



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 2, pp.: 78-91  
2022

DOI:

10.22034/jssta.2022.365155.1092

### Article Info

Received: 2022-10-10  
Accepted: 2022-11-7

### Keywords

Internal ballistics, Vacuum stand diffuser, Numerical simulation, Unsteady flow

### How to Cite this article

Nematollah Fouladi, Alireza Mohammadi, "Numerical Evaluation of a Test Bed of an Orbital Transmission Engine in an Initial Vacuum Condition", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 2 (2), p.: 78-91, 2023.

## Numerical Evaluation of a Test Bed of an Orbital Transmission Engine in an Initial Vacuum Condition

Nematollah Fouladi <sup>\*,1</sup>, Alireza Mohammadi <sup>2</sup>

1,\*. Assistant Professor, Space Transportation Research Institute, Tehran, Iran, n.fouladi@isrc.ac.ir,  
(Corresponding author)

2. PhD, Space Transportation Research Institute, Tehran, Iran, mohama\_a@yahoo.com

### Abstract

The purpose of this research is to evaluate a ground test bed of an orbital transmission engine with pre-evacuation of the engine's internal space. In the usual tests on the ground, the initial pressure of the engine is atmospheric pressure. While during the orbital mission, the internal space of the engine may be in the vacuum pressure. Therefore, to ensure the proper performance of internal ballistics, it is necessary to test the performance by pre-evacuating its internal space. In this research, first, the suitability of an exhaust diffuser for this type of test is investigated numerically. Then, the unsteady numerical simulations have been done by applying the pressure-time profiles of the engine as the boundary condition of the inlet pressure. Investigations show that the two phenomena of flow being supersonic in the diffuser at very low engine pressures and the discharge of the return flow to the vacuum chamber prevent the significant influence of environmental conditions on the flow inside the nozzle. So, from the initial moment to the stable working of the diffuser, the flow in the first half of the nozzle is in the supersonic state. Therefore, the internal ballistics of the engine is evaluated independently of the conditions of the outside environment.



## ارزیابی عددی بستر آزمون یک موتور انتقال مداری در شرایط اولیه خلاء

نعمت اله فولادی<sup>۱\*</sup>، علیرضا محمدی<sup>۲</sup>

دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

۱.\*: استادیار، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، تهران، ایران n.fouladi@isrc.ac.ir  
(نویسنده مسئول)  
۲. دکترا، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، تهران، ایران mohama\_a@yahoo.com

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۲، صفحه ۹۱-۷۸  
پاییز و زمستان ۱۴۰۱

DOI:  
10.22034/jsssta.2022.365155.1092

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶

واژه‌های کلیدی

بالتستیک داخلی، دیفیوزر استند  
خلأ، شبیه‌سازی عددی، جریان ناپایا

نحوه استناد به این مقاله

نعمت اله فولادی، علیرضا محمدی. "ارزیابی عددی بستر آزمون یک موتور انتقال مداری در شرایط اولیه خلاء"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد دوم، شماره دوم، صفحات ۹۱-۷۸، ۱۴۰۱.

### چکیده

هدف از این تحقیق، ارزیابی بستر آزمون یک موتور انتقال مداری در حالت اولیه فشار پایین (خلأ نسبی) فضای داخلی موتور است. در تست‌های زمینی معمول موتور در محیط شبیه‌ساز ارتفاع بالا، فضای داخلی موتور در حالت اولیه فشار اتمسفر محلی قرار دارد. در حالی که، در زمان ماموریت مداری ممکن است شرایط اولیه خلاء در فضای داخلی موتور برقرار باشد. بنابراین، برای اطمینان از عملکرد مناسب بالتستیک داخلی، لازم است که عملکرد موتور با پیش‌خلأسازی فضای داخلی آن تست شود. برای این منظور، ابتدا با بررسی تئوری، مناسب بودن هندسه یک دیفیوزر خروجی گاز مافوق صوت برای این نوع تست مطرح شده، سپس، از شبیه‌سازی عددی جریان برای بررسی طرح استفاده شده است. شبیه‌سازی عددی غیردائم با اعمال پروفیل‌های فشار-زمان موتور به عنوان شرط مرزی ورودی انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دو پدیده مافوق صوت شدن جریان در دیفیوزر در فشارهای موتور خیلی پایین و تخلیه جریان برگشتی به محفظه خلاء، مانع از تاثیرگذاری قابل توجه شرایط محیطی در جریان داخل نازل می‌شود، به طوری که از لحظه اولیه شروع به کار موتور تا راه‌اندازی پایدار دیفیوزر، جریان در نیمه اولیه نازل در حالت مافوق صوت قرار دارد. بنابراین، بالتستیک داخلی موتور مستقل از شرایط محیط بیرون ارزیابی می‌شود.

## ۱- مقدمه

غالباً پیش از ساخت نمونه پروازی و مرحله پرتاب ماهواره بر باید از صحت عملکرد زیرسیستم پیشرانش آن اطمینان حاصل شود. بنابراین، لازم است موتورهای مرحله بالای زیرسیستم پیشرانش در سطح زمین تحت تست عملکردی قرار گیرد. چنانچه این موتورها که غالباً مجهز به نازل با نسبت انبساط بالا هستند در محیط اتمسفر تست شوند، جریان کامل درون نازل آنها برقرار نشده و جریان از دیواره نازل جدا شده و مقدار تراست نازل به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. راهکار ارزیابی صحیح مشخصات عملکردی موتور مرحله بالا، استفاده از شبیه‌ساز ارتفاع بالا با به‌کارگیری یک دیفیوزر خروجی گاز مافوق صوت است [۱] و [۲]. در شکل ۱، شماتیکی از هسته مرکزی شبیه‌ساز ارتفاع بالا نوع دیفیوزر گلوگاه ثانویه نشان داده شده است. در این تجهیز، توسط هد دینامیکی گازهای احتراقی، طی یک پروسه انبساط گازها و تشکیل قطاری از موج‌های ضربه‌ای، شرایط خلاء به طور خودکار در اطراف نازل ایجاد شده و این گازها به محیط بیرون پمپ می‌شود.



شکل ۱. شماتیک هسته مرکزی بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا [۱]

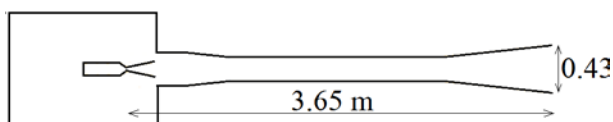
یکی از فعالیت‌های تعریف شده برای بررسی کیفی عملکرد یک موتور انتقال مداری، بررسی اثر شرایط خلاء اولیه بر بالستیک داخلی موتور و عملکرد چاشنی آن است. در این بررسی، برخلاف تست‌های معمول که نازل موتور مجهز به درپوش بوده است و فضای داخل موتور در لحظه اولیه در فشار اتمسفر محلی قرار دارد؛ خلاء اولیه توسط پمپ خلاء در داخل موتور و اطراف آن ایجاد می‌شود. تست موتور در این شرایط انجام شده و عملکرد بالستیک موتور و چاشنی‌ها در لحظه روشن شدن موتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحقیق، معیار ارزیابی مطلوب بودن منحنی فشار- زمان موتور است. در عمل، برای انجام این تست یک محیط خیلی بزرگ در اطراف موتور باید ایزوله و پیش خلاء‌سازی شده باشد،

که غالباً برای موتورهای بزرگ (با دبی جرمی بالا) کار مشکلی بوده و مقرون به‌صرفه نیست. در صنایع فضایی کشورهای مطرح در حوزه فضا، در تست فاز روشن شدن موتور غالباً از اجکتور سیال ثانویه برای ایجاد مکش جریان و پایین نگه داشتن فشار در خروجی نازل استفاده می‌شود [۳]. اجکتورهای سیال ثانویه به طور عمده با دبی بخار آب چندین برابر دبی گازهای احتراقی (حدود ۸ برابر)، نیاز به راه‌اندازی تجهیزات سنگین و پرهزینه تولید و ذخیره‌سازی بخار آب هستند [۴]. متأسفانه در کشور ما هنوز این فناوری توسعه نیافته است.

