

# بررسی اثر ردیف دیسک‌های چندگانه بر پارامترهای عملکردی یک ورودی هوای فراصوتی

مهدی ناظوری‌زاده<sup>۱</sup>، جواد سپاهی یونسی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی هوافضا دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- استادیار گروه مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳)

## چکیده

این مقاله به بررسی عددی اثر ردیف دیسک‌های چندگانه بر پارامترهای عملکردی یک ورودی هوای فراصوتی تقارن‌محوری از نوع تراکم ترکیبی در عدد ماخ ۲ می‌پردازد. پارامترهای عملکردی ورودی شامل ضریب پسا، ضریب اعوجاج، نسبت بازیافت فشار کل و نسبت دبی جرمی است. ردیف دیسک‌های چندگانه یکی از روش‌های نوین برای کنترل جریان و لایه مرزی است. در این مطالعه پس از اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به کمک نتایج تجربی، ورودی مورد نظر در نسبت پس‌فشارهای مختلف از نظر پارامترهای عملکردی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به بررسی اثر تعداد دیسک‌ها، طول و عمق حفره‌های ایجاد شده پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ردیف دیسک‌های چندگانه اثر مطلوبی بر ضریب پسا و نسبت دبی جرمی دارد. همچنین مشاهده شد که استفاده از ردیف دیسک‌های چندگانه حالت کارکردی فروبهرانی را به تعویق می‌اندازد که از لحاظ عملیاتی برای وسیله پرنده بسیار حائز اهمیت است، زیرا باعث گسترش پاکت پروازی پرنده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ورودی هوای فراصوتی، ردیف دیسک‌های چندگانه، ضریب پسا، نسبت دبی جرمی، بازیافت فشار کل، ضریب اعوجاج

## Effects of MRD Concept on the Performance of a Supersonic Air Inlet

### Abstract

This study deals with the numerical investigation of the effects of the of multi row disks on the performance parameters of an axisymmetric supersonic air inlet of the mixed compression type at free stream Mach number of 2. Inlet performance parameters include drag coefficient, distortion coefficient, total pressure recovery and mass flow ratio. The multi row disk concept is one of the new methods to control the flow and the boundary layer. In this study, after validating the results of numerical simulation with the help of experimental results, the desired inlet has been investigated in terms of performance parameters in different back pressure ratios. Then, the effects of number of disks, length and depth of the cavities were also investigated. The results showed that using the multi row disks has a favorable effect on the drag coefficient and mass flow ratio. It was also observed that the use of multi row disks postpones the subcritical operating condition, which is operationally very beneficial for the aerial vehicle, because it makes the flight envelope of the vehicle wider.

**Key words:** Supersonic inlet, Multi row disk, Drag coefficient, Mass flow ratio, Total pressure recovery, Flow distortion

\*نویسنده پاسخگو: جواد سپاهی یونسی، تلفن: ۰۹۱۰۲۱۲۲۹۷۷، پست الکترونیکی: [jsepahi@um.ac.ir](mailto:jsepahi@um.ac.ir)

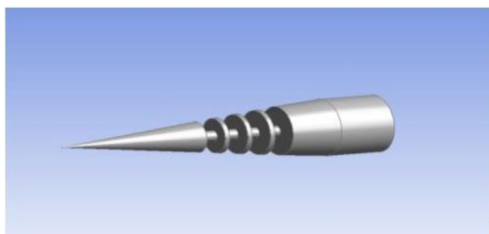
این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



## مقدمه

و کاهش نسبت طول به عمق حفره‌ها منجر به کاهش نوسانات فشار می‌شود [۱۰]. اسماعیل زاده و عباسی با بررسی عددی یک سطح فشاری با ردیف دیسک‌های چندگانه دریافتند که استفاده از روش ردیف دیسک‌های چندگانه باعث کاهش ضریب پسا و گرمایش آیرودینامیکی بر روی سطح فشاری می‌شود [۱۱]. کورانانو همکاران با مطالعات عددی دریافتند که تعداد دیسک‌ها تأثیری در ضخامت لایه مرزی نداشته و ضخامت لایه مرزی وابسته به طول حفره‌ها است [۱۲].

همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از مفهوم دیسک‌های چندگانه بسیار نو بوده و تا کنون مطالعات بسیار محدودی در زمینه آن انجام شده است. اما تا کنون هیچ مطالعه‌ای به منظور بررسی اثر تعداد دیسک‌ها و مشخصات هندسی حفره‌ها بر پارامترهای عملکردی ورودی صورت نگرفته است. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی عددی اثر پارامترهای مختلف دیسک‌ها بر عملکرد یک ورودی هوای فراصوتی است.



شکل ۱ - نمای سه‌بعدی ردیف دیسک‌های چندگانه روی سطح فشاری ورودی [۱۳]

## شرایط کارکردی ورودی فراصوتی

در ورودی‌های تراکم ترکیبی ابتدا روی جسم مرکزی (سطح فشاری) از طریق یک سری امواج ضربه‌ای مایل، سیال متراکم می‌شود و سپس داخل ورودی، قطار امواج ضربه‌ای به وجود می‌آید. این آرایش در نهایت با یک موج ضربه‌ای عمودی خاتمه پیدا می‌کند. موقعیت موج ضربه‌ای عمودی نسبت به ورودی گلوگاه، تأثیر زیادی بر بازده ورودی دارد. برای یک ورودی تقارن محوری، مطابق شکل ۲ سه حالت کارکردی مختلف وجود دارد. چنانچه مقدار پس فشار کم باشد، ورودی در

ورودی‌های هوای فراصوتی باید جریان هوای آزاد را در شرایط عملیاتی مختلف به جزء بعدی موتور برسانند. ورودی‌های هوای فراصوتی معمولاً از یک سری سطوح شیب‌دار متحرک، دیواره‌های متخلخل و سیستم‌های مکانیکی پیچیده تشکیل شده‌اند [۱-۳]. در داخل ورودی‌های هوای فراصوتی یک سری امواج ضربه‌ای مایل و به دنبال آن یک موج ضربه‌ای قائم تولید می‌شود که این آرایش در ورودی هوای تراکم ترکیبی و تراکم داخلی مشاهده می‌شود [۴].

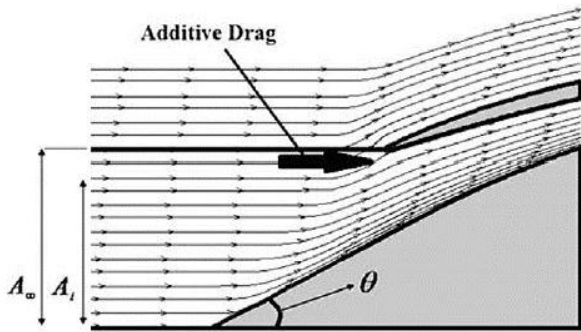
به منظور بهبود عملکرد ورودی‌های فراصوتی، تا کنون مطالعات فراوانی انجام شده است. یکی از راهبردهای رایج، استفاده از ورودی‌های هندسه متغیر است. این راه حل به عنوان مثال در هواپیمای کنکورد استفاده شد که از سطوح شیب‌دار با زاویه متغیر استفاده می‌کرد.

