



ISAV2022

دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱ تهران - ایران



شبیه سازی عددی اثر حفاظ فیزیکی بلیمپ روی اختلاف فاز سنسورهای آکوستیکی

سجاد فاخری کوزه کنان، لیلا محمودی*

ایران، تهران، نام شرکت آواسنجش ارس، ۵۴۴۱۷۶۴۳۷۷، Mahmoodi_leila@ee.sharif.edu

ایران، تهران، شرکت آواسنجش ارس، ۵۴۴۱۷۶۴۳۷۷، sajjadf79@gmail.com

*پست الکترونیکی: Mahmoodi_leila@ee.sharif.edu

چکیده

در مدل های متداول وجود کپسول های گیرنده کمک می کند که تاخیر فازی (بصورت آنالوگ و در فرکانس مشخص) در امواج وارده از جانب میکروفون ایجاد شود تا امواج وارد شده از دیواره های کناری ناهم فاز باشند و همدیگر را خنثی نمایند و تاثیر اصوات جانبی کاهش داده شود. اما هدف این مقاله این است که فرکانس هایی که در آن عملیات انجام می شود بوسیله اپراتور و در محدوده مطلوب وارد شوند. این کار با ایجاد کپسول های گیرنده قابل انجام نیست. میکروفون هایی بجای کپسول های گیرنده قرار داده می شود تا بصورت دیجیتالی عملیات اجرا شود و از طریق اپراتور فرکانس های مطلوب مشخص شود.

در این مقاله فرکانس و پاسخ های جهتی میکروفون های داخل حفاظ توسط پدیده های موج ایستاده و تداخل مورد بررسی قرار می گیرد. با ساطع کردن موج از منبع موج که در مختصات های مختلف قرار داده شده است، اختلاف فاز بین میکروفون ها را مشاهده نموده و نتایج آن با رابطه مرجع مقایسه می شود. همچنین پارامترهای موثر در ایجاد اختلاف فاز غیرخطی را مورد بررسی قرار داده، سپس فرکانسی که در آن اختلاف فاز غیرخطی می شود، بدست می آید. علاوه بر اختلاف فاز، تحلیل و تجزیه اختلاف دامنه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی انجام شده در این مقاله در نمونه سه بعدی به همراه بلیمپ صورت گرفته است. با توجه به نتایج دریافتی مشاهده می شود که اختلاف دامنه بدلیل افزایش طول موج در نتیجه افزایش فرکانس فقط در فرکانس های کمتر قابل اعتماد می باشد. همینطور اختلاف فاز بدلیل تغییر سریع جبهه موج در فازهای مخالف و در فرکانس های بالا، دارای خطای زیادی می باشد که این امر با کوتاه تر کردن فاصله دومیکروفون قابل بهبود است.

کلمات کلیدی: میکروفون شاتگان؛ بلیمپ؛ اختلاف فاز؛ فشار صوتی؛ دامنه فشار صوتی

۱. مقدمه

از نظر ظاهری میکروفون های شاتگان به شکل استوانه های بلند با شکاف هایی در اطراف بدنه با پراکندگی منظم می باشند. در نزدیکی انتهای استوانه، کپسول گیرنده صدا قرار گرفته است. صدا از سمت روبرو وارد استوانه شده و به کپسول گیرنده می رسد. در عین حال، صدایی که از سمت مجاور و از طریق شکاف های بدنه وارد میکروفون می شوند 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 نشانه روی 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، جهت‌دار بودن آنها بیشتر است.

