



بررسی پارامترهای مغناطیسی بر عملکرد بومر الکترومغناطیسی

محمد رضا شمس^{*}، محمد رضا کازرانی وحدانی^ب، رضا مردانی^پ

^{آ*} ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوا دریا، ۷۱۹۴۹۱۴۵۸۹، کارشناس ارشد

^ب ایران، دانشیار

^پ ایران، دانشیار

* محمد رضا شمس: Mrshams@mut.ac.ir

چکیده

در این مقاله اثر مشخصات الکتریکی بر کارکرد یک بومر الکترومغناطیسی به عنوان یک منبع تولید کننده شوک صوتی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور ابتدا با بررسی روابط حاکم بر ارتعاشات ورق و حل آن کل ارتعاشات بومر را بدست می آوریم. برای حل این معادلات پیچیده و زمان بر از شبیه سازی المان محدود در حوزه ی زمان استفاده شده است تا تاثیر پارامترهایی مانند پهنای پالس الکتریکی ورودی، تعداد و توزیع کویل ها بر نحوه ی ارتعاشات دیافراگم بررسی شود. نتایج بیانگر آن است که با افزایش پهنای پالس الکتریکی ورودی دامنه ی جابجایی دیافراگم در ابتدا افزایش می یابد اما پس از مدتی به یک مقدار ثابت میل می کند. همچنین مشاهده شد دامنه ی جابجایی دیافراگم با افزایش تعداد کویل ها افزایش می یابد. مطالعه نشان داد توزیع یکنواخت کویل ها در امتداد شعاع دیافراگم سبب می شود نیروی القای الکترومغناطیسی به صورت همگن بر دیافراگم وارد شود و در نتیجه دامنه ی ارتعاشات دیافراگم بیشینه شود.

کلمات کلیدی: بومر الکترومغناطیسی؛ شوک صوتی؛ روش المان محدود.

۱- مقدمه

امواج ضربه ای آکوستیکی، امواج پرتوانی هستند که به دلیل انرژی بالا توانایی نفوذ به لایه های زیرین بستر دریا را دارند. این ویژگی سبب شده از این امواج برای شناسایی لایه های زیرین بستر دریا و منابع نفت و گاز استفاده می شود. از جمله روش های تولید امواج ضربه ای می توان به استفاده از خرج های انفجاری، اسپارک گپ ها^۱، تفنگ های صوتی و بومرهای الکترومغناطیسی اشاره کرد. نخستین روشی که برای تولید امواج آکوستیکی پرتوان مورد استفاده قرار گرفت بکارگیری خرج های انفجاری بود. این روش اولین بار توسط بلوچمن در سال ۱۸۹۸ میلادی به منظور عکس برداری از بستر دریا استفاده شد [۱]. از جمله روش های دیگر اسپارک گپ ها می باشند. از سوی دیگر نخستین بار در جنگ جهانی دوم از اسپارک گپ ها برای تولید امواج آکوستیکی به منظور کشف زیردریایی و

^۱ sparkgap

خنثی کردن مین‌های دریایی استفاده شد [۲]. پس از آن در سال‌های بعد جنگ جهانی دوم از تفنگ‌های صوتی که در سال ۱۹۷۰ توسط زیلکوفسکی اختراع شدند [۳]، به منظور تولید امواج آکوستیکی پرتوان استفاده شد.

