



# ISAV2022

## دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران ۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱



### شبیه سازی عددی اثر تداخلات آکوستیکی روی اختلاف فاز سنسورهای آکوستیکی

سجاد فاخری کوزه کنان<sup>۱</sup>، لیلا محمودی<sup>۱\*</sup>

ایران، تهران، نام شرکت آواسنجش ارس، ۵۴۴۱۷۶۴۳۷۷؛ پژوهشگر

\*پست الکترونیکی: Mahmoodi\_leila@ee.sharif.edu

#### چکیده

در میکروفون های شاتگان تجاری و متداول، در باندهای فرکانسی مشخصی، حذف صوت های جانبی صورت می گیرد. در مدل های متداول وجود کپسول های گیرنده کمک می کند که تاخیر فازی در امواج وارده از اطراف میکروفون ایجاد کرد. در این حالت موج های وارد شده از دیواره های کناری ناهم فاز شده و همدیگر را خنثی می نمایند و تاثیر اصوات جانبی کاهش می یابد. بدلیل وجود کپسول های گیرنده، عملیات ایجاد تاخیر فاز، بصورت آنالوگ و در فرکانس مشخصی صورت می گیرد. اما هدف این است که فرکانس هایی که در آن عملیات انجام می شود بوسیله اپراتور و در محدوده مطلوب تعیین شود. این کار با ایجاد کپسول های گیرنده قابل انجام نیست. بدین منظور از میکروفون هایی بجای کپسول های گیرنده استفاده می شود که بصورت دیجیتالی عملیات را اجرا نموده و از طریق اپراتور فرکانس های مطلوب قابل تعیین است. علاوه بر استفاده از میکروفون ها بجای کپسول های گیرنده که باعث کاهش اثرات میدان امواج جانبی می شوند، وجود شبکه هایی با اندازه و فواصل مشخص در سرتاسر شیلد آکوستیکی<sup>۱</sup>، تا حد امکان باعث کمتر شدن نویز در اصوات دریافتی خواهند شد. بنابراین این نوع میکروفون ها به همراه شیلد آکوستیکی نه تنها بصورت دیجیتال و برنامه ریزی شده، منجر به کاهش اثرات میدان امواج جانبی می شوند بلکه نویزهایی که امواج با جهت گیری مستقیم می توانند با خود به همراه داشته باشند را نیز کاهش می دهند. در این مقاله با استفاده از نرم افزار کامسول و با ساطع نمودن منابع موج، اختلاف فاز بین میکروفون ها محاسبه شده و با حالتی که صرفاً یک منبع موج در مختصات و شدت ثابت قرار دارد، مقایسه می شود. همچنین بررسی می شود که چه پارامتری و در چه صورتی منجر به اختلاف فاز غیرخطی شده و تا چه حدی میزان خطا کمتر می شود. علاوه بر آن زاویه و شدت منبع موج دومی که در آن اختلاف فاز غیرخطی می شود، بدست می آید. این شبیه سازی در نمونه دوبعدی به همراه شیلد آکوستیکی انجام گرفته است. در نهایت در فرکانس های مختلف نیز، تحلیل های بیان شده مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده، در محدوده فشاری ۰.۰۰۰۲ پاسکال تغییرات کمی در محدوده خطا مشاهده می شود. همچنین، یکی از مناسب ترین زوایا برای قرارگیری منبع موج دوم زاویه ای است که اختلاف زاویه منبع اول با منبع دوم ۵ درجه می باشد. مشاهده می شود که هرچه شدت منبع دوم کمتر باشد، با افزایش فرکانس می توان خطا را کنترل نمود و ثابت نگه داشت.

**کلمات کلیدی:** میکروفون شاتگان؛ اختلاف فاز؛ منبع موج؛ فشار منبع موج.

<sup>۱</sup> Blimp

## ۱ - مقدمه

از نظر ظاهری میکروفون‌های شاتگان به شکل استوانه‌های بلند با شکاف‌هایی در اطراف بدنه با پراکندگی منظم می‌باشند. در نزدیکی انتهای استوانه، کپسول گیرنده صدا قرار گرفته‌است. صدا از سمت روبرو وارد استوانه شده و به کپسول گیرنده می‌رسد. در عین حال، صداهایی که از سمت مجاور و از طریق شکاف‌های بدنه وارد میکروفون می‌شوند بدلیل تداخل فاز با یکدیگر، حذف شده و به کپسول گیرنده نمی‌رسند. به همین دلیل این نوع میکروفون‌ها را لوله‌های تداخلی یا Interference Tube نیز می‌نامند. بدلیل شباهت استوانه‌های میکروفون‌های گان و شاتگان با لوله‌های تفنگ و اینکه به سمت منبع صدا نشانه‌روی می‌شوند، از نام شاتگان برای این نوع میکروفون استفاده می‌شود. میکروفون‌های شاتگان در فرکانس‌های بالا بهتر از فرکانس‌های متوسط و پایین عمل می‌کنند و هرچه طول آن‌ها بلندتر باشد، جهت‌دهندگی بیشتری خواهند داشت [۱].