در این فعالیت امکان استفاده از دیفیوزر خروجی گاز مافوق صوت برای انجام این نوع تست یک موتور انتقال مداری با رویکرد شبیه‌سازی عددی جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این صورت که مطابق شکل ۱، یک دیفیوزر طولی در امتداد نازل موتور قرار می‌گیرد و نواحی اطراف موتور توسط یک محفظه موسوم به محفظه تست یا محفظه خلاء احاطه می‌شود و یک دیافراگم در انتهای دیفیوزر قرار داده می‌شود. سپس، فضای داخلی سیستم (موتور، نازل، محفظه خلاء و دیفیوزر) توسط یک پمپ خلاء، پیش خلاء-سازی می‌شود. ایده اولیه در پیشنهاد این سیستم این است که با توجه به خلاء اولیه در حین روشن شدن موتور و در فشارهای خیلی پایین احتراق، جریان مافوق صوت در نازل و بخشی از طول دیفیوزر شکل می‌گیرد. این امر باعث تاخیر زمانی قابل توجهی برای انعکاس و برگشت امواج اغتشاشی به سمت نازل می‌شود، تا اینکه فشار موتور در این فاصله زمانی افزایش یافته و قادر به مقابله با امواج برگشتی و اغتشاشات بیرونی می‌شود، به طوری که در فاز روشن شدن موتور، امواج برگشتی یا اغتشاشی قادر به عبور از گلوگاه نازل و تاثیرگذاری در بالستیک داخلی موتور نمی‌شود. قابل ذکر است که این فعالیت بر اساس نیاز به تست کیفی یک موتور انتقال مداری در داخل کشور تعریف شده است و تاکنون تحقیق مشابهی در مراجع ارائه نشده است.

هدف این فعالیت، بررسی مناسب بودن بستر تست (دیفیوزر خروجی مافوق صوت) برای انجام تست زمینی موتور در شرایط خلاء است. برای این منظور، اثبات عدم تاثیرگذاری اغتشاشات محیط بیرون بر بالستیک داخلی موتور ضروری است. در این تحقیق از منحنی فشار- زمان واقعی موتور که در تست با شرایط غیر خلاء به دست آمده است، استفاده می‌شود. تحلیل عددی

نمونه کیفی موتور انتقال مداری آرش ۲۰ (با نازل طول بلند) مورد استفاده قرار گرفته است. در تست مزبور، در لحظه شروع به روشن شدن موتور مطابق معمول فضای خالی داخلی موتور در فشار اتمسفر محلی قرار داشته است. هم‌چنین، نازل مجهز به یک درپوش داخلی بوده که بعد از گلوگاه آن قرار می‌گیرد. این درپوش در فشارهای بالاتر از ۱۰ بار به محیط بیرون پرتاب می‌شود. در مسئله حاضر نازل بدون درپوش است. ابتدا فشار خلاء در حدود ۰/۰۲ بار در داخل فضای خالی موتور، نازل، دیفیوزر و محفظه خلاء، توسط پمپ خلاء ایجاد شده، سپس موتور روشن می‌شود. در شکل ۲ شماتیکی از موتور، نازل، دیفیوزر و محفظه خلاء در تست مورد نظر نمایش داده شده است. قطر خروجی دیفیوزر برابر ۰/۴۳ متر و فاصله طولی گلوگاه نازل تا انتهای دیفیوزر برابر ۳/۶۵ متر است.



شکل ۲. دیفیوزر و نازل در تست مورد نظر

در این بخش یک برآورد اولیه در خصوص کیفیت هندسه پیش‌خلاء اولیه برای انجام این تست ارائه می‌شود. در بخش بعدی با شبیه‌سازی عددی جریان، موضوع با دقت بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

دمای احتراق موتور در حدود ۳۵۰۰ کلوین بوده و نسبت ظرفیت گرمایی ویژه گازهای احتراقی در حدود ۱/۲ است. البته در عمل با انبساط گازهای احتراقی در ورودی دیفیوزر، دمای استاتیک کاهش می‌یابد. سرعت صوت به عنوان معیاری از سرعت پیش‌روی اغتشاشات از رابطه زیر قابل استخراج است:

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (1)$$

بالستیک داخلی موتور خارج از اسکوپ تحقیق حاضر است. در واقع تحلیل عددی بالستیک داخلی موتور سوخت جامد با پیچیدگی زیادی همراه است و در عمل استفاده از منحنی فشار-زمان حاصل از تست واقعی دقت بیشتری در این نوع بررسی دارد. در ادامه در بخش ۲، با انتخاب دیفیوزر مناسب، بررسی‌های تئوری لازم ارائه شده است. در بخش ۳، روش عددی و اعتبارسنجی بیان شده و در بخش ۴، نتایج و بحث ارائه شده است. ابتدا در زیر بخش ۴-۱، مناسب بودن دیفیوزر برای کارکرد پایای تست خلاء موتور مورد بررسی قرار گرفته است. سپس در زیربخش ۴-۲، با شبیه‌سازی غیردائم و لحاظ کردن پروفیل فشار-زمان اصلی موتور، امکان‌سنجی ارزیابی تاثیر پیش‌خلاء‌سازی در بالستیک داخلی بررسی شده است. هم‌چنین، در بخش ۴-۳، شبیه‌سازی جریان ناپا با ضریب ۰/۷ برابر پروفیل فشار-زمان موتور برای اثبات مناسب بودن بستر تست در صورت اثرگذاری پیش‌خلاء‌سازی بر بالستیک داخلی موتور ارائه شده است. در پایان در بخش ۵، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی تحقیق ارائه شده است.

## ۲- تعریف مسئله و بررسی اولیه

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، در این تحقیق، از دیفیوزر خروجی گاز مافوق صوت برای ارزیابی عملکرد موتور با پیش‌خلاء‌سازی فضای داخلی آن استفاده می‌شود. با توجه به پیش‌خلاء شدن فضای داخل موتور، فضای داخل دیفیوزر و محفظه خلاء، در لحظات اولیه روشن شدن موتور (در فشارهای بسیار پایین)، گلوگاه نازل در حالت خفگی قرار خواهد گرفت. بنابراین، اغتشاشات بیرونی نمی‌تواند از گلوگاه نازل به داخل موتور نفوذ کند. هم‌چنین، به دلیل گستردگی دیفیوزر در بعد طولی، جریان مافوق صوت اولیه در فشارهای بسیار پایین (در آن لحظات) در طول دیفیوزر به طور موقت شکل می‌گیرد. این موضوع می‌تواند باعث تاخیر زمانی در رسیدن اغتشاش پایین دست به سمت نازل و موتور باشد، به طوری که زمان کافی برای ارزیابی اثر پیش‌خلاء‌سازی در عملکرد چاشنی‌ها بدون دخالت اغتشاشات محیطی فراهم شود.

در این تحقیق، از یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه مطابق شکل ۲ استفاده می‌شود. این دیفیوزر از نوع گلوگاه ثانیه است که به روش موج ضربه‌ای قائم طراحی شده و در سال ۱۳۹۸، در تست زمینی

برای لحاظ کردن این موضوع، در این تحقیق یک احتمال نسبتاً بد نیز در نظر گرفته شده است. به این معنی که فرض شده است که در اثر اختلال در عملکرد چاشنی در اثر فشار خلاء، در یک ثانیه اول نرخ افزایش فشار موتور به طور محسوسی در حدود ۳۰ درصد کاهش یابد. به عبارت دیگر، منحنی فشار-زمان اصلی موتور در عدد ۰/۷ ضرب شود. در این تحقیق، با این فرض نیز شبیه‌سازی غیردائم جریان به منظور ارزیابی احتمال تاثیرگذاری شرایط محیطی تست بر بالستیک داخلی موتور انجام می‌شود.

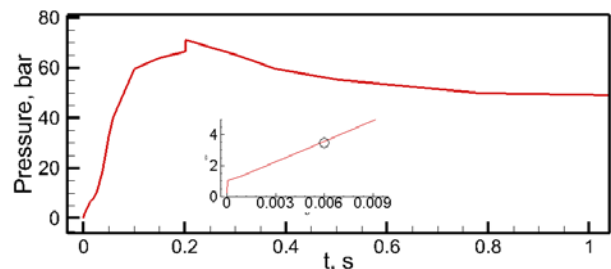
قابل ذکر است که در بستر تست پیشنهاد شده هرچه نرخ افزایش فشار موتور کمتر باشد، زمان رسیدن به شرایط راه‌اندازی (ما فوق صوت شدن دیفیوزر) افزایش می‌یابد و در نتیجه نفوذ اغتشاشات محیطی به بالا دست (به سمت موتور) بیشتر می‌شود. روند تحقیق برای پاسخ دادن به این سوال شروع شده است: آیا با منحنی فشار-زمان واقعی (در تست بدون خلاء)، عملکرد بستر تست (با دیفیوزر) مانع از دخالت اغتشاشات در بالستیک داخلی موتور می‌شود؟ در ادامه، با توجه به رابطه عکس زمان رسیدن به حالت راه‌اندازی دیفیوزر با نرخ افزایش فشار موتور، فرض بر این است که در بدترین حالت ۳۰ درصد نرخ افزایش فشار موتور (به خاطر پیش خلاء سازی) افت پیدا کند. آیا در بدترین شرایط فرضی هم بستر تست خلاء برای انجام تست مناسب است؟

