تخمین توان چند قطبی‌های آکوستیکی به روش معکوس

رضا معدولیت[۱]، نوروز محمد نوری[۲]، علی رهروی[۳]*

[۱] دانشیار، دانشگاه علم وصنعت ایران؛ r_madoliat@iust.ac.ir
[۲] استاد، دانشگاه علم وصنعت ایران؛ mnouri@iust.ac.ir
[۳] دانشجوی دکتری ، دانشگاه علم وصنعت ایران؛ ali_rahrovi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۳۱

کلمات کلیدی:
تک قطبی
جداسازی کور منابع
چهارقطبی
دوقطبی
روش معکوس

چکیده

برای کاهش آلودگی صوتی، باید نوع منبع صدا و توان آن مشخص شود. بدین منظور باید این صدا اندازه‌گیری شود و سپس با یک سری از منابع چندقطبی معادل شود و توان آکوستیکی آنها بدست آید. جهت نیل به این هدف دو روش جداسازی کور منابع و روش معکوس مورد بررسی قرار گرفته است. چیدمان‌های مختلف از منابع در نظر گرفته شده و توان آکوستیکی منابع بدست آمد که به کمک معیار عدم انطباق مطابقت خوبی بین این صداهای مدل شده و صدای اصلی بدست آمد. با توجه به این نکته که آرایش‌های مختلفی از منابع را می‌توان پیشنهاد داد این چیدمان‌ها بررسی شدند و در انتها یک چیدمان مرجع از منابع به نام آرایش عمودی منابع برگزیده شد که این چیدمان را می‌توان به عنوان یک فرم استاندارد در نظر گرفت. در این چیدمان استاندارد تمام منابع چند قطبی وجود دارد. این قابلیت در بقیه مدل‌های که تا کنون ارائه شده است وجود ندارد.

Acoustic Model Identification Using Inverse Model

Reza Madoliat[1], Norouz Mohammad Nouri[2], Ali Rahrovi[3]*

[1] *Associate Professor, Iran University of Science & Technology; r_madoliat@iust.ac.ir*
[2] *Professor, Iran University of* Science & *Technology; mnouri@iust.ac.ir*
[3] *PhD Candidate, Iran University of* Science & *Technology; ali_rahrovi@iust.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 28 Aug. 2016
Accepted: 21 Jun. 2017

Keywords:
Blind Source separation
Dipole
Inverse method
Monopole
Quadrople

ABSTRACT

Sound measured at various points around the environment can be evaluated by a series of multi-pole sources and their acoustic strength can be acquired. In this numerical study, a method, called the inverse method, was examined to achieve this goal. A variety of arrangements of different sources were considered and the acoustic strength of these sources was acquired. Through the application of the mismatch criterion, good conformity was observed between these sound models and the original sound. Furthermore, with regard to results, sound was generated via different source arrangements which showed acceptable agreement with the original sound. Finally, an arrangement named ‘sources vertical arrangement’ was selected as the best approach.

۱ – مقدمه

تلاش‌های زیادی صرف کاهش صدا در محیط اطـراف مـی‌شـود در این میان، وسایل مکانیکی سهم بسزایی در تولید این صدا دارند. در بسیاری از موارد براحتی می‌توان تشـخیص داد کـه کـدام بخـش از یک ماشین، منبع تولید صدا است. اما تعیین اینکه این منبع با چـه قدرتی مشغول تولید صـدا اسـت براحتـی امکـان پـذیر نیسـت. در صورتی که نوع منبع و قدرت آن مشخص باشد انتخـاب روش مـوثر برای کاهش صدا امکان‌پذیر خواهـد بـود. در ایـن میـان روش‌هـای گوناگونی برای تشخیص منبع و یا توان آکوسـتیکی آن وجـود دارد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]

ولی استفاده از روش جدا سازی کور منابع و روش معکوس در این میان رایج‌تر هستند.

گریس [۱] مسئله معکوس را برای صدای ناشی از یک صفحه که در معرض وزش باد قرار داشت بررسی کرد و در گام بعدی بجای یک صفحه، مسئله را برای یک بال مستطیلی مورد مطالعه قرار داد [۲]. نلسون و یان [۳, ۴] برای به کارگیری روش کنترل فعال و تخمین قدرت آکوستیکی منابع، فرض کردند تعداد و موقعیت قرار گیری منابع مشخص است. آنها همچنین رابطه ماتریسی بین قدرت منبع و فشار آکوستیکی را معلوم فرض کردند.

لی [۵]؛ لی و ژو [۶] مسئله معکوس را برای یک جسم سه‌بعدی متحرک، با شکل دلخواه و با استفاده از معادله فاکس ویلیامز و هاوکینگ (FW-H) حل نمودند. لی و لئو [۷] مسئله معکوس را برای یک مدل آئرواکوستیکی ناشی از اندرکنش روتور و استاتور بررسی کردند. آنها از معادله انتگرالی فردهولم نوع اول استفاده نمودند. جراد و همکاران [۸] بروی نویز فن‌ها کار کردند. آنها بصورت تئوری و عملی توزیع منابع دوقطبی یک فن محوری را بدست آوردند. پرسینیک[۹] در ادامه کار جراد بهترین مکان برای اندازه‌گیری صدای یک فن که خطاهای اندازه‌گیری اثر کمتری داشته باشند را بدست آورد. ترابلسی و همکاران [۱۰] توزیع نیروی چرخان ناپایدار روی سطح پره یک فن را به کمک فشار آکوستیکی میدان دور بدست آوردند. در ادامه‌ی بررسی تحقیقات گذشته، کاربرد مسئله معکوس در حوزه دریایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

پروانه¬ها باعث تحریک بدنه شناور می‌گردد. با نصب گیرنده‌های بروی بدنه در نزدیکی محل قرارگیری پروانه و به کار گیری روش المان مرزی و روش معکوس می‌توان پارامترهای مربوط به منابع را تعیین کرد. وینگدرن [۱۱] و سونگ و همکاران[۱۲, ۱۳] در این زمینه تلاش‌های بسیار خوبی انجام داده اند.

