

مطالعه و بهینه سازی عملکرد بومر الکترومغناطیسی

محمدرضا کازرانی وحدانی^{۱*}، محمدرضا شمس^۲، رضا مردانی^۳

kazerani@mut.ac.ir

mrshams@mut.ac.ir

mardani_r@mut.ac.ir

^{۱*} نویسنده مسئول، دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶

چکیده

در این مقاله عملکرد و مشخصات ارتعاشی یک بومر الکترومغناطیسی به عنوان یک منبع تولید کننده امواج آکوستیکی پرتوان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. سیستم مورد بررسی از یک سیم پیچ نواری ۴۵ دوره ای با دو دیافراگم دایره ای به قطر ۵۰۸ میلی متر و ضخامت ۱۲/۷ میلی متر تشکیل شده که از اطراف توسط ۶ فنر مقید شده است. به این منظور کارکرد بومر به کمک روابط حاکم بر ارتعاشات دیافراگم، جریان های گردابی و اثرات متقابل آن ها فرمول بندی شد. از آن جا که حل این معادلات به روش تحلیلی دشوار می باشد، از روش المان محدود برای حل همزمان این معادلات استفاده شد. نتایج نشان دهنده آن است که با افزایش ضخامت دیافراگم از ۵ تا ۱۸ میلی متر، دامنه جابه جایی دیافراگم در ابتدا به سرعت افزایش می یابد اما با افزایش ضخامت به تدریج به یک مقدار ثابت در ۱۸ میلی متر میل می کند. همزمان فرکانس جابه جایی دیافراگم با افزایش ضخامت، از ۲۲ تا ۱۴ هرتز کاهش می یابد. از سوی دیگر بررسی ها نشان می دهند در صورتی که ثابت فنرها با نسبت مشابهی و به طور همزمان با افزایش ضخامت دیافراگم افزایش یابد، جابجایی دیافراگم با ضخامت ۹ میلی متر یک مقدار بیشینه خواهد داشت. بررسی جنس دیافراگم همچنین نشان می دهد که دامنه جابه جایی دیافراگم آلومینیوم به سبب چگالی کمتر و ضریب رسانندگی بالاتر در مقایسه با سایر فلزات به طور قابل توجهی بیشتر می باشد.

واژه های کلیدی: بومر الکترومغناطیسی، امواج آکوستیکی پرتوان، سیم پیچ نواری، روش المان محدود

۱. مقدمه

از امواج آکوستیکی پرتوان که توانایی بسیار بالایی در نفوذ به بستر دریا را دارند، برای شناسایی منابع نفت و گاز در زیر بستر دریا از استفاده می‌شود. برای تولید این امواج از روش‌ها و تجهیزات مختلفی استفاده می‌شود. از جمله این تجهیزات می‌توان به خرج‌های انفجاری، تفنگ‌های صوتی، اسپارک گپ‌ها و بومرها اشاره کرد.

استفاده از مواد منفجره به منظور ایجاد شوک صوتی در آب اولین بار توسط بلوچمن در سال ۱۸۹۸ گزارش شد [۱]. اما به طور گسترده توسط ژئوفیزیکدانان شناخته نشده بود. محققان در موسسه اقیانوس شناسی وود هول^۱ از این روش به ویژه برای اکتشاف مکان آتشفشان‌های فعال زیر دریا و کوه‌های دریایی که به راحتی یافت نمی‌شوند استفاده کردند. سپس در بازه جنگ جهانی دوم، برای نخستین بار به منظور تولید امواج آکوستیکی پرتوان در زیر آب از اسپارک گپ^۲ (جرقه زن) استفاده شد. امروزه از این سیستم در سونار، ارتباطات زیر آب و در برخی موارد تحقیقات علمی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

پس از آن و در سال‌های بعد از جنگ جهانی دوم از تفنگ‌های صوتی به منظور تولید امواج آکوستیکی پرتوان استفاده شد. تفنگ‌های صوتی با آزاد کردن ناگهانی حجم زیادی از گازهای فشرده شده در آب کار می‌کنند. عملکرد تفنگ صوتی نخستین بار توسط زیلکوفسکی^۳ در سال ۱۹۷۰ مورد بررسی قرار گرفت. سپس در سال ۲۰۰۰ با ایجاد به روز رسانی بر روی نمونه اولیه در صنعت نظامی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در سال‌های اخیر از تفنگ‌های صوتی استفاده گسترده‌ای به منظور اکتشافات دریایی شده است [۳].

یکی دیگر از ابزارهای تولید امواج آکوستیکی پرتوان بومر الکترومغناطیسی می‌باشد. در بومرها با القای الکترومغناطیس و ایجاد ناگهانی جریان گردابی بر روی یک صفحه دایره‌ای فلزی (دیافراگم)، یک شوک صوتی در محیط آب ایجاد می‌شود. از میان روش‌های بیان شده بومر دارای خصوصیات منحصر به فردی همچون قابلیت کنترل پذیری توان شوک صوتی تولید شده می‌باشد.