در این مقاله فرکانس و پاسخ‌های جهتی میکروفون‌های شاتگان توسط پدیده‌های موج ایستاده و تداخل بررسی می‌شود. 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 انجام می‌شود. رویدادهای ورزشی با سطح نویز محیطی بالا ممکن است به میکروفون‌های با جهت‌گیری قوی نیاز داشته باشند. (۱)

ساختار عمومی یک میکروفون شاتگان شامل یک لوله با شکاف‌های از پیش طراحی شده 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 می‌شود. در مدل آنها، میدان بیرونی به عنوان امواج صفحه ورودی و میدان داخلی به عنوان امواج صفحه محرک مدل‌سازی می‌شود. به‌طور 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 است، 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. به‌دنبال 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 رابطه‌های حاکم در قسمت رابطه‌های استخراج شده قابل مشاهده می‌باشند. تغییرات هارمونیک در همه زمینه‌های مورد تحقیق و مطالعه، توسط $e^{i\omega t}$ با استفاده از تبدیل iw 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 بلیمپ نویزهای محیطی ناشی از گردوخاک و سایر موارد محیطی که می‌توانند باعث ایجاد نویز شوند، باعث کمتر شدن نویز در اصوات دریافتی تا حد امکان خواهند شد. بنابراین این نوع میکروفون‌ها به همراه بلیمپ نه تنها بصورت دیجیتال و برنامه‌ریزی شده اثرات میدان امواج جانبی را کاهش می‌دهند، بلکه نویزهایی که امواج با جهت‌گیری مستقیم می‌توانند با خود به‌همراه داشته‌باشند را نیز کاهش می‌دهد.

سعی بر آن است که با ساطع کردن موج از منبع که در مختصات‌های مختلف قرار داده خواهد شد، اختلاف فاز بین میکروفون‌ها مشاهده گردد و با رابطه مرجعی که در ادامه خواهد آمد مقایسه شود. همچنین مشاهده خواهد شد که چه پارامتری و در

چه صورتی باعث می شود که اختلاف فاز غیرخطی شود. همچنین فرکانسی که در آن اختلاف فاز غیرخطی می شود، بدست خواهد آمد. از پارامترهای دیگری که نیاز است مورد بررسی قرار گیرد آن است که تغییر اندازه شبکه بندی در نتایج اختلاف فاز تاثیر گذار است یا خیر. علاوه بر اختلاف فاز، تحلیل و تجزیه اختلاف دامنه نیز بررسی خواهد شد. این شبیه سازی در نمونه سه بعدی به همراه بلیمپ صورت خواهد گرفت.

۲. مدل های فیزیکی مسئله

فیزیک حاکم بر مسئله برای آکوستیک خطی که به واسطه متغیر عددی فشار تشریح شده است با معادله موج هلمهولتز بصورت ریاضی مدل می شود (رابطه های (۱)، (۲)، (۳)). فیزیک حاکم شامل شرایط بر روی دامنه برای مدل سازی تلفات به روش همگن، مدل های سیال معادل، مواد متخلخل و همچنین تلفات در مناطق باریک (بطور مثال شکاف ها) است.

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

$$p_t = p + p_b \quad (2)$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2 \quad (3)$$

برای مشاهده نتایج اختلاف فاز و اختلاف دامنه و تحلیل آن ها نیاز به مدل سازی ریاضی موارد مربوطه است که رابطه های مربوط به این مدل سازی رابطه های (۴)، (۵)، (۶) می باشند. همچنین نحوه ایجاد این رابطه ها در نرم افزار کامسول در شکل های (۳) و (۴) قابل مشاهده می باشد.

$$\Delta \phi = \frac{d \times \cos \beta}{c} \quad (4)$$

$$\Delta \phi_{actual} = \theta_2 - \theta_1 = \arg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (5)$$

$$\Delta \phi_{real} = \frac{(d_2 - d_1) \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y_{source} - \frac{y_2 + y_1}{2}}{\frac{x_2 + x_1}{2} - x_s} \right) \right)}{c} \quad (6)$$

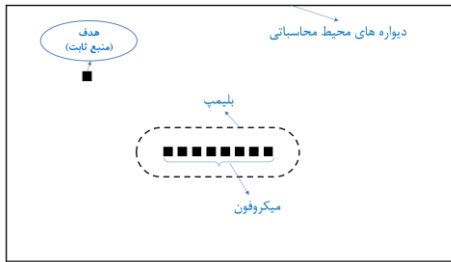
۳. مدل سه بعدی به همراه بلیمپ

در این مدل سعی بر آن است تا اختلاف فاز و تاثیر میدان موج بر روی نمونه سه بعدی به همراه بلیمپ را بررسی نمود.

