

# بررسی عددی اثر پیش خلاء سازی در زمان راه اندازی دیفیوزر خروجی گاز مافوق صوت در استند خلاء

نعمت‌اله فولادی<sup>۱</sup>، علیرضا محمدی<sup>۲</sup> و هادی رضایی<sup>۳</sup>

پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی

پژوهشگاه فضایی ایران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۰)

## چکیده

در مقاله حاضر عملکرد یک دیفیوزر خروجی گاز مافوق صوت در زمان روشن شدن یک موتور فضایی در تست زمینی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور تحلیل‌های عددی غیردائم جریان گازهای احتراقی در دیفیوزر مزبور با پروفیل فشار- زمان محفظه احتراق انجام شده است. فیزیک جریان در دیفیوزر و عملکرد آن در لحظه روشن شدن موتور در شرایط بدون پیش خلاء سازی و با پیش خلاء سازی بخش‌هایی از دیفیوزر و محفظه تست مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اثر پیش خلاء سازی در کاهش زمان راه‌اندازی دیفیوزر (زمان احراز شرایط خلاء در پیرامون نازل موتور) نشان داده شده است. در ادامه، اثر انتخاب ناحیه پیش خلاء سازی بر زمان راه‌اندازی دیفیوزر خروجی گازها با شبیه‌سازی عددی جریان مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج تحلیل عددی در قالب تشریح برخی از کمیت‌های جریان، مانند عدد ماخ و فشار استاتیک در زمان‌های مختلف ارائه شده است. نشان داده شده که با شرایط اولیه بدون پیش خلاء (فشار و دمای اتمسفر محلی) در حدود  $1/2$  S زمان لازم است تا دیفیوزر راه‌اندازی شده و شرایط خلاء نسبی را در پیرامون نازل و محفظه تست ایجاد نماید. در صورت استفاده از گزینه پیش خلاء سازی، راه‌اندازی دیفیوزر در زمان کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد. بررسی‌های عددی حاضر نشان می‌دهند که اثر فضای پیش خلاء سازی در عملکرد راه‌اندازی دیفیوزر قابل ملاحظه است. هرچه فضای بیشتری در طول دیفیوزر پیش خلاء شده باشد، راه‌اندازی دیفیوزر در مدت زمان کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد، از طرفی، افزایش فضای پیش خلاء سازی از ناحیه محفظه تست نتیجه عکس داشته و باعث بزرگتر شدن مدت زمان راه‌اندازی دیفیوزر می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تست استند خلاء، دیفیوزر گلوگاه ثانویه، پیش خلاء سازی، تحلیل عددی

## Numerical Investigation of Pre-evacuation Influences of Second Throat Exhaust Diffuser

N. Fouladi, A. Mohammadi, and H. Rezaei

Space Transportation Research Institute

Iranian Space Research Center

(Received: 7/September/2016; Accepted: 9/January/2017)

### ABSTRACT

In this paper, the influences of regional pre-evacuation of an altitude test facility on starting time of a second throat supersonic exhaust diffuser are numerically investigated. Detailed numerical studies have been carried out to evaluate the physics of the flow and starting time of the diffuser for different pre-evacuation zones along the diffuser and the test chamber. Unsteady axisymmetric compressible Navier–Stokes equations, incorporated with the two equation  $k\omega$ -SST turbulence model are solved, with density-based solver to extract the current flow features. The numerical method is properly validated with the measured data available in the literature. Our investigations show that the amount of pre-evacuation volume has strong effects on starting time of the diffuser. As we extend pre-evacuation zone along the diffuser, the smaller starting time of diffuser is resulted. However, the increasing of pre-evacuated test chamber size causes the increasing of starting time of the diffuser.

**Keywords:** Altitude Test Facility, Second Throat Exhaust Diffuser, Pre-evacuation, CFD

۱- پژوهشگر (نویسنده پاسخگو): nfouladi@eri.ac.ir

۲- پژوهشگر: armohamadi@eri.ac.ir

۳- پژوهشگر: hadi.rezaei@srbiau.ac.ir

## ۱- مقدمه

نازل موتورهای فضایی از نسبت انبساط بالایی برخوردار است و در صورت آزمایش در سطح زمین (در شرایط اتمسفر محلی) جدایش جریان وسیعی در داخل نازل شکل می‌گیرد و به تبع آن تراست موتور به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین، در تست زمینی این موتورها لازم است که شرایط خلاء نسبی در پیرامون نازل ایجاد شود و گازهای احتراقی به محیط بیرون انتقال داده شوند. غالباً از دیفیوزر خروجی گاز لوله مستقیم یا گلوگاه ثانویه برای این منظور استفاده می‌شود [۳-۱]. این دیفیوزرها از یک طرف به محفظه تست (یا خلاء) متصل هستند و از طرف دیگر به فضای آزاد اتمسفر محلی منتهی می‌شوند و از هد دینامیکی گازهای احتراقی در طی یک پروسه پیچیده انبساط گازها و تشکیل قطاری از موجهای ضربه‌ای برای ایجاد شرایط خلاء در اطراف نازل و پمپ کردن این گازها به محیط بیرون بهره می‌برند. دیفیوزر لوله مستقیم از یک لوله طویل با قطر ثابت تشکیل شده است که قطر آن اندکی بزرگتر از قطر خروجی نازل موتور می‌باشد و غالباً بخش انتهایی آن به شکل دیفیوزر مادون صوت (واگرا) طراحی می‌شود. دیفیوزر گلوگاه ثانویه شبیه به دیفیوزر لوله مستقیم است با این تفاوت که در قسمت عمده‌ای از طول لوله (قبل از دیفیوزر مادون صوت) قطر لوله باریکتر شده باشد. این قسمت باریک شده را گلوگاه ثانویه می‌گویند. در شکل ۱ شماتیکی از یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه نمایش داده شده است. دیفیوزرهای گلوگاه ثانویه به دلیل برخورداری از سطح مقطع کوچکتر در قسمت گلوگاه ثانویه بازافت فشار بهتری نسبت به دیفیوزرهای لوله مستقیم دارند و در تست زمینی موتورهای فضایی با فشار احتراق پایین‌تر کاربرد دارند [۱].

مطالعه تاریخچه تحقیق در مورد دیفیوزر خروجی گازهای احتراقی در تست استندهای خلاء نشان می‌دهد که از سال ۱۹۵۰ تاکنون تحقیقات تجربی، تئوری و عددی زیادی در این مورد انجام شده است. در بیشتر تحقیقات انجام شده، تحلیل دینامیک گازی، طراحی و بررسی عملکرد در حالت پایا مورد توجه قرار گرفته است [۴-۱]. در اینگونه بررسی‌ها، عملکرد دیفیوزر در لحظه روشن شدن و یا خاموشی موتور مورد تحلیل قرار نمی‌گیرند.

مدت زمان لازم برای ایجاد خلاء نسبی در پیرامون نازل از لحظه روشن شدن یک موتور فضایی اهمیت زیادی در تست

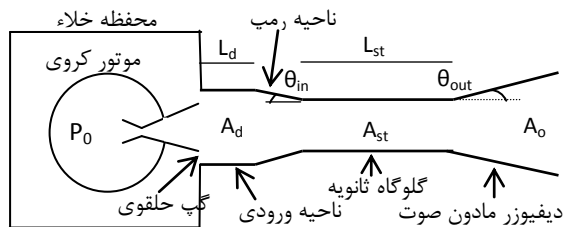
استندهای خلاء دارد و به اصطلاح زمان راه‌اندازی شدن دیفیوزر گفته می‌شود. این مدت زمان هر چه کوتاه‌تر باشد، جزئیات بیشتری از عملکرد یک موتور در لحظه روشن شدن آن قابل ثبت و شناسایی خواهد بود. زمان راه‌اندازی یک دیفیوزر به شرایط اولیه حاکم، حجم محفظه تست (یا محفظه خلاء) و هندسه دیفیوزر بستگی دارد. مطالعه تاریخچه تحقیق در این خصوص نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از تخلیه کننده‌های سیال ثانویه می‌توان زمان راه‌اندازی دیفیوزرها را به طور قابل توجهی کاهش داد [۵]. در این روش، در زمان روشن شدن موتور شار جرمی سیال ثانویه زیادی جهت بیرون کشیدن موج ضربه‌ای جریان از داخل نازل مورد نیاز است. از طرفی، وقتی که دیفیوزر به شرایط پمپ خودکار برسد، شار جرمی سیال ثانویه می‌بایست کاهش داده شده و متوقف شود. در عمل به دلیل پیچیدگی‌های زیاد فاز روشن شدن موتور، بکارگیری این سیستم با مشکلات زیادی خصوصاً در تعیین شار جرمی سیال ثانویه لحظه‌ای همراه است. عمده کاربرد این روش در تست موتورهایی با فشار احتراق نسبتاً پایین (و نسبت انبساط نازل بالا) است که در آن هد دینامیکی گازهای احتراقی برای پمپ خودکار در داخل دیفیوزر کافی نباشد.

یکی از راه‌کارهای متداول جهت کاهش دادن مدت زمان راه‌اندازی یک دیفیوزر پیش خلاء کردن بخشی از نواحی داخلی دیفیوزر و محفظه تست می‌باشد [۳ و ۱۰-۶]. در عمل پیش خلاء‌سازی توسط یک پمپ خلاء و یا یک تخلیه کننده سیال ثانویه قبل از شروع به روشن شدن موتور انجام می‌شود و در پیاده‌سازی این روش هیچگونه تداخلی با پیچیدگی‌های موجود در فاز روشن شدن موتور بوجود نمی‌آید. در این روش، جهت حفظ شرایط اولیه مذکور، لازم است که نواحی کم فشار داخلی (ناحیه پیش خلاء شده) توسط یک دیافراگم از نواحی پر فشار بیرونی (نواحی متصل به شرایط اتمسفر محلی) جدا شوند. مطالعه مراجعی که این روش را برای راه‌اندازی دیفیوزر استفاده کرده‌اند، نشان می‌دهد که علی‌رغم به‌کارگیری زیاد این روش، فیزیک جریان گازهای خروجی در لحظه روشن شدن موتور، زمان محو شدن دیافراگم و توسعه جریان در دیفیوزر کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر موقعیت دیافراگم (یا به عبارتی ناحیه پیش خلاء‌سازی) تبیین نشده است. در تحقیقات مختلف موقعیت دیافراگم بدون ذکر دلیل متفاوت در

شده است. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی عددی جریان در دیفیوزر با شرایط اولیه پیش خلاء ارائه شده و با نتایج حالت بدون پیش خلاءسازی مقایسه شده است. در بخش ۶ اثر ناحیه پیش خلاءسازی با تغییر موقعیت دیافراگم ارائه شده است. همچنین اثر حجم محفظه تست پیش خلاء شده در زمان راه-اندازی دیفیوزر در بخش ۷ مورد بررسی قرار گرفته است. نهایتاً در بخش ۸ نتیجه گیری ارائه شده است.

