

دوفصلنامه هیدروفیزیک

دوره چهارم، شماره اول (بهار و تابستان ۱۳۹۷)

بررسی و مقایسه تجربی و تئوری میزان گذردهی آکوستیکی بدنه شناورهای کامپوزیتی

مهرداد بهزادی^۱، رضا مردانی^{۲*}

behzadi52@yahoo.com

mardani_r@mut.ac.ir

^۱ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۹

چکیده

امواج آکوستیکی ناشی از کارکرد موتور و بقیه تجهیزات داخلی شناور، در صورت عبور از بدنه کامپوزیتی، موجب تشخیص شناور توسط مین‌های دریایی به‌ویژه مین‌های آکوستیکی می‌شود. در نتیجه کنترل و کاهش میزان صوت عبوری از بدنه شناور در مناطق عملیاتی مین‌گذاری شده، اهمیت حیاتی دارد. در این تحقیق با توجه به اهمیت عبور امواج آکوستیکی از بدنه شناورهای خاص، میزان عبور امواج آکوستیکی از مواد مختلف کامپوزیتی با ساختارهای لایه‌ای و ساندویچی در آب به صورت‌های تئوری و تجربی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. برای انجام آزمون‌ها، پنج عدد صفحه کامپوزیتی ساخته شده و پس از قراردادن آن‌ها در آب، میزان عبور امواج آکوستیکی از هر صفحه در دو بازه فرکانسی مختلف به صورت مجزا اندازه‌گیری شده است. نمونه اول پانل ساندویچی با هسته فوم پی‌وی‌سی و پوسته‌هایی مرکب از الیاف شیشه و کربن، نمونه دوم دارای ساختار لایه‌ای شامل چند لایه الیاف شیشه، نمونه سوم مانند نمونه دوم اما با تعداد لایه‌های بیشتر، نمونه چهارم پانل ساندویچی با هسته چوب بالسا و پوسته‌هایی شامل الیاف شیشه و نمونه آخر مانند نمونه چهارم اما با هسته فوم پی‌وی‌سی انتخاب شده است. در پایان نتایج مربوط به صفحه‌ها به صورت نمودار بیان شده و مقایسه‌های موردنیاز و کاربردی بین نتایج تجربی و محاسبات تئوری صورت گرفته است. نمونه‌های اول و آخر قابلیت جذب بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارند حتی نمونه اول که دارای الیاف کربن است، قابلیت آن کمی بهتر از نمونه آخر می‌باشد. قابل توجه است که نتایج به دست آمده نقش مهمی در انتخاب مواد کامپوزیتی و طراحی مناسب بدنه شناور کامپوزیتی دارد.

واژه‌های کلیدی: شناور کامپوزیتی، گذردهی آکوستیکی، مواد کامپوزیتی، ساندویچ پانل

۱. مقدمه

مین‌های دریایی قرار دارد، به همین علت ساختار و سیستم‌های آن باید طوری باشد که موجب تحریک مین‌ها