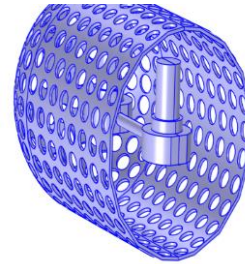
۱-۳ هندسه

بدلیل سنگین بودن حجم محاسبات تنها دو میکروفون مدل سازی خواهد شد و همچنین تحلیل بصورت متقارن انجام خواهد گرفت. زیرا اگر بلیمپ و میکروفون ها بصورت کامل وارد شبیه سازی شوند، حجم محاسبات سنگین خواهد شد در صورتیکه نیازی به اینکار بدلیل تقارن نیست. در ابتدا دو میکروفون با پایه های آنها در سالی دور کس مدل سازی می شوند. بدلیل تقارن، مانند شکل ۱ تنها نصف مدل سازی خواهد شد. اگر میکروفون ها جدا و پایه ها بصورت جداگانه مدل شوند و بر روی هم مونتاژ گردند، صفحه ای در محل نشیمنگاه میکروفون بر روی پایه، بین میکروفون و پایه ایجاد خواهد شد که شبکه بندی را مختل می کند. البته این امر با تغییر حالت

هندسه از *from union* به *from assembly* رفع شدنی است اما فیزیک مسئله و شرایط مرزی را مختل خواهد کرد. سپس بلیمپ به همراه شبکه‌های روی آن مدل‌سازی می‌شود. بعد از مدل‌سازی میکروفون‌ها بر روی پایه‌هایشان و همین‌طور بلیمپ و وارد کردن آن‌ها به قسمت هندسه کامسول، نیمکره‌ای با شعاع ۱ سانتی‌متر بعنوان منبع موج در هندسه ایجاد می‌شود. همچنین مکعب مستطیلی با ابعاد (۱۲۰ و ۱۲۰ و ۱۵۰) متر بعنوان محیط اطراف ایجاد می‌شود و بدلیل تقارن نصف می‌گردد. ابعاد مکعب مستطیل حائز اهمیت می‌باشد. زیرا با آزمایش ابعاد مختلف، خطای اختلاف فاز بیشتر از حالت بهینه خواهد بود (شکل ۲).



شکل ۲- هندسه کامل



شکل ۱- هندسه مدل

رابطه‌های اختلاف دامنه شکل کلی بصورت رابطه (۷) خواهند داشت.

$$\Delta A = 20 \log(P_2) - 20 \log(P_1) \quad (7)$$

۲-۳ خواص مواد مورد استفاده

در قسمت مواد، هوا را به دامنه‌های مکعب مستطیل و نیم‌کره اختصاص داده و میکروفون‌ها از جنس آلومینیوم با سرعت صوت ۶۳۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. به بلیمپ ماده فرضی PVC اختصاص داده 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 در ماده مورد نظر ایجاد می‌شود. و این مقاومت صوتی ایجاد شده در هر ماده باعث می‌شود تا صوت منتشر شده به شکل متفاوتی به هر کدام از مواد موجود در شبیه‌سازی ما جذب شود. مثلاً مقاومت صوتی در هوا کمتر از مقاومت صوتی در آلومینیوم است که این امر باعث می‌شود که در شبیه‌سازی ما موج به راحتی در هوا منتشر شود ولی مقداری از صوت منتشر شده در هنگام برخورد به آلومینیوم دفع شود.

۳-۳ فیزیک و شرایط مرزی

- فشار منبع موج اول، مقدار دلخواه ۱ پاسکال بصورت تک قطبی در نظر گرفته می‌شود.
- به مرزهای بیرونی ناحیه شبیه‌سازی شده شرط مرزی PML (Perfectly matched layer) تخصیص داده شده است. این شرط مرزی به این دلیل است که موج برخورد کرده با دیواره‌های میدان فشار، به داخل میدان برنگردد.
- بدلیل وجود تقارن شرط مرزی تقارن به تمام مرزهای صفحه تقارن اختصاص می‌یابد.
- به بلیمپ و دیواره شبکه‌های آن شرایط مرزی دیواره سخت صوتی تخصیص داده می‌شود.