### ۳- روش شبیه‌سازی عددی جریان

#### ۳-۱- حلگر عددی و مدل توربولانسی

در این تحقیق، با توجه به جریان سرعت بالا در نازل و دیفیوزر از حلگر چگالی مبنا استفاده شده است. با توجه به تقارن هندسی مدل، تقارن موجود در فیزیک جریان و همچنین صرفه‌جویی در هزینه محاسباتی از حل در مختصات متقارن محوری استفاده شده است. بنابراین، معادلات حاکم بر جریان، معادلات ناویر-استوکس<sup>۱</sup> به صورت تراکم‌پذیر، ناپایا و تقارن محوری است. برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار انسیس فلوئنت<sup>۲</sup> (ورژن R2 2020) استفاده شده است. با توجه به اینکه در این مسئله اندرکنش قوی مابین موج ضربه‌ای جریان و لایه مرزی دیواره نازل و دیفیوزر

که در آن نسبت ظرفیت گرمایی ویژه و  $R$  ثابت گازها است که برای سیال مورد نظر  $\gamma=1.2$  و  $R=297 \text{ J/(kg.K)}$  است. با در نظر گرفتن بدترین حالت (یعنی  $T=3500 \text{ K}$ ) که منجر به سرعت صوت (یا سرعت انتشار اغتشاشات) بیشتر در جریان گازهای احتراقی می‌شود و با توجه به فاصله ۳/۶۵ متری گلوگاه نازل تا انتهای دیفیوزر (محل مانع یا دیپوش فلزی دیفیوزر در شکل ۲)، جریان بعد از ۰/۰۳۲۵ ثانیه به مانع برخورد می‌کند و اثرات انعکاسی آن بعد از سپری شدن دو برابر این زمان یعنی ۰/۰۶۵ ثانیه به گلوگاه نازل می‌رسد. منحنی فشار-زمان موتور تا یک ثانیه اول در شکل ۲ نمایش داده شده است [۵]. مطابق شکل ۳، در لحظه ۰/۰۰۶ ثانیه فشار موتور ۳/۵ بار است و در این فشار با فرض فشار محیط نازل برابر ۱ بار، گلوگاه در حالت خفگی به سر می‌برد (نسبت فشاری که در آن جریان در گلوبی نازل به حالت خفگی می‌رسد برابر ۲/۷ است). بنابراین، اغتشاشات قادر به عبور از گلوگاه نازل نخواهد بود.



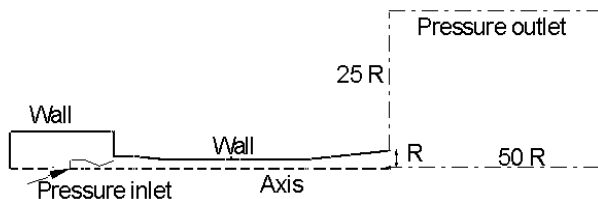
شکل ۳. منحنی فشار- زمان اصلی موتور تا یک ثانیه [۵]

البته نتایج فوق وقتی قابل اتکا است که اولاً بپذیریم که منحنی فشار - زمان موتور تحت پیش خلاء‌سازی فضای داخلی موتور تغییری با حالت تست بدون پیش خلاء نخواهد داشت. دوم اینکه جریان در لحظه اولیه در امتداد دیفیوزر انبساط ما فوق صوت داشته باشد. در غیر این صورت، دیواره‌های دیفیوزر نزدیک به نازل هم قادر به تولید امواج برگشتی به داخل نازل خواهد بود. برای مطمئن شدن از این امر، شبیه‌سازی عددی جریان غیردائم با پروفیل فشار- زمان موتور انجام می‌شود. با این حال، این احتمال وجود دارد که پیش خلاء‌سازی فضای داخلی موتور بر عملکرد چاشنی و در نتیجه پروفیل فشار- زمان اولیه موتور تاثیر بگذارد.

(ناحیه دوردست) با ابعاد بزرگ در انتهای دیفیوزر در نظر گرفته شده است. انجام تحلیل‌های جریان ناپایا برای این مسئله بدون در نظر گرفتن ناحیه دوردست، خطای فاحشی را در شبیه‌سازی عددی جریان وارد می‌کند. بنابراین، ناحیه دوردست برای این مسئله باید تا حد امکان بزرگ در نظر گرفته شود [۹].

در این تحقیق، شرط مرزی ورودی فشار در سطح ورودی نازل، شرط مرزی خروجی فشار در مرزهای خروجی ناحیه دوردست در نظر گرفته شده است. شرط مرزی، عدم لغزش جریان و آدیاباتیک<sup>۳</sup> برای تمامی سطوح دیواره اعمال شده است. دمای سکون در ورودی برابر با ۳۴۰۰ کلوین است. در حل غیردائم، جریان از پروفیل فشار-زمان موتور (شکل ۳) به عنوان فشار ورودی برحسب زمان استفاده می‌شود. همچنین در مرزهای ناحیه دوردست فشار اتمسفر محلی ۰/۸۸۶ بار و دمای ۳۰۰ کلوین اعمال می‌شود.

در شکل ۵، نمایی از شبکه محاسباتی بی‌سازمان با امان‌های مثلثی ارائه شده است. به منظور جلوگیری از ایجاد خطا در تحلیل ناپلیا، محیط خارج دیفیوزر (ناحیه دور دست) به اندازه کافی بزرگ (50 R) در نظر گرفته شده که در آن شعاع سطح خروجی دیفیوزر است. با توجه به مطالعه استقلال حل از شبکه محاسباتی انجام شده در تحقیقات گذشته [۱۰ و ۱۱]، اندازه شبکه مورد استفاده در این پژوهش در حدود ۹۰۰۰۰ سلول محاسباتی است. همچنین، از مش لایه مرزی با فاصله اولین گره با دیواره برابر ۰/۰۲ میلی‌متر بر روی دیواره دیفیوزر استفاده شده است به طوری که  $y^+$  جریان در حین حل در محدوده زیر ۵ قرار دارد که مناسب با مدل توربولانسی مورد استفاده است.



شکل ۴. شرایط مرزی برای حل جریان غیردائم

وجود دارد، جدایش جریان از دیواره‌ها در برخی نواحی نازل و دیفیوزر اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، مدل آشفتگی مورد استفاده باید برای تخمین محل جدایش جریان مناسب باشد. در این پژوهش، از مدل آشفتگی  $k-\omega$  عمومی شده (GEKO: generalized  $k-\omega$ ) استفاده شده است. منتر<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ با هدف بهبود پیش‌بینی اغتشاشات جریان، مدل GEKO را ارائه کردند [۶ و ۷]. این مدل دو معادله‌ای مبتنی بر مدل  $k-\omega$  بوده، اما دارای انعطاف‌پذیری بالا برای تنظیم مدل برای طیف گسترده‌ای از جریان‌ها است. مناسب بودن این مدل برای این نوع جریان توسط فولادی و همکاران در سال ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. مطابق جدول ۱، مشخصات روش عددی مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات روش عددی

ردیف	توضیحات
هندسی و حل مدل	دو بعدی تقارن محوری
معادله حالت	گاز ایده‌آل کامل
نوع حلگر	چگالی-مینا
حالت جریان	وابسته به زمان
مدل توربولانسی	Menter's GEKO
روش تخمین شار	Roe-FDS
روش تخمین گرادیان	حداقل مربعات سلول-مینا
گسسته‌سازی معادلات جریان	مرتبه دوم
گسسته‌سازی انرژی جنبشی توربولانس	مرتبه دو بالادست
گسسته‌سازی نرخ اتلاف مخصوص	مرتبه دو بالادست
شبکه محاسباتی	مثلثی بی‌سازمان
فرمولاسیون زمانی	مرتبه دوم ضمنی
عدد کورانت	0.5
گام زمانی	5.0e-7 - 1.0e-6 (Sec)

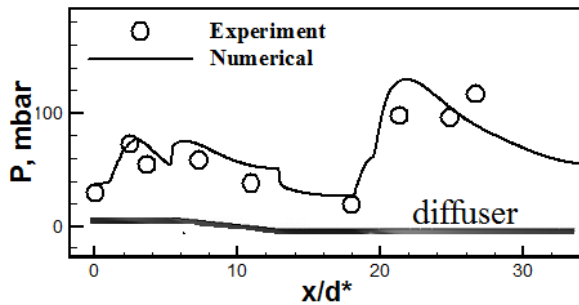
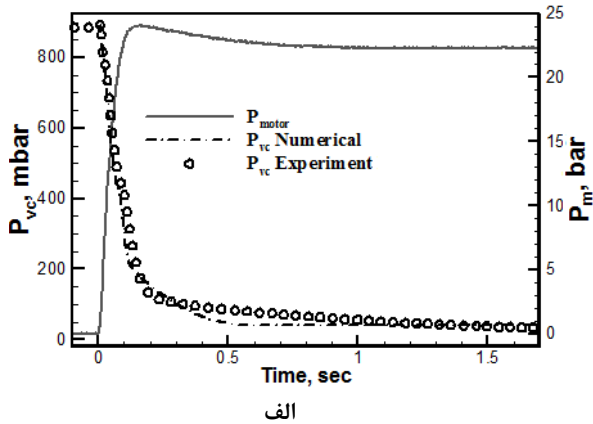
### ۳-۲- شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

