



## بررسی عددی جریان مماسی سیال عبوری از یک آستر ریزسوراخ‌دار

مهدی معاونی تاج‌الدین<sup>۱</sup>، ایمان بهمن جهرمی<sup>۲\*</sup>، حسن ناصح<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

### چکیده

در این بررسی میدان جریان پس‌زمینه برای مطالعات آکوستیکی روی یک آستر ریزسوراخ‌دار استخراج شده‌است. برای این منظور، بخشی از یک آستر ریزسوراخ‌دار که در معرض جریان مماسی هوا قرار دارد، به عنوان هندسه مورد مطالعه انتخاب شده‌است. معادلات ناویر-استوکس در حالت سه بعدی به صورت عددی حل شده‌است. برای این منظور شبکه‌ی محاسباتی مناسب با تعداد سلول محاسباتی لازم، ایجاد شده‌است. برای مدل‌سازی اغتشاشات جریان نیز از مدل اغتشاشی  $k - \varepsilon$  بهره گرفته شده‌است. برای کاستن از هزینه‌ی محاسبات در ورودی کانال، از شرط مرزی جریان کاملاً توسعه یافته استفاده شده‌است. به منظور صحت‌گذاری، نتایج بدست آمده با نتایج تجربی، مقایسه شده‌است. اثر عدد ماخ جریان ورودی به کانال بر دو مکانیزم اثر گذار بر رفتار آکوستیکی آستر، یکی مقدار مؤلفه‌ی عمودی سرعت در دهانه‌ی سوراخ و دیگری مقدار گردابه‌ها در دهانه و پایین دست سوراخ بررسی شده‌است. با افزایش عدد ماخ در ورودی مجرا، میزان چرخش مؤلفه‌ی عمودی سرعت در طول سوراخ افزایش یافته که سبب تغییر در خواص آکوستیکی آستر از جمله امپدانس آن خواهد شد. میزان تولید گردابه‌ها در پایین دست سوراخ نیز با افزایش عدد ماخ، افزایش می‌یابد. نتایج نشان دهنده‌ی افزایش امپدانس آکوستیکی با افزایش عدد ماخ است.

**کلمات کلیدی:** آسترهای ریز سوراخ‌دار؛ آیروآکوستیک؛ جریان مماسی؛ معادلات ناویر-استوکس؛ گردابه.

## Numerical Investigation of Grazing Flow on a Micro Perforated Plate Liner

Mahdi Moaveni Tajoddin<sup>1</sup>, Iman Bahman Jahromi<sup>2,\*</sup>, Hassan Naseh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Ministry of Science, Research & Technology, Aerospace Research Institute, Iran.

<sup>2</sup> Assist. Prof., Ministry of Science, Research & Technology, Aerospace Research Institute, Iran.

### Abstract

This study investigates the background flow field of a micro-perforated plate (MPP) liner for acoustic analysis under grazing airflow conditions. A segment of the MPP liner is modeled, and the three-dimensional Navier-Stokes equations are numerically solved using a carefully designed computational mesh. A turbulence model is employed to account for flow disturbances, and a fully developed flow boundary condition is applied at the channel entrance to optimize computational cost. The numerical results are validated against experimental data from previous studies. The impact of flow Mach number on two key mechanisms influencing the acoustic behavior of the liner is examined: (1) the vertical velocity component at the hole openings, and (2) vortex generation at and downstream of the holes. As the Mach number at the inlet of the duct increases, the amount of rotation of the vertical component of velocity along the hole also increases, which leads to changes in the acoustic properties of the liner, including its impedance. In other words, the generation of vortices downstream of the hole increases with increasing Mach number. Findings reveal that an increase in Mach number leads to higher acoustic impedance, highlighting the complex interplay between flow dynamics and acoustic performance.

**Keywords:** Micro Perforated Plate; aeroacoustic; grazing flow; Navier-Stokes equations; vortex.

## ۱- مقدمه

ارتعاشات صوتی علاوه بر تأثیر مخرب بر سلامت جسمی و روانی انسان‌ها [۱] و [۲]، می‌تواند بر سازه‌های هوایی و فضایی نیز تأثیرات مخربی داشته‌باشد. ارتعاشات بیش از حد ناشی از سر و صدا منجر به خستگی، افزایش تنش و آسیب به بدنه و اجزای هواپیماها و فضاپیماها می‌شود. شناسایی منابع بالقوه ارتعاش و راهبردهای کاهش اثرات آن، سبب افزایش ایمنی و طول عمر وسایل پرنده خواهدشد. برای دستیابی به این هدف، درک تعامل بین جریان سیال و امواج آکوستیک برای بهینه‌سازی طراحی وسایل پرنده ضروری است. یکی از روش‌های مقابله با اثرات مخرب امواج آکوستیکی استفاده از آسترها است. از آسترهای آکوستیکی در دهانه‌ی ورودی موتورهای توربینی تا نازل خروجی آن‌ها، محافظه‌ی احتراق انواع موتورهای توربینی و فضایی، کانال‌های تهویه‌ی مطبوع کابین هواپیما و کپسول‌های فضایی سرنشین‌دار، پرنده‌های بدون سرنشین و کم‌صدا و بسیاری کاربرد دیگر استفاده می‌شود. در این بین آسترهای صفحه‌ی ریزسوراخدار<sup>۲</sup> دارای کاربرد زیادی هستند. در بسیاری از کاربردهای بیان شده، معمولاً جریان سیال، مماس بر آستر از آن عبور می‌کند. لذا در این بررسی عبور جریان مماسی<sup>۳</sup> بر آستر ریزسوراخدار مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

شناسایی جریان سیال پس‌زمینه و پدیده‌شناسی جریان در آسترهای ریزسوراخدار یکی از اصلی‌ترین گام‌های مطالعه‌ی پدیده‌های آکوستیکی می‌باشد. برای این منظور، در این بررسی حل جریان سه‌بعدی معادلات ناویر-استوکس در مجاورت آسترهای زیرسوراخدار انجام شده‌است.

