



بررسی تجربی نشت امواج لمب از یک صفحه به مایعات مجاور با استفاده از حسگرهای ارزان قیمت

سید امیر حسینی سبزواری*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

چکیده

صفحات نازک به صورت گسترده در سازه‌ها و تجهیزات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتشار امواج لمب در این صفحات تحت تأثیر عوامل بیرونی نظیر ضربه‌های مکانیکی و یا عوامل درونی مانند ایجاد ترک رخ می‌دهد. در صورت مجاورت صفحه با سیال، بخشی از انرژی موج به محیط پیرامونی منتقل شده و رفتار انتشار آن در صفحه تغییر می‌یابد. در این پژوهش، نشت امواج لمب از یک صفحه فلزی به سیال مجاور به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، یک سامانه آزمایشگاهی ساده طراحی و بانک داده‌ای از سیگنال‌های آکوستیکی منتشرشده (AE) با نرخ نمونه‌برداری پایین ایجاد گردید. تحلیل داده‌ها به منظور بررسی چگونگی تأثیر مایع مجاور صفحه در حوزه زمان و فرکانس انجام شد. نتایج نشان دادند که اگرچه شاخص‌های حوزه زمان بیشترین تأثیر را از پدیده نشت امواج دریافت می‌کنند، اما در نرخ‌های پایین نمونه‌برداری قابلیت تفکیک کافی را ندارند. مطابق نتایج آزمایش‌های انجام شده غوطه ور شدن صفحه داخل آب موجب نشت ۹۸٪ انرژی به سیال می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از حسگرهای ارزان قیمت می‌تواند ابزاری کارآمد برای پیش و تحلیل انتشار امواج در صفحات نازک هنگام تماس با سیال باشد.

کلمات کلیدی: امواج لمب؛ نشت امواج؛ نمونه‌برداری پایین؛ امپدانس صوتی.

An Experimental Study on Lamb Wave Leakage from a Plate into Adjacent Fluids Using Low-Cost Sensors

Seyed Amir, Hoseini Sabzevari*

Assist. Prof., Mech. Eng., University of Gonabad, Gonabad, Iran.

Abstract

Thin plates are widely used in industrial structures and mechanical components, where Lamb waves are generated either by external mechanical excitations or internal defects such as cracking. When a plate is in contact with a surrounding fluid, part of the wave energy leaks into the adjacent medium, thereby altering the propagation characteristics within the plate. In this study, the leakage of Lamb waves from a metallic plate into a neighboring fluid is investigated experimentally. For this purpose, a simple laboratory setup was developed, and a database of low-sampling-rate acoustic emission (AE) signals was collected. The acquired data were analyzed in both the time and frequency domains to evaluate the influence of the fluid on the wave propagation behavior. The results indicate that although time-domain features are strongly affected by the leakage phenomenon, they do not provide sufficient discrimination capability at low sampling rates. Experimental findings show that immersing the plate in water leads to approximately 98% energy leakage into the fluid. These observations suggest that low-cost sensors can serve as an effective tool for monitoring and analyzing Lamb-wave propagation in thin plates under fluid-contact conditions.

Keywords: Lamb waves; wave leakage; low sampling rate; acoustic impedance.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱-۵۷۲۰۲۰۰۰؛ فکس: ۰۵۱-۵۷۲۵۵۹۶۹

آدرس پست الکترونیک: Hoseini.Sabzevari@gonabad.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی انتشار امواج لمب به عنوان بخشی از فرآیند تشخیص موقعیت منبع صدا به ویژه در صفحات همواره مورد توجه محققان بوده است. تشخیص موقعیت منبع صدا به عنوان یکی از روش‌های بررسی سلامت سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. از میان آزمون‌های غیرمخرب متعدد همچون ذرات نافذ، جریان گردابی و غیره، آزمون‌های صوتی به علت هزینه پایین و دقت بالا مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته‌اند.

عوامل بیرونی مانند ضربه ناشی از برخورد در کنار عوامل درونی همچون تشکیل ترک و یا عیب‌های سازه ای در اجزای سیستم منجر به ایجاد و انتشار امواج الاستیک در سازه می‌گردند. برهم کنش میان امواج منتشر شده و بازتاب‌های آن‌ها از سطوح بالایی و پایینی صفحه باعث ایجاد امواج لمب می‌گردد [۱]. با دریافت امواج منتشر شده و تحلیل داده‌های ذخیره شده می‌توان موقعیت و کیفیت رخداد عیب (به دلیل عوامل درونی یا بیرونی) را تشخیص و گزارش نمود [۲].

با وجود گسترش روش‌های تشخیص موقعیت منبع صدا در تشخیص محل رخداد ترک صفحات و تشخیص و یافتن موقعیت نشتی در لوله‌های تحت فشار، بررسی اثر نشت امواج لمب به سیالات مجاور همچنان به عنوان یک چالش در این حوزه باقی مانده است. در اکثر پژوهشی‌های پیشین با توجه به شرایط آزمایشگاه اتخاذ شده از تاثیر امواج نشتی به سیال مجاور صرف نظر شده است. در سال‌های اخیر، بررسی رفتار امواج هدایت‌شونده در شرایطی که صفحه در تماس با یک محیط سیالی قرار دارد، اهمیت ویژه‌ای در حوزه‌های مختلف مهندسی پیدا کرده است. زمانی که موج لمب در صفحات منتشر می‌شود، در صورت تماس صفحه با یک سیال مجاور، بخشی از انرژی آن به صورت امواج نشتی^۱ به درون سیال نشت می‌کند. پدیده نشت موج لمب در حوزه‌های مختلفی از جمله ساخت مواد کامپوزیت [۳]، بازرسی خطوط لوله [۴، ۵] و حسگر زیستی [۶] کاربردهای وسیعی دارد.