نخستین مدل تجربی بومر سال ۱۹۶۱ در موسسه اقیانوس شناسی وود هول معرفی شد [۴]. در این مدل یک دیافراگم با ضخامت ۶٫۳۵ میلی‌متر و قطر ۴۵۲ میلی‌متر به موازات یک سیم پیچ با تعداد ۴۵ دور قرار دارد.

در آزمایش‌های متعدد صورت گرفته مشاهده شد که تولید شوک صوتی سبب ایجاد پدیده حفره‌زایی^۴ در آب شده [۴] که در طول زمان باعث خوردگی دیافراگم می‌شود. به منظور جلوگیری از خوردگی ناشی از کاویتاسیون سوراخی در مرکز دیافراگم تعبیه شد و به منظور جلوگیری از تغییر حالت دیافراگم، ضخامت آن به ۱۲/۷ میلی‌متر افزایش و توسط ۱۲ فتر مقید شد [۴].

سیمپکین^۵ و همکاران توانستند با طراحی یک بومر که دیافراگم آن توسط یک بفلد دایره ای که از کنارها مقید شده بود، به عمق ۲۰۰ متری در رسوبات نرم نفوذ کرده و به کیفیت قابل قبولی از نظر وضوح و کاهش نویز دست یابند [۵].

چندین سال بعد به منظور بررسی مجموعه آتشفشانی در ساحل خلیج ناپل، جی آیلو^۶ و همکارانش از یک آرایه یدک شونده بومر با طول پالسی برابر با ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌ثانیه برای اکتشاف در آب‌های بسیار کم عمق استفاده کردند [۶].

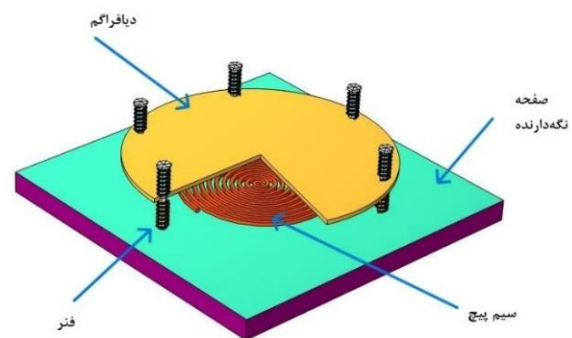
در سال ۲۰۱۹ پرادو^۷ و همکارانش به منظور بررسی بستر رودخانه آمازون در منطقه‌ای در شمال برزیل، از یک بومر ساخته شده توسط شرکت SIG با توان ۳۰۰ ژول و فرکانس غالب ۱/۲ کیلوهرتز استفاده کردند [۷]. بومر مورد استفاده در ابعاد ۳۸۰×۳۸۰ میلی‌متر و سطح منبع^۸ ۲۲۰ دسی بل می‌باشد. عرض پالس تولید شده توسط این مدل ۰/۱۲ تا ۰/۱۵ میلی‌ثانیه و ولتاژ مورد نیاز برای شارژ بانک خازنی آن ۴ کیلو ولت بوده است.

در سال ۲۰۲۳ گروه شنژن^۹ با کالیبره کردن بومر در یک حوضچه بدون پژواک توانستند مبنای قابل اعتمادی برای تعیین پارامترهای پس از پردازش فراهم کنند. این نمونه ساخته شده بر خلاف نمونه‌های قبل قابلیت تنظیم عمق برای کاربر را مهیا میکرد [۸].

هدف این مقاله تحلیل عملکرد یک بومر الکترومغناطیس و استخراج پارامترهای بهینه عملکردی آن می باشد. به این منظور ابتدا معادلات حاکم بر بخش های الکترومغناطیسی، مکانیکی و اثرات متقابل این بخش ها به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه از شبیه سازی المان محدود جهت تعیین مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای موثر بر کارکرد بومر استفاده خواهد شد.

۲. تئوری و محاسبات

شماتیک کلی بومر الکترومغناطیسی مورد بررسی در این مقاله در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱. برشی از یک بومر الکترومغناطیسی