در این مقاله اختلاف فاز و پاسخ‌های میکروفون به امواج ساطع شده از دو منبع متفاوت که منبع اول ثابت و منبع دوم با شدت و زاویه جهت‌گیری متغیر در فرکانس ۱۰۰ هرتز، توسط پدیده‌های موج ایستاده و تداخل بررسی می‌شوند. برای بسیاری از برنامه‌های صوتی، استفاده از میکروفون‌هایی با جهت‌گیری بالا ضروری است. به عنوان مثال، در صنعت فیلم، پیک‌آپ دیالوگ روی مجموعه تیراندازی معمولاً از طریق میکروفون‌های با جهت‌گیری قوی استفاده می‌شود. رویدادهای ورزشی با سطح نویز محیطی بالا ممکن است به میکروفون‌های با جهت‌گیری قوی نیاز داشته باشند.

ساختار عمومی یک میکروفون شاتگان شامل یک لوله با شکاف‌های از پیش طراحی‌شده با امپدانس مشخص در پیرامون آن و یک میکروفون ترجیحاً کاردیوید در انتهای آن می‌باشد. این جهت‌گیری ناشی از طراحی هوشمندانه تداخل صوتی قسمت بیرونی در دهانه‌ها و میدان داخلی در لوله است. در توسعه اولیه میکروفون‌های شاتگان، مدل travelling-wave (TWM) توسط اولسون و میسون پیشنهاد شد. اولسون به طور تحلیلی میکروفون‌های جهت‌دار را با ادغام تاخیرهای میدان بیرونی که به هر روزنه می‌رسد و انتشار تاخیر در لوله شاتگان مدل می‌کند. رویکرد میسون برای محاسبه تاخیرها مشابه روش اولسون است به جز استفاده از جمع گسسته به جای ادغام پیوسته که توسط اولسون استفاده شده‌است. در مدل آن‌ها، میدان بیرونی به عنوان امواج صفحه ورودی و میدان داخلی به عنوان امواج صفحه محرک مدل‌سازی می‌شود. به طور خاص، مدل میدان بیرونی از مفهوم آرایه فازی پیروی می‌کند، که فرض می‌کند امواج صفحه توسط یک منبع میدان دور که در هر شکاف با زمان‌های مختلف وارد شده، تولید می‌شود. برای میدان داخلی، مدل فرض می‌کند که امواج صوتی وارد شده به دهانه‌های شکاف منتشر می‌شوند و به شکل امواج سطحی در حال حرکت ترکیب می‌شوند تا منجر به جهت‌گیری بسیار زیاد میکروفون شاتگان شوند. به دنبال کار اولسون و میسون، مدل دیگری از میکروفون شاتگان توسط کارنز پیشنهاد شد که مدل آن بر اساس ماتریس‌های انتقال لوله شاتگان است [۲]. پیشرفت‌های میکروفون تفنگ ساچمه‌ای در مقالات [۲] تا [۸]. خلاصه شده است. دیکس مدل شاتگان را بر اساس کارهای اولسون، میسون و کارن گسترش داد [۹]. [۱۰].

با وجود استفاده گسترده از میکروفون‌های شاتگان، از نظر جنبه‌های نظری موارد زیادی برای بررسی وجود دارد. به ویژه، پاسخ فرکانسی و جهت‌دهی پیش‌بینی شده توسط TWM قبلی می‌تواند به شدت با اندازه‌گیری‌های عملی در برخی موارد متفاوت باشد.

معادلات حاکم در مقاله، معادلات موج هلمهولتز در حوزه فرکانس هستند که در روابط حاکم در قسمت فرمول‌های استخراج شده قابل مشاهده می‌باشند. تغییرات هارمونیک در همه زمینه‌های مورد تحقیق و مطالعه، توسط  $e^{i\omega t}$  با استفاده از تبدیل  $i\omega$  ایجاد می‌شود.

علاوه بر وجود میکروفون‌ها بجای کپسول‌های گیرنده که باعث کاهش اثرات میدان امواج جانبی می‌شوند، وجود شبکه‌هایی با اندازه مشخص و در فواصل مشخص در سرتاسر شیلد آکوستیکی، نویزهای محیطی ناشی از گردو خاک و سایر موارد محیطی که می‌توانند باعث ایجاد نویز شوند، تا حد امکان منجر به کمتر شدن نویز در اصوات دریافتی خواهند شد. بنابراین این نوع میکروفون‌ها بصورت

دیجیتال و برنامه‌ریزی شده، نه تنها اثرات میدان امواج جانبی را کاهش می‌دهند، بلکه نویزهایی که امواج با جهت‌گیری مستقیم می‌توانند با خود به همراه داشته باشند را نیز کاهش می‌دهد.