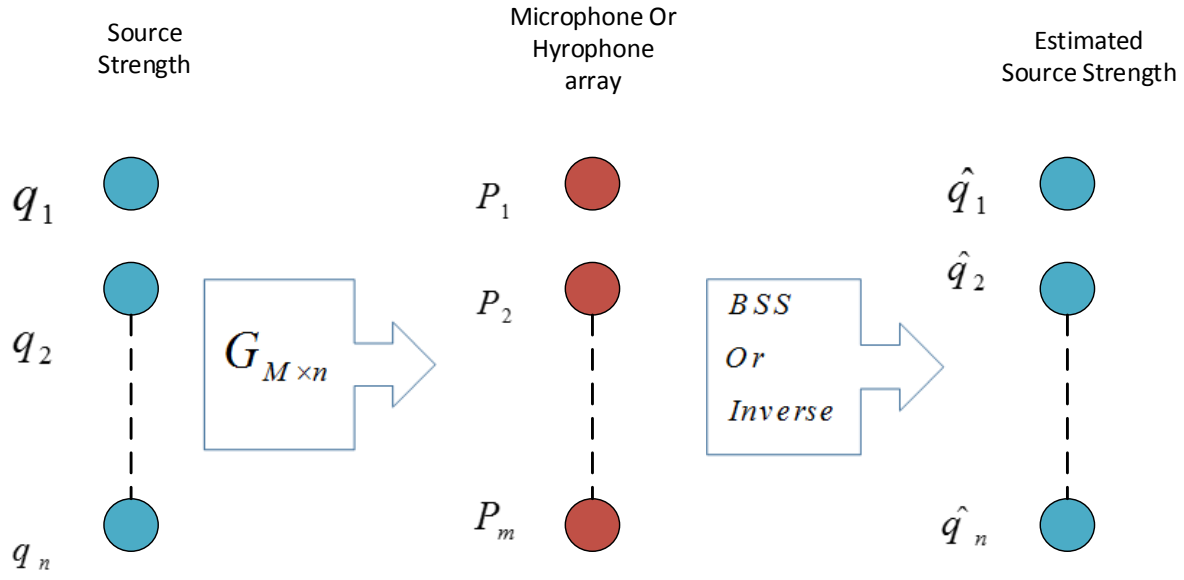
در این مقاله یک روش عمومی برای تخمین قدرت منابع آکوستیکی مختلف (تک‌قطبی ، دوقطبی ، چهارقطبی طولی و چهارقطبی جانبی) ارائه شده است. برای این منظور روش جداسازی کور منابع[۱] BSS و روش معکوس بررسی می‌شود. بمنظور بررسی تطابق صدای اصلی و صدای مدل شده از روش عدم انطباق[۲] استفاده گردید. در ادامه نیز محل اندازه گیری صدا جهت کاهش اثر خطاهای اندازه‌گیری بررسی گردیده است. در متن هرکجا از کلمه چندقطبی استفاده شده منظور تک‌قطبی، دوقطبی و چهارقطبی می‌باشد.

۲- روش‌های حل مسئله

منابع صدا را می‌توان به دو شاخه کلی دسته بندی کرد، منابعی که نسبت به طول موج کوچک هستند و منابعی که نسبت به طول موج بزرگ هستند[۱۴]. منابع بزرگ با سطح وسیع را می‌توان بوسیله تعدادی از منابع کوچکتر تجزیه کرد که به آن تصویرسازی منبع میدان نزدیک معادل[۳] (NESI) می گویند[۱۵]. در این مقاله یک چهارچوب کلی برای انتخاب منابع و چگونگی تعیین توان آنها معرفی می‌شود.۱۰ نشان می‌دهد صدای ناشی از تعدادی منبع آکوستیکی با توان معلوم بوسیله چندین میکروفن اندازه‌گیری می‌شود. در گام بعدی قرار است بکمک روش‌های معکوس و جداسازی کورمنابع، توان آکوستیکی هر منبع تخمین زده شود.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \qquad (۱)$$

در این رابطه k عدد موج و p فشار کلی صوت[۴] است که بوسیله اصل برهم نهی، جمع p^i موج تابشی[۵] و p^s باز تابی[۶]است[۱۲].

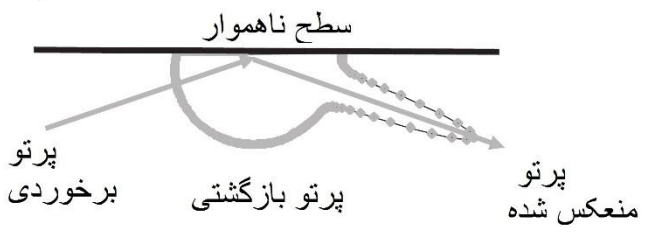


شکل ۱- نحوه‌ی بکارگیری روش‌های معکوس و جداسازی کور منابع.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]

$$p = p^i + p^s \qquad (۲)$$

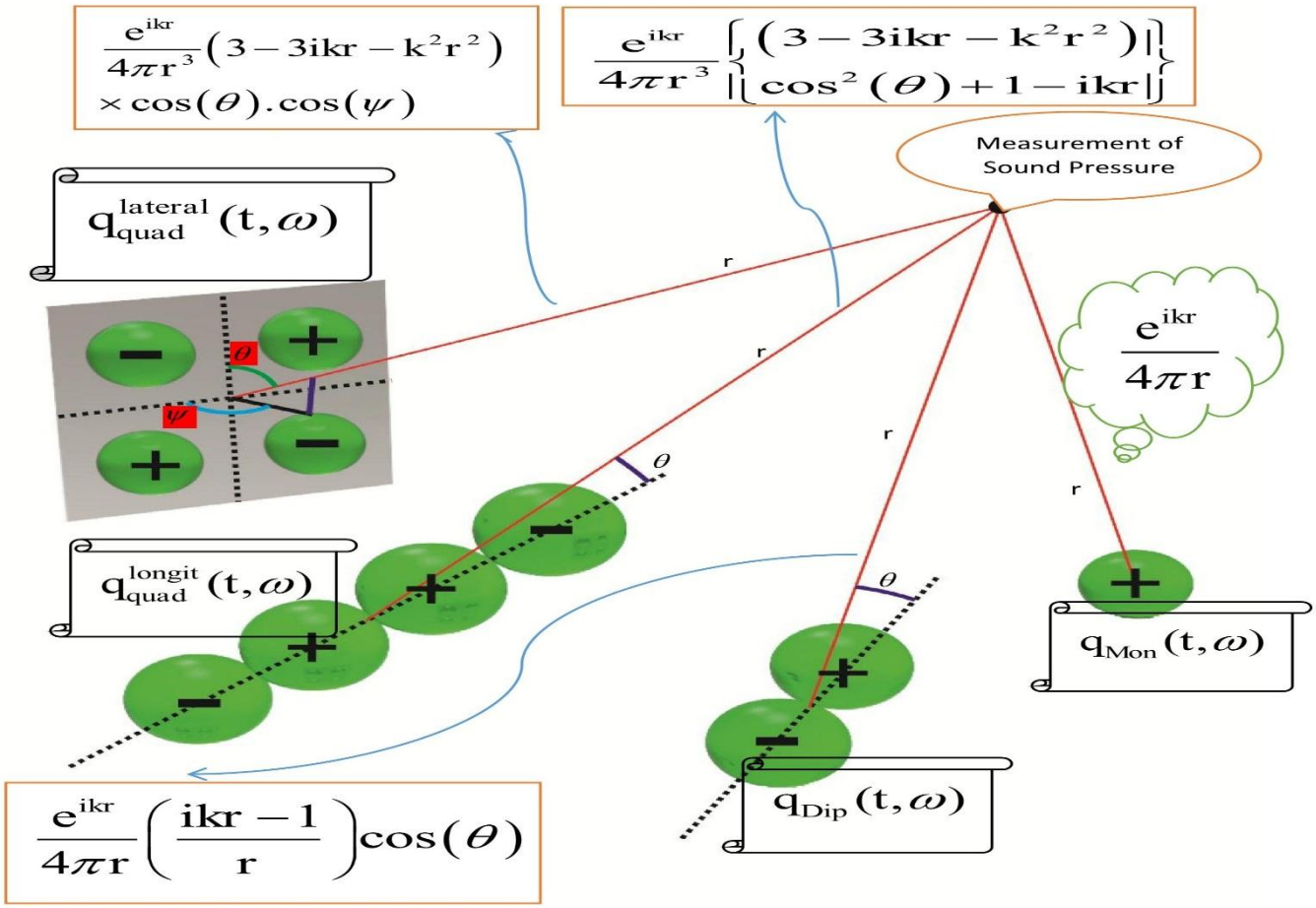
هر دو مقدار p^i و p^s معادله هولم هواتز را ارضا می کنند اما فقط p^s شرط انتشار سامرفلد را ارضا می‌کند. در این مقاله فرض می‌کنیم صدای منتشره از چند قطبی‌ها به هیچ سطحی برخورد نکرده است بنابراین بخش بازتابی در نظر گرفته نمی‌شود. در صورت برخورد موج آکوستیکی به یک سطح مانند۲۰، برای بخش بازتابی باید از روش المان مرزی و معکوس استفاده شود که خارج از بحث این مقاله است.