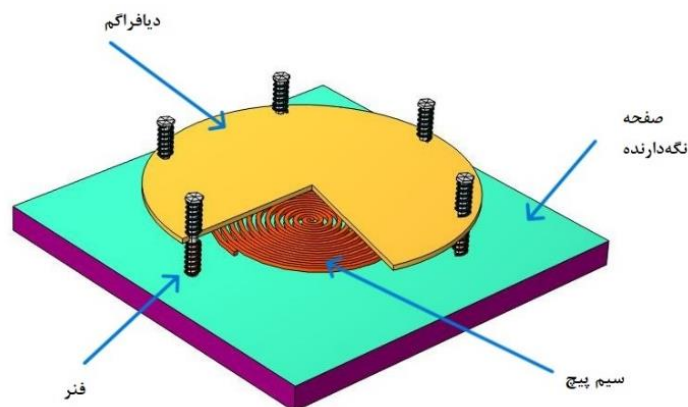
یکی از منابع مهم تولید امواج آکوستیکی پرتوان در زیر آب بومرهای الکترومغناطیسی می‌باشند. بومر از یک دیافراگم رسانا تشکیل شده که در موازات یک سیم پیچ قرار گرفته است. با تخلیه ناگهانی انرژی الکتریکی ذخیره شده‌ی یک بانک خازنی بر روی سیم پیچ، بر اساس قانون القای فارادی یک جریان گردابی بر روی دیافراگم القا می‌شود. برهمکنش این جریان با میدان مغناطیسی ناشی از سیم پیچ، یک نیروی ناگهانی به دیافراگم وارد می‌کند و دیافراگم را به سرعت از سیم پیچ دور می‌کند. حرکت ناگهانی دیافراگم که در تماس با آب قرار دارد باعث ایجاد یک شوک صوتی پرتوان در محیط آب می‌شود. بومر در مقایسه با تفنگ‌های صوتی به سبب کنترل پذیری شوک صوتی تولید شده آسیب کمتری به جانداران دریایی وارد می‌کند.

نخستین مدل تجربی بومر توسط موسسه اقیانوس شناسی Wood Hole معرفی شد [۴]. این مدل از یک دیافراگم آلومینیومی با قطر ۴۵۲.۷ میلی‌متر و ضخامت ۶.۳۵ میلی‌متر که در موازات یک سیم پیچ دایروی با تعداد دور ۴۵ دور قرار گرفته تشکیل شده است. ایجاد یک شوک صوتی پرتوان توسط بومر در محیط آب سبب ایجاد پدیده کاویتاسیون در آب می‌شود که در طول زمان باعث خوردگی دیافراگم می‌شود. به منظور جلوگیری از خوردگی ناشی از کاویتاسیون سوراخی در مرکز دیافراگم تعبیه شد و برای جلوگیری از تغییر حالت دیافراگم ضخامت آن به ۱۲.۷ میلی‌متر و قطر آن به ۵۰۸ میلی‌متر افزایش و توسط ۱۲ فنر از اطراف مقید شده است. همچنین به منظور جلوگیری از تغییر حالت سیم پیچ در این مدل از دو دیافراگم استفاده شد [۵]. در سال ۱۹۶۴ Hersey و همکاران برای جلوگیری از خمش دائمی دیافراگم در انرژی‌های بالا تعداد فنرهای بومر را به ۶ فنر کاهش و قطر دیافراگم را به ۷۶۲ میلی‌متر افزایش دادند. همچنین برای ایجاد مقاومت در برابر خوردگی ناشی از کاویتاسیون، یک صفحه فولادی به مرکز دیافراگم متصل کردند که سبب شد صفحات دیافراگم عمر بیشتری داشته باشند. simpkin و همکاران در سال ۱۹۹۷ توانستند با نفوذ به عمق ۲۰۰ متری در رسوبات نرم کف دریا به کیفیت قابل توجهی از نظر وضوح و کاهش نویز برسند. دیافراگم این مدل توسط یک بفلد دایره‌ای از کنارها مقید شده است [۶]. گروه شنژن با کالیبره کردن بومر در یک حوضچه بدون پژواک توانستند مبنای قابل اعتمادی برای تعیین پارامترهای پس از پردازش فراهم کنند [۷].

هدف مقاله‌ی حاضر مطالعه‌ی تاثیر پارامترهای الکتریکی بر عملکرد الکترومکانیکی یک بومر الکترومغناطیسی می‌باشد. به این منظور پس از توصیف مشخصات سیستم مورد مطالعه، مکانیزم و قوانین الکترومغناطیسی و مکانیکی حاکم بر بومر توصیف می‌شود. پس از آن عملکرد بومر مورد نظر به کمک روش المان محدود شبیه‌سازی و مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهد گرفت و بررسی می‌کنیم چگونه با تنظیم پارامترهای الکتریکی سامانه مانند دامنه و طول پالس تحریک می‌توان کارکرد آن را بهینه نمود.