## ۲- ارائه مدل ریاضی

با فرض اینکه موج ساطع شده از منبع ثابت  $(a(t))$  و موج ساطع شده از منبع دوم (تداخل  $(n(t))$ ) به میکروفون‌ها برخورد می‌کند، موج اول و تداخل بترتیب با تاخیر بیان شده در رابطه (۱) و رابطه (۲) به میکروفون دوم خواهد رسید.

$$T = \frac{d \times \cos(\beta_2)}{c} \quad (2) \quad \tau = \frac{d \times \cos(\beta_1)}{c} \quad (1)$$

که عبارت اول مربوط به موج اول و عبارت دوم مربوط به موج تداخل می‌باشد که بتا زاویه برخورد هر موج با محور مشترک میکروفون اول و دوم،  $d$  فاصله میکروفون اول و دوم و  $C$  سرعت صوت می‌باشد. امواج دریافتی توسط میکروفون‌ها بصورت رابطه (۳) و (۴) می‌باشند.

$$m_1 = a(t) + n(t) \quad (3)$$

$$m_2 = a(t - \tau) + n(t - T) \quad (4)$$

با تقسیم دو رابطه (۳) و (۴) و آرگومان‌گیری از عبارت بدست آمده در فضای فوریه، رابطه‌ای تحلیلی برای اختلاف فاز بدست خواهد آمد.

$$\text{angle}\left(\frac{m_1}{m_2}\right) = \text{angle}\left(\frac{a(t) + n(t)}{a(t)e^{-\tau} + n(t)e^{-T}}\right) \quad (5)$$

$$a(t) = Ae^{j\omega} \quad (6)$$

$$n(t) = Ne^{j\omega} \quad (7)$$

$$\Delta\phi = \text{angle}\left(\frac{Ae^{j\omega} + Ne^{j\omega}}{Ae^{j\omega} \times e^{-\tau} + Ne^{j\omega} \times e^{-T}}\right) \quad (8)$$

$$\Delta\phi = \text{angle}\left(\frac{A + N}{Ae^{-\tau} + Ne^{-T}}\right) \quad (9)$$

که  $A$  و  $N$  بترتیب دامنه موج ساطع شده از منبع اول و منبع دوم می‌باشند. حال با ارائه مدل ریاضی و همینطور اختلاف فاز در حالتی که تنها یک منبع موج وجود دارد، تحلیل و تجزیه نتایج بدست آمده توسط شبیه‌سازی بوسیله نرم‌افزار ارائه می‌شود.

مدل فیزیکی که بطور خلاصه در مقدمه توضیح داده شد، مطابق توضیحات آتی در نرم‌افزار پیاده‌سازی خواهد شد. فیزیک حاکم بر مسئله برای آکوستیک خطی که به واسطه متغیر عددی فشار تشریح شده است، با معادله موج هلمهولتز بصورت ریاضی مدل می‌شود (رابطه‌های (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)). فیزیک حاکم شامل شرایط بروی دامنه برای مدل‌سازی تلفات به روش همگن، مدل‌های سیال معادل، مواد متخلخل و همچنین تلفات در مناطق باریک (بطور مثال شکاف‌ها) است.

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (10)$$

$$k_{eq}^2 = \left( \frac{\omega}{c_c} \right)^2 \quad (12) \quad p_t = p + p_b \quad (11)$$

## ۳- مدل دوبعدی به همراه شیلد آکوستیکی

در این مدل اختلاف فاز و تاثیر میدان امواج روی نمونه دوبعدی به همراه شیلد آکوستیکی ارائه می‌شود.

## ۱-۳ پارامترها

موقعیت منبع دوم متغیر می‌باشد که مختصات افقی و عمودی برحسب شعاع ثابت (برابر با فاصله منبع موج اول از مبدا مختصات) و زاویه متغیر تغییر می‌کند. بدلیل اینکه زاویه متغیر می‌باشد، متغیری بنام زاویه در قسمت پارامترها ایجاد می‌شود و مقدار اولیه دلخواهی در قسمت پارامترها در نظر گرفته می‌شود تا بتوان مقادیر مختلفی را در قسمت حلگر به آن اختصاص داد. همچنین متغیر دیگری بنام فشار با مقدار اولیه دلخواه ایجاد می‌شود. پارامترهای استفاده‌شده در نرم‌افزار کامسول در جدول (۱) آورده شده‌است.

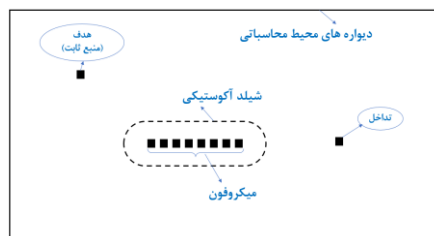
جدول ۱- پارامترهای ایجاد شده

مقدار	توضیحات	نام متغیر
100 Hz	100[Hz]	f
1 Pa	1[Pa]	P <sub>10</sub>
0.5236 rad	30[deg]	$\theta_{10}$
0.84853 m	84.8528137423857[cm]	r <sub>10</sub>
0.73485 m	r <sub>10</sub> × cos( $\theta_{10}$ )	x <sub>10</sub>
0.42426 m	r <sub>10</sub> × sin( $\theta_{10}$ )	y <sub>10</sub>