## ۲- تعریف مسئله و انگیزه تحقیق

همان‌طور که در مقدمه اشاره شده است، یک دیفیوزر خروجی گازهای احتراقی در زمان روشن بودن موتور جریان گازهای احتراقی را به محیط اتمسفر تخلیه کرده و فشار خلاء مورد نیاز را در پیرامون نازل برقرار می‌نماید. در شکل ۱ شماتیکی از هسته اصلی یک تست استند خلاء نمایش داده شده است. در این شکل محفظه خلاء (یا محفظه تست)، موتور و نازل مورد آزمایش، دیفیوزر خروجی گازهای احتراقی و گپ حلقوی مابین سطح خروجی نازل و سطح ورودی دیفیوزر نمایش داده شده است.



شکل (۱): شماتیکی از اجزای اصلی یک تستند خلاء

در یک تست استند خلاء جهت اندازه گیری تراست موتور بدنه موتور با یکسری اتصالاتی به یک نیروسنج متصل می‌شود. دیفیوزر خروجی گازهای احتراقی در این شکل از نوع دیفیوزر گلوگاه ثانویه است و از قسمت‌های ناحیه ورودی دیفیوزر، ناحیه رمپ، بخش گلوگاه ثانویه و بخش دیفیوزر مادون صوت تشکیل شده است. نحوه کار یک دیفیوزر خروجی گاز احتراقی به این صورت است که ابتدا گازهای خروجی از نازل در شرایط فرو منبسط<sup>۵</sup> وارد قسمت ورودی دیفیوزر می‌شوند. سپس جت سیال گازهای منبسط شده به دیواره ورودی دیفیوزر برخورد کرده و در ادامه موج ضربه‌ای مایل جریان تشکیل می‌شود که

نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال سانکاران<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۰۲ در تست آزمایشگاهی دیفیوزر گلوگاه ثانویه با سیال سرد، موقعیت دیافراگم را در ابتدای ناحیه رمپ قرار داده اند [۳]. آشوکومار<sup>۲</sup> و همکاران ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ در تست‌های آزمایشگاهی مختلف دیفیوزر گلوگاه ثانویه با سیال سرد و گرم، موقعیت دیافراگم را در ابتدای گلوگاه ثانویه قرار داده اند [۸-۷]. همچنین در تست‌های آزمایشگاهی با دیفیوزر لوله مستقیم که توسط آنمالی<sup>۳</sup> و همکاران ۱۹۹۸ و پارک<sup>۴</sup> و همکاران ۲۰۰۸ انجام شده است، موقعیت دیافراگم در انتهای دیفیوزر قرار داده شده است [۹-۱۰]. مطالعه مراجع مذکور و سایر مراجع مشابه نشان می‌دهد که دلیل خاصی برای انتخاب محل دیافراگم ارائه نشده است. همچنین فیزیک جریان در لحظه شروع به کار موتور و محو شدن دیافراگم و لحظات بعدی توسعه جریان در دیفیوزر مورد مطالعه قرار نگرفته است. کمبود اطلاعات موجود در مراجع در خصوص تبیین فیزیک جریان در زمان شروع به کار موتور در استند خلاء در قبل و بعد از محو شدن دیافراگم و بررسی اثر موقعیت دیافراگم در زمان راه‌اندازی دیفیوزر، نویسندگان مقاله حاضر را بر آن داشت که تحقیق پیش رو را ارائه دهند.

قابل ذکر است که در این نوع شبیه‌سازی‌های عددی، گام زمانی تحلیل عددی در حدود ۵-۱۰ s است [۱] که جهت شبیه‌سازی حداقل ۲ s زمان عملکرد یک دیفیوزر، شبیه‌سازی زمانبری محسوب می‌شود. در این تحقیق از یک دستگاه کامپیوتر با پردازشگر Intel core i5 CPU 3.1 GHz استفاده می‌شود. تجربه نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی جریان در ۲ s اول شروع به کار موتور بیش از سه هفته زمان اجرای کامپیوتری لازم است.

در ادامه مقاله، در بخش ۲ مسئله مورد بررسی تشریح شده و انگیزه تحقیق بیان شده است. در بخش ۳ معادلات حاکم، روش تحلیل عددی و اعتبارسنجی تحلیل عددی به طور مختصر شرح داده شده است. در ادامه، نتایج تحقیق در بخش-های ۴ تا ۷ ارائه شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی عددی جریان در دیفیوزر با شرایط اولیه بدون پیش خلاء ارائه

1 - Sankaran

2 - Ashokkumar

3 - Annamalai

4 - Park

5 - Under-expand

عددی غیر دائم جریان می‌باشد. همچنین در این تحقیق اثر نواحی پیش خلاءسازی در کاهش زمان راه‌اندازی دیفیوزر مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمان راه‌اندازی دیفیوزر از لحظه روشن شدن موتور، به زمانی اطلاق می‌شود که در اثر کارکرد صحیح دیفیوزر فشار در اطراف نازل (در محفظه تست) به کمتر از فشار خروجی نازل در شرایط خلاء برسد. زمان راه‌اندازی یک دیفیوزر، شروع اندازه‌گیری تراست موتور را تعیین می‌کند و اهمیت زیادی در تست استندهای خلاء دارد. به عبارت دیگر هر چه زمان راه‌اندازی دیفیوزر کوچک‌تر باشد، جزئیات بیشتری از موتور در زمان روشن شدن آن قابل اندازه‌گیری و شناسایی خواهد بود.

روش پیش خلاءسازی قسمت‌هایی از مجرای عبور گازهای احتراقی و محفظه تست در یک استند خلاء، علی‌رغم ساده بودن پیاده‌سازی آن در عمل، مزیت قابل توجهی به لحاظ دقت بالای اندازه‌گیری تراست در لحظه‌های روشن شدن یک موتور فضایی دارد. این امر برای طراحان این نوع موتورها از ارزش بالایی برخوردار است. در این تحقیق علاوه بر تبیین فیزیک جریان گازهای احتراقی با رویکرد شبیه‌سازی عددی جریان، روند بررسی‌ها در جهت یافتن پاسخ به برخی از پرسش‌های مطرح در طراحی و ساخت استند خلاء سوق داده شده است. برخی از این سوالات بعنوان نمونه در ادامه این پاراگراف مطرح شده است: پیش خلاءسازی به چه میزان در کاهش زمان راه‌اندازی دیفیوزر موثر است؟ فضای پیش خلاءسازی موثر کدام نواحی هستند؟ به عبارت دیگر محل مناسب برای نصب دیافراگم کجاست؟ شرایط جریان (دما و فشار) در لحظه برخورد به دیافراگم چگونه است؟ دانستن این اطلاعات در طراحی مکانیزم دیافراگم کمک می‌کند. همچنین ابعاد محفظه تست در زمان راه‌اندازی دیفیوزر چه تاثیری دارد؟ بیشینه دما و فشار سیال در محفظه تست و در داخل دیفیوزر در زمان روشن شدن موتور چه مقدار است؟ دانستن این امر در اتخاذ تدابیر لازم جهت حفاظت دمایی و سازه‌ای محفظه تست، بدنه دیفیوزر و ابزار اندازه‌گیری موجود در محفظه و حتی حسگرهای متصل به بدنه دیفیوزر کمک شایانی می‌کند.

در حالت بدون پیش خلاء، شرایط اولیه در تحلیل عددی غیردائم در کل میدان جریان شرایط اتمسفر محلی (فشار ۰/۸۸ bar و دمای ۳۰۰ K) می‌باشد، در حالی که در شرایط پیش خلاءسازی شرایط اولیه در شبیه‌سازی عددی متفاوت

به کاهش سرعت و افزایش فشار استاتیک گازها کمک می‌کند. در ادامه، تداخل پی در پی موج‌های ضربه‌ای با دیواره دیفیوزر و همدیگر در طول دیفیوزر رخ می‌دهد و توسط موج ضربه‌ای قائم در انتهای گلوگاه ثانویه سرعت جریان به زیر صوت رسانده می‌شود. سپس جریان مادون صوت در بخش انتهایی دیفیوزر (دیفیوزر مادون صوت) به صورت تدریجی تا فشار اتمسفر محلی متراکم می‌شود. این مکانیزم باعث می‌شود که فشار استاتیک سیال در طول دیفیوزر به تدریج بازیابی شده و گازهای احتراقی به محیط بیرونی تخلیه شوند. با انبساط جت سیال در ورودی دیفیوزر فشار گازها در این نواحی پایین‌تر از فشار گاز خروجی نازل می‌شود. این امر باعث ایجاد مکش در دهانه محفظه تست (یا محفظه خلاء) شده و شرایط خلاء نسبی را تا زمان خاموشی موتور به طور خودکار حفظ می‌کند.

