مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 185-196

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی اثر محدود کننده جریان برگشتی در عملکرد راه‌اندازی آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع

نعمت اله فولادی

دکترا، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی13445754، nfouladi@eri.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 اردیبهشت 1396

پذیرش: 01 خرداد 1396

ارائه در سایت: 22 تیر 1396

کلید واژگان:

آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع

محدود کننده جریان برگشتی

زمان راه‌اندازی دیفیوزر

شبیه‌سازی عددی جریان

چکیده

غالباً، در لحظه روشن شدن یک موتور در آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع، جریان گازهای احتراقی از هد دینامیکی کافی برای برقراری جریان مافوق-صوت در دیفیوزر خروجی گاز این آزمایشگاه برخوردار نیست. در این حالت، وقوع پدیده جریان برگشتی به داخل محفظه خلاء اجتناب‌ناپذیر است. جریان برگشتی گازهای دما بالا به محفظه خلاء، علاوه بر از بین بردن خلاء مطلوب و کاهش دقت اندازه‌گیری‌ها، زمان راه‌اندازی دیفیوزر را نیز به تعویق می‌اندازد و ممکن است به سیستم‌های اندازه‌گیری آسیب برساند. در تحقیق حاضر ابتدا با شبیه‌سازی عددی فرآیند روشن شدن موتور در داخل یک آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع، پدیده جریان برگشتی در این سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. در گام بعدی، با نصب مانع محدود کننده جریان برگشتی با ارتفاع مختلف در محل ورودی محفظه خلاء، تاثیر آن در کاهش نرخ جریان برگشتی و عملکرد راه‌اندازی دیفیوزر مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، راهکار مانع جریان برگشتی یکطرفه برای اولین بار در این تحقیق ارائه شده و میزان بهبود عملکرد راه‌اندازی دیفیوزر با راهکار مزبور مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی‌های عددی حاضر نشان می‌دهد که استفاده از مانع جریان برگشتی عادی علی‌رغم تاثیر قابل توجه آن در کاهش بیشینه فشار و دمای محفظه خلاء، کاهش چشم‌گیری در زمان راه‌اندازی دیفیوزر ایجاد نمی‌کند. حتی با حضور این مانع حالت پایای مطلوب در محفظه خلاء با تاخیر ایجاد می‌شود. در حالیکه بکارگیری مانع جریان برگشتی یکطرفه علاوه بر حفظ مزیت‌های روش عادی، کاهش قابل توجهی در زمان راه‌اندازی دیفیوزر و رسیدن به فشار مطلوب در محفظه خلاء ایجاد می‌کند.

Numerical investigation of back flow arrester effect on altitude test simulator starting performance

Nematollah Fouladi

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

* P.O.B. 13445754, Tehran, Iran, nfouladi@eri.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 April 2017
Accepted 22 May 2017
Available Online 13 July 2017

Keywords:
Altitude test simulator
backflow arrester
diffuser starting time
computational fluid dynamics

ABSTRACT

During transient phase of motor burning in an altitude test simulator, the low momentum exhaust combustion gases could not establish supersonic flow in the exhaust diffuser. This leads to a reverse flow of the exhaust gases into the vacuum chamber through the annular gap between nozzle and diffuser walls. This spoils the vacuum in the chamber and it is potentially dangerous for measurement instruments inside the vacuum chamber. In this research, at first, the physics of the flow at initial transient phase of motor burning is investigated numerically and the backflow phenomenon is illustrated. Then, the influences of backflow arrester (BFA) in variations of vacuum chamber pressure and temperature are studied at the transient starting phase. It has been found that applying BFA to decrease the backflow to the vacuum chamber has no significant effect on starting time of the diffuser but it has strong effect on peak pressure and temperature reduction of the vacuum chamber. Also, it is found that reaching steady condition in vacuum chamber is delayed with this instrument. However; using one-way backflow arrester of reasonable size, both the starting time of diffuser and the peak temperature of the vacuum chamber experience a strong reduction. Moreover, the vacuum chamber steady condition is accelerated with this alternative. Therefore, this device is more suitable than conventional BFA for transient starting phase of the altitude test simulators.

1- مقدمه

در تست زمینی یک موتور فضایی با شرایط اتمسفر محیطی به دلیل نسبت انبساط بالای نازل جریان گازهای احتراقی از بدنه آن جدا شده و منجر به افت شدید ضربه ویژه[1] می‌شود. بنابراین عملکرد واقعی موتور با این شیوه قابل ارزیابی نیست. برای برطرف کردن این معضل در اغلب تست استندها از آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع استفاده می‌شود [2,1]. در یک آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع، محیط اطراف موتور و نازل توسط یک محفظه تست (یا محفظه خلاء) و یک لوله گازدینامیکی (یا دیفیوزر) طویلی که قطر آن در محل نازل اندکی بزرگتر از قطر خروجی نازل است از محیط اتمسفر جدا می‌شود. انبساط

[1]Specific impulse

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Nematollah Fouladi, Numerical investigation of back flow arrester effect on altitude test simulator starting performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 185-196, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

جریان گازهای مافوق‌صوت خروجی از نازل در ورودی دیفیوزر محیط فشار پایین لازم را در محفظه خلاء ایجاد کرده و باعث پمپ خودکار گازهای احتراقی به محیط اتمسفر محلی می‌شود. بنابراین عملکرد موتور بدون تشکیل موج ضربه‌ای و جدایش جریان در نازل آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مدت زمان لازم برای ایجاد شرایط خلاء لازم در پیرامون نازل از لحظه روشن شدن یک موتور اهمیت زیادی در کارایی آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع دارد و به اصطلاح زمان راه‌اندازی شدن دیفیوزر[1] 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. از لحظه شروع به کار موتور تا لحظه راه‌اندازی شدن دیفیوزر به دلیل حاکم بودن شرایط گذرا فشار خلاء لازم در اطراف موتور برقرار نیست. یکی از مشکلاتی که در این شرایط در استندهای خلاء پیش می‌آید، نفوذ جریان گازهای احتراقی (با دمای بالای K 2000) به داخل محفظه خلاء است که به جریان برگشتی[2] معروف است [4,3]. جریان برگشتی تبعاتی ازجمله افزایش زمان راه‌اندازی دیفیوزر و گرم شدن محفظه خلاء و ابزارهای اندازه‌گیری موجود در آن دارد و ممکن است آسیب جدی به این سیستم‌ها وارد نماید. علاوه بر آن باعث نوسانات شدید تراست اندازه‌گیری شده توسط لودسل می‌شود و دقت اندازه‌گیری‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. از این‌رو کاهش دادن جریان برگشتی در زمان روشن شدن موتور اهمیت زیادی در عملکرد بهینه تست استندهای خلاء دارد.

با بهره‌گیری از اجکتورهای سیال ثانویه[3] در زمان روشن شدن موتور می‌توان تا حدودی از نفوذ سیال گرم به محفظه خلاء جلوگیری کرد. با این روش زمان راه‌اندازی دیفیوزر نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در عمل به دلیل پیچیدگی‌های زیاد فیزیک جریان در فاز روشن شدن موتور، بکارگیری این روش با مشکلات زیادی خصوصاً در تعیین دبی سیال ثانویه لحظه‌ای همراه است. عمده کاربرد این روش در تست موتورهایی با فشار احتراق نسبتاً پایین است که مجهز به نازل با نسبت انبساط سطحی بالایی باشند. غالباً در تست اینگونه موتورها در آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع هد دینامیکی گازهای احتراقی برای پمپ شدن خودکار در داخل دیفیوزر کافی نیست [5,4].

یکی از راهکارهای موثر جهت کاهش دادن مدت زمان راه‌اندازی دیفیوزر پیش‌خلاء کردن بخشی از نواحی داخلی دیفیوزر و محفظه خلاء می‌باشد [7,6,3]. پیش‌خلاءسازی توسط یک پمپ خلاء و یا یک اجکتور سیال ثانویه قبل از شروع به روشن شدن موتور انجام می‌شود. در عمل با وجود بکارگیری این روش غالباً راه‌اندازی دیفیوزر به صورت آنی اتفاق نمی‌افتد و میزان کاهش زمان راه‌اندازی به عوامل مختلفی از جمله هندسه دیفیوزر، فضای پیش‌خلاء‌سازی و پروفیل فشار احتراق برحسب زمان بستگی دارد. بنابراین معضل جریان برگشتی در این روش هر چند تاحدودی کاهش می‌یابد، ولی همچنان بعنوان یک خطر بالقوه محسوب می‌شود.

در تحقیق حاضر جهت کاهش دادن جریان برگشتی علاوه بر پیش‌خلاء کردن دیفیوزر و محفظه خلاء از یک مانع محدود کننده جریان برگشتی (BFA[4]) در موقعیت گپ حلقوی مابین سطح خروجی نازل و سطح ورودی دیفیوزر استفاده می‌شود. مانع مزبور به بدنه دیفیوزر متصل است. جستجو در تحقیقات انجام شده در خصوص آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع نشان می‌دهد که تاثیر BFA در عملکرد راه‌اندازی این آزمایشگاه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. اشوکومار و همکاران 2015 با انجام یک تست تجربی نشان دادند که با استفاده از BFA بیشینه فشار داخل محفظه خلاء در اثر کاهش جریان برگشتی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [7]. نگاهی دقیق‌تر به بررسی‌های این مرجع نشان می‌دهد که روند بررسی این موضوع از پختگی لازم برخوردار نیست و بیشتر اهمیت استفاده از BFA مورد تاکید قرار گرفته است. ضمن اینکه تاثیر اندازه BFA مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق با شبیه‌سازی عددی جریان سیال داغ، تاثیر نصب BFA در آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع با اندازه‌های مختلف علاوه بر بیشینه فشار محفظه خلاء، زمان راه‌اندازی دیفیوزر و دمای متوسط محفظه خلاء نیز مورد بررسی قرار گرفته است و نقاط ضعف و قوت این روش آشکار شده است. نشان داده شده است که بکارگیری BFA علی‌رغم کاهش قابل توجه بیشینه فشار و دمای محفظه خلاء تاثیر چندانی در کاهش زمان راه‌اندازی این سیستم ندارد و حتی ممکن است رسیدن به فشار مطلوب در محفظه خلاء را به تعویق بیندازد. در ادامه تحقیق، مانع جریان برگشتی یکطرفه OWBFA[5] بعنوان یک راهکار جدید برای برطرف کردن نقاط ضعف BFA مطرح شده و با تحلیل عددی جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه مقاله، در بخش 2 کلیات آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع و انگیزه تحقیق بیان شده است. در بخش 3 روش تحلیل عددی در شبیه‌سازی جریان مورد تشریح قرار گرفته است، استقلال از شبکه حل عددی بررسی شده و اعتبارسنجی تحلیل عددی انجام شده است. در ادامه، نتایج تحقیق در بخش 4 ارائه شده است. در این بخش در گام اول، فیزیک جریان در آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع در زمان روشن شدن موتور و پدیده جریان برگشتی و دلایل ایجاد آن مورد تشریح قرار گرفته است. در گام بعدی اثر نصب محدود کننده جریان برگشتی با اندازه‌های مختلف در محل گپ حلقوی بر تغییرات زمانی فشار و دمای محفظه خلاء و زمان راه‌اندازی دیفیوزر مورد بررسی قرار گرفته است. در گام نهایی بخش 4، راهکار OWBFA در جهت بهبود عملکرد محدود کننده جریان برگشتی ارائه شده و بررسی‌های لازم در این خصوص انجام شده است. نهایتا در بخش 5 نتیجه‌گیری تحقیق ارائه شده است.