از اولین پژوهش‌های انجام شده در حوزه می‌توان به مطالعه‌ی انجام شده توسط روخلین^۲ و همکاران [۷] اشاره

نمود. آن‌ها طیف موجی و ویژگی‌های شاخه‌های نشت‌کننده در صفحات سیال را تحلیل کردند. شووالوف^۳ و همکاران [۸] با بررسی دقیق‌تر صفحات تحت بارگذاری سیالی نشان دادند که وجود سیال می‌تواند موجب تغییرات چشمگیر در منحنی‌های سرعت و تشکیل شاخه‌های جدید امواج نشتی گردد. این یافته‌ها اهمیت نقش سیال را در تغییر رفتار انتشار امواج لمب برجسته کرده و مسیر تحقیقاتی گسترده‌ای را برای مدل‌سازی دقیق‌تر این پدیده‌ها رقم زد.

در حوزه مدل‌سازی امواج، روش‌های نیمه‌تحلیلی مختلفی برای کاهش پیچیدگی محاسبات توسعه یافته‌اند. این روش‌ها کوشیده‌اند امکان تحلیل سریع‌تر و دقیق‌تر امواج هدایت‌شونده را فراهم کنند [۹]. در این میان، روش ارائه شده توسط گلشکوف^۴ و همکاران [۱۰] با ساده‌سازی تعریف مرزهای دور و ارائه چارچوبی کارآمد برای مدل‌سازی صفحات غوطه‌ور در سیال نقش مهمی ایفا کرده است.

در همین راستا، آشکارسازی اثرات انرژی در امواج لمب نشتی در تحقیقات مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. بویل^۵ و همکاران [۱۱] رفتار بازتاب انرژی صوتی از صفحات را در محیط‌های سیالی بررسی کردند و نشان دادند که افزایش ضخامت صفحه و نسبت امپدانس صوتی سیال به جامد، میزان انتقال انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آانس^۶ و همکاران [۱۲] نیز با تحلیل رفتار امواج در صفحات ویسکوالاستیک نشان دادند که حضور سیال نه تنها میرایی موج را افزایش می‌دهد، بلکه موجب تغییر الگوهای بازتاب و انتقال امواج نیز می‌شود.

سیمونتی^۷ و همکاران [۱۳] با تحلیل شاخه‌های غیرانتشاری امواج لمب، تحلیل دقیقی درباره‌ی رفتار امواج ارائه کردند. همچنین، نیدوسپاسوف^۸ و همکاران [۱۴] با بررسی امواج در صفحات غوطه‌ور، نشان دادند که بارگذاری سیالی می‌تواند منجر به ظهور اثرات انرژی غیرمعمول و تشکیل نواحی با شار انرژی معکوس گردد؛ پدیده‌ای که در تفسیر الگوهای انتقال انرژی اهمیت حیاتی دارد.

مطالعات دیگری نیز به تحلیل انتشار امواج لمب در ساختارهای دارای لایه‌های سیالی پرداختند. ویکتروف^۹ [۱۵]

⁷ Simonetti

⁸ Nedospasov

⁹ Viktorov

¹ Leaky Lamb Waves

² Rokhlin

³ Shuvalov

⁴ Glushkov

⁵ Boyle

⁶ Aanes

در این مطالعه، به صورت تجربی به بررسی نشت امواج لمب را در شرایط واقعی و با استفاده از حسگرهای ارزان قیمت و قابل کاربرد در محیط‌های صنعتی پرداخته شده است [۲۲]. تمرکز اصلی این پژوهش، پایش امواج ناشی با استفاده از سیگنال‌های AE در نرخ نمونه‌برداری پایین است. این رویکرد علاوه بر فراهم کردن امکان پایش مداوم و کم‌هزینه، موجب کاهش حجم داده و در نتیجه ساده‌تر شدن پردازش‌ها می‌شود. این ساده‌سازی‌ها قابلیت پیاده‌سازی در کاربردهای صنعتی را فراهم می‌آورد.

۲- روش پیشنهادی

۲-۱- محیط آزمایش

در قدم اول به منظور ایجاد بانک داده‌ی مورد نیاز یک محیط آزمایش طراحی و ساخته شد. در این محیط آزمایشگاه یک صفحه فلزی به ابعاد ۵۲ در ۲/۵ سانتی‌متر و به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر و به جرم ۲۵ گرم در داخل یک قاب معلق گردید. قسمت میانی صفحه در مایع مستغرق شده است، لذا امواج منتشر شده قبل از دریافت توسط حسگر تحت تاثیر ناشی به سیال قرار می‌گیرند. جهت ایجاد و دریافت امواج منتشر شده در صفحه از دو حسگر پیزوالکتریک استفاده گردید. جهت دریافت داده‌ها از یک کارت با نرخ داده برداری ۴۴۱۰۰ داده بر ثانیه استفاده گردید.

