

بررسی اثرات ابعاد یک استخر تست هیدروآکوستیک بر کالیبراسیون حساسیت میدان آزاد هیدروفون به روش پالس

احسان سلکی*
دکتری مهندسی مکانیک
پژوهشکده صوتیات
solki@alumni.iust.ac.ir/
e.solki@gmail.com

احسان روحی
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
پژوهشکده صوتیات
Ehsan-roohi-9111362@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۸

چکیده

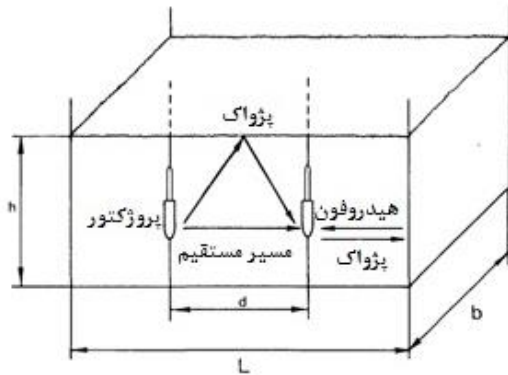
کالیبراسیون پارامتر حساسیت هیدروفون، دارای الزامات فراوانی مشتمل بر وجود شرایط میدان آزاد و نوفه محیطی ناچیز بوده و از طرق گوناگونی نیز انجام می‌پذیرد. در این میان یکی از بهینه‌ترین روش‌های موجود، بهره‌گیری از پالس به جای امواج پیوسته است؛ زیرا که این کار، انجام کالیبراسیون در استخرهایی با ابعاد کوچک‌تر را امکان‌پذیر می‌سازد. روش مذکور یا همان کالیبراسیون به روش پالس، به‌طور مستقیم متأثر از ابعاد استخر تست هیدروآکوستیک و بسامد کاری بوده و تغییر هر یک از عوامل فوق‌الذکر، اثرات محسوسی را در فرآیند کالیبراسیون به دنبال خواهد داشت. تحقیق حاضر به مطالعه اثرات ابعاد استخر تست و بسامد کاری بر روند کالیبراسیون هیدروفون به روش پالس اختصاص دارد. نتایج حاکی از آن است که هر اندازه بسامد کاری کمینه کاهش یابد، می‌بایست عمق بیشتری را در مرحله طراحی برای استخر لحاظ نمود، در غیر این صورت انجام کالیبراسیون میسر نخواهد بود.

واژگان کلیدی: استخر تست هیدروآکوستیک، کالیبراسیون، حساسیت هیدروفون، روش پالس

۱. مقدمه

است [۱]. طراحان استخرهای تست هیدروآکوستیک^۳ برای غلبه بر مشکلات یادشده و شبیه‌سازی شرایط میدان آزاد، دیواره‌های استخر را با مواد جاذب صوت می‌پوشانند که از این استخرها با نام استخرهای ناپژواک^۴ یاد می‌شود [۱] و [۲]. با این حال در صورتی که بلندگوی زیرآبی‌ایی که در استخرهای ناپژواک مورد استفاده قرار می‌گیرد امواج صوتی

یکی از مهم‌ترین کمیتاتی که در ارزیابی عملکرد یک هیدروفون مورد بررسی قرار می‌گیرد، حساسیت میدان آزاد^۱ می‌باشد. کالیبراسیون این کمیت از روش‌های گوناگونی صورت می‌پذیرد که تمامی آن‌ها نیازمند برقراری شرایط میدان آزاد^۲ و نیز سطح نوفه محیطی پایین بوده که تحقق این شرایط در استخرهای تست در بیشتر موارد بسیار دشوار



شکل ۱. نمایی شماتیک از یک مخزن آب مورد استفاده در کالیبراسیون به روش پالس [۱].

