(Research Article)
Assessment of the beamforming method for numerical investigation of the noise source locations in a turbulent channel flow

H. Lakzayi, Z. Pouransari*

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

Received: 2023/07/03, Accepted: 2023/09/20

Abstract

In this study, a turbulent flow inside a closed channel is considered. For many years, aeroacoustic researchers have used integral formulations and acoustic analogies like the Ffowcs Wiliams and Hawking's equations to find the location and power of sound sources in turbulent flows and their propagation to far fields. Recently, researchers are interested in coupling traditional acoustic analogies with numerical beam-forming methods; In the far field and outside of sound computation region, acoustic pressure is calculated on a specific array of virtual microphones and then beam-formed is transformed into hypothetical source points in the stream to obtain a source distribution map in the desired area. But in this work, a microphone array is located inside the sound source and the noise propagation domain (here, the DNS method is also used to directly calculate the sound emission range. By using this method, bias errors are reduced). This work is focused on the localization and locating of sources using the beam-forming method. Finally, acoustic maps are drawn. These maps are drawn in three different frequencies where the frequency value is equal to f=2, 5 and 8.

Keywords: Aeroacoustics, Turbulent flow, Beam forming method, Ffowcs Williams-Hawkings equations (FW-H), Localization of noise sources.

pp. 59-65 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: pouransari@iust.ac.ir

مقاله پژوهشی

مجله انجمن مهندسی صوتیّات ایران
سال ۱۴۰۲، دوره: ۱۱، شماره: ۱، صفحات: ۵۹-۶۵

ارزیابی روش پرتودیسی جهت بررسی عددی مکان‌های منبع نوفه در یک جریان کال آشفته

حسن لکزایی، زینب پورانصاری*
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت
دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

چکیده

در این مطالعه، جریان آشفته در داخل یک کال (کانال) بسته بررسی شده است. در سال‌های متمادی، محققان هواصوتی از فرمول‌بندی‌های انتگرالی و تشابه‌های صوتی مانند معادلات فاکس ویلیامز-هاوکینگز برای یافتن مکان و قدرت منابع صوتی در جریان‌های متلاطم و انتشار آن‌ها به میدان دور استفاده می‌کردند. اخیراً محققان علاقه‌مند به جفت کردن قیاس‌های صوتی سنتی با روش‌های عددی پرتودیسی (شکل‌دهی امواج) هستند. در میدان دور و خارج از منطقه محاسبات صوتی، فشار صوتی روی آرایه خاصی از میکروفون‌های مجازی محاسبه می‌شود و سپس موج به نقاط منبع فرضی در جریان تبدیل می‌شود تا نقشه توزیع منبع در منطقه مورد نظر به‌دست آید. اما در این پژوهش یک آرایه میکروفون در داخل منبع صدا و حوزه انتشار نوفه قرار دارد (در اینجا از روش دی‌اِن‌اِس برای محاسبه مستقیم دامنه انتشار صدا نیز استفاده شده است. با استفاده از این روش، خطاهای بایاس کاهش می‌یابد). این پژوهش بر محلی‌سازی و مکان‌یابی منابع با استفاده از روش پرتودیسی متمرکز است. در نهایت نقشه‌های صوتی ترسیم می‌شوند. این نقشه‌ها در سه بسامد مختلف ترسیم شده‌اند که مقدار بسامد برابر با ۲، ۵ و ۸ است.

کلیدواژه‌ها: هواصوتیات، جریان آشفته، روش پرتودیسی (شکل‌دهی امواج)، معادلات فاکس ویلیامز-هاوکینگز، محلی‌سازی منابع نوفه.

۱. مقدمه

نوفه یک مشکل اجتماعی مدرن است که از جمله پیامدهای آن می‌توان به ممانعت از نصب توربین‌های بادی بزرگ در نزدیکی مناطق مسکونی و محدود کردن تعداد برخاست و فرود در فرودگاه‌های بزرگ اشاره کرد. در سال‌های اخیر، دانشگاه و صنعت به تلاش‌هایی برای پیشنهاد راه‌حل‌های کاهش نوفه پیوستند. توسعه وسایل نقلیه بی‌صدا بیش‌تر از دیگر مسائل، اکنون نیاز به تکرار طراحی از طریق نمونه‌سازی اولیه و آزمایش تونل باد دارد. از آن‌جایی که این روش‌ها پرهزینه و زمان‌بر هستند، تولیدکنندگان بیش‌تر و بیش‌تری به روش‌های عددی تکیه می‌کنند [۱]. یکی از مهم‌ترین کاربردهایی که در زمینه کاهش نوفه مورد توجه قرار گرفته، هواصوتی[1] است.