غالباً طراحی دیفیوزر برای هندسه نازل و فشار محفظه احتراق مشخصی انجام می‌شود. در این مقاله به طراحی دیفیوزر پرداخته نمی‌شود و پارامترهای بی بعد هندسه دیفیوزر و نازل مطابق جدول ۱ فرض شده است که خروجی طراحی مفهومی با روش موج ضربه‌ای قائم می‌باشد [۱۱]. هدف تحقیق حاضر بررسی عملکرد دیفیوزر مزبور در شرایط بدون پیش خلاء و با پیش خلاءسازی در زمان روشن شدن موتور با شبیه‌سازی

**جدول (۱): مشخصات نازل و دیفیوزر گلوگاه ثانویه [۱۱].**

مقدار	تعریف پارامتر	پارامتر بی‌بعد
۵۳	نسبت سطح مقطع خروجی نازل به سطح مقطع گلوگاه نازل	$\frac{A_e}{A^*}$
۷۰	نسبت سطح مقطع ورودی دیفیوزر به سطح مقطع گلوگاه نازل	$\frac{A_d}{A^*}$
۱/۸۵۵	نسبت سطح مقطع ورودی دیفیوزر به سطح مقطع گلوگاه ثانویه	$\frac{A_d}{A_{st}}$
۳/۳۲	نسبت سطح مقطع خروجی دیفیوزر به سطح مقطع گلوگاه ثانویه	$\frac{A_o}{A_{st}}$
۸	نسبت طول به قطر گلوگاه ثانویه	$\left(\frac{L}{D}\right)_{st}$
۰/۸	نسبت طول به قطر ورودی دیفیوزر	$\left(\frac{L}{D}\right)_{id}$
۶°	زاویه ناحیه رمپ	$\theta_{in}$
۶°	زاویه دیفیوزر مادون صوت	$\theta_{out}$

محاسباتی از مدل توربولانسی اسپالارت-الماراس<sup>۱</sup> و یا  $k-\epsilon$  به همراه عبارت‌های تصحیحی برای رینولدز پایین استفاده شده است [۱، ۳، ۱۲، ۱۳]. این روش‌ها خطای زیادی در تخمین نواحی جدایش جریان دارند. نویسندگان مقاله حاضر در مرجع [۱۱] با بررسی‌های عددی نشان دادند که مدل توربولانسی  $k\omega$ -SST برای این مسئله از دو روش مذکور مناسب‌تر است. این مدل توربولانسی برای نواحی جریان جدا شده دقت بیشتری دارد، ولی با توجه به نیاز این روش به شبکه محاسباتی ریزتر در نزدیکی دیواره، بار محاسباتی تحلیل عددی نیز بیشتر خواهد شد. با این حال، در این تحقیق از مدل توربولانسی  $k\omega$ -SST استفاده شده است.

در حل پایای جریان در دیفیوزر مافوق صوت، هر چه شرایط اولیه به جواب نهایی نزدیکتر باشد، تحلیل مسئله زودتر همگرا می‌شود، ولی در تحلیل غیردائم دیفیوزر شرایط اولیه می‌بایست شرایط واقعی حاکم بر مسئله در لحظه صفر باشد. بنابراین، در حالت عدم استفاده از گزینه پیش خلاء شرایط اتمسفری حاکم مقدار کمیت‌های جریان مانند فشار و دما را تعیین می‌کنند، ولی در شرایط پیش خلاء مقادیر آنها متفاوت خواهد بود.

در این تحقیق جهت انجام تحلیل‌های عددی از شبکه محاسباتی بی‌سازمان مثلثی استفاده شده است. از مش لایه مرزی به منظور حل دقیق‌تر جریان توربولانت بهره گرفته شده است، به طوری که فاصله اولین گره محاسباتی تا دیواره دیفیوزر کمتر از  $0.3$  میلی‌متر است. با این شبکه مقدار  $y^+$  شبکه در تحلیل‌های انجام شده کمتر از  $10$  می‌باشد، که مناسب مدل توربولانسی  $k\omega$ -SST است. در شکل ۳ نماهای مختلفی از شبکه محاسباتی نمایش داده شده است.

میدان جریان شامل نازل موتور، محفظه خلاء، دیفیوزر و ناحیه بیرونی است که به اصطلاح ناحیه دور دست نامیده می‌شود. با توجه به تقارن محوری بودن هندسه و جریان، میدان محاسباتی دو بعدی در نظر گرفته شده است. همچنین به خاطر غیردائم بودن تحلیل‌های عددی یک ناحیه محاسباتی اضافی (ناحیه دور دست) با ابعاد بزرگ در انتهای دیفیوزر در نظر گرفته شده است. انجام تحلیل‌های جریان ناپایا برای این مسئله بدون در نظر گرفتن ناحیه دور دست خطای فاحشی را در شبیه‌سازی عددی جریان وارد می‌کند. بنابراین ناحیه دور

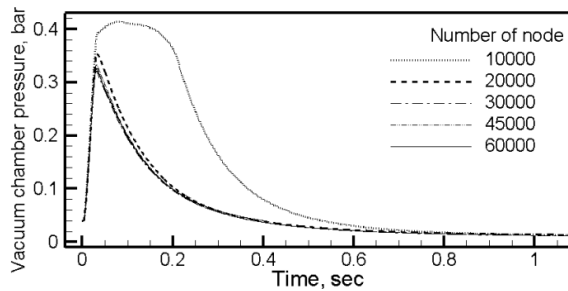
است. در شکل ۲ موقعیت دیافراگم در ابتدای گلوگاه ثانویه نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور، هوا در شرایط فشار استاتیک  $0.04 \text{ bar}$  در داخل نازل موتور، ورودی دیفیوزر و ناحیه رمپ و محفظه خلاء قرار دارد. در حالی که ناحیه گلوگاه ثانویه، دیفیوزر مادون صوت و ناحیه دور دست (یا بیرونی) شرایط اتمسفر محلی را دارند. بعد از شروع به روشن شدن موتور، جریان سیال داغ به سطح داخلی دیافراگم برخورد کرده و ناحیه پرفشاری در محل دیافراگم شکل می‌گیرد. به محض اینکه فشار سیال گرم در محل دیافراگم اندکی بزرگتر از فشار اتمسفر محلی باشد، دیافراگم از بین رفته و مجرای جریان به سمت بیرون باز می‌شود. در این بررسی با تغییر موقعیت دیافراگم الگوی توسعه یافتن جریان در دیفیوزر نمایش داده شده و اثرات آن در زمان راهاندازی دیفیوزر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین اثر حجم محفظه تست پیش خلاء شده در زمان راهاندازی دیفیوزر با شبیه‌سازی عددی جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۲): موقعیت دیافراگم و شرایط فشاری نواحی مختلف در حالت پیش خلاء.

### ۳- روش تحلیل عددی و اعتبارسنجی

معادلات حاکم بر جریان سیال در دیفیوزرها معادلات ناویر-استوکس به فرم تقارن محوری و تراکم پذیر ناپایا می‌باشد [۱۲]. در یک دیفیوزر خروجی گازهای احتراقی، عدد ماخ سیال برای گاز گرم از  $0.5$  تا  $5$  تغییر می‌کند. بنابراین جریان به شدت تراکم پذیر است و برای اینگونه مسائل، روش حل چگالی- مینا نسبت به روش فشار- مینا دقت بیشتری دارد. غالباً در تحلیل دیفیوزر خروجی گازهای احتراقی از روش حل چگالی مینا استفاده شده است [۱، ۱۳، ۳]. با توجه به این که در این مسئله اندرکنش قوی مابین موج ضربه‌ای جریان و لایه مرزی دیواره دیفیوزر وجود دارد، در برخی نواحی جدایش جریان از دیواره اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، مدل توربولانسی مورد استفاده می‌بایست برای تخمین محل جدایش جریان مناسب باشد. در برخی از مراجع به منظور کاهش دادن بار

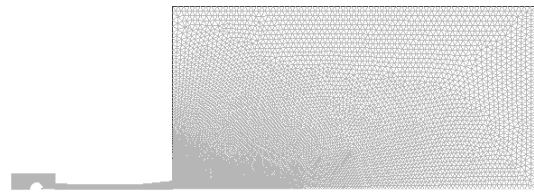


شکل (۴): فشار محفظه خلاء بر حسب زمان با اندازه‌های مختلف شبکه محاسباتی در تحلیل غیر دائم.

تحقیق در ایجاد شبکه‌های محاسباتی از نرم افزار گمبیت<sup>۱</sup> استفاده شده و کلیه تحلیل‌های عددی جریان با استفاده از نرم‌افزار فلونت<sup>۲</sup> انجام شده است.

نویسندگان مقاله حاضر در مرجع [۱۱] نتایج تحلیل عددی پایای یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه را با نتایج یک مرجع تجربی معتبر مقایسه کرده و صحت نتایج این‌گونه تحلیل‌ها را به اثبات رسانده‌اند. جهت انجام اعتبارسنجی تحلیل‌های ناپایا نیاز به نتایج تست تجربی به صورت وابسته به زمان و همچنین مشخص بودن کلیه اطلاعات هندسی میدان جریان از جمله ابعاد نازل موتور، محفظه تست و دیفیوزر می‌باشد. جستجو در مراجع نشان می‌دهد که در این خصوص مراجع تجربی بسیار محدودی وجود دارند، که در آنها از مشخص کردن اطلاعات هندسی کامل امتناع شده است. بنابراین، در این تحقیق جهت ارائه یک اعتبارسنجی ناپایا، نتایج یک تست تجربی (با فشار احتراق ثابت) با نتایج تحلیل ناپایای حاضر مورد مقایسه قرار گرفته است که در ادامه ارائه شده است. قابل ذکر است که در مراجع موجود، غالباً اعتبارسنجی در این خصوص به صورت پایا انجام شده است [۱ و ۱۲]. البته تعداد نادری مراجع نیز وجود دارند که نتایج تحلیل ناپایا را با نتایج تست تجربی خودشان اعتبارسنجی کرده‌اند [۶ و ۱۰]. با این حال نویسندگان مقاله حاضر ضمن ارائه یک مقایسه با تحلیل ناپایای جریان در فشار احتراق ثابت، جهت تاکید بر صحت نتایج این تحقیق در بخش نتایج این نوشتار مقایسه‌های کلی در خصوص یافته‌های جدید با نتیجه‌گیری‌های تست‌های تجربی موجود ارائه داده‌اند.

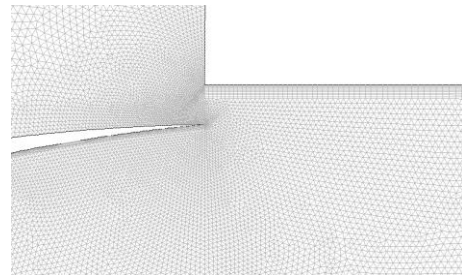
یووم<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ نتایج تست تجربی یک دیفیوزر مافوق صوت لوله مستقیم را ارائه داده‌اند [۱۳].