دامنه محاسباتی و شرایط مرزی در تحلیل‌های عددی در شکل ۴ نمایش داده شده است. دامنه محاسباتی از نواحی نازل، محفظه خلاء، دیفیوزر گلوگاه ثانویه و ناحیه دوردست تشکیل شده است. به دلیل ناپایا بودن تحلیل‌های عددی، یک ناحیه محاسباتی اضافی

3 Adiabatic

1 Menter  
2 Courant





ب

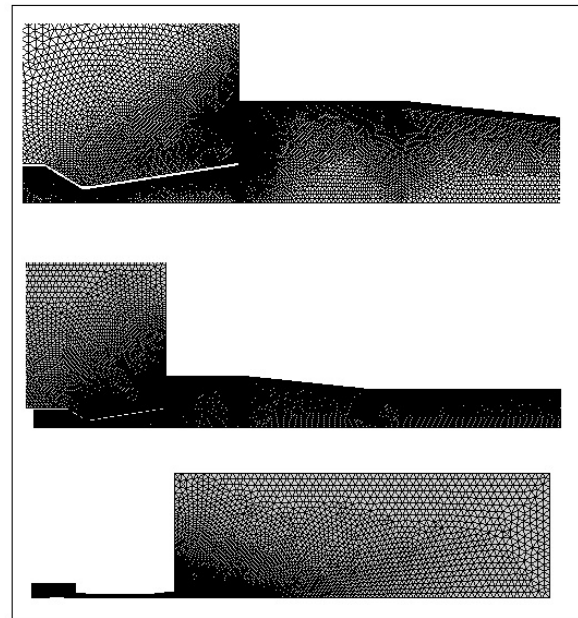
شکل ۶. مقایسه نتایج تجربی و عددی (الف) نمودار فشار محفظه خلاء ( $P_{vc}$ ) و فشار موتور ( $P_m$ ) بر حسب زمان، (ب) نمودار فشار استاتیک ( $p$ ) دیواره دیفیوزر در لحظه یک ثانیه

#### ۴- یافته‌ها

در این بخش، ابتدا مناسب بودن دیفیوزر برای کارکرد پایای تست خلاء موتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با شبیه‌سازی غیردائم و لحاظ کردن پروفیل فشار- زمان اصلی موتور، امکان‌سنجی ارزیابی تاثیر پیش‌خلاء‌سازی در بالستیک داخلی موتور بررسی می‌شود. در پایان، شبیه‌سازی جریان ناپایا با ضریب  $0.7$  برابر پروفیل فشار- زمان موتور برای اثبات مناسب بودن بستر تست در صورت اثرگذاری پیش‌خلاء‌سازی بر بالستیک داخلی موتور ارائه می‌شود.

#### ۴-۱- تحلیل جریان پایا

نتایج این بخش، صرفاً بررسی عملکرد دیفیوزر است. در واقع به این سوال پاسخ داده می‌شود که آیا با فشار احتراق موتور، دیفیوزر در شرایط راه‌اندازی پایدار قرار می‌گیرد؟ هر چند موضوع



شکل ۵. شبکه محاسباتی برای حل جریان غیردائم

#### ۳-۲- بررسی صحت شبیه‌سازی عددی

به منظور اطمینان از صحت نتایج عددی، یکی از تست‌های دیفیوزر و نازل مربوط به موتور انتقال مداری که در بستر تست گاز سرد انجام شده بود با روش عددی مورد نظر این تحقیق شبیه‌سازی شده و نتایج در این قسمت با یکدیگر مقایسه شده است. اطلاعات تست تجربی توسط فولادی و همکاران در مرجع [۱۲] ارائه شده است. در شکل ۶-الف، فشار محفظه خلاء ( $P_{vc}$ ) حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی بر حسب زمان مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که نتایج عددی از دقت مناسبی برای پیش‌بینی روند ایجاد خلاء برخوردار است. همچنین، در شکل ۶-ب توزیع فشار استاتیک ( $p$ ) دیواره دیفیوزر حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در حالت راه‌اندازی شده (در ثانیه یکم) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که فشار دیواره پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی در ورودی، رمپ و اواسط گلوگاه ثانویه با دقت مناسبی محاسبه شده است.

مایلی هستند که به سمت دیواره‌های دیفیوزر امتداد یافته و با لایه مرزی این دیواره‌ها تداخل ایجاد می‌کنند. این فرآیند چندین بار در طول دیفیوزر اتفاق می‌افتد تا اینکه سرعت جریان در انتهای دیفیوزر مادون صوت می‌شود. در بخش انتهایی دیفیوزر جریان سیال در قسمت اعظم سطح خروجی دیفیوزر مادون صوت شده است. هم‌چنین، در شکل ۹ تغییرات عدد ماخ جریان در محور مرکزی دیفیوزر نمایش داده است. مطابق شکل مزبور، جریان ابتدا منبسط شده و با موج ضربه‌ای مایل در ناحیه ورودی دیفیوزر وارد ناحیه رمپ می‌شود. در این حالت، جریان سیال در ورودی گلوگاه ثانویه مافوق صوت بوده و با شکل‌گیری پی‌درپی موج‌های ضربه‌ای جریان در طول دیفیوزر، عدد ماخ جریان با نوسانات شدیدی در طول دیفیوزر همراه است. از شکل مزبور مشخص است که عدد ماخ جریان در محور طولی دیفیوزر در چندین نقطه به صورت محلی کاهش پله‌ای را تجربه کرده است، به طوری که از مقدار بالای ۵ در ورودی دیفیوزر تا مقداری نزدیک به ۱ در انتهای دیفیوزر کاهش یافته است.

کانتور فشار استاتیک جریان در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. مطابق شکل، فشار استاتیک در طول دیفیوزر از مقدار خیلی پایین (فشار خلاء) تا حدود  $0/88$  بار (فشار اتمسفر محلی) در خروجی دیفیوزر تغییر کرده است. این بازیافت فشار توسط قطاری از موج‌های ضربه‌ای جریان در طول لوله دیفیوزر اتفاق افتاده است. در این کانتورها انبساط جت سیال در دهانه محفظه خلاء قبل از موج ضربه‌ای مایل باعث ایجاد مکش سیال داخل محفظه تست شده و در شرایط پایای جریان، فشار داخل محفظه تست با فشار جت سیال به تعادل رسیده است. در این تست، فشار استاتیک محفظه خلاء در حدود  $0/5$  بار است. منحنی فشار استاتیک (P) در طول بدنه دیفیوزر در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. این منحنی بیانگر کیفیت تراکم سیال در طول دیفیوزر است. غالباً در تست‌های تجربی این منحنی‌ها با نصب سنسورهای فشار در طول دیفیوزر به دست می‌آیند. مطابق شکل، افزایش فشار در طول دیفیوزر روند تدریجی قابل قبولی داشته و با منحنی‌های متعارف ارائه شده در مراجع برای این نوع دیفیوزرها هم‌خوانی دارد [۱۳ و ۱۴].

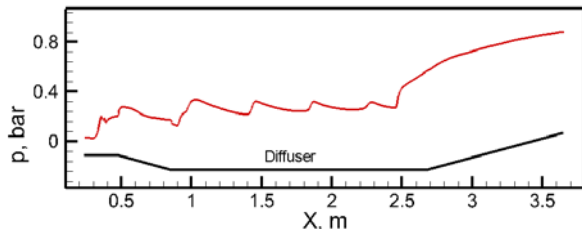
تحقیق بررسی عدم تاثیرپذیری بالستیک موتور از شرایط محیطی است ولی در تست اصلی لازم است که دیفیوزر در حدود چندین ثانیه در حالت کارکرد مافوق صوت و پایدار قرار داشته باشد، به طوری که فشار پایین لازم در اطراف موتور و نازل ایجاد و حفظ شود.

مطابق منحنی فشار- زمان موتور مورد نظر در شکل ۳، تا حدود یک ثانیه، فشار محفظه احتراق بالاتر از ۴۰ بار است. در ادامه این زیربخش نتایج تحلیل عددی و عملکرد دیفیوزر با فشار ورودی نازل برابر ۴۰ بار به صورت پایا ارائه می‌شود.