شکل ۲- انعکاس صدا از یک سطح سخت[۱۶]

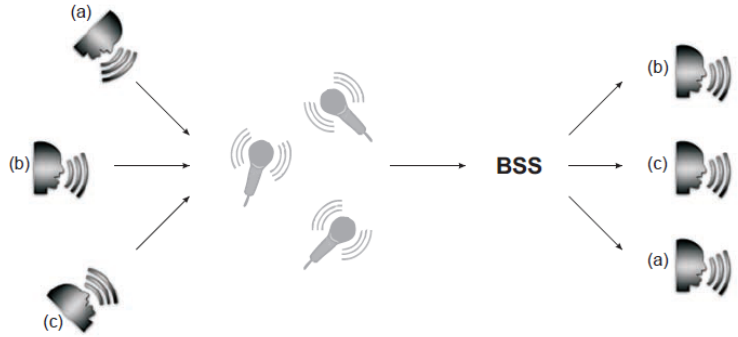
چندقطبی‌ها به عنوان منابع صدا به سه دسته تقسیم شده که عبارتند از تک‌قطبی، دوقطبی و چهارقطبی. چهارقطبی‌ها خود به دو دسته چهار قطبی طولی و جانبی دسته بندی می‌شوند.۳۰ به صورت نمادین، صدا اندازه‌گیری شده در یک نقطه را نشان می‌دهد. در این شکل، صدایی بوجود آمده بوسیله یک تک‌قطبی، یک دوقطبی، یک چهارقطبی طولی و یک چهارقطبی جانبی نشان داده شده است. همچنین در شکل مذکور، مکانیزم تولید صدا برای هر منبع مشخص گردیده است.

شایان ذکر است که همه منابع در یک فرکانس خاص، تولید صدا می‌نمایند. هدف کلی این تحقیق آن است که با اندازه‌گیری فشار آکوستیکی در نقاط مختلف محیط اطراف، توان منابع[۷] بدست می-آید. در ادامه دو روش مختلف بررسی می‌گردند تا بتوانیم توان منابع را محاسبه کنیم.



شکل ۳- مکانیزیم تولید صدا به وسیله تک قطبی، دوقطبی وچهارقطبی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]



شکل ۴- کاربرد روش BSS در مسئله کوکتل پارتی[۱۷]

۲-۱-روش جداسازی کور منابع

تکنیک جداسازی کور منابع BSS در اکثر موارد با مثال کوکتل پارتی[۸] بیان می‌شود. این مسئله در۴۰ نشان داده شده است. وقتی تعدادی از افراد در حال صحبت کردن با هم هستند همزمان تعدادی میکروفن نصب شده در محیط، صدا را اندازه‌گیری می‌کنند هر میکروفن صدایی را ضبط می‌کند که ترکیبی از همه گفتگوها است(ترکیبی از منابع مستقل است). دو متغییر x و y هنگامی مستقل هستند که با داشتن مقدار هرکدام نتوان مقدار دیگری را برآورد کرد. از لحاظ ریاضی چگالی احتمال دو طرفه[۹] برای متغیرهای مستقل به صورت ضرب چگالی احتمال هر کدام می‌باشد[۱۸].

$$\rho(x,y)=\rho(x).\rho(y) \qquad (۳)$$

در این رابطه چگالی احتمال با ρ نشان داده شده است. مدل ریاضی مربوط به روش جداسازی کور منابع (BSS) به صورت زیر تعریف می‌گردد. در اینجا اطلاعات ثبت شده بصورت ترکیبی از منابع مجهول $s(t)$ است و A نیز به عنوان ماتریس ترکیب کننده شناخته می‌شود.

$$x(t)=A.s(t) \qquad (۴)$$

۲-۲-روش معکوس (inverse)

برای بکارگیری این روش ابتدا در نقاط مختلف، صدا که از جنس فشار (P) بوده و تابع زمان و مکان می‌باشد اندازه‌گیری می‌شود که P در هر نقطه‌ای برابر است با

$$P(x,t)=\mathrm{Re}\{\sum_j 2i\,\rho\pi f_j\varphi_j(x)\exp(-2\pi i f_j t)\} \qquad (۵)$$

در این رابطه $i=\sqrt{-1}$، ρ چگالی، f فرکانس، φ تابع پتانسیل، و t زمان است. پس از آنکه صدا در نقاط مختلف برحسب زمان اندازه‌گیری شد. با توجه به رابطه (۵) از صدای اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف تبدیل فوریه گرفته می‌شود. و مقدار $\varphi(x)$ در فرکانس‌های متفاوت برای هر نقطه‌ای که در آن صدا اندازه‌گیری شده است بدست می‌آید.