الف) نمایی از کل میدان حل و شبکه محاسباتی



ب) بزرگنمایی شکل الف در پیرامین دیفیوزر استند خلاء



ج) بزرگنمایی شکل ب در ناحیه گپ حلقوی

شکل (۳): شبکه محاسباتی برای تحلیل جریان ناپایا در

دست برای این مسئله می‌بایست تا حد امکان بزرگ در نظر گرفته شود [۱۰].

به منظور اطمینان از استقلال حل عددی از اندازه شبکه محاسباتی، تحلیل غیر دائم جریان سیال با شرایط اولیه مطابق شکل ۲ با اندازه‌های مختلف شبکه محاسباتی انجام شده است. پنج تا شبکه با اندازه‌های ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۴۵۰۰۰ و ۶۰۰۰۰ گره محاسباتی برای این منظور ایجاد شده است. به دلیل اهمیت زیاد پروفیل فشار- زمان محفظه تست در بررسی حاضر، این پروفیل برای نمایش استقلال حل از شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده است. نتایج این بررسی در شکل ۴ نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور شبکه‌های محاسباتی بالای ۳۰۰۰۰ گره محاسباتی برای تحلیل این مسئله کفایت می‌کند. در این تحقیق از شبکه‌های محاسباتی بالای ۵۰۰۰۰ گره محاسباتی استفاده شده است.

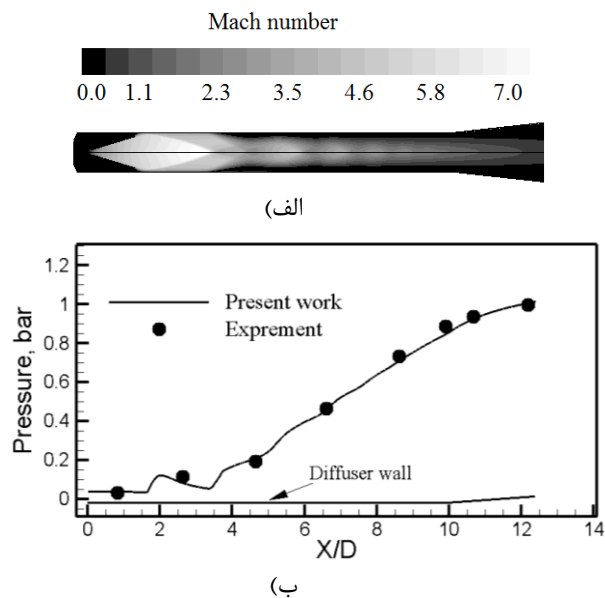
در این تحقیق، شرط مرزی فشار ورودی در سطح ورودی نازل، شرط مرزی فشار خروجی در سطوح مرزی ناحیه دور دست، شرط مرزی عدم لغزش جریان و شار حرارتی صفر برای تمامی سطوح دیواره و شرط مرزی تقارن جریان برای سطوح تقارن محوری اعمال شده است. قابل ذکر است که در این

1- GAMBIT

2- FLUENT

3- Yeom

۴- تحلیل عددی راهاندازی دیفیوزر بدون پیش خلاءسازی در این بخش نتایج تحلیل عددی غیردائم جریان در دیفیوزر با شرایط اولیه فشار و دمای اتمسفر محلی ارائه می‌شود. به عبارت دیگر هوا در شرایط فشار استاتیک ۰/۸۸ bar و دمای استاتیک ۳۰۰ K در داخل نازل، دیفیوزر، محفظه خلاء و ناحیه دور دست قرار دارد. شبیه‌سازی جریان با شرایط اولیه مزبور با پروفیل فشار- زمان محفظه احتراق انجام شده است. دمای محفظه احتراق ۳۴۰۰ K است. روش تحلیل عددی مطابق با مطالب ارائه‌شده در بخش قبلی در نرم‌افزار فلونت پیاده‌سازی شده است. در ادامه به تغییرات کمیت‌های جریان و تشریح فیزیک جریان در این شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.



شکل (۵): (الف) نتایج شبیه‌سازی، الف) کانتور عدد ماخ جریان در دیفیوزر از نتایج شبیه‌سازی حاضر و ب) مقایسه فشار استاتیک در طول لوله دیفیوزر در تحقیق حاضر با کار تجربی یووم و همکاران [۱۳].

کانتور عدد ماخ و فشار استاتیک جریان در زمان‌های مختلف در شکل‌های ۷-۶ نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور در لحظه ۰/۰۱۶ s موج ضربه‌ای جریان در داخل نازل قرار دارد. در اثر تشکیل موج ضربه‌ای جریان، ناحیه فشار قوی تشکیل شده است. تا این لحظه گازهای احتراقی تا ورودی دیفیوزر جریان داشته‌اند و بقیه نواحی شرایط اتمسفر محلی را دارند. طبیعی است که در این شرایط سیال گرم از ناحیه گپ حلقوی وارد محفظه خلاء می‌شود. همچنین در لحظه ۰/۲۰۱۲ s موج ضربه‌ای جریان در خروجی نازل مستقر است.

مشخصات هندسی دیفیوزر و نازل موتور در جدول ۲ ارائه شده است. فشار کل محفظه احتراق ۴۴ bar بوده و سیال عامل نیتروژن خنک با دمای کل ۳۰۰ K می‌باشد.

جدول (۲): مقادیر پارامترهای نازل و دیفیوزر لوله مستقیم در کار تجربی یووم و همکاران ۲۰۰۹ [۱۳].

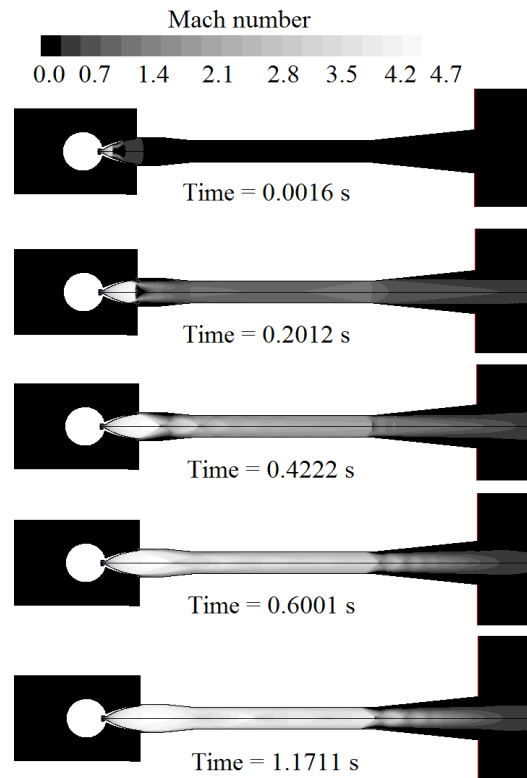
پارامتر	$\theta_{out}$	$\left(\frac{L}{D}\right)_d$	$\frac{A_d}{A^*}$	$\frac{A_e}{A^*}$	$A^*$
مقدار	۶°	۱۲/۳۸	۵۶/۲۵	۳۵/۰۲	۶/۱۶

در تحقیق حاضر، به منظور اعتبارسنجی روش تحلیل عددی دیفیوزر خروجی گازهای احتراقی، این مسئله به صورت تقارن محوری با روش چگالی مبنای ناپایا تحلیل عددی شده است. در این تحلیل از مدل توربولانسی k $\omega$ -SST استفاده شده است. همچنین از یک شبکه محاسباتی بی‌سازمان مثلثی شامل ۵۰۰۰۰ گره محاسباتی در دامنه حل استفاده شده است با توجه به این که فشار محفظه احتراق ثابت است نتیجه نهایی این شبیه‌سازی به حالت پایا همگرا شده است. در شکل ۵-الف نتایج تحقیق حاضر با نمایش کانتور عدد ماخ جریان در داخل نازل و دیفیوزر نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۵-ب نتایج تجربی یووم و همکارانش ۲۰۰۹ با نمایش منحنی فشار استاتیک در طول دیفیوزر با نتایج شبیه‌سازی حاضر مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج کار تجربی نشان می‌دهد که تطابق خیلی خوبی بین آنها وجود دارد.

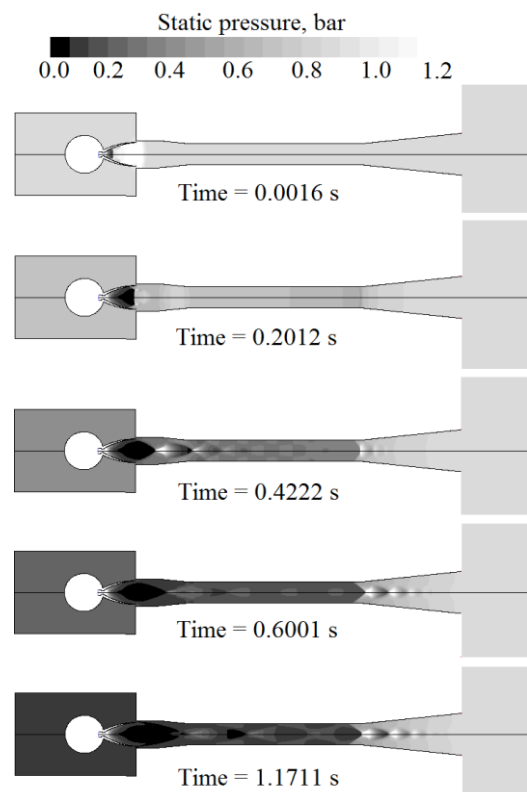
مطابق منحنی فشار ارائه شده در طول دیواره دیفیوزر (شکل ۵-ب)، در بازه طولی ۱ < X/D < ۴، دو مورد افزایش فشار پله‌ای در مسیر جریان اتفاق افتاده است. از کانتور عدد ماخ در شکل ۵-الف واضح است که افزایش فشار ناگهانی اولی در نتیجه برخورد جت سیال خروجی نازل و تشکیل موج ضربه‌ای مایل در این محل بوجود آمده و در ادامه افزایش فشار ناگهانی دومی مربوط به جدایش جریان از سطح دیفیوزر می‌باشد. بعد از جدایش جریان از دیواره تا انتهای دیفیوزر جریان در مجاورت دیواره مادون صوت بوده و در اثر تشکیل موج‌های ضربه‌ای در هسته مرکزی دیفیوزر فشار استاتیک بر روی دیواره نیز به تدریج افزایش یافته است، تا اینکه در انتهای دیفیوزر فشار استاتیک سیال برابر با فشار اتمسفر محلی شده است.