شناور ویژه کامپوزیتی به دلیل نوع عملیات، در معرض انفجار

در سال ۲۰۰۱ میلادی یانگ و همکاران، تحقیقی روی مواد کامپوزیتی چندلایه متخلخل جدید که از پلیمر، فلز و الیاف پلیمر با دمای ذوب پایین ساخته شده است، انجام دادند. این ماده با استفاده از پیش ترکیب مواد، لایه چینی، پیش گرمایش و روش های قالب گیری، ساخته می شود و ضریب جذب آکوستیکی بسیار زیادی در بازه بسامدی ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز دارد. با استفاده از ساختار این نوع ماده، مدلی ریاضی که به وسیله پنج پارامتر قطر الیاف، چگالی الیاف، سطح الیاف، میزان تخلخل و بسامد پیکربندی می شود، برای پیش بینی میزان جذب صدا ارائه شده است. از این روش برای طراحی مواد جدید از این نوع که کیفیت های بهتری در بسامدهای ویژه دارند می توان استفاده نمود [۱]. در سال ۲۰۰۸ میلادی کو و همکاران گذردهی آکوستیکی از یک صفحه کامپوزیتی را با مدل دو و سه بعدی محاسبه کرده و با نتایج تجربی مقایسه نمودند [۲]. در سال ۲۰۱۰ میلادی، تأثیر پارامترهای گوناگون طراحی مانند چگالی و جنس هسته و ابعاد سلول ها بر سرعت گسترش موج در سازه ساندویچ لانه زنبوری توسط پیترز و همکاران به صورت تجربی مورد تحلیل قرار گرفته است. سرعت امواج خمشی و پیچشی اندازه گیری و ارتباط آن ها با بازده افت انتقال تعیین شد. نتایج نشان داد بیشترین تأثیر بر سرعت امواج از سوی عامل مدول برشی هسته است و درعین حال ابعاد سلول ها تأثیر چندانی بر افت انتقال ندارد. همچنین ماده پوسته تنها بر سرعت امواج در حالت خمش خالص تأثیر دارد [۳]. در سال ۲۰۱۲ میلادی شن و همکاران یک مدل تنوری بر اساس روش المان محدود برای محاسبه میزان گذردهی آکوستیکی از صفحه ساندویچی ارائه دادند که با نتایج تجربی موجود تطابق خوبی داشت [۴]. سارجانیس و همکاران در سال ۲۰۱۲ تأثیر هسته ساندویچ پانل با پوسته کربن را روی عدد موج و میزان میرایی ارتعاش بررسی کردند [۵، ۶]. البته تحقیقاتی در خصوص ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری نیز انجام شده است اما به دلیل داشتن تخلخل و نفوذپذیری، کاربرد این هسته ها در صنایع دریایی متداول نیست [۷، ۸]. همچنین کنوزل و همکاران ساندویچ پانل های با هسته و پوسته مختلف را به صورت تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار داده اند [۹].

نشود. یکی از این روش ها استفاده از شناور اثر سطحی است. این نوع شناورها نسبت به شناورهای متداول، آبخور کمی دارند و در نتیجه علاوه بر تحریک کم تر مین های دریایی، در صورت انفجار نیز میزان آسیب وارد شده به شناور بسیار کم است. در شکل ۱ نمونه ای از شناور اثر سطحی در حین عملیات مشاهده می شود. امواج آکوستیکی ناشی از موتور و بقیه تجهیزات داخلی شناور، در صورت عبور از بدنه کامپوزیتی، باعث تشخیص شناور توسط مین های مجهز به حس گر آکوستیکی می شود. در نتیجه کنترل و کاهش میزان صوت عبوری از بدنه شناور در مناطق عملیاتی مین گذاری شده، اهمیت حیاتی دارد.



شکل ۱: شناور کامپوزیتی و بعضی تهدیدهای دریایی

از دو روش متفاوت می توان برای کاهش شدت صداهای ناخواسته استفاده نمود: کنترل غیرفعال و فعال. در روش غیرفعال از مواد ویژه جاذب صوت مانند فوم، الیاف شیشه و مانند آن ها، برای جذب انرژی استفاده می شود؛ اما این روش ها برای کاهش صدای با بسامد پایین، به دلیل طول موج بلند، کارایی کمی داشته مگر اینکه از مواد با ضخامت بسیار زیاد استفاده شود. از طرف دیگر روش های فعال که بر پایه کاهش صوت با استفاده از ایجاد موج آکوستیکی با فاز معکوس و برهم نهی آن با موج اصلی است، قابلیت بالایی در کاهش صداهای با بسامد کم دارد. با این حال این روش در فضای سه بعدی، تنها برای استفاده محدود محلی قابل استفاده است، همچنین برای بسامدهای بالا محدودیت دارد.

جدول ۱. نحوه لایه گذاری صفحه های کامپوزیتی

No.	Material	Layer(s)
1	Carbon 200 woven	1
	E-Glass 200 woven	5
	E-Glass 150 Mat	1
	PVC AIREX C71.55 (30 mm)	1
	E-Glass 150 Mat	1
	E-Glass 200 woven	5
2	Carbon 200 woven	1
	E-Glass 150 Mat	1
	E-Glass 200 woven	5
3	E-Glass 150 Mat	1
	E-Glass 200 woven	5
	E-Glass 150 Mat	2
	E-Glass 200 woven	5
	E-Glass 150 Mat	1
4	E-Glass 150 Mat	1
	E-Glass 200 woven	5
	E-Glass 150 Mat	1
	PRO Balsa LD7 (30 mm)	1
	E-Glass 150 Mat	1
	E-Glass 200 woven	5
5	E-Glass 150 Mat	1
	E-Glass 200 woven	5
	E-Glass 150 Mat	1
	PVC AIREX C71.55 (30 mm)	1
	E-Glass 150 Mat	1
	E-Glass 200 woven	5
	E-Glass 150 Mat	1