برخی ورودی‌های هندسه ثابت دارای معایبی مانند تلفات ناشی از عملیات در شرایط خارج از طراحی، جدایش لایه مرزی، مسائل مربوط به پایداری، پدیده بازاعوجاج جریان و بسیاری از موارد دیگر است [۵]. همان‌طور که قبلاً ذکر شد ورودی هوا با هندسه متغیر یکی از راه‌های غلبه بر این معایب است [۶-۸]. یکی از راه‌های جدید بهبود عملکرد ورودی هوا قرار دادن یک سری دیسک پشت سرهم روی سطح فشاری است که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این روش با ایجاد یک سری حفره داخل سطح فشاری، لایه مرزی و جدایش آن کنترل می‌شود. این ایده اولین بار توسط کوبایاشی پیشنهاد شده است [۶]. کوبایاشی از طریق بررسی تجربی، استفاده از ردیف دیسک‌های چندگانه را برای بهبود عملکرد ورودی فراصوتی پیشنهاد کرد. کوبایاشی و همکاران دریافتند که استفاده از سیستم ردیف دیسک‌های چندگانه باعث کاهش ضخامت لایه مرزی و بهبود پایداری ورودی هوا می‌شود [۹]. کوبایاشی و همکاران با مطالعه تجربی بر روی یک سطح فشاری در حضور ردیف دیسک‌های چندگانه دریافتند که برای مقادیر زیاد نسبت طول به عمق حفره‌ها، نوسانات فشار افزایش می‌یابد

Concorde<sup>۱</sup>Buzz<sup>۲</sup>Kobayashi<sup>۳</sup>Multi row disk (MRD)<sup>۴</sup>Kuranha<sup>۵</sup>

$$MFR = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_\infty} = \frac{A_i}{A_\infty} \quad (1)$$

که  $\dot{m}_i$  برابر است با دبی جرمی وارد شده به ورودی و  $\dot{m}_\infty$  برابر است با بیشینه دبی جرمی که می‌تواند داخل ورودی هوا شود.



شکل ۳ - مساحت‌های مختلف جریان در دهانه ورودی فراصوتی [۱۵]

بازیافت فشار کل برابر با میانگین فشار کل در انتهای ورودی به فشار کل جریان آزاد است. این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$TPR = \frac{P_{te}}{P_{t\infty}} \quad (2)$$

پارامتر سوم اعوجاج جریان است که معرف یکنواختی جریان در انتهای ورودی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

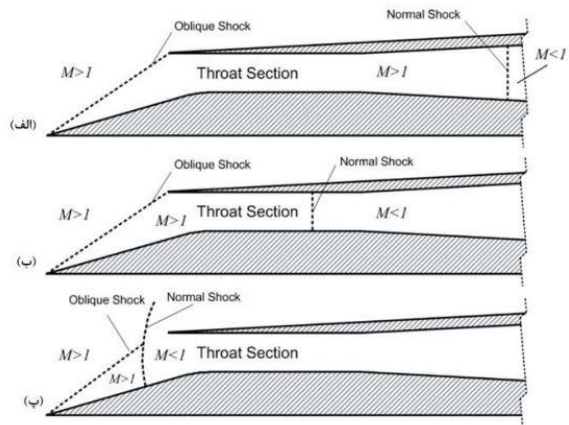
$$FD = \frac{P_{t,max} - P_{t,min}}{P_{t,avg}} \quad (3)$$

که در آن  $P_{t,max}$ ،  $P_{t,min}$  و  $P_{t,avg}$  به ترتیب فشار کل بیشینه، فشار کل کمینه و فشار کل متوسط در صفحه انتهای ورودی هستند.

آخرین پارامتر عملکردی مورد بررسی در این تحقیق ضریب پسا است که روی پوسته خارجی ورودی محاسبه و با  $C_D$  نشان داده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_D = \frac{2D}{\rho AV^2} \quad (4)$$

شرایط فرابحرانی بوده و موج ضربه‌ای عمودی در قسمت واگرای ورودی قرار می‌گیرد. با افزایش پس فشار موج ضربه‌ای به سمت بالادست حرکت کرده تا در گلوگاه قرار گیرد. در این حالت ورودی در شرایط بحرانی کار می‌کند و با اعمال پس فشار بیشتر موج ضربه‌ای عمودی از دهانه ورودی خارج می‌شود زیرا که این موج در مجرای همگرا پایدار نمی‌ماند و لذا ورودی در حالت فروبحرانی قرار می‌گیرد. در این حالت به دلیل فاصله گرفتن موج ضربه‌ای عمودی از لبه پوسته سرریز جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه دبی جرمی ورودی کاهش می‌یابد. افزایش بیشتر پس فشار موجب می‌شود تا موج ضربه‌ای عمودی در جلوی ورودی شروع به نوسان کند و پدیده باز رخ دهد. حالات کاری مورد بررسی در این پژوهش تنها شرایط فرابحرانی و بحرانی بوده و شرایط فروبحرانی به دلیل پایدار نبودن موج ضربه‌ای و ناپایا بودن جریان مورد بحث و بررسی قرار نمی‌گیرد.



شکل ۲ - حالات مختلف کارکردی ورودی هوای فراصوتی (الف) فرابحرانی (ب) بحرانی (پ) فروبحرانی [۱۴]

### پارامترهای عملکردی ورودی فراصوتی

مهم‌ترین پارامترهای عملکردی ورودی فراصوتی نسبت دبی جرمی، بازیافت فشار کل، اعوجاج جریان و ضریب پسا هستند. نسبت دبی جرمی طبق رابطه ۱ با توجه به شکل ۳ به صورت زیر بیان می‌شود:

Supercritical <sup>۶</sup>  
Critical <sup>۷</sup>  
Subcritical <sup>۸</sup>  
Cowl Lip <sup>۹</sup>

Flow distortion <sup>۱۰</sup>

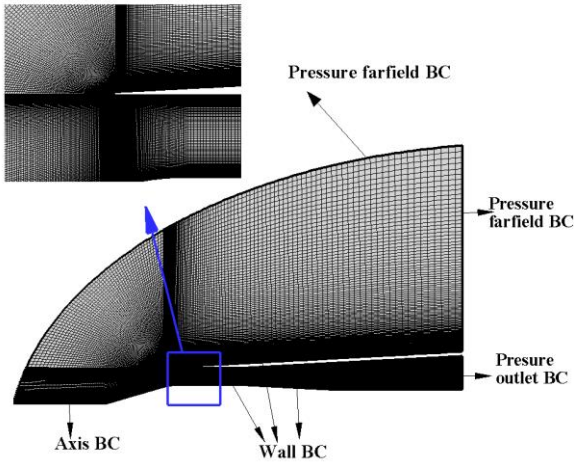
که در آن  $D$ ،  $\rho$ ،  $A$  و  $V$  به ترتیب نیروی پسا، چگالی، مساحت مرجع و سرعت جریان آزاد هستند.