## ۲-۳ هندسه

نکته قابل ذکر تعدد وجود پروب‌ها بجای چهار پروب است. این کار بدلیل آن صورت گرفته تا در فرکانس‌های بالا حداقل دو پروبی که اختلاف فاز بین آنها محاسبه می‌شود در نیم‌فاز یکسانی قرار بگیرند تا اختلاف فاز آنها بدون تغییر علامت مشاهده و تحلیل گردد. مدل هندسی مطابق جدول (۱) در قسمت هندسه ایجاد می‌شود. مستطیل‌های نشان‌داده شده در شکل (۱) معرف میکروفون‌ها است که برای اندازه‌گیری فشار و فاز روی آن‌ها پروب قرار داده شده‌است. یک پروب نیز بعنوان منبع ثابت در سمت چپ و دیگری بعنوان تداخل در سمت راست قرار دارد. محیط محاسباتی اطراف به حدی بزرگ در نظر گرفته شده‌است که اثر Near field کاهش یافته و در واقع اثرات Far field بررسی شود. توری استفاده شده در شکل (۱) همان شیلد آکوستیکی در حالت دو بعد است. هر چه روزنه‌های استفاده‌شده در ساختار شیلد آکوستیکی کوچکتر باشد، به شکل یک فیلتر پایین‌گذر عمل کرده و فرکانس‌های بالاتر را تضعیف می‌نماید. لذت برای فرکانس‌های بالا به مانند موسیقی یا سیگنال صحبت، حتماً بایستی از شیلد آکوستیکی یا بسکت‌های با روزنه بزرگتر استفاده نمود تا حداقل تضعیف اتفاق بیفتد. ولی این اتفاق باعث افزایش ورودی گرد و خاک و همچنین اثر لایه‌های مرزی هوا روی سیگنال‌های خروجی میکروفون خواهد شد. بنابراین طراحی مناسب بگونه‌ای است که حداقل روزنه در فرکانس مورد نظر طراحی شود تا نه سیگنال تخریب شود و نه اثر جریان‌های جوی زیاد شود. مختصات این نقطه بصورت پارامتری وارد می‌شود که تابعی از شعاع (فاصله منبع موج اول از مبدا مختصات) و زاویه خواهد بود. در آخر شبکه‌هایی با اندازه ۳.۸ میلی‌متر و فاصله ۱۰.۵ میلی‌متر بعنوان شیلد آکوستیکی اضافه می‌شود.

ابعاد اختصاص داده شده مشابه ابعاد واقعی هستند. شکل (۲) هندسه مدل فوق را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- هندسه مدل

### ۳-۳ خواص مواد مورد استفاده

در قسمت مواد، هوا را به سطح مستطیل اختصاص داده و پروبها از جنس آلومینیوم با سرعت صوت ۶۳۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. شبکه‌های شیلد آکوستیکی از نوع ماده فرضی PVC در نظر گرفته می‌شود. امپدانس صوتی بدلیل خاصیت سینوسی صوت ظاهر می‌شود و برای هر ماده مقدار مشخصی دارد. این پارامتر در صوت‌شناسی اهمیت زیادی دارد. مقاومت صوتی یا امپدانس صوتی، از کمیت‌های فیزیکی است که در طراحی مبدل‌های فراصوتی، ارزیابی میزان جذب صوت در مواد و نیز در محاسبه طول امواج صوتی و بازتاب آن، مورد استفاده قرار می‌گیرد. امپدانس آکوستیکی در مواد از حاصل ضرب چگالی ماده در سرعت صوت ایجاد می‌شود. مقاومت صوتی ایجاد شده در هر ماده باعث می‌شود تا صوت منتشر شده به شکل متفاوتی به هرکدام از مواد موجود در شبیه‌سازی جذب شود. مثلاً مقاومت صوتی در هوا کمتر از مقاومت صوتی در آلومینیوم است که این امر باعث می‌شود که در شبیه‌سازی، موج به راحتی در هوا منتشر شود ولی مقداری از صوت منتشر شده در هنگام برخورد به آلومینیوم دفع می‌شود.