در این لحظه هنوز نازل موتور راه‌اندازی نشده است. در لحظه  $0.4222$  s در داخل نازل موج ضربه‌ای جریان وجود ندارد و به عبارت دیگر نازل راه‌اندازی شده است. در این حالت، امواج انبساطی از لبه‌های نازل به داخل دیفیوزر وارد می‌شود. با این حال بخش ورودی دیفیوزر به طور کامل از جریان مافوق صوت پر نشده است. در اثر انبساط جریان در ورودی دیفیوزر فشار استاتیک در نزدیکی دیواره دیفیوزر پایین آمده و دلیل کاهش فشار محفظه خلاء در این لحظه به این موضوع بر می‌گردد. در لحظه  $0.6$  s بخش بزرگی از گلوگاه ثانویه و همچنین ورودی دیفیوزر توسط جریان مافوق صوت پر شده است. با این حال قسمت‌های ورودی دیفیوزر به دلیل وارد شدن جریان سرعت پایین از محفظه خلاء هنوز مادون صوت می‌باشد. در این حالت چون شرایط محیطی حاکم در محفظه خلاء به فشار کمتر از فشار خروجی نازل نرسیده است، دیفیوزر در حالت راه‌اندازی قرار ندارد و تراست ایجاد شده به طور دقیق قابل اندازه‌گیری نیست. با گذشت زمان تخلیه جریان در محفظه خلاء ادامه پیدا می‌کند. در لحظه  $1.1711$  s موج ضربه‌ای مایل در ورودی دیفیوزر تشکیل می‌شود. در این لحظه فشار محفظه خلاء اندکی کمتر از فشار خروجی نازل بوده و فشار استاتیک در خروجی دیفیوزر برابر با فشار استاتیک اتمسفر محلی است. به عبارت دیگر شرایط خلاء نسبی در پیرامون نازل ایجاد شده است و گازهای احتراقی از فشار بسیار کم در خروجی نازل تا فشار اتمسفر در خروجی دیفیوزر به طور تدریجی متراکم شده است. مطابق این بررسی کاملاً مشخص است که رسیدن به حالت راه‌اندازی دیفیوزر نیازمند سپری شدن یک بازه زمانی می‌باشد که در آن شرایط محیطی پیرامون نازل به سمت شرایط خلاء نسبی میل می‌کند.

در شکل ۸ سرعت تخلیه شدن محفظه خلاء بر حسب زمان نمایش داده شده است. مطابق شکل در لحظات اولیه (تا  $0.2376$  s) سرعت تخلیه شدن علامت منفی داشته است. به عبارت دیگر تا این لحظه بخشی از گازهای حاصل از احتراق وارد محفظه خلاء شده است. دلیل این پدیده به تشکیل موج ضربه‌ای قائم در داخل نازل بر می‌گردد که در اثر آن فشار سیال در دهانه محفظه خلاء بیشتر شده و در اثر آن سیال داغ وارد محفظه خلاء می‌شود. شکل ۹ بردار سرعت جریان را در لحظه  $0.076$  s نمایش داده است. در این لحظه سرعت گازهای وارد شده به محفظه خلاء  $346$  m/s است. بعد از لحظه  $0.2376$  s در اثر کاهش یافتن فشار گازهای احتراقی در دهانه محفظه،



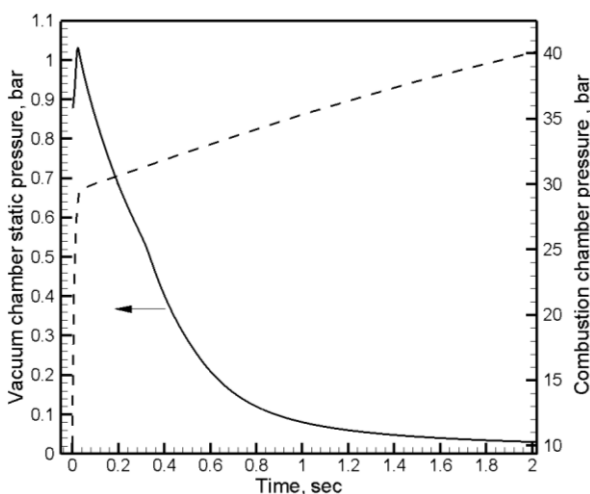
شکل (۶): کانتور عدد ماخ جریان در زمان‌های مختلف در حالت بدون پیش خلاء.



شکل (۷): کانتور فشار استاتیک جریان در زمان‌های مختلف در حالت بدون پیش خلاء.



منحنی فشار استاتیک سیال در محفظه خلاء بر حسب زمان در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. این منحنی روند تدریجی تخلیه شدن محفظه خلاء را نشان می‌دهد و در تحلیل‌های غیردائم هستند خلاء از اهمیت زیادی برخوردار است. به عبارت دیگر با استفاده از این منحنی عملکرد راه‌اندازی دیفیوزر استند خلاء سنجیده می‌شود. مطابق شکل مزبور ابتدا فشار محفظه خلاء به دلیل حضور موج ضربه‌ای در داخل نازل افزایش یافته و سپس با گذشت زمان در اثر مکش ایجاد شده از جت گازهای احتراقی خارج شده از نازل به تدریج کاهش یافته است.

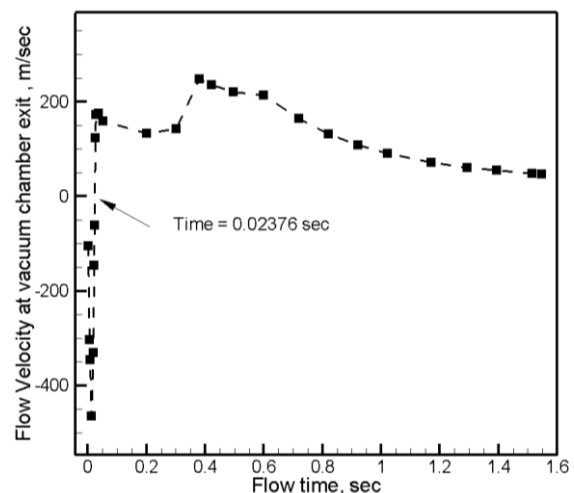


شکل (۱۱): فشار استاتیک متوسط سیال در محفظه خلاء بر حسب زمان در حالت بدون پیش خلاء.

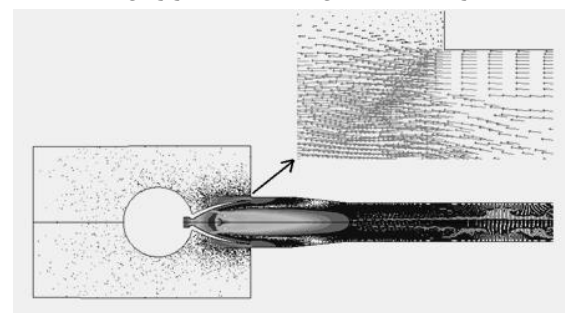
قابل ذکر است که روند تغییرات فشار محفظه با زمان در این بررسی با تحقیقات مشابه ارائه شده در مرجع [۱] همخوانی دارد. مطابق شکل ۱۱، در لحظه  $1/2$  s فشار متوسط داخل محفظه در حدود  $0/06$  bar است. به عبارت دیگر فشار محیط اطراف نازل کمتر از فشار سیال خروجی نازل در عملکرد نامی آن است. بنابراین، از این لحظه به بعد تراست موتور قابل اندازه‌گیری خواهد بود. با گذشت زمان و افزایش فشار احتراق فشار محفظه خلاء بیشتر پایین می‌آید به طوری که فشار متوسط داخل محفظه در لحظه  $2$  s در حدود  $0/03$  bar شده است.

در این بررسی دمای کل سیال در محفظه احتراق  $3400$  K و دیواره دیفیوزر عایق حرارتی فرض شده است. منحنی دما- زمان سیال داخل محفظه خلاء در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

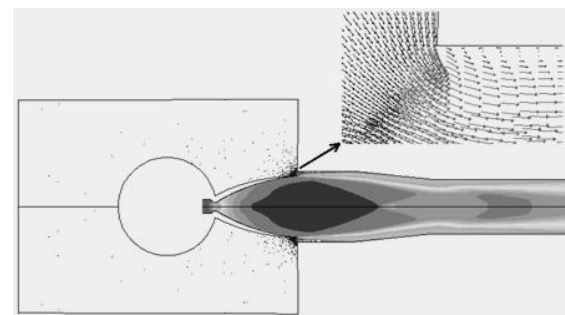
تخلیه گازهای درون محفظه خلاء شروع می‌شود. به عبارت دیگر انبساط جریان در وروی دیفیوزر باعث ایجاد مکش در دهانه محفظه خلاء شده و جریان از داخل محفظه به داخل دیفیوزر برقرار می‌شود. در شکل ۱۰ کانتور بردار سرعت جریان در لحظه  $0/6001$  s نمایش داده شده است. در این لحظه سرعت متوسط جریان وارد شده به دیفیوزر از محفظه خلاء در حدود  $213$  m/s است. با گذشت زمان فشار محفظه خلاء پایین آمده و بنابراین اختلاف فشار در دهانه محفظه خلاء کاهش پیدا می‌کند و در اثر آن به مرور زمان سرعت تخلیه شدن کاهش پیدا می‌کند و به سمت صفر میل می‌کند.



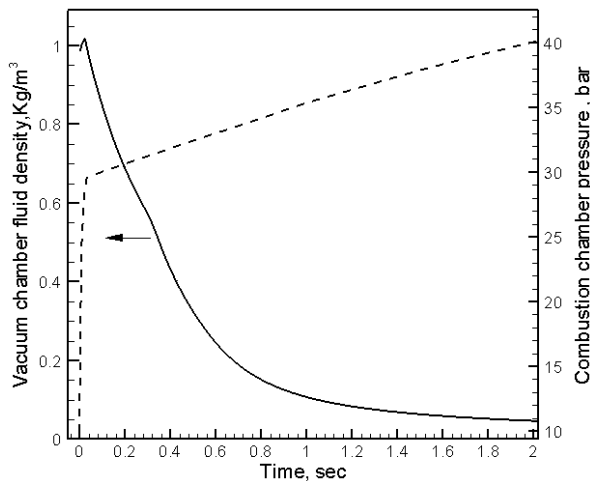
شکل (۸): سرعت تخلیه شدن محفظه خلاء در زمان‌های مختلف.