این ساختار از یک دیافراگم آلومینیومی تشکیل شده که از اطراف به وسیله ۶ فنر به شاسی متصل می باشد. این دیافراگم در فاصله معینی از یک سیم پیچ قرار گرفته و در اتصال به بانک خازنی قرار دارد. بانک خازنی پس از شارژ کامل توسط یک ژنراتور، در یک بازه زمانی بسیار کوتاه در سیم پیچ مذکور تخلیه می شود. عبور جریان از سیم پیچ سبب ایجاد یک میدان مغناطیسی در اطراف آن می شود. این میدان مغناطیسی متغیر با زمان باعث ایجاد جریان های گردابی بر روی دیافراگم آلومینیومی می شود. طبق قانون القای فارادی، هرگاه شار مغناطیسی که از یک مدار بسته ای می گذرد، تغییر کند نیروی محرکه الکتریکی در آن القا می شود که به آن القای الکترومغناطیس فاراده گفته می شود. زمانی که میدان مغناطیسی متغیر با زمان به یک جسم هادی اعمال شود طبق قانون القای الکترومغناطیسی فارادی یک نیروی محرکه القایی و در نتیجه یک جریان القایی در آن تولید می شود. به این جریان القایی جریان گردابی یا جریان اددی گفته

می شود. این جریان به نوبه خود سبب تولید یک میدان مغناطیسی القایی در فضای اطراف هادی می شود. طبق قانون لنز جهت جریان القایی به گونه ای می باشد که میدان مغناطیسی حاصل از آن در خلاف جهت میدان مغناطیسی تولید کننده جریان القایی است. برهمکنش این جریان القایی و میدان مغناطیسی سبب ایجاد نیروی دافعه ناگهانی بین سیم پیچ و دیافراگم در بومر می شود. این مساله سبب دور شدن دیافراگم از سیم پیچ می شود. حرکت ناگهانی دیافراگم به شاره اطراف آن منتقل می شود که این منجر به ایجاد یک شوک صوتی پر توان در شاره می شود.

در حالت کلی ارتعاشات واداشته دیافراگم (یک صفحه تخت دایره ای) از رابطه زیر تبعیت می کند [۹، ۱۰]:

$$D\nabla^2\nabla^2w-\rho h\frac{\partial^2w}{\partial t^2}=p_m(r,\theta,t)+p_a(r,\theta,t) \quad (1)$$

که در آن $w=w(r,\theta,t)$ جابه جایی هر نقطه از صفحه از حالت تعادل می باشد. D ، h و ρ نیز به ترتیب سختی خمشی، ضخامت و چگالی جرمی دیافراگم می باشد. جمله $p_m(r,\theta,t)$ در سمت راست این معادله فشار ناشی از برهمکنش بین میدان مغناطیسی و جریان های گردابی روی صفحه و $p_a(r,\theta,t)$ فشار آکوستیکی حاصل از تماس یک طرف دیافراگم با محیط آب می باشد.

نیروی وارد بر جریان های گردابی در اثر برهمکنش با میدان مغناطیسی اطراف آن از رابطه $\mathbf{f}=\mathbf{J}\times\mathbf{B}$ محاسبه می شود که در آن $\mathbf{B}$ بردار چگالی میدان مغناطیسی و $\mathbf{J}$ بردار چگالی جریان های گردابی می باشد که متناسب با کرل میدان مغناطیسی است:

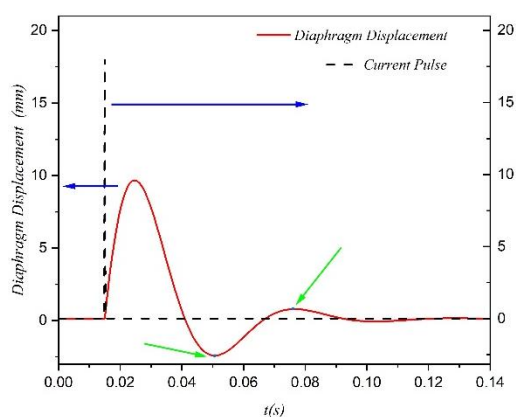
$$\mathbf{J}=(\nabla\times\mathbf{B})/\mu \quad (2)$$

در نتیجه

$$\mathbf{f}=(\nabla\times\mathbf{B})\times\mathbf{B}/\mu \quad (3)$$

با توجه به تقارن محوری مساله، نیروی الکترومغناطیسی خالص وارد بر دیافراگم در راستای عمود بر آن می باشد. بر این اساس جمله $p_m(r,\theta,t)$ در سمت راست معادله بالا از

یک دیافراگم آلومینیومی دایره‌ای به شعاع ۲۵۴ میلی متر و ضخامت ۱۲/۷ میلی متر صورت پذیرفت که از اطراف به وسیله ۶ فنر با ثابت سختی $K=120000(N/m)$ مقید شده است و به فاصله ۱۸ میلی متر بالای مجموعه کوئل‌ها قرار دارد. تحریک بومر از طریق یک جریان الکتریکی وابسته به زمان به شکل گاوسی با دامنه $I_0=19A$ ، پهنای $\sigma_0=0/0001$ و موقعیت زمانی $t_0=0/015(s)$ ، که در شکل (۳) نمایش داده شده است، صورت می‌گیرد.