2- کلیات آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع و انگیزه تحقیق

شماتیکی از هسته اصلی یک استند خلاء در شکل 1 نمایش داده شده است. این سیستم از یک لوله گازدینامیکی (دیفیوزر[6]) و یک محفظه تست (و یا محفظه خلاء[7]) تشکیل شده است. لوله گازدینامیکی از یک طرف به محفظه خلاء متصل است و از طرف دیگر در محیط اتمسفر محلی قرار دارد. موتور و نازل در داخل محفظه خلاء قرار داشته و هیچگونه اتصالی به بدنه محفظه ندارند. موتور مورد آزمایش از طریق یک شفت انتقال نیرو به لودسل متصل است که اندازه‌گیری تراست موتور را بر عهده دارد و می‌تواند داخل و یا خارج محفظه خلاء قرار داشته باشد. غالباً در این ساختار سطح خروجی نازل و سطح ورودی دیفیوزر در یک صفحه قرار دارند و یک گپ حلقوی در این

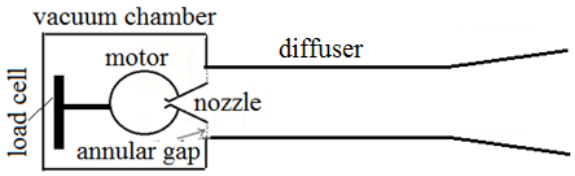

Fig. 1 Schematic of an altitude test simulator.

شکل 1 شماتیکی از یک سیستم شبیه‌ساز ارتفاع

[1] Diffuser starting time
[2] Backflow
[3] Secondary flow ejectors
[4] Backflow arrester
[5] One-way backflow arrester
[6] Diffuser
[7] Vacuum chamber

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

صفحه برای محفظه خلاء تشکیل می‌شود که می‌تواند مجرای عبور جریان مابین ورودی دیفیوزر و محفظه خلاء باشد. در مرجع [7] تاثیر عدم قرار گرفتن سطوح مذکور در یک صفحه مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف اصلی اغلب طراحان شبیه‌ساز ارتفاع تعیین پارامترهای هندسی دیفیوزر به نحوی است که دو وظیفه پمپ خودکار گازهای احتراقی به محیط اتمسفر و ایجاد شرایط خلاء نسبی در اطراف نازل در کمترین فشار احتراق موتور انجام شود. به این فشار احتراقی فشار راه‌اندازی کمینه دیفیوزر گفته می‌شود. فشار راه‌اندازی کمینه زمانی حاصل می‌شود که بازیافت فشار در طول دیفیوزر با اتلاف فشار کل کمتری همراه باشد [8].

الزامات موتور مورد نظر در طراحی دیفیوزر در جدول 1 نمایش داده شده است. در طراحی مفهومی دیفیوزر مقدار کمینه فشار راه‌اندازی دیفیوزر مساوی 30 bar انتخاب شده است. با مراجعه به جدول آیزنتروپیک [9] برای نسبت انبساط 53 و فرض فشار کل 30 bar، مقدار فشار استاتیک در خروجی نازل 0.05 bar به دست می‌آید. بنابراین حداکثر فشار محفظه خلاء در طراحی دیفیوزر می‌بایست برابر این مقدار باشد.

در طراحی یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه 7 پارامتر هندسی (3 پارامتر سطحی، 2 پارامتر طولی و 2 پارامتر زاویه ای) آن می‌بایست طوری محاسبه شوند که بازیابی فشار استاتیک در داخل دیفیوزر با کمترین افت فشار کل همراه باشد. فولادی و همکاران در مرجع [10] الگوریتم طراحی دیفیوزر گلوگاه ثانویه را ارائه داده‌اند. به طور کلی، الگوریتم مزبور از روش تئوری موج ضربه‌ای قائم برای مقدار دهی اولیه پارامترهای سطحی استفاده می‌کند، پارامترهای طولی و زاویه‌ای از جمع‌بندی‌های نتایج تجربی مراجع انتخاب می‌شوند و از روش شبیه‌سازی عددی برای جستجوی گزینه مطلوب که در فشار کل طراحی کمترین افت فشار را دارد استفاده می‌شود. مقادیر پارامترهای هندسی دیفیوزر طراحی شده در جدول 2 ارائه شده است. در مرجع مزبور عملکرد دیفیوزر طراحی شده در حالت پایا با شبیه‌سازی عددی جریان سیال گرم مورد بررسی قرار گرفته و صحت طراحی به اثبات رسیده است. علاوه بر آن دیفیوزر مزبور در تست زمینی یک موتور کروی در پژوهشگاه فضایی ایران مورد آزمایش قرار گرفته و صحت عملکرد آن مورد تایید قرار گرفته است [11].

تجربه تست موتور در سکوی شبیه‌ساز ارتفاع در پژوهشگاه فضایی ایران نشان می‌دهد که جریان برگشتی در زمان روشن شدن موتور باعث نوسانات شدید تراست اندازه‌گیری شده توسط لودسل می‌شود. علاوه بر آن برخورد گازهای گرم (با دمای بالای 2000 K)، باعث گرم شدن سنسورها و بدنه موتور مورد آزمایش می‌شود. در صورت کوتاه نبودن دوره تخلیه این گازها ممکن است سنسورهای اندازه‌گیری از کار بیفتند و حتی به بدنه موتور آسیب جدی وارد شود. علاوه بر موارد مذکور در تست‌های توسعه‌ای این گونه موتورها لازم است که دمای سطح بیرونی موتور به طور دقیق اندازه‌گیری شود. غالباً اطلاعات به دست آمده از این اندازه‌گیری در بررسی عملکرد عایق طراحی شده برای سطح داخلی موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد [11]. در این تحقیق به منظور بهبود عملکرد سکوی شبیه‌ساز ارتفاع در زمان روشن شدن موتور تاثیر نصب محدود کننده جریان برگشتی در موقعیت گپ حلقوی محفظه خلاء مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل 2 شمانیکی از هسته اصلی یک شبیه‌ساز ارتفاع مجهز به BFA نمایش داده شده است. BFA یک مانع حلقوی است که در محل گپ حلقوی محفظه خلاء به دیواره ورودی دیفیوزر نصب می‌شود. قابل ذکر است که در صورت نصب این مانع به بدنه نازل به دلیل انتقال مومنتم اضافی به بدنه نازل از طریق مانع در تماس با جریان،

جدول 1 الزامات موتور مورد نظر در طراحی دیفیوزر

Table 1 Diffuser design considerations related to a given motor

پارامتر	واحد	مقدار
A_e/A^*	–	53
T_C	K	3400
γ	–	1.166
P_C	bar	30-50

جدول 2 مقادیر پارامترهای هندسی دیفیوزر طراحی شده [10].

Table 2 Geometrical parameters of designed diffuser [10].

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
A_e/A^*	53	$(L/D)_{st}$	8
A_d/A	70	$(L/D)_d$	0.8
A_d/A_{st}	1.855	θ_{in}	6
A_o/A_{st}	3.32	θ_{out}	6

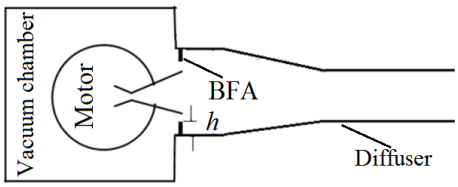

Fig. 2 Schematic of an altitude test simulator equipped with BFA.

شکل 2 شماتیکی از هسته اصلی یک شبیه‌ساز ارتفاع مجهز به BFA

تراست اندازه‌گیری شده با خطا همراه خواهد بود. در این تحقیق با شبیه-سازی عددی جریان، تاثیر نصب اندازه‌های مختلف BFA بر زمان راه‌اندازی دیفیوزر و تغییرات فشاری و دمایی محفظه خلاء مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این در ادامه تحقیق، تاثیر مانع جریان برگشتی یکطرفه (OWBFA) بر زمان راه‌اندازی دیفیوزر مورد بررسی قرار می‌گیرد. مانع یکطرفه طوری عمل می‌کند که در لحظه ایجاد مکش در دهانه محفظه خلاء (در زمان تخلیه محفظه) BFA به طور کامل جمع شده و سطح عبور جریان برای تخلیه سریعتر محفظه خلاء افزایش می‌یابد.

3- روش تحلیل عددی جریان و اعتبارسنجی

معادلات حاکم بر جریان سیال معادلات ناویر-استوکس به فرم تقارن محوری و تراکم پذیر ناپایا می‌باشد [9]. در این بخش از مقاله به نحوه تعامل با برخی از مهمترین پارامترهای حل عددی برای تحلیل جریان در آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع پرداخته شده، بررسی استقلال از شبکه حل عددی و اعتبارسنجی تحلیل عددی ارائه شده است.

3-1- نوع حلگر و مدلسازی توربولانس جریان

در یک دیفیوزر خروجی گازهای احتراقی، تغییرات عدد ماخ گازهای احتراقی زیاد است (غالباً از 0 تا 5). بنابراین جریان به شدت تراکم‌پذیر بوده و برای اینگونه مسائل، روش حل چگالی-مبنا نسبت به روش فشار-مبنا دقت بیشتری دارد [13,12]. با توجه به اینکه در این مسئله اندرکنش قوی مابین موج ضربه‌ای جریان و لایه مرزی دیواره دیفیوزر وجود دارد، جدایش جریان از دیواره آن در برخی نواحی مخصوصاً در قسمت‌های انتهایی دیفیوزر اجتناب ناپذیر است. بنابراین مدل توربولانسی مورد استفاده می‌بایست برای تخمین محل جدایش جریان مناسب باشد. در برخی از مراجع به منظور کاهش دادن بار محاسباتی از مدل توربولانسی اسپالارت-الماراس[1] و یا k-ε به همراه

[1] Spalart–Allmaras

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

راهکارهای تصحیحی برای نواحی جریان رینولدز پایین استفاده شده است [13,12,4]. با این حال، این روش‌ها خطای زیادی در تخمین نواحی جدایش جریان دارند. بارتوزویچ و همکاران [14] با مقایسه نتایج حل مدلهای مختلف توربولانسی و نتایج تجربی برای اجکتورهای مافوق‌صوت نشان دادند که مدل توربولانسی kω-SST برای این مسئله مناسب‌تر است. اخیراً نیز توسط فولادی و همکاران [10] نشان داده شده است که مدل توربولانسی kω-SST نسبت به مدل‌های توربولانسی اسپالارت-الماراس و k-ε برای مدلسازی جریان توربولانس در داخل دیفیوزر مافوق‌صوت گلوگاه ثانویه و تعیین محل جدایش جریان مناسب‌تر بوده و نتایج تحلیل جریان با این مدل توربولانسی به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. بنابراین در کلیه تحلیل‌های ارائه شده در این تحقیق از مدل توربولانسی kω-SST استفاده شده است.