۲- تئوری و محاسبات

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



شکل ۱. برشی از دیافراگم یک بومر الکترومغناطیسی

مطابق (شکل ۱) ساختار مورد بررسی از یک دیافراگم آلومینیومی دایره‌ای شکل به قطر ۴۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر تشکیل شده است که به فاصله‌ی ۵۰ میلی‌متر از یک سیم‌پیچ تخت با تعداد دور ۱۵ و سطح مقطع ۱×۰.۵ میلی‌متر قرار گرفته است. دیافراگم از اطراف توسط ۶ فنر با ثابت سختی ۶۸۱۱۰ نیوتن بر متر به یک شاسی صلب که سیم‌پیچ تخت نیز بر روی آن قرار دارد، متصل شده است. سیم پیچ در اتصال با یک بانک خازنی قرار دارد که توسط یک ژنراتور شارژ شده و در یک بازه زمانی بسیار کوتاه بر روی سیم پیچ مذکور تخلیه می‌شود.

با عبور جریان از سیم پیچ یک میدان مغناطیسی در اطراف آن ایجاد می‌شود. این میدان مغناطیسی متغیر با زمان باعث ایجاد جریان‌های گردابی بر روی دیافراگم می‌شود. مطابق قانون لنز میدان مغناطیسی ثانویه تولید شده توسط این جریان‌های گردابی با تغییر میدان اولیه مخالفت می‌کند [۸]. بر هم کنش جریان‌های گردابی دیافراگم و میدان مغناطیسی اولیه سبب ایجاد یک نیروی دافعه‌ی الکترومغناطیسی می‌شود که باعث دور شدن دیافراگم و سیم پیچ از یکدیگر می‌شود. انتقال حرکت ناگهانی دیافراگم به شاره‌ی اطراف آن (آب) منجر به ایجاد یک شوک صوتی پرتوان می‌شود.

در حالت کلی معادله حاکم بر ارتعاش یک ورق به صورت زیر نوشته می‌شود [۹ و ۱۰].

$$D \nabla^2 \nabla^2 w - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P_m(x, y, t) + P_a(x, y, t) \quad (1)$$

که در آن w جابجایی دیافراگم از حالت تعادل و ρ ، h و D به ترتیب بیانگر چگالی جرمی، ضخامت و سختی خمشی ورق (دیافراگم) می‌باشد. جمله چشمه در این معادله (سمت راست معادله) متشکل از مجموع دو جمله‌ی P_m و P_a است. که P_m بیانگر فشار وارد بر دیافراگم ناشی از برهمکنش نیروی مغناطیسی و جریان گردابی و جمله‌ی P_a فشار حاصل از تماس دیافراگم با محیط آب می‌باشد.

نیروی وارد بر جریان‌های گردابی در اثر برهمکنش با میدان مغناطیسی اطراف آن از رابطه $f = J \times B$ محاسبه می‌شود که در آن B بردار چگالی میدان مغناطیسی و J بیانگر جریان‌های گردابی می‌باشد که متناسب با کرل میدان مغناطیسی است [۱۱]:

$$f = (\nabla \times B) / \mu \quad (2)$$

در نتیجه نیروی برهمکنش میدان مغناطیسی با جریان گردابی القایی بر روی دیافراگم برابر خواهد بود با:

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

با توجه به تقان محوری بومر نیروی الکترومغناطیسی خالص وارد بر دیافراگم در راستای عمود بر آن می‌باشد. بر این اساس عبارت P_m در سمت راست معادله (۱) از تقسیم این نیرو بر مساحت سطح دیافراگم بدست می‌آید.

حرکت رفت و برگشتی دیافراگم باعث ایجاد یک موج آکوستیکی در آب می‌شود که مطابق معادله‌ی زیر در آب انتشار می‌یابد:

$$\nabla^2 p_a + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

که در آن p فشار موج آکوستیکی و c سرعت موج آکوستیکی در آب می‌باشد. بر روی سطح دیافراگم موج آکوستیکی با عامل تولید آن یعنی ارتعاش دیافراگم مطابق رابطه‌ی زیر ارتباط می‌یابد:

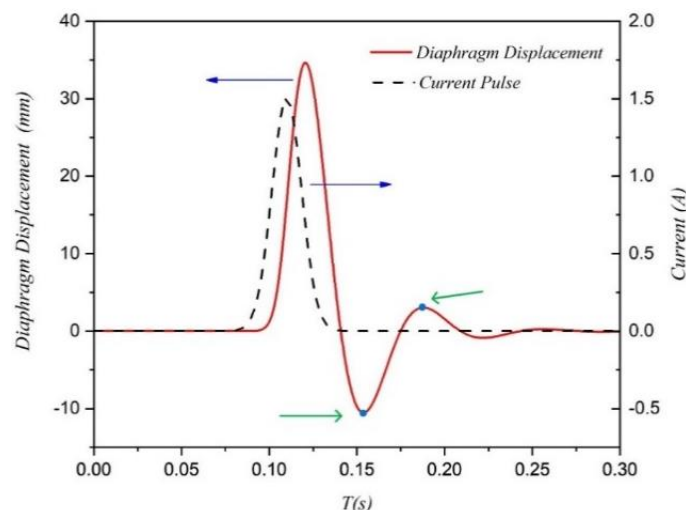
$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = -n \cdot \nabla p_a \quad (5)$$

ارتعاشات بومر در تماس با آب و همچنین انتشار موج آکوستیکی ناشی از آن در محیط از حل هم زمان معادله‌های (۱)، (۲)، (۳)، (۴) و (۵) محاسبه خواهد شد. از آن‌جا که با توجه به هندسه‌ی مساله، فیزیک‌های متفاوت موثر در آن و اثرات متقابل آن‌ها، حل این معادلات به روش تحلیلی و به صورت هم زمان کار دشوار و زمان بری است، برای شبیه سازی عملکرد این سامانه، اقدام به حل از

طریق روش المان محدود توسط نرم افزار کامسول کردیم. بدین منظور برای بررسی نحوه عملکرد دیافراگم، شبیه سازی به صورت وابسته به زمان انجام و برای کاهش زمان محاسبات از تقریب دو بعدی متقارن استفاده شد.

۳- نتایج

مشخصات بومر الکترومغناطیسی مورد مطالعه در این مقاله مطابق با نمونه‌ی ساخته شده در مرجع [۴] به شکل زیر انتخاب شد: دیافراگم آلومینیمی به قطر ۵۰۸ میلی‌متر و ضخامت ۱۲.۷ میلی‌متر که توسط شش فنر با ثابت ۶۸۱۱۰ نیوتن بر متر در فاصله‌ی ۱۸ میلی‌متر از یک کوئل تخت مسی ساخته شده از یک مفتول مسی با سطح مقطع ۱.۲۷×۶.۳۵ میلی‌متر و ۴۵ دور. دیافراگم با استفاده از تخلیه‌ی یک بانک خازنی با یک جریان الکتریکی وابسته به زمان به شکل گاوسی با دامنه $I_0 = 1.5A$ ، موقعیت زمانی $t_0 = 0.11(s)$ و پهنای σ_0 تحریک می‌شود، (شکل ۲). از شبیه‌سازی المان محدود وابسته زمان در یک بازه زمانی ۰ تا ۰/۳ ثانیه با گام‌های زمانی ۰/۰۱ ثانیه برای بررسی اثر اعمال این جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی حاصل از آن، نیروهای مغناطیسی اعمال شده بر دیافراگم، جریان گردابی و نوسان‌های مکانیکی آن استفاده شده است.