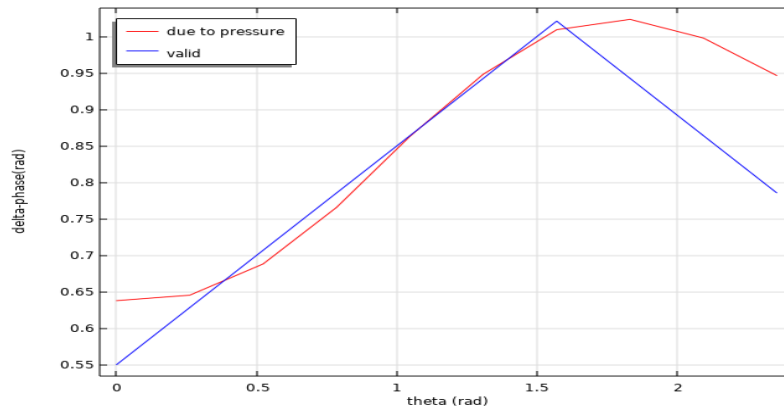
۱. رابطه (۱) بیانگر رابطه کلی حاکم بر فیزیک مسئله می باشد که تابعی از چگالی، منبع موج تک قطبی، منبع موج دوقطبی، فشار و عدد موج می باشد.
۲. فشار حاکم بر مسئله از دو بخش فشاری که اپراتور تعیین می کند و فشار پس زمینه تشکیل می شود (رابطه (۲)). فشار پس زمینه تقریباً جزئی از شرایط اولیه بیان می شود مثلاً موج تعریف شده که از صفحه ای ساطع می شود.
۳. همینطور عدد موج بیانگر بسامد مکانی یک موج است که به صورت دور بر واحد طول یا رادیان بر واحد طول بیان می شود. به عبارت دیگر، عدد موج تعداد موج های موجود در واحد طول است. رابطه (۳) بیانگر رابطه عدد موج می باشد.
۴. در فیزیک مسئله یکی از شرایط مرزی که اختصاص داده شده، فشاری برابر ا پاسکال روی سطح نیم کره است که برابر فشار کل رابطه (۱) می باشد.
۵. شرط مرزی دیواره سخت روی دیواره های میکروفون اعمال شده است، این شرط مرزی تضمین می کند که گرادیان فشار عمود بر دیواره صفر می باشد (رابطه (۸)).

$$-n. \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right)_{up} = 0$$

$$-n. \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right)_{down} = 0$$
(۸)

۴-۳ تست اعتباردهی

در حوزه فرکانس بدلیل تغییرات زیادی که در جبهه های موج ناهم فاز بخاطر فرکانس های متفاوتی که مطالعه می شود، وجود دارد. بنابراین از نمودار اختلاف فاز برحسب فرکانس نمی توان برای اعتباردهی مسئله بهره برد. اما اگر متغیر مستقل زاویه قرارگیری منبع موج باشد. می توان نمودار اختلاف فاز را همانند شکل ۳، طبق فرمول مرجع و فشار نقاط که وابسته به مختصات قرارگیری منبع موج هستند را برحسب زاویه قرارگیری منبع موج بدست آورد و دو نمودار بدست آمده را با هم مقایسه نمود تا اعتباردهی مسئله انجام شود.