3-2-دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و اولیه و گام زمانی

در شکل 3 دامنه محاسباتی و شرایط مرزی در تحلیل‌های غیر دائم نمایش داده شده است. دامنه محاسباتی در تحلیل‌های غیر دائم از نواحی نازل، محفظه خلاء با حجم $1.36\ m^3$، دیفیوزر گلوگاه ثانویه و ناحیه دور دست تشکیل شده است. طول و عرض ناحیه دور دست به اندازه 50 و 25 برابر شعاع سطح خروجی دیفیوزر (R) انتخاب شده است. لازم به ذکر است که در تحلیل‌های جریان دائم که در مرجع [10] برای دیفیوزر مورد نظر انجام شده است، به منظور کاهش بار محاسباتی ناحیه دور دست غیر فعال شده و از یک محفظه خلاء بسیار کوچک استفاده شده است. زیرا که در بررسی عملکرد دائم دیفیوزر ابعاد محفظه خلاء تاثیری در نتایج حل ندارد. در این تحقیق، شرط مرزی ورودی فشار[1] در سطح ورودی نازل، شرط مرزی خروجی فشار[2] در مرزهای خروجی ناحیه دور دست، شرط مرزی عدم لغزش جریان و آدیاباتیک[3] برای تمامی سطوح دیواره اعمال شده است. در تحلیل‌های پایا فشار احتراق ثابت بوده ولی در تحلیل‌های غیردائم در این تحقیق از منحنی فشار احتراق برحسب زمان در ورودی نازل استفاده می‌شود. همچنین در مرزهای ناحیه دور دست فشار و دمای اتمسفر محلی (0.88 bar و 300 K) اعمال می‌شود. در حل پایای جریان در دیفیوزر مافوق‌صوت، هر چه شرایط اولیه به جواب نهایی نزدیکتر باشد، تحلیل مسئله زودتر همگرا می‌شود. بنابراین، به منظور تسریع در حل پایا، از توزیع فشار آیزنتروپیک در طول نازل و توزیع فشار خطی در طول دیفیوزر و فشار ثابت با مقدار خیلی کوچک (نزدیک به شرایط خلاء) در محفظه خلاء به عنوان شرایط اولیه استفاده شده است [10]. در تحلیل‌های غیردائم تحقیق حاضر، شرایط اولیه می‌بایست شرایط واقعی حاکم بر مسئله در لحظه صفر باشد.

غالباً در شبیه‌سازی غیر دائم جریان گازها در دیفیوزر گام زمانی 10^{-5} s با عدد کورانت 10 مورد استفاده قرار گرفته است [16,15,12]. در تحقیق

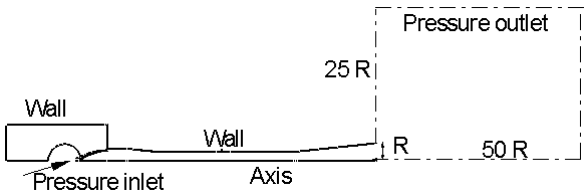

Fig. 3 Computational domain for unsteady analysis.

شکل 3 دامنه محاسباتی در تحلیل‌های غیر دائم.

[1] Pressure inlet
[2] Pressure outlet
[3] No slip flow and zero heat flux

حاضر که مربوط به فرآیند روشن شدن موتور و راه‌اندازی دیفیوزر است، گام زمانی تحلیل عددی از 10^{-6} s در ابتدای روشن شدن موتور تا 10^{-5} s در لحظه راه‌اندازی دیفیوزر متغیر در نظر گرفته شده است. همچنین عدد کورانت از مقدار 0.5 در شروع تحلیل تا مقدار 7 در لحظه راه‌اندازی دیفیوزر تغییر داده می‌شود. تمامی تحلیل‌های این تحقیق با یک دستگاه کامپیوتر با پردازشگر زئون اینتل E5-2630 V3 انجام شده است. تجربه شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی یک ثانیه‌ای این مسئله بیش از 4 روز زمان محاسباتی لازم است.

3-3- شبکه محاسباتی

در این تحقیق از شبکه محاسباتی بی‌سازمان مثلثی استفاده شده است. از مش‌بندی لایه مرزی به منظور حل دقیق‌تر جریان توربولانت بهره گرفته شده است، به طوری که فاصله اولین گره محاسباتی تا دیواره دیفیوز کمتر از 0.2 mm است. با این شبکه مقدار y^+ در تحلیل‌های انجام شده کمتر از 10 می‌باشد، که مناسب مدل توربولانسی kω-SST است. در شکل 4 نماهای مختلفی از شبکه محاسباتی نمایش داده شده است. با توجه به تقارن محوری بودن هندسه و جریان، میدان محاسباتی دو بعدی در نظر گرفته شده است. به منظور اطمینان از استقلال حل عددی از اندازه شبکه محاسباتی تحلیل غیر دائم با شرایط اولیه پیش خلاءسازی شده با اندازه‌های مختلف شبکه محاسباتی انجام شده است. با توجه به اهمیت زیاد تغییرات زمانی فشار محفظه خلاء در زمان راه‌اندازی دیفیوزر، این منحنی برای بررسی استقلال از حل شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده است. نتایج این بررسی در شکل 5 نمایش داده شده است. در این شکل محور قائم سمت چپ فشار متوسط محفظه خلاء و محور قائم سمت راست فشار احتراق موتور را نمایش می‌دهد. مطابق شکل 5 شبکه‌های محاسباتی بالای 30000 گره محاسباتی برای مطالعه تغییرات زمانی فشار داخل محفظه خلاء کفایت می‌کند. به منظور بررسی های بیشتر شبکه محاسباتی، تنش برشی بر روی دیواره دیفیوزر با 5 شبکه با تعداد گره‌های محاسباتی مختلف در شکل 6 نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور، تنش برشی بر روی دیواره دیفیوزر برای شبکه های با

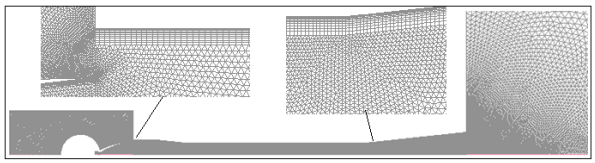

Fig. 4 Schematic of utilized numerical grid in the unsteady analysis

شکل 4 نمایی از شبکه محاسباتی مورد استفاده در تحلیل‌های غیر دائم

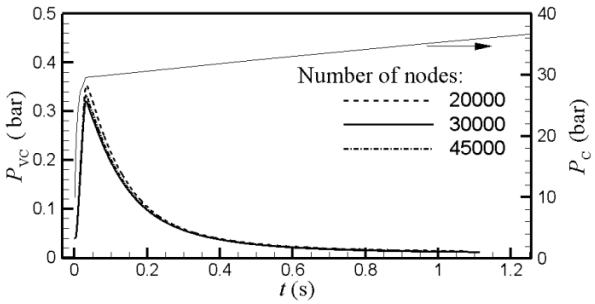

Fig. 5 Time variations of vacuum chamber pressure with different mesh sizes.

شکل 5 فشار محفظه خلاء برحسب زمان با اندازه‌های مختلف شبکه محاسباتی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

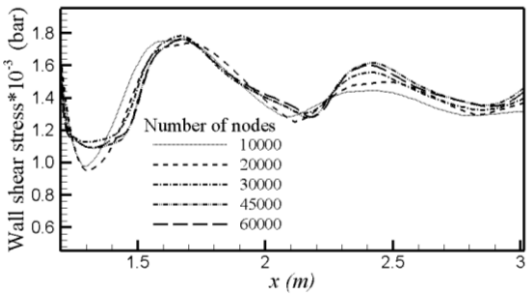

Fig. 6 Variations of wall shear stress along the diffuser wall with different mesh sizes.

شکل 6 تغییرات تنش برشی دیواره در طول دیفیوزر با اندازه های مختلف شبکه محاسباتی.

اندازه 45000 و 60000 گره محاسباتی اختلاف ناچیزی دارند. از اینرو در این تحقیق از شبکه‌های محاسباتی بالای 50000 گره محاسباتی در تحلیل‌های عددی استفاده شده است همچنین قابل ذکر است که در این تحقیق تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی بالغ بر 120000 المان مثلثی است که در محدوده تعداد سلول شبکه انتخابی مراجع [14,8,5] که از 45000 تا 200000 است، قرار دارد.

3-4- اعتبارسنجی روش تحلیل عددی

اعتبارسنجی روش تحلیل عددی دائم با استفاده از نتایج تجربی معتبر برای یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه توسط فولادی و همکاران در مرجع [10] ارائه شده است. جهت انجام اعتبارسنجی تحلیل ناپایا نیاز به نتایج تست تجربی به صورت وابسته به زمان می‌باشد که در آن کلیه اطلاعات هندسی میدان جریان از جمله ابعاد نازل موتور، محفظه تست و دیفیوزر مشخص باشند. جستجو در مراجع موجود 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 قابل ذکر است که در مراجع موجود، علی‌رغم ارائه نتایج تحلیل ناپایا، غالباً به اعتبارسنجی تحلیل پایا اکتفا شده است [4,15]. البته تعداد نادری مراجع نیز وجود دارند که نتایج تحلیل ناپایا را با نتایج تست تجربی خودشان اعتبارسنجی کرده‌اند [16,3]. در این پژوهش ضمن مقایسه نتایج تحلیل ناپایای جریان با نتایج تحلیل عددی یک مرجع معتبر [15]، جهت تاکید بر صحت نتایج ارائه شده، مقایسه‌های مختلفی در خصوص یافته های تحقیق با نتیجه گیری‌های تست های تجربی موجود در بخش نتایج ارائه شده است که تا حدود زیادی صحت نتایج ارائه شده را به اثبات می‌رسانند.

در مسئله مورد بررسی پارک و همکاران 2012، یک موتور با نسبت انبساط 69.5 با فشار احتراق 47.6 bar توسط یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه با هندسه مشخص راه‌اندازی شده است. برای مدلسازی فرآیند خاموشی موتور فرض شده است که فشار احتراق آن با گذر زمان با یک شیب خطی کاهش می‌یابد. در این مسئله، یکی از پارامترهای مهم یافتن فشار احتراقی است که در آن دیفیوزر از حالت استارت خارج می‌شود و با ورود جریان گازهای احتراقی به محفظه خلاء، شرایط خلاء لازم در محفظه از بین می‌رود. در این لحظات جریان ناپایدار در نازل و دیفیوزر برقرار می‌شود و موقعیت موج ضربه ای جریان در ورودی دیفیوزر و نازل به شدت دچار نوسان می‌شود. پارک و همکاران 2012 این مسئله پیچیده را با استفاده از یک کد عددی که مشخصات آن را در مرجع [15] ارائه داده‌اند، تحلیل عددی کرده‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که دیفیوزر مورد استفاده در فاصله زمانی کوتاهی (کمتر از 0.03 s) در فشار احتراق 30.5 bar از حالت استارت خارج می‌شود.

در تحقیق حاضر مسئله مزبور با روش عددی ارائه شده در فوق شبیه-سازی عددی شده است. اطلاعات هندسی دیفیوزر گلوگاه ثانویه مورد استفاده به صورت بی‌بعد در مرجع مزبور موجود است. متاسفانه در این مرجع ابعاد محفظه خلاء و پروفیل نازل (مخصوصاً سطح گلوگاه نازل) به صورت کمی بیان نشده است. بنابراین اطلاعات مزبور از روی شکل‌های ارائه شده در مرجع با روش تقریبی تخمین زده شده است. در شکل 7 نتایج تغییرات زمانی فشار محفظه خلاء در لحظه خاموشی موتور در تحقیق حاضر با نتایج عددی پارک و همکاران مورد مقایسه قرار گرفته است. مطابق شکل مزبور، فشار محفظه خلاء تا لحظه 0.025 s (فشار احتراق 30.5 bar) اختلاف ناچیزی با نتایج مرجع دارد. در تحقیق حاضر در لحظه 0.028 s (فشار احتراق 32 bar) دیفیوزر از حالت استارت خارج شده است. به عبارت دیگر روش مرجع و روش حاضر در تخمین فشار خروج از استارت دیفیوزر در حدود 5%≈ (32- 30.5)/30.5 با هم اختلاف دارند. از طرفی بعد از خارج شدن از حالت استارت، در هر دو روش عددی بازه زمانی که در آن محفظه خلاء برای بار اول به فشار 1 bar رسیده است تقریباً برابر 0.01 s است. قابل ذکر است که تفاوت‌های موجود بین شبیه‌سازی حاضر و شبیه‌سازی مرجع می‌تواند به دلیل تفاوت در تخمین‌های هندسی بکار رفته و رویکردهای عددی متفاوت استفاده شده در کد عددی مرجع و نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق باشد. در کل با توجه به فیزیک ناپایدار جریان در لحظه خارج شدن دیفیوزر از حالت استارت در یک بازه زمانی کوچک، تست تجربی و تحلیل عددی این مسئله بسیار دشوار است و این میزان نزدیکی دو روش عددی مختلف می-تواند بیانگر صحت بکارگیری ابزار مورد استفاده در تحلیل غیر دائم جریان در آزمایشگاه شبیه‌ساز ارتفاع باشد.