برای آن که کالیبراسیون هیدروفون‌ها از طریق روش پالس به درستی انجام پذیرد، می‌بایست طول پالس τ به قدری کوتاه باشد که صحت کالیبراسیون در اثر کثرت پژواک‌ها (یا همان پالس‌های منعکس شده از مرزها) دچار اختلال نگردد. به این منظور شرایطی که در روابط ۱ تا ۳ ارائه شده‌اند، می‌بایست ارضاء گردند. در این روابط، c نشان‌دهنده سرعت صوت در آب می‌باشد [۱].

$$\tau \leq \frac{2d}{c} \quad (1)$$

$$\tau \leq \frac{L-d}{c} \quad (2)$$

$$\tau \leq \frac{\sqrt{h^2 + d^2} - d}{c} \quad (3)$$

روابط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب مربوط به انعکاس بین ترانسدیوسرها، انعکاس از دیوارها و نیز انعکاس از سطح و کف می‌باشند. بر اساس این روابط، طول پالس می‌بایست به اندازه کافی کوتاه باشد، تا امواج منعکس شده از مرزها (پژواک‌ها) پیش از سیگنال دریافتی از مسیر مستقیم وارد گیرنده نشده و صحت آزمایش را دچار اختلال نمایند. عامل دیگری که موجب محدودیت طول پالس می‌شود، بسامد کاری کمینه است. برای مثال، در شرایطی که بسامد

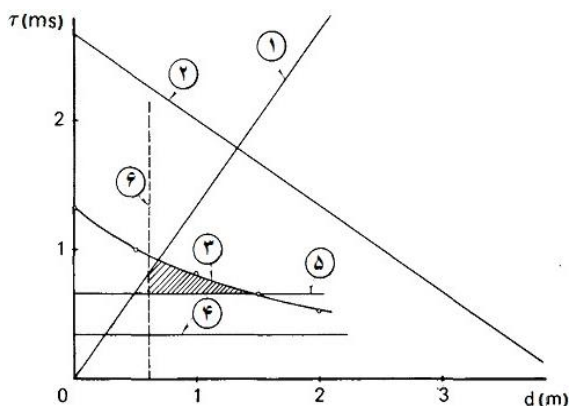
پیوسته^۵ تولید نماید، انجام کالیبراسیون در بسامدهای پایین مستلزم داشتن استخری با ابعاد بسیار زیاد خواهد بود که تحقق این امر نیز عمدتاً از منظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. یکی از رویکردهایی که برای تسهیل کالیبراسیون در استخرهایی با ابعاد کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهره‌گیری از روش پالس^۶ است [۱ و ۲].

در تحقیق حاضر ابتدا توضیحاتی در ارتباط با روابط حاکم بر روش پالس ارائه گردیده و در ادامه تأثیر ابعاد (طول، عرض و عمق) استخرهای تست هیدروآکوستیک بر کالیبراسیون هیدروفون به روش پالس، و محدودیت‌ها و الزاماتی که در این خصوص مطرح می‌باشند، مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

۲. شرح مبانی روش پالس

شکل ۱ نمایی شماتیک از یک مخزن آب با طول L ، عرض b و ارتفاع h را نشان می‌دهد که دو ترانسدیوسر (یک هیدروفون و یک پروژکتور^۷) با فاصله d از یکدیگر را درون خود جای داده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، امواج صوتی‌ایی که توسط پروژکتور تولید شده و به وسیله هیدروفون دریافت می‌شوند، مسیرهای متفاوتی را مشتمل بر مسیر مستقیم، انعکاس از دیوارهای جانبی و انعکاس از سطح و کف می‌پیمایند. انتشار امواج صوتی پیوسته توسط یک بلندگوی زیرآبی، موجب می‌شود که تمایز سیگنالی که از مسیر مستقیم به گیرنده وارد شده، از سیگنال‌هایی که پس از انعکاس از مرزها دریافت شده‌اند، دشوار و یا حتی ناممکن گردد. راه‌کاری که برای رفع این نقیصه ارائه گردیده، ارسال پالس‌های صوتی به جای امواج صوتی پیوسته می‌باشد [۱].