کربی و همکاران [۳] به‌صورت تجربی اثر جریان سیال مماسی بر امیدانس آکوستیکی صفحات ریزسوراخدار را در سرعت‌های مختلف بررسی کردند. مالاماری و همکاران [۴] نیز به صورت تجربی اثر جریان مماسی تا ماخ ۰/۷ را بر امیدانس آکوستیکی صفحات ریزسوراخدار بررسی کردند. دان ژائو و همکاران [۵] و [۶] آسترهای ریزسوراخدار را در معرض جریان سیال عمودی<sup>۴</sup> قرار دادند و پارامترهای اثر ماخ جریان، قطر سوراخ‌ها و نسبت سوراخ‌شدگی را بر پارامترهای آکوستیکی بصورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند.

ژنلین جی و همکاران [۷] اثر ماخ جریان در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۰/۲ و سوراخ آستر در محدوده‌ی ۲ تا ۶ میلی‌متر و چند پارامتر هندسی دیگر بر امیدانس آستر را مورد مطالعه‌ی عددی قرار دادند. بهمن جهرمی و همکاران [۸] به مطالعه‌ی آستری شبیه به آسترهای ریزسوراخدار بدون حضور جریان سیال پرداختند. دستورانی [۹] اثر شکل حفره‌ی پشت سوراخ را بر فرکانس جذب صوت و شدت آن در حضور جریان سیال مماسی بررسی کرد. [۱۰] مقایسه‌ای بین مدل‌های نیمه‌تجربی موجود برای بیان امیدانس آکوستیکی آسترهای ریزسوراخدار در دو نوع کانال با مقاطع مستطیلی و دایروی با نتایج حل عددی معادلات ناویر-استوکس است. هواپینگ ون و همکاران [۱۱] با شبیه‌سازی عددی جریان مماسی بر روی آستر ریزسوراخدار، اثر زاویه‌ی سوراخ و نسبت قطر به طول آن را بر امیدانس آستر در ماخ‌های زیر ۰/۲ مورد مطالعه قرار داده‌اند. در صورتی‌که نسبت سوراخ‌شدگی در حدود یک درصد باشد، براساس مطالعات تئوری و تجربی، می‌توان به مطالعات بر روی یک آستر با یک سوراخ بسنده نمود [۱۲] و [۳]. از طرفی معمولاً شدت صوت ایجاد شده توسط آستر در مقابل شدت صوت جذب شده توسط آن قابل صرف‌نظر کردن است [۱۳].

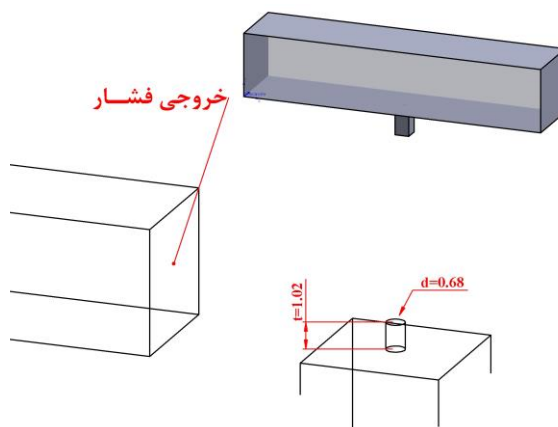
در این بررسی، به مطالعه‌ی عددی جریان سیال مماسی بر روی یک آستر ریزسوراخدار در محدوده‌ی عدد ماخ بین ۰/۱ تا ۰/۳ پرداخته و از معادلات ناویر-استوکس در شکل سه بعدی آن استفاده شده است. برای کاستن از هزینه‌ی محاسبات، شرط مرزی ورودی کانال، جریان کاملاً توسعه یافته<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده‌است. در نتیجه‌ی این انتخاب طول کانال در بالادست جریان به ۵۵ میلی‌متر کاهش یابد. در حالی‌که در بررسی‌های بیان شده در ادبیات پژوهش این مقدار در حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. برای مدل‌سازی اغتشاشات جریان روش متوسط شده‌ی رینولدز<sup>۶</sup> و مدل اغتشاشی  $k - \varepsilon$  به‌کار گرفته شده است.

در ادامه‌ی این بررسی، هندسه‌ی آستر ریزسوراخدار معرفی می‌شود. سپس معادلات حاکم بر جریان ارائه می‌شود. در بخش بعدی ارائه نتایج شبیه‌سازی عددی و صحت‌گذاری ارائه می‌شود و نهایتاً جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بیان شده است.