4- نتایج و بحث

در بخش حاضر ابتدا فیزیک جریان در یک سیستم شبیه‌ساز ارتفاع در فاز گذرای روشن شدن موتور مورد تشریح قرار گرفته و جریان برگشتی و اثرات آن در تغییرات فشار و دمای متوسط محفظه خلاء نمایش داده شده است. سپس تاثیر نصب BFA در محل گپ حلقوی به بدنه دیفیوزر مورد بررسی قرار گرفته و نقاط ضعف و قوت این روش مورد ارزیابی قرار گرفته است. نهایتاً راهکار OWBFA با تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفته و میزان بهبود عملکرد BFA با این راهکار مشخص شده است.

1-4- فیزیک جریان از لحظه روشن شدن موتور تا برقراری حالت پایا در دیفیوزر

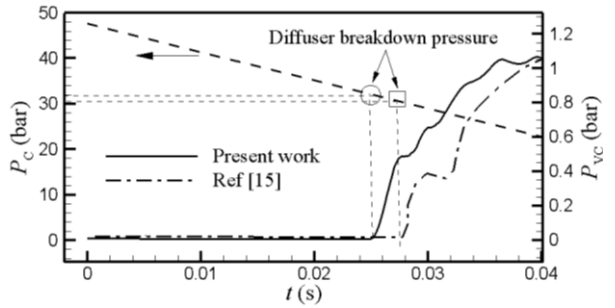

Fig. 7 Temporal variation of vacuum chamber pressure during shut-down transient.

شکل 7 تغییرات زمانی فشار محفظه خلاء در فرآیند گذرای خاموشی موتور.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

در این بخش نتایج شبیه‌سازی جریان با پروفیل فشار-زمان محفظه احتراق (شکل 5) بدون نصب BFA مورد بحث قرار گرفته است. در شروع شبیه‌سازی محل دیافراگم در انتهای گلوگاه ثانویه قرار داده شده است، به طوری که در نواحی قبل از دیافراگم شرایط پیش‌خلاء (فشار 0.04 bar و دمای 300 K) و نواحی بعد از دیافراگم شرایط اتمسفر محلی (فشار 0.88 bar و دمای 300 K) برقرار است. روش تحلیل عددی مطابق با مطالب ارائه شده در بخش 3 در نرم افزار فلوئنت[1] پیاده‌سازی شده است.

شکل‌های 8 و 9 کانتور فشار استاتیک و عدد ماخ جریان را در زمان‌های مختلف فاز گذرای روشن شدن موتور و راه‌اندازی دیفیوزر نمایش داده است. مطابق شکل 8 در لحظه بسیار کوتاهی (0.0066 s) سیال گرم به محل دیافراگم رسیده و اختلاف فشار لازم را جهت محو ساختن دیافراگم فراهم آورده است. مطابق شکل 9، در این لحظه جریان گازها به صورت مافوق‌صوت تا ورودی دیفیوزر پیشروی کرده است. لحظاتی بعد از محو شدن

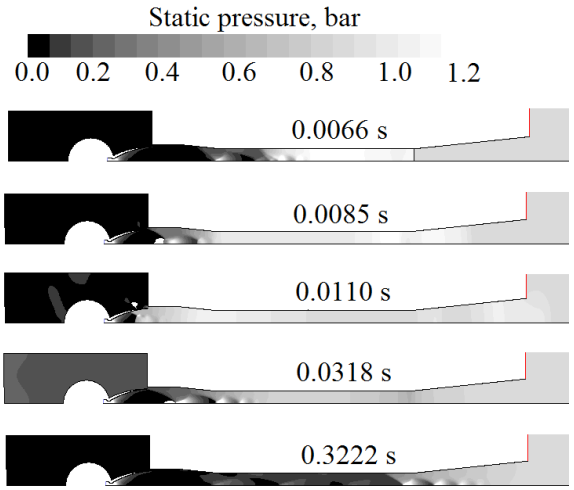

Fig. 8 Contours of static pressure (bar) in computational domain at different times

شکل 8 کانتور فشار استاتیک (bar) در میدان محاسباتی در زمان‌های مختلف

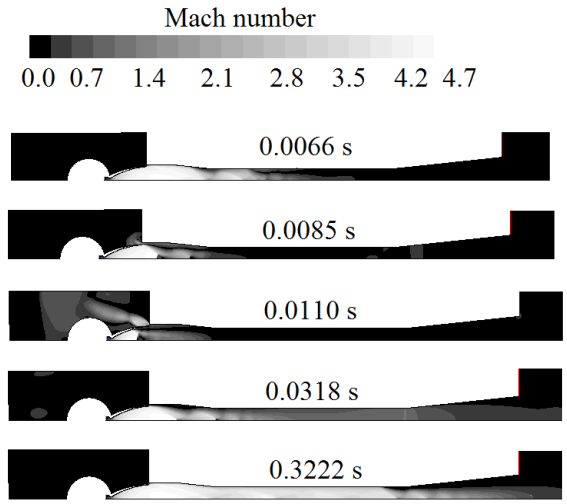

Fig. 9 Contours of Mach number in computational domain at different times

شکل 9 کانتور عدد ماخ جریان در میدان محاسباتی در زمان‌های مختلف

دیافراگم با توجه به اینکه جریان سیال گرم هد دینامیکی کافی برای غلبه به شرایط اتمسفر محلی و انبساط مافوق‌صوت در طول گلوگاه ثانویه را ندارد، از شرایط پایین دست تاثیر گرفته و ورودی دیفیوزر از حالت مافوق‌صوت خارج شده است. در این حالت جریان خروجی از نازل به طور کامل در دهانه دیفیوزر منبسط نشده و با موج ضربه‌ای تراکمی همراه شده است. با توجه به فشار پایین محفظه خلاء که در فرآیند پیش‌خلاءسازی حاصل شده است بخشی از جریان سیال گرم وارد محفظه خلاء شده و جریان برگشتی شکل گرفته است (لحظه 0.0085 s). جریان برگشتی باعث افزایش فشار سیال در محفظه خلاء یا پیرامون نازل می‌شود. با افزایش فشار در صفحه خروجی نازل موج ضربه‌ای قائم جریان در داخل نازل شکل گرفته و این امر شدت جریان برگشتی را افزایش داده است (لحظه 0.0110 s). با گذشت زمان و افزایش فشار محفظه احتراق، موج ضربه‌ای جریان از نازل خارج شده و انبساط سیال گرم در بخشی از ورودی دیفیوزر باعث کاهش فشار در دهانه محفظه خلاء شده است. به این وسیله تخلیه گازها از محفظه خلاء شروع شده است (لحظه 0.0318 s). با افزایش فشار احتراق، سرعت تخلیه گازها از محفظه خلاء شدت بیشتری گرفته و با پایین آمدن فشار در اطراف نازل مخصوصاً در دهانه خروجی آن انبساط گازها به طور کامل در سطح ورودی دیفیوزر شکل گرفته است. در این هنگام، برخورد جت سیال منبسط شده با دیواره دیفیوزر باعث تشکیل موج ضربه‌ای مایل شده است. در ادامه زنجیره‌ای از موج‌های ضربه‌ای در طول دیفیوزر شکل گرفته است (لحظه 0.3222 s). به عبارت دیگر در این حالت دیفیوزر راه‌اندازی شده است. در این سیستم با تشکیل موج ضربه‌ای مایل اولیه، محفظه خلاء نسبت به فشار اتمسفر محلی آببندی می‌شود و همچنین در ادامه با تشکیل زنجیره موج‌های ضربه‌ای مایل، تراکم سیال به طور نسبتاً تدریجی در طول دیفیوزر تا فشار اتمسفر محلی در خروجی دیفیوزر انجام می‌شود. این امر موجبات پمپ خودکار گازهای گرم را به محیط اتمسفر محلی فراهم کرده و خلاء نسبی لازم را در پیرامون نازل برقرار می‌سازد.

در شکل‌های 10 و 11 پروفیل‌های تغییرات فشار استاتیک در طول دیواره دیفیوزر و تغییرات فشار کل در محور مرکزی دیفیوزر در دو حالت عدم راه‌اندازی (0.0318 s) و راه‌اندازی (0.3222 s) دیفیوزر نمایش داده شده است. از مشخصه‌های بارز عملکرد صحیح یک دیفیوزر مافوق‌صوت راه-اندازی شده در سیستم‌های شبیه‌ساز ارتفاع، داشتن فشار استاتیک پایین (کمتر از فشار استاتیک در خروجی نازل در جریان فرومنبسط) در ورودی دیفیوزر، افزایش فشار پله‌ای با شدت کم در قسمت عمده‌ای از طول دیفیوزر و افزایش تدریجی فشار در قسمت انتهایی دیفیوزر (تا فشار اتمسفر محلی) می‌باشد [16,15,13]. مطابق شکل 10 این ویژه‌گی‌های تراکمی سیال برای حالت راه‌اندازی شده دیفیوزر مورد مطالعه شکل گرفته است. مطابق شکل 11، با وجود اختلاف کم در مقدار فشار کل دو حالت مذکور در موقعیت ورودی دیفیوزر ($x < 0.6$ m)، تغییرات فشار کل آنها در طول محور مرکزی دیفیوزر بسیار متفاوت شده است، به طوری که در شرایط راه‌اندازی شده دیفیوزر، مکانیزم زنجیره‌ای موج‌های ضربه‌ای مایل (با شدت ضعیف‌تر) باعث اتلاف کمتر فشار کل سیال در امتداد دیفیوزر شده است. در حالی که در شرایط عدم راه‌اندازی شده، با شکل‌گیری موج‌های ضربه‌ای قوی اولیه فشار کل سیال در ناحیه ورودی دیفیوزر شدیداً افت پیدا کرده است. یک نکته قابل توجه در منحنی فشار کل حالت راه‌اندازی شده، افت شدید آن در قسمت انتهایی گلوگاه ثانویه است. این امر به دلیل جدایش جریان از دیواره دیفیوزر

[1] Fluent

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

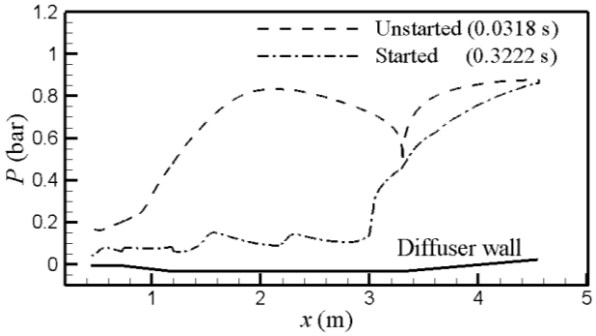

Fig. 10 Static pressure variations along the diffuser wall at two diffuser statuses, unstarted (0.0318 s) and started (0.3222 s).