حسگرهای پیزوالکتریک در دو طرف صفحه و به فاصله ۴۹/۵ سانتی‌متر از یکدیگر بر روی سطح آن نصب شده‌اند. لازم به ذکر است در این پژوهش، حسگرهای پیزوالکتریک به عنوان مبدل‌های باندپهن جهت تولید و دریافت امواج مورد استفاده قرار گرفتند. سیگنال تحریک به صورت جاروب فرکانسی در بازه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز اعمال شد و پاسخ سیستم در کل این بازه فرکانسی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که هدف مطالعه تحلیل رفتار نسبی سیگنال دریافتی در گستره‌ای از فرکانس‌ها بوده است، تمرکز بر یک فرکانس مرکزی مشخص مدنظر نبوده و تحلیل‌ها بر اساس پاسخ کلی سیستم انجام شده‌اند. انتخاب حسگرها و سازه معلق آن موجب می‌شود، تاثیر نویز محیط پیرامون در آزمایش‌ها به حداقل برسد. انتخاب این تجهیزات ساده و کم‌هزینه، مزیتی مهم نسبت به پژوهش‌های پیشین

نخستین تحلیل‌های سرعت فاز امواج سطحی در حضور لایه‌های مایع را ارائه کرد. وو^۱ و همکاران [۱۶] انتشار امواج لمب در صفحات دارای لایه‌های سیال را مطالعه کردند و نتایج آن‌ها تأثیر ضخامت، چگالی و ویسکوزیته سیال را بر رفتار انتشار نشان داد. ژمین^۲ و همکاران [۱۷] نیز با توسعه مدل‌های دقیق‌تر، ویژگی‌های انتشار را در صفحات دارای سیالات دوطرفه تحلیل نمودند. ژیاولی‌انگ^۳ و همکاران [۱۸] نیز یکی از نخستین مطالعات در بررسی جریان‌های آکوستیکی القاشده توسط امواج شبه‌لمب در صفحات را ارائه کردند که تأثیرات قابل توجهی بر رفتار امواج ناشی دارد.

در کنار پیشرفت‌های تئوریک، کاربرد امواج لمب ناشی در پایش فرآیندهای صنعتی نیز رشد چشمگیری داشته است. دنیسمن^۴ و همکاران [۱۹] با استفاده از حسگرهای نقطه‌ای تغییرات ولتاژ را برای بررسی فرآیند پرشدن رزین پایش کردند. فراتا^۵ و همکاران [۲۰] با ادغام چند حسگر فشار و مدل‌سازی عددی، روشی برای بازسازی جبهه‌ی جریان رزین ارائه نمودند. فن^۶ و همکاران [۲۱] نشان دادند که امواج لمب در صفحات دارای قطرات مایع می‌توانند با دقت بالا تغییرات محیط سیال را آشکار کنند؛ موضوعی که اهمیت امواج ناشی را برای حسگرهای تماسی و غیرتماسی تأیید می‌کند.

نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که پدیده‌ی ناشی امواج لمب به سیالات مجاور، تأثیرات بنیادی بر سرعت، میزان تضعیف، دامنه‌ی موج و حتی مسیر انتقال انرژی دارد. به‌ویژه در کاربردهایی مانند پایش سلامت سازه، ساخت کامپوزیت‌ها، بازرسی خطوط لوله و حسگرهای زیستی، درک دقیق رفتار امواج ناشی برای بهبود دقت و قابلیت اعتماد سامانه‌های پایشی ضروری است. در برخی مطالعات پیشین، اندازه‌گیری امواج ناشی با قرار دادن حسگرها در داخل سیال انجام شده است که امکان اندازه‌گیری مستقیم میدان فشار را فراهم می‌کند، اما نیازمند تجهیزات دقیق‌تر و شرایط آزمایشگاهی پیچیده‌تر است. در مقابل، در پژوهش حاضر تمرکز بر اندازه‌گیری پاسخ موج در خود صفحه و تحلیل غیرمستقیم نشت انرژی به سیال است که امکان پیاده‌سازی ساده‌تر و کاربرد صنعتی گسترده‌تری را فراهم می‌کند.

⁴ Danisman

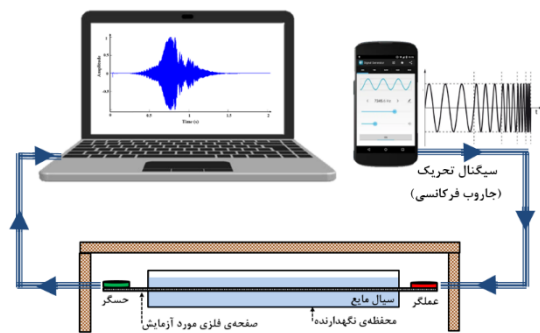
⁵ fratta

⁶ Fan

¹ Wu

² Zhemin

³ Xiaoliang



شکل ۲- شماتیک و جریان کاری تجهیزات

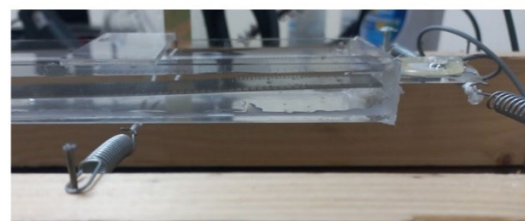
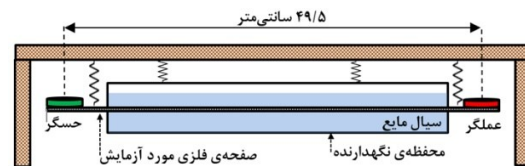
جدول ۱- فهرست تجهیزات استفاده شده.