تابع $\varphi(x)$ ممکن است در اثر مشارکت تعداد مختلفی از هر کدام منابع چندقطبی بوجود آید. برای مثال ممکن است که صدایی از دو تک‌قطبی، پنج دوقطبی، یک چهارقطبی طولی و سه چهارقطبی جانبی تشکیل شده باشد یا آنکه در تولید صدا یکی یا حتی سه نوع از منابع فوق شرکت نداشته باشند مثلا صدا از سه دوقطبی تولید شده باشد. که رابطه کلی آن به صورت $Hq=\varphi$ (رابطه ۶) است. در این رابطه q بردار توان منبع و H ماتریس تبدیل است در حالی که H به مکان اندازه گیری صدا و مکان منابع وابسته است (رابطه(۷))[۲۰,۱۹].

$$\begin{bmatrix}\sum_{M=1}^{m_{mon}}G_k & \sum_{M=1}^{m_{dip}}\frac{\partial G_k}{\partial\xi} & \sum_{M=1}^{m_{quad}^{longitu}}\frac{\partial^2 G_k}{\partial\xi^2} & \sum_{M=1}^{m_{quad}^{lateral}}G_k^{lateral}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}q_{mon}\\ q_{dip}\\ q_{quad}^{longit}\\ q_{quad}^{lateral}\end{bmatrix}=\varphi \qquad (۶)$$

$$G_k=\frac{e^{ikr}}{4\pi r},\quad \frac{\partial G_k}{\partial\xi}=\frac{e^{ikr}}{4\pi r}\left(\frac{ikr-1}{r}\right)\cos(\theta) \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial^2 G_k}{\partial\xi^2}=\frac{e^{ikr}}{4\pi r^3}\left\{\left(3-3ikr-k^2r^2\right)\cos^2(\theta)+1-ikr\right\}$$

$$G_k^{lateral}=\frac{e^{ikr}}{4\pi r^3}\left(3-3ikr-k^2r^2\right)\cos(\theta).\cos(\psi)$$

$$p(X)=i\,\rho\omega\varphi(X)$$

در این رابطه G_k تابع گرین، r فاصله بین منبع و گیرنده، θ و ψ زاویه بین منبع و گیرنده است این زوایا در ۳۰ بخوبی مشخص شده است.

در اینجا لازم است تعیین شود بین صدای اصلی و صدای مدل شده بوسیله چند قطبی‌ها چه مقدار تطابق وجود دارد لذا تابع $E(\Phi)$ تعریف می‌شود. این تابع یک همبستگی خطی بین فشار مدل شده با فشار اندازه‌گیری در حوزه فرکانس است که بصورت زیر تعریف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]

می‌شود. هرچه مقادیر این تابع به صفر نزدیک باشد تطابق بین صدای اصلی و مدل شده بیشتر خواهد بود[۱۳].

$$E(\Phi)=1-\frac{P_m^H(\omega,\Phi).\hat{C}(\omega).P_m(\omega,\Phi)}{\left\|P_m(\omega,\Phi)\right\|^2} \quad (۸)$$

در این رابطه Φ بردار پارامترهای منبع است، $P_m(\omega,\Phi)$ سیگنال صدای مدل شده در فرکانس $(\omega=2\pi f)$ و بالانویس H اپراتور مزدوج ترانهاده[۱۰] هرمیتن است. سیگنال فشار اندازه‌گیری به شکل ماتریس طیف چگالی متقاطع[۱۱] یا (CSDM) استفاده می‌شود تا نسبت سیگنال به نویز بهبود یابد.

$$\hat{C}(\omega)=\frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L}P_l(\omega)P_l^H(\omega) \quad (۹)$$

در اینجا $P_l(\omega)$ بردار یکه شده است و زیرنویس l شماره اندازه‌گیری و L تعداد کل فشار اندازه‌گیری شده است. مقدار $E(\Phi)$ هنگام کاهش عدم تطابق بین میدان فشار مدل شده و اندازه‌گیری شده به صفر میل می‌کند.

کاهش اثر خطاهای اندازه‌گیری

رابطه ۱۰ حساسیت مقدار q به تغییرات کوچک δP را نشان می‌دهد. در معادله مذکور عدد سلامت[۱۲] (κ) ماتریس H ، را می‌توان بصورت رابطه ۱۱ تعریف کرد.

$$\frac{\|\delta q\|}{\|q\|}=\kappa(H)\frac{\|\delta P\|}{\|P\|} \quad (۱۰)$$

$$\kappa(H)=\|H\|.\|H\|^{-1}=\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (۱۱)$$

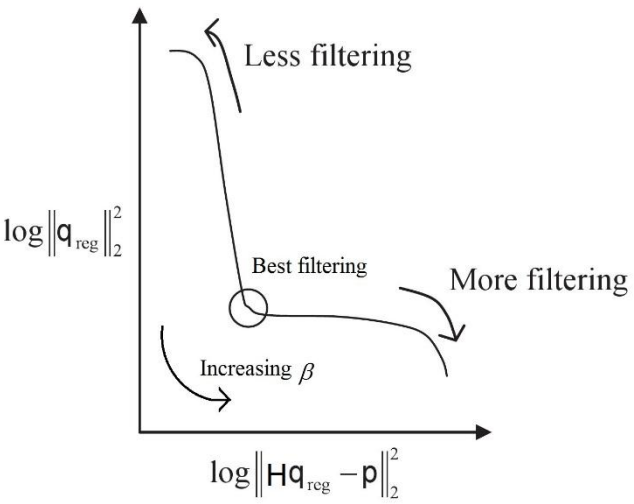
$\|H\|$ نرم ماتریس H و $\sigma_{\min}$ و $\sigma_{\max}$ به ترتیب کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین مقدار ویژه H است. حساسیت حل به صورت مستقیم از عدد سلامت ماتریس منتج می‌شود.

در مواقعی که κ کوچک است، H شرایط خوبی برای استفاده در روش معکوس دارد و انحراف کوچک بردار فشار، تغییر زیادی در حل بردار توان بوجود نمی‌آورد. اما هنگامی که κ بزرگ باشد گوییم مسئله حالت بدخیم[۱۳] دارد و تغییرات کوچک در P منجر به خطای بزرگ در حل می‌شود.

برای کاهش اثر این خطاهای اندازه‌گیری دو روش کلی وجود دارد روش‌های ریاضی حل تیخونف[۱۴] که بصورت رابطه زیر است.

$$q=\left[H^H H+\beta I\right]^{-1}H^H P \quad (۱۲)$$

در اینجا β پارامتر تنظیم کننده[۱۵] است[۸].



شکل ۵- نمایی از یک نمودار L-curve نقطه بهینه با دایره نشان داده شده[۱۵].

روش انتخاب محل گیرنده صدا با انتخاب محل سنسورها نیز می‌توان میزان عدد سلامت ماتریس را کاهش داد[۹]. بطوری که اثر خطاهای اندازه گیری کاهش پیدا می‌کنند. طبق معادله ۷ تمام درایه‌های ماتریس تبدیل H تابعی از r هستند یعنی فاصله بین منبع تا محل اندازه‌گیری صدا است. پس با انتخاب بهینه محل اندازه‌گیری صدا عدد سلامت ماتریس، کاهش پیدا خواهد کرد.