<sup>۴</sup> bias-flow<sup>۵</sup> Fully developed flow<sup>۶</sup> Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)<sup>۱</sup> Liner<sup>۲</sup> Micro Perforated Plate (MPP)<sup>۳</sup> Grazing flow

## ۲- هندسه‌ی آستر ریزسوراخ‌دار

استفاده از آسترهای صفحات ریزسوراخ‌دار بسیار رایج است و ساختار آن‌ها از جنبه‌های گوناگون مورد مطالعه‌ی پژوهشگران زیادی قرار گرفته‌است. لذا در بررسی حاضر و در ادامه و تکمیل پژوهش‌های انجام شده‌ی قبلی، بررسی عبور جریان مماسی بر روی آستر با استفاده از شرط مرزی جریان توسعه یافته در ورود به مجرا مورد بررسی قرار گرفته‌است. هندسه‌ی مورد بررسی با توجه به مطالعه‌ی تجربی مالمری و همکاران در [۴] انتخاب شده است. آستر مورد مطالعه در پژوهش ایشان دارای ابعاد مطابق جدول ۱ است. از آنجا که در بررسی ایشان نسبت سوراخ‌شدگی<sup>۱</sup> در حدود ۱٪ است، لذا اندرکنش بین سوراخ‌ها ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است [۱۲] و [۳]. بنابراین می‌توان از اثر نحوه‌ی چیدمان سوراخ‌ها نیز صرف‌نظر کرد. امپدانس آستر هم برابر با امپدانس یک سوراخ تقسیم بر نسبت سوراخ‌شدگی در آستر است [۱۲]. بنابراین برای کاستن از هزینه‌ی محاسبات در این پژوهش مدل هندسی مطابق



شکل ۱ در نظر گرفته خواهد شد. همه‌ی ابعاد به میلی‌متر است.

## ۳- معادلات حاکم و فرضیات

برای بررسی میدان سرعت و فشار در مجرا و اطراف آستر با توجه به فیزیک مسئله و این‌که نتایج باید برای تحلیل‌های آکوستیکی آتی قابل استفاده باشند؛ معادلات به‌صورت تراکم پذیر در نظر گرفته می‌شود. رژیم جریان مغشوش از حل گر سیال تک‌فاز با مدل توربولانسی  $k-\varepsilon$  استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این بخش همان معادلات پیوستگی (معادله‌ی (۱)) و بقای ممنتوم (معادله‌ی (۲)) است [14].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu \epsilon_{ij} + \delta_{ij} \lambda \text{div} \mathbf{u}] + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

که  $\rho$  چگالی،  $\mathbf{u}$  بردار سرعت (شامل سه مؤلفه‌ی  $(u, v, w)$ ، فشار  $p$  و بردار نیروهای حجمی است.  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کرونکر<sup>۲</sup> بوده و برای مقادیر  $i = j$  دارای مقدار یک و برای سایر موارد، مقدار آن صفر می‌باشد و  $\lambda$  ویسکوزیته‌ی بالک<sup>۳</sup> است.

سیال عامل هوا در نظر گرفته خواهد شد و محاسبات در شرایط دما و فشار استاندارد محیط انجام خواهد شد. از اثرات گرانش و سایر نیروهای حجمی صرف‌نظر می‌شود. جریان آدیاباتیک فرض می‌شود. ضرایب ترموفیزیکی سیال، مانند ویسکوزیته و غیره ثابت در نظر گرفته خواهند شد. جریان در مجرا کاملاً توسعه یافته و دائم در نظر گرفته می‌شود. در تمام موارد جریان سیال در ماخ‌های زیر ۰/۳ بررسی خواهد شد.

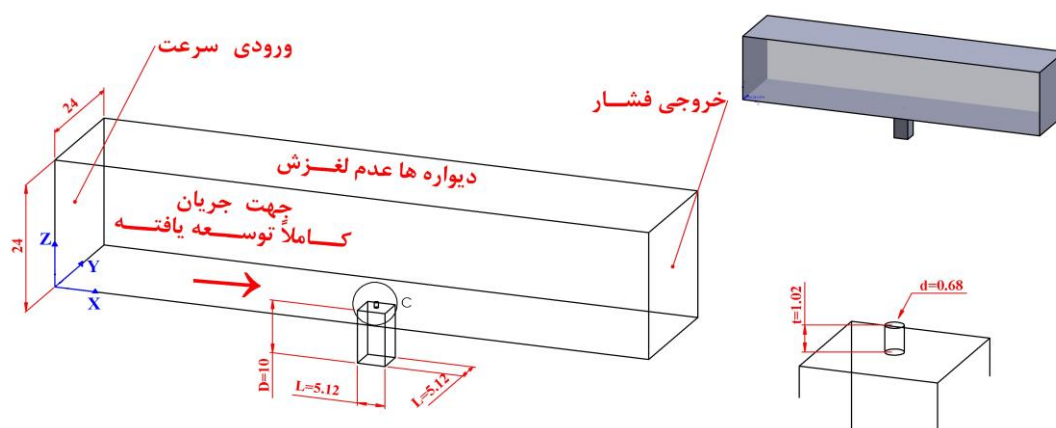
جدول ۱- مشخصات آستر مورد مطالعه در پژوهش مالمری و همکاران در [۴]

| قطر سوراخ‌ها<br>[mm] | ضخامت صفحه<br>یا طول سوراخ<br>[mm] | نسبت سوراخ<br>شدگی ( $\delta$ ) | ابعاد مقطع<br>مجرا [mm] | ابعاد صفحه‌ی<br>آستر [mm] | عمق حفره<br>پشت آستر<br>[mm] | طول<br>کانال [mm] |
|----------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------|
| ۰/۶۸                 | ۱/۰۲                               | ۱/۰۳۹                           | ۲۴*۲۴                   | ۲۴*۲۴                     | ۱۰                           | ۸۶۰               |

<sup>3</sup> bulk viscosity

<sup>1</sup> Perforation ratio

<sup>2</sup> Kronecker delta



شکل ۱- نمای کلی هندسه مورد بررسی و شرایط مرزی آن

جدول ۲- جزئیات شبکه‌ی محاسباتی

| تعداد سلول‌های محاسباتی | تعداد سلول‌های چهار وجهی <sup>۱</sup> | تعداد سلول‌های منشوری <sup>۲</sup> | تعداد سلول‌های هرمی <sup>۳</sup> | تعداد سلول‌های شش وجهی <sup>۴</sup> | حداقل کیفیت المان‌ها | کیفیت متوسط المان‌ها |
|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| ۸۸۶۹۷۸                  | ۵۹۳۱۳۸                                | ۱۸۴۰۲۰                             | ۶۴۴۰                             | ۱۰۳۳۸۰                              | ۰/۰۲۶۴۱              | ۰/۷۳۳۵               |

ندارد. بنابراین این شبکه‌ی محاسباتی برای ادامه‌ی شبیه‌سازی انتخاب گردید.