توضیحات	تجهیزات مورد استفاده
صفحه فلزی با ابعاد ۵۰ در ۲/۵ سانتی متر و ضخامت ۰/۲ میلی متر، جنس فولاد ضدزنگ ۴۵۰ میلی لیتر آب	صفحه
به منظور تماس صفحه با سیال با ابعاد ۴۵ در ۵ سانتی متر و ارتفاع ۲ سانتی متر	سیال
حسگر پیزوالکتریک، جرم ۱۲ گرم، فرکانس تشدید ۳۲۰۰ هرتز.	محفظه
نرم افزار مولد فرکانس در تلفن همراه، جاروب فرکانسی در بازی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز، به مدت ۲ ثانیه.	حسگر
قاب آزمایش به منظور معلق نمودن صفحه و محفظه حین انجام آزمایش	مولد سیگنال

در آرایش اندازه گیری حاضر، سامانه تحریک و ثبت داده به صورت غیرهمزمان عمل می کنند؛ به این معنا که سیگنال تحریک و فرآیند ثبت داده توسط دو سامانه مستقل انجام شده است. به همین دلیل، ثبت سیگنال ها در یک بازه زمانی از پیش تعیین شده صورت گرفته تا اطمینان حاصل شود کل فرآیند انتشار موج در صفحه در داده ثبت شده پوشش داده می شود. در نتیجه، شروع ثبت سیگنال الزاماً منطبق با لحظه تحریک نیست و پالس اولیه به صورت مجزا در ابتدای سیگنال قابل تفکیک نمی باشد، هرچند اثر آن در شکل کلی سیگنال دریافتی وجود دارد. با توجه به اینکه هدف این پژوهش تحلیل رفتار کلی انتشار موج و مقایسه ویژگی های سیگنال در شرایط مختلف بوده و نه تعیین دقیق زمان رسیدن موج، این موضوع تأثیری بر اعتبار نتایج ندارد. روش حاضر مبتنی بر تحلیل

محسوب می شود؛ چراکه علاوه بر سهولت نصب، داده های سبک تری تولید کرده و حساسیت کمتری به تغییرات محیطی دارند.

در این پژوهش از روش های فعال جهت ایجاد امواج استفاده شده است. هدف از این انتخاب، اطمینان از بازه های فرکانسی ایجاد شده و رعایت یکنواختی و تکرارپذیری امواج ایجاد شده می باشد. ابعاد صفحه مورد آزمایش و به طبع آن، فاصله ی میان دو حسگر به نحوی انتخاب شده است بر اساس شرایط آزمایش و به صورت تجربی انتخاب شده است. این انتخاب باید به نحوی باشد که علاوه بر کاهش اثر اشباع و نویز محیطی در داده های ذخیره شده، موجب میرایی و تضعیف بیش از حد امواج منتشر شده، نگردد. شماتیک محیط آزمایش و موقعیت قرارگیری حسگر در شکل های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. تجهیزات استفاده شده در این آزمایش ها در جدول ۱، فهرست شده اند.



شکل ۱- صفحه مورد آزمایش و موقعیت قرارگیری حسگرها

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{C_p} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad \text{و} \quad C_p = \sqrt{\frac{2\mu + \lambda}{\rho}} \quad (۴)$$

$$\nabla^2 H = \frac{1}{C_s} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad \text{و} \quad C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (۵)$$

که در آن C_p و C_s به ترتیب نشان دهنده‌ی سرعت انتشار موج فشاری و برشی در محیط می‌باشد. دو معادله نشان داده شده در روابط (۴) و (۵) نشان دهنده‌ی موج فشاری و موج برشی در صفحه عمودی می‌باشند. برهم کنش میان این دو موج و بازتاب‌های آن‌ها از سطوح بالایی و پایینی صفحه باعث ایجاد امواجی می‌شود که امواج لمب^۵ نامیده می‌شوند. از حل معادلات فوق با فرض پاسخ هماهنگ در راستای افقی معادلات مربوط به انتشار امواج لمب مطابق روابط (۶) و (۷) حاصل می‌شود:

$$u_x = [C_2 i k \cos(py) + D_1 q \cos(qy)] + [C_1 i k \sin(py) - D_2 q \sin(qy)] \quad (۶)$$

$$u_y = -[C_2 p \sin(py) + D_1 i k \sin(qy)] + [C_1 p \cos(py) - D_2 i k \cos(qy)] \quad (۷)$$

که در آن k ، عدد موج و ضرایب C_1, C_2, D_1, D_2 ضرایب ثابتی هستند که با اعمال شرایط مرزی حاصل می‌شوند. همچنین p و q مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شوند:

$$p^2 = \frac{w^2}{C_p^2} - k^2 \quad \text{و} \quad q^2 = \frac{w^2}{C_s^2} - k^2 \quad (۸)$$

که در آن w نشان دهنده‌ی فرکانس می‌باشد. روابط (۶) و (۷) را می‌توان به صورت مجموع دو پاسخ متقارن مطابق رابطه (۹) و نامتقارن مطابق رابطه (۱۰)، در نظر گرفت.

$$u_x = [C_2 i k \cos(py) + D_1 q \cos(qy)] \quad (۹)$$

$$u_y = -[C_2 p \sin(py) + D_1 i k \sin(qy)]$$

$$u_x = [C_1 i k \sin(py) - D_2 q \sin(qy)] \quad (۱۰)$$

$$u_y = [C_1 p \cos(py) - D_2 i k \cos(qy)]$$

ویژگی‌های نسبی سیگنال است و بنابراین وابستگی مستقیمی به تعیین دقیق لحظه شروع تحریک ندارد.

۲-۲- امواج منتشر شده

با برهم کنش امواج الاستیک ایجاد شده در صفحات نازک (به علت عوامل بیرونی همچون ضربه وارد شده بر صفحه و یا به علت عوامل درونی مانند ایجاد ترک) و بازتاب‌های آن‌ها از سطوح صفحه امواج لمب^۱ ایجاد و منتشر می‌شود.