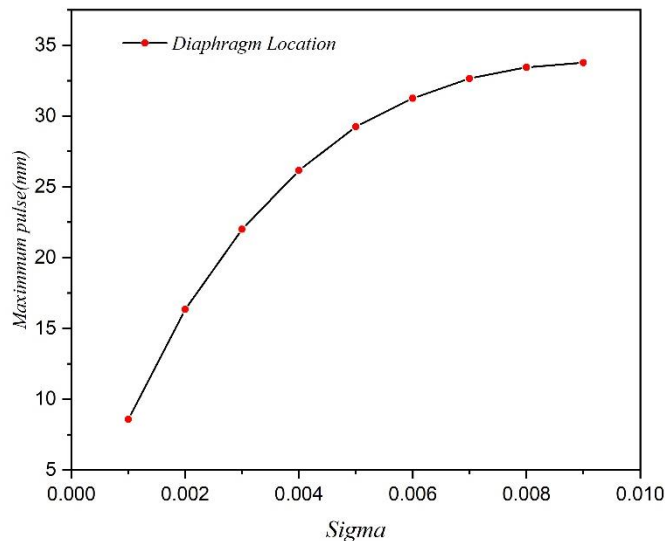
شکل ۲. نمودار پالس ورودی و خروجی سیستم

نمودار جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم به همراه پالس جریان الکتریکی ورودی سیستم (به شکل گاوسی با دامنه $I_0 = 1.5A$ ، موقعیت زمانی $t_0 = 0.11(s)$ و پهنای $\sigma_0 = 0.0084932$) به صورت تابعی از زمان در (شکل ۲) رسم شده است. در این شکل نمودار پالس جریان ورودی با نقطه چین و جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم با خط پیوسته نمایش داده شده است. همانطور که قبلاً توضیح داده شد برهمکنش میدان مغناطیسی ناشی پالس جریان با جریان گردابی القا شده بر روی دیافراگم سبب یک نیروی دافعه‌ی ناگهانی بین دیافراگم و کوئل‌ها می‌شود (که با فرض صلب و ساکن بودن کوئل‌ها) سبب حرکت رو به جلو دیافراگم می‌شود. با فاصله گرفتن دیافراگم از حالت تعادل خود، نیروی بازگرداننده‌ی فنرها از صفر شروع به افزایش می‌کند که دامنه‌ی جابجایی دیافراگم را محدود می‌کند. این مساله به همراه کاهش جریان ورودی باعث می‌شود دیافراگم پس از رسیدن به یک جابجایی بیشینه به سمت حالت تعادل خود بازگردد. در این حالت جابجایی دیافراگم را می‌توان در دو بخش تقسیم کرد: بخش اول از زمان اعمال پالس جریان تا انتهای آن که دیافراگم همانند یک نوسانگر هماهنگ واداشته ارتعاش می‌کند. در بخش دوم در عامل تحریک، دامنه‌ی ارتعاش دیافراگم همانند یک نوسانگر هماهنگ میرا به صفر میل می‌کند. در این فاز فرکانس حرکت دیافراگم را می‌توان با استفاده از بیشینه و کمینه‌های نمودار جابجایی (که بر روی نمودار با فلش سبز رنگ مشخص شده‌اند) محاسبه نمود.

۳-۱ اثر پهنای پالس ورودی بر دامنه نوسان دیافراگم

به منظور بررسی اثر پالس جریان ورودی بر نوسان دیافراگم، در (شکل ۳) نمودار جابجایی نقطه‌ی مرکزی دیافراگم به صورت تابعی از σ و σ مقدار متفاوت σ و به ازای دامنه‌ی ثابت پالس جریان ورودی $I_0=1.5A$ رسم شده است. همانطور که انتظار می‌رود از آنجا که افزایش σ ، بیانگر افزایش توزیع زمانی (پهن شدن) پالس تحریک ورودی می‌باشد، نقطه‌ی زمانی آغاز حرکت دیافراگم در زمان‌های کمتری رخ می‌دهد. به عبارت دیگر پهنای اولین پالس جابجایی دیافراگم نیز با افزایش σ افزایش یابد. از طرفی از آنجا که افزایش پهنای پالس، معادل تزریق مقدار بیشتری انرژی به سیستم می‌باشد، همانطور که در (شکل ۳) دیده می‌شود افزایش σ باعث افزایش دامنه‌ی نوسان دیافراگم می‌شود. به منظور بررسی این موضوع در (شکل ۳) بیشینه‌ی جابجایی دیافراگم به صورت تابعی از سیگما رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش پهنای پالس ورودی دامنه‌ی نوسان دیافراگم در ابتدا به سرعت افزایش می‌یابد؛ اما شیب افزایش آن به تدریج کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در حدود $\sigma=0.009$ به یک مقدار ثابت میل می‌کند. این مساله را می‌توان به تعادل بین نیروی برهمکنش میدان مغناطیسی و جریان گردابی (که متناسب با آهنگ زمانی تغییر میدان است) و نیروی فنر نسبت داد.