برخورد یک موج تخت به یک صفحه با ابعاد بی نهایت، شرایط مطلوبی برای اندازه گیری ضریب های بازتاب، عبور و سایر پارامترهای آکوستیکی آن صفحه ایجاد می نماید؛ اما اندازه گیری ها اغلب روی صفحه هایی با ابعاد محدود انجام می شود و این شرایط، محدودیت هایی را بر اندازه گیری ها وارد می سازد. یکی دیگر از عوامل به وجود آورنده خطا، تخت نبودن جهت موج تابشی است. یک موج کروی می تواند باعث ایجاد انحراف در اندازه گیری ضریب عبور نسبت به موج تخت شود [۱۰]. علاوه بر شناورها سازه های مختلف دریایی نیز می توانند از کامپوزیت هایی ساخته شوند که مانع انتشار نویز آکوستیکی شده و در بحث های مختلف از انفجار مین گرفته تا زندگی جانداران دریایی تأثیر گذار باشند در این خصوص ساترلند در سال ۲۰۱۸ مطالعه مروری کاملی در این خصوص انجام داده است [۱۱].

۲. مواد و روش ها

در این تحقیق با توجه به اهمیت عبور امواج آکوستیکی از بدنه شناورهای دریایی، به ویژه شناورهای کامپوزیتی با کاربرد خاص، میزان عبور امواج آکوستیکی از مواد مختلف کامپوزیتی با ساختارهای لایه ای و ساندویچی در آب مورد ارزیابی قرار گرفته است و پس از انجام آزمون های مورد نیاز و محاسبات تئوری مربوطه، مواد مختلف با یکدیگر مقایسه و ترکیب مناسب پیشنهاد شده است.

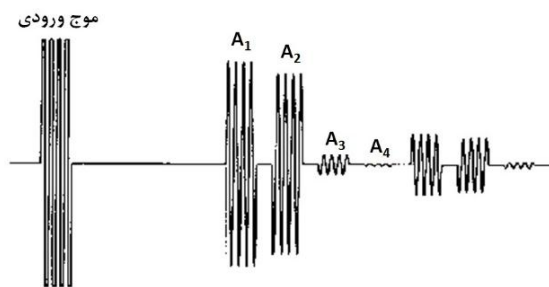


شکل ۲. صفحه های کامپوزیتی ساخته شده شماره ۱ و ۴

در چیدمانی لازم برای اندازه گیری پارامترهای آکوستیکی صفحه ها مانند ضریب عبور، بازتاب و جذب، نمونه باید ضخامتی حدود ده برابر طول موج در بسامد مورد استفاده را داشته باشد. این به آن علت است که امواج آکوستیکی منعکس شده ناشی از بازتاب های پشت سر هم در درون نمونه از یکدیگر قابل جداسازی باشند. برای انجام آزمون ها، تعداد پنج صفحه کامپوزیتی مطابق با لایه گذاری جدول شماره ۱ با رزین اپوکسی و به روش کیسه خلأ با ابعاد ۵۰×۵۰ سانتی متر مربع ساخته و پس از قراردادن آن ها در آب، میزان عبور امواج آکوستیکی از هر صفحه در دو بازه فرکانسی مختلف به صورت مجزا اندازه گیری شده است. در شکل ۲ تعدادی از صفحه های کامپوزیتی ساخته شده نمایش داده شده است.

که قطر دیافراگم در حدود ده برابر طول موج مورد نظر باشد. از یک قاب عایق آکوستیکی برای عمود نگه داشتن نمونه استفاده شد.

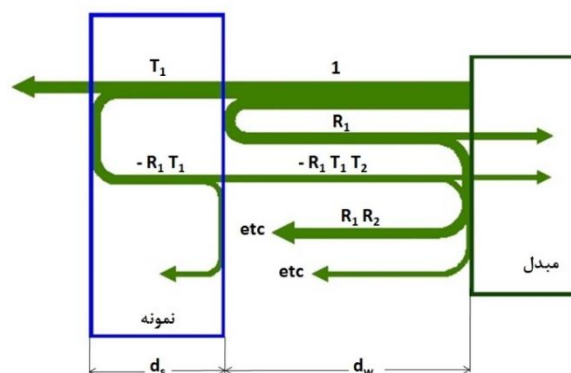
زمانی که امواج آکوستیکی به یک صفحه در آب برخورد می کند اکوهای شبیه شکل ۵ در خروجی ایجاد می شود. چهار اکوی اول که با A_1, A_2, A_3, A_4 مشخص می شوند، ناشی از موجی است که فقط یک بار در آب بین منبع و نمونه حرکت کرده است.