در حالت کلی پاسخ انتشار امواج مطابق رابطه (۱) بیان می‌گردد:

$$\vec{u} = \vec{u}_p + \vec{u}_{sv} + \vec{u}_{sh} \quad (۱)$$

که در آن u_p ، u_{sv} و u_{sh} به ترتیب نشان دهنده‌ی موج فشاری^۲، موج برشی در صفحه‌ی عمودی^۳ و موج برشی در صفحه افقی^۴ می‌باشد. همچنین بر اساس اصل هلمهولتز^۵ بردار جابجایی را می‌توان به صورت مجموعی از دو تابع پتانسیل اسکالر ϕ و برداری $\vec{H}$ در نظر گرفت.

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \phi + \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (۲)$$

که در آن ∇ نمایانگر اپراتور گرادیان است. معادله امواج منتشر شده در یک صفحه نازک همگن، الاستیک و همسانگرد با استفاده از در جاگذاری روابط فوق در معادله ناویر^۶ استخراج می‌شود:

$$\vec{\nabla} \left((\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi - \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{\ddot{\phi}} \right) + \vec{\nabla} \times \left(\mu \nabla^2 \vec{H} - \rho \vec{\ddot{H}} \right) = 0 \quad (۳)$$

که در آن ρ چگالی، λ و μ ضرایب لامه^۷ می‌باشند. با صرف نظر کردن از یک بعد (به دلیل ضخامت ناچیز صفحه) و با اعمال شرط کرنش صفحه‌ای یعنی $u_x \neq 0$ ، $u_y = 0$ و $u_z = 0$ عبارت‌های زیر برای توابع پتانسیل معرفی شده، حاصل می‌شود:

^۵ Helmholtz principle

^۶ Navier

^۷ lame

^۸ Lamb Waves

^۱ Lamb Waves

^۲ P-wave

^۳ Shear-Vertical wave

^۴ Shear-Horizontal wave

محیط رخ می‌دهد و برخلاف مورد (الف)، نقش آن در فواصل دورتر از منبع موج پررنگ‌تر است. رابطه (۱۲) نحوه‌ی عملکرد این اثر را نشان می‌دهد [۲۵]:

$$\frac{F(D_1)}{F(D_2)} = e^{-g''(D_2-D_1)} \quad (12)$$

که در رابطه فوق، g'' ضریب میرایی بوده و مقدار آن معمولاً به صورت آزمایشگاهی تعیین می‌شود.

ج-تأثیر محیط‌های مجاور: در این حالت، بخشی از انرژی موج منتشر شده به محیط کناری انتقال یافته و دامنه موج اصلی کاهش می‌یابد؛ پدیده‌ای که از آن با عنوان نشتی انرژی یاد می‌شود. اگر محیط مجاور هوا باشد، معمولاً این اثر بسیار ناچیز تلقی شده و قابل صرف‌نظر کردن است [۲۶]. نتایج تجربی درینک واتر^۲ و همکاران [۲۷] نیز نشان می‌دهد که در یک صفحه شیشه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر در مجاورت هوا، میزان این "نشتی" بسیار کم بوده و تأثیر قابل توجهی بر رفتار موج ندارد.

د-پراکندگی موج: این نوع افت انرژی زمانی بروز می‌کند که به دلیل افزایش مدت‌زمان انتشار، امواج دچار گسترش زمانی شده و دامنه آن‌ها کاهش یابد [۲۸].

۲-۴- بازتاب و انتقال امواج الاستیک

وقتی امواج الاستیک منتشر شده از سطح صفحه به مرز برخورد می‌کنند، بخشی از انرژی به صورت موج‌های بازتابی بازمی‌گردد و بخشی دیگر از مرز عبور کرده و منتقل می‌شود. در حالت کلی دو نوع مرز قابل توجه و بررسی هستند: مرزهای «جامد-هوا» و مرزهای «جامد-جامد / جامد-مایع».

در مرزهای جامد-هوا عملاً انتقال انرژی از صفحه به هوا رخ نمی‌دهد و مرز را می‌توان ناحیه‌ای با «عدم تماس» در نظر گرفت که ضریب بازتاب آن تقریباً برابر با یک است [۲۹].

برای مرزهای پیوسته‌ی جامد-جامد (یا جامد-مایع که اتصال کامل وجود داشته باشد)، تماس بین صفحه و محیط مجاور ممکن است ناقص باشد (مثلاً وجود لایه‌های هوا یا خلل و فرج در ناحیه تماس) که این امر خود به پیچیدگی موضوع می‌افزاید. همچنین بازتاب امواج نرمال بر اساس نسبت

با اعمال شرایط مرزی و حل عددی این روابط، می‌توان پاسخ این معادلات را در دو قسمت متقارن و نامتقارن را به صورت موده‌های متقارن و نامتقارن به دست آورد.

به بیان دیگر، امواج لمب در صفحات نازک حاصل کوپل شدن و برهم‌کنش امواج طولی و برشی در ضخامت صفحه است و هر دو مؤلفه در تشکیل پاسخ نهایی موج نقش دارند. در این پژوهش، تمرکز بر بررسی پاسخ کلی انتشار و تغییرات انرژی موج بوده و تفکیک سهم تنش‌های طولی و برشی به صورت مجزا مدنظر قرار نگرفته است. با این حال، اثر این امواج به صورت ضمنی در رفتار موده‌های منتشرشده و در سیگنال‌های ثبت‌شده توسط حسگرها منعکس شده است.