محاسبه‌ی دوره‌ی تناوب حرکت دیافراگم پس از پایان پالس الکتریکی (اختلاف زمانی پیک‌های دوم و سوم در (شکل ۲) به ازای پهنای پالس‌های مختلف بیانگر آن است که علی‌رغم جابجایی زمانی نمودارها، دوره‌ی تناوب حرکت آزاد دیافراگم در همه‌ی موارد یکسان می‌باشد. این مساله ناشی از آن است که همانطور که پیش از این توضیح داده شد، حرکت آزاد دیافراگم در نیمه‌ی دوم حرکت مستقل از پالس تحریک می‌باشد و رفتار زمانی آن تنها تحت تاثیر جرم دیافراگم، ثابت فنر و میرایی ناشی از حضور محیط آب می‌باشد.

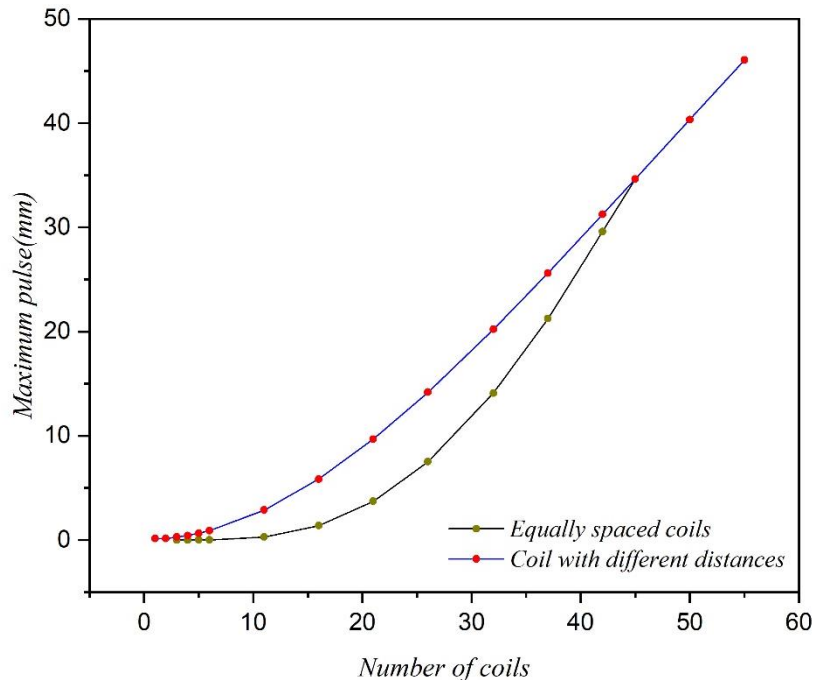


شکل ۳. نمودار جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم بر حسب تابعی از پهنای پالس