۳- نتایج

برای ارزیابی عملکرد روش جداسازی کور منابع و روش معکوس، صدایی تولید شد که از هریک از منابع دو نمونه در تولید آن سهم داشتند. به این دلیل که دریابیم آیا روش‌های مذکور قابلیت تفکیک منابع را دارا می‌باشند یا نه؟ مشخصات این منابع در۰ جدول ۱ گرد آوری شده است.

صدای تولید شده بوسیله این هشت منبع در ۶۶ نقطه مختلف روی محیط یک کره اندازه‌گیری شده است. این فشارهای اندازه‌گیری شده را به عنوان ورودی به روش BSS و روش معکوس وارد می‌کنیم تا مشخص شود آیا این دو قابلیت تشخیص این منابع و تعیین توان آنها را دارند یا خیر؟

۳-۱- شناسایی به کمک روش جداسازی کور منابع

صدای تولید شده در قسمت قبل با استفاده از روش جداسازی کور منابع که از الگوریتم آنالیز منابع مستقل سریع[۱۶] بهره می‌جوید تجزیه شد. روش کور منابع فقط توانست دوصدای متفاوت از هم را تشیخص بدهد. همانگونه که قبلا بیان گردید هشت منبع مختلف به تولید صدا پرداختند که فقط دو منبع تشخیص داده شد. درجدول ۲ عدم انطباق دو صدای تشخیص داده شده بوسیله Fast Ica و صدای اصلی جدول ۱ بیان گردیده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]

جدول ۱- مکان وتوان چندقطبی‌ها در دستگاه مختصات کروی

	دستگاه مختصات کروی :			
	R (m)	$\psi\ (rad)$	$\theta\,(rad)$	توان منبع
تک قطبی	0.5	$\frac{\pi}{19}$	$\frac{\pi}{7}$	$10\frac{m^3}{s}$
	0.25	$\frac{\pi}{7}$	$\frac{\pi}{5}$	$1.2\frac{m^3}{s}$
دوقطبی	0.85	$\frac{8\pi}{5}$	$\frac{7\pi}{13}$	$3\frac{m^4}{s}$
	0.95	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{12\pi}{13}$	$5.5\frac{m^4}{s}$
چهارقطبی طولی	0.35	$\frac{13\pi}{11}$	$\frac{31\pi}{17}$	$13\frac{m^5}{s}$
	0.46	$\frac{19\pi}{7}$	$\frac{11\pi}{13}$	$11.3\frac{m^5}{s}$
چهارقطبی جانبی	0.78	$\frac{19\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{7}$	$8.7\frac{m^5}{s}$
	1.67	0	π	$2\frac{m^5}{s}$

۳-۲- شناسایی منابع به کمک روش معکوس

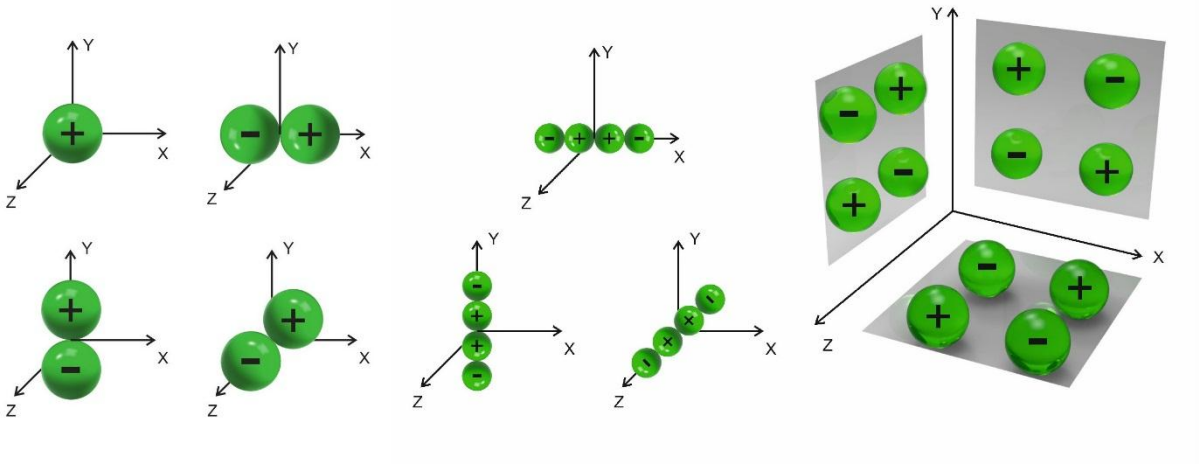
روش معکوس توانست توان منابع را با دقت بسیار خوبی بدست آورد که میزان خطاها برحسب درصد در جدول ۳ آورده شده است. درصد خطاها از مرتبه 10^{-11} می‌باشد. در ادامه نیز میزان عدم انطباق بین صدای منابعی که از روش معکوس بدست آمده و صدای اصلی (جدول ۳، جدول ۱)، محاسبه شده که برابر است با $E = 1.1\times10^{-16}$ که نشان دهنده دقت بسیار بالای نتایج است.

جدول ۲- درصد خطا در تخمین توان

چهارقطبی طولی اول	0.64×10^{-11}	تک قطبی اول	3.0×10^{-11}
چهارقطبی طولی دوم	1×10^{-11}	تک قطبی دوم	24×10^{-11}
چهارقطبی جانبی اول	0.31×10^{-11}	دوقطبی اول	0.5×10^{-11}
چهارقطبی جانبی دوم	2.85×10^{-11}	دوقطبی دوم	1×10^{-11}

جدول ۳- عدم انطباق بین منابع حاصل از روش جداسازی کور منابع و منابع اصلی صدای جدول یک