هواصوتیات محاسباتی (سی‌اِی‌اِی)[2] شاخه‌ای از هواصوتیات است که از روش‌های عددی برای تجزیه و تحلیل تولید و انتشار نوفه‌های آیرودینامیکی در جریان‌های آشفته استفاده می‌کند. سی‌اِی‌اِی یک زمینه تحقیقاتی جدیدتر در مقایسه با سی‌اِف‌دی[3] است که در دو دهه اخیر به سرعت رشد کرده است.

شبیه‌سازی نوفه آیرودینامیکی جریان‌های پیچیده اغلب به استفاده از قیاس‌های صوتی متکی است، جریان ناپایدار ابتدا در مجاورت جسم حل می‌شود و سپس منابع صوتی با استفاده از فرمول‌بندی‌های انتگرال در میدان دور استخراج و منتشر می‌شوند. یکی از رایج‌ترین روی‌کردها حل جریان از طریق شبیه‌سازی گردابی بزرگ (اِل‌ایی‌اِس)[4] یا شبیه‌سازی گردابی جداشده (دی‌ایی‌اِس)[5] و استفاده از

* نویسنده پاسخگو: pouransari@iust.ac.ir

[1] Aeroacoustic

[2] CAA
[3] CFD
[4] LES
[5] DES

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران/ دوره ۱۱/ شماره ۱/ بهار و تابستان ۱۴۰۲

انتگرال فوکس ویلیامز-هاوکینگز (اِف‌دابلیو-اِچ)[1] برای محاسبه فشار صوتی در میدان دور است. اخیراً، علاقه‌ای به جفت‌کردن این روی‌کرد با روش پرتودیسی (شکل‌دهی امواج) وجود داشته است؛ فشار صوتی روی یک آرایه میکروفون مصنوعی در خارج از منطقه منبع با استفاده از انتگرال اِف‌دابلیو-اِچ محاسبه می‌شود و موج به ناحیه منبع باز می‌گردد تا توزیع منبع متناظر در منطقه جریان ناپایدار محاسبه شود [۲-۸]. این روش علاوه بر ارائه اطلاعات در مورد مکان منابع، راهی برای بررسی سازگاری نتایج اِف‌دابلیو-اِچ فراهم می‌کند. مشکل این روی‌کرد این است که اطلاعات حاصل از منابع، به قیاس اِف‌دابلیو-اِچ که برای به‌دست آوردن داده‌های آرایه استفاده می‌شود، متکی است و به‌طور بالقوه خطاهای بایاس[2] را ایجاد می‌کند.

روش پرتودیسی یک روش پردازش داده است که علامت‌های ورودی مجموعه‌ای از حسگرها را به‌صورت فضایی صافی (فیلتر) می‌کند و علامت این آرایه بسته به فاصله نسبی بین منبع و ناظر به یک جهت خاص هدایت می‌شود. روش پرتودیسی کاربرد گسترده‌ای در ارتباطات، امواج لرزه‌ای و امواج صوتی دارد که در آخرین مورد به نام پرتودیسی صوتی نامیده می‌شود. امواج صوتی دو دسته اصلی دارند. اولی بر استخراج علامت‌ها متمرکز است و در دومی محلی‌سازی منابع صوتی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق از دومین کاربرد بیان شده، استفاده شده است [۹]. اخیرا ژو و همکاران از این کاربرد الگوریتم پرتودیسی برای شبیه‌سازی محلی‌سازی یک منبع تک بسامد از یک توربین بادی ۱٫۵ مگاواتی استفاده کردند [۱۰].

بارسیکو و همکاران یکی از اولین کسانی بودند که از آرایه‌های میکروفون برای تحقیقات نوفه استفاده کردند [۱۱]. مروری کلی بر روش‌های پرتودیسی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد توسط مارتینز و همکاران ارائه شده است [۱۲].