شکل 10 تغییرات فشار استاتیک در طول دیفیوزر در دو حالت عدم راه‌اندازی (0.0318 s) و راه‌اندازی شده (0.3222 s) آن.

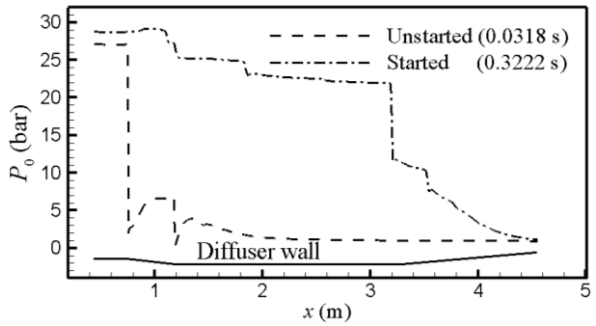

Fig. 11 Total pressure variations in center line of diffuser at two diffuser statuses, unstarted (0.0318 s) and started (0.3222 s).

شکل 11 تغییرات فشار کل سیال در محور مرکزی دیفیوزر در دو حالت عدم راه‌اندازی (0.0318 s) و راه‌اندازی شده (0.3222 s) آن.

اتفاق افتاده است. وقوع این پدیده از کانتور عدد ماخ جریان در شکل 9 در لحظه 0.3222 s کاملاً مشهود است، به طوری که در این موقعیت طولی در نواحی نزدیک به دیواره جریان مادون صوت برقرار شده است. تغییرات عدد ماخ جریان در محور مرکزی دیفیوزر برای دو حالت مذکور در شکل 12 نشان داده شده است. مطابق شکل مزبور در حالت راه‌اندازی شده، عدد ماخ جریان در محور مرکزی دیفیوزر از قسمت ورودی تا قسمت انتهایی گلوگاه ثانویه (محل جدایش جریان) بالای 3 است و کاهش عدد ماخ در این بازه طولی توسط موج‌های ضربه‌ای مایل اتفاق افتاده است. در موقعیت جدایش جریان با تشکیل یک موج ضربه‌ای نسبتاً قوی عدد ماخ جریان کاهش قابل توجهی داشته است و در ادامه عدد ماخ جریان در شیپوره واگرا به زیر 1 رسیده و تا عدد ماخ 0.5 در انتهای دیفیوزر کاهش پیدا کرده است. در حالیکه در حالت عدم راه‌اندازی دیفیوزر (0.0318 s) موج‌های ضربه‌ای قوی اولیه باعث مادون صوت شدن جریان در نیمه اولیه محور مرکزی گلوگاه ثانویه شده است. این امر با افت فشار کل زیادی همراه بوده است و بنابراین گازهای احتراقی هد دینامیکی کافی را برای برقراری جریان مافوق‌صوت در گلوگاه ثانویه نداشته‌اند.

در شکل 13 تغییرات دمای استاتیک جریان در محور مرکزی دیفیوزر در حالت‌های مذکور نمایش داده شده است. دمای کل احتراق در این بررسی K 3400 است. مطابق شکل مزبور، در حالت راه‌اندازی شدن دیفیوزر دمای استاتیک سیال از ناحیه ورودی تا قسمت انتهایی گلوگاه ثانویه آن کمتر از K 2000 است. با وقوع پدیده جدایش جریان و کاهش مومنتم جریان در انتهای شیپوره واگرا دمای سیال به مقداری بالاتر از K 3000 افزایش یافته است.

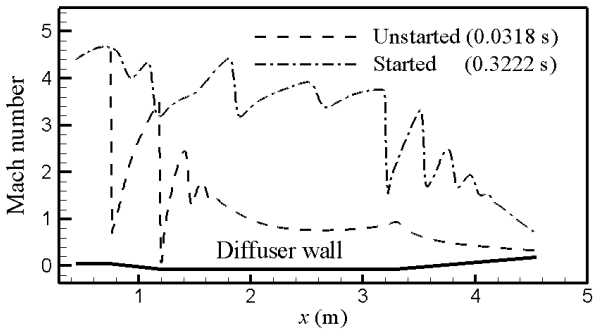

Fig. 12 Mach number variation ins center line of diffuser at two diffuser statuses, unstarted (0.0318 s) and started (0.3222 s).

شکل 12 تغییرات عدد ماخ جریان در محور مرکزی دیفیوزر در دو حالت عدم راه-اندازی (0.0318 s) و راه‌اندازی شده (0.3222 s) آن.

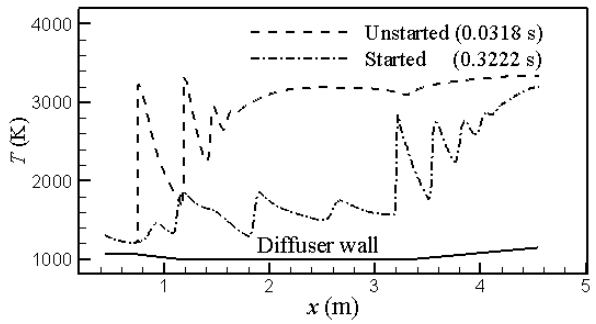

Fig. 13 Static temperature variations in center line of diffuser at two diffuser statuses, unstarted (0.0318 s) and started (0.3222 s).

شکل 13 تغییرات دمای استاتیک جریان در محور مرکزی دیفیوزر در دو حالت عدم راه‌اندازی (0.0318 s) و راه‌اندازی شده (0.3222 s) آن.مختلف.

بنابراین بحرانی‌ترین قسمت برای سیستم حفاظت حرارتی بدنه دیفیوزر قسمت انتهای دیفیوزر می‌باشد. در صورتی که در حالت عدم راه‌اندازی، به دلیل مومنتوم کم سیال در طول دیفیوزر، دمای استاتیک سیال در قسمت عمده طول دیفیوزر بالای K 3000 (نزدیک به دمای احتراق) شده است. در این حالت، همه قسمت‌های بدنه دیفیوزر نقاط بحرانی برای سیستم حفاظت حرارتی بدنه محسوب می‌شوند. بنابراین مزیت دیگر راه‌اندازی سریع دیفیوزر که در این تحقیق با کاهش جریان برگشتی تحقق پیدا می‌کند، حفاظت حرارتی بدنه دیفیوزر در مقابل دمای زیاد سیال در سراسر دیفیوزر است. قابل ذکر است که روند تغییرات دمایی سیال در داخل دیفیوزر در زمان گذرای روشن شدن موتور که در فوق شرح داده شده است با کانتورهای دمایی ارائه شده در مرجع [3] برای یک دیفیوزر لوله مستقیم همخوانی دارد.

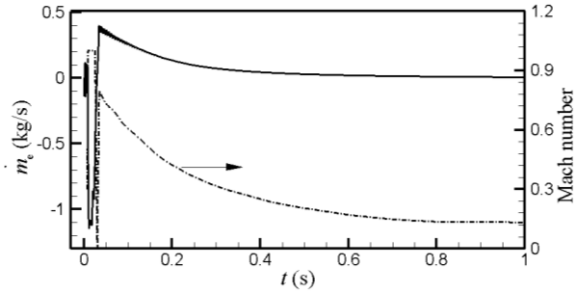

Fig. 14 Mass flow rate and much number variations at annular gap area during motor burning.

شکل 14 دبی جرمی و عدد ماخ جریان در سطح گپ حلقوی از لحظه روشن شدن موتور

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

در شکل 14 منحنی‌های دبی جرمی و عدد ماخ (در سطح گپ حلقوی) برحسب زمان از لحظه روشن شدن موتور تا 1 s نمایش داده شده است. علامت منفی دبی جرمی به معنی وارد شدن جریان به محفظه خلاء (یا جریان برگشتی) می‌باشد. مطابق شکل مزبور، در یک بازه زمانی کوتاه سیال گرم با نرخ جرمی نسبتاً زیاد وارد محفظه خلاء شده است. در حالیکه روند خالی شدن محفظه خلاء با نرخ جرمی کمتر و بسیار تدریجی‌تر بوده است. دلیل این اتفاق به اختلاف فشار زیاد داخل محفظه و ناحیه ورودی دیفیوزر در حین وقوع جریان برگشتی و برعکس اختلاف فشار کم در این نواحی در زمان تخلیه محفظه می‌باشد، به طوری که در لحظه وقوع بیشینه دبی جریان برگشتی، یک موج ضربه‌ای قائم در داخل نازل بوده و ناحیه نسبتاً فشار قوی (در حدود 0.6 bar) در ورودی دیفیوزر و در محل گپ حلقوی شکل گرفته است. در این حالت عدد ماخ جریان در سطح گپ حلقوی برابر 1 بوده و جریان مافوق‌صوت در قسمت ورودی محفظه خلاء برقرار شده است. به عبارت دیگر حالت خفگی (chock) برای جریان برگشتی در سطح گپ حلقوی شکل گرفته است. این امر در کانتور عدد ماخ ارائه شده در شکل 9 در لحظه 0.0110 s نیز قابل مشاهده است. قابل ذکر است که در مراجع [4,3] نیز شکل‌گیری جریان برگشتی مافوق صوت در ورودی محفظه خلاء نشان داده شده است. در این شرایط، به منظور کاهش دبی جرمی جریان برگشتی دو راهکار عملی می‌تواند موثر باشد. راهکار اول کاهش دادن اختلاف فشار بین دو طرف گپ حلقوی (ورودی دیفیوزر و محفظه خلاء) است. این امر با استفاده از یک سیستم اجکتور سیال ثانویه (ترجیحاً با سیال بخار آب در تست گرم و گاز نیتروژن در تست سرد) در پایین دست جریان، مثلاً در انتهای دیفیوزر امکان پذیر است. این روش به دلیل معایب ذکر شده در بخش مقدمه تحقیق در عمل با مشکلاتی مواجهه است که برای استفاده در فاز روشن شدن موتور مناسب نیست. غالباً روش مزبور در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرد که فشار احتراق موتور پایین بوده و بعد از روشن شدن موتور، جریان گازهای احتراقی از هد دینامیکی کافی برای راه‌اندازی دیفیوزر برخوردار نباشد [5,4]. راهکار دوم کاهش دادن مساحت سطح ورودی جریان به محفظه خلاء (سطح گپ حلقوی) است [7]. با توجه به شرایط خفگی جریان برگشتی در این سطح، هرچقدر سطح ورودی جریان کوچکتر باشد، دبی جرمی کمتری در این لحظات وارد محفظه خواهد شد. بر این اساس نصب BFA در سطح گپ حلقوی می‌تواند تا حدودی این نقش را ایفاء نماید. پیاده‌سازی این راهکار در عمل بسیار ساده است.