استخر اعمال می‌گردند با خطوط ۱ تا ۳ و الزامات ناشی از بسامد کمینه و بیشینه، با خطوط ۴ تا ۶ نمایش داده شده‌اند. ناحیه‌ای که در آن تمامی نامساوی‌های ارائه شده در روابط ۱ تا ۶ به‌طور همزمان برقرار باشند، موسوم به ناحیه کاربردی^{۱۲} است. این ناحیه مقدار مناسب طول پالس و فاصله ترانسدیوسرها را تعیین می‌کند. عدم وجود ناحیه کاربردی برای یک استخر با ابعاد و بسامد کاری مشخص، به منزله آن است که کالیبراسیون به روش پالس در استخر مزبور امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این صورت می‌بایست استخری با ابعاد مناسب طراحی نموده و یا بسامد بیشینه و کمینه را به‌گونه‌ای تعیین نمود که انجام کالیبراسیون میسر گردد [۱].



شکل ۲. ناحیه کاربردی در کالیبراسیون به روش پالس [۱].

هر چند پارامتر عرض استخر در روابط ۱ تا ۶ در ظاهر لحاظ نشده است، با این حال بر اساس مطالبی که بوهر^{۱۳} [۳]، در کتاب "اندازه‌گیری‌های الکتروآکوستیک زیرآبی"^{۱۴} عنوان نموده، تأثیر پارامتر عرض، مشابه با پارامتر عمق می‌باشد. بنابراین نتایجی که برای محاسبه کمینه عمق یک استخر تست در محدوده بسامدی خاص حاصل می‌شود را می‌توان به‌عنوان معیاری برای تعیین کمینه عرض آن استخر تست نیز به کار برد.

کمینه ۳ کیلوهرتز باشد، طول پالس در محدوده ارائه شده در رابطه ۴ می‌باشد [۱].

$$\tau \geq 0.33 \text{ (ms)} \quad (4)$$

به‌منظور اینکه سیگنال حالت پایا^۹ به‌گیرنده رسیده و دو ترانسدیوسر، حالت گذرا^{۱۰} نداشته باشند، حداقل طول پالس در عمل می‌بایست دو برابر مقدار ارائه شده در رابطه ۴ باشد [۱]. به این ترتیب، محدودیتی که بسامد کاری کمینه بر طول پالس اعمال می‌کند، به‌صورت نامساوی ارائه شده در رابطه ۵ خواهد بود.

$$\tau \geq 0.7 \text{ (ms)} \quad (5)$$

یکی از پارامترهای مهم دیگری که بر صحت نتایج کالیبراسیون به روش پالس تأثیرگذار می‌باشد، فاصله میان هیدروفون و پروژکتور است. برای حصول اطمینان از این که هیدروفون در ناحیه میدان - دور^{۱۱} قرار گرفته، نامساوی ارائه شده در رابطه ۶ می‌بایست ارضاء گردد [۱].

$$d \geq \frac{a^2}{\lambda} \quad (6)$$

در رابطه ۶ a نشان‌دهنده بزرگ‌ترین بعد پروژکتور و λ نیز کوتاه‌ترین طول موجی (بسامد بیشینه‌ای) است که در کالیبراسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال، در صورتی که بسامد بیشینه معادل ۱۰۰ کیلوهرتز بوده و از پروژکتوری که بزرگترین بعد آن معادل ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد استفاده گردد، و با در نظر گرفتن سرعت انتشار صوت زیرآب معادل ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، محدوده فاصله بین ترانسدیوسرها از رابطه ۷ حاصل می‌گردد [۱].

$$\begin{aligned} f &= 100 \text{ kHz} \\ \lambda &= \frac{c}{f} \\ \lambda &= \frac{1500}{10^5} = 15 \times 10^{-3} \\ d &\geq \frac{10^{-2}}{15 \times 10^{-3}} = 66 \text{ (cm)} \end{aligned} \quad (7)$$

شکل ۲ محدودیت‌هایی را که روابط ۱ تا ۷ تحمیل می‌کنند، ارائه می‌نماید. محدودیت‌هایی که در اثر ابعاد