همچنین، اگرچه سیگنال‌های دریافت‌شده توسط حسگر شامل اطلاعات هر دو مود منتشر شده است؛ اما تفکیک این مودها در داده‌های ذخیره شده امکان پذیر نیست، زیرا این امر نیازمند نرخ بالای نمونه برداری می‌باشد.

۲-۳- میرایی امواج لمب

با انتشار امواج در محیط، بخشی از انرژی آن‌ها به تدریج کاسته می‌شود. نتیجه این فرایند، کاهش آرام دامنه امواج است که از آن با عنوان میرایی یاد می‌شود [۵]. پولاک^۱ این پدیده را بر اساس مکانیسم‌های مؤثر بر آن در چهار گروه اصلی دسته‌بندی کرده است [۲۳]:

الف-گسترش هندسی موج: به این معنا که هرچه موج مسافت بیشتری را طی کند، دامنه آن به دلیل پخش شدن انرژی در سطح وسیع‌تر کاهش می‌یابد. این نوع میرایی معمولاً در ناحیه نزدیک به منبع موج اهمیت بیشتری دارد. رابطه بین افت دامنه و فاصله پیموده شده مطابق رابطه (۱۱) بیان می‌شود [۲۴]:

$$\frac{F(D_1)}{F(D_2)} = \frac{\sqrt{D_2}}{\sqrt{D_1}} \quad (11)$$

که در رابط فوق، D_i فاصله حسگر از منبع موج و $F(D_i)$ بیانگر انرژی ثبت‌شده توسط حسگر هستند.

ب- ویژگی‌های محیط انتشار: بخشی از افت دامنه به ماهیت فیزیکی محیطی مربوط است که موج در آن منتشر می‌شود. این کاهش به دلیل برهم‌کنش‌های درونی میان ذرات

² Drinkwater

¹ Pollock

آزمایش و بررسی دقیق و کمی تکرارپذیری آن، مقادیر پیک، انرژی، جذر میانگین مربعات و فرکانس غالب داده‌های ذخیره برای تمامی آزمایش‌ها طی ۳۰ تکرار محاسبه و در جدول ۲ گزارش شده است.

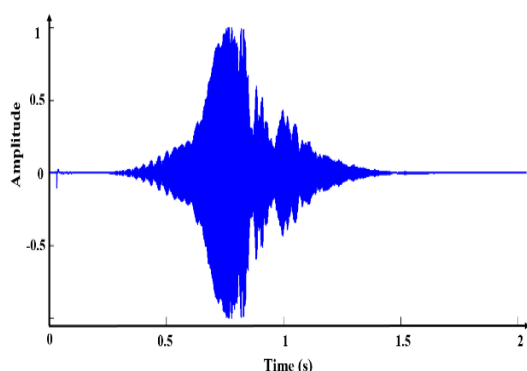
به منظور محاسبه‌ی انرژی و جذر میانگین مربعات داده‌ها به ترتیب از روابط (۱۳) و (۱۴) استفاده گردید:

$$E = \sum_{n=1}^N x^2(n) \quad (13)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n)} \quad (14)$$

که در آن، $x(n)$ دامنه سیگنال و N تعداد نمونه‌ها می‌باشد. آزمایش دوم: در این آزمایش، سطح پایینی صفحه در مجاورت با آب قرار گرفته است. مشابه آزمایش قبلی، فاصله دو حسگر ۴۹/۵ سانتی‌متر و تحریک به‌وسیله‌ی یک موج سینوسی با فرکانسی ۵۰۰ الی ۱۰۰۰۰ هرتز تحریک شده است. در این آزمایش، ۴۵ سانتی‌متر از صفحه در مجاورت سیال قرار گرفته است.

سیگنال ذخیره شده در تکرار پنجم در شکل ۴، ترسیم شده است. همچنین، مقادیر شاخص‌های پیک، انرژی، جذر میانگین مربعات و فرکانس غالب داده‌های ذخیره برای ۳۰ تکرار محاسبه و در جدول ۳ گزارش شده است.



شکل ۳- نمایش حوزه زمان سیگنال ذخیره شده تکرار اول در آزمایش اول (محور زمان نشان‌دهنده مدت زمان تحریک جاروب فرکانسی است).

امپدانس صوتی دو مرز و یا تقریب به‌وسیله‌ی سختی فنر، قابل مدل‌سازی می‌باشد. اما این روابط توصیف دقیقی از رفتار امواج لمب ارائه نمی‌دهند.

از طرفی، مدل‌سازی کامل یک مجموعه آزمایشگاهی شامل صفحه و مبدل‌هایی با ابعاد محدود در محیط سیال، معمولاً به‌صورت تحلیلی امکان‌پذیر نیست. راه‌حل‌های موجود عمدتاً به صفحات بی‌نهایت یا مرز آزاد یا صفحات بی‌نهایت در تماس با سیال محدود می‌شوند [۹].

همچنین در مرزهای ناقص، رفتار بازتاب و عبور موج به فرکانس و سختی تماس وابسته است و در فرکانس‌های پایین روندی قابل‌پیش‌بینی دارد، اما در فرکانس‌های بالاتر ممکن قابل استناد نباشد [۳۰]. لذا برای تأیید کامل این نتایج، انجام بررسی‌های تجربی متناظر ضروری است [۳۱].