در شکل 15 تغییرات فشار و دمای متوسط محفظه خلاء برحسب زمان از لحظه روشن شدن موتور تا 1 s نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور بیشینه فشار و دمای متوسط محفظه خلاء در حدود 0.19 bar و 1360 K بوده است. روند تغییرات این منحنی‌ها از تغییرات زمانی دبی جرمی در سطح گپ حلقوی تبعیت می‌کند. غالباً در بررسی عملکرد یک تست ارتفاع منحنی فشار برحسب زمان محفظه خلاء از اهمیت زیادی برخوردار است. در عمل با نصب یک سنسور فشار در محفظه خلاء و ثبت فشار لحظه‌ای آن می‌توان در مورد صحت آزمایش موتور اظهار نظر کرد. مطابق تعریف، زمان راه‌اندازی دیفیوزر از لحظه روشن شدن موتور، به زمانی اطلاق می‌شود که در اثر کارکرد صحیح دیفیوزر فشار در اطراف نازل (در محفظه خلاء) به کمتر از فشار خروجی نازل در شرایط فرومنبسط برسد [7]. با استفاده از این تعریف و در نظر گرفتن اینکه فشار استاتیک در خروجی نازل در شرایط فرومنبسط در حدود bar 0.0505 است، در این تحقیق، شرط راه‌اندازی شدن دیفیوزر رسیدن فشار محفظه خلاء به مقدار 0.05 bar در نظر گرفته شده است. با این تعریف، مطابق پروفیل فشار محفظه خلاء در شکل 15، دیفیوزر مورد نظر بعد از 0.3 s راه‌اندازی شده است، که مقدار دقیق آن 0.3222 s است. در صورتی که مطابق بررسی‌های انجام شده در حالت بدون پیش‌خلاءسازی زمان راه‌اندازی دیفیوزر بیش از 1 s به دست می‌آید [16,6,3]. قابل ذکر است که بعد از راه‌اندازی شدن دیفیوزر با توجه به دانسیته پایین سیال گرم، دمای بالای سیال داخل آن خطر جدی برای ابزارهای اندازه‌گیری موجود در محفظه خلاء به شمار نمی‌رود.

4-2- بررسی اثر محدود کننده جریان برگشتی در زمان روشن شدن موتور

در این بخش تاثیر نصب محدود کننده جریان برگشتی BFA به محل گپ حلقوی در تغییرات فشاری و دمایی محفظه خلاء مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل‌های عددی انجام شده از شرایط اولیه پیش‌خلاء استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های عددی با ارتفاع مانع h=0, 5, 10, 15, and 20 mm مطابق روش عددی ارائه شده در بخش 3 انجام شده است. h=0 به معنی عدم استفاده از BFA است که در بخش 4-1 مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت ارتفاع گپ حلقوی 23.3 mm است. همچنین افزایش ارتفاع مانع به معنی کاهش گپ حلقوی مابین خروجی نازل و ورودی دیفیوزر است.

در شکل 16 تغییرات زمانی فشار در محفظه خلاء با اندازه‌های مختلف BFA نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور رفتار منحنی‌های فشار محفظه با حضور مانع (h≠0) در زمان روشن شدن موتور همانند حالت عدم حضور آن (h=0) می‌باشد، با این تفاوت که بیشینه فشار متوسط محفظه خلاء با افزایش ارتفاع مانع کاهش قابل توجهی داشته است، به طوری که با نصب BFA با ارتفاع 20 mm، بیشینه فشار محفظه خلاء از 0.19 bar در

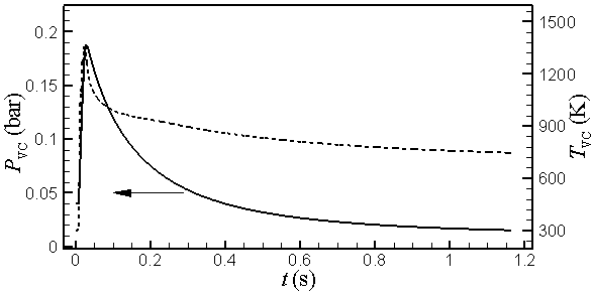

Fig. 15 Static pressure and temperature variations of vacuum chamber during motor burning.

شکل 15 تغییرات فشار و دمای متوسط محفظه از لحظه روشن شدن موتور

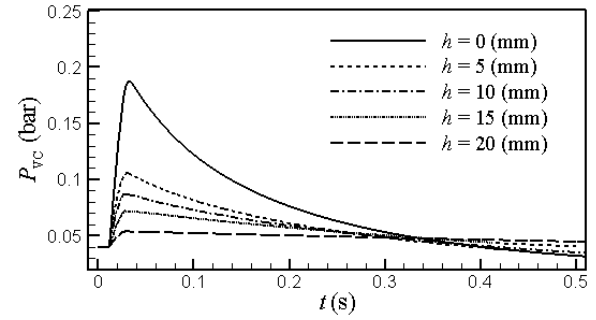

Fig. 16 Static pressure variations of vacuum chamber with different sizes of BFA.

شکل 16 تغییرات زمانی فشار در محفظه خلاء با اندازه‌های مختلف BFA

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

حالت h=0 به 0.054 bar رسیده که خیلی نزدیک به فشار راه‌اندازی دیفیوزر (یعنی 0.05 bar) است. علی‌رغم کاهش بیشینه فشار محفظه با افزایش ارتفاع مانع، نرخ زمانی کاهش فشار متوسط محفظه نیز کاهش یافته است و در نتیجه مدت زمان طولانی‌تری سپری شده است تا شرایط پایای مطلوب در محفظه خلاء برقرار شود. اگر فشار 0.05 bar در محفظه خلاء مبنای راه-اندازی شدن دیفیوزر قرار داده شود، از شکل 16 مشخص است که حضور BFA کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان راه‌اندازی دیفیوزر ایجاد نکرده است. قابل ذکر است که با هندسه مفروض شبیه‌ساز خلاء، در حالت h=20 mm اندازه گپ حلقوی از مقدار 23.3 mm به مقدار 3.3 mm کاهش می‌یابد و افزایش بیشتر ارتفاع BFA به لحاظ عملی مقرون به صرفه نیست. در مرجع [7] یک سیستم شبیه‌ساز خلاء مجهز به مانع جریان برگشتی 10 mm و گپ حلقوی 2 mm تست تجربی شده است. در این مرجع تغییرات منحنی فشار محفظه برحسب زمان برای تست‌های مجهز به BFA و بدون استفاده از آن گزارش شده است که در شکل 17 نمایش داده شده است. مقایسه نتایج عددی حاضر برای حالت‌های h=0 mm و h=20 mm که در شکل 16 ارائه شده با نتایج تجربی گزارش شده در شکل 17 نشان می‌دهد که روند تغییرات فشار محفظه خلاء با نصب یک مانع بزرگ (گپ حلقوی کوچک) برای هر دو روش عددی و تجربی همخوانی نزدیکی دارند. در مرجع مزبور با وجود نمایش روند تغییرات فشار محفظه خلاء، اشاره‌ای به نرخ پایین تخلیه محفظه خلاء نشده است و ادعا شده است که استفاده از مانع جریان برگشتی ممکن است راه‌اندازی دیفیوزر را تسریع نماید. طبق بررسی عددی حاضر این احتمال در حالت حدی h ممکن است مصداق داشته باشد، به طوری که اگر در تحقیق حاضر h=21 mm (گپ حلقوی به 2.2 mm) در نظر گرفته شود بیشینه

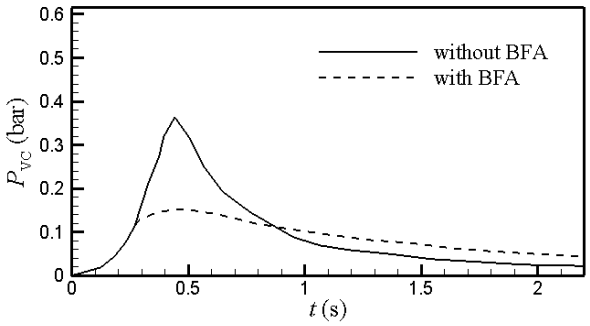

Fig. 17 Static pressure variations of vacuum chamber with BFA (h=10 mm) and without BFA. (annular gap=12 mm) [7].

شکل 17 تغییرات زمانی فشار در محفظه خلاء با استفاده از BFA (h=10 mm) و بدون استفاده از آن (گپ حلقوی 12 mm) [7].

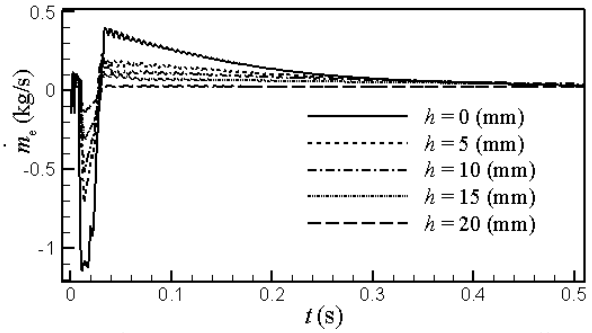

Fig. 18 Mass flow rate variations at annular gap area with different sizes of BFA.

شکل 18 دبی جرمی جریان در سطح گپ حلقوی با اندازه‌های مختلف BFA

فشار محفظه خلاء با وجود پدیده جریان برگشتی کمتر از 0.05 bar خواهد شد و در این صورت راه‌اندازی دیفیوزر آنی تلقی می‌شود. راه‌اندازی آنی دیفیوزر با حالت حدی BFA به عوامل دیگری مثل هندسه دیفیوزر حجم محفظه خلاء، شکل نازل و پروفیل فشار-زمان محفظه احتراق نیز وابسته است. در صورت عدم راه‌اندازی آنی دیفیوزر در حالت حدی BFA، می‌توان اثبات کرد که حضور این مانع به دلیل کاهش نرخ تخلیه شدن محفظه خلاء تاثیر قابل توجهی در زمان راه‌اندازی دیفیوزر ندارد و حتی ممکن است آن را به تعویق بیندازد. از طرفی در یک سیستم شبیه‌ساز ارتفاع ممکن است فشار محفظه خلاء بسیار پایین‌تر مطلوب باشد. به عبارت دیگر هر چه فشار داخل محفظه به شرایط واقعی خلاء نزدیکتر باشد، دقت آزمایش انجام شده بیشتر خواهد بود. برای حصول به این امر، غالباً قطر ورودی دیفیوزر بزرگتر انتخاب می‌شود. با این امر جت سیال خروجی از نازل انبساط بیشتری پیدا کرده و فشار استاتیک در ورودی دیفیوزر کاهش بیشتری می‌یابد و در نتیجه آن فشار داخل محفظه خلاء نیز بیشتر کاهش پیدا می‌کند. بعنوان مثال در مرجع [3] در یک تست تجربی با گاز نیتروژن سرد سطح مقطع ورودی دیفیوزر بیش از 4 برابر سطح مقطع خروجی نازل (5.68 برابر سطح گلوگاه) در نظر گرفته شده است. با این انتخاب، فشار در محفظه خلاء کمتر از یک-دهم فشار خروجی نازل در شرایط فرومنبسط شده است. با توضیحات ارائه شده در فوق می‌توان نتیجه گرفت که در چنین مواردی نصب BFA عملکرد مناسبی نداشته و باعث طولانی‌تر شدن زمان رسیدن به فشار مطلوب در محفظه خلاء خواهد شد. در شکل 18 تغییرات دبی جرمی سیال برحسب زمان در محل گپ حلقوی با اندازه‌های مختلف مانع نمایش داده شده است. مطابق شکل مزبور با افزایش ارتفاع BFA، هرچند مقدار جریان برگشتی کاهش یافته، ولی به دلیل حضور BFA نرخ زمانی تخلیه محفظه خلاء از جریان برگشتی نیز کاهش پیدا کرده است، به طوری که مطابق شکل 16 کاهش قابل توجهی در زمان راه‌اندازی دیفیوزر بوجود نیامده است. دلیل اینگونه عملکرد نصب BFA را می‌توان به کاهش اثر جت سیال منبسط شده در ورودی دیفیوزر نسبت داد. در واقع، انبساط سیال از سطح خروجی نازل تا دیواره ورودی دیفیوزر تاثیر زیادی در ایجاد مکش در دهانه محفظه خلاء (گپ حلقوی) دارد. این امر را می‌توان با نمایش پروفیل فشار استاتیک و سرعت تخلیه شدن محفظه در محل گپ حلقوی در حالت عدم نصب BFA (h=0) نشان داد (شکل‌های 19 و 20). در شکل‌های 19 و 20، y=0 و y=23.3 mm در محور افقی به ترتیب به موقعیت‌های دیواره سطح خروجی نازل و دیواره سطح ورودی دیفیوزر در صفحه گپ حلقوی اشاره می‌کنند. مطابق شکل 19 در لحظات اولیه تخلیه محفظه خلاء (تا 0.17 s)، فشار استاتیک سیال در نزدیکی دیواره دیفیوزر پایین‌تر است و این امر باعث شده است که سرعت تخلیه شدن سیال (شکل 20) در این نواحی از گپ حلقوی بیشتر باشد. با حضور مانع برگشت جریان، هر چه ارتفاع این مانع بزرگ‌تر باشد، گپ حلقوی موثر در تخلیه محفظه به دیواره نازل نزدیک‌تر شده و بنابراین از تاثیر انبساط جت سیال در تخلیه محفظه خلاء کاسته می‌شود.