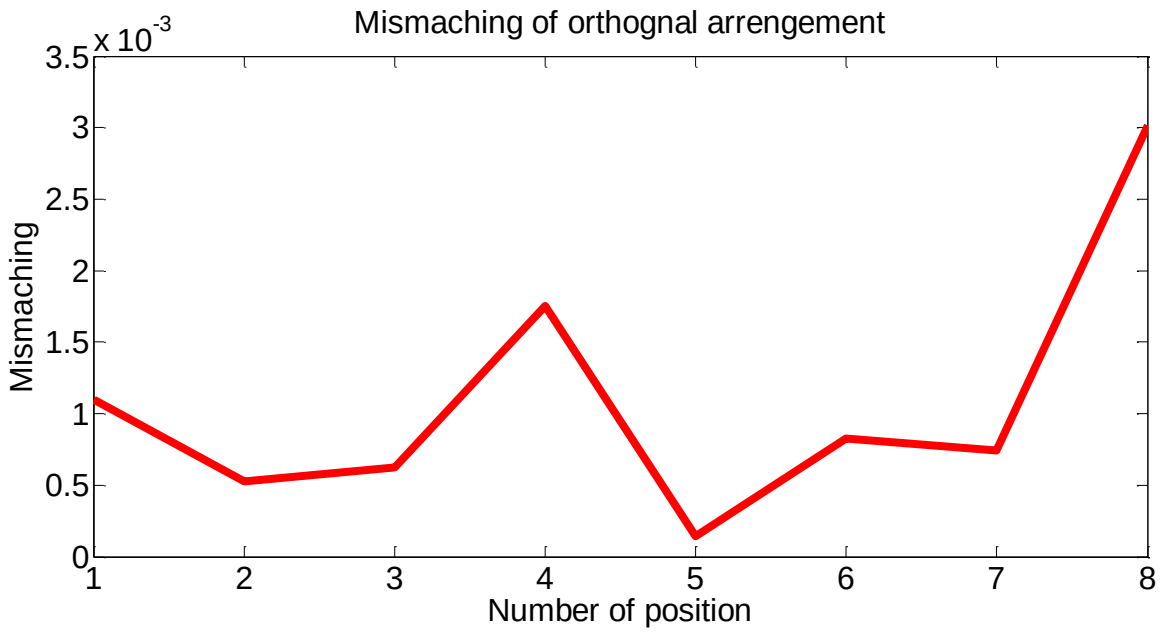
	تک‌قطبی اول	تک‌قطبی دوم	دوقطبی اول	دوقطبی دوم	چهارقطبی اول	چهارقطبی طولی دوم	چهارقطبی جانبی اول	چهارقطبی جانبی دوم
منبع اول تشخیص داده شده بوسیله BSS	۰/۰۵۴۶	۰/۶۱۳	۰/۷۶۷	۰/۰۲۷۴	۰/۱۳۳	۰/۰۶۵۹	۰/۰۴۸۱	۰/۰۴۷۸
منبع دوم تشخیص داده شده بوسیله BSS	۰/۹۵۲۲	۰/۹۵۲۲	۰/۹۵۲۲	۰/۹۵۲۲	۰/۹۵۲۲	۰/۹۵۲۲	۰/۹۵۲۲	۰/۹۵۲۲



شکل ۶- نمایی از چیدمان عمودی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]



شکل ۷- عدم انطباق بین صدای اصلی و چیدمان عمودی در نقاط مختلف

در روش معکوس کاربر باید محل منابع را مشخص نمایید. در مرحله قبل، محل منابع مطابق جدول یک در نظر گرفته شد. در این مرحله محل قرار گیری منابع مطابق جدول یک نیست بدین صورت که جای منابع عوض شد یعنی در مرحله نخست شعاع محل قرار گیری منابع تغییری نکرد و مطابق جدول یک بود اما مقدار θ و ϕ به صورت اتفاقی انتخاب شدند. در ادامه نیز θ و ϕ اولیه منابع تغییری داده نشد ولی شعاع قرار گیری آنها بصورت اتفاقی انتخاب گردید و در گام انتهایی محل منابع به صورت کاملا اتفاقی انتخاب گردید برای هر کدام از سه چیدمان مذکور توان جدیدی برای منابع بدست آمد و عدم انطباق[۱۷] بین صدای اصلی (۰جدول ۱) و صدای چیدمان‌های مذکور در۰ جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- عدم انطباق بین صدای چیدمان های مختلف و صدای اصلی

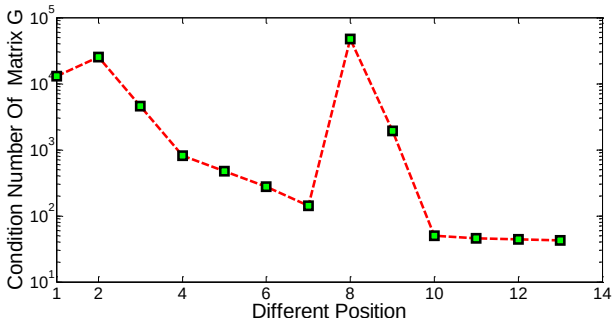
شعاع منابع بصورت اتفاقی انتخاب شد.	$E= 3.1\times10^{-3}$
ψ و θ منابع بصورت اتفاقی انتخاب شد.	$E =1.8\times10^{-4}$
مختصات محل قرار گیری منابع کاملا بصورت اتفاقی انتخاب شد.	$E=1.85\times10^{-4}$

۳-۲-۱- سیستم عمودی

چیدمانی از منابع را در نظر بگیریدکه یک تک‌قطبی روی مرکز آن، سه دوقطبی و سه چهارقطبی طولی در جهت محورهای اصلی (xyz) قرار دارند. در انتها سه چهارقطبی جانبی که بردارهای عمود بر سطح هر کدام در جهت محورهای مختصات x، y و z باشند، مانند۰۶. در این شکل برای آنکه تشخیص منابع از هم مشکل ساز نباشد و همه‌ی منابع بروی هم قرار نگیرند، آنها با فاصله از هم رسم شده‌اند. در این آرایش جدید ۱۰ منبع داریم. این چیدمان جدید می‌تواند در نقاط مختلفی قرار گیرد. بنابراین این چیدمان در چند نقطه مختلف قرار داده شد و به کمک روش معکوس توان مربوط به هر یک از منابع محاسبه گردید. عدم انطباق بین صدای اصلی (۰جدول ۱) و صدای ناشی از این چیدمان جدید که در نقاط مختلف قرار داده شده در۰ ۷ آمده است.

۳-۲-۲- کاهش اثر خطاهای اندازه‌گیری

با انتخاب محل مناسب قرار گیری گیرنده صدا اعم از میکروفن یا هیدروفن[۱۸] می‌توان عدد سلامت ماتریس را کاهش داد. حتی به کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی نیز می‌توان محلی با کمترین عدد سلامت را یافت. ۸۰ مقادیر مختلف عدد سلامت، در نقاط مختلف را نشان می‌دهد.