جزئیات شبکه‌ی محاسباتی انتخاب شده به این صورت است که در کانال اصلی حداکثر اندازه‌ی المان ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. در اطراف دیواره‌ها از شبکه‌ی لایه مرزی به تعداد ۳۰ لایه استفاده شده‌است. در سوراخ و نواحی اطراف آن از شبکه‌ی منشوری مناسب استفاده شده‌است. در داخل سوراخ نیز از ۱۵ لایه شبکه‌ی لایه مرزی استفاده شده‌است. در داخل حفره هم از شبکه‌ی چهار وجهی بی‌سازمان و در نزدیک دیواره‌های آن نیز از شبکه‌ی لایه مرزی استفاده شده‌است. در شکل ۲ نمای کلی شبکه ارائه شده‌است.

#### ۴- مشخصات شبکه محاسباتی

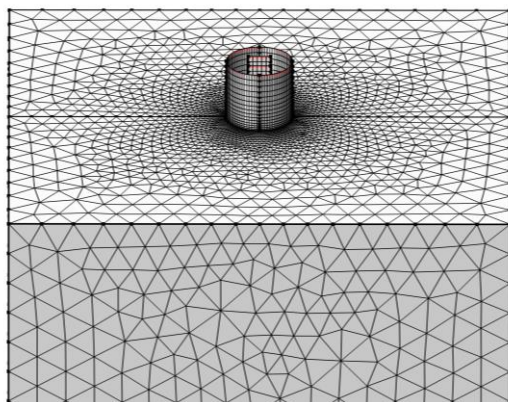
برای محاسبه‌ی پارامترهای جریان، لازم است تا شبکه‌ی محاسباتی مناسب ایجاد گردد. لذا با بررسی اولیه و استفاده از اصول دینامیک سیالات محاسباتی، شبکه‌ی محاسباتی مناسب ایجاد گردید. نخست و قبل از آغاز شبیه‌سازی، وابستگی حل به شبکه‌ی محاسباتی بررسی شده‌است. برای این منظور سه شبکه‌ی محاسباتی با تعداد سلول‌های ۵۸۲۰۰۰، ۸۸۷۰۰۰ و ۱۴۹۷۰۰۰ سلول ایجاد گردید. ساختار هر سه شبکه مشابه و ترکیبی از سلول‌های محاسباتی با سازمان و بی‌سازمان مشابه شکل ۲ است. به جز در محدوده‌ی سوراخ و حفره در سایر نواحی میدان حل از شبکه‌ی بی‌سازمان شش وجهی استفاده شده‌است. در شکل ۳ مقدار مؤلفه‌ی افقی سرعت ( $u$ ) در ماک ۰،۱، برحسب ارتفاع مجرا و در فاصله ۶۵ میلی‌متری از بالادست آن ارائه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که شبکه با تعداد سلول ۸۸۷۰۰۰ به بالا حساسیتی به تعداد سلول‌های محاسباتی

<sup>۱</sup> tetrahedron

<sup>۲</sup> prism

<sup>۳</sup> pyramid

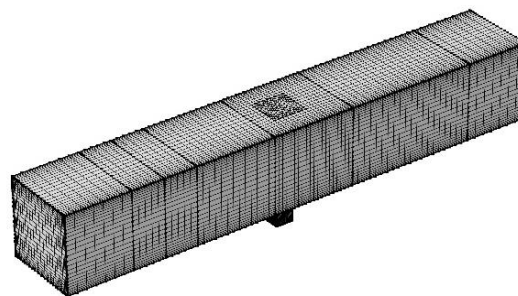
<sup>۴</sup> hexahedron



شکل ۵- شبکه‌ی محاسباتی جریان در اطراف سوراخ و حفره

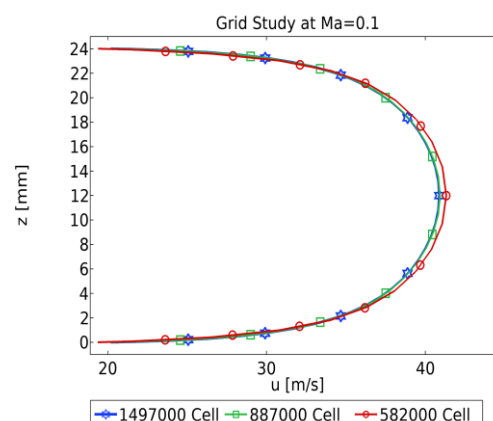
#### ۵- ارائه نتایج شبیه‌سازی عددی و صحت‌گذاری