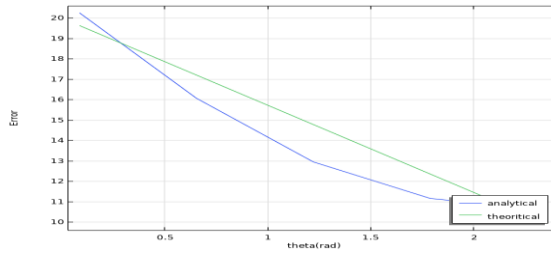
### ۳-۴ فیزیک و شرایط مرزی

- فشار منبع موج اول، مقدار دلخواه ۱ پاسکال بصورت تک قطبی در نظر گرفته می‌شود.
  - برای منبع موج دوم بدلیل متغیر بودن فشار آن (P10 موجود در پارامترها) بصورت تک قطبی در نظر گرفته می‌شود.
  - مرزهای بیرونی ناحیه شبیه‌سازی شده، اطراف شیلد آکوستیکی شرط مرزی PML (Perfectly matched layer) تخصیص داده‌شد. این شرط مرزی به این دلیل است که موج برخورد کرده با دیواره‌های میدان فشار شبیه‌سازی شده به داخل میدان برنگردد.
  - به شبکه‌های شیلد آکوستیکی شرایط مرزی دیواره سخت صوتی اختصاص داده می‌شود.
۱. رابطه (۱۰) بیانگر رابطه کلی حاکم بر فیزیک مسئله می‌باشد که تابعی از چگالی، منبع موج تک قطبی، منبع موج دوقطبی، فشار و عدد موج می‌باشد.
  ۲. فشار حاکم بر مسئله از دو بخش فشاری تعیین شده توسط اپراتور و فشار پس‌زمینه تشکیل می‌شود (رابطه (۱۱)). فشار پس‌زمینه تقریباً جزئی از شرایط اولیه بیان می‌شود مثلاً موج تعریف شده که از صفحه‌ای ساطع می‌شود.
  ۳. همینطور عدد موج بیانگر بسامد مکانی یک موج است که به صورت دور بر واحد طول یا رادیان بر واحد طول بیان می‌شود. به عبارت دیگر، عدد موج تعداد موج‌های موجود در واحد طول است. رابطه (۱۲) بیانگر رابطه عدد موج می‌باشد.
  ۴. در فیزیک مسئله یکی از شرایط مرزی که اختصاص داده شده، فشاری برابر ۱ پاسکال به منبع موج اول و عبارت P10 به منبع دوم است که برابر فشار کل رابطه (۱۰) می‌باشد.
  ۵. شرط مرزی دیواره سخت روی دیواره‌های میکروفون اعمال شده‌است، این شرط مرزی تضمین می‌کند که گرادیان فشار عمود بر دیواره صفر می‌باشد (رابطه (۱۳)).

$$-n \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right)_{up} = 0, \quad -n \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right)_{down} = 0 \quad (13)$$

### ۳-۵ تست اعتباردهی

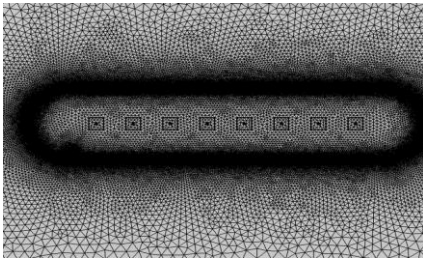
در حوزه فرکانس بدلیل تغییرات زیادی که در جبهه‌های موج ناهم‌فاز بخاطر فرکانس‌های متفاوتی که مطالعه می‌شود، وجود دارد. بنابراین از نمودار اختلاف فاز برحسب فرکانس نمی‌توان برای اعتباردهی مسئله بهره برد. اما اگر متغیر مستقل ما زاویه قرارگیری منبع موج باشد. می‌توان نمودار اختلاف فاز را همانند شکل (۲)، طبق فرمول مرجع و فشار نقاط که وابسته به مختصات قرارگیری منبع موج دوم هستند را برحسب زاویه قرارگیری منبع موج بدست آورد و دو نمودار بدست آمده را با هم مقایسه نمود تا اعتباردهی مسئله انجام شود. اعتباردهی در فشار ۱ پاسکال و فرکانس ۱۰۰ هرتز انجام شده‌است.



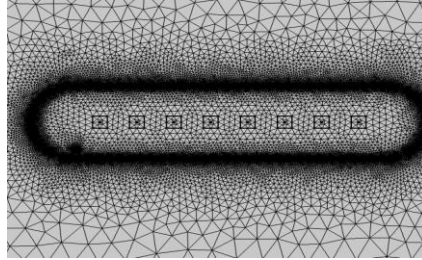
شکل ۲- اعتباردهی اختلاف فاز برحسب زاویه قرارگیری منبع موج دوم

### ۳-۶ تست استقلال از شبکه بندی

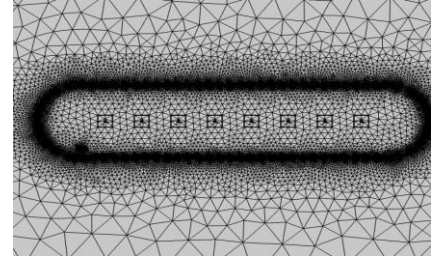
انتظار می رود در پدیده اختلاف فاز با تغییر شبکه بندی و کوچک تر کردن ابعاد شبکه بندی، تغییری رخ ندهد. زیرا اختلاف فاز نتیجه ای نسبی بوده و محاسبات عددی در آن تغییر زیادی ایجاد نمی کند. بنابراین برای آزمایش این مورد، دامنه فشار در فرکانس ۱۰۰ هرتز و سه حالت زیر شبیه سازی شده و اختلاف فاز آن ها بدست می آیند تا صحت این آزمایش بررسی شود. در شکل های (۳)، (۴) و (۵) که به شبکه بندی بصورت خودکار انجام شده و بترتیب شبکه ریزتر می شود و در عین حال اختلاف فاز تقریباً یکسان است. ابعاد شبکه بترتیب برابر است با:



شکل ۵- حالت سوم: (تعداد المان های تولید شده: ۹۹۰۳۶) با اختلاف فاز ۸.۷۱۵ رادیان



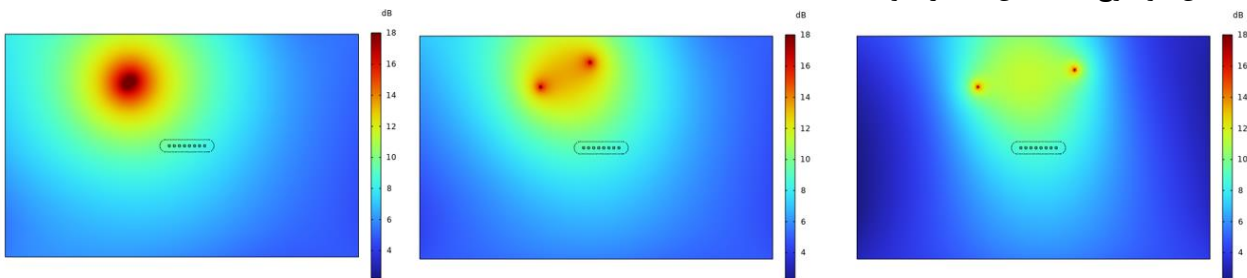
شکل ۴- حالت دوم: (تعداد المان های تولید شده: ۴۹۹۰۶) با اختلاف فاز ۸.۷۲۳ رادیان



شکل ۳- حالت اول: (تعداد المان های تولید شده: ۳۷۰۴۸) با اختلاف فاز ۸.۷۳ رادیان

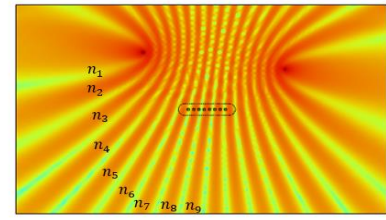
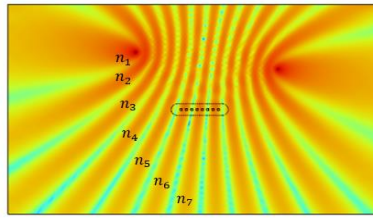
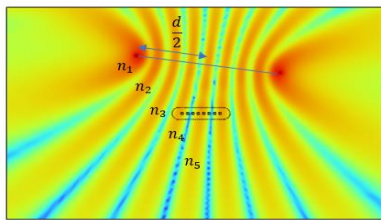
### ۳-۷ بررسی نتایج

برای سه حالت مختلف زاویه و فشار متغیر، فشار و فرکانس متغیر و زاویه و فرکانس متغیر مدل فوق مورد بررسی قرار می گیرد. شکل (۶) کانتور فشار ناشی از اثر برهم نهی دو موج را در فواصل مختلف از یکدیگر را در فرکانس ۱۰۰ هرتز نشان می دهد. از شکل سمت چپ به راست فاصله زیاد می شود. بعلاوه اینکه دو موج هم فاز و هم فرکانس هستند و همچنین فاصله دو موج بسیار کمتر از  $\frac{\lambda}{2}$ ، طول موج شبیه سازی می باشد، تمامی نقاط در محیط شبیه سازی شده، یا در نیم پیک مثبت و یا در نیم پیک منفی قرار دارد. به همین دلیل همواره در جهت تقویت همدیگر قرار دارند. با افزایش فاصله بین دو منبع، شدت امواج جمع شده کاهش پیدا می کند و با کاهش فاصله بین دو موج شدت آن بیشتر خواهد شد.



شکل ۶- کانتور فشار ناشی از اثر برهم نهی دو موج در فواصل مختلف

شکل (۷) توزیع میدان فشار در سه فرکانس مختلف را نمایش داده شده است. فرکانس هر شکل و همچنین نحوه محاسبه تعداد فرینج‌ها در زیر هر شکل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس به علت زیاد شدن تعداد قله‌ها و دره‌های موج ساطع شده از هر دو منبع، احتمال جاییکه دو منبع هم‌فرکانس در اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه قرار بگیرند بسیار بیشتر شده و در نتیجه فرینج‌های بیشتری تشکیل خواهد شد. لذا چنانچه از اشکال زیر دیده می‌شود، با افزایش فرکانس تعداد فرینج‌ها هم در راستای خط طولی منابع موج و ه مدر راستای عمود بر آن افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. براساس قاعده سرانگشتی، فاصله دو منبع تقسیم بر  $\frac{\lambda}{2}$ ، تعداد فرینج‌های نصف فاصله دو منبع را تخمین می‌زند.



$$\left\{ \begin{array}{l} f = 1100\text{Hz} \rightarrow \frac{\lambda}{2} = 15.45\text{cm} \Rightarrow \text{فرینج تعداد} = \frac{84\text{cm}}{15.45\text{cm}} = 5.43 \\ S_1 - S_2 = 84\text{cm} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f = 1500\text{Hz} \rightarrow \frac{\lambda}{2} = 11\text{cm} \Rightarrow \text{فرینج تعداد} = \frac{84\text{cm}}{11\text{cm}} = 7 \\ S_1 - S_2 = 84\text{cm} \end{array} \right.$$