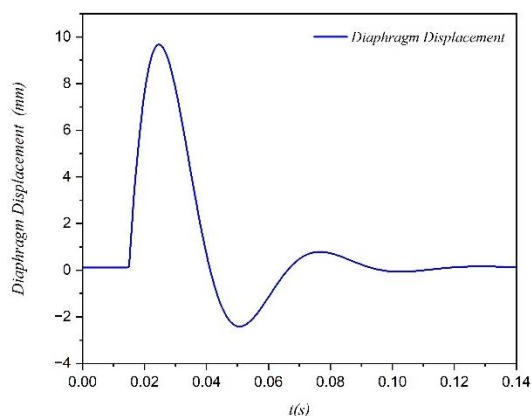


شکل ۳. نمودار پالس گاوسی اعمال شده به کوئل‌ها

در ادامه از یک تحلیل زمانی^{۱۱} در بازه زمانی ۰ تا ۰/۱۴ ثانیه و با گام‌های زمانی ۰/۰۱ ثانیه برای بررسی اثر اعمال جریان وابسته به زمان و میدان مغناطیسی حاصل از آن، جریان‌های گردابی، نیروهای الکترومغناطیسی اعمال شده بر دیافراگم و نوسان‌های مکانیکی آن استفاده شده است.

۴. نتایج

در شکل (۴) نمودار جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم به صورت تابعی از زمان رسم شده است.



شکل ۴. نمودار جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم بر حسب تابعی از زمان

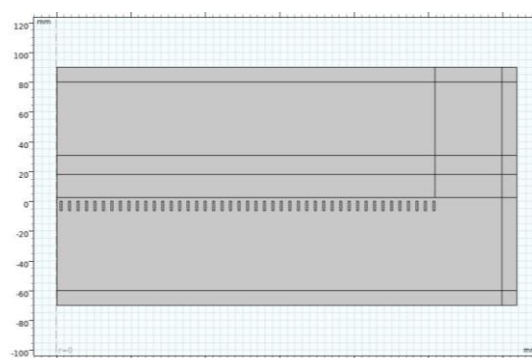
تقسیم معادله (۳) بر مساحت دیافراگم محاسبه می‌شود. نیروی وارد شده از طرف میدان مغناطیسی دیافراگم را از سیم‌پیچ دور می‌کند. از سوی دیگر اما، نیروی بازگرداننده فنرهای متصل به لبه‌های دیافراگم دامنه حرکت آن را محدود و دیافراگم را به موقعیت اولیه آن باز می‌گرداند. از سوی دیگر فشار آکوستیکی در هر نقطه بر روی سطح دیافراگم نیز از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = -\hat{n} \cdot \nabla p_a \quad (4)$$

جابه‌جایی دیافراگم $w(r, \theta, t)$ در هر لحظه از حل همزمان معادله‌های (۱) و (۳) و با اعمال شرط مرزی (۴) محاسبه خواهد شد.

۳. یافته‌ها و بحث‌ها

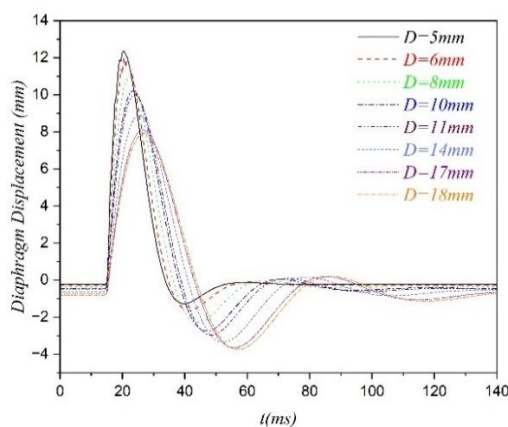
به منظور توصیف ارتعاشات دیافراگم و جابه‌جایی آن از حالت تعادل لازم است معادلات (۱)، (۲)، (۳)، (۴) به طور همزمان حل شوند. با توجه به پیچیدگی مساله برای حل دقیق معادلات و شبیه‌سازی عملکرد این سیستم، از شبیه‌سازی المان محدود در نرم افزار کامسول استفاده کردیم. به منظور بررسی نحوه عملکرد بومر در حوزه زمان، شبیه‌سازی به شکل وابسته به زمان انجام شد.