برای حل جریان از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس<sup>۱</sup> استفاده شده‌است. در این نرم‌افزار از فیزیک جریان سیال، جریان سیال تک‌فاز<sup>۲</sup>، جریان مغشوش<sup>۳</sup> و از بین انواع مدل‌های اغتشاشی، مدل اغتشاشی  $k-\varepsilon$  برای حل دائم و تراکم‌پذیر جریان، انتخاب شده‌است. این حل‌گر معادلات (۱) و (۲) و در صورت لزوم معادله‌ی انرژی را حل می‌کند. مدل‌های اغتشاشی (مانند مدل‌های  $k-\varepsilon$ ،  $k-\omega$ ،  $SST$  و غیره) معادلات جریان را به روش RANS، حل می‌کند. در روش RANS تنش رینولدز به‌عنوان مجهول در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از یکی از مدل‌های اغتشاشی یک یا دو معادله برای تعیین آن به مجموعه‌ی معادلات اضافه می‌شود [۱۵]. ژانگ در [۱۲]، نشان داده‌است که استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر و دارای هزینه‌ی محاسباتی بالاتر مانند حل کامل و مستقیم معادلات ناویر-استوکس<sup>۴</sup> و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۵</sup> آورده‌ی چندانی برای مطالعه‌ی اثرات آکوستیکی در صفحات ریزسوراخ‌دار ندارد. وی نتیجه گرفته‌است که استفاده از روش‌های میانگین‌گیری شده‌ی رینولدز (RANS و URANS<sup>۶</sup>) با توجه به هزینه‌ی محاسباتی کمتر آن‌ها دارای دقت کافی برای استفاده در مطالعه‌ی اثرات آکوستیکی صفحات ریزسوراخ‌دار است.



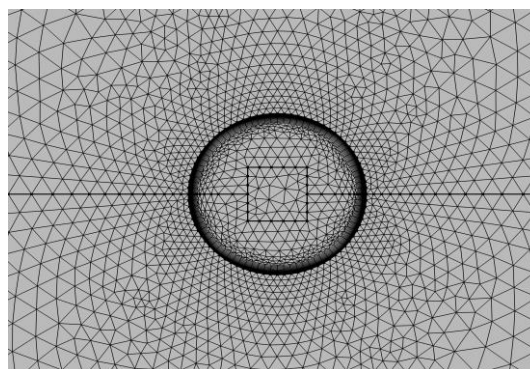
شکل ۲- نمای کلی شبکه‌ی مورد استفاده برای محاسبه‌ی

#### جریان



شکل ۳- بررسی وابستگی حل به شبکه‌ی محاسباتی

در شکل ۴ شبکه در مقطع سوراخ و در شکل ۵ شبکه در اطراف سوراخ و حفره نشان داده شده‌است. در جدول ۲ نیز جزئیات شبکه‌ی محاسباتی ارائه گردیده‌است.



شکل ۴- شبکه‌ی محاسباتی جریان و لایه مرزی آن در مقطع سوراخ

<sup>۴</sup> Direct Navier-Stokes

<sup>۵</sup> Large Eddy Simulation

<sup>۶</sup> Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)

<sup>۱</sup> COMSOL MULTIPHYSIC®

<sup>۲</sup> Single- Phase Flow

<sup>۳</sup> Turbulent Flow

جهت صحت‌گذاری حل انجام شده، نتایج حاصل با نتایج حل تجربی مالماری و همکاران در [۴]، مقایسه گردید. در پژوهش تجربی ایشان پارامتر سرعت اصطکاکی<sup>۱</sup> اندازه‌گیری و محاسبه گردیده‌است. سرعت اصطکاکی با توجه به مقدار تنش برشی بر روی دیواره با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد [۱۵].

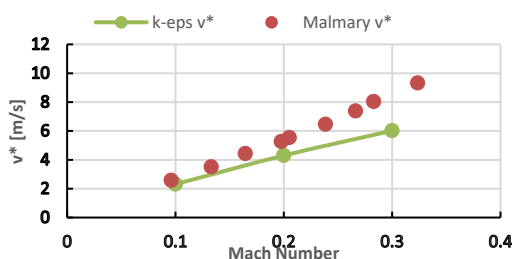
$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (۴)$$

مالماری با استفاده از اندازه‌گیری گرادیان فشار در طول کانال، هندسه‌ی آن و خواص ترموفیزیکی سیال به‌وسیله‌ی رابطه‌ی زیر مقدار سرعت اصطکاکی در هر ماخ را گزارش نموده‌است.

$$v^* = \sqrt{\frac{a}{2\rho} \frac{dP}{dx}} \quad (۵)$$

که در آن  $a$  عرض کانال مربعی مورد استفاده توسط مالماری و  $\rho$  چگالی سیال عامل است.

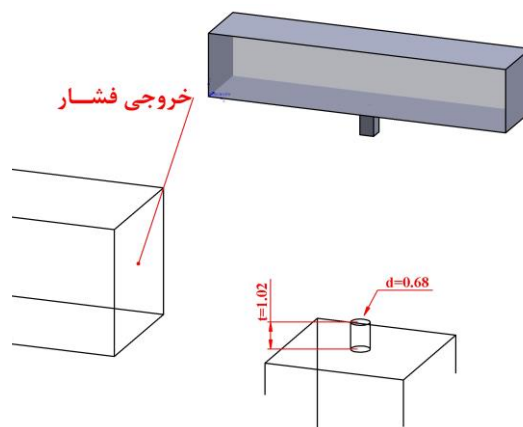
در شکل ۷ مقایسه‌ای بین سرعت اصطکاکی حاصل از شبیه‌سازی انجام شده با نتایج تجربی مالماری در [۴]، ارائه شده‌است.