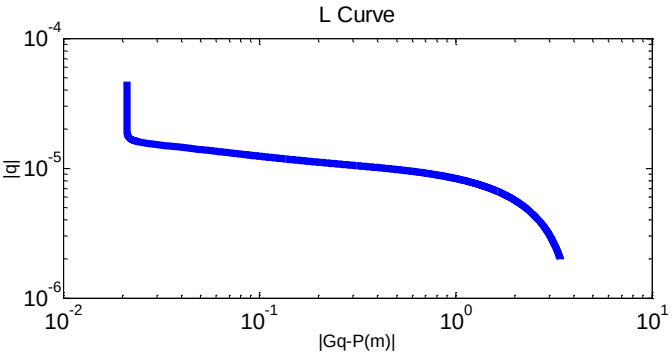
شکل ۸- مقدار عدد سلامت ماتریس در نقاط مختلف

یکی دیگر از روش‌های کاهش اثر خطاهای اندازه‌گیری استفاده از روش ریاضی تیخونف است. بدلیل آنکه این تحقیق بصورت عددی انجام شده است و در روش عددی خطای اندازه‌گیری وجود ندارد برای شبیه‌سازی اثر این خطا، یک نویز با توزیع یکنواخت و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]

میانگین صفر که مقدار واریانس (variance) آن برابر V است به مقدار فشار در محل گیرنده‌های صدا اضافه می‌گردد. برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز از رابطه ۱۳ استفاده می‌شود. در این معادله J تعداد اندازه‌گیری و P فشار اندازه‌گیری است. نسبت سیگنال به نویزِ در نظرگرفته شده برای این قسمت $\frac{S}{N}=50$ است. در این مرحله نمودار L-curve برای بازه $10^{-10}\le\beta\le10^{-1}$ در ۹۰ رسم شده است.

$$\frac{S}{N}=20\log10\left[\frac{1}{J}\frac{|p|^2}{V^2}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۳)$$



شکل ۹- نمایی از نمودار L-curve

۴- بحث

نتایج۰ جدول ۲ نشان می‌دهند که روش BSS نمی‌تواند بخوبی صداهای متفاوت مثال۰ جدول ۱ را از هم تشخیص دهد. برخلاف رفتاری که در مسائل گوناگون از خود نشان داده است. پس از بررسی‌های زیاد، این نتیجه بدست آمد: بدلیل آنکه فرکانس موج آکوستیکی تولید شده بوسیله همه منابع یکی است و می‌توان به‌کمک یک تابع ریاضی مقادیر آنها را بهم مربوط کرد پس طبق رابطه ۱۴ تابع چگالی احتمال آنها از هم مستقل نیست[۱۹]. در این رابطه ρ چگالی تابع احتمال و dy/dx مشتق تابع y نسبت به تابه x است. یعنی که با داشتن احتمال وقوع پدیده x می‌توان احتمال وقوع پدیده y را بدست آورد پس مولفه‌های صدای تولیدی از لحاظ آماری از هم مستقل نیستند که با اصول اولیه بکارگیری روش BSS کاملا متناقض است.

$$\rho(y).\left|dy/dx\right|=\rho(x) \qquad (۱۴)$$

هنگامی که فرکانس منابع از هم متفاوت باشد، حتی اگر فرکانس آنها بهم نزدیک باشد با بکارگیری الگوریتم Second Order Blind Identification بجای الگوریتم Fast Ica می‌توان این سیگنال‌ها را از هم جدا کرد[۱۷] اما مشکل دیگری بوجود می‌آید. بدلیل آنکه ماتریس ترکیب کننده و منابع مجهول هستند(رابطه۴) نامعینی بعد از انجام الگوریتم جداسازی بوجود می‌آید. اثر یک اسکالر ضرب شونده در یکی از منابع قابل حذف شدن است. زیرا با ضرب شدن مقدار معکوس عدد اسکالر در ستون‌های ماتریس متناظر اثر پارامتر مذکور از بین خواهد رفت[۱۷, ۱۸].

$$x_i(t)=\sum_{j=1}^{n_s}\left(\frac{1}{\alpha_j}.a_{ij}\right)\left(\alpha_j.s_j\right) \qquad (۱۵)$$

به دلیل آنکه هدف این تحقیق تعیین مقادیر توان منابع است و در صورت ضرب شدن مقادیر اسکالر در توان منابع، نمی‌توان این مقادیر را بدرستی تعیین کرد و همچنین بدلیل عدم استقلال منابع با فرکانس یکسان لذا استفاده از روش BSS برای تخمین توان منابع آکوستیکی مناسب نمی‌باشد.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که به کمک روش معکوس می‌توان، توان آکوستیکی منابع را با دقت بسیار خوبی محاسبه کرد. یکی از مواردی که در مورد روش معکوس حائز اهمیت است عدم یگانگی جواب‌ها است. جدول ۴ عدم انطباق بدست آمده بین صداهای تولید شده توسط سه چیدمان گوناگون و صدای اولیه را نشان می‌دهد که مقادیر قابل قبولی هستند. این موضوع نشان می‌دهد که روش معکوس جواب‌های یگانه‌ای[۱۹] ندارد [۲۱, ۲۲, ۲۳].

همانگونه که۳۰ و رابطه ۷ نشان می‌دهند به غیر از تک‌قطبی‌ها که فقط فاصله بین منبع صدا و گیرنده آن مهم است در بقیه منابع زوایای بین منبع و گیرنده سهم بسیار زیادی در میزان صدای دریافتی در محل اندازه‌گیری صدا دارند. یکی از پارامترهایی که قبل از تخمین توان منبع باید تعیین گردد زوایای قرار گیری آنها است. برای حذف این مشکل در چندقطبی‌هایی که زوایا در میزان صدا اهمیت پیدا می‌کنند باید چندقطبی‌هایی در نظر گرفته شود که در جهت سه محور مختصات x، y و z هستند ولی توان آنها مجهول است. دوقطبی‌ها و چهارقطبی‌های طولی آرایش خطی دارند ولی جهت و توان آنها مشخص نیست. بنابراین می‌توان بجای آنها سه‌دوقطبی و سه چهارقطبی با توان مجهول در جهت محورهای مختصات در نظرگرفت. برای چهار قطبی‌های جانبی که آرایش صفحه‌ای دارند ولی جهت صفحات و توان آنها مجهول است نیز می‌توان آنها را با سه چهارقطبی جانبی با توان مجهول که بردارهای نرمال صفحات آن در راستای محورهای x، y و z است معادل نمود. بنابراین با توجه به عدم یگانگی جواب‌ها در روش معکوس می توان صدای منابع مختلف را بوسیله این فرم استاندارد (شکل ۶) معادل‌سازی کرد که مشکلاتی مانند جهت مجهول منابع وجود ندارد. مقادیر۷۰ نشان می‌دهد که یک نقطه با کمترین عدم انطباق وجود دارد. بنابراین می‌توان با استفاده از بهینه‌سازی محل قرار گیری این چیدمان را طوری انتخاب کرد که کمترین عدم انطباق حاصل شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]