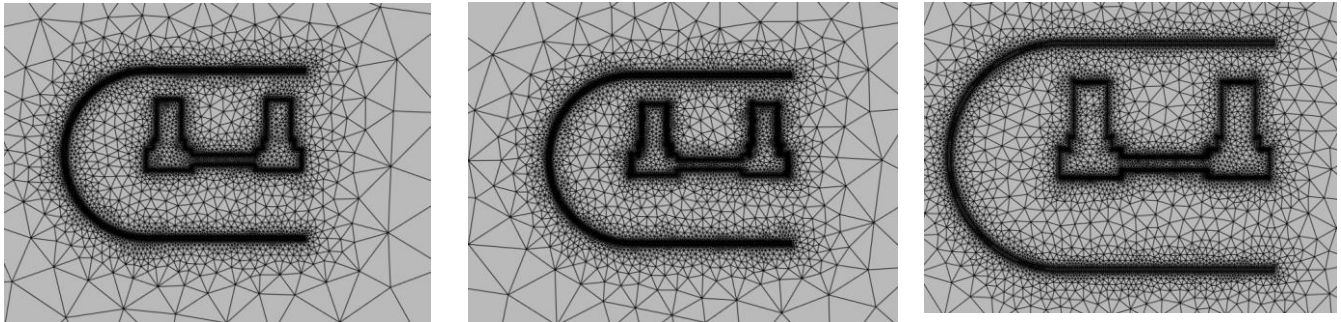


شکل ۳- اعتباردهی اختلاف فاز برحسب زاویه قرارگیری منبع موج

۵-۳ 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 ۵۰۰ 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 ۴، ۵ و ۶ بترتیب شبکه ریزتر شده و در عین حال اختلاف فاز تقریباً یکسان است. ابعاد شبکه بترتیب برابر است با:

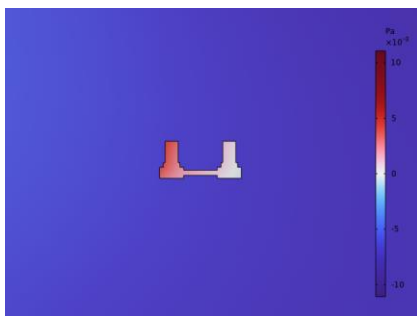
- شبکه‌بندی با ابعاد اولیه (تعداد المان‌های تولید شده: ۱۰۶۶۳۴۷، شکل ۴)
- ابعاد قسمت شبکه‌بندی سه‌گوش آزاد نصف می‌شوند. (تعداد المان‌های تولید شده: ۱۲۸۸۲۰۲، شکل ۵)
- ابعاد قسمت شبکه‌بندی mapped نصف می‌شوند. (تعداد المان‌های تولید شده: ۱۴۸۱۳۶۶، شکل ۶)



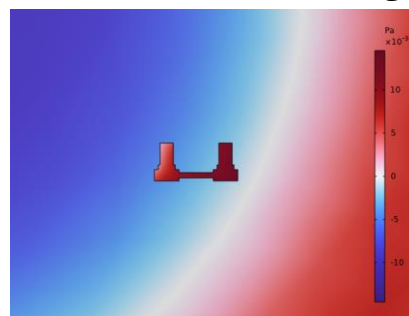
شکل ۴- حالت اول با اختلاف فاز ۰.۶۷۱۲ شکل ۵- حالت دوم با اختلاف فاز ۰.۶۶۹۵ شکل ۶- حالت سوم با اختلاف فاز ۰.۶۶۵۴ رادیان

۳-۶ بررسی نتایج

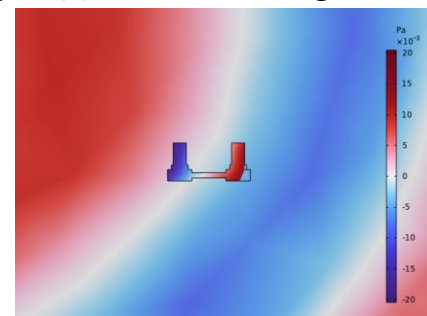
در این بخش، به بررسی نتایج شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. شکل (۷) تا (۹) کانتور فشار را بترتیب در ۱۰۰۰ هرتز، ۵۰۰ هرتز و ۱۰۰ هرتز نمایش می‌دهد. همچنین در شکل‌های (۱۰) الی (۱۲) کانتورهای دامنه در فرکانس‌های فوق نمایش داده شده‌است. در این شکل‌ها موج از قسمت بالا و سمت چپ ساطع می‌شود.