شکل ۷- مقایسه‌ی سرعت اصطکاکی نتایج تجربی مرجع [۴] با بررسی حاضر

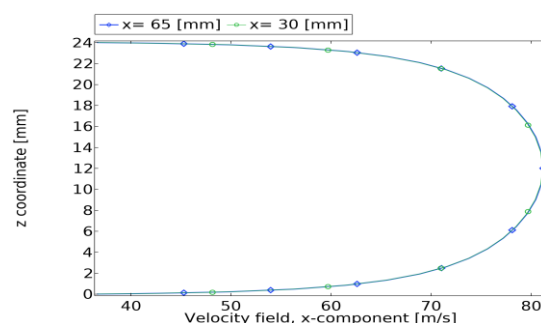
به‌طوری که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نتایج حل عددی بررسی حاضر با نتایج آزمایش [۴] تطابق خوبی دارد. اختلاف موجود نیز به دلیل مدل‌سازی تنش دیواره توسط مدل‌های RANS در شبیه‌سازی عددی با نتایج اندازه‌گیری است. البته مالماری هم توضیح دقیقی درباره‌ی نحوه‌ی اندازه‌گیری گرادیان فشار نداده‌است. نتایج به‌دست آمده با توجه به آن‌که شرط مرزی ورودی کانال، جریان کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته شده‌است با نتایج تجربی ارائه شده در [۴] و نتایج عددی

در دیواره‌ها شرط مرزی عدم لغزش اعمال شده‌است. جریان ورودی به مجرا کاملاً توسعه یافته و در عدد ماخ ۰/۱ تا ۰/۳ در نظر گرفته شده‌است. خروجی کانال، تخلیه به فشار محیط در نظر گرفته شده‌است. مقادیر اولیه برای میدان سرعت و فشار در گام اول برای ماخ ۰/۱، صفر و برای سایر ماخ‌ها مقادیر حل ماخ قبلی در نظر گرفته شده‌است. برای انرژی جنبشی و نرخ اتلافات اغتشاشی نیز مقادیر پیش فرض به ترتیب ۰/۰۰۳۹۳۸۷ و ۰/۰۰۹۲۶۹۷ در نظر گرفته شده‌است. در



شکل ۱ نمای از شرایط مرزی میدان حل، نشان داده شده‌است.

جهت بررسی نحوه‌ی اعمال شدن شرط مرزی ورودی کاملاً توسعه یافته نمودار مؤلفه‌ی  $x$  سرعت ( $u$ ) در فواصل ۳۰ و ۶۵ میلی‌متری از بالادست کانال و به‌طور نمونه در ماخ ۰/۲ در شکل ۶ ارائه شده‌است.

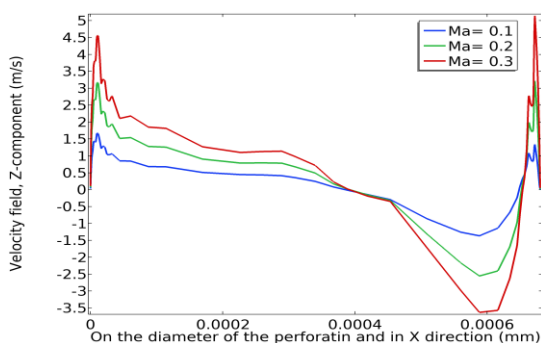


شکل ۶- بررسی توسعه یافتگی جریان در ماخ ۰/۲

<sup>1</sup> Friction velocity

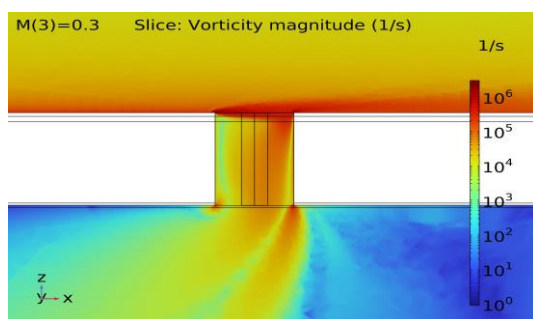


مؤلفه‌ی سرعت در راستای  $z$  (عمود بر سطح سوراخ) روی قطر سوراخ و در راستای محور  $x$  برحسب قطر سوراخ در شکل ۹ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد ماخ اختلاف سرعت در بالادست و پایین‌دست سوراخ افزایش می‌یابد. این پدیده سبب افزایش دامنه‌ی گردابه‌ها در دهانه‌ی سوراخ و ریزش آن به پایین‌دست مجرا می‌شود. پدیده‌ی تشکیل و ریزش گردابه‌ها در دهانه‌ی سوراخ بر رفتار آکوستیکی آستر تأثیرگذار است [۱۸]. رفتار آکوستیکی این آسترها به‌خصوص در محدوده‌ی شدت صوت‌های بالاتر از ۱۲۵ دسی‌بل تحت تأثیر پدیده‌ی ریزش گردابه است [۱۹].