### معرفی روش عددی

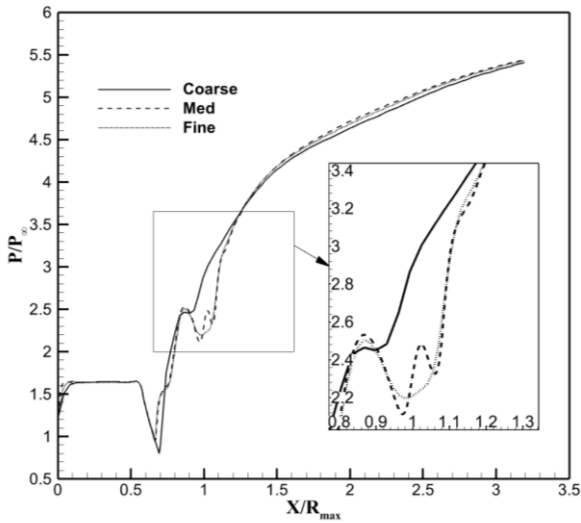
همان طور که قبلاً ذکر شد، ورودی مورد بررسی در این تحقیق یک ورودی تقارن محوری از نوع تراکم ترکیبی است که برای عدد ماخ ۲ طراحی و در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۵ جزئیات شبکه و شرایط مرزی استفاده شده نشان داده شده است. جهت بررسی استقلال حل از شبکه طبق جدول ۱ از ۳ شبکه با تعداد سلول های متفاوت استفاده شده است که در نهایت با توجه به شکل ۶ با استفاده از شبکه Med با تعداد ۱۰۰۰۰۰ سلول شبیه سازی نهایی انجام گرفته است. مقدار  $y^+$  نیز با توجه به مدل آشفتگی انتخابی در محدوده ۱ بوده است. شبیه سازی عددی به صورت دوبعدی تقارن محوری، دیواره ها آدیاباتیک و جریان پایا بوده است. معادلات حاکم بر جریان توسط نرم افزار انسیس فلونت ۱۹/۴ حل شده است. حلگر استفاده شده چگالی مینا و مدل آشفتگی استفاده شده  $K - \omega$  SST بوده است.

جدول ۱- تعداد سلول در شبکه های مختلف

شبکه	تعداد سلول
Coarse	۲۰۰۰۰
Med	۱۰۰۰۰۰
Fine	۲۰۰۰۰۰



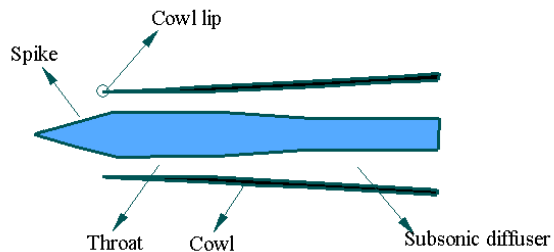
شکل ۵- شبکه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده در حل عددی



شکل ۶- نمودار نسبت فشار روی اسپایک برای شبکه های مختلف

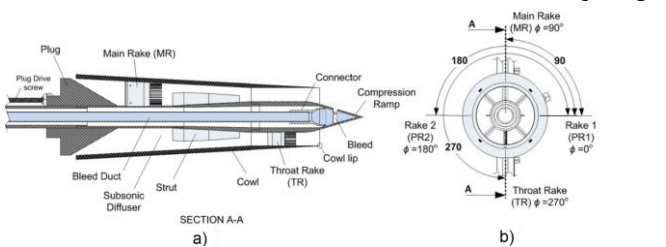
### اعتبارسنجی نتایج

شکل ۷ نسبت فشار استاتیکی روی اسپایک حاصل از نتایج عددی و نتایج تجربی [۱۶] را نشان می دهد. مشاهده می شود که در نسبت طول ۰/۱۸ به دلیل وجود امواج انبساطی روی سطح فشاری، فشار استاتیکی دچار افت می شود. اما بلافاصله با عبور از یک موج ضربه ای مایل فشار استاتیکی افزایش می یابد. در ادامه و در نسبت طول ۰/۳، جریان با عبور از موج ضربه ای عمودی افزایش قابل توجه فشار استاتیکی را تجربه می کند. همان طور که ملاحظه می شود نتایج شبیه سازی



شکل ۴- قسمت های مختلف ورودی هوای مورد بررسی

یکی از اصلی‌ترین دلایل تفاوت نتایج عددی با نتایج تجربی وجود استرات‌ها یعنی پایه‌های نگهدارنده بین جسم مرکزی و پوسته ورودی است. چهار عدد از این استرات‌ها همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در مدل تجربی استفاده شده است که در حل عددی تقارن محوری در پژوهش حاضر امکان مدل‌سازی آن‌ها وجود ندارد و برای بررسی اثرات آن‌ها نیاز به یک حل سه‌بعدی است. اگرچه ضخامت این استرات‌ها در کار تجربی به حدی نبوده است که باعث عدم تقارن زیادی در جریان (در زاویه حمله صفر) شود، ولی یکی از اصلی‌ترین عوامل اختلاف بین نتایج خصوصاً در شکل ۸ مقاله حاضر که مقایسه در پایین‌دست این استرات‌ها انجام شده است، وجود این استرات‌ها است.

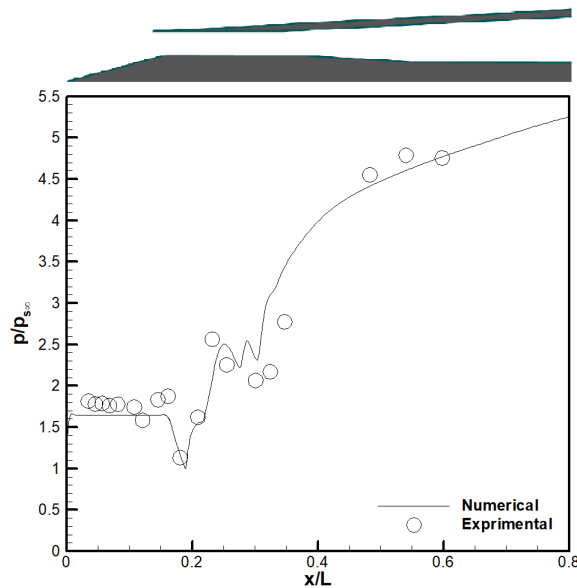


شکل ۹- شکل نمونه‌وار ورودی هوای مورد بررسی در آزمایش تجربی (الف) نمای جانبی (ب) نمای جلویی [۱۶]

### نتایج

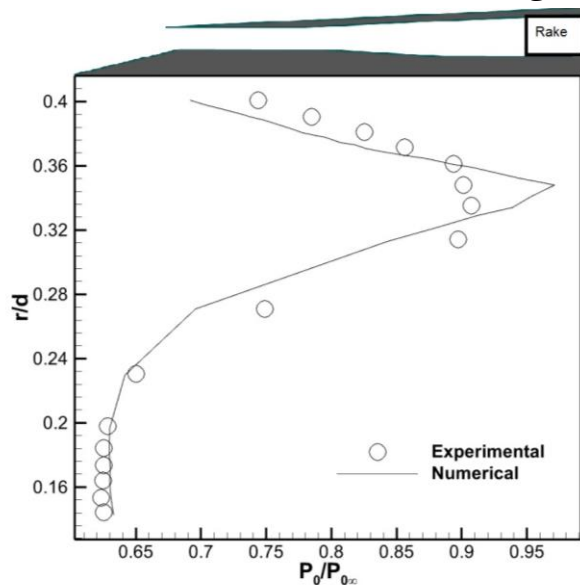
بعد از اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی، برای روش ردیف دیسک‌های چندگانه شبیه‌سازی‌های مختلف انجام گرفت. شایان ذکر است که در تمام هندسه‌ها موقعیت قرارگیری اولین حفره ۰/۱۵۵ طول ورودی و ضخامت دیسک‌ها برابر با یک میلی‌متر است. شکل ۱۰ کانتور عدد ماخ در حضور ۶ دیسک را نشان می‌دهد. مطابق این شکل به دلیل حفره‌های ایجاد شده بین دیسک‌ها یک سری موج ضربه‌ای مایل اضافی به نام امواج ضربه‌ای سدی روی سطح فشاری ورودی تشکیل می‌شوند. لایه مرزی در حضور حفره‌ها کاملاً به سطح فشاری می‌چسبد و در مجاورت دیسک‌ها به داخل حفره‌ها کشیده می‌شود که نمایانگر بهبود کنترل لایه مرزی در روش ردیف دیسک‌های چندگانه است. در ادامه برخی از پارامترهای هندسی روش ردیف دیسک‌های چندگانه یعنی طول، عمق و تعداد حفره‌ها

با دقت مناسبی با نتایج تجربی مطابقت دارد. مطابق شکل ۷ بیشینه خطا از ۱۰٪ تجاوز نمی‌کند.