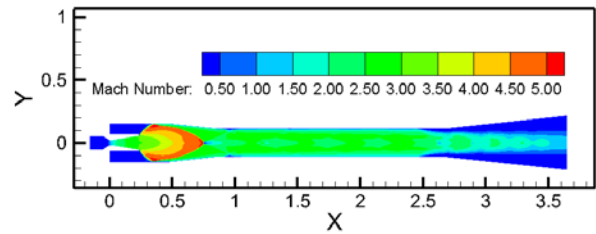
با توجه به پایا بودن حل عددی و عدم تاثیر حجم محفظه خلاء در نتایج و به منظور کاهش حجم محاسبات، حجم محفظه خلاء به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده شده است. هم‌چنین، وجود ناحیه دوردست در این نوع حل ضروری نیست. بنابراین، ناحیه دوردست نیز در حل جریان پایا حذف شده است. در حل پایای جریان در دیفیوزر مافوق صوت، هر چه شرایط اولیه به جواب نهایی نزدیک‌تر باشد، تحلیل مسئله زودتر هم‌گرا می‌شود. بنابراین، به‌منظور تسریع در حل پایا، از توزیع فشار آیزنتروپیک<sup>۱</sup> در طول نازل و توزیع فشار خطی در طول دیفیوزر و فشار ثابت با مقدار خیلی کوچک (نزدیک به شرایط خلاء) در محفظه خلاء به‌عنوان شرایط اولیه استفاده شده است. شبیه‌سازی عددی جریان مطابق با اطلاعات جدول ۱ در شرایط پایا انجام شده است.

در شکل‌های ۷ و ۸، کانتورهای عدد ماخ و شوک جریان نمایش داده شده است. مطابق شکل ۷ در ورودی دیفیوزر جریان مافوق صوت برقرار شده است. این امر به معنی قرار داشتن دیفیوزر در حالت راه‌اندازی است. عدد ماخ جریان در سطح خروجی نازل در حدود ۳ بوده و سیال بعد از خروج از نازل انبساط بیش‌تری پیدا کرده و دهانه ورودی دیفیوزر را پر کرده است. بیش‌ترین عدد ماخ در میدان جریان کمی بیشتر از ۵ است و در نواحی مرکزی دیفیوزر بعد از ورودی اتفاق افتاده است. برخورد جت سیال به دهانه ورودی دیفیوزر باعث ایجاد موج‌های ضربه‌ای مایل شده است (شکل ۸). موج‌های ضربه‌ای مایل در قسمت محوری با همدیگر تداخل می‌کنند و حاصل تداخل آنها موج‌های ضربه‌ای

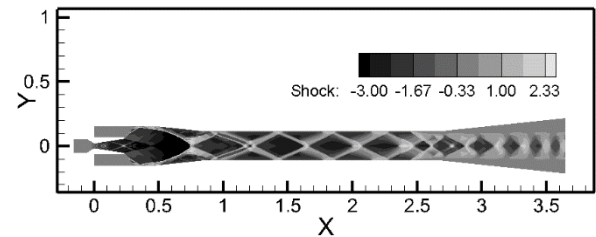




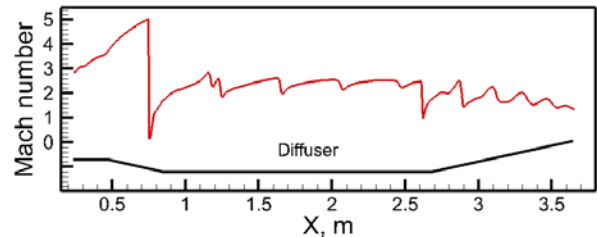
شکل ۱۱. توزیع فشار استاتیک (p) در طول دیفیوزر، جریان دائم، فشار موتور ۴۰ بار



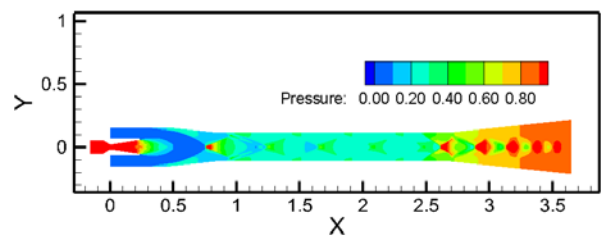
شکل ۷. کانتور عدد ماخ در نازل و دیفیوزر، جریان دائم، فشار موتور ۴۰ بار



شکل ۸. کانتور شوک جریان در نازل و دیفیوزر، جریان دائم، فشار موتور ۴۰ بار



شکل ۹. منحنی عدد ماخ جریان در محور مرکزی دیفیوزر، جریان دائم، فشار موتور ۴۰ بار



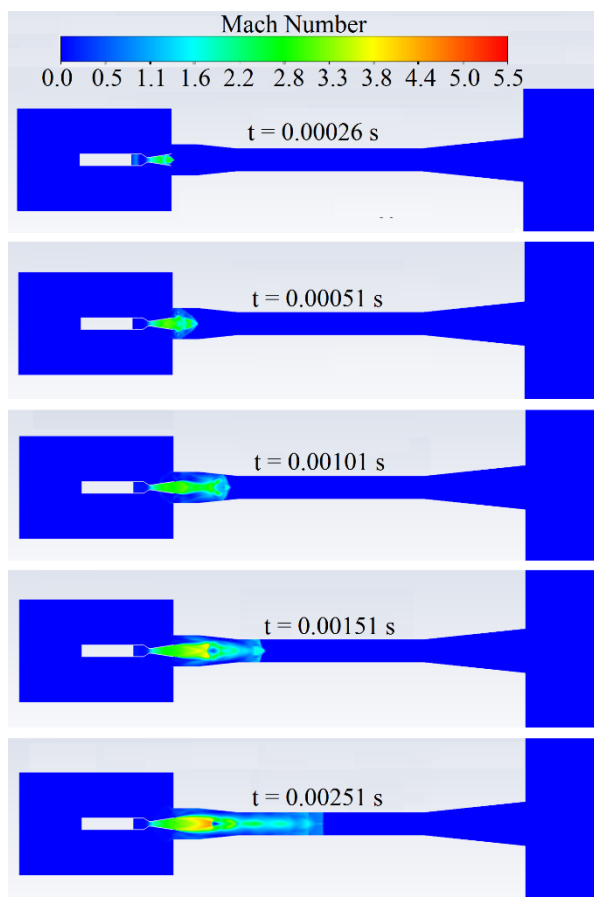
شکل ۱۰. کانتور فشار استاتیک جریان در نازل و دیفیوزر، جریان دائم، فشار موتور ۴۰ بار

## ۲-۴- تحلیل جریان ناپایا با منحنی فشار-زمان موتور

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی فریند راه‌اندازی دیفیوزر ارائه می‌شود. هدف این بررسی، اثبات عدم اثرگذاری شرایط تست محیطی (حضور دیفیوزر) بر بالستیک داخلی موتور است. به عبارتی دیگر به این سوال پاسخ داده می‌شود که با فرض عدم اثرگذاری پیش خلاء‌سازی فضای داخلی موتور در منحنی فشار-زمان موتور، آیا شرایط محیطی (حضور بدنه دیفیوزر و فشار محیط) بر دینامیک جریان در نازل اثرگذار خواهد بود؟ در عمل برای اثبات عدم اثرگذاری شرایط محیطی، کافی است که از لحظه شروع احتراق تا لحظه راه‌اندازی پایدار دیفیوزر، گلوگاه نازل پیوسته در حالت خفگی (عدد ماخ جریان برابر ۱) قرار داشته باشد. در این صورت، اغشاشات پایین دست (محیط اطراف) قادر به عبور از گلوگاه نازل و تاثیرگذاری روی بالستیک داخلی موتور نخواهد بود.