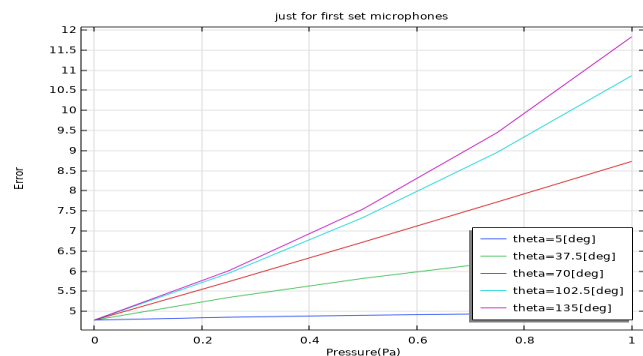
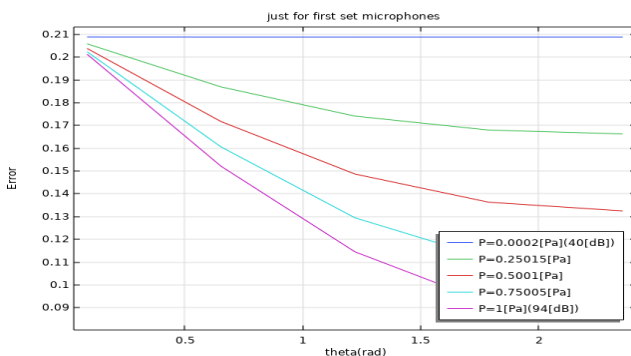
$$\left\{ \begin{array}{l} f = 2000\text{Hz} \rightarrow \frac{\lambda}{2} = 8\text{cm} \Rightarrow \text{فرینج تعداد} = \frac{84\text{cm}}{8\text{cm}} = 9.8 \\ S_1 - S_2 = 84\text{cm} \end{array} \right.$$

شکل ۷- توزیع میدان فشار در سه فرکانس مختلف

نمودار اختلاف فاز برای دو حالت تک منبع و دو منبع برحسب پارامترهای متغیر ایجاد شده است اما برای راحتی درک نمودار، نمودار بی‌بعد خطا ایجاد شده که بصورت رابطه (۱۴) می‌باشد.

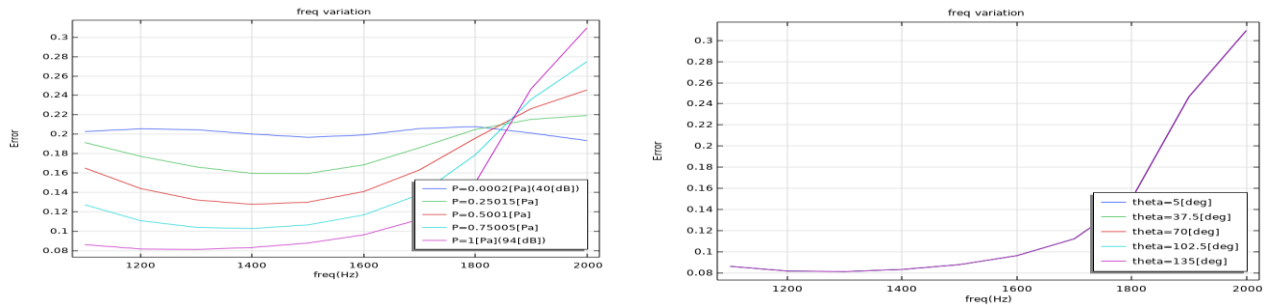
$$\text{Error} = \frac{|\Delta\phi_{\text{two-source}} - \Delta\phi_{\text{one-source}}|}{\Delta\phi_{\text{one-source}}}, \quad \Delta\phi_{\text{one-source}} = \frac{d \times \cos(\beta)}{c} \quad (14)$$

نمودار سمت راست در شکل (۸)، خطا بر حسب فشار تداخل را به ازای زاویه‌های ورود مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش فشار منبع موج دوم، در هر زاویه‌ای مقدار خطا بیشتر از حالت‌های دیگر خواهد بود و دلیل این امر آن است که فشاری با مقداری بزرگتر از فشار نقطه اول، اغتشاش زیادی در مجموعه ایجاد می‌کند که اختلاف فاز را به نسبت شدت تداخل تغییر می‌دهد. اما در مقادیر کمتر فشار، مقدار خطا کمتر است که بیانگر این می‌باشد که تاثیر شدت موج اول بیشتر از منبع دوم خواهد بود. در زاویه  $5^\circ$  درجه خطا بسیار کوچک و نزدیک به صفر می‌باشد. نمودار سمت چپ در شکل (۸)، خطا بر حسب زاویه ورود تداخل را به ازای فشار مختلف نشان می‌دهد. در فشار  $0.0002$  پاسکال، خطا تغییر زیادی ندارد و تقریباً مقدار ثابتی می‌باشد. دلیل این امر آن است که در فشار مذکور، منبع موج دوم تاثیر بسیار کمتری نسبت به منبع موج اول دارد. با کمتر شدن زاویه خطای نمودار بیشتر خواهد شد زیرا دو منبع موج از یکدیگر مجزا در نظر گرفته می‌شوند و میزان تغییرات خطا بیشتر می‌شود. در این نمودار مشاهده می‌شود که هرچه شدت منبع دوم کمتر باشد، تغییرات خطا کمتر خواهد بود. زیرا با کمتر شدن شدت منبع دوم، تاثیر آن بر مجموعه کمتر خواهد شد.