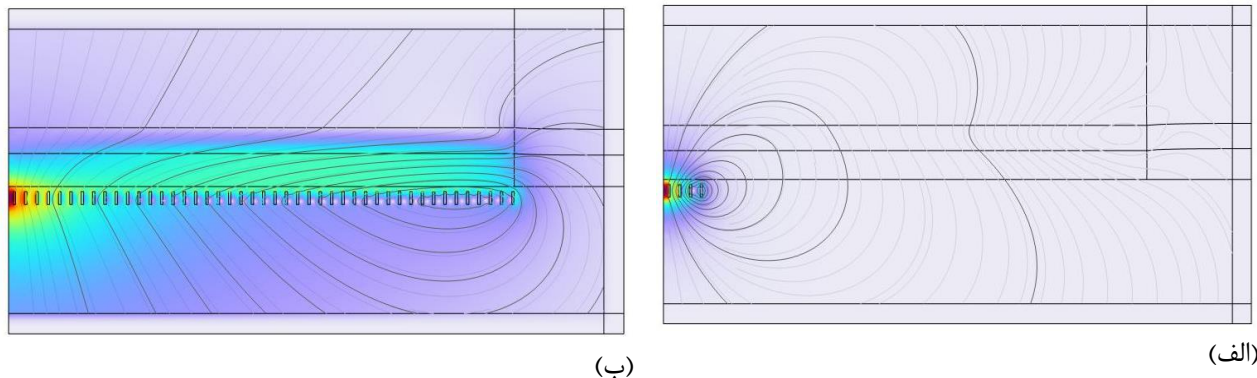
۳-۲ بررسی اثر تعداد کویل‌ها

به منظور بررسی تاثیر تعداد کویل‌ها بر نوسان دیافراگم، در (شکل ۴) نمودار بیشینه‌ی جابجایی نقطه مرکزی دیافراگم به صورت تابعی از تعداد کویل‌ها برای دو حالت مختلف رسم شده است. در حالت اول افزایش تعداد کویل‌ها از مرکز دیافراگم شروع می‌شود به گونه‌ای که فاصله اولین کویل تا محور دیافراگم $2/88$ میلی‌متر و فاصله کویل‌های بعدی نسبت به کویل‌های مجاور $5/692$ میلی‌متر باشد؛ طوری که با افزایش تعداد کویل‌ها فاصله‌ی آن‌ها ثابت باقی می‌ماند. در حالت دوم کویل‌ها به طور یکنواخت در طول شعاع دیافراگم توزیع می‌شوند به گونه‌ای که با افزایش تعداد کویل‌ها فاصله‌ی آن‌ها کاهش می‌یابد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش تعداد کویل‌ها در هر دو حالت بیشینه جابجایی دیافراگم افزایش می‌یابد. اما این افزایش برای حالتی که کویل‌ها به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند با شیب بیشتری آغاز می‌شود. این شیب از حدود $N=20$ تقریباً ثابت می‌شود و نمودار به صورت خطی افزایش می‌یابد. در

مقابل در حالی که فاصله‌ی کویل‌ها ثابت است و تعداد کویل‌ها از مرکز دیافراگم شروع به افزایش می‌کند، بیشینه دامنه‌ی جابجایی دیافراگم با آهنگ بسیار کندتری افزایش می‌یابد. اما شیب افزایش با افزایش تعداد کویل‌ها به سرعت افزایش می‌یابد به گونه‌ای که، همانطور که قبلاً بیان شد، به ازای $N=45$ دامنه‌ی جابجایی دیافراگم در هر دو حالت با هم برابر می‌شود.

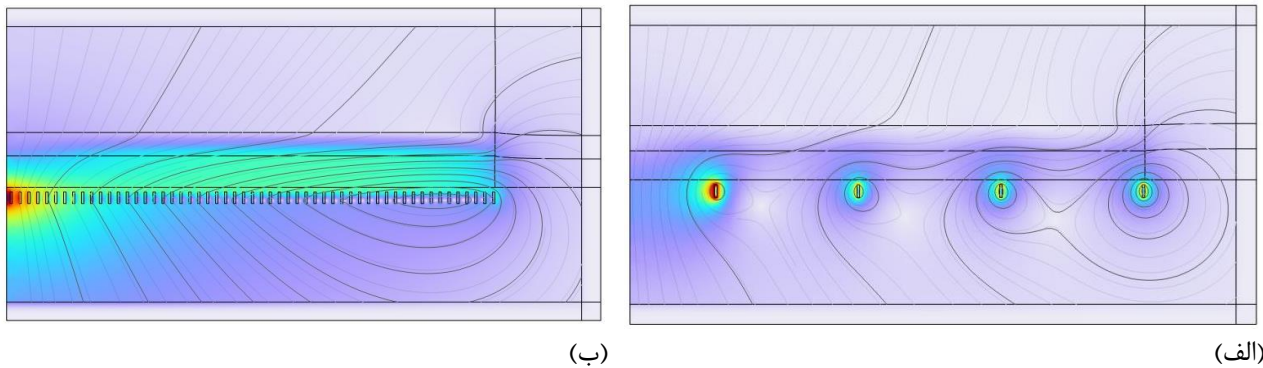


شکل ۴. نمودار بیشینه‌ی جابه‌جایی نقطه مرکزی دیافراگم



شکل ۵ (الف). جریان ایجاد شده بر روی دیافراگم توسط ۴ کویل، (ب) جریان ایجاد شده بر روی دیافراگم توسط ۴۵ کویل