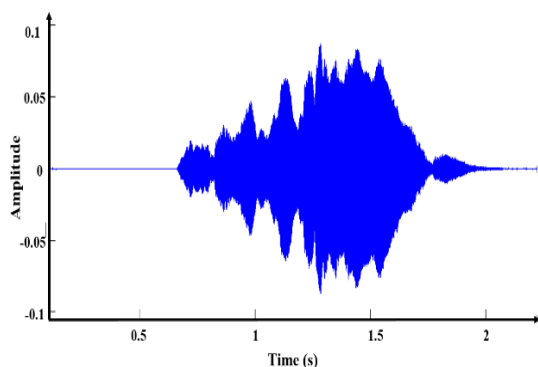
۳- نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

به منظور بررسی دقیق انتشار امواج در صفحات به هنگام مجاورت با سیال، چندین آزمایش به شرح زیر طراحی و انجام شد:

آزمایش اول: در تمامی آزمایش‌ها فاصله‌ی میان دو حسگر نصب شده بر روی صفحه ۴۹/۵ سانتی‌متر می‌باشد. در این پژوهش، سیگنال تحریک به‌صورت جاروب فرکانسی امواج سینوسی در بازه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز و در مدت زمان ۲ ثانیه اعمال شد تا پاسخ سیستم در گستره‌ای از فرکانس‌ها بررسی شود. امواج ایجاد شده از صفحه‌ی معلق در مجاورت هوا عبور کرده و توسط حسگر دوم دریافت و ذخیره شدند. به منظور کاهش اثر نتایج پژوهش به تغییرات کوچک، آزمایش ۳۰ مرتبه تکرار شده است. در شکل ۳، سیگنال ذخیره شده در تکرار اول ترسیم شده است. محور زمان در سیگنال‌های ثبت‌شده بیانگر مدت زمان اعمال تحریک و پاسخ سیستم به آن بوده و نشان‌دهنده زمان رسیدن موج اولیه نمی‌باشد. همچنین سیگنال‌ها در یک بازه زمانی ثابت ثبت شده‌اند و شروع ثبت منطبق با لحظه تحریک نیست. با توجه به اینکه هدف این مطالعه تحلیل رفتار کلی سیگنال دریافتی و ویژگی‌های آن در طول تحریک بوده است، زمان واقعی انتشار موج که در مقیاس بسیار کوتاه‌تری رخ می‌دهد در این نمودارها مدنظر نبوده است. این رویکرد امکان استخراج اطلاعات فرکانسی غنی‌تر از پاسخ سیستم را فراهم می‌کند. به‌منظور اطمینان از صحت انجام

شده، نشان می‌دهد که تغییر شرایط محیط، اثر قابل توجهی بر دامنه، انرژی و فرکانس غالب سیگنال دارد.

در آزمایش اول که انتشار در مجاورت هوا انجام شده، مقادیر پیک، انرژی و جذر میانگین مربعات بالاترین مقدار را داشته و ضریب تغییرات آن‌ها نیز بسیار کوچک است که نشان‌دهنده پایداری و تکرارپذیری مناسب آزمایش در شرایط بدون سیال است. با قرار گرفتن یک سطح صفحه در مجاورت آب (آزمایش دوم)، دامنه‌ی سیگنال کاهش یافته و ضریب تغییرات برخی شاخص‌ها افزایش پیدا کرده است که بیانگر تأثیر میرایی ناشی از سیال بر پایداری اندازه‌گیری‌ها است. در آزمایش سوم که هر دو سطح در تماس با آب قرار دارند، کاهش قابل توجه پیک و انرژی همراه با افزایش محسوس ضریب تغییرات پیک نشان می‌دهد که حضور سیال بیشترین اثر را بر تضعیف امواج و افزایش تغییرپذیری ثبت‌ها داشته است. این روند کلی نشان می‌دهد که سیال علاوه بر کاهش دامنه، منجر به افزایش عدم قطعیت در اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۵- نمایش حوزه زمان سیگنال ذخیره شده تکرار هشتم در آزمایش سوم (محور زمان نشان‌دهنده مدت زمان تحریک جاروب فرکانسی است).

جدول ۴- بررسی کمی شاخص‌های سیگنال‌های دریافت شده در آزمایش سوم.

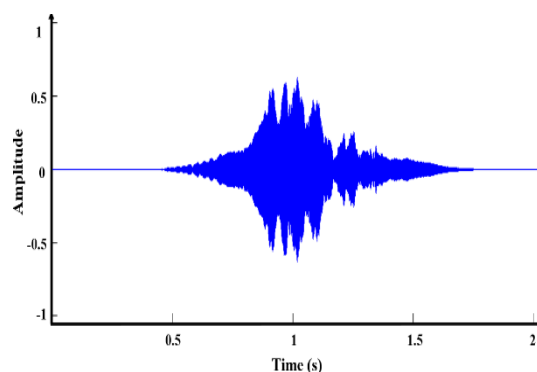
شاخص	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
پیک	۰/۰۹۲۶	۰/۰۲۷۱	۰/۲۹۲۵
انرژی	۵۱/۲۱۷	۱/۲۸۸	۰/۰۲۵۲
جذرمیانگین مربعات	۰/۰۱۹۷	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۱۲۸
فرکانس غالب	۴۰۹۰/۱	۱/۹۹۴۸	۰/۰۰۰۴۸۷

جدول ۲- بررسی کمی شاخص‌های سیگنال‌های دریافت شده در آزمایش اول.

شاخص	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
پیک	۱/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۹۷	۰/۰۰۰۱۹۷
انرژی	۳۵۶۶/۷	۱۳/۹۵	۰/۰۰۳۹
جذرمیانگین مربعات	۰/۱۶۴۲	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۲
فرکانس غالب	۳۳۱۲/۲	۰/۳۷۵۸	۰/۰۰۰۱۱۳

جدول ۳- بررسی کمی شاخص‌های سیگنال‌های دریافت شده در آزمایش دوم.