در آزمایش تونل باد هواصوتی، یک الگو در تونل باد نصب می‌شود و یک آرایه میکروفون در خارج از جریان هوای تونل باد نصب می‌شود. متعاقباً، فنّ پرتودیسی به داده‌های صوتی برای محلی‌سازی منبع صدا اعمال می‌شود [۹، ۱۳]. یک راه جایگزین و به نوعی مستقیم‌تر برای استفاده از روش پرتودیسی، قرار دادن آرایه میکروفون مصنوعی به‌طور مستقیم در حوزه محاسبات صدا است [۱۴- ۱۵]. قرار دادن آرایه میکروفون در یک منطقه زمانی که صدا مستقیماً محاسبه می‌شود، امکان دور زدن استفاده از قیاس‌های صوتی را فراهم می‌کند و بنابراین یک روی‌کرد مکمل برای تجزیه و تحلیل منابع ارائه می‌دهد.

از آن‌جا که داده‌های شبیه‌سازی مستقیم در مقاله‌ی [۱۶] به چاپ رسیده است لذا از جهت داده‌های دی‌اِن‌اِس[3] جریان آشفته درون کال (کانال) اعتبار سنجی قبلاً انجام شده است. در مورد انجام روش پرتودیسی روی جریان آشفته درون کال (کانال)، براساس اطلاعات نویسندگان تاکنون پژوهشی در این زمینه انجام نگرفته است و تحقیق حاضر روی هندسه مذکور در واقع نخستین مورد از پیاده‌سازی این الگو است. لذا جهت مقایسه از پژوهش‌های مشابه روی هندسه‌های دیگر استفاده شده است. از جمله منبع [۱۷] پژوهشی در مورد پیاده‌سازی روش شکل‌دهی امواج روی داده‌های شبیه‌سازی مستقیم بر یک پروانه است که نتایج آن نشان می‌دهد که این روش امکان مطالعه دقیق سازوکارهای تولید نوفه پروانه را فراهم می‌کند. یانگژو و همکاران به مطالعه منابع هواصوتی یک پروانه دو پره با استفاده از روی‌کرد اِف‌دابلیو-اِچ/ آی‌دی‌دی‌ایی‌اِس و الگوسازی منبع صدا از طریق روش مستقیم پرتودیسی عددی پرداختند [۱۷].

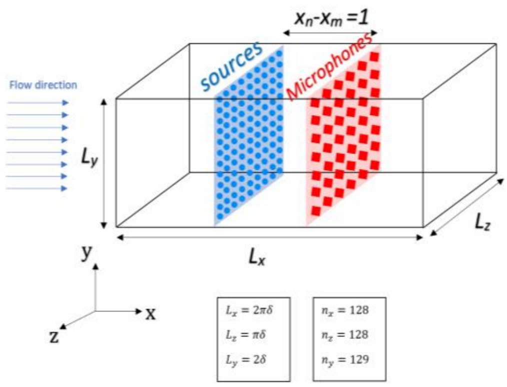
در پژوهش حاضر از روش عددی پرتودیسی مستقیم برای جریان آشفته در کال (کانال) استفاده شده که با شبیه‌سازی عددی مستقیم حل شده است. پیش از این پژوهش‌های محدودی از اعمال روش پرتودیسی روی هندسه‌های دیگر موجود است از جمله منبع [۱۸] که روش شکل‌دهی عددی مستقیم به الگوی مجرای ورودی هوا، که قبلا توسط پیگنیر و همکاران مطالعه شده بود، اعمال شد. جریان ناپایدار در اطراف ورودی از طریق روی‌کرد آی‌دی‌دی‌ایی‌اِس[4] حل شد. سپس از روی‌کرد

[1] FW-H
[2] Bias errors
[3] DNS; Direct Numerical Simulation
[4] IDDES

دی‌اِن‌بی[۱] برای تجزیه و تحلیل منابع صدا در ورودی استفاده شد. سپس نتایج حاصله با نتایج به‌دست آمده با استفاده از انتگرال اِف‌دابلیو-اِچ مقایسه شدند، اما تحقیق حاضر بر محلی‌سازی و یافتن قدرت منابع صوتی با استفاده از الگوریتم پرتودیسی متمرکز است. ادامه‌ی این مقاله به‌صورت زیر تنظیم شده است. در بخش دوم، مسئله‌ی مورد مطالعه شرح داده شده و معادلات حاکم بر مسئله ارائه شده‌اند. نتایج حاصل از پژوهش و تحلیل آن‌ها در بخش سوم قرار گرفته است و در نهایت در بخش چهارم این مقاله به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

یک کال (کانال) بسته با ابعاد L_x، L_y و L_z در نظر گرفته شده که جریان آشفته درون آن جریان دارد که در واقع سیال وظیفه انتقال امواج صوتی را بر عهده دارد. عدد رینولدز بر حسب نصف کال (کانال) و سرعت جریان ورودی برابر با $Re = ۴۲۰۰$ و عدد رینولدز اصطکاکی آشفته این جریان $Re_\tau = ۱۸۰$ است. به جهت بی‌بعدسازی شبه‌سنج‌های محلی، شبه‌سنج δ به عنوان نصف ارتفاع کال تعریف می‌شود. بنابراین ابعاد کال به‌صورت $L_x = ۲\pi\delta$، $L_y = ۲\delta$ و $L_z = \pi\delta$ تعریف می‌شود. شکل ۱ طرح‌واره کال مورد بحث را نمایش می‌دهد.