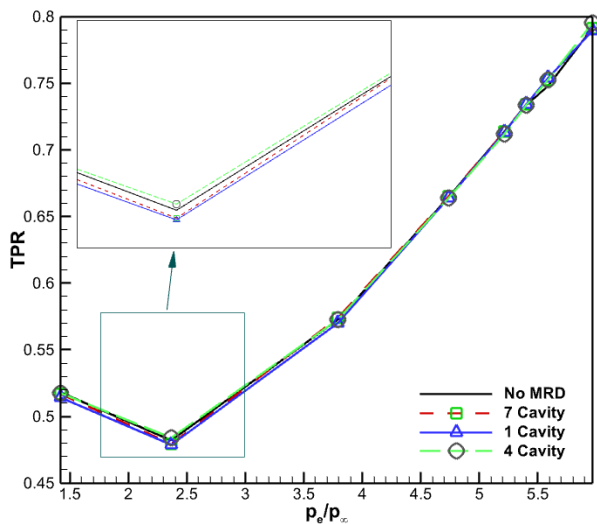
شکل ۷- مقایسه نسبت فشار استاتیکی روی اسپایک حاصل از نتایج عددی و تجربی [۱۶]

شکل ۸ نیز نسبت فشار کل در محل ریک انتهایی ورودی حاصل از نتایج عددی و نتایج تجربی [۱۶] را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی با دقت مناسبی با نتایج تجربی مطابقت دارد.



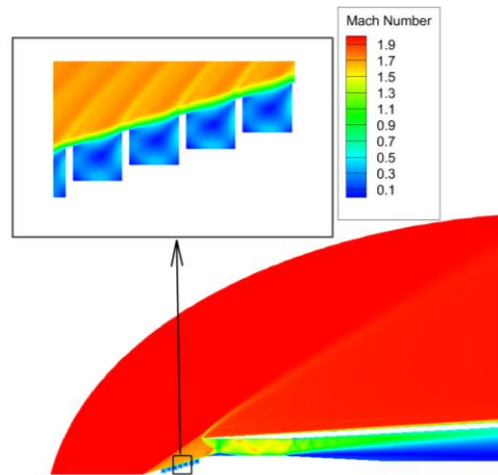
شکل ۸- مقایسه نسبت فشار کل در محل ریک انتهایی ورودی حاصل از نتایج عددی و تجربی [۱۶]

توجه به حضور دیفیوزر فروصوتی در پایین دست گلوگاه و افزایش تدریجی مساحت جریان، مقدار عدد ماخ در بالادست موج ضربه‌ای عمودی افزایش می‌یابد که منجر به قوی شدن موج ضربه‌ای عمودی می‌شود. این افزایش قدرت باعث اتلاف شدید در فشار کل جریان و به تبع آن بازیافت فشار کل کم می‌شود. از نسبت پس فشار ۲/۴ به بعد، به دلیل حرکت موج ضربه‌ای عمودی به طرف بالادست و به تبع آن کاهش عدد ماخ و قدرت موج ضربه‌ای عمودی، بازیافت فشار کل دچار افزایش می‌شود. طبق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که تعداد حفره‌ها تأثیر زیادی بر بازیافت فشار کل ندارد. مطابق شکل ۱۳ با بررسی عدد ماخ در خط مرکزی ورودی هوا این نتیجه حاصل می‌شود که امواج ضربه‌ای سدی حاصل از روش ردیف دیسک‌های چندگانه دارای قدرت کمی هستند به نحوی که مقدار عدد ماخ در عبور از امواج ضربه‌ای سدی همانند حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه است و افت عدد ماخ در ۰/۱۸ نسبت طول ناشی از عبور جریان از موج ضربه‌ای مخروطی است. به همین دلیل مقدار عدد ماخ و به تبع آن بازیافت فشار کل دچار تغییر زیادی نمی‌شود.



شکل ۱۲ - نمودار بازیافت فشار کل بر حسب پس فشار برای تعداد مختلف حفره

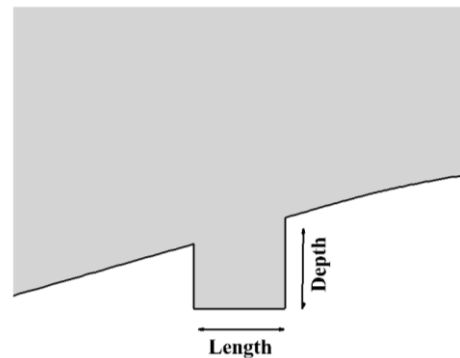
جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و پارامترهای عملکردی ورودی هوا به ازای آن‌ها مطالعه می‌شوند.



شکل ۱۰ - کاننور عدد ماخ به ازای ۶ دیسک در عدد ماخ ۲

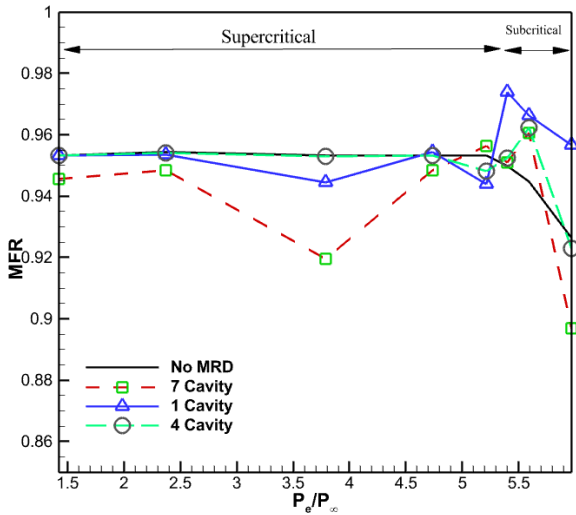
### بررسی اثر تعداد حفره‌ها

در ابتدا به بررسی اثر تعداد حفره‌ها در روش ردیف دیسک‌های چندگانه بر روی پارامترهای عملکردی پرداخته می‌شود. مطابق شکل ۱۱ در تمام حفره‌ها مقدار عمق و طول یکسان و برابر با ۷ میلی‌متر است.

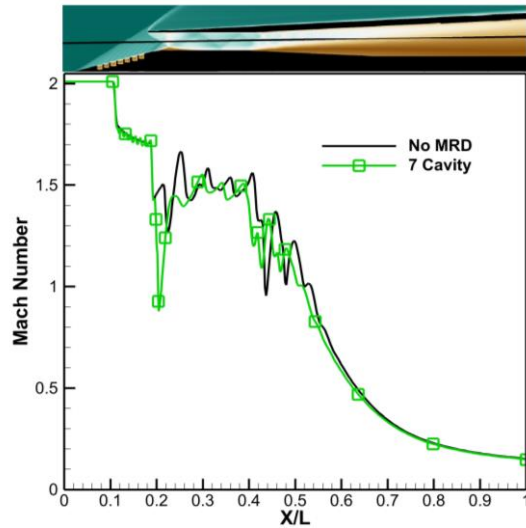


شکل ۱۱ - پارامترهای طول و عمق حفره در روش ردیف دیسک‌های چندگانه

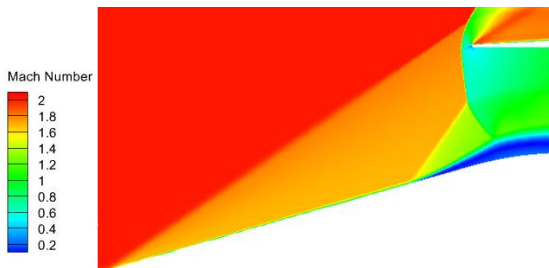
شکل ۱۲ نمودار بازیافت فشار کل برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و با روش ردیف دیسک‌های چندگانه را نشان می‌دهد. برای مقادیر کم پس فشار ورودی در حالت فرابحرانی قرار دارد. در این حالت موج ضربه‌ای عمودی در انتهای ورودی و در یک مساحت به نسبت زیاد قرار دارد. با