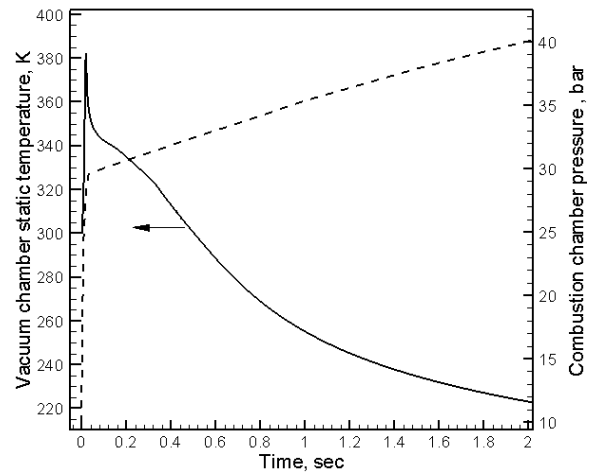
شکل (۹): کانتور بردار سرعت جریان در لحظه  $0/0071$  s.



شکل (۱۰): کانتور بردار سرعت جریان در لحظه  $0/6001$  s.



شکل (۱۳): دانسیته متوسط سیال در محفظه خلاء برحسب زمان در حالت بدون پیش خلاء.



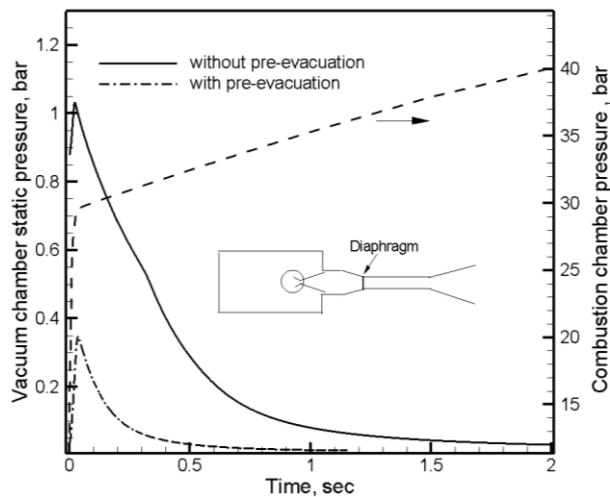
شکل (۱۲): دمای استاتیک متوسط سیال در محفظه خلاء برحسب زمان در حالت بدون پیش خلاء.

۵- بررسی اثر پیش خلاءسازی در زمان راهاندازی دیفیوزر در این بخش نتایج تحلیل عددی غیردائم جریان در دیفیوزر با شرایط اولیه خلاء نسبی در محفظه خلاء و بخشی از دیفیوزر ارائه می‌شود. شبیه‌سازی جریان با شرایط اولیه نشان داده شده در شکل ۲ با پروفیل فشار- زمان محفظه احتراق انجام شده است. شکل ۱۴ منحنی فشار و دمای متوسط سیال در پشت دیافراگم را بر حسب زمان نمایش داده است. مطابق شکل مزبور در لحظه بسیار کوتاهی سیال گرم به محل دیافراگم رسیده و در کمتر از  $0.015$  s فشار متوسط سیال در سطح داخلی دیافراگم بزرگتر از فشار اتمسفر محلی شده است. همچنین دمای متوسط سیال در محل دیافراگم در لحظه کوتاه اشاره شده تا  $500$  K رسیده است. کانتور فشار استاتیک در میدان جریان در این حالت در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. در این لحظه در اثر اختلاف فشار به وجود آمده، دیافراگم از حالت آبنندی خارج شده و محو می‌گردد. بعد از محو شدن دیافراگم با توجه به اینکه جریان سیال گرم هد دینامیکی کافی برای غلبه به شرایط اتمسفر محلی و انبساط مافوق صوت در طول گلوگاه ثانویه را ندارد، از شرایط پایین دست تاثیر گرفته و وردی دیفیوزر از حالت مافوق صوت خارج می‌شود و بنابراین، بخشی از جریان سیال گرم وارد محفظه خلاء شده و بنابراین فشار و دمای سیال در محفظه تست افزایش می‌یابد. با گذشت زمان و افزایش فشار محفظه احتراق، ورودی دیفیوزر به شرایط مافوق صوت بر می‌گردد و انبساط جریان در ورودی دیفیوزر باعث تخلیه شدن محفظه خلاء می‌شود.

دمای استاتیک سیال داخل محفظه خلاء قبل از شروع به کار موتور  $300$  K بوده است. به دلیل ورود سیال گرم به داخل محفظه در لحظه‌های اولیه دمای متوسط سیال در داخل محفظه خلاء تا  $380$  K افزایش پیدا کرده است. سپس با گذشت زمان به دلیل تخلیه شدن محفظه خلاء دمای محفظه به تدریج کاهش می‌یابد. به طوری که در لحظه  $1/2$  s دمای محفظه خلاء در حدود  $245$  K است. به عبارت دیگر دمای محفظه خلاء در این لحظه در حدود  $28^\circ\text{C}$  می‌باشد. همچنین در لحظه  $2$  s دمای متوسط محفظه خلاء در حدود  $222$  K است. دقت شود که این کاهش دما در اثر تخلیه شدن سیال از محفظه اتفاق افتاده است. منحنی دانسیته- زمان سیال داخل محفظه خلاء در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در لحظه‌های  $1/2$  s و  $2$  s دانسیته سیال داخل محفظه خلاء به ترتیب در حدود  $0.083$  و  $0.045$   $\text{kg/m}^3$  است. به عبارت دیگر به دلیل ناچیز بودن جرم سیال داخل محفظه دمای بسیار پایین سیال تهدید جدی برای ابزار اندازه‌گیری موجود در محفظه به شمار نمی‌رود.

در این بررسی مشخص شد که تست زمینی موتور فضایی مفروض را می‌توان بدون پیش خلاءسازی در استند خلاء انجام داد. در این حالت در حدود  $1/2$  s زمان لازم است تا دیفیوزر راهاندازی شده و شرایط خلاء نسبی را در پیرامون نازل و محفظه خلاء ایجاد نماید. بنابراین تا  $1/2$  s اول تست، تراست موتور قابل اندازه‌گیری نبوده و پس از آن می‌توان تراست موتور را با دقت مناسبی اندازه‌گیری کرد.

در شکل ۱۷ تغییرات زمانی فشار متوسط محفظه خلاء در دو حالت بدون پیش خلاء و با پیش خلاءسازی مقایسه شده است. اگر مبنای راهاندازی دیفیوزر رسیدن به فشار متوسط ۰/۰۶ bar در محفظه خلاء قرار داده شود، در حالت پیش خلاءسازی زمان راهاندازی دیفیوزر ۰/۳ s به دست می آید.

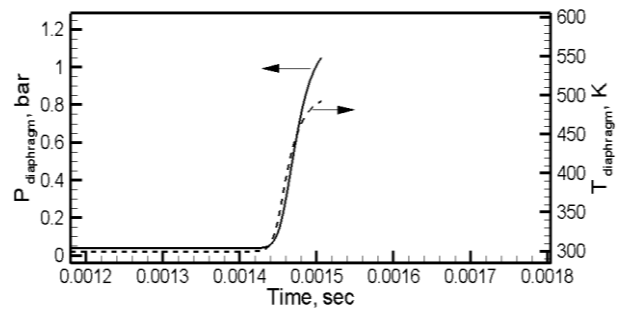


شکل (۱۷): مقایسه تغییرات زمانی فشار استاتیک محفظه خلاء در دو حالت بدون پیش خلاء و با پیش خلاءسازی.

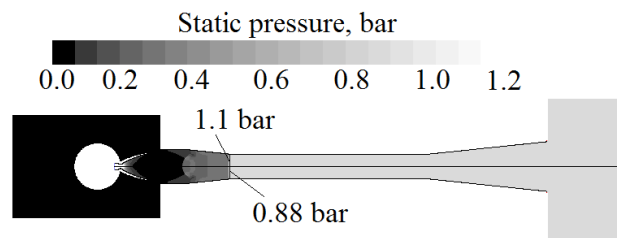
در حالی که در حالت بدون پیش خلاءسازی زمان راهاندازی دیفیوزر ۱/۲ s بوده است. به عبارت دیگر با پیش خلاءسازی انجام شده زمان راهاندازی دیفیوزر ۷۵٪ کاهش یافته است. در تحقیقی مشابه در مرجع [۷] نیز اثر پیش خلاءسازی با موقعیت دیافراگم در ابتدای ورودی گلوگاه ثانویه مورد مطالعه قرار گرفته است. با یک حجم محفظه خلاء بزرگ، نشان داده شده است که در حدود ۵۰٪ زمان راهاندازی دیفیوزر نسبت به حالت بدون پیش کاهش پیدا کرده است. در تحقیق حاضر اثر حجم محفظه خلاء در کاهش یا افزایش زمان راهاندازی دیفیوزر در بخش ۷ مورد بررسی قرار گرفته است.

در این بررسی مشخص شد که با پیش خلاءسازی استند خلاء می توان تست زمینی موتور فضایی مفروض را با عملکرد مناسب تری انجام داد. با این راهکار در لحظه کوتاه تری (کمتر از ۰/۳ s) دیفیوزر راهاندازی می شود.