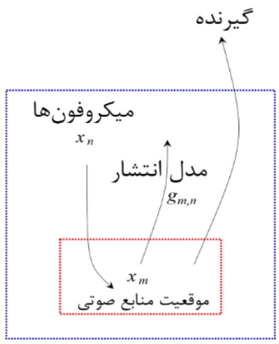


شکل ۱ طرح‌واره کال مورد بررسی.

تعداد نقاط شبکه‌ی محاسباتی در سه جهت اصلی به‌صورت $n_x = ۱۲۸$، $n_y = ۱۲۹$ و $n_z = ۱۲۸$ هستند که ابعاد نهایی شبکه با داده‌های موجود هم‌خوانی داشته باشد. لازم به ذکر است که در جهات x و z شبکه‌بندی به‌صورت یکنواخت است، اما در راستای y به علت تراکم بیش‌تر گره‌ها در نزدیک دیواره شبکه به‌صورت کشیده و درشت[۲] است. در شکل ۱ شبکه‌های میکروفون‌ها و منابع صوتی مشخص شده‌اند. این آرایه‌ها به‌صورت شبکه‌های مستطیلی هستند. با توجه به ابعاد شبکه و کشیده شدن نقاط در محور y، تعداد میکروفون‌ها برابر ۱۴۱۳ و تعداد منابع صوتی برابر ۲۱۹۳ خواهند بود.

۲-۱. معادلات حاکم

داده‌های سیال به روش شبیه‌سازی مستقیم به‌دست آمده‌اند و معادلات حاکم بر جریان معادله‌ی مومنتوم و معادله‌ی پیوستگی هستند که در هندسه‌ی مسئله حل شده‌اند. با در دست داشتن داده‌های مربوط به جریان سیال، می‌توان از روش پرتودیسی، قدرت منابع صوتی را به‌دست آورد. شکل ۲ طرح‌واره روش مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۲ روش مورد استفاده پرتودیسی به‌صورت مستقیم [۱۸].

همان‌طور که در شکل مشخص شده است، در این روش میکروفون‌ها به‌صورت مستقیم در ناحیه‌ی محاسباتی قرار داشته و اطلاعات زمانی این میکروفون‌ها به‌عنوان ورودی روش پرتودیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش فرض می‌شود که M منبع صوتی در موقعیت x_m و N میکروفون در موقعیت x_n واقع شده است. یک تابع تبدیل بین منبع و میکروفون‌ها در نظر گرفته شده که $g_{m,n}$ نامیده می‌شود. از آن‌جا که میکروفون‌ها مستقیماً در ناحیه

[۱] DNB; Direct Numerical Beamforming

[۲] Coarse

محاسباتی قرار دارند، نتایج این روش دچار خطای کم‌تری نسبت به آنالوژی‌های کلاسیک هواصوتیاتی است.

منابع صوتی به‌صورت منابع تک‌قطبی الگو شده‌اند. از این‌رو تابع تبدیل متناسب با این شرایط به‌صورت $g_{m,n} = \frac{e^{-ikr_{m,n}}}{r_{m,n}}$ می‌باشد که در آن $r_{m,n} = |x_n - x_m|$ می‌باشد. فشار در میکروفون n-اُم به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$P = GS \qquad (۱)$$