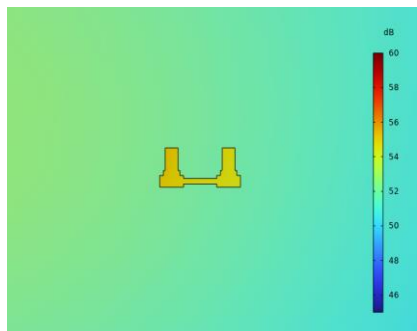
شکل ۹- کانتور فشار در ۱۰۰ هرتز



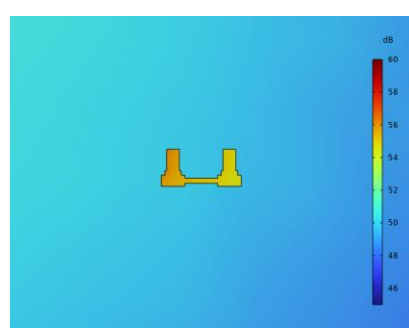
شکل ۸- کانتور فشار در ۵۰۰ هرتز



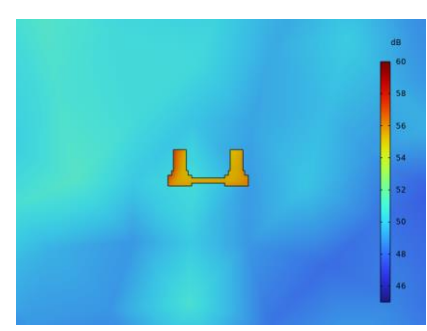
شکل ۷- کانتور فشار در ۱۰۰۰ هرتز



شکل ۱۲- کانتور دامنه فشار در ۱۰۰ هرتز

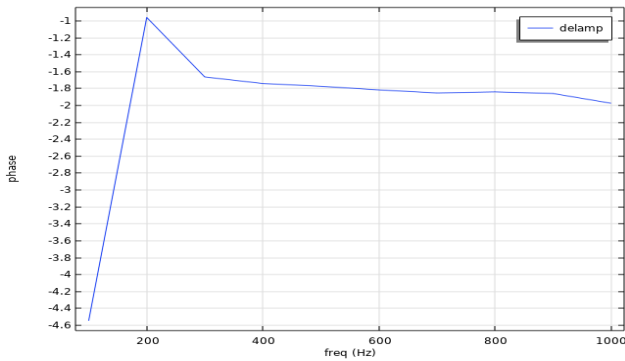


شکل ۱۱- کانتور دامنه فشار در ۵۰۰ هرتز

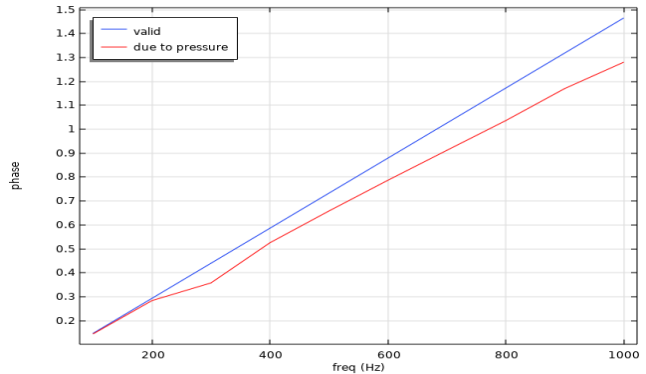


شکل ۱۰- کانتور دامنه فشار در ۱۰۰۰ هرتز

با توجه به شکل‌های فوق، در فرکانس‌های بالا بدلیل طول موج کوتاه‌تر جبهه موج سریع‌تر از نیم‌فاز مثبت به نیم‌فاز منفی تغییر پیدا می‌کند و این یکی از عوامل ایجاد خطا در نمودار اختلاف دامنه می‌باشد که با کوتاه‌تر کردن فاصله میکروفون‌ها حل شدنی است. اما مدل از ابعاد واقعی خارج می‌شود. در نمودار (۱) اختلاف فاز برحسب فشار نقاط و در نمودار (۲) اختلاف فاز برحسب رابطه مرجع را خواهیم داشت. در فرکانس‌های بالا نقاطی روی میکروفون‌ها که محاسبه بر روی آنها انجام می‌شود، در دو جبهه موج با فازهای مخالف قرار می‌گیرند.



نمودار ۲- اختلاف دامنه

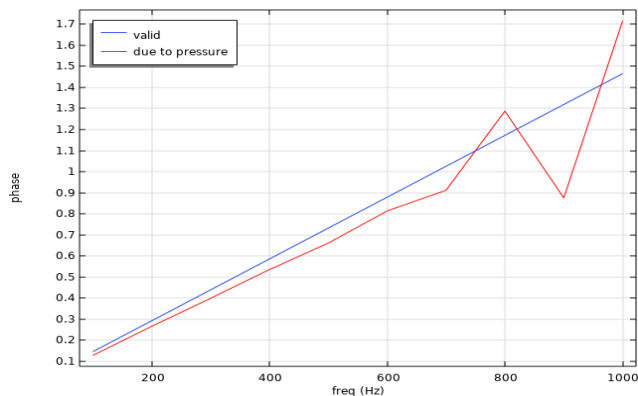


نمودار ۱- اختلاف فاز