شکل ۹- مؤلفه‌ی  $z$  سرعت روی سوراخ برحسب قطر آن در ماخ‌های مختلف

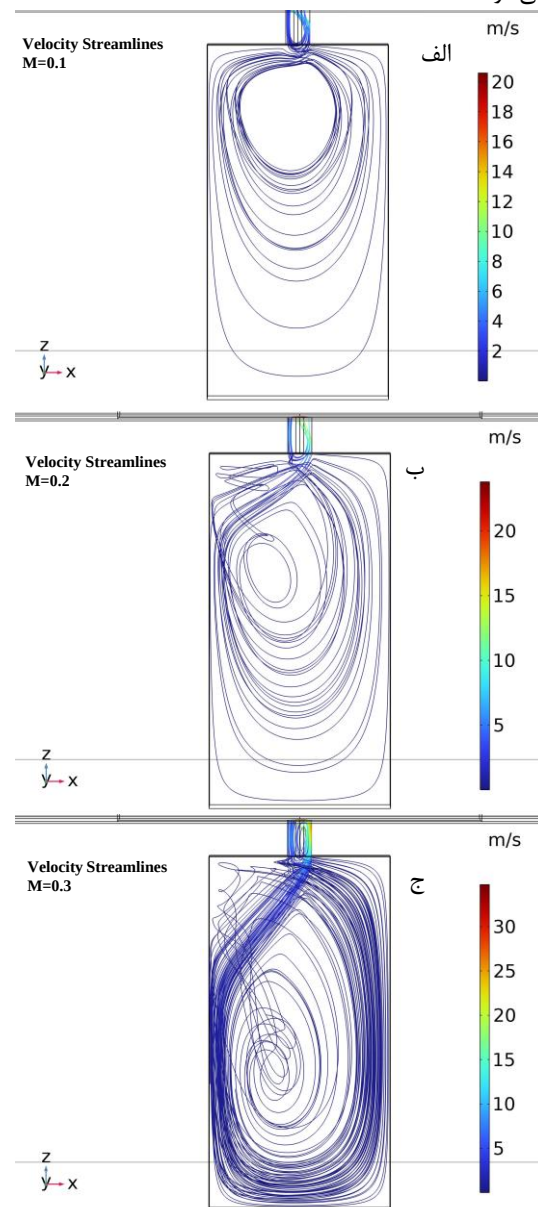
در شکل ۱۰، کانتور این گردابه‌ها برای ماخ  $0.3$  ارائه شده است. مشاهده می‌شود که از ورودی سوراخ تا خروجی آن و در ادامه به سمت پایین دست کانال، مقدار گردابه‌ها افزایش می‌یابد. ریزش گردابه‌ها به پایین دست جریان بر ضریب جذب و امپدانس آکوستیکی آستر تأثیرگذار است. در شکل ۱۱ کانتور مقدار ورتیسیته در ماخ‌های  $0.1$  تا  $0.3$  نشان داده شده است.



شکل ۱۰- کانتور ورتیسیته در ماخ  $0.3$

ارائه شده در [۱۶] و [۱۷] که از این شرط استفاده نکرده‌اند، سازگار است.

در شکل ۸ خطوط جریان در سوراخ و حفره نشان داده شده است. به‌طوری‌که مشاهده می‌شود با افزایش عدد ماخ چرخش جریان در حفره افزایش می‌یابد. به‌علاوه مرکز خطوط جریان با افزایش عدد ماخ به سمت پایین و چپ حفره منتقل می‌شود.



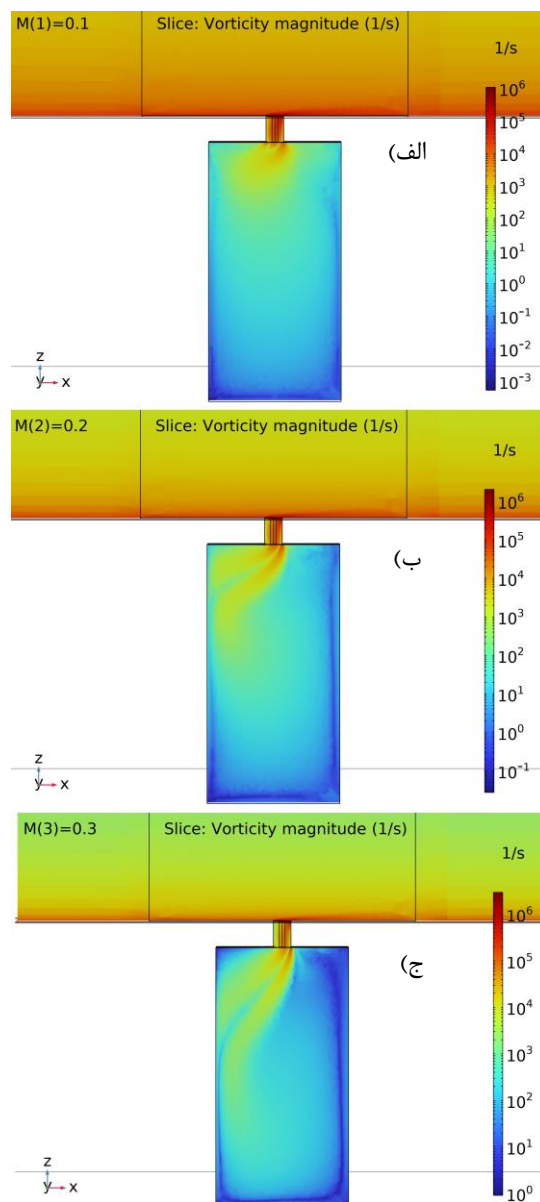
شکل ۸- خطوط جریان در سوراخ و حفره الف)  $0.1$

$M=0.2$  (ب)  $M=0.3$  (ج)