شکل ۵: نمونه‌ای از سیگنال‌های آکوستیکی اندازه‌گیری شده [۱۲]

A_1 ناشی از بازتاب از سطح جلویی نمونه، A_2 ناشی از بازتاب از سطح پشتی نمونه و A_3 و A_4 ناشی از بازتاب متوالی درون نمونه است. گروه چهار اکوی بعدی در قطار اکوها، ناشی از تکرار بازتاب اکوهای اولیه پس از انعکاس‌های متوالی بین منبع و نمونه مورد آزمایش است. فرض کنیم مانند شکل ۶ منبع صوت، یک موج با دامنه واحد تولید کند و سیگنال تولید شده درون آب حرکت کرده تا اینکه به ناحیه ناپیوستگی امپدانسی در سطح تماس آب و نمونه برخورد نماید.

سطح آب

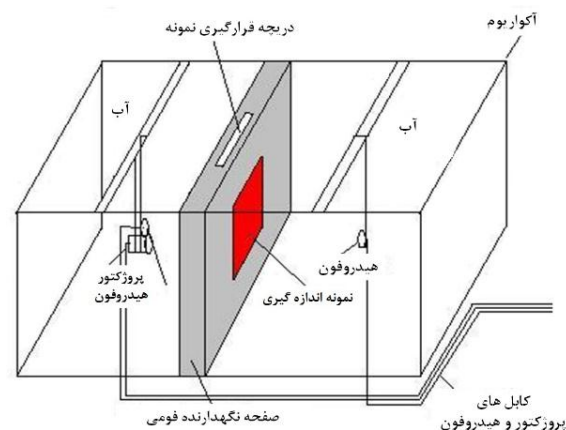


شکل ۶: موج ورودی به صفحه و اکوهای پی‌درپی ایجاد شده درون نمونه [۱۲]

نمونه اول پانل ساندویچی با هسته فوم پی‌وی‌سی و پوسته‌هایی مرکب از الیاف شیشه و کربن، نمونه دوم دارای ساختار لایه‌ای شامل چند لایه الیاف شیشه، نمونه سوم مانند نمونه دوم اما با تعداد لایه‌های بیشتر، نمونه چهارم پانل ساندویچی با هسته چوب بالسا و پوسته‌هایی شامل الیاف شیشه و نمونه آخر مانند نمونه چهارم اما با هسته فوم پی‌وی‌سی انتخاب شد. پس از تهیه نمونه‌ها، یک سیستم اندازه‌گیری مناسب طراحی و ساخته شد. شماتیکی از این سیستم در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳: چیدمان اندازه‌گیری در حوضچه



شکل ۴: شماتیک چیدمان اندازه‌گیری در حوضچه

این سیستم شامل یک مخزن آب، قاب نگهدارنده نمونه و دو عدد ترانس دیوسر آکوستیکی (پروژکتور و هیدروفون) برای تولید و دریافت صوت در بازه فرکانسی دلخواه است. پروژکتور شامل دو ترانس دیوسر مستقل کالیبره شده در بازه فرکانسی ۲ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۷۰ کیلوهرتز بوده و هیدروفون ساخت شرکت B&K مدل 8104 دارای محدوده فرکانسی ۰/۱ هرتز تا ۱۲۰ کیلوهرتز است. برای رسیدن به امواج تخت باید از پروژکتور با دیافراگم تخت استفاده نمود به گونه‌ای

اندازه گیری این تأخیر زمانی باید به این نکته توجه داشت که A2 نسبت به A1 معکوس شده است. این به آن معنا است که اگر از یک شکست اولیه جلو رونده مثبت به عنوان مبنای زمانی برای A1 استفاده کنیم، باید به یک شکست اولیه جلو رونده منفی برای A2 توجه کنیم. اغلب اوقات مواد با افت بالا شکل A2 را عوض می کنند و تعیین زمان را سخت می نمایند [۱۲، ۱۳].