۶- بررسی اثر موقعیت دیافراگم در زمان راهاندازی دیفیوزر جهت بررسی تاثیر ناحیه پیش خلاءسازی در زمان راهاندازی دیفیوزر، تحلیل عددی جریان سیال گرم با تغییرات محل

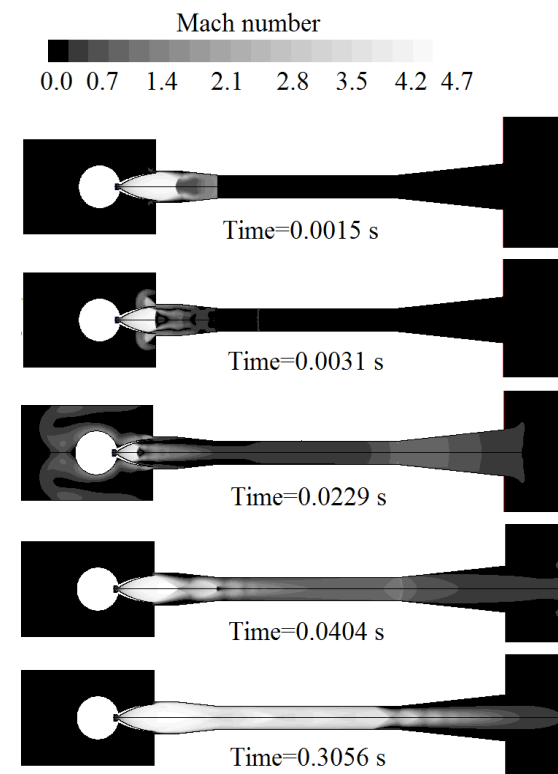


شکل (۱۴): تغییرات زمانی فشار (P<sub>diaphragm</sub>) و دمای (T<sub>diaphragm</sub>) متوسط سیال در سطح داخلی دیافراگم.

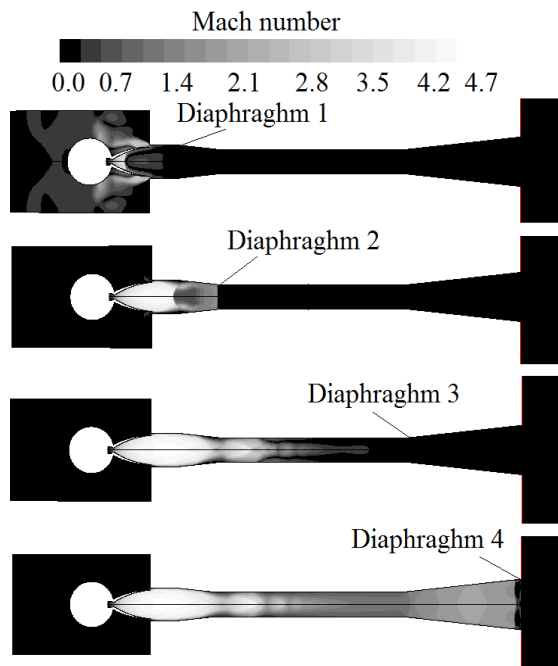


شکل (۱۵): کانتور فشار استاتیک جریان در پشت دیافراگم در لحظه محو شدن دیافراگم.

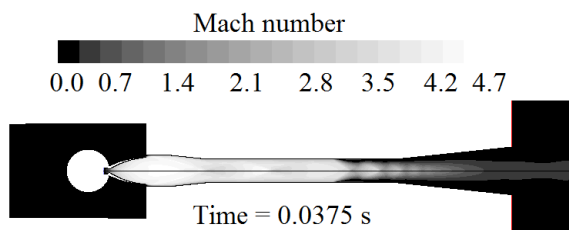
شکل ۱۶ کانتور عدد ماخ جریان را در زمان های مختلف در بعد از محو شدن دیافراگم نمایش داده است.



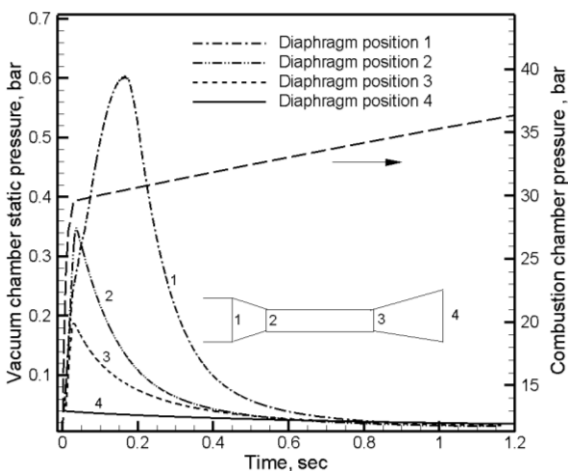
شکل (۱۶): کانتور عدد ماخ جریان در زمان های مختلف بعد از محو شدن دیافراگم.



شکل (۱۸): کانتور عدد ماخ جریان در لحظه ماقبل محو شدن دیافراگم در موقعیت‌های مختلف دیافراگم



شکل (۱۹): کانتور عدد ماخ در لحظه  $0.03749$  s (زمان راه‌اندازی دیفیوزر) در بعد از محو شدن دیافراگم در موقعیت انتهای دیفیوزر.



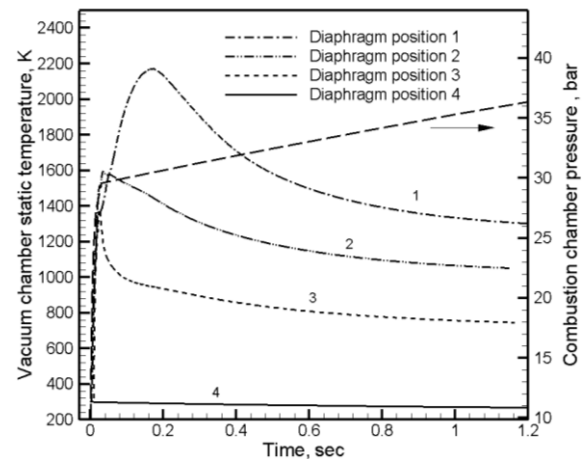
شکل (۲۰): تغییرات زمانی فشار استاتیک محفظه خلاء در حالت پیش خلاء با موقعیت‌های مختلف دیافراگم

دیافراگم انجام شده است. چهار محل متفاوت برای دیافراگم در نظر گرفته شده است: ابتدای ناحیه رمپ، ابتدای گلوگاه ثانویه، انتهای گلوگاه ثانویه و انتهای دیفیوزر. شبیه‌سازی عددی جریان با پیش خلاءسازی نواحی قبل از دیافراگم انجام شده است. شرط محو شدن دیافراگم در هر مورد، رسیدن سیال گرم به فشار متوسط  $1/1$  bar در سطح داخلی دیافراگم قرار داده شده است. در شکل ۱۸ کانتور عدد ماخ در لحظه ماقبل محو شدن دیافراگم برای هر چهار حالت نمایش داده شده است. به عبارت دیگر این کانتورها مربوط به لحظه‌ای هستند که فشار متوسط سیال در سطح داخلی دیافراگم برابر  $1/1$  bar است. مطابق شکل مزبور، در حالتی که دیافراگم در ابتدای ناحیه رمپ قرار داده شده است، موج ضربه‌ای جریان داخل نازل قرار دارد. همانطوری که در بخش ۴ توضیح داده شد، در این شرایط سیال گرم با سرعت زیادی وارد محفظه خلاء می‌شود. در حالت‌های دیگر موج ضربه‌ای جریان در داخل نازل قرار ندارد و جریان خروجی از نازل منبسط شده است. بنابراین نازل موتور کاملاً به شرایط راه‌اندازی رسیده است. در حالت‌هایی که موقعیت دیافراگم در ابتدا و انتهای گلوگاه ثانویه باشد، بخش‌هایی از دیفیوزر مافوق صوت شده است. بعد از پاره شدن دیافراگم در این حالت‌ها، روند توسعه جریان در دیفیوزر مطابق توضیحات ارائه شده در بخش ۵ اتفاق می‌افتد. روند توسعه جریان با نمایش کانتور عدد ماخ جریان در داخل دیفیوزر در بعد از محو شدن دیافراگم برای حالتی که دیافراگم در ابتدای گلوگاه ثانویه است در شکل ۱۶ ارائه شده است. برای حالتی که دیافراگم در انتهای گلوگاه ثانویه قرار داشته نیز همین روند توسعه جریان در بعد از محو شدن دیافراگم صادق است. همچنین مطابق شکل، در حالتی که دیافراگم در موقعیت انتهای دیفیوزر قرار داده شده باشد، بخش وسیعی از دیفیوزر مخصوصاً گلوگاه ثانویه تا قبل از محو شدن دیافراگم مافوق صوت شده است. در شکل ۱۹ کانتور عدد ماخ در لحظه راه‌اندازی دیفیوزر در بعد از محو شدن دیافراگم نشان داده شده است. مطابق شکل مزبور در این حالت در لحظه بسیار کوتاهی کمتر از  $0.04$  s دیفیوزر راه‌اندازی شده است.

شکل‌های ۲۱ - ۲۰ تغییرات زمانی فشار متوسط و دمای متوسط سیال در محفظه خلاء را برای موقعیت‌های مختلف دیافراگم نمایش داده است.

وابسته است. با بررسی‌های انجام شده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که هر چه در طول دیفیوزر فضای پیش خلاءسازی افزایش داده شود، در اثر مافوق صوت شدن جریان در بخش وسیعی از ناحیه داخل دیفیوزر امکان غلبه جریان سیال گرم به شرایط اتمسفر محلی بعد از محو شدن دیافراگم بالا می‌رود و این امر راه‌اندازی زود هنگام دیفیوزر را رقم می‌زند. نویسندگان مقاله حاضر در مرجع [۱۱] با بررسی‌های عددی بحث هیستریزس<sup>۱</sup> بودن جریان گازها در دیفیوزرهای گلوگاه ثانویه را مطرح کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که در صورت مافوق صوت شدن جریان در یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه، افت فشار کل سیال در طول دیفیوزر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پیش خلاءسازی بخش عمده دیفیوزر منجر به مافوق صوت شدن آن در قبل از محو شدن دیافراگم شده و این امر در حفظ فشار کل سیال گرم جهت غلبه بر شرایط اتمسفر محلی موثر بوده و باعث راه‌اندازی زود هنگام دیفیوزر شده است.