برای بررسی این موضوع، پروفیل فشار زمان محفظه موتور (شکل ۳) به عنوان فشار ورودی به میدان جریان اعمال شده است. از شبکه محاسباتی ارائه شده در شکل ۵ و روش عددی مطابق با اطلاعات جدول ۱ استفاده شده است. پیش خلاء‌سازی میدان جریان با مسدود کردن انتهای دیفیوزر (شرط دیواره در سطح خروجی نازل) و مقداردهی اولیه فشار استاتیک برابر با ۰/۰۲ بار (این میزان فشار خلاء با توجه به امکانات موجود در اجرای تست اصلی در نظر گرفته شده است) در نواحی داخلی نازل، محفظه خلاء و دیفیوزر انجام شده است. در ناحیه دور دست جریان (خارج از دیفیوزر) فشار اولیه میدان جریان برابر با فشار اتمسفر محلی (۰/۸۸ بار) قرار داده شده است. شرط از بین رفتن دیواره در انتهای دیفیوزر، رسیدن فشار میانگین سطحی در سطح مانع (سمت

بوده و رفته رفته قدرت آنها افزایش می‌یابد. با این وجود، این امواج قادر به عبور از ناحیه مافوق صوت شکل گرفته در نواحی ورودی دیفیوزر نیستند. از طرفی با افزایش زمان، فشار احتراق موتور هم در حال افزایش بوده و این امر باعث گسترده‌تری جریان در قسمت‌های میانی دیفیوزر می‌شود، به طوری که در لحظه  $0/00876$  ثانیه جریان در قسمت ورودی و هم‌گرایی به حالت مافوق صوت رسیده است. این دو عامل در تقابل با هم عمل کرده و در نهایت مطابق با شکل ۱۴، امواج تراکمی برگشتی در اثر حضور مانع غالب شده و در لحظه  $0/01551$  ثانیه جریان مافوق صوت شکل گرفته در قسمت‌های ورودی گلوگاه ثانویه و هم‌گرایی دیفیوزر مادون صوت می‌شود.



شکل ۱۲. کانتور عدد ماخ جریان از لحظه  $0/00026$  تا  $0/00251$  ثانیه

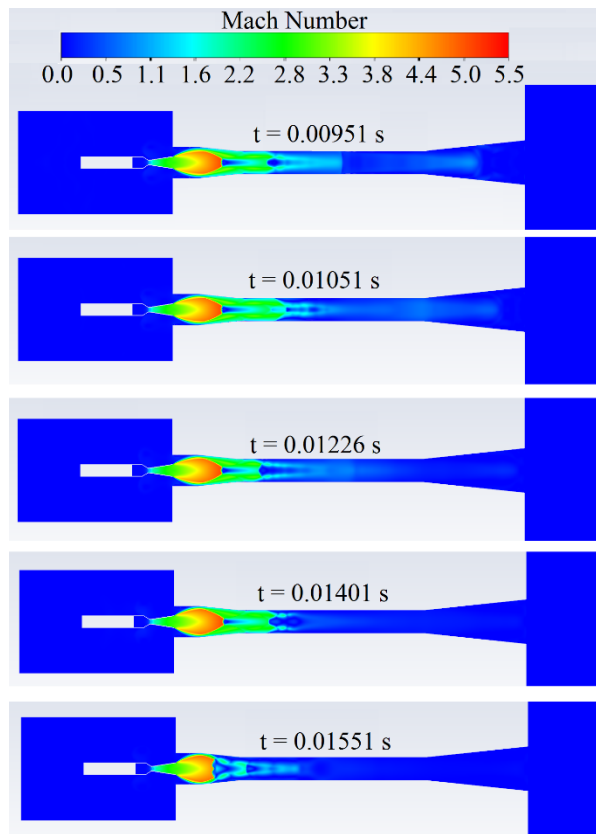
دیفیوزر) به مقداری نزدیک به فشار اتمسفر محلی قرار داده شده است. به محض برقراری این شرط، شرط مرزی دیواره در سطح خروجی دیفیوزر به شرط مرزی سطح داخلی میدان جریان (Interior) تغییر داده می‌شود. مطابق جدول ۱، گام زمانی تحلیل عددی در این شبیه‌سازی مقدار بسیار کوچکی برابر با  $5 \times 10^{-7}$  s تا  $10^{-6}$  قرار داده شده است. در مقادیر بالاتر گام زمانی، حل عددی با ناپایداری و خطای عددی مواجه می‌شود [۱۱]. با این گام زمانی، زمان واقعی محاسبات بیش از دو هفته با پردازشگر Intel® Xeon® CPU ES-2630 v3 @ 2.40GHz 2.40 GHz 2 processors به طول می‌انجامد. این سیستم ۱۶ هسته‌ای بوده و برای انجام محاسبات (با نرم‌افزار فلوئنت موازی ورژن R2 ۲۰۲۰) از هشت هسته آن استفاده شده است.

نتایج تحلیل عددی با نمایش کانتور عدد ماخ جریان در میدان حل از لحظه  $0/00026$  تا  $0/22801$  ثانیه در شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ ارائه شده است. هم‌چنین تغییرات زمانی فشار متوسط محفظه خلاء و فشار متوسط سیال در سطح داخلی مانع تعبیه شده در انتهای دیفیوزر به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نمایش داده شده است.

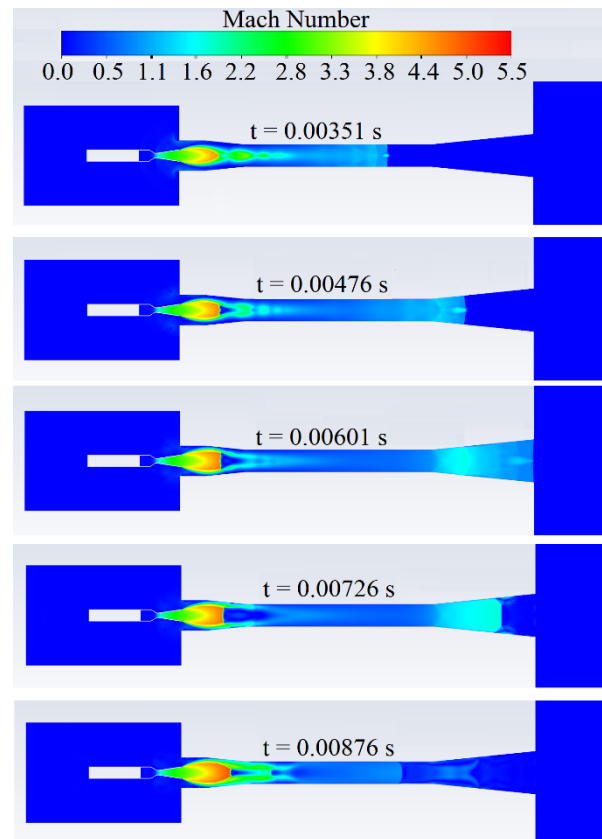
مطابق شکل ۱۲، تا  $0/00251$  ثانیه جریان گازهای داغ تا وسط دیفیوزر پیش‌روی کرده است. از لحظه  $0/00101$  ثانیه به بعد، جریان در نازل در حالت کاملاً مافوق صوت گسترش یافته است و گلوگاه نازل در حالت خفگی قرار گرفته است. مطابق شکل ۱۲، کاملاً مشخص است که جریان گازهای داغ مافوق صوت در جهت طولی (در طول دیفیوزر) در حال گسترش است و مقدار خیلی کمی از گازها به محفظه خلاء وارد می‌شوند. این امر باعث می‌شود که فشار محفظه خلاء (شکل ۱۸) در این لحظات خیلی پایین‌تر از فشار گاز خروجی نازل ( $0/75$  بار) باشد که در نتیجه آن جریان خروجی از نازل حالت انبساطی مافوق صوت داشته باشد. کانتور عدد ماخ جریان از لحظه  $0/00351$  تا  $0/00876$  ثانیه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق شکل در لحظه  $0/00601$  ثانیه جریان گازهای داغ به مانع تعبیه شده در انتهای دیفیوزر برخورد می‌کند. مطابق شکل ۱۹، در این لحظه فشار سیال در سطح داخلی مانع با شیب بالایی شروع به افزایش می‌کند. در اثر برخورد گازهای داغ به مانع، امواج تراکمی برگشتی جریان شکل می‌گیرد که با گذر زمان به بالادست جریان (سمت نازل) در حال پیش‌روی

داخلی مانع به مقدار مطلوب باز شدن مانع می‌رسد. کانتور عدد ماخ جریان در این لحظه در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. در این لحظه، شرط مرزی دیواره در انتهای دیفیوزر به شرط مرزی سطح داخلی<sup>۱</sup> تغییر داده می‌شود. بنابراین، جریان گازهای داغ به محیط بیرون راه پیدا می‌کند. در شکل ۱۷، کانتورهای عدد ماخ جریان بعد از باز شدن مانع در لحظات مختلف، از ۰/۰۳۶۲۶ تا ۰/۲۲۸۰۱ ثانیه نمایش داده شده است که بیانگر راه‌اندازی شدن دیفیوزر و رسیدن آن به شرایط کارکرد پایدار در لحظه ۰/۲۲۸۰۱ ثانیه است. مطابق منحنی تغییرات زمانی فشار محفظه (شکل ۱۸)، در لحظات اولیه باز شدن مانع تا ۰/۰۴۵ ثانیه فشار محفظه خلاء در حال افزایش است. سپس فشار محفظه خلاء به مقدار بیشینه ۰/۱۶ بار رسیده و سپس شروع به کاهش می‌کند. به