۳. نتایج

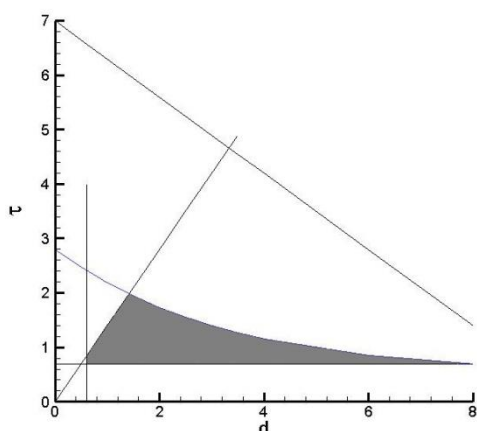
۳-۱. امکان‌سنجی کالیبراسیون

در این بخش امکان انجام کالیبراسیون به روش پالس با تکیه بر مبانی ارائه شده در بخش پیشین، در چند استخر هیدروآکوستیک نوعی با ابعاد گوناگون مورد بررسی قرار گرفته و در صورت امکان‌پذیر بودن کالیبراسیون، طول پالس (بر حسب میلی‌ثانیه) و فاصله مجاز میان ترانسدیوسرها (بر حسب متر) برای هر یک از استخرها در قالب نمودار ارائه می‌گردند.

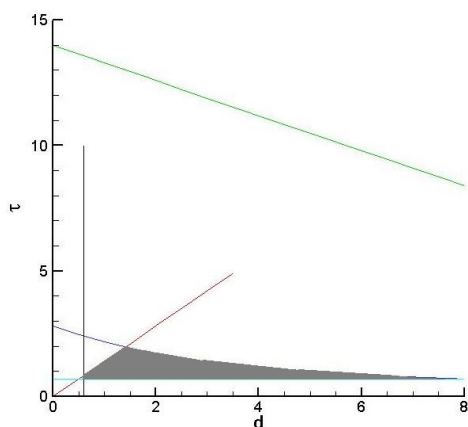
شکل‌های ۳ و ۴ ناحیه کاربردی را برای استخرهایی با ابعاد گوناگون (با ثابت ماندن عمق) در محدوده بسامدی ۳ تا ۱۰۰ کیلوهرتز نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود ناحیه کاربردی برای این استخرها حاکی از امکان‌پذیر بودن کالیبراسیون در آن‌ها می‌باشد. نکته دیگری که از این نمودارها برمی‌آید آن است که افزایش طول استخر در شرایطی که محدوده بسامدی و نیز عمق استخر ثابت باشد، تأثیر عمده‌ای در کالیبراسیون به روش پالس اعمال نمی‌کند.

شکل‌های ۵ الی ۸ محدودیت‌های موجود برای طراحی استخرهایی با ابعاد گوناگون در محدوده بسامدی ۱ تا ۲۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۵ با شکل ۴ نشان می‌دهد، کاهش بسامد کمینه از ۳ به ۱ کیلوهرتز منجر به عدم شکل‌گیری ناحیه کاربردی شده است. این امر بدان معناست که کالیبراسیون به روش پالس با بسامد کمینه ۱ کیلوهرتز در استخری با عمق ۴ متر امکان‌پذیر نبوده و می‌بایست عمق بیشتری را هنگام طراحی برای استخر لحاظ نمود. مطابق شکل‌های ۵ و ۶، افزایش عمق استخر از ۴ متر به ۶ متر، منجر به شکل‌گیری ناحیه کاربردی شده و همین امر انجام کالیبراسیون را ممکن می‌سازد. مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ روشن می‌سازد که با ثابت ماندن محدوده بسامدی و عمق استخر، طول استخر پارامتر مهمی به‌شمار

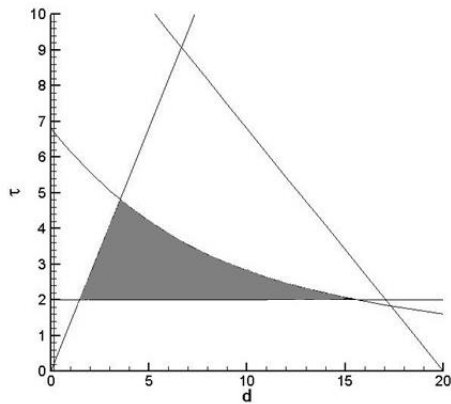
نیامده و افزایش آن از ۲۰ به ۴۰ متر، نقشی در شکل‌گیری و یا عدم شکل‌گیری ناحیه کاربردی نداشته است. علاوه بر این، افزایش طول استخر موجب تغییر محسوس فاصله مجاز ترانسدیوسرها نیز نشده است. با مقایسه شکل‌های ۶ و ۸ می‌توان این‌گونه استنباط نمود که با افزایش عمق در محدوده بسامدی معین، فاصله مجاز ترانسدیوسرها افزایش می‌یابد.