شکل ۱۴ - نمودار نسبت دبی جرمی بر حسب پس فشار برای تعداد مختلف حفره



شکل ۱۳ - نمودار عدد ماخ روی خط مرکزی ورودی هوا

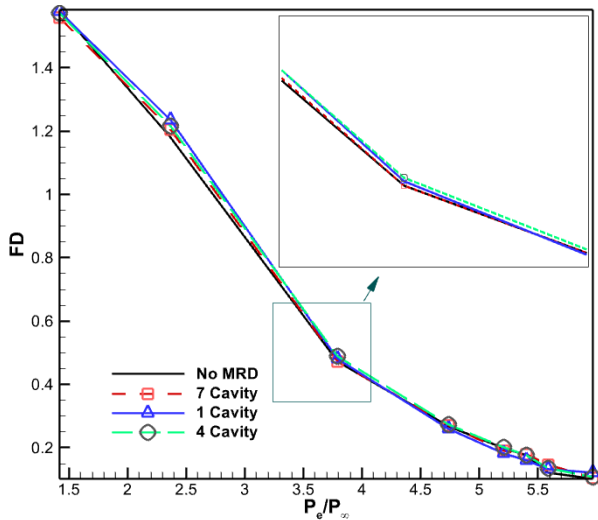


شکل ۱۵ - کانتور عدد ماخ در حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه در نسبت پس فشار ۵/۹

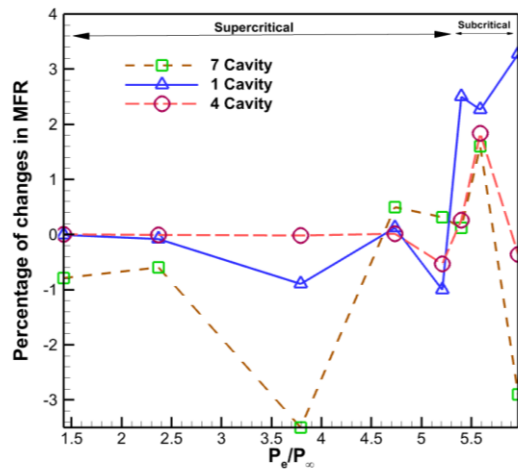


شکل ۱۶ - کانتور عدد ماخ در حالت یک حفره‌ای در نسبت پس فشار ۵/۹

شکل ۱۴ نمودار نسبت دبی جرمی را برای حالت بدون روش ردیف دیسک‌های چندگانه و با ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه به ازای نسبت پس فشار بیش‌تر از حدود ۵/۲، نسبت دبی جرمی کاهش می‌یابد که به دلیل ایجاد حالت فروبحرانی و فاصله گرفتن موج ضربه‌ای مخروطی ابتدایی از لبه پوسته و در نتیجه افزایش انحراف و سرریز جریان از اطراف لبه پوسته است که در شکل ۳ هم به صورت کلی قابل مشاهده است. این در حالی است که برای حالات با دیسک‌های چندگانه، به دلیل انحراف جریان در عبور از امواج سدی، نسبت دبی جرمی در حالت فرابحرانی مقداری کاهش می‌یابد که از نکات منفی این روش است. همچنین مشاهده می‌شود که در حالت یک حفره‌ای بر خلاف سایر موارد در پس فشارهای بزرگ‌تر از ۵ ورودی وارد حالت فروبحرانی نشده است و نسبت دبی جرمی مقدار قابل توجهی دارد. با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به دلیل وجود حفره، جدایش لایه مرزی نسبت به حالت بدون روش دیسک‌های چندگانه به تعویق می‌افتد و باعث تأخیر در بیرون افتادن موج ضربه‌ای عمودی در حالت یک حفره‌ای می‌شود. شکل ۱۷ درصد تغییرات نسبت دبی جرمی در روش ردیف دیسک‌های چندگانه را نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد.



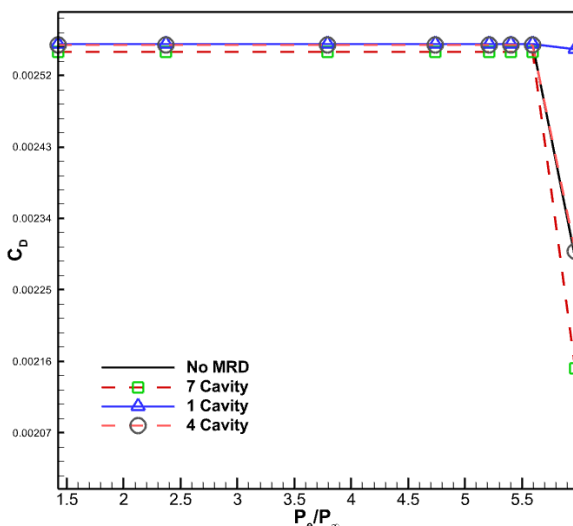
شکل ۱۸ - نمودار ضریب اعوجاج بر حسب پس فشار برای تعداد مختلف حفره



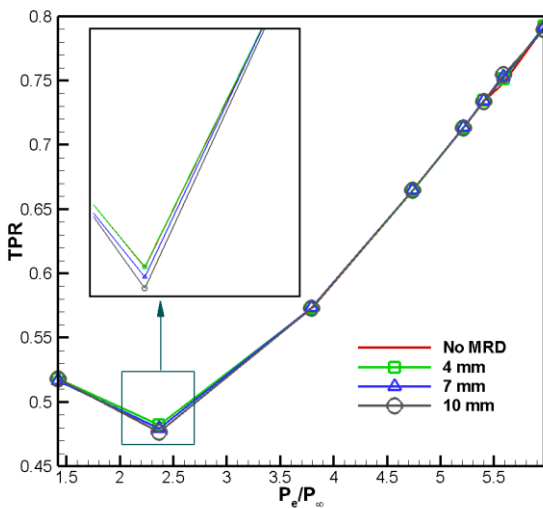
شکل ۱۷ - درصد تغییرات نسبت دبی جرمی در روش ردیف دیسک‌های چندگانه نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه بر حسب پس فشار برای تعداد مختلف حفره

شکل ۱۹ نمودار ضریب پسا را برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و با ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالتی که تعداد حفره‌ها بیشینه باشد، کاهش بیش‌تر ضریب پسا حاصل می‌شود. همچنین بر اساس شکل ۱۹ مشاهده می‌شود از آنجایی که در حالت یک حفره‌ای در پس فشار انتهایی ورودی هوا وارد حالت فروبحرانی نشده است، کاهش ضریب پسا در آن محدوده پس فشار صورت نگرفته است و ورودی در حالت بحرانی کار می‌کند. شکل ۲۰ درصد تغییرات ضریب پسا با روش ردیف دیسک‌های چندگانه را نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد.