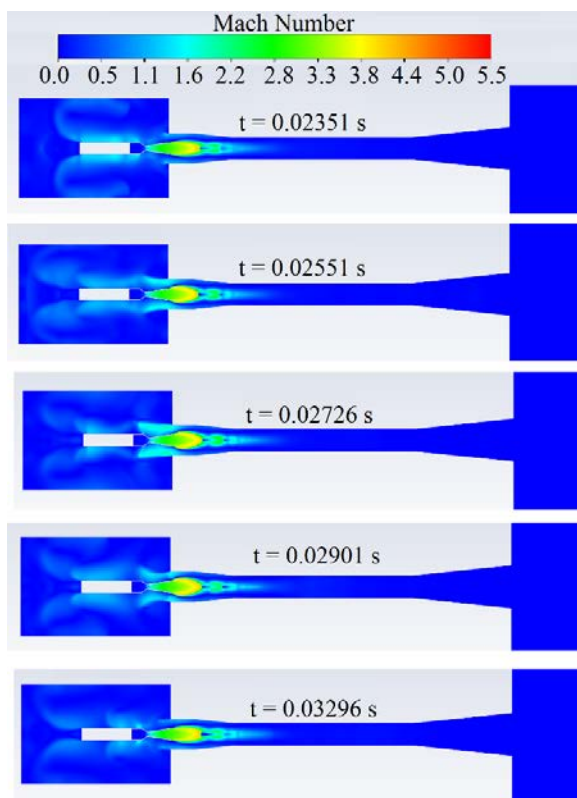
مطابق شکل ۱۵، در لحظه ۰/۰۱۶۵۱ ثانیه جریان در ورودی دیفیوزر از حالت مافوق صوت خارج شده و با گذر زمان جریان برگشتی به محفظه خلاء اتفاق می‌افتد. با توجه به خلاء بودن محفظه، جریان برگشتی با سرعت زیادی (عدد ماخ بالای ۲) در محفظه خلاء گسترش می‌یابد. دقت شود که تخلیه شدن جریان برگشتی به محفظه خلاء مانع از افزایش ناگهانی فشار در خروجی نازل شده و به تبع آن از ورود اغتشاشات به نازل تا حدودی جلوگیری می‌شود. مطابق شکل ۱۸، در این لحظات فشار محفظه خلاء با شیب بالایی رو به افزایش است. با گذر زمان، با افزایش فشار محفظه نازل، حجم گاز بیش‌تری وارد محفظه خلاء می‌شود، فشار متوسط سیال در سطح داخلی مانع انتهایی افزایش می‌یابد تا اینکه در لحظه ۰/۰۳۲۹۵۷ ثانیه مطابق شکل ۱۹ فشار در سطح



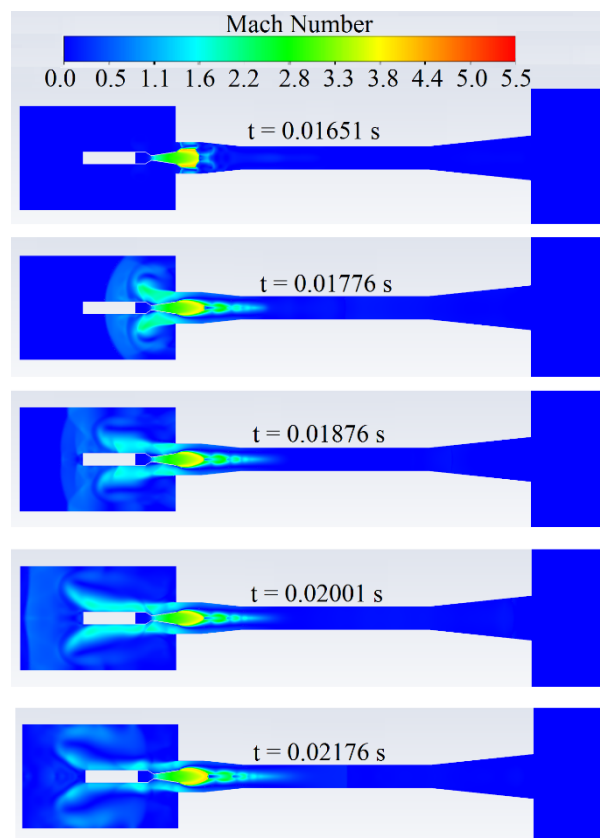
شکل ۱۴. کانتور عدد ماخ جریان از لحظه ۰/۰۰۹۵۱ تا ۰/۰۱۵۵۱ ثانیه



شکل ۱۳. کانتور عدد ماخ جریان از لحظه ۰/۰۰۳۵۱ تا ۰/۰۰۸۷۶ ثانیه



شکل ۱۶. کانتور عدد ماخ جریان از لحظه  $0.02351$  تا  $0.03296$  ثانیه (لحظه باز شدن مانع)



شکل ۱۵. کانتور عدد ماخ جریان از لحظه  $0.01651$  تا  $0.02176$  ثانیه

پروفیل فشار- زمان موتور با فرض ۳۰ درصد کاهش شیب منحنی فشار زمان در شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به فیزیک جریان در این تحلیل مشابه با نتایج شبیه‌سازی حالت اصلی بوده است. بنابراین، از ارائه جزئیات آنها به دلیل تکراری شدن مطالب پرهیز شده است. منحنی فشار-زمان مربوط به محفظه خلاء و فشار- زمان متوسط سطح داخلی مانع با فرض دو حالت مختلف بالستیک داخلی بدون تغییر و بالستیک داخلی نامطلوب در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۲۰، در شبیه‌سازی بدترین حالت، بیشینه فشار جریان برگشتی در محفظه خلاء افزایش داشته و هم‌چنین شیب تغییرات این منحنی نسبت به حالت اصلی کم‌تر است. هم‌چنین، مطابق شکل ۲۱، تغییرات فشار متوسط روی سطح داخلی مانع در حالت دوم نسبت به حالت اول به لحاظ زمانی و دامنه تغییرات از شدت ملایم‌تری برخوردار است. نتایج شبیه‌سازی این حالت هم نشان

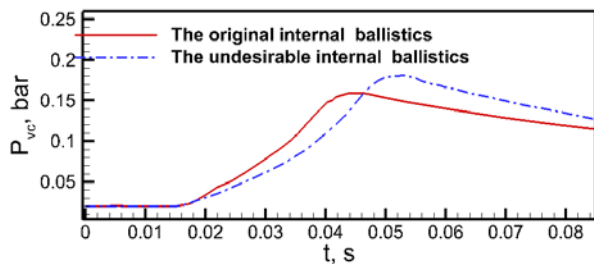
عبارت دیگر، با برطرف شدن مانع و افزایش فشار موتور، جریان مافوق صوت گسترده‌تری در ناحیه دیفیوزر پیدا می‌کند (شکل ۱۷) و این عوامل باعث تخلیه بیشتر محفظه خلاء می‌شود. مطابق شکل ۱۷، در لحظه  $0.022801$  ثانیه، فشار متوسط محفظه خلاء در حدود  $0.05$  بار است.

مطابق این بررسی، مشخص شد که با پروفیل فشار- زمان مورد نظر، در تمامی حالت‌ها نازل در شرایط مافوق صوت قرار دارد و بنابراین، احتمال اثرگذاری شرایط محیطی (حضور دیفیوزر) در عملکرد بالستیک داخلی موتور منتفی است.

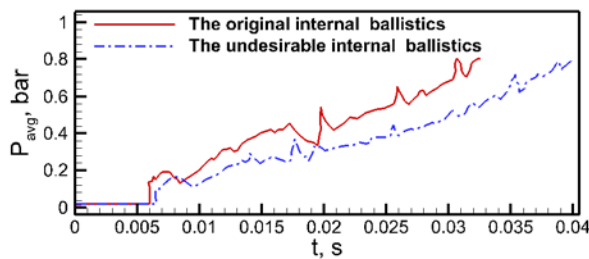
### ۳-۴- تحلیل جریان ناپایا با فرض کاهش نرخ افزایش زمانی فشار موتور

به منظور اطمینان از عملکرد صحیح بستر تست در صورت بروز تغییر در بالستیک داخلی موتور به واسطه پیش‌خلای سازی،

می‌دهد که بستر تست در نظر گرفته شده، مناسب ارزیابی بالستیک داخلی موتور با پیش خلاءسازی فضای داخلی موتور است، به طوری که، در لحظات اولیه، کارکرد چاشنی که مصادف با فرایند راه‌اندازی دیفیوزر است و در طول این فرایند نازل همیشه در حالت خفگی است، هیچ‌گونه اغتشاش بیرونی قادر به ورود به داخل موتور و اثرگذاری در بالستیک داخلی آن نیست.