شکل ۳. ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی به ترتیب معادل ۱۰، ۶ و ۴ متر در محدوده بسامدی ۳ تا ۱۰۰ کیلوهرتز.



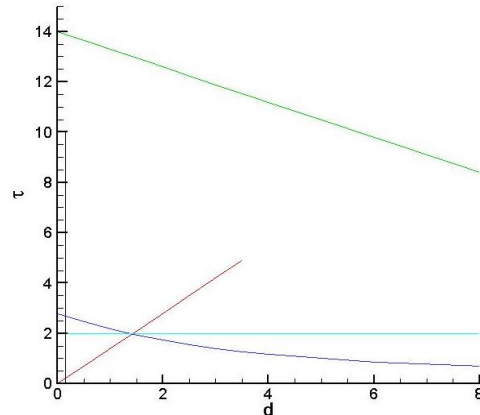
شکل ۴. ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی معادل ۲۰، ۱۰ و ۴ متر در محدوده بسامدی ۳ تا ۱۰۰ کیلوهرتز.



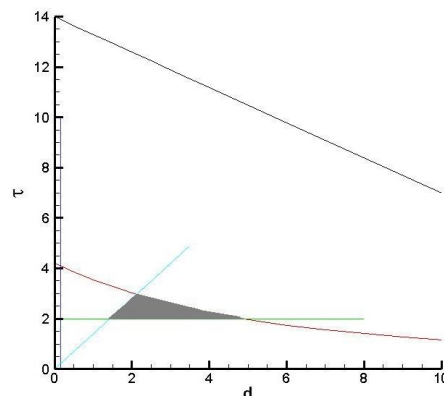
شکل ۸. ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی معادل ۲۰، ۱۰ و ۱۰ متر در محدوده بسامدی ۱ تا ۲۰ کیلوهرتز.

شکل‌های ۹ الی ۱۲ الزامات موجود برای طراحی استخرهایی با ابعاد گوناگون در محدوده بسامدی ۵۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۹ با شکل ۶ نشان می‌دهد که کاهش بسامد کمینه تا ۵۰۰ هرتز، امکان شکل‌گیری ناحیه کاربردی و کالیبراسیون را در استخری با عمق ۶ متر فراهم نمی‌آورد. افزایش عمق استخر تا عمق ۸ متر در شکل ۱۰ نیز تأثیری بر شکل‌گیری ناحیه کاربردی نخواهد داشت. لذا می‌بایست عمق بیشتری را برای استخر در نظر گرفت. مطابق شکل ۱۱، افزایش عمق استخر به ۹ متر موجب شکل‌گیری ناحیه کاربردی و امکان‌پذیر شدن کالیبراسیون به روش پالس می‌شود.

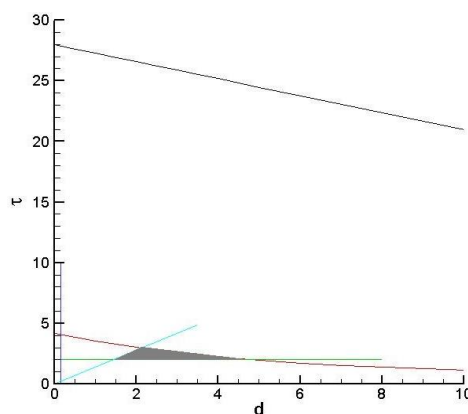
همان‌طور که پیش از این اشاره شد، نمودارهای به‌دست آمده از روش پالس علاوه بر این‌که امکان‌پذیر بودن کالیبراسیون را مشخص می‌سازند، محدوده فاصله مجاز میان ترانسدیوسرها را نیز تعیین می‌کنند. بر این اساس فاصله بین ترانسدیوسرها برای استخری که مشخصات آن در شکل ۱۱ بیان گردیده می‌تواند بین ۳ تا ۴ متر باشد. مطابق شکل ۱۲، با افزایش عمق استخر به ۱۰ متر، فاصله مجاز میان ترانسدیوسرها ۳ تا ۶ متر شده و نسبت به شکل ۱۱ افزایش یافته است. به عبارت دیگر می‌توان گفت، برای آن‌که کالیبراسیون به روش پالس با بسامد کمینه ۵۰۰ هرتز محقق گردد، داشتن استخری با عمق ۹ متر کفایت می‌کند،