شکل ۱۸ نمودار ضریب اعوجاج را برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و با سیستم ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد. با افزایش پس فشار و به تبع آن حرکت موج ضربه‌ای عمودی به سمت جلوگاه و تشکیل آن در یک مساحت کم‌تر، قدرت موج ضربه‌ای عمودی و در نتیجه جدایش و نایکنواختی جریان کاهش می‌یابد که طبق رابطه ۳ منجر به کاهش اعوجاج جریان می‌شود. مشاهده می‌شود که همانند بازیافت فشار کل نسبت به حالت بدون سیستم ردیف دیسک‌های چندگانه تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود. از آنجایی که ضریب اعوجاج نیز همانند بازیافت فشار کل وابسته به فشار کل انتهایی ورودی هوا است و فاصله بین حفره‌ها و انتهای ورودی به نسبت زیاد است که باعث اختلاط جریان و از بین رفتن اثر حفره‌ها می‌شود، تغییر زیادی در مقدار ضریب اعوجاج حاصل نمی‌شود.

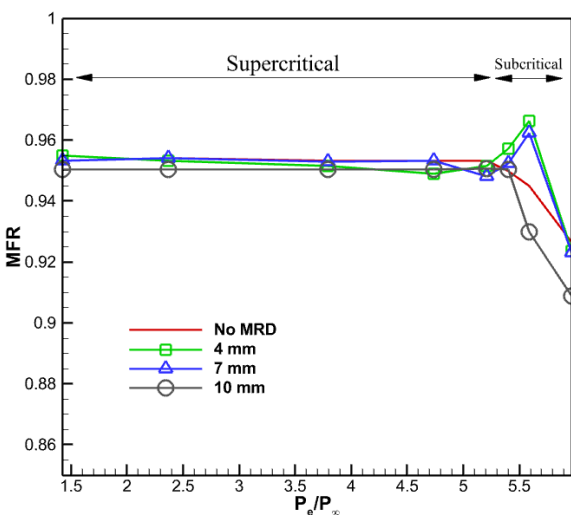






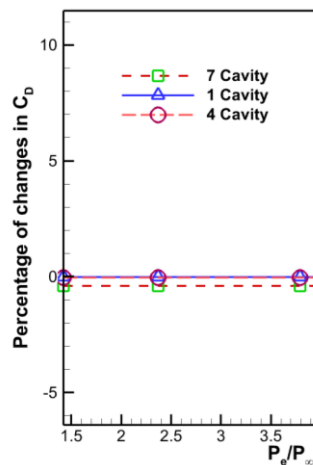
شکل ۲۱ - نمودار بازیافت فشار کل بر حسب پس فشار برای طول مختلف حفره

شکل ۲۲ نمودار نسبت دبی جرمی را برای حالت بدون روش ردیف دیسک‌های چندگانه و با ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد. طبق شکل ۲۲ مشاهده می‌شود که در محدوده فرابحرانی استفاده از ردیف دیسک‌های چندگانه اثر مطلوبی نداشته است. ضمناً در حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و حالتی که طول حفره‌ها برابر با ۷ میلی‌متر باشد، بیش‌ترین مقدار نسبت دبی جرمی حاصل می‌شود، اما در محدوده فروبحرانی برای کم‌ترین مقدار طول حفره، ورودی دارای نسبت دبی جرمی بیشینه و قابل قبولی است.



شکل ۲۲ - نمودار نسبت دبی جرمی بر حسب پس فشار برای طول مختلف حفره

شکل ۱۹ - نمودار ضریب پسا بر حسب پس فشار برای تعداد مختلف حفره

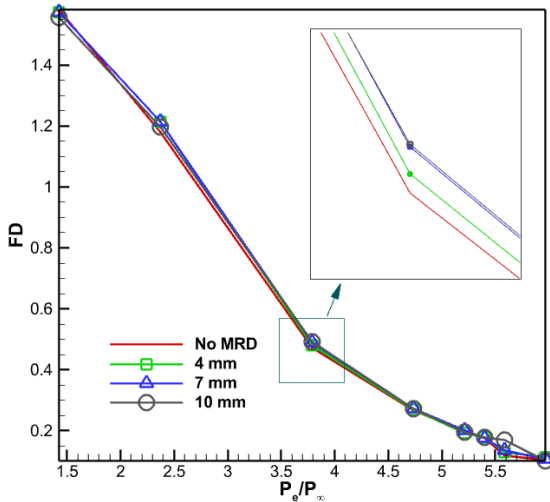


شکل ۲۰ - درصد تغییرات ضریب پسا در روش ردیف دیسک‌های چندگانه نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه بر حسب پس فشار برای طول مختلف حفره

### بررسی اثر طول حفره‌ها

در ادامه به بررسی اثر طول حفره‌ها در دستگاه ردیف دیسک‌های چندگانه بر روی پارامترهای عملکردی ورودی پرداخته می‌شود. در تمام حالات مقدار عمق برابر با ۷ میلی‌متر و تعداد حفره‌ها برابر با ۴ بوده است.

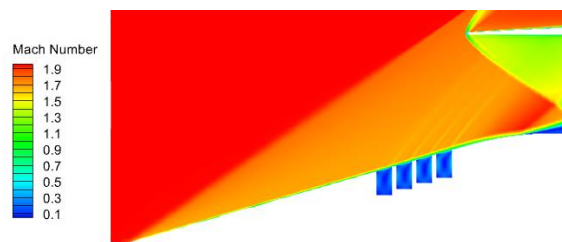
شکل ۲۱ نمودار بازیافت فشار کل برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و انواع ورودی با روش ردیف دیسک‌های چندگانه معرفی شده در بالا را نشان می‌دهد. طبق شکل مشاهده می‌شود که طول حفره‌ها نیز تاثیر چندانی بر بازیافت فشار کل ندارد. مانند قبل علت این موضوع دوباره قدرت پایین امواج سدی است که تاثیر زیادی بر کاهش عدد ماخ جریان و به تبع آن مقدار فشار کل جریان ندارد.



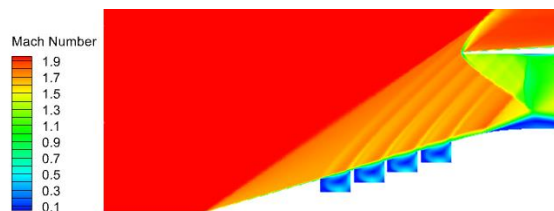
شکل ۲۵ - نمودار ضریب اعوجاج بر حسب پس فشار برای طول مختلف حفره

شکل ۲۶ نمودار ضریب پسا برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و انواع ورودی با ردیف دیسک‌های چندگانه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در حالتی که طول حفره‌ها برابر با مقدار بیشینه باشد ضریب پسای کمتری حاصل می‌شود. با توجه به اینکه در این حالت تعدادی از امواج ضربه‌ای سدی از بالای لبه پوسته عبور می‌کنند، با تضعیف امواج ضربه‌ای اطراف پوسته باعث کاهش ضریب پسا می‌شوند. از نسبت پس فشار ۵/۵ به بعد نیز به دلیل وقوع حالت فروبحرانی برای تمام حالات و تشکیل موج ضربه‌ای عمودی جلوی دهانه ورودی ضریب پسا افت ناگهانی داشته است زیرا سطح بالایی پوسته در معرض یک جریان فروصوتی قرار می‌گیرد. شکل ۲۷ درصد تغییرات ضریب پسا با روش دیسک‌های چندگانه را نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۲۳ و ۲۴ در حالتی که طول حفره‌ها برابر با مقدار بیشینه است، امواج ضربه‌ای سدی تمام دهانه ورودی را می‌پوشانند و با انحراف جریان و افزایش سرریز هوا از اطراف لبه پوسته باعث کاهش نسبت دبی جرمی در حالت فروبحرانی نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه می‌شود. در پس فشارهای حالت فروبحرانی نیز برای طول حفره ۴ و ۷ میلی‌متر به دلیل تاخیر در جدایش جریان، نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه حجم وسیع‌تری از جریان وارد دهانه ورودی می‌شود که باعث افزایش نسبت دبی جرمی می‌شود.