**۷- بررسی اثر حجم محفظه خلاء در زمان راه‌اندازی دیفیوزر**  
به منظور بررسی اثر حجم محفظه خلاء در زمان راه‌اندازی دیفیوزر، محل دیافراگم در انتهای گلوگاه ثانویه قرار داده شده است. تحلیل عددی با سه حجم مختلف محفظه خلاء ( $0.166 \text{ m}^3$ ،  $1.36$ ، و  $5/2$ ) با پیش خلاءسازی نواحی قبل از دیافراگم انجام شده است. در شکل ۲۲ تغییرات زمانی فشار در محفظه خلاء با سه حجم مختلف محفظه خلاء نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور، با افزایش حجم محفظه خلاء، هرچند مقدار بیشینه فشار سیال در محفظه خلاء کاهش یافته ولی فشار در محفظه خلاء با نرخ خیلی کمتری کاهش می‌یابد، به طوری که مدت زمان راه‌اندازی دیفیوزر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به عبارت دیگر هر چه حجم محفظه خلاء بزرگتر باشد، روند پر و خالی شدن محفظه خلاء بسیار تدریجی‌تر بوده و راه‌اندازی دیفیوزر دیرتر رخ داده است. قابل ذکر است که در بررسی‌های تجربی مرجع [۸] با نصب محل دیافراگم در ابتدای گلوگاه ثانویه و مقایسه تغییرات زمانی فشار در دو محفظه خلاء کوچک و بزرگ، نتایج مشابهی ارائه شده است که در جهت تایید بررسی‌های عددی حاضر می‌باشد.

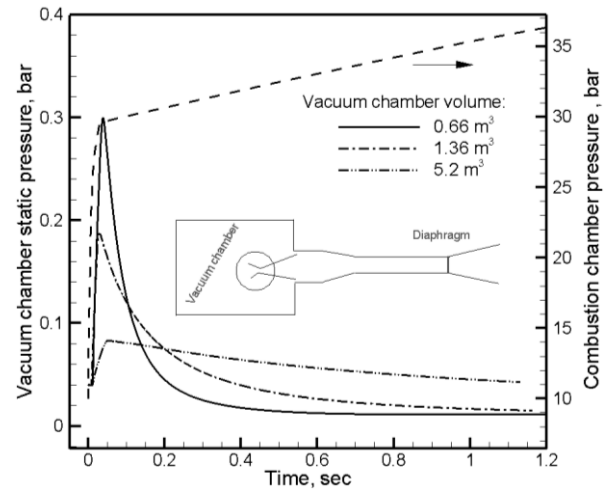


شکل (۲۱): تغییرات زمانی دمای استاتیک محفظه خلاء در حالت پیش خلاء با موقعیت‌های مختلف دیافراگم.

مطابق شکل‌های مزبور، تاثیر ناحیه پیش خلاءسازی در تغییرات زمانی فشار محفظه خلاء قابل توجه است، به طوری که هر چه ناحیه پیش خلاءسازی در طول دیفیوزر بیشتر گسترش داده شود، زمان راه‌اندازی دیفیوزر (لحظه رسیدن محفظه به فشار  $0.06$  بار) بیشتر کاهش می‌یابد و دمای متوسط سیال در محفظه خلاء کمتر افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۲۰، در صورتی که محل دیافراگم در انتهای دیفیوزر قرار داده شود، تغییرات زمانی فشار داخل محفظه پیوسته کاهش یافته است. به عبارت دیگر، در این حالت راه‌اندازی دیفیوزر به طور آنی اتفاق می‌افتد و سیال گرم در زمان روشن شدن موتور فرصت وارد شدن به محفظه خلاء را پیدا نمی‌کند. در این حالت از ابتدای روشن شدن موتور می‌توان تراست آن را با دقت مناسبی اندازه‌گیری کرد. قابل ذکر است که در تحقیقات پارک و همکاران [۱۰] که با یک دیفیوزر لوله مستقیم با طول  $X/D=5$  و فشار احتراق نزدیک به  $50 \text{ bar}$  انجام شده است، در اثر پیش خلاءسازی محفظه تست و دیفیوزر (محل دیافراگم در انتهای دیفیوزر)، راه‌اندازی دیفیوزر به طور آنی اتفاق افتاده است. این در حالی است که در تحقیقات ایشان بدون پیش خلاءسازی راه‌اندازی دیفیوزر در حدود  $2/5 \text{ s}$  به تعویق افتاده است.

با وجود راه‌اندازی آنی دیفیوزر در صورت انتخاب انتهای دیفیوزر به عنوان محل دیافراگم در این مسئله، در کل نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد که وقوع این امر در تمامی دیفیوزرها حتمی است. چرا که مدت زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی یک دیفیوزر به پارامترهای هندسی و پروفیل فشار احتراق برحسب زمان

دیفیوزر دارد. نشان داده شد که در صورتی که ناحیه پیش خلاءسازی در طول دیفیوزر (به عبارتی در پایین دست جریان) به اندازه کافی بزرگ باشد، مثلاً موقعیت دیافراگم در انتهای دیفیوزر باشد، ممکن است راهاندازی دیفیوزر به صورت آنی اتفاق بیفتد و در این صورت از همان ابتدای روشن شدن موتور تراست موتور قابل اندازه‌گیری خواهد بود. همچنین اثر افزایش حجم محفظه تست پیش خلاء شده در مدت زمان راهاندازی دیفیوزر مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که افزایش ناحیه پیش خلاءسازی در بالادست جریان در دیفیوزر (محفظه تست) نتیجه مطلوبی از نظر کاهش مدت زمان راهاندازی دیفیوزر ندارد.



شکل (۲۲): تغییرات زمانی فشار در محفظه خلاء با سه

#### حجم مختلف محفظه خلاء

طبق بررسی‌های حاضر، اگر حجم محفظه خلاء بیش از حد مورد نیاز بزرگتر انتخاب شود، ممکن است بیشینه فشار در محفظه خلاء در لحظه پر شدن آن از سیال گرم کمتر از فشار راهاندازی دیفیوزر باشد، که در این صورت راهاندازی دیفیوزر آنی تلقی می‌شود. در عمل حجم مورد نیاز محفظه خلاء را فضای لازم دسترسی و جانمایی ابزار اندازه‌گیری تعیین می‌کند و افزایش بیش از حد حجم محفظه تست باعث بزرگتر شدن ابعاد استند خلاء می‌شود و عاری از عیب نمی‌باشد. صرف نظر از این حالت حدی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ناحیه پیش خلاءسازی در بالادست دیفیوزر (محفظه تست) نتیجه مطلوبی از نظر کاهش مدت زمان راهاندازی دیفیوزر ندارد.

#### ۸- نتیجه‌گیری

در این بررسی مشخص شد که بدون پیش خلاءسازی دیفیوزر می‌توان تست ارتفاع را برای موتور مورد نظر انجام داد. در این صورت در حدود  $1/2$  s زمان لازم است تا دیفیوزر راهاندازی شده و شرایط خلاء نسبی را در پیرامون نازل و محفظه خلاء ایجاد نماید. بنابراین، تا  $1/2$  s اول تست، تراست موتور قابل اندازه‌گیری نبوده و پس از آن می‌توان تراست موتور را با دقت خوبی اندازه‌گیری کرد. نشان داده شد که با پیش خلاءسازی دیفیوزر می‌توان تست ارتفاع را با عملکرد مناسب‌تری انجام داد. در این حالت در لحظه کوتاه‌تری دیفیوزر راهاندازی می‌شود. تحلیل‌های عددی با تغییر موقعیت دیافراگم در طول دیفیوزر انجام گرفت و اثبات شد که افزایش ناحیه پیش خلاءسازی در طول دیفیوزر تاثیر قابل توجهی در کاهش مدت زمان راهاندازی

#### ۹- مراجع

1. Park, B.H., Lim, J., Park, S., Lee, J. H., and Yoon, W.S. "Design and Analysis of a Second-throat Exhaust Diffuser for Altitude Simulation", Journal of Propulsion and Power, Vol. 28, No. 5, pp.1091-1104, 2012.
2. Annamalai, K., Satyanarayana, T.N.V., Sriramulu, V., and Bhaskaran, K.A., "Development of Design Methods for Short Cylindrical Supersonic Exhaust Diffuser", Experiments in Fluids, Vol. 29, No. 4, pp. 305-308, 2000.
3. Sankaran, S., Satyanarayana, T.N.V., Annamalai, K., Visvanathan, K., Babu, V., and Sundararajan, T., "CFD Analysis for Simulated Altitude Testing of Rocket Motors", Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 48, No. 2, pp.153-162, 2002.
4. Bartosiewicz, Y., Aidoun, Z., Desevaux, P., and Mercadier, Y., "Numerical and Experimental Investigations on Supersonic Ejectors", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 26, No. 1, pp. 56-70, 2005.
5. Kumaran, R.M. Sundararajan, T., and Raja., M.D., "Pressure Variation in Thrust Chamber During High Altitude Simulation", AIAA Paper 2009-798, 2009.
6. Park, B.H., Lim, J.H., and Yoon, W., "Fluid Dynamics in Starting and Terminating Transients of Zero-secondary Flow Ejector", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 29, No.1, pp. 327-339, 2008.
7. Ashokkumar, R. Sankaran, S., and Sundararajan, T., "Investigation on the Performance of Second Throat Supersonic Exhaust Diffuser for Starting Higher Area Ratio Nozzles", AIAA Paper 2012-3294, 2012.

11. Fouladi, N., Mohammadi, A., and Rezaei, H., "Numerical Design and Analysis of Supersonic Exhaust Diffuser in Altitude Test Simulator", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 159-168, 2016 (In Persian).
12. Kumaran, R.M. Sundararajan, T., Manohar, D.R., "Simulations of High Altitude Tests for Large Area Ratio Rocket Motors", *AIAA Journal*, Vol. 51, No. 2, pp. 433-443, 2013.
13. Yeom, H.W. Yoon, S., and Sung, H.G., "Flow Dynamics at the Minimum Starting Condition of a Supersonic Diffuser to Simulate a Rocket's High Altitude Performance on the Ground", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 254-261, 2009.
8. Ashokkumar, R., Sankaran, S., Srinivasan, K., and Sundararajan, T., "Effects of Vacuum Chamber and Reverse Flow on Supersonic Exhaust Diffuser Starting", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 2, pp. 750-754, 2015.
9. Annamalai, K., Visvanathan, K.; Sriramulu, V., and Bhaskaran, K.A., "Evaluation of the Performance of Supersonic Exhaust Diffuser Using Scaled Down Models", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 17, No. 3, pp. 217-229, 1998.
10. Park, B.H., Lee, J.H., and Yoon, W., "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*, Vol. 29, No. 5, pp. 1369-1379, 2008.