با داشتن چگالی نمونه ρ_s و سرعت صوت در نمونه C_s می توان امپدانس مشخصه نمونه را محاسبه نمود:

$$Z_s = \rho_s C_s \quad (۴)$$

برای فرکانس های خیلی بالا سرعت صوت در ساندویچ پانل ها از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_s = \sqrt{2\pi f} \sqrt{\frac{B_f}{m_f + \frac{1}{2}m_c}} \quad (۵)$$

که در آن f فرکانس برحسب هرترز، B_f ضریب سختی پوسته برحسب نیوتن متر، m_f و m_c به ترتیب جرم واحد سطح پوسته و هسته برحسب کیلوگرم بر مترمربع است.

اکنون با محاسبه Z_w (امپدانس آکوستیکی آب) بر اساس فرمول زیر، می توان کمیت های T_1 ، T_2 و R را محاسبه کرد.

$$Z_w = \rho_w C_w \quad (۶)$$

که در آن ρ_w چگالی آب (معادل ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و C_w سرعت صوت در آب (معادل ۱۴۸۴ متر بر ثانیه) است [۱۴، ۱۵]. در این تحقیق مقادیر T_2 به صورت عملی و تئوری به دست آمده و با هم مقایسه شده اند. در نمودارها این پارامتر با T نشان داده شده است.

۴. نتایج و بحث

پس از انجام آزمون ها و محاسبات نظری مورد نیاز، نمودارهای مربوط به هر صفحه ترسیم شد. در شکل های ۷ تا ۱۳ نمودارهای میزان عبور صوت از صفحه های مورد آزمایش با هم و با نتایج تحلیلی مقایسه شده است.

اگر Z_s امپدانس آکوستیکی نمونه و Z_w امپدانس آکوستیکی آب باشد در این صورت، ضریب بازتاب R_1 (نسبت دامنه موج بازتابی به موج تابشی که کمیتی حقیقی است) در سطح جدایی از رابطه زیر به دست می آید:

$$R_1 = \frac{Z_s - Z_w}{Z_s + Z_w} \quad (۱)$$

در این حالت بخشی از موج آکوستیکی تابشی نیز به داخل نمونه نفوذ می کند. دامنه موج عبوری با ضریب گذردهی T_1 و به شکل زیر تعریف می شود:

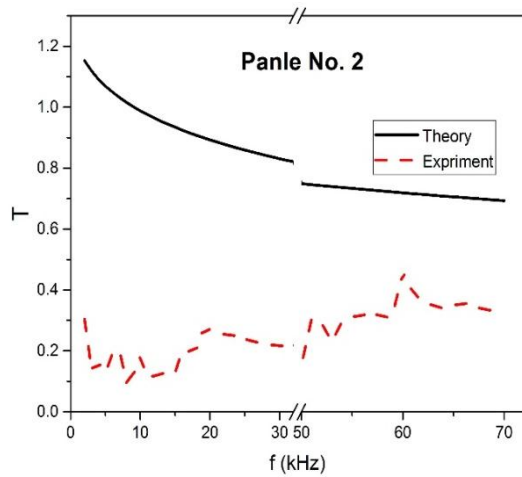
$$T_1 = \frac{2Z_s}{Z_s + Z_w} = 1 + R_1 \quad (۲)$$

پس از ورود سیگنال به داخل قطعه، بخشی از آن از سطح دیگر نمونه خارج می شود و بخشی نیز به سمت داخل نمونه بازتاب می یابد. ضریب بازتاب در سطح پشتی نمونه به سادگی برابر با $-R_1$ است. زمانی که این موج بازتابیده بار دیگر به سطح جلویی برخورد می کند، بخشی از آن بازتاب می یابد و بخش دیگر آن به درون آب نفوذ می کند. ضریب گذردهی در این حالت برابر است با:

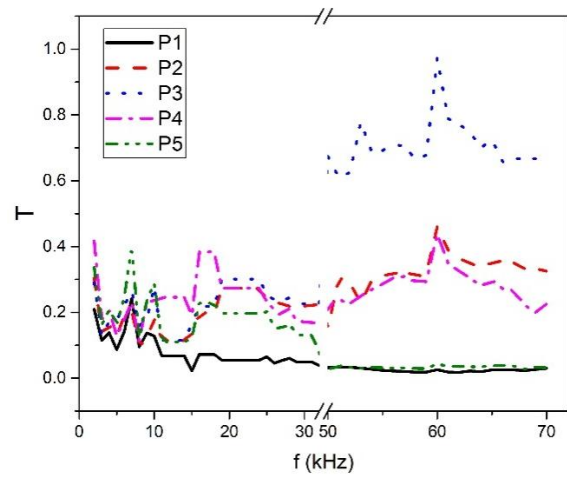
$$T_2 = \frac{2Z_w}{Z_s + Z_w} = 1 - R_1 \quad (۳)$$