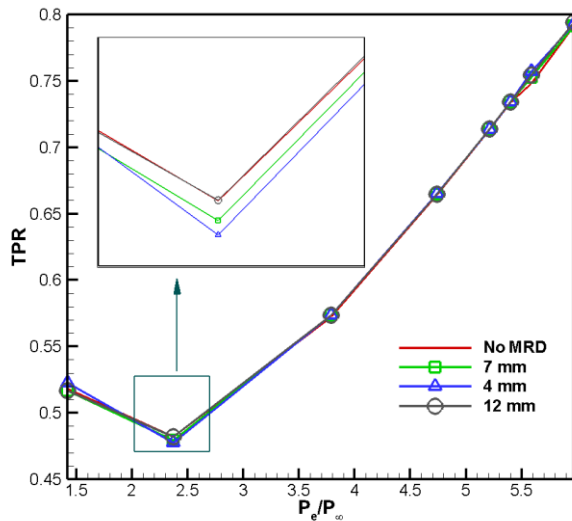


شکل ۲۳ - کانتور عدد ماخ به ازای طول حفره ۴ میلی‌متر در نسبت پس فشار ۴/۷



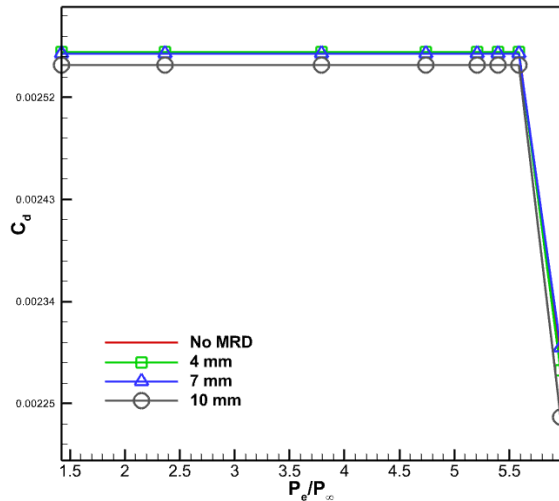
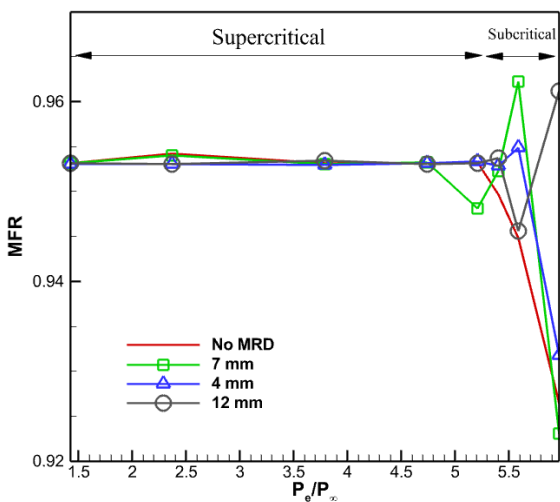
شکل ۲۴ - کانتور عدد ماخ به ازای طول حفره ۱۰ میلی‌متر در نسبت پس فشار ۴/۷

شکل ۲۵ نمودار ضریب اعوجاج برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و انواع مختلف ورودی با سیستم ردیف دیسک‌های چندگانه را نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۲۵ پیداست به دلیل ضعیف بودن امواج ضربه‌ای سدی طول حفره‌ها تاثیر چندانی بر ضریب اعوجاج ندارد.

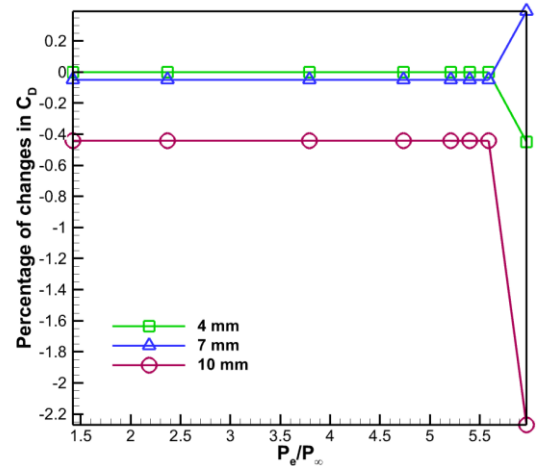


شکل ۲۸ - نمودار بازیافت فشار کل بر حسب پس فشار برای عمق مختلف حفره

شکل ۲۹ نمودار نسبت دبی جرمی را برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و با ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد. طبق شکل ۲۹ مشاهده می‌شود که در محدوده فرابحرانی تمام حالات شبیه به هم عمل می‌کنند، اما در محدوده فروبحرانی حالتی که دارای بیشترین مقدار عمق است، نسبت دبی جرمی آن مقدار قابل توجهی دارد و بر خلاف سایر حالات وارد حالت فروبحرانی نشده است. دلیل این موضوع کشیده شدن بیشتر لایه مرزی به داخل حفره‌ها و به تبع آن جدایش دیرتر جریان است که باعث می‌شود ورودی در حالت کارکردی بحرانی باقی بماند و نسبت دبی جرمی افزایش یابد.



شکل ۲۶ - نمودار ضریب پسا بر حسب پس فشار برای طول مختلف حفره

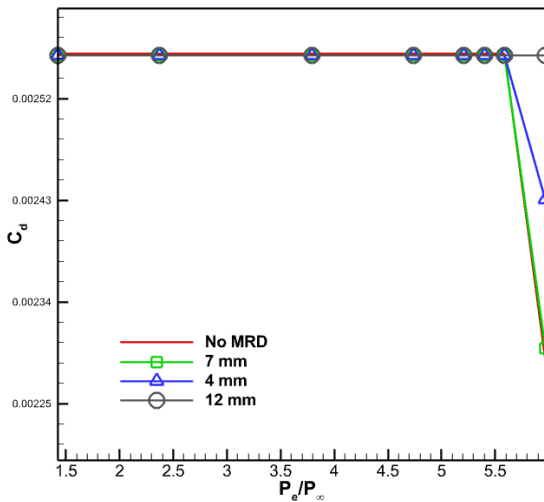


شکل ۲۷ - درصد تغییرات ضریب پسا در روش ردیف دیسک‌های چندگانه نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه بر حسب پس فشار برای طول مختلف حفره

### بررسی اثر عمق حفره‌ها

در انتها اثر عمق حفره‌ها در روش ردیف دیسک‌های چندگانه بر روی پارامترهای عملکردی بررسی می‌شود. در تمام حالات مقدار طول برابر با ۷ میلی‌متر و تعداد حفره‌ها برابر با ۴ بوده است.