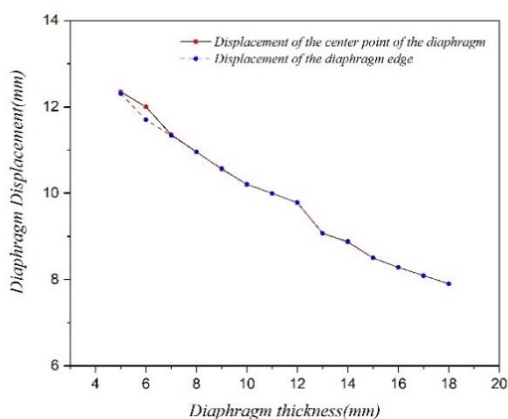
شکل ۲. ساختار مورد بررسی در تقریب دو بعدی متقارن

همان طور که در شکل (۲) نمایش داده شده است، به جهت کاهش زمان محاسبات، از تقریب دو بعدی متقارن^{۱۲} برای شبیه‌سازی این ساختار توسط نرم افزار کامسول استفاده کرده‌ایم. در این تقریب، کوئل یک تکه ۴۵ دور بومر به صورت ۴۵ کوئل مجزای هم فاصله در نظر گرفته شد که جهت جریان یکسانی از آن‌ها عبور می‌کند. محاسبات برای

است. همانطور که در این شکل نمایش داده می شود با افزایش ضخامت موقعیت تعادلی دیافراگم (عرض از مبدا نمودارها قبل از اعمال جریان در $t=0.015(s)$ به تدریج از -0.2235 به -0.8045 کاهش می یابد. این مساله ناشی از تاثیر وزن دیافراگم در تعادل با نیروی فنر می باشد. از سوی دیگر با افزایش ضخامت دیافراگم جرم آن نیز افزایش می یابد. همانطور که در شکل (۶-الف) مشاهده می شود، این پدیده سبب کاهش دوره تناوب میرا شونده دیافراگم می شود که با گسترش توزیع زمانی پالس جابجایی دیافراگم در شکل مشخص می شود.



شکل ۵. (الف). جابه جایی نقطه مرکزی دیافراگم به ازای ضخامت های مختلف دیافراگم



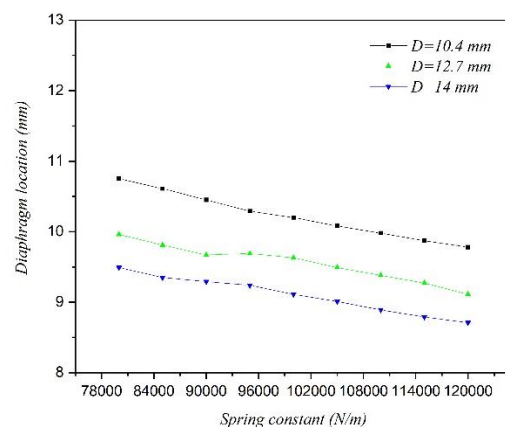
شکل ۶ (ب). نمودار جابه جایی دو نقطه از دیافراگم

نمودار جابه جایی نقطه مرکزی و لبه دیافراگم در بیشینه جابجایی به صورت تابعی از ضخامت آن در شکل (۶-ب) نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود اعمال جریان الکتریکی در سیم پیچ، سبب جابه جایی تقریباً یکسان نقاط لبه و مرکز دیافراگم می شود. این پدیده را می توان بر

همانطور که در این شکل مشاهده می شود با اعمال جریان الکتریکی متغیر با زمان به کوئل ها، یک میدان مغناطیسی پالسی در محیط اطراف کوئل ها ایجاد می شود. این پدیده سبب دور شدن ناگهانی دیافراگم می شود. این حرکت ناگهانی باعث ایجاد یک شوک صوتی قوی در محیط اطراف، (آب)، می شود. کل جابه جایی توصیف شده حول محل تعادل اولیه دیافراگم در بازه زمانی کوتاه 0.026 ثانیه صورت می گیرد.

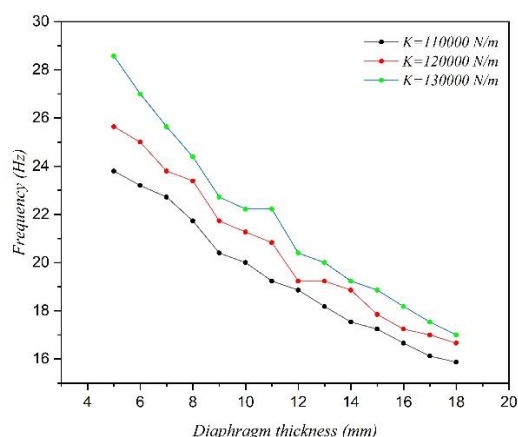
در ادامه به بررسی دقیق تر ارتعاش های دیافراگم و اثر پارامترهای مختلف بر نحوه ارتعاش آن می پردازیم.

نمودار تاثیرات ثابت فنر بر بیشینه جابه جایی نقطه مرکزی دیافراگم به صورت تابعی از ثابت فنر برای چهار مقدار مختلف شعاع دیافراگم در شکل (۵) نمایش داده شده است. در این شکل ثابت فنر از 80000 تا 120000 نیوتن برمتر با گام 5000 افزایش یافته است. همانطور که انتظار می رود با افزایش سختی فنر دامنه ارتعاشات دیافراگم کاهش می یابد. از سوی دیگر افزایش قطر دیافراگم سبب توزیع جریان گردابی بر روی سطح بزرگتری از دیافراگم می شود. در نتیجه نیروی برهمکنش مغناطیسی، معادله (۳)، افزایش می یابد که به همراه افزایش اینرسی (جرم) سیستم باعث می شود بیشینه جابجایی دیافراگم با افزایش قطر افزایش یابد.