۸۸۷۰۰۰ سلول محاسباتی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. بعد از آن فیزیک و شرایط مرزی مناسب در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس انتخاب و فعال گردید. استفاده از شرط مرزی ورودی سرعت مائلاً توسعه یافته یکی از وجوه تمایز این پژوهش با سایر پژوهش‌های مرور شده بود. با استفاده از شرط مرزی ورودی کاملاً توسعه یافته به کانال، شبیه‌سازی انجام و نتایج حاصله، صحت‌گذاری گردید. انتخاب و تنظیم شرط مرزی ورودی کاملاً توسعه یافته سبب کاسته شدن از طول مجرا و در نتیجه کاهش چشم‌گیر تعداد سلول‌های محاسباتی گردید. این در حالی است که از دقت نتایج نیز کاسته نشده است. شبیه‌سازی در محدوده‌ی عدد ماخ ۰/۱ تا ۰/۳ انجام شد. سرعت اصطکاکی بدست آمده با نتایج تجربی مورد مقایسه و صحت‌گذاری قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده، نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش عدد ماخ در ورودی مجرا، میزان چرخش مؤلفه‌ی عمودی سرعت در طول سوراخ افزایش یافته است. افزایش میزان چرخش مؤلفه‌ی سرعت موجب رخداد پدیده‌ی ریزش گردابه‌ها خواهد شد. این پدیده سبب تغییر در خواص آکوستیکی آستر از جمله امپدانس آن خواهد شد. میزان تولید گردابه‌ها در پایین دست سوراخ نیز با افزایش عدد ماخ، افزایش می‌یابد. این پدیده نیز در خواص آکوستیکی و جذب آستر اثرگذار است.

## ۷- مراجع

- [1] U. Michel, W. Dobrzynski, W. Splettstoesser, J. Delfs, U. Isermann, and F. Obermeier, "Aircraft noise," Spon Press, 2013.
- [2] K. Rydzynski and T. Jung, "Health Risks from Exposure to Noise from Personal Music Players," Sci. Comm. Emerg. New. Identified Heal. Risks ( SCENIHR ), no. June, pp. 1–80, 2008.
- [3] R. Kirby and A. Cummings, "The impedance of perforated plates subjected to grazing gas flow and backed by porous media," J. Sound Vib., vol. 217, no. 4, pp. 619–636, 1998.
- [4] C. Malmay, S. Carbone, Y. Aurégan, and V. Pagneux, "Acoustic impedance measurement with grazing flow," 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf. Exhib., no. May, pp. 1–9, 2001.
- [5] D. Zhao, Y. Sun, S. Ni, C. Ji, and D. Sun, "Experimental and theoretical studies of aeroacoustics damping performance of a bias-flow perforated orifice," Appl. Acoust., vol. 145, pp. 328–338, 2019.



شکل ۱۱- کانتور مقدار ورتیسیتیه در ماخ‌های مختلف

الف)  $M=0.1$  (ب)  $M=0.2$  (ج)  $M=0.3$

## ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این بررسی به مطالعه‌ی عددی جریان سیال بر نوعی از آسترهای آکوستیکی پرداخته شد. برای این منظور شبکه‌ی محاسباتی مناسب با استفاده از اصول دینامیک سیالات محاسباتی ایجاد گردید. وابستگی نتایج به شبکه‌ی محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت و شبکه‌ی محاسباتی مناسب با تعداد



- [12] X. Zhang, "Acoustic behavior of micro-perforated panels in grazing flow," The Hong Kong Polytechnic University, 2020.
- [13] J. Zhao et al., "Neck-embedded acoustic meta-liner for the broadband sound-absorbing under the grazing flow with a wide speed range," J. Phys. D. Appl. Phys., vol. 56, no. 4, 2023.
- [14] COMSOL Multiphysics, CFD Module User 's Guide. COMSOL, 2016.
- [15] Stephen B. Pope, Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000.
- [16] Y. Li and Y. S. Choy, "Acoustic behaviour of micro-perforated panel backed by shallow cavity under fully developed grazing flow," J. Sound Vib., vol. 569, no. August 2023, p. 117985, 2024.
- [17] X. Zhang and L. Cheng, "Acoustic impedance of micro-perforated panels in a grazing flow," J. Acoust. Soc. Am., vol. 145, no. 4, pp. 2461–2469, 2019.
- [18] X. Qiang, P. Wang, and Y. Liu, "Aeroacoustic simulation of transient vortex dynamics subjected to high-intensity acoustic waves," Phys. Fluids, vol. 34, no. 9, 2022.
- [19] J. Roche, F. Vuillot, L. Leylekian, G. Delattre, and F.-T. Cedex, "Numerical and Experimental Study of Resonant Liners Aeroacoustic Absorption Under Grazing Flow," in 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2010, pp. 1–18.
- [6] D. Guan, D. Zhao, J. Li, and J. Li, "Evaluations of acoustic damping performances of double-layer in-duct perforated plates at low Mach and Helmholtz number," J. Acoust. Soc. Am., vol. 146, no. 5, pp. 3512–3523, 2019.
- [7] Z. Chen, Z. Ji, and H. Huang, "Acoustic impedance of perforated plates in the presence of fully developed grazing flow," J. Sound Vib., vol. 485, p. 115547, 2020.
- [8] I. Bahman-Jahromi and H. Dastourani, "Numerical and Analytical Study of Acoustic Liner Absorption Coefficient to Reduce Turbofan Engine Noise," J. Technol. Aerosp. Eng., vol. 5, no. 2, pp. 11–18, 2021. (in Persian)
- [9] H. Dastourani and I. Bahman-Jahromi, "Evaluation of Aeroacoustic Performance of a Helmholtz Resonator System with Different Resonator Cavity Shapes in the Presence of a Grazing Flow," J. Aerosp. Eng., vol. 34, no. 5, pp. 1–13, 2021.
- [10] Y. Ou and Y. Zhao, "Prediction of the Absorption Characteristics of Non-Uniform Acoustic Absorbers with Grazing Flow," Appl. Sci., vol. 13, no. 4, 2023.
- [11] H. Wen, C. Wu, T. Wu, and J. Guo, "Acoustic impedance extraction method and acoustic characteristics analysis of perforated plates under grazing flow," J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control, vol. 43, no. 1, pp. 289–304, 2024.