این بخش از موج در قطار اکوها، اکویی با دامنه A2 تولید می کند. جز در حالتی که مبدل به طور کامل با آب تطبیق امپدانس داده شده باشد، بخشی از امواج بازگشت شده به مبدل بازتابیده می شود. این مسئله دلیل حضور مجموعه بعدی پالس ها در قطار موج است. ضریب بازتاب مبدل R_2 تابع مختلطی از بسامد است. به همین دلیل بهتر است، مبدل به جای اینکه در تماس با نمونه قرار گیرد، به طور کامل در آب غوطه ور باشد. اگر به دنبال اندازه گیری دقیق تضعیف آکوستیکی مواد باشیم، باید ضریب بازتاب را در دو طرف نمونه بدانیم.

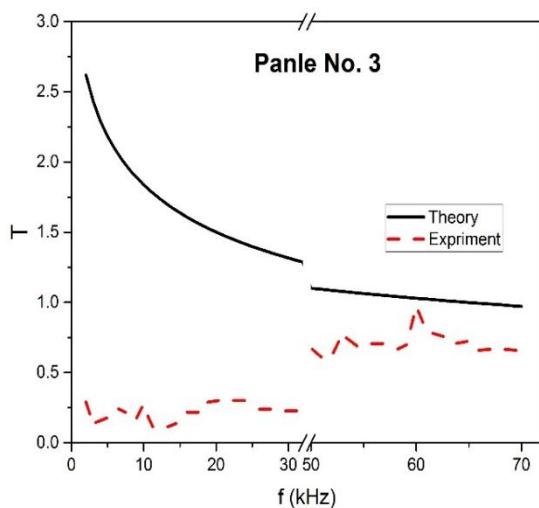
زمانی که نمونه در حوضچه آب قرار دارد دامنه های A1 و A2 با تأخیر زمانی بین آنها ثبت می شود. این تأخیر زمانی متناظر با زمان انتشار سیگنال درون نمونه است. در هنگام



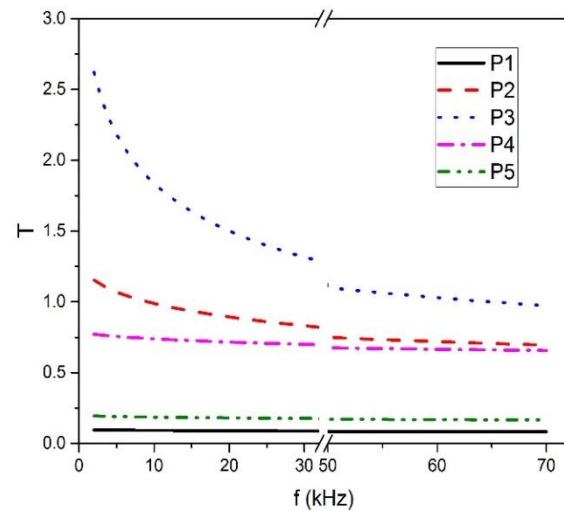
شکل ۱۰. مقایسه تجربی و تحلیلی گذردهی آکوستیکی برحسب فرکانس مربوط به صفحه شماره ۲ در بازه‌های فرکانسی ۲-۳۲kHz و ۵۰-۷۰kHz



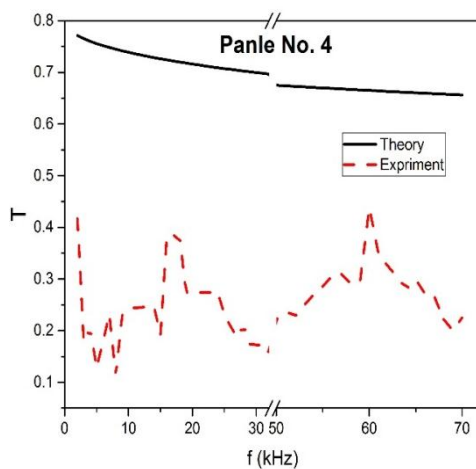
شکل ۷. مقایسه گذردهی آکوستیکی برحسب فرکانس مربوط به پنج صفحه آزموده شده در بازه‌های فرکانسی ۲-۳۲kHz و ۵۰-۷۰kHz به صورت تجربی