اختلاف در الگوی رشد بیشینه دامنه‌ی جابجایی دیافراگم نسبت به تعداد کویل‌ها در دو حالتی که در (شکل ۴) بررسی شد را می‌توان بر اساس اختلاف توزیع میدان مغناطیسی بر روی دیافراگم در این دو حالت توضیح داد. به این منظور در (شکل ۵-الف و ۵-ب) توزیع میدان مغناطیسی به ازای $N=4$ و $N=45$ رسم شده است. همانطور که در (شکل ۵ و ۶-ب) مشاهده می‌شود توزیع یکنواخت کویل‌ها در طول شعاع دیافراگم باعث می‌شود میدان مغناطیسی ناشی از آن‌ها به طور یکنواخت بر روی دیافراگم توزیع شود و جریان‌های گردابی ناشی از تغییر این میدان در گستره‌ی وسیع‌تری از دیافراگم پخش شوند. در نتیجه نیروی القاء الکترومغناطیسی ناشی از قانون لنز در این حالت به صورت یکنواخت به تمام سطح دیافراگم وارد می‌شود و سبب جابجایی بیشتری می‌شود. در مقابل زمانی که کویل‌ها به صورت هم فاصله در مرکز دیافراگم قرار می‌گیرند، توزیع میدان مغناطیسی و جریان گردابی ناشی از آن تنها در مرکز دیافراگم توزیع می‌شود و در نتیجه نیروی الکترومغناطیسی تنها در ناحیه‌ی محدودی نزدیک مرکز دیافراگم متمرکز خواهد بود. توزیع محدودتر میدان مغناطیسی و جریان گردابی همچنین سبب کاهش دامنه‌ی نیروی الکترومغناطیسی القایی می‌شود. این دو موضوع سبب می‌شود دامنه‌ی جابجایی دیافراگم در این حالت نسبت به حالتی که کویل‌ها یکنواخت توزیع شده‌اند بیشتر شود.



شکل ۶(الف). جریان ایجاد شده بر روی دیافراگم توسط ۴ کوئل، (ب) جریان ایجاد شده بر روی دیافراگم توسط ۵۵ کوئل

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثر تعداد کوئل‌ها و دامنه پالس ورودی بر نوسان دامنه دیافراگم مبدل بومر پرداخته شد. بر این اساس ابتدا تعداد کوئل‌ها به گونه‌ای افزایش یافته که فاصله اولین کوئل تا محور دیافراگم $2/88$ میلی‌متر و فاصله هر کوئل از دورهای کناری $5/692$ میلی‌متر می‌باشد. در مرحله بعد چیدمان کوئل‌ها را به گونه‌ای مشخص کردیم، که آخرین آن مماس بر لبه دیافراگم به فاصله 254 میلی‌متری از مرکز دیافراگم قرار داشته باشد. در هر مرحله از شبیه سازی با افزایش تعداد کوئل‌ها دامنه جابه‌جایی دیافراگم افزایش می‌یابد. این مساله با توزیع میدان مغناطیسی ناشی از کوئل‌ها بر روی سطح دیافراگم ارتباط مستقیم دارد. بنابراین بهترین عملکرد بومر در شرایطی است که، از یک سیم پیچ تخت با 45 دور با قطر دیافراگم 508 میلی‌متر مورد استفاده قرار بگیرد. بر اساس شبیه سازی انجام شده می‌توان بیان نمود که بهترین پهنای پالس ورودی برای سیستم بومر در بازه $0/005$ تا $0/008$ می‌باشد.

۵- سپاس گذاری

این مقاله با پشتیبانی معنوی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوا دریا انجام شده است.

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.
3. Duncan A, McCauley R. Characterisation of an air-gun as a sound source for acoustic propagation studies. InUDT 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. Edgerton, H. E., S. O. Raymond, and G. G. Hayward, Submersible boomer study and experimental program, Rept. B-2440, E.G. & G. Rept. 2 for Woods Hole Oceanographic Institution, June 7, 1962a.
6. Simpkin PG. The Boomer sound source as a tool for shallow water geophysical exploration. Marine Geophysical Researches. 2005 Jun;26:171-81.
7. 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.
8. Halliday D, Resnick R, Walker J. Fundamentals of physics. John Wiley & Sons; 2013 Aug 13.

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 12.
11. Tsuboi H, Tanaka M, Misaki T. Eddy current and deflection analyses of a thin plate in time-changing magnetic field. IEEE transactions on magnetics. 1990 Sep;26(5):1647-9.