که در معادله اخیر $P = (p_n)$ یک بردار N×۱، $G = (g_{m,n})$ یک ماتریس N×M و $S = (s_m)$ یک بردار M×۱ می‌باشد. با در نظر گرفتن اینکه G مشخص است، مسئله اصلی یافتن S است. در صورتی‌که روش پرتودیسی بر داده‌های تجربی پیاده شود، معادله (۱) به‌صورت نامعین درخواهد آمد، زیرا بیش‌تر اوقات تعداد منابع صوتی بیش‌تر از میکروفون‌ها هستند. به جهت رفع این مسئله تعداد مجهولات باید، یا به طریق افزایش میکروفون‌ها و یا با کاهش تعداد منابع صوتی کاهش بیابند. از آن‌جا که پرتودیسی به‌صورت عددی انجام می‌شود، افزایش تعداد میکروفون‌ها به معنی استفاده از داده‌های بیش‌تر از شبیه‌سازی صورت گرفته است؛ بنابراین می‌توان از این روش استفاده کرد. دو دلیل برای استفاده از روش پرتدیسی وجود دارد، اول این‌که تعداد میکروفون‌ها با توجه به ابعاد شبکه محدود است، زیرا در هر گره تنها یک میکروفون وجود دارد و این نکته منجر به سبک‌تر شدن فرایند پردازش می‌شود؛ و دوم اینکه در حوزه‌ی پرتودیسی الگوریتم‌های جدید و دانش گسترده‌ای در دهه‌های اخیر به‌دست آمده است. ایده اصلی این روش هدایت داده‌های میکروفون واقع در محل منابع صوتی به کمک شیوه مناسب انتقال بوده که داده‌های خروجی به عنوان خروجی استاندارد پرتودیسی شناخته می‌شود. امکان استخراج یک معادله جدید وجود داشته که این خروجی‌ها را به توان دوم قدرت منابع مرتبط می‌سازد. برخلاف معادله اولیه، ماتریس این معادله جدید مربعی بوده بنابراین امکان حل آن وجود دارد.

جزئیات بیش‌تر در مورد حل در منبع [۱۹] یافت می‌شود.

برای شروع، کمیت b_m به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$b_m = W_m^{\dagger} P \qquad (۲)$$

که $W_m = (w_{m,n})$ یک بردار N×۱ بوده که با عنوان بردار هادی شناخته می‌شود. نماد † نشان‌دهنده‌ی ترانهاده مزدوج ماتریس است. با فرض غیرمتجانس بودن منابع صوتی، عبارت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{B} = A\tilde{S} \qquad (۳)$$

که در آن $\tilde{B} = \left(|b_m|^2\right)$ و $\tilde{S} = \left(|s_m|^2\right)$ بردارهای M×۱ بوده، و $A = \left(|W_i^{\dagger} G_j|^2\right)$ ماتریس مربعی M×M است. با استفاده از معادلات (۲) و (۳)، ضرایب $|b_m|^2$ به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$|b_m|^2 = |W_m^{\dagger} P|^2 = W_m^{\dagger} P P^{\dagger} W_m \qquad (۴)$$

عبارت $PP^{\dagger}$ معمولاً با عنوان ماتریس طیفی متقاطع (سی‌اِس‌اِم)[1] آرایه شناخته می‌شود. در اینجا $|b_m|^2$ متناظر با خروجی استاندارد پرتودیسی برای منبع m-اُم است. در این پژوهش، بردارهای هادی W_i موازی با G_i در نظر گرفته شده، بنابراین می‌توان گفت $W_i = \alpha_i G_i$ که در نهایت منجر به نتیجه زیر می‌شود:

$$A_{i,j} = |\alpha_i|^2 \, |G_i^{\dagger} G_j|^2 \qquad (۵)$$

ضریب α_i به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که برای یک منبع منفرد واقع در x_{mo}، $|b_{mo}|^2 = |s_{mo}|^2$ بوده و در نهایت ضریب به شکل زیر به‌دست آید:

$$|\alpha_i|^2 = \frac{1}{|G_i^{\dagger} G_j|^2} \qquad (۶)$$

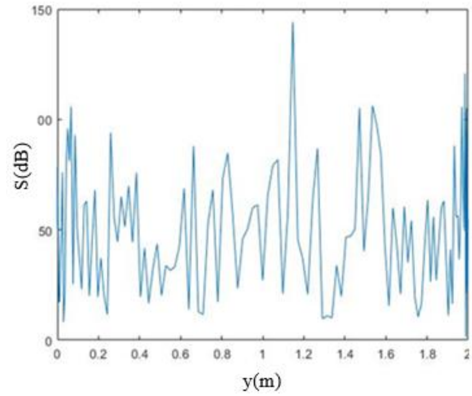
با انتخاب α_i به‌صورت گفته‌شده، ماتریس A یک ماتریس مربعی با درایه‌های مثبت و قطر واحد بوده که به عنوان تابع پخش نقاط (پی‌اِس‌اِف)[2] آرایه شناخته شده است و بعضاً به آن تابع پرتودیسی آرایه گفته می‌شود. بنابراین با طی‌کردن مراحل فوق، مساله قابل حل بوده و قدرت منابع صوتی حاصل می‌شود.