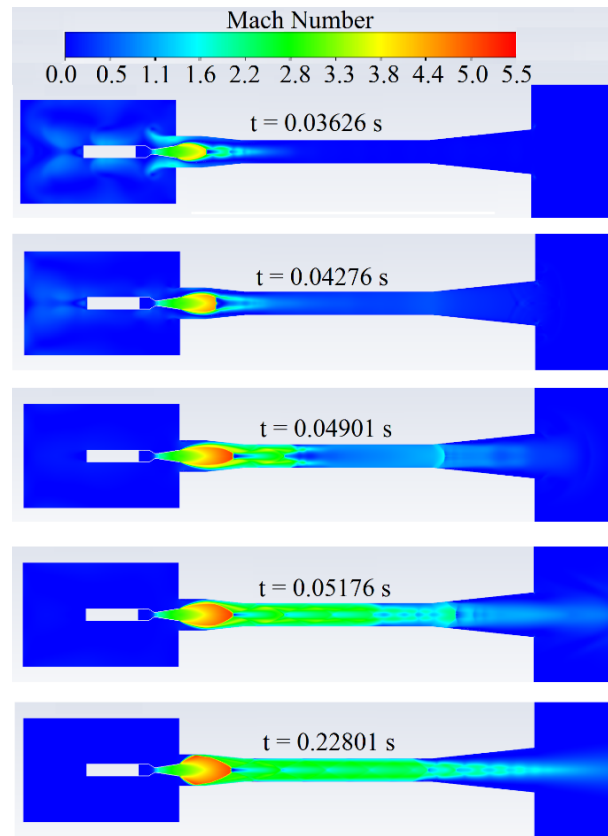
شکل ۲۰. تغییرات زمانی فشار متوسط محفظه خلاء با فرض دو حالت مختلف بالستیک داخلی اصلی و نامطلوب



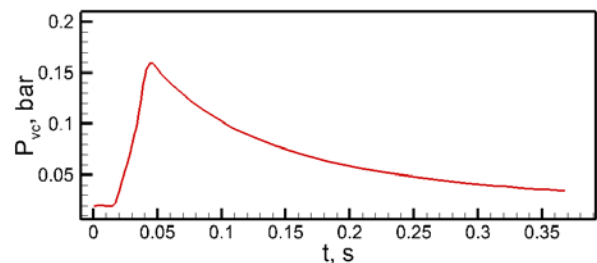
شکل ۲۱. تغییرات زمانی فشار متوسط وزنی روی سطح داخلی مانع در انتهای دیفیوزر با فرض دو حالت مختلف بالستیک داخلی اصلی و نامطلوب

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

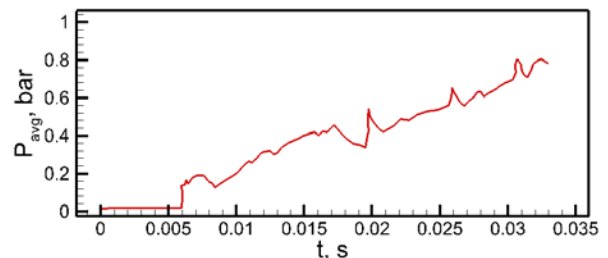
هدف از این تحقیق، مشخص کردن بستر تست یک موتور انتقال مداری برای تست عملکرد موتور در شرایط پیش خلاءسازی فضای داخلی موتور است. برای این منظور، ایده استفاده از دیفیوزر خروجی گاز مافوق صوت مطرح شد. به منظور اطمینان از عدم اثرگذاری شرایط محیطی تست (حضور دیفیوزر و محفظه خلاء) در بالستیک داخلی موتور، از شبیه‌سازی عددی جریان استفاده شد. ابتدا شبیه‌سازی عددی جریان گازهای داغ در شرایط پایا انجام شد تا مشخص شود که دیفیوزر در شرایط فشار کاری موتور راه‌اندازی می‌شود. سپس، شبیه‌سازی عددی غیردائم با اعمال



شکل ۱۷. کانتور عدد ماخ جریان از لحظه ۰/۰۳۶۲۶ تا ۰/۲۲۸۰۱ ثانیه



شکل ۱۸. تغییرات زمانی فشار متوسط محفظه خلاء ( $P_{ve}$ )



شکل ۱۹. تغییرات زمانی فشار متوسط وزنی ( $P_{avg}$ ) روی سطح داخلی مانع در انتهای دیفیوزر

- Experimental Fluid Mechanics XII; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020.
- [7] F.R., Menter, R. Lechner, A. Matyushenko, "Generalized k-w Two-Equation Turbulence Model in Ansys CFD (GEKO)", Ansys Technical Report, 2020.
- [8] N. Fouladi, S. Afkhami, and M. PasandidehFard, "Numerical simulation of flow separation in a thrust optimized parabolic nozzle", Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 54, No. 5, pp 1-12, 2022.
- [9] H. W. Yeom, S. Yoon, H. G. Sung, "Flow Dynamics at the Minimum Starting Condition of a Supersonic Diffuser to Simulate a Rocket's High Altitude Performance on the Ground", Mechanical Science and Technology, Vol. 23, pp 254-261, 2009.
- [10] N. Fouladi, A. Mohammadi, and H. Rezaei, "Numerical Investigation of Pre-evacuation Influences of Second Throat Exhaust Diffuser," Fluid Mechanics and Aerodynamics, vol. 2, pp 55-69, 2017.
- [11] N. Fouladi, M. Farahani, "Numerical investigation of second throat exhaust diffuser performance with thrust optimized parabolic nozzles", Aerospace Science and Technology, Vol. 105, 106020, 2020.
- [12] N. Fouladi, S. Afkhami, and M. PasandidehFard, "Experimental Study of Pre-evacuation Effect on Second throat Diffuser Starting Process", Journal of Space Science, Technology & Applications, Vol. 1, No. 2, pp 167-179, 2022.
- [13] W.L. Jones, Jr. H.G. Price, C.F. Lorenzo, "Experimental study of zero-flow ejectors using gaseous nitrogen", NASA Technical Note D-230, 1960.
- [14] R.C. German, R.C. Bauer, J.H. Panesci, "Methods for determining the performance of ejector-diffuser systems", J. Spacecraft and. Rockets, Vol. 3, No. 2, pp 193-200, 1966.

پروفیل فشار- زمان اصلی موتور به عنوان شرایط مرزی فشار ورودی انجام شد. بررسی‌ها نشان داد که مافوق صوت شدن جریان اولیه در دیفیوزر در فشارهای موتور خیلی پایین و تخلیه جریان برگشتی به محفظه خلاء دو عامل مهم در جلوگیری از تاثیرگذاری قابل توجه شرایط محیطی در جریان داخل نازل هستند. به عبات دیگر، نشان داده شده که در دوره زمانی روشن شدن موتور تا راه‌اندازی پایدار دیفیوزر نازل موتور در حالت خفگی قرار دارد، بنابراین، اغتشاشات محیطی قادر به نفوذ به داخل موتور و اثرگذاری در بالستیک داخلی آن نیست. علاوه بر این، برای اطمینان از کفایت بستر تست در اندازه‌گیری فشار-زمان واقعی موتور (بدون اثرگذاری شرایط محیطی) در حالت‌هایی که پیش-خلاءسازی باعث کاهش قابل توجه (تا ۳۰٪) نرخ رشد فشار موتور در زمان روشن شدن می‌شود، شبیه‌سازی عددی غیردائم انجام شد و کفایت بستر تست مورد تایید قرار گرفت.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## مراجع

- [1] N. Fouladi, "Numerical investigation of back flow arrester effect on altitude test simulator starting performance", Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, pp 185-196, 2017 (in Persian).
- [2] P. Ducasse, "Rocket altitude test facilities register", AGARD-AG-297, ISBN 92-835-0404-6, pp 1-74, 1987.
- [3] G. Saunders, "A3 subscale diffuser test article design", In 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (p. 5010), 2009.
- [4] M. HatamiNasab, N. Fouladi, "The Statistical Analysis of Gas Ejectors in High Altitude Test Facilities for Space Motors", Journal of Technology in Aerospace Engineering, Vol. 2, Issue 2, pp 25-34, 2018.
- [5] ن. فولادی و ع. محمدی، "طراحی اولیه و تحلیل عددی سکوی تست موتور سامان در ارزیابی عملکرد چاشنی در شرایط خلاء"، گزارش علمی و فنی STRI-SC9SDC11Y/01-R-04/111، پژوهشگاه فضای ایران، ۱۴۰۱.
- [6] F.R. Menter, A. Matyushenko, R. Lechner, "Development of a Generalized K-w Two-Equation Turbulence Model" In New Results in Numerical and



## COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)