شکل 21 تغییرات زمانی دمای استاتیک در محفظه خلاء را با مقادیر مختلف اندازه BFA نشان داده است. مطابق شکل مزبور، با نصب BFA بیشینه دمای متوسط سیال داخل محفظه کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است، به طوری که با نصب BFA با ارتفاع 5 mm، 10، 15، و 20 بیشینه دمای محفظه خلاء به ترتیب 930 K، 813، 636، و 450 شده است که نسبت به حالت بدون نصب BFA، به ترتیب 31.8%، 40.3%، 53.3% و 67% کاهش یافته است. بنابراین بیشترین تاثیر نصب BFA را می‌توان به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

حفاظت حرارتی محفظه خلاء و ابزار اندازه‌گیری موجود در آن نسبت داد.

4-3- بررسی اثر محدود کننده جریان برگشتی یکطرفه

در این بخش تاثیر نصب مانع جریان برگشتی یکطرفه (OWBFA) بر عملکرد راه‌اندازی دیفیوزر مورد بررسی قرار گرفته است. همانطوریکه قبلاً نیز اشاره شده است، این مانع یکطرفه طوری عمل می‌کند که در لحظه ایجاد مکش در دهانه محفظه خلاء (در زمان تخلیه محفظه) BFA به طور کامل جمع شده و باعث افزایش سطح عبور جریان می‌شود. برای شبیه‌سازی این حالت بعد از محو شدن دیافراگم و سرازیر شدن جریان به محفظه خلاء، نهایتاً لحظه‌ای فرا می‌رسد که در آن دبی جرمی سیال وارد شده به محفظه برابر صفر می‌شود. در این لحظه شرط مرزی سطح BFA از حالت دیواره (wall) به شرط مرزی سطح میانی[1] میدان حل تغییر داده می‌شود. شبیه‌سازی عددی با این شرایط با اندازه‌ای مختلف BFA انجام شده است. تغییرات زمانی دبی جرمی سیال در سطح گپ حلقوی و فشار متوسط سیال در محفظه خلاء برای هر دو روش BFA و OWBFA در شکل‌های 22 و 23 مقایسه شده است. مطابق شکل‌های مزبور، بکارگیری OWBFA با ارتفاع مانع h=5 mm تاثیر قابل توجهی در نرخ تخلیه محفظه خلاء نسبت به BFA عادی ایجاد نکرده است و از اینرو نرخ کاهش فشار محفظه و زمان راه‌اندازی دیفیوزر برای هر دو رویکرد تقریباً یکسان شده است. تاثیر OWBFA در عملکرد تخلیه محفظه از h=10 mm به بعد مشهودتر است، به طوری که هر چه ارتفاع مانع بیشتر باشد، در اثر وجود مانع در زمان وقوع جریان برگشتی دبی جرمی وارد شده به محفظه کاهش

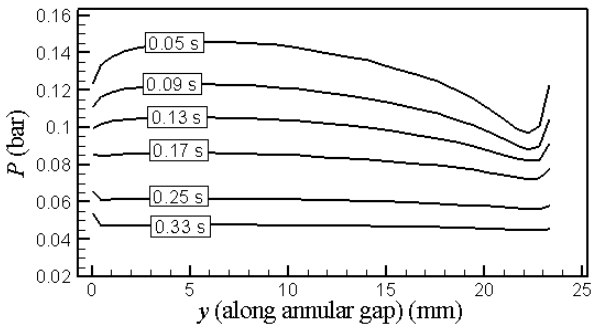

Fig. 19 Static pressure versus y (along annular gap) at different times, h=0.

شکل 19 فشار استاتیک برحسب y (در گپ حلقوی) در زمان‌های مختلف، حالت h=0

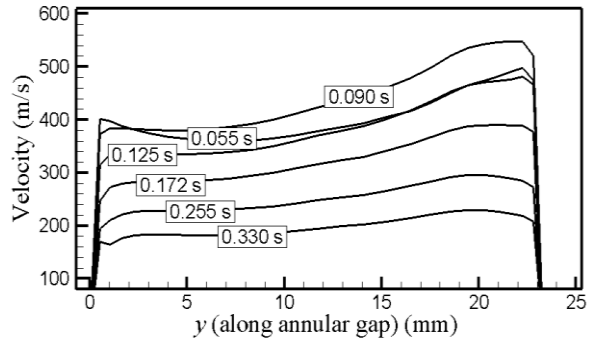

Fig. 20 Exit velocity versus y (along annular gap) at different times, h=0.

شکل 20 سرعت تخلیه سیال برحسب y (در گپ حلقوی) در زمان‌های مختلف، حالت h=0

[1] interior surface

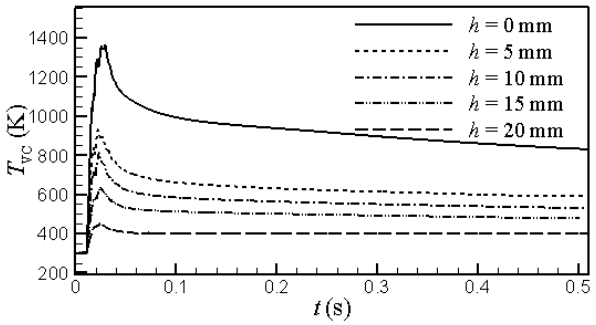

Fig. 21 Static temperature variations of vacuum chamber with different sizes of BFA.

شکل21 زمانی دمای استاتیک در محفظه خلاء با مقادیر مختلف اندازه مانع محدود کننده گپ حلقوی

یافته و در زمان تخلیه محفظه نیز با جمع شدن مانع نرخ تخلیه محفظه افزایش یافته است. مطابق شکل‌های مزبور، در حالت h=20 mm با رویکرد OWBFA دبی جریان در تخلیه محفظه به طور چشم‌گیری افزایش داشته و به تبع آن شیب تغییرات فشار محفظه هم افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. به عبارت دیگر در این حالت راه‌اندازی دیفیوزر بسیار سریع‌تر رخ می‌دهد. در شکل‌های 24 و 25 بردارهای سرعت جریان در دو رویکرد BFA و OWBFA با ارتفاع مانع 20 mm در لحظه اولیه تخلیه محفظه (t=0.03 s) نمایش داده شده است. مطابق شکل‌های مزبور الگوی تخلیه جریان در دو رویکرد بسیار متفاوت است، به طوری که حضور مانع در رویکرد BFA باعث تشکیل یک گردابه بزرگ در پشت این مانع شده و جت سیال منبسط شده تاثیر چندانی در تخلیه محفظه نداشته است، ولی در رویکرد OWBFA مانند حالت بدون استفاده از مانع از حداکثر پتانسیل جت سیال منبسط شده در

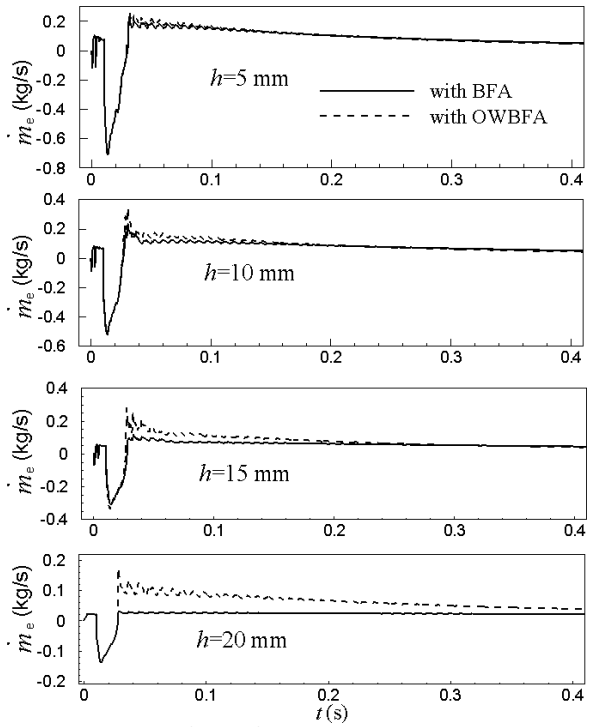

Fig. 22 Comparison of mass flow rate variations at annular gap area with BFA and ABFA with different sizes.

شکل 22 مقایسه دبی جرمی جریان در سطح گپ حلقوی با به کارگیری BFA و ABFA در اندازه‌های مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

ورودی دیفیوزر جهت تخلیه محفظه استفاده شده است. از طرف دیگر زاویه بالای جت سیال برخورد کرده با بدنه دیفیوزر در رویکرد BFA باعث تشکیل موج ضربه‌ای مایل قوی‌تری می‌شود که با اتلاف فشار کل بیشتری همراه بوده و این امر نیز در جهت به تاخیر انداختن زمان راه‌اندازی دیفیوزر موثر است.

در شکل 26 زمان راه‌اندازی شدن دیفیوزر با اندازه‌های مختلف ارتفاع مانع با دو رویکرد BFA و OWBFA مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل مزبور، شرط راه‌اندازی شدن سیستم شبیه‌ساز خلاء برقراری فشار متوسط bar 0.05 در محفظه خلاء می‌باشد. مطابق شکل مذکور، بکارگیری BFA تا ارتفاع mm15 تاثیر چندانی در کاهش زمان راه‌اندازی نداشته است. این سیستم

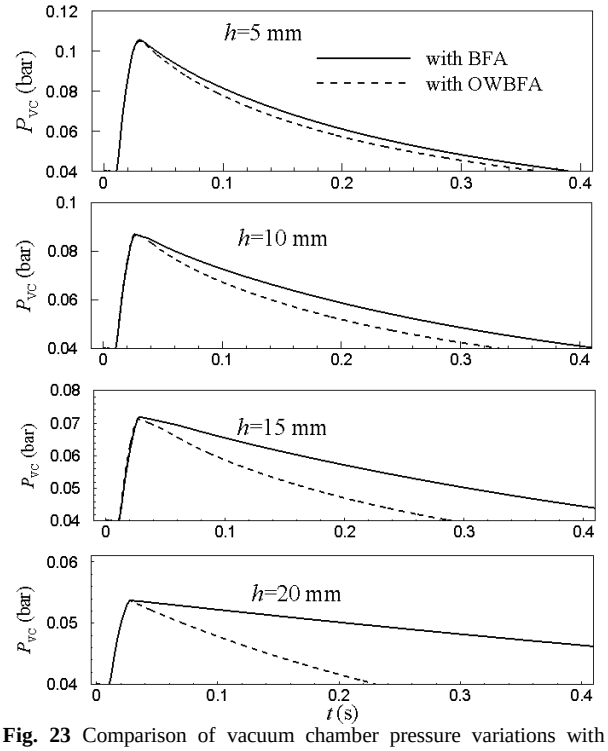

Fig. 23 Comparison of vacuum chamber pressure variations with BFA and ABFA with different sizes.