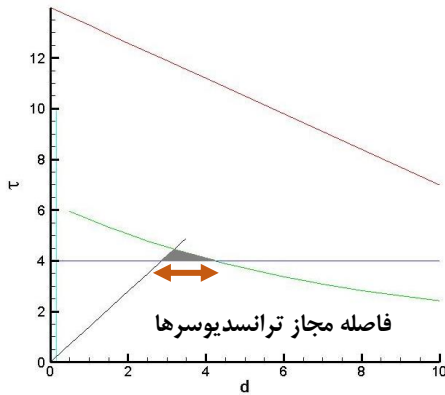
شکل ۵. عدم وجود ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی به ترتیب معادل ۲۰، ۱۰ و ۴ متر در محدوده بسامدی ۱ تا ۲۰ کیلوهرتز.



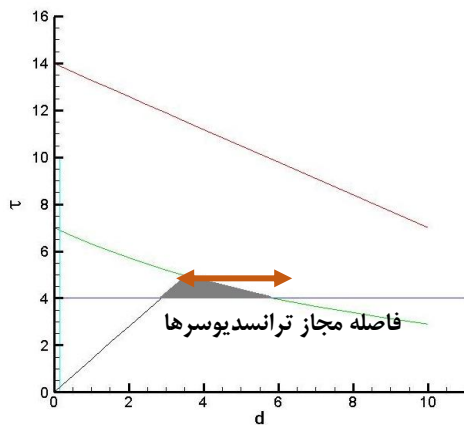
شکل ۶. ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی به ترتیب معادل ۲۰، ۱۰ و ۶ متر در محدوده بسامدی ۱ تا ۲۰ کیلوهرتز.



شکل ۷. ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی به ترتیب معادل ۴۰، ۱۰ و ۶ متر در محدوده بسامدی ۱ تا ۲۰ کیلوهرتز.



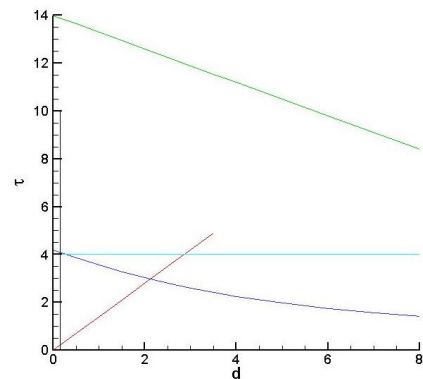
شکل ۱۱. ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی به ترتیب معادل ۲۰، ۱۰ و ۹ متر در محدوده بسامدی ۵۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز.



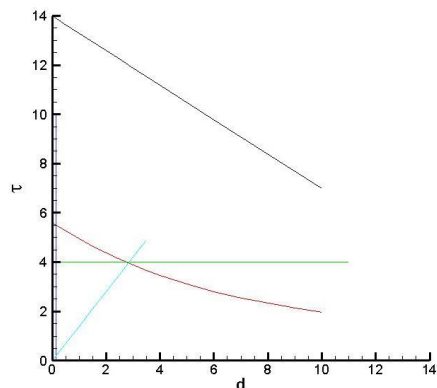
شکل ۱۲. ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی به ترتیب معادل ۲۰، ۱۰ و ۱۰ متر در محدوده بسامدی ۵۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز.

پس از بررسی امکان انجام کالیبراسیون به روش پالس در استخرهایی با ابعاد و بسامدهای کاری گوناگون، می‌بایست به این نکته اشاره نمود که تعیین ابعاد استخر و نیز مشخص نمودن طول پالس و محدوده فاصله ترانسدیوسرها برای استخرهای مزبور از راه دیگری نیز امکان‌پذیر است که در ادامه به آن اشاره می‌گردد.