۳. نتایج

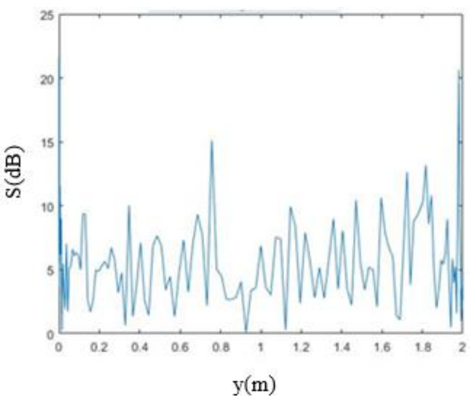
بسامد نمونه‌برداری حدوداً برابر ۲۰ هرتز در نظر گرفته خواهد شد. قضیه‌ی نمونه‌برداری نایکویست- شانن بیان می کند که نتایج در صورتی کاملاً قابل اطمینان هستند که بسامد مورد بررسی از نصف بسامد نمونه‌برداری کم‌تر

[1] CSM; Cross Spectral Matrix
[2] PSF; Point Spread Function

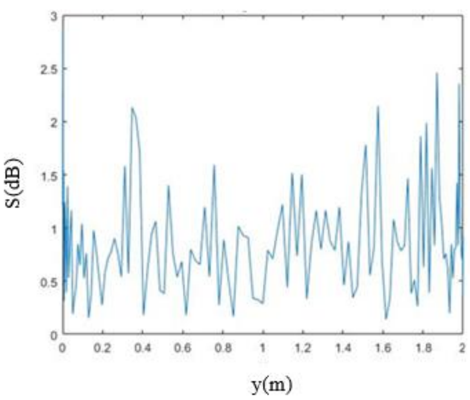
باشد [۲۰]. بنابراین، مطالعات انجام‌شده در این پژوهش در بسامدهای کم‌تر از ۱۰ هرتز انجام شده است. در بسامدهای مختلف بین صفر تا ۱۰ هرتز، نتایج به‌دست‌آمده، نوسانات قابل‌توجهی دارند، بنابراین در سه بسامد مختلف نتایج خروجی گرفته شده است تا امکان مقایسه وجود داشته باشد. لازم به‌ذکر است میکروفون‌ها در موقعیت $x=\pi/3$ قرار گرفته‌اند.



شکل ۳ نوسانات منبع صوتی در بسامد ۲ هرتز.



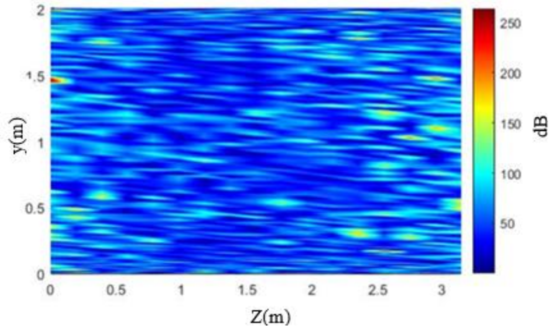
شکل ۴ نوسانات منبع صوتی در بسامد ۵ هرتز.



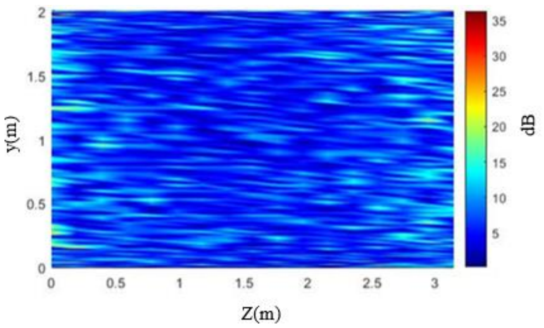
شکل ۵ نوسانات منبع صوتی در بسامد ۸ هرتز.

شکل‌های ۳ الی ۵ نشان‌دهنده‌ی نوسانات قدرت منبع صوتی از پایین تا بالای دیواره در سه بسامد مختلف ۲، ۵ و ۸ هرتز هستند. با توجه به شکل ۳ به نظر می‌رسد که در موقعیت‌های حدود $y=1/1$ دامنه نوسانات ناگهان به بیشینه خود می‌رسد.