شاخص	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
پیک	۰/۶۲۵۵	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۲۶
انرژی	۱۳۱۲	۱۳۸/۷۰	۰/۱۰۵
جذرمیانگین مربعات	۰/۰۹۹۳	۰/۰۰۷۳	۰/۰۷۳۲
فرکانس غالب	۳۳۷۰/۴	۴۰/۹۷۱۹	۰/۰۱۲۲



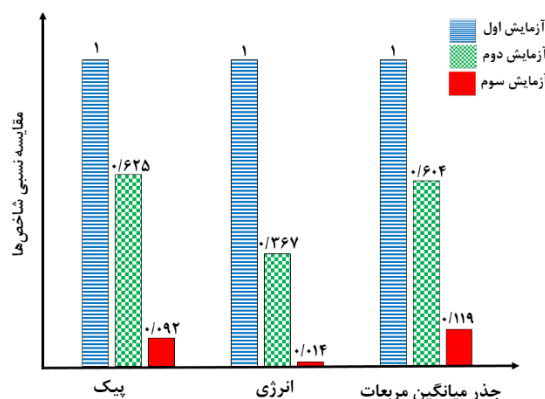
شکل ۴- نمایش حوزه زمان سیگنال ذخیره شده تکرار پنجم در آزمایش دوم (محور زمان نشان‌دهنده مدت زمان تحریک جاروب فرکانسی است).

آزمایش سوم: فواصل و مشخصات هندسی مشابه آزمایش‌های قبلی می‌باشد. در این آزمایش، هر دو سطح بالایی و پایینی سطح پایینی صفحه در مجاورت با آب قرار گرفته است. فاصله صفحه‌ی مغروق تا سطح سیال ۵ میلی‌متر می‌باشد. سیگنال ذخیره شده در تکرار هشتم در شکل ۵، ترسیم شده است. همچنین، مقادیر شاخص‌های مورد بررسی برای ۳۰ تکرار محاسبه و در جدول ۴ گزارش شده است.

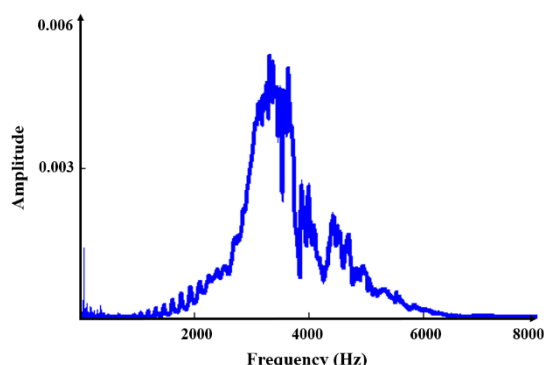
شاخص‌های گزارش شده در جداول ۲ الی ۴ به صورت نسبی در شکل ۶ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. داده‌های گزارش

بخش ۲-۳ مهمترین عامل این کاهش انرژی، انتقال آن به محیط مجاور (سیال) بوده است.

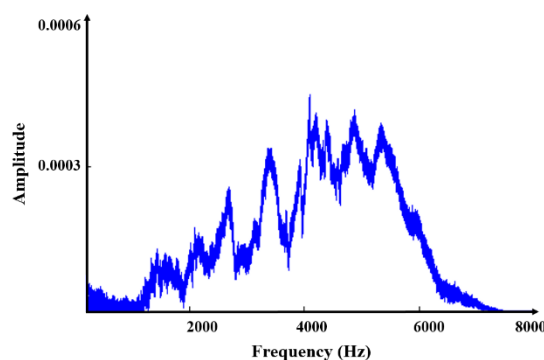
با توجه به ماهیت امواج الاستیک منتشر شده در صفحه نازک فلزی که در بخش ۲-۲ بررسی گردید، امواج منتشر شده بعد بازتاب‌های متعدد از سطوح بالایی و پایینی صفحه توسط حسگر دریافت و ذخیره می‌شوند. این بازتاب‌ها در هر مرحله موجب انتقال بخشی از انرژی سیگنال به محیط پیرامون می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر سیال بر انتشار امواج، سیگنال‌های ذخیره شده از آزمایش‌های اول و سوم به حوزه فرکانس منتقل و نتایج حاصل در شکل‌های ۷ و ۸ گزارش شده است.



شکل ۶- مقایسه نسبی شاخه‌های گزارش شده در آزمایش‌های اول، دوم و سوم



شکل ۷- نمایش حوزه فرکانس مربوط به ۳۰ تکرار آزمایش اول



شکل ۸- نمایش حوزه فرکانس مربوط به ۳۰ تکرار آزمایش سوم

بر اساس مقایسه‌های انجام‌شده در شکل‌های ۷ و ۸، مشخص می‌شود که حضور سیال موجب تغییرات چشمگیری در ساختار طیفی امواج می‌شود. در آزمایش اول، که انتشار

در ادامه با جزئیات بیشتر به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از داده‌برداری می‌پردازیم. در تمامی آزمایش‌ها، فرضیات زیر لحاظ شده است:

۱- انتقال امواج از صفحه به محفظه سیال در محل ورود و خروج صفحه از آن صرف نظر شده است. (به علت عایق بندی محفظه)

۲- صفحه و محفظه‌ی سیال هر کدام جداگانه در داخل قاب معلق شده‌اند. از برخوردهای احتمالی ناخواسته صفحه با محفظه صرف نظر شده است.

۳- شرایط نویز محیطی در تمامی آزمایش‌ها یکسان فرض شده است.