اما از آن‌جا فاصله مجاز ترانسدیوسرها برای این استخر بسیار کم (تنها ۳ الی ۴ متر) می‌باشد، قدرت مانور برای انجام کالیبراسیون در چنین استخری پایین است. لذا می‌توان عمق را تا حدی که مقتضیات اقتصادی سازندگان استخر اجازه می‌دهد، افزایش داد. بدیهی است که افزایش عمق استخر تا ۱۰ متر و متعاقباً افزایش فاصله مجاز ترانسدیوسرها، قدرت مانور برای انجام کالیبراسیون را نیز افزایش خواهد داد.



شکل ۹. عدم وجود ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی به ترتیب معادل ۲۰، ۱۰ و ۶ متر در محدوده بسامدی ۵۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز.



شکل ۱۰. عدم وجود ناحیه کاربردی برای استخری با طول، عرض و عمقی به ترتیب معادل ۲۰، ۱۰ و ۸ متر در محدوده بسامدی ۵۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز.

۳-۲. تعیین مقادیر حدی برای ابعاد استخر

تست

روابطی که در این بخش ارائه می‌گردند، طراحان استخرهای هیدروآکوستیک را یاری می‌کنند تا کمینه ابعاد استخر خود را با توجه به بسامد کاری دلخواه خود مشخص نمایند. این روابط که در واقع بازنویسی روابط ۱ الی ۳ به‌شمار می‌آیند، تنها یک مقدار حدی را برای طول پالس و فاصله ترانسدیوسرها مشخص نموده و محدوده مجاز این کمیات را تعیین نمی‌کنند. در ادامه این روابط برای استخری با بسامد کاری کمینه ۵۰۰ هرتز و بسامد بیشینه ۲۰ کیلوهرتز ارائه می‌گردند.

قیدی که بسامد کاری کمینه بر طول پالس اعمال می‌کند، دقیقاً مشابه آن‌چه که در رابطه ۴ عنوان گردید، برای بسامد ۵۰۰ هرتز نیز قابل محاسبه بوده و از رابطه ۸ به‌دست می‌آید.

$$\tau \geq 2 \text{ (ms)} \quad (۸)$$

برای آن‌که علامت حالت پایا توسط هیدروفون دریافت گردد، طول پالس را می‌بایست دو برابر مقدار ذکر شده در رابطه ۸ در نظر گرفت. لذا قیدی که بسامد کمینه بر طول پالس اعمال می‌کند از رابطه ۹ قابل محاسبه است.

$$\tau \geq 4 \text{ (ms)} \quad (۹)$$

رابطه ۱ را می‌توان به‌صورت رابطه ۱۰ بازنویسی نموده و از آن برای محاسبه کمینه فاصله میان ترانسدیوسرها استفاده نمود.

$$d \geq \frac{\tau c}{2} = \frac{.004 * 1500}{2} = 3 \quad (۱۰)$$

از سوی دیگر، بازنویسی روابط ۲ و ۳، کمینه طول و عمق استخر را به‌دست می‌دهد که این موارد به‌ترتیب در روابط ۱۱ و ۱۲ ارائه گردیده‌اند.

$$L \geq \tau c + d = .004 * 1500 + 3 = 9 \quad (۱۱)$$

$$b = h \geq \sqrt{(\tau c + d)^2 - d^2} = \sqrt{(.004 * 1500 + 3)^2 - 3^2} = 8.48 \quad (۱۲)$$

به این ترتیب برای آن‌که انجام کالیبراسیون به روش پالس در محدوده بسامدی مذکور امکان‌پذیر گردد، می‌بایست استخری با طول، عرض و ارتفاعی به‌ترتیب معادل ۹، ۸/۴۸ و ۸/۴۸ متر در اختیار داشت. لازم به ذکر است که ابعاد یاد شده حداقل ابعاد استخر بوده و در صورتی که ابعاد استخر از این مقادیر تجاوز نماید نه تنها خللی در آزمایش‌ها ایجاد نمی‌گردد، بلکه افزایش ابعاد استخر به منزله افزایش محیط کاری و متعاقباً افزایش قدرت مانور در انجام آزمایش‌ها می‌باشد [۱]. بر اساس مرجع [۱] در صورتی که نسبت بین طول و عرض (یا عمق) استخر از رابطه ۱۳ تبعیت نماید، استخر مزبور شرایط کاری مطلوب‌تری را برای انجام آزمایش‌ها دارا می‌باشد.