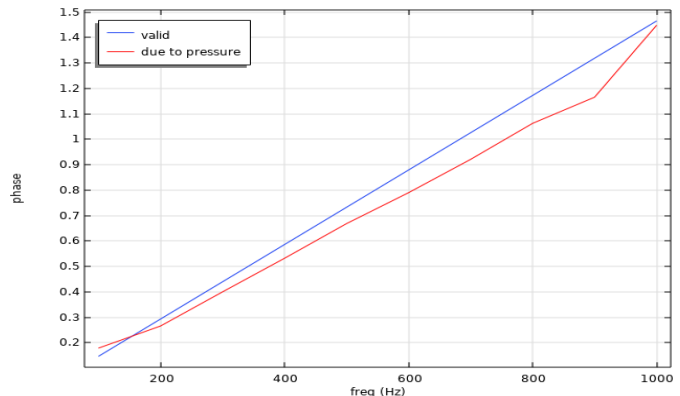
نمودار اختلاف فاز خطای قابل توجهی دارد که احتمال می‌رود بدلیل امپدانس موجود در بلیمپ (که جبهه‌های موج را ناهمگون می‌سازد.) و همینطور فاصله کوتاه بین هر جبهه موج بدلیل کاهش طول موج باشد.

شبیه‌سازی و تحلیل در حوزه فرکانس، باعث می‌شود که در فرکانس‌های متوسط و بالا، بدلیل کاهش طول موج که در نتیجه افزایش فرکانس می‌باشد، میکروفون‌های پشت سر هم در نیم‌فازهای متفاوت و علامت‌های مختلف قرار می‌گیرند. و در هنگام محاسبه اختلاف فاز و اختلاف دامنه، در قله و دره‌هایی قرار می‌گیریم که باعث متفاوت شدن علامت فشار می‌شود، که این امر یک خطای اولیه‌ای را در محاسبات و در اختلاف دامنه و فاز ایجاد می‌کند. در مدل دوبعدی این مشکل با بیشتر نمودن تعداد میکروفون‌ها که در نتیجه فاصله بین دو میکروفون پشت سر هم کمتر می‌شود، این خطا قابل رفع خواهد بود. اما در مدل سه‌بعدی که تعداد میکروفون‌ها واقعی می‌باشد، این خطا همچنان وجود دارد. اما به احتمال قوی در شبیه‌سازی در حوزه زمان بدلیل اینکه دیگر وابسته به فرکانس نیست، این مشکل حل خواهد شد. و حتی می‌توان در مدل سه‌بعدی نیز بصورت واقعی تعداد میکروفون‌ها را چهار عدد فرض نمود.