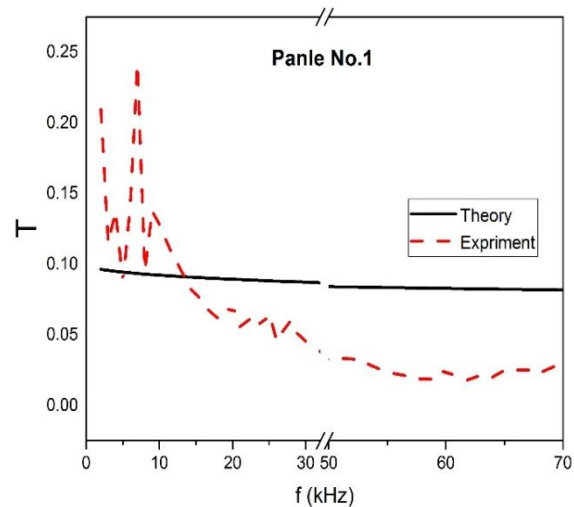
شکل ۱۱. مقایسه تجربی و تحلیلی گذردهی آکوستیکی برحسب فرکانس مربوط به صفحه شماره ۳ در بازه‌های فرکانسی ۲-۳۲kHz و ۵۰-۷۰kHz



شکل ۸. مقایسه گذردهی آکوستیکی برحسب فرکانس مربوط به پنج صفحه در بازه‌های فرکانسی ۲-۳۲kHz و ۵۰-۷۰kHz به صورت تحلیلی



شکل ۱۲. مقایسه تجربی و تحلیلی گذردهی آکوستیکی برحسب فرکانس مربوط به صفحه شماره ۴ در بازه‌های فرکانسی ۲-۳۲kHz و ۵۰-۷۰kHz



شکل ۹. مقایسه تجربی و تحلیلی گذردهی آکوستیکی برحسب فرکانس مربوط به صفحه شماره ۱ در بازه‌های فرکانسی ۲-۳۲kHz و ۵۰-۷۰kHz

تطابق رفتار نمودارهای مقایسه‌ای تجربی و تئوری قابل قبول بوده و انحراف موجود مربوط به شرایط آزمایش نمونه‌ها و فرضیه‌های موجود در فرمول‌های استفاده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمون‌ها و محاسبات انجام شده، نتایج زیر به دست آمد که می‌تواند در طراحی سازه کامپوزیتی بدنه اصلی شناور مورد استفاده قرار گیرد:

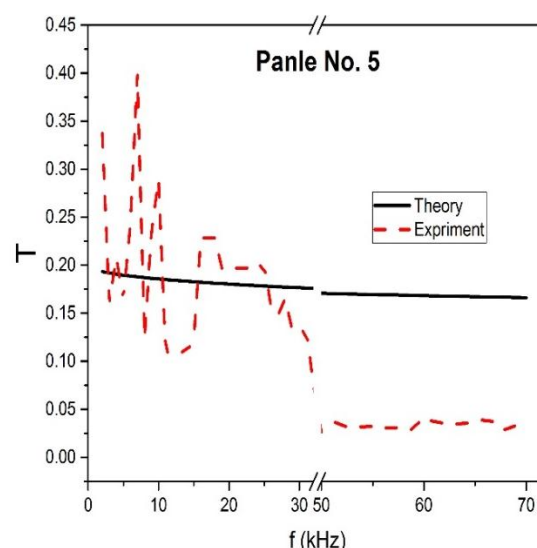
✓ استفاده از هسته فوم PVC از هسته چوب بالسا بهتر است؛

✓ استفاده از لایه‌های الیاف کربن در ساختار پوسته بدنه ساندویچی شناور در کاهش گذردهی آکوستیکی بسیار مؤثر است؛

✓ استفاده از الیاف شیشه در کاهش گذردهی آکوستیکی تأثیر چندانی ندارد و با توجه به ویژگی‌ها و قیمت مناسب، برای استحکام دادن به سازه بدنه شناور به کار می‌رود.