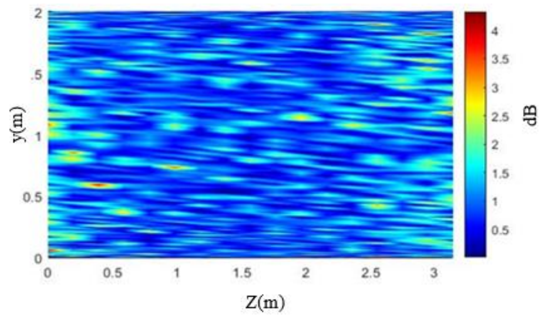
در ادامه، توزیع قدرت منابع صوتی در صفحه‌ی yz و در سه بسامد مختلف در شکل‌های ۶ الی ۸ ترسیم شده است.



شکل ۶ توزیع قدرت منبع صوتی در بسامد ۲ هرتز.



شکل ۷ توزیع قدرت منبع صوتی در بسامد ۵ هرتز.



شکل ۸ توزیع قدرت منبع صوتی در بسامد ۸ هرتز.

با بررسی نتایج این بخش، مشاهده می‌شود که در بسامد میانی توزیع منابع بهتر از حالات دیگر است. البته نقشه‌های صوتی با توجه به داده‌های موجود و محاسبات صورت‌گرفته رسم شده و طبیعتاً در هر فاصله و بسامد

توزیع و اشکال متفاوتی دارد و می‌توان نتیجه گرفت که ماهیت این نقشه‌ها کمی غیرقابل پیش‌بینی است. برای مثال در شکل ۷ که اتفاقاً در بسامد میانی به‌دست‌آمده، هیچ‌گونه افزایش ناگهانی در دامنه قدرت منبع صوتی مشاهده نشد و توزیع قدرت منابع تقریباً یکنواخت است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر فاصله منابع صوتی و گیرنده‌ها بر شدت امواج صوتی و نوسانات آن بررسی گردید. داده‌های سیالاتی به‌کار رفته در پژوهش داده‌های سیالاتی جریان آشفته موجود در یک کال (کانال) بسته بوده که به روش شبیه‌سازی مستقیم عددی (دی‌اِن‌اِس) به‌دست آمده است؛ سپس به کمک روش پرتودیسی مستقیم و عددی (دی‌اِن‌بی)، فرآیند مکان‌یابی منابع صوتی و بررسی شدت و قدرت این منابع انجام گرفت. محاسبات و شبیه‌سازی‌های این پژوهش با کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب صورت گرفته است.

جهت مقایسه نتایج مربوط به قدرت منابع صوتی از پژوهش‌های مشابه بر هندسه‌های دیگر استفاده شده است. از جمله منبع [۱۸] پژوهشی در مورد پیاده‌سازی روش پرتودیسی بر داده‌های شبیه‌سازی مستقیم روی یک مجرای ورودی هوا است که نتایج آن نشان می‌دهد که به‌صورت کلی با افزایش بسامد مقدار قدرت شبه‌سنج S کاهش یافته است که در نتایج کار حاضر نیز این موضوع مشهود است که بیش‌ترین مقدار برای شبه‌سنج S در بسامد ۲ هرتز حاصل شده و با افزایش بسامد این مقدار کاهش می‌یابد. از طرفی مطابق با یافته‌های منبع [۱۵] تکامل تفکیک مکانی با بسامد به خوبی در بسامدهای پایین بازیابی شده است.

نوسانات منبع صوتی و نقشه‌های صوتی برای سه بسامد زیر ۱۰ هرتز به‌دست آمد. با توجه به شکل ۳ به نظر می‌رسد که در موقعیت‌های حدود $y=1/1$ دامنه نوسانات ناگهان به بیشینه خود می‌رسد. مشاهده شد که در بسامد میانی توزیع منابع بهتر از حالات دیگر است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از جناب آقای دکتر رسام از دانشگاه تهران که با در اختیار گذاشتن داده‌های شبیه‌سازی، نویسندگان را یاری رساندند تقدیر و سپاس‌گزاری به عمل می‌آورند.

تضاد منافع

نویسندگان هیچ منافع مالی یا روابطی که بتواند بر انتشار این مقاله تأثیرگذار باشد ندارند.

فهرست منابع

[1] N.J. Pignier, “The impact of trffiac noise on economy and environment: a short literature study: Performed within the scope of the ECO2 project noise propagation from sustainable ground vehicles,” KTH Royal Institute of Technology, vol. 29, pp. 1-16, 2015.