شکل ۸- خطای اختلاف فاز نسبت به مدل تک موج

شکل (۹) خطای اختلاف فاز نسبت به مدل تک موج را برحسب فرکانس نمایش می‌دهد. شکل سمت چپ خطا بر حسب فرکانس را بر ازای فشارهای مختلف و شکل سمت راست خطا برحسب فرکانس به ازای زوایای ورود تداخل مختلف نمایش می‌دهد. مطابق شکل فوق، وقتی منبع موج دومی به مدل اضافه شود در فرکانس‌های مختلف مدل رفتار غیرخطی و ناهمگونی از خود بجا می‌گذارد. اما با توجه به شکل سمت چپ می‌توان دریافت در فرکانس‌های مختلف با افزایش فشار منبع موج دوم، تغییرات خطا غیرخطی‌تر می‌شود. و در فرکانس‌های بالاتر خطا بیشتر می‌شود زیرا جبهه‌های موج تداخل بیشتری خواهند داشت. در فرکانس تقریبی ۱۸۵۰ هرتز تغییر در شدت منبع دوم، تأثیری بر روی خطا نخواهد داشت.



شکل ۹- خطای اختلاف فاز نسبت به مدل تک موج برحسب فرکانس

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله از میکروفون‌ها بجای کپسول‌های گیرنده به همراه شیلد آکوستیکی استفاده شده‌است که نه تنها بصورت دیجیتال و برنامه‌ریزی شده، منجر به کاهش اثرات میدان امواج جانبی می‌شوند بلکه نویزهایی که امواج با جهت‌گیری مستقیم می‌توانند با خود به‌همراه داشته‌باشند را نیز کاهش می‌دهند. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده شده‌است که در آن پس از شبیه‌سازی مدل فوق، با ساطع نمودن منابع موج (منبع اول در مختصات ثابت و منبع دوم با پارامترهای زاویه و شدت متغیر)، اختلاف فاز بین میکروفون‌ها محاسبه شده و با حالتی که صرفاً یک منبع موج در مختصات و شدت ثابت قرار دارد، مقایسه می‌شود. همچنین بررسی شده‌است که چه پارامتری و در چه صورتی منجر به اختلاف فاز غیرخطی شده و تا چه حدی میزان خطا کمتر می‌شود. علاوه بر آن زاویه و شدت منبع موج دومی که در آن اختلاف فاز غیرخطی می‌شود، بدست می‌آید. این شبیه‌سازی در نمونه دوبعدی به‌همراه شیلد آکوستیکی انجام گرفته‌است. در نهایت در فرکانس‌های مختلف نیز، تحلیل‌های بیان شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نمودار خطا برحسب زاویه قرارگیری و در فشارهای متفاوت منبع موج دوم، در محدوده فشاری ۰.۰۰۰۲ پاسکال تغییرات کمی در محدوده خطا مشاهده می‌شود. به این دلیل که فشار منبع موج دوم در این حالت بسیار کمتر از فشار منبع موج اول بوده و می‌توان از شیب تأثیرات آن در زوایای مختلف صرف‌نظر نمود و خطای میانگینی تقریباً برابر ۲۱ درصد برای این حالت در نظر گرفته می‌شود. اما با افزایش فشار، منبع موج دوم تأثیر بسزایی خواهد داشت. با توجه به نمودار خطا برحسب فشار منبع موج دوم و در زوایای مختلف، یکی از مناسب‌ترین زوایا برای قرارگیری منبع موج دوم زاویه‌ای است که اختلاف زاویه منبع اول با منبع دوم ۵ درجه باشد. در نمودار خطا برحسب فرکانس و در فشارهای مختلف، هرچه شدت منبع دوم کمتر باشد، با افزایش فرکانس می‌توان خطا را کنترل نمود و ثابت نگه داشت.

## مراجع

- [1]. <https://rode.com/en/headphones/over-ear/nth-100S>
- [2]. T. N. Carnes, D. D. Reynolds, E. L. Hixson, "Analytical modeling of wave interference directional microphones", *J. Eng. Ind.* 103, 361–371 (1981).
- [3]. W. P. Mason and R. N. Marshall, "A tubular directional microphone," *J. Acoust. Soc. Am.* 10, 206–215 (1939).



- [4].J. Eargle, *The Microphone Book*, Focal Press, Waltham, MA, 108–114 (2005).
- [5].H. F. Olson, “Line microphones,” *Proc. IRE* 27, 438–446 (1939).
- [6].H. F. Olson, “Directional microphones,” *J. Audio Eng. Soc.* 15, 420–430 (1967).
- [7].H. F. Olson, “The quest for directional microphones at RCA,” *J. Audio Eng. Soc.* 28, 776–786 (1980).
- [8].G. Ballou, J. Ciaudelli, V. Schmitt, *Electroacoustic Devices: Microphones and Loudspeakers*, Focal Press, Waltham, MA, 82–89, 2009.
- [9].G. R. Dix, *Development and comparison of highly directional loudspeakers*, M.S. thesis, Brigham Young University, Provo, UT, 2006.
- [10]. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications; Allan D Pierce; Boston University