شکل ۷. نمودار جابه جایی نقطه مرکزی دیافراگم بر اساس تغییرات فنر

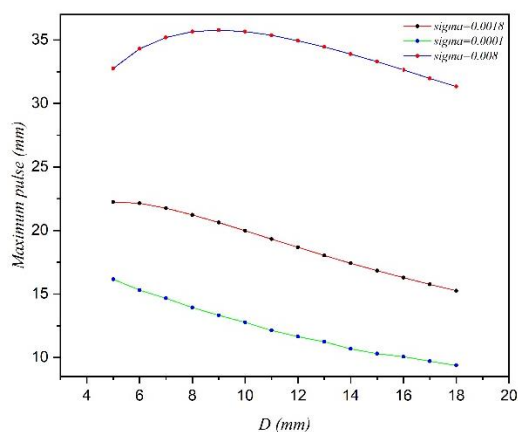
به منظور تعیین ضخامت بهینه دیافراگم، در شکل (۶-الف) نمودار بیشینه جابه جایی نقطه مرکزی دیافراگم به صورت تابعی از زمان برای ضخامت های 5 تا 18 میلی متر رسم شده



شکل ۸. نمودار تغییرات فرکانس بر حسب شعاع دیافراگم در ثابت فنر مختلف

مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت دیافراگم، فرکانس جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم به صورت تقریباً خطی و با شیب زیاد تا ۱۶ هرتز کاهش پیدا می‌کند. همانطور که اشاره شد این مساله را می‌توان به افزایش جرم دیافراگم نسبت داد که در یک مساله جرم و فنر میرا شونده مانند مساله فعلی باعث کاهش فرکانس نوسان آزاد می‌شود.

در شکل (۹) نمودار جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم به صورت تابعی از ضخامت دیافراگم برای پهنای پالس ۰.۰۰۸، ۰.۰۰۱۸ و ۰.۰۰۰۱ به صورتی نمایش داده شده است که ثابت فنر نیز به صورت همزمان و با نسبت مشابهی افزایش یافته است. ابتدا به منظور مقایسه مدت زمان جابجایی دیافراگم با [۱۱]، پهنای پالس را برابر ۰.۰۰۰۱ در نظر گرفته شد.

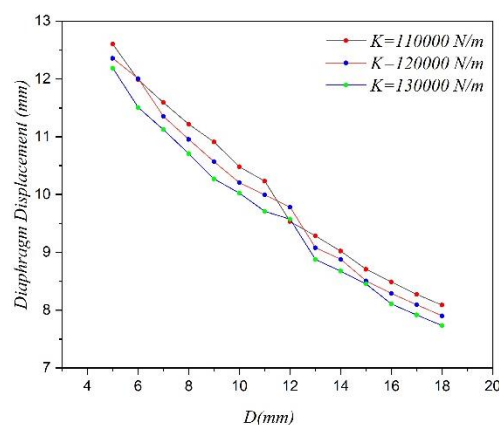


شکل ۹. نمودار جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، به منظور مقایسه مدت زمان جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم با [۱۱]، σ

توزیع یکنواخت نیروی الکترومغناطیسی وارد بر دیافراگم نسبت داد.

به منظور بررسی دقیق‌تر این مساله بیشینه جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم نسبت به وضعیت تعادل آن به صورت تابعی از ضخامت آن برای سه مقدار متفاوت ثابت فنر رسم شده است، (شکل ۷).



شکل ۷. نمودار جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم به ازای ضخامت‌ها و ثابت فنرهای مختلف

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود انتظار می‌رود با افزایش ضخامت دیافراگم، بیشینه دامنه جابجایی افزایش یابد. اما به سبب پهنای پالس بسیار کم و ثابت فنر با یک شیب زیاد شروع به کاهش می‌کند.