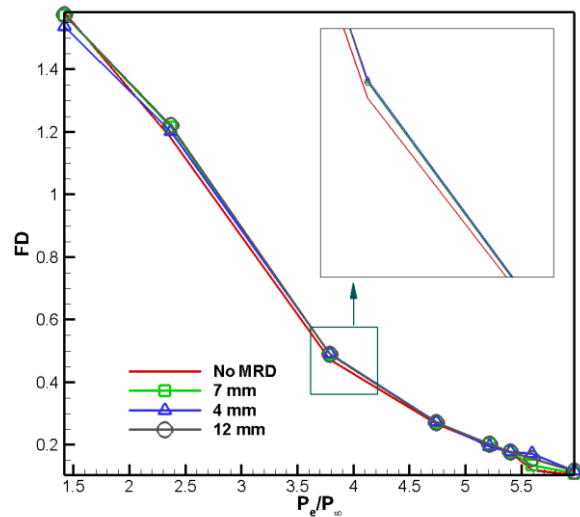
شکل ۲۸ نمودار بازیافت فشار کل را برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و با روش ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد. طبق شکل ۲۸ مشاهده می‌شود که عمق حفره‌ها نیز تاثیر چندانی بر بازیافت فشار کل ندارد که دلیل آن ضعیف بودن امواج ضربه‌ای سدی است.



شکل ۲۹- نمودار نسبت دبی جرمی بر حسب پس فشار برای عمق مختلف حفره

شکل ۳۰ نمودار ضریب اعوجاج را برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و با سیستم ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۳۰ پیداست عمق حفره-ها تاثیر چندانی بر ضریب اعوجاج ندارد که دلیل آن دور بودن محل دیسک‌ها از انتهای ورودی و اختلاط جریان تا انتهای ورودی است.

شکل ۳۱- نمودار ضریب پسا بر حسب پس فشار برای عمق مختلف حفره



شکل ۳۰- نمودار ضریب اعوجاج بر حسب پس فشار برای عمق مختلف حفره

جدول ۲- درصد تغییرات ضریب پسا در روش ردیف دیسک‌های چندگانه نسبت به حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه

عمق (میلی‌متر)	نسبت پس فشار	
	۵/۵۸	۵/۹۶
۴	-۰٪/۰۵	۶٪/۱۳
۷	-۰٪/۰۱۱	۰٪/۳۹
۱۲	-۰٪/۰۴	۱۱٪/۷۲

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از حل عددی، یک ورودی فراصوتی تقارن محوری با تراکم ترکیبی شبیه‌سازی شد. برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، حل عددی با داده‌های تجربی تونل باد برای همان ورودی مقایسه و هم‌خوانی آن‌ها بررسی شد. سپس اثر طول، عمق و تعداد حفره‌ها بر پارامترهای عملکردی ورودی هوا در عدد ماخ ۲ مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که استفاده از سیستم ردیف دیسک‌های چندگانه به دلیل دور بودن محل قرارگیری دیسک‌ها از انتهای ورودی و از بین رفتن اثر حفره‌ها، تأثیر محسوسی بر بازیافت فشار کل و ضریب اعوجاج ندارد. با بررسی نمودارهای نسبت دبی جرمی مشاهده شد که در محدوده فرا بحرانی مقدار نسبت دبی جرمی وابسته به هندسه حفره‌ها است و استفاده از روش ردیف دیسک‌های چندگانه باعث افت کم نسبت دبی جرمی به دلیل

شکل ۳۱ نمودار ضریب پسا را برای حالت بدون ردیف دیسک‌های چندگانه و با ردیف دیسک‌های چندگانه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که عمق حفره‌ها تاثیر چندانی بر ضریب پسا ندارد و تمامی حالات تقریباً شبیه به هم عمل می‌کنند.

advanced variable geometry inlet," in *55th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*, 2004, p. S. 5.06 .

- [۹] H. Kobayash, Y. Maru, M. Hongoh, S. Takeuchi, K. Okai, and T. Kojima, "Study on variable-shape supersonic inlets and missiles with MRD device," *Acta Astronautica*, vol. 61, no. 11-12, pp. 978-988, 2007.
- [۱۰] Y. Maru, H. Kobayashi, S. Takeuchi, and T. Sato, "Flow oscillation characteristics in conical cavity with multiple disks," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 44, no. 5, pp. 1012-1020, 2007.
- [۱۱] S. E. Vali and S. Abbasi, "Hypersonic drag and heat reduction mechanism of a new hybrid method of spike, multi-row discs and opposing jets aerodynamic configuration," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 194, p. 123034, 2022.
- [۱۲] S. Khurana, G. G. Achary, S. Arora, and J. Sinha, "Computational analysis of multi row disk inlet," in *2017 First International Conference on Recent Advances in Aerospace Engineering (ICRAAE)*, 2017: IEEE, pp. 1-5 .
- [۱۳] J. Sinha, K. Arora, O. prakash, S. Bandopadhyaya, P. P. P. Saha, and A. Bhattacharya, "Analysis of multi row disk inlet device in supersonic flow condition" Annual CFD Symposium, 2019
- [۱۴] M. R. Soltani, J. Sepahi Younsi, and A. Daliri, "Performance investigation of a supersonic air intake in the presence of the boundary layer suction," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 229, no. ۸, pp. 1495-1509, 2015.
- [۱۵] M. R. Soltani, J. S. Younsi, M. Farahani, and A. Masoud, "Numerical simulation and parametric study of a supersonic intake," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. ۲۲۷, no. 3, pp. 467-479, 2013.

افزایش سرریز جریان می‌شود. در محدوده فروبحرانی نیز مشاهده شد که با کاهش تعداد و طول حفره‌ها و افزایش عمق آن‌ها نسبت دبی جرمی افزایش می‌یابد. در مورد ضریب پسا نیز مشاهده شد که این کمیت وابسته به عمق حفره‌ها نیست و در حالتی که تعداد و طول حفره‌ها در حالت بیشینه باشد، ورودی دارای کمترین ضریب پسا خواهد بود. همچنین با بررسی نمودارها این نتیجه حاصل شد که با کاهش طول و تعداد حفره‌ها و افزایش عمق آن‌ها ورودی هوا دیرتر وارد حالت فروبحرانی شده و در حالت کارکردی بحرانی باقی می‌ماند.

#### منابع و مراجع

- [۱] M. Gridley and S. Walker, "Advanced aero-engine concepts and controls," in *AGARD Conference Proceedings*, 1996, vol. 572 .
- [۲] M. Valorani, F. Nasuti, M. Onofri, and C. Buongiorno, "Optimal supersonic intake design for air collection engines (ACE)," *Acta Astronautica*, vol. 45, no. 12, pp. 729-745, 1999.
- [۳] H. Ran and D. Mavris, "Preliminary design of a 2D supersonic inlet to maximize total pressure recovery," in *AIAA 5th ATIO and 16th Lighter-Than-Air Sys Tech. and Balloon Systems Conferences*, 2005, p. 7357 .
- [۴] E. L. Goldsmith, *Intake aerodynamics*. Blackwell Science, 1999.
- [۵] M. Migliorini, P. K. Zachos, and D. G. MacManus, "Novel method for evaluating intake unsteady flow distortion," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 38, no. 1, pp. 135-147, ۲۰۲۲ ,
- [۶] H. Kobayashi, N. Tanatsugu, T. Sato, Y. Maru, and T. Kojima, "Experimental study of multi-row disk inlets for hypersonic air breathing propulsion," in *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2004, p. 861 .
- [۷] J. Sinha, "Studies on the transition of the flow oscillations over an axisymmetric open cavity model," *Advances in Aerospace Science and Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 83-90, 2013.
- [۸] H. Kobayashi, T. Kojima, K. Okai, and Y. Maru, "Study of supersonic cavity flow in

- [۱۶] M. R. Soltani and J. Sepahi-Younsi, "Buzz cycle description in an axisymmetric mixed-compression air intake," *AIAA Journal*, vol. 54, no. 3, pp. 1040-1053, 2016.