نکته بعدی در مورد مسائل معکوس خطاهای اندازه‌گیری است که باعث می‌شود نتوان توان منابع را بخوبی محاسبه نمود. همانگونه که قبلا بیان شد هرچه عدد سلامت ماتریس تبدیل کوچکتر باشد تاثیر این خطاها کمتر خواهد بود (رابطه ۱۰). در۸۰ یک نقطه با کمترین عدد سلامت وجود دارد پس می‌توان با انتخاب صحیح محل قرارگیری سنسورها عدد سلامت ماتریس را کاهش داد. همچنین به کمک روش L-Curve و نتایج۹۰ می‌توان اثر خطاهای اندازه‌گیری را نیز بخوبی کاهش داد. در این شکل مقدار بهینه برای $\beta = 1.5\times10^{-4}$ است بنابراین اثر این خطاها کمترین خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

روش BSS در جهت تعیین توان منابع چندقطبی آکوستیکی مناسب نیست بدلیل آنکه تمام منابع با یک فرکانس به تولید صدا می‌پردازند که باعث می‌شود صداهای تولیدی از لحاظ آماری مستقل نباشد اما به کمک روش معکوس می‌توان توان منابع چندقطبی را بدست آورد تا عدم انطباق بین صدای مدل شده و اصلی در حد قابل قبولی کم باشد. با توجه به اینکه روش معکوس دارای جواب یگانه‌ای نیست و چیدمان‌های مختلفی را می‌توان برای منابع انتخاب نمود، انتخاب چیدمان عمودی مشکل تعیین جهت برای منابع دارای جهت (دوقطبی و چهارقطبی) را حل می‌نمایید. در ضمن، اگر مشخص شود یک نوع از منابع در تولید صدا سهمی ندارد می‌توان آن نوع منبع را از چیدمان عمودی حذف نمود. به کمک روش بهینه‌سازی می‌توان محل قرار گیری چیدمان را طوری انتخاب کرد که میزان عدم انطباق بین صدای اندازه‌گیری شده و صدای مدل شده کاهش یابد. در انتها نیز باید خاطر نشان کرد میزان اثر خطاهای اندازه‌گیری را می‌توان با انتخاب مناسب محل قرار گیری سنسورها و یا روش L-curve کاهش داد.

کلید واژگان

1- Blind Source Separation
2- Matched-Field Inversion (MFI)
3- Near field Equivalent Source Imaging
4 -Total sound pressure
5-Incident sound pressure
6 -Scattered sound pressure
7 -Source strength
8 -Cocktail party
9 -Joint probability density functions
10- Hermitian
11- Cross-spectral density matrix
12- Condition Number
13- Ill-posed
14- Tikhonov
15- Regularization factor
16- Fast independent component analysis (Fast Ica)
17 –Mismatching
18-Hyrophone
19 -Nonuniquness

۶ - مراجع

1- Grace, S.P., H.M. Atassi, and W.K. Blake., (1996), *Inverse aeroacoustic problem for a streamlined body I - Accuracy of solutions*, AIAA Journal, Vol.34, p.2241-2246.

2- Wood, T.H. and S.M. Grace., (2000), *Inverse Aeroacoustic Problem for a Rectangular Wing*, AIAA Journal, Vol.38, p.203-210.

3- Yoon, S. and P. Nelson, (1998), *Reconstruction of aeroacoustic source strength distributions by inverse techniques*, in 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics.

4- Nelson, P.A. and S.H. Yoon, (2000), *ESTIMATION OF ACOUSTIC SOURCE STRENGTH BY INVERSE METHODS: PART I, CONDITIONING OF THE INVERSE PROBLEM*. Journal of Sound and Vibration, Vol.233, p.639-664.

5- LI, X.D., (1995), *A new kind of inverse problem in aerodynamics and areoacoustics in Jet ProPulsion, Beijing*, People Republic of China.

6- Li, X.D. and S. Zhou, (1996), *Spatial transformation of the discrete sound field from a propeller*, AIAA Journal, Vol.34, p.1097-1102.

7- Luo, J. and X.D. Li, (2002), *AN INVERSE AEROACOUSTIC PROBLEM ON ROTOR WAKE/STATOR INTERACTION*, Journal of Sound and Vibration,.Vol.254, p.219-229.

8- Gérard, A., A. Berry, and P. Masson, (2005), *Control of tonal noise from subsonic axial fan. Part 1: reconstruction of aeroacoustic sources from far-field sound pressure*, Journal of Sound and Vibration,.Vol.288, p.1049-1075.

9- Presezniak, F., G. Steenackers, and P. Guillaume, (2010), *Microphone positioning optimization for conditioning inverse tonal fan noise*, Mechanical Systems and Signal Processing,Vol.24, p.168.

10- Trabelsi, H., et al., (2014), *Reconstruction of the unsteady rotating forces of fan's blade from far-field sound pressure*, Applied Acoustics,Vol.86, p.126-137.

11- Wijngaarden, E.V, (2011), *Prediction of Propeller-Induced Hull-Pressure Fluctuations*, in Marin, Delft: Netherlands, p.210.

12- Lee, K., et al., (2014), *Propeller sheet cavitation noise source modeling and inversion*, Journal of Sound and Vibration,Vol.333, p.1356-1368.

13- Kim, D., K. Lee, and W. Seong, (2014), *Non-cavitating propeller noise modeling and inversion*, Journal of Sound and Vibration,Vol.333, p.6424-6437.

14- Chanaud, R.C., (2010), *Tools for Analyzing Sound Sources*, p.173.

15- Mingsian R. Bai, J.-G.I., Jacob Benesty, *ACOUSTIC ARRAY SYSTEMS THEORY*,

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]

IMPLEMENTATION, AND APPLICATION, edition first, John Wiley & Sons Singapore,p.516.

16- Poncelet, F, (2010), *Experimental Modal Analysis using Blind Source Separation Techniques*, University of Liège, p.166.

17- Aapo Hyvtirinen, J.K., Erkki Oja, (2001) *Independent Component Analysis*.

18- S.BENDAT, A.G.P.a.J., (2010), *Random Data Analysis and Measurement Procedures*, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, Vol.4,.p.640.

19- Madoliat, R., N.M. Nouri, and A. Rahrovi, (2016), *Equalization of acoustic source using multi-pole sources and source strength estimation using inverse method.*, Applied Acoustics,Vol.113, p.210-220.

20- Madoliat, R., N.M. Nouri, and A. Rahrovi, (2017), *Developing general acoustic model for noise sources and parameters estimation*, AIP Advances, Vol.**7**, .p.025014.

21- S.W. Rienstra, A.H., *An Introduction to Acoustics*, (2013), Eindhoven University of Technology.

22- Iskander Akhatov, Y.A., (2007), *Keith Attenborough* , Springer Handbook of Acoustics.

23- Madoliat, R., N.M. Nouri, and A. Rahrovi, (2017), *Acoustic model order reduction for the lowest condition number in inverse method*, AIP Advances, Vol.**7**, .p. 065010.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.7.3]