$$\frac{L}{h} = \frac{L}{b} = 1.25 \quad (۱۳)$$

با استفاده از رابطه ۱۳ و با توجه به این‌که کمینه عمق (و عرض) استخر، ۸/۴۸ می‌باشد، استخری با طول ۱۰/۶ متر شرایط مناسب‌تری را برای انجام آزمایش‌ها فراهم می‌آورد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با تکیه بر مبانی ریاضی حاکم بر کالیبراسیون هیدروفون به روش پالس، ابتدا شکل‌گیری و عدم شکل‌گیری ناحیه کاربردی برای استخرهایی با ابعاد و نیز بسامدهای کاری مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در مرحله بعد نیز مقادیر حدی برای استخری با بسامد کاری کمینه ۵۰۰ هرتز و بسامد بیشینه ۲۰ کیلوهرتز، تعیین گردید. نتایج حاکی از آن است که ابعاد و بسامد کاری استخر تست هیدروآکوستیک، اثرات مشهودی را بر روند کالیبراسیون اعمال می‌کنند که جزئیات آن به شرح ذیل می‌باشد:

۱. تشکیل ناحیه کاربردی به معنای امکان‌پذیر بودن آزمایش کالیبراسیون به روش پالس است.

۲. عامل عمق بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری و یا عدم شکل‌گیری ناحیه کاربردی دارا می‌باشد.
۳. کاهش بسامد کاری مستلزم داشتن استخری با عمق بیشتر است.

۴. در استخرهایی که امکان انجام کالیبراسیون در آنها وجود دارد، در یک محدوده بسامدی معین، فاصله مجاز ترانسدیوسرها با افزایش عمق، افزایش می‌یابد.
کاهش بسامد کاری استخر (به شرط ثابت ماندن ابعاد) موجب کاهش فاصله مجاز ترانسدیوسرها می‌گردد.

۵. مأخذ

- [1] Bruel & Kjaer, "Technical review to advance techniques in acoustical, electrical and mechanical measurement", 1973, No. 1, pp. 3-16.
[2] Au, W. W. L., M. C. Hastings, "Principles of Marine Bioacoustics," New York, Springer, 2008.
[3] Bobber, J. R., "Underwater electroacoustic measurements", Orlando, Naval research laboratory", 1970, pp. 168-169.

پی نوشت

1. Free Field Sensitivity

۲. شرایط میدان آزاد زمانی حاصل می‌شود که امواج صوتی بدون برخورد با مانع، ادامه‌ی مسیر داده و هیچ‌گونه انعکاسی از مرزها نداشته باشند.

۳. Hydroacoustic Test Pool

۴. Anechoic Pool

۵. (Continuous Wave) امواج صوتی پیوسته به امواجی اطلاق می‌گردند که بلاانقطاع توسط مولد صدا تولید می‌گردند. عبارت موج پیوسته معمولاً در مقابل پالس صوتی به کار می‌رود که حکایت از امواجی دارد که به صورت مقطعی و در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه از سوی مولد انتشار می‌یابند.

۶. Pulse Technique

۷. Projector

۸. Pulse Length (Duration)

۹. Steady State

۱۰. Transient

۱۱. امواج صوتی گسیل‌شده از یک منبع نقطه‌ای (Point Source)، در فواصل نزدیک به منبع که به ناحیه میدان- نزدیک (Near-Field) موسوم است، به صورت امواج کروی (Spherical Wave) منتشر می‌شوند. این در حالی است که اگر به اندازه کافی از منبع صدا فاصله بگیریم، می‌توان امواج صوتی را با تقریب مناسبی امواج تخت (Plane Wave) تلقی نمود. فواصلی که این تقریب در ارتباط با آنها صادق است، ناحیه میدان- دور (Far-Field) نامیده می‌شوند.

12. Working Area

13. Bobber

14. Underwater Electroacoustic Measurements