[2] Y. Du, P. Morris, “Numerical investigation of the noise source locations of supersonic jets using the beamformed method,” 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, vol. 1169, pp. 2012, 2012.

[3] P. Panickar, N. Sinha, N. Murray, “Localization of acoustic sources in shock-containing jet flows using phased array measurements,” 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, vol. 613, pp. 2013-2025, 2013.

[4] D. Armstrong, A. Najafiyazdi, L.G. Mongeau, V. Raymond, “Numerical simulations of flow over a landing gear with noise reduction devices using the lattice-boltzmann method,” in 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, vol. 2114, pp. 27–29, 2013.

[5] J.P. Erwin, P. Panickar, P. Vogel, N. Sinha, “Acoustic Source Localization of Rectangular Jets using Large Eddy Simulation with Numerical Phased Arrays,” 52nd Aerospace Sciences Meeting, pp. 0179, 2014.

[6] C.C. Nelson, A.B. Cain, R. Dougherty, K.S. Brenter, P.J. Morris, “Application of synthetic array techniques for improved simulations of hot supersonic jet noise,” International Journal of Aeroacoustics, vol. 16, no. 4-5, pp. 382-402, 2017.

[7] Y. Du, P.J. Morris, “The separation of radiating and non-radiating near-field pressure fluctuations in supersonic jets,” Journal of Sound and Vibration, vol. 355, pp. 172-187, 2015.

[8] V. Fleury, R. Davy, “Analysis of jet–airfoil interaction noise sources by using a

microphone array technique," Journal of Sound and Vibration, vol. 364, pp. 44-66, 2016.

[9] P. Chiariotti, M. Martarelli, P. Castellini, "Acoustic beamforming for noise source localization-Reviews methodology and applications," Mechanical Systems Signal Process, vol. 120, pp. 422-448, 2019.

[10] W. Xue, B. Yang, S. Jia, "Aeroacoustic source localization," arXiv preprint, vol. 2306, pp. 142-156, 2023.

[11] B. Barsikow, W. King Iii, E. Pfizenmaier, "Wheel/rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones," Journal of Sound and Vibration, vol. 118, no.1, pp. 99-122, 1987.

[12] R. Merino-Martínez, P. Sijtsma, M. Scellen, T. Ahlefeldt, J. Antoni, C.J. Bahr, D. Blacodon, D. Ernst, A. Finez, S. Funke, T. Geyer, S. Haxter, G. Herold, X. Huang, M. Humphreys, Q. Leclere, A. Malgoezar, "A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays," CEAS Aeronautical Journal, vol. 10, no. 1, pp. 197-230, 2019.

[13] Q. Leclere, A. Pereira, C. Bailly, J. Antoni, C. Picard, "A unified formalism for acoustic imaging based on microphone array measurements," Internal Journal Aeroacoust. vol. 16, no. 4-5, pp. 431-456, 2017.

[14] L. Brusniak, M.L. Shur, P. Spalart, "Phased-array imaging of jet noise sources in a large-eddy simulation," Collection of technical papers-12th AIAA/CEAS aeroacoustics conference, vol. 1, pp. 609-27, 2006.

[15] J. Adam, D. Ricot, A. Menoret, "Direct aeroacoustic source identification based on lattice boltzmann simulation and beamforming technique," Proceedings of the 15th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, AIAA paper, vol. 3182, pp. 1863-1866, 2009.

[16] A. Rasam, G. Brethouwer, P. Schlatter, Q. Li, A.V. Johansson, "Effects of modelling, resolution and anisotropy of subgrid-scales on large eddy simulations of channel flow," Journal of Turbulence, vol. 12, pp. 1863-1866, 2011.

[17] J. Yangzhou, J. Wu, Z. Ma , X. Huang, "Aeroacoustic sources analysis of wake-ingesting propeller noise," Journal of Fluid Mechanics, vol. 962, pp. A29, 2023.

[18] N.J. Pignier, C.J. O'Reilly, S. Boij, "Aeroacoustic study of a submerged air inlet using an IDDES/FW-H approach and sound source modelling through direct numerical beamforming," in 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, vol. 133, pp. 15–31, 2016.

[19] R. Dougherty, R.P. Ramachandran, G .Raman. "Deconvolution of sources in aeroacoustic images from phased microphone arrays using linear programming," International Journal of Aeroacoustics, vol. 12, pp. 699-717, 2013.

[20] C. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proceedings of the Institute of Radio Engineers, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.