یکی از پارامترهایی که می‌خواهیم مشاهده نماییم به چه اندازه در خطای نمودار اختلاف فاز تاثیر گذار است، ابعاد صفحه PML می‌باشد. بنابراین ابعاد مکعب مستطیل را بیشتر از مقدار بهینه قرار می‌دهیم که ببینیم که آیا دلیل خطا ابعاد مکعب مستطیل است یا خیر.



نمودار ۴- اختلاف فاز برای ابعاد (۳۰۰، ۲۷۰، ۲۷۰)



نمودار ۳- اختلاف فاز برای ابعاد (۲۳۰، ۲۰۰، ۲۰۰)

طبق نمودارهای بالا صفحات PML تاثیر به سزایی در خطا ندارند. اما می‌توان میزان اندکی خطا را بهبود بخشید. همانطور که از نمودارهای بالا استخراج می‌شود، ابعاد (۲۳۰ و ۲۰۰ و ۲۰۰) حالت بهینه برای زمانی هستند که منبع موج ما در مختصات (۳۰ و ۵۰) قرار دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله فرکانس و پاسخ‌های جهتی میکروفون‌های داخل حفاظ توسط پدیده‌های موج ایستاده و تداخل مورد بررسی قرار می‌گیرد. با ساطع کردن موج از منبع موج که در مختصات‌های مختلف قرار داده شده‌است، اختلاف فاز بین میکروفون‌ها را مشاهده نموده و نتایج آن با رابطه مرجع مقایسه می‌شود. همچنین پارامترهای موثر در ایجاد اختلاف فاز غیرخطی را مورد بررسی قرار داده، سپس فرکانسی که در آن اختلاف فاز غیرخطی می‌شود، بدست می‌آید. پارامترهای دیگری که آزمایش شده‌است، آن است که تغییر اندازه شبکه‌بندی در نتایج اختلاف فاز تاثیرگذار است یا خیر. علاوه بر اختلاف فاز، تحلیل و تجزیه اختلاف دامنه نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. شبیه‌سازی انجام‌شده در این مقاله در نمونه سه‌بعدی به همراه بلیمپ صورت گرفته‌است. اختلاف فاز مرجعی که با آن اختلاف فاز ناشی از شبیه‌سازی و به کمک فشار نقاط یا سطوح روی میکروفون‌ها مقایسه می‌شود، از رابطه اختلاف فاز در صوت‌شناسی بدست می‌آید.

با توجه به نتایج، نمودار اختلاف دامنه بدلیل افزایش طول موج در نتیجه افزایش فرکانس فقط در فرکانس‌های کمتر قابل اعتماد می‌باشد. همینطور نمودار اختلاف فاز بدلیل تغییر سریع جبهه موج در فازهای مخالف و در فرکانس‌های بالا، دارای خطای زیادی می‌باشد که این امر با کوتاه‌تر کردن فاصله دومیکروفون قابل بهبود است اما شبیه‌سازی از ابعاد واقعی فاصله خواهد گرفت. این امر بدلیل شبیه‌سازی در حوزه فرکانس می‌باشد که با تغییر فرکانس طول موج نیز تغییر نموده و خطا افزایش می‌یابد. اما اگر شبیه‌سازی ما در حوزه زمان صورت بگیرد، زمان پارامتر تغییر کننده در شبیه‌سازی خواهد بود و در نتیجه میتوان تغییر فرکانس را با خطای بهینه کنترل نمود.

مراجع

1. <https://rode.com/en/headphones/over-ear/nth-100S>
2. T. N. Carnes, D. D. Reynolds, and 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, 2005), pp.108–114.
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, and V. Schmitt, Electroacoustic Devices: Microphones and Loudspeakers (Focal Press, Waltham, MA, 2009), pp. 82–89.
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