شکل 23 مقایسه فشار محفظه خلاء با به کارگیری BFA **و** ABFA **در** اندازه‌های مختلف

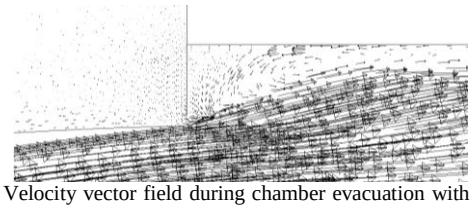

Fig. 24 Velocity vector field during chamber evacuation with BFA, t= 0.03 s.

شکل 24 میدان بردار سرعت در زمان تخلیه محفظه خلاء با نصب BFA، t= 0.03 s.

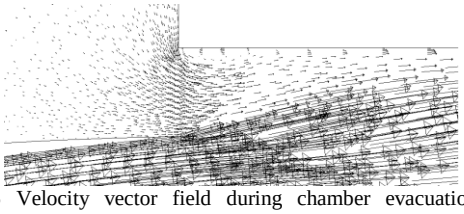

Fig. 25 Velocity vector field during chamber evacuation with OWBFA, t= 0.03 s.

شکل 25 میدان بردار سرعت در زمان تخلیه محفظه خلاء با نصب OWBFA، t= 0.03 s.

با ارتفاع مانع 20 mm (گپ حلقوی 3.3 mm)، کاهش زمان راه‌اندازی در حد 34% را ایجاد کرده است. در حالی که با بکارگیری رویکرد OWBFA با ارتفاع مانع بالاتر از 10 mm کاهش قابل توجهی در زمان راه‌اندازی ایجاد شده است، به طوری که با ارتفاع مانع 20 mm، در حدود 77% زمان راه‌اندازی دیفیوزر کاهش یافته است. به منظور نمایش بیشتر قابلیت رویکرد OWBFA مقایسه صورت گرفته در شکل 26 با فرض راه‌اندازی سیستم شبیه‌ساز ارتفاع با شرط برقراری فشار مطلوب 0.04 bar در محفظه خلاء در شکل 27 تکرار شده است. مطابق شکل مزبور در این حالت بکارگیری BFA نه تنها زمان رسیدن به فشار مطلوب را کاهش نمی‌دهد، بلکه باعث افزایش آن نیز شده است. این امر با افزایش ارتفاع این مانع شدت بیشتری پیدا کرده است، به طوری با ارتفاع مانع 20 mm زمان راه‌اندازی در فشار مطلوب نسبت به حالت عدم بکارگیری مانع دو برابر شده است. حال آنکه با بکارگیری رویکرد OWBFA زمان راه-اندازی در فشار مطلوب با افزایش ارتفاع مانع پیوسته کاهش یافته است، به طوری که با ارتفاع مانع 20 mm این زمان نسبت به حالت h=0 به مقدار یک-دوم تقلیل یافته است.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پدیده جریان برگشتی در یک سیستم شبیه‌ساز ارتفاع با روش شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفت. از روش پیش‌خلاءسازی سیستم شبیه‌ساز ارتفاع به منظور کاهش زمان راه‌اندازی آن استفاده شد. ابتدا فیزیک جریان در زمان روشن شدن موتور و نحوه برگشت جریان به محفظه خلاء مورد تشریح قرار گرفت. سپس بررسی‌های عددی عملکرد راه‌اندازی سیستم شبیه‌ساز ارتفاع با نصب مانع محدود کننده جریان برگشتی (BFA) در

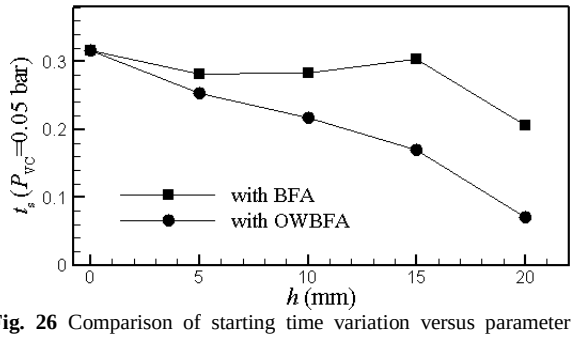

Fig. 26 Comparison of starting time variation versus parameter h using BFA and OWBFA, P_{VC}=0.05 bar.

شکل 26 مقایسه تغییرات زمان راه‌اندازی بر حسب پارامتر h با استفاده از BFA و OWBFA، P_{VC} =0.05 bar.

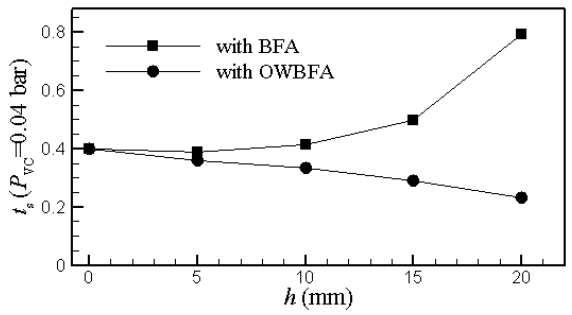

Fig. 27 Comparison of starting time variation versus parameter h using BFA and OWBFA, P_{VC}=0.04 bar.

شکل 27 مقایسه تغییرات زمان راه‌اندازی بر حسب پارامتر h با استفاده از BFA و OWBFA، P_{VC} =0.04 bar.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]

موقعیت گپ حلقوی به دیواره دیفیوزر انجام شد. نشان داده شد که با نصب BFA در موقعیت گپ حلقوی، علی‌رغم کاهش نرخ جریان برگشتی و کاهش بیشینه فشار محفظه خلاء، بجز در حالت گپ حلقوی بسیار کوچک کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان راه‌اندازی این سیستم ایجاد نمی‌شود. دلیل این موضوع کاهش نرخ تخلیه شدن محفظه به دلیل کاهش سطح گپ حلقوی بوده است. این امر باعث تاخیر در ایجاد شرایط پایای مطلوب در محفظه خلاء نیز می‌شود که عاری از عیب نمی‌باشد. با این وجود، با بکارگیری این روش بیشینه دمای متوسط سیال داخل محفظه در زمان گذرای روشن شدن موتورکاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. به طوری که با نصب BFA با ارتفاع mm 20 بیشینه دمای محفظه خلاء در حدود 67% نسبت به حالت بدون نصب آن کاهش می‌یابد. بنابراین بیشترین تاثیر BFA در حفاظت حرارتی محفظه خلاء و ابزار اندازه‌گیری موجود در آن نمود پیدا می‌کند. راهکار مانع جریان برگشتی یکطرفه (OWBFA) در جهت بهبود روش BFA برای اولین بار در این تحقیق مطرح شد و با روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که با این راهکار مشکل تخلیه بسیار کند جریان برگشتی از محفظه خلاء تا حد زیادی مرتفع شده و زمان راه‌اندازی دیفیوزر کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند، به طوری که با رویکرد OWBFA با اندازه مانع مناسب، زمان راه-اندازی دیفیوزر بیش از 50% کاهش می‌یابد. علاوه بر آن بکارگیری OWBFA باعث تسریع در ایجاد شرایط پایای مطلوب در محفظه خلاء می‌شود.

6- فهرست علایم

A_d/A^*	نسبت سطح مقطع ورودی دیفیوزر به سطح مقطع گلوگاه نازل
A_d/A_{st}	نسبت سطح مقطع ورودی دیفیوزر به سطح مقطع گلوگاه ثانویه
A_e/A^*	نسبت سطح مقطع خروجی نازل به سطح مقطع گلوگاه نازل
A_e/A_{st}	نسبت سطح مقطع خروجی دیفیوزر به سطح مقطع گلوگاه ثانویه
$(L/D)_d$	نسبت طول به قطر ناحیه ورودی دیفیوزر
$(L/D)_{st}$	نسبت طول به قطر ناحیه گلوگاه ثانویه
$\dot{m}_e$	دبی جرمی خروجی از محفظه خلاء (kg/s)
P	فشار استاتیک (bar)
P_0	فشار کل (bar)
P_C	فشار محفظه احتراق (bar)
P_{VC}	فشار متوسط محفظه خلاء (bar)
t	زمان (s)
T	دمای استاتیک (K)
T_C	دمای محفظه احتراق (K)
T_{VC}	دمای متوسط محفظه خلاء (K)
t_s	مدت زمان راه اندازی دیفیوزر (s)

علایم یونانی

γ	نسبت ظرفیت گرمایی ویژه
θ_{in}	زاویه رمپ ورودی دیفیوزر (°)
θ_{out}	زاویه شیپوره واگرا (°)

زیرنویس‌ها

C	محفظه احتراق
s	شروع
st	گلوگاه ثانویه
VC	محفظه خلاء

7- مراجع

[1] P. Ducasse, *Rocket Altitude Test Facilities Register*, AGARD-AG-297, ISBN 92-835-0404-6, pp. 1-74, 1987.

[2] K. Schäfer, H. Zimmermann, Simulation of flight conditions during lift off for rocket engine testing, *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Fort Lauderdale, FL, July 11-14, 2004.

[3] B. H. Park, J. H. Lee, W. Yoon, Studies on the starting transient of a straight cylindrical supersonic diffuser: Effects of diffuser length and pre-evacuation state, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 5, pp. 1369–1379, 2008.

[4] R. M. Kumaran, T. Sundararajan, D. R. Manohar, Simulations of high altitude tests for large area ratio rocket motors, *AIAA Journal*, Vol. 51, No. 2, pp. 433-443, 2013.

[5] R. M. Kumaran, P. K. Vivekanand, T. Sundararajan, Optimization of second throat ejectors for high-altitude test facility, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 3, pp. 697-706, 2009.

[6] N. Fouladi, A. Mohamadi, H. Rezaei, Numerical investigation of pre-evacuation influences of second throat exhaust diffuser, *Fluid Mechanics and Aerodynamics*, In press, 2017. (in Persianفارسی)

[7] R. Ashokkumar, S. Sankaran, K. Srinivasan, T. Sundararajan, 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.

[8] J. Chen, Z. G. Wang, J. P. Wu, W. W. Xu, Effect of the second-throat on the performance of supersonic-supersonic ejectors, *Progress of Projects Supported by NSFC*, Vol. 55, No. 9, pp. 2530–2537, 2012.

[9] J. D. Anderson Jr., *Fundamentals of Aerodynamics*, 5th Edition, McGraw-Hill Education, pp. 1–1106, 2015.

[10] N. Fouladi, A. Mohamadi, H. Rezaei, 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 فارسی)

[11] Propulsion research group, *Arash 22 Motor Development Serial Tests*, Tehran, Space Transportation Research Institute, Upper Stage IranSat2 project, Report number: STRI-SC9SDC11Y/01-R-I-03/49, pp. 1-41, 2016.

[12] 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, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 254-261, 2009.

[13] S. Sankaran, T. N. V. Satyanarayana, K. Annamalai, K. Visvanathan, V. Babu, T. Sundararajan, CFD analysis for simulated altitude testing of rocket motors, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, Vol. 48, No. 2, pp. 153-162, 2002.

[14] Y. Bartosiewicz, Z. Aidoun, P. Desevaux, Y. Mercadier, Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, No. 1, pp. 56–70, 2005.

[15] B. H. Park, J. Lim, S. Park, J. H. Lee, W. S. Yoon, 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.

[16] B. H. Park, J. H. Lim, W. Yoon, 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7]