مراجع

- [1] Yang TL, Chiang DM, Chen R. Development of a novel porous laminated composite material for high sound absorption. *Journal of Vibration and Control*. 2001 Jul;7(5):675-98.
- [2] Kuo YM, Lin HJ, Wang CN. Sound transmission across orthotropic laminates with a 3D model. *Applied Acoustics*. 2008 November; 69(11): 951-59.
- [3] Peters P, Nutt S. Wave speeds of honeycomb sandwich structures: An experimental approach. *Applied Acoustics*. 2010 February; 71(2): 115-19.
- [4] Shen C, Xin FX, Lu TJ. Theoretical model for sound transmission through finite sandwich structures with corrugated core. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2012 Dec 1;47(10):1066-72.
- [5] Sargianis J, Suhr J. Core Material Effect on wave number and vibrational damping characteristics in carbon fiber sandwich composites. *Composite Science and Technology*. 2012 August; 72(13): 1493-99.
- [6] Sargianis J, Suhr J. Effect of core thickness on wave number and damping properties in



شکل ۱۳. مقایسه تجربی و تحلیلی گذردهی آکوستیکی بر حسب فرکانس مربوط به صفحه شماره ۵ در بازه‌های فرکانسی ۲-۳۲kHz و ۵۰-۷۰kHz

با توجه به نمودارهای گذردهی آکوستیکی به دست آمده از پنج صفحه آزموده شده می‌توان نتیجه گرفت که در بازه فرکانسی ۲-۳۲kHz صفحه شماره ۱ کمترین عبور آکوستیکی را دارد. در بازه فرکانسی ۲-۱۰kHz صفحه شماره ۵ و در بازه فرکانسی ۱۰-۲۰kHz صفحه شماره ۴ و در بازه فرکانسی ۲۰-۳۰kHz صفحه شماره ۳ بیشترین عبور آکوستیکی را دارند. همچنین در بازه فرکانسی ۵۰-۷۰kHz صفحه شماره ۱ کمترین عبور آکوستیکی و صفحه شماره ۳ بیشترین عبور را داشته است. بنابراین با در نظر گرفتن نتایج آزمون‌ها و محاسبات تحلیلی، در بازه‌های فرکانسی اندازه گیری شده بهترین صفحه از نظر عدم عبور امواج آکوستیکی صفحه شماره ۱ است. از آنجا که ضخامت صفحه‌های شماره ۱، ۴ و ۵ یکسان بوده و فرم هندسی آن‌ها نیز یکسان است و با توجه به نمودارهای آکوستیکی با قطعیت می‌توان نتیجه گرفت که رفتار صفحه شماره ۱ نسبت به ۴ و ۵ از نظر عدم عبور امواج آکوستیکی در بازه‌های فرکانسی آزمایش شده، بهترین است. همچنین با توجه به نمودارهای به دست آمده برای صفحه‌های ۲ و ۳ که فاقد هسته و دارای ضخامت‌های متفاوت اند می‌توان چنین استنباط نمود که رفتار صفحه شماره ۲ نسبت به شماره ۳ (صفحه ضخیم‌تر) از نظر عدم عبور امواج آکوستیکی بهتر است. لازم به ذکر است که

- sandwich composites. Composite Science and Technology. 2012 March;72(6): 724-30.
- [7] Rajaram S, Wang T, Nutt S. Sound transmission loss of honeycomb sandwich panels. Noise Control Eng. 2006 Mar/Apr; 54(2): 106-15.
- [8] Ng CF, Hui CK. Low frequency sound insulation using stiffness control with honeycomb panels. Applied Acoustics. 2008 April; 69(4):293-301.
- [9] Schaniel G, Morgenthaler, Knusel T, Butikofer R, Meier U. Analysis of Sound Transmission Loss of Sandwich Structures with Different Core Materials. Switzerland, Pilatus: Aircraft Ltd; 2006. (vol.27)
- [10] Viscardi M, Napolitano P. Numerical prediction and experimental validation of sound transmission loss for sandwich panels. Computer and Mathematics in Automation and Materials Science. 2014; 22: 117-22.
- [11] Sutherland LS. A review of impact testing on marine composite materials: Part I – Marine impacts on marine composites. Composite Structures. 2018 March;188: 197-208.
- [12] Selfridge AR. Approximate Material Properties in Isotropic Materials. Sonics and Ultrasonics. 1985 May; 32(3): 381-94.
- [13] Kinsler LE, Frey AR, Coppens AB, James V. Fundamental of acoustics. 4rd ed. Wiley-VCH: USA; 1999. p.175-85.
- [14] Urick RJ. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. McGraw-Hill: USA; 1983. p.160-90.
- [15] Available from: <https://www.diabgroup.com>