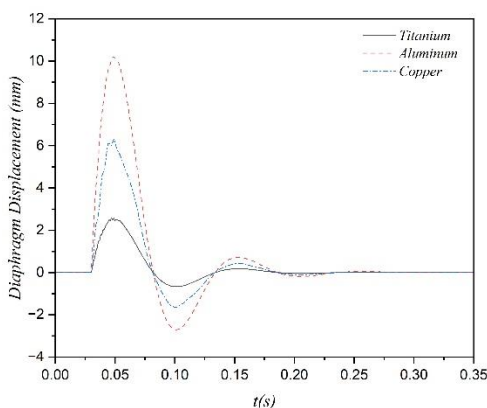
در شکل (۸) تاثیر ضخامت دیافراگم بر فرکانس ارتعاش دیافراگم به صورت تابعی از ضخامت برای سه مقدار متفاوت ثابت فنر رسم شده است. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، به منظور محاسبه فرکانس جابجایی دیافراگم، دوره تناوب T با اندازه‌گیری فاصله زمانی اولین دره و دومین قله محاسبه می‌شود و بر اساس آن فرکانس به کمک رابطه $f = \frac{1}{T}$ حاصل می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود جابه‌جایی دیافراگم تیتانیوم نسبت به دو مورد دیگر بسیار کمتر می‌باشد. این به دلیل ضریب رسانندگی اندک تیتانیوم می‌باشد که در حدود یک مرتبه بزرگی از مقادیر متناظر آلومینیوم و مس کمتر است، جدول (۱). از سوی دیگر از آنجا که ابعاد دیافراگم برای هر سه جنس یکسان فرض شده است؛ به دلیل چگالی بیشتر مس، دوره تناوب جابجایی دیافراگم مسی بزرگتر می‌باشد و زمان به زمان توزیع گسترده‌تری دارد.

جدول ۱. ضریب رسانندگی الکتریکی بر حسب زیمنس بر متر

آلومینیوم	مس	تیتانیوم
3.774e7[S/m]	5.998e7[S/m]	7.407e5[S/m]

در شکل (۱۱) جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم به صورت تابعی از زمان برای دیافراگم‌هایی از جنس آلومینیوم، تیتانیوم و مس را رسم شده است با این تفاوت نسبت به شکل (۱۰) که ضخامت دیافراگم به نحوی تعیین شد، که جرم هر سه فلز برابر ۶٫۹۵ کیلوگرم است. در این حالت ضخامت آلومینیوم ۱۲٫۷، مس ۳٫۸ و تیتانیوم ۶٫۹ میلی‌متر می‌باشد و در تعادل با نیروی وزن دیافراگم در فاصله ۵۸ میلی‌متر بالای کوئل‌ها قرار می‌گیرد.



شکل ۱۱. جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم بر حسب تابعی از زمان به ازای جنس‌های مختلف

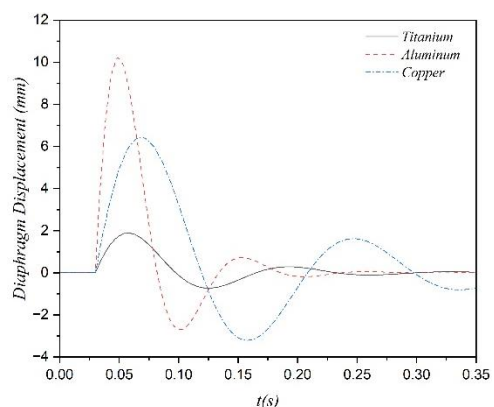
همانطور که مشاهده می‌شود، دامنه جابه‌جایی دیافراگم آلومینیومی در مقایسه با مس و تیتانیوم بیشتر است اما فرکانس نوسان آن‌ها تقریباً با هم یکی می‌باشد. در اینجا به دلیل رسانندگی اندک تیتانیوم دامنه نوسانات آن هنوز اندک است. از سوی دیگر بزرگی نسبی جابجایی دیافراگم

را برابر 0.0001 در نظر می‌گیریم. بر این اساس با افزایش ضخامت دیافراگم، بیشینه جابه‌جایی نقطه مرکزی آن به صورت خطی کاهش می‌یابد. این مساله را بدین صورت می‌توان بیان کرد که با افزایش ضخامت دیافراگم، جرم آن نیز افزایش یافته و با توجه به کاهش پهنای پالس و مقدار ثابت فنر، بیشینه جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم با یک شیب کم کاهش می‌یابد. این پدیده سبب می‌شود، تا جابه‌جایی دیافراگم حول محل تعادل اولیه خود در بازه زمانی کوتاه ۰/۰۲۶ ثانیه صورت می‌گیرد.

همچنین جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم به صورت تابعی از ضخامت آن برای پهنای پالس 0.008 و 0.0018 مورد بررسی قرار گرفت.

مطابق شکل (۹) در صورتی که $\sigma = 0.008$ باشد، با افزایش ضخامت دیافراگم، در ابتدا دامنه جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم با یک شیب زیاد شروع به افزایش می‌کند. پس از آن با رسیدن به یک مقدار بهینه به ازای $D = 9\text{mm}$ به سرعت و با یک شیب زیاد به صورت خطی شروع به کاهش می‌کند. میزان کاهش در این حالت در شعاع‌های بالاتر خطی می‌باشد. سپس در صورتی که $\sigma = 0.0018$ باشد، ابتدا بیشینه جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم با یک شیب کم تا $D = 6\text{mm}$ افزایش یافته، و پس از آن با یک شیب کم و به صورت خطی شروع به کاهش می‌کند.

در شکل (۱۰) جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم صورت تابعی از زمان برای دیافراگم‌هایی از جنس آلومینیوم، تیتانیوم و مس را رسم شده است.



شکل ۱۰. نمودار جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم با ضخامت یکسان

- [3] Duncan A, McCauley R. Characterisation of an air-gun as a sound source for acoustic propagation studies. In UDT Pacific 2000 Conference, Sydney Australia 2000 Feb (pp. 7-9).
- [4] Edgerton HE, Hayward GG. The 'boomer' sonar source for seismic profiling. Journal of Geophysical Research. 1964 Jul 15;69(14):3033-42.
- [5] Simpkin PG. The Boomer sound source as a tool for shallow water geophysical exploration. Marine Geophysical Researches. 2005 Jun;26:171-81.
- [6] Aiello G, Giordano L, Marsella E, Passaro S, Elitok O. Seismic stratigraphy and marine magnetism of the Naples Bay (Southern Tyrrhenian sea, Italy): the onset of new technologies in marine data acquisition, processing and interpretation. Stratigraphic Analysis of Layered Deposits. 2012 Apr 27;2:21-60.
- [7] Prado AH, Almeida RP, Tamura LN, Galeazzi CP, Ianniruberto M. Interpretation software applied to the evaluation of shallow seismic data processing routines in fluvial deposits. Brazilian Journal of Geology. 2019 Apr 29;49:e20180121.
- [8] Zheng J, Li L, Xie J, Yan T, Jiang B, Huang X, Hui G, Li T, Wen M, Huang Y. The application of a homemade boomer source in offshore seismic survey: From field data acquisition to post-processing. Journal of Applied Geophysics. 2023 Mar 1;210:104945.
- [9] Junger MC, Feit D. Sound, structures, and their interaction. Cambridge, MA: MIT press; 1986 Nov.
- [10] Kinsler LE, Frey AR, Coppens AB, Sanders JV. Fundamentals of acoustics. John Wiley & Sons; 2000 Jan.
- [11] Edgerton HE, Hayward GG. The 'boomer' sonar source for seismic profiling. Journal of Geophysical Research. 1964 Jul 15;69(14):3033-42.

آلومینیومی را می‌توان به ضخامت بیشتر آن نسبت داد که سبب می‌شود جریان‌های گردابی توضیح بیشتری در دیافراگم داشته باشد و در نتیجه نیروی برهمکنش ناشی از قانون لنز در آن بیشتر باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر تغییرات ضخامت دیافراگم، ثابت فتر و جنس دیافراگم بر عملکرد یک مبدل بومر الکترومغناطیسی پرداخته شد. محاسبات برای یک بومر شامل یک سیم پیچ نواری با ۴۵ دوره که از اطراف توسط ۶ فتر مقید شده است صورت پذیرفت. از روش المان محدود برای حل روابط حاکم بر ارتعاشات دیافراگم، جریان‌های گردابی و اثرات متقابل آن‌ها فرمول‌بندی و استخراج دامنه جابجایی دیافراگم استفاده شد. نشان داده شد که با افزایش ضخامت دیافراگم، دامنه جابجایی آن در ابتدا به شدت افزایش می‌یابد اما سرعت این افزایش به تدریج کاهش یافته تا در ضخامت ۱۸ میلی‌متر ثابت می‌شود. از سوی دیگر نیز فرکانس جابه‌جایی دیافراگم تا ۱۶ هرتز کاهش می‌یابد. همچنین بررسی افزایش ثابت فنرهای نگهدارنده به همراه ضخامت دیافراگم با نسبت مشابه، نشان دهنده یک بیشینه در جابجایی دیافراگم در ضخامت ۹ میلی‌متر می‌باشد. از سوی دیگر مطالعه نشان داد به دلیل ضریب رسانندگی بالاتر و چگالی کمتر، آلومینیوم گزینه مناسب‌تری در مقایسه با سایر فلزات برای ساخت دیافراگم می‌باشد.

سپاسگزاری

این کار با پشتیبانی معنوی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا انجام شده است.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Wood Hole
- 2 Spark Gap
- 3 Zielkowski
- 4 Cavitation
- 5 Simkin
- 6 G Aiello
- 7 Prado
- 8 Source level
- 9 Zheng
- 10 2D Axi-Symmetric
- 11 time dependent

مراجع

- [1] Ewing M, Woollard GP, Vine AC, Worzel JL. Recent results in submarine geophysics. Geological Society of America Bulletin. 1946 Oct 1;57(10):909-34.
- [2] Sun Y, Timoshkin IV, Given MJ, Wilson MP, Wang T, MacGregor SJ, Bonifaci N. Acoustic impulses generated by air-bubble stimulated underwater spark discharges. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018 Oct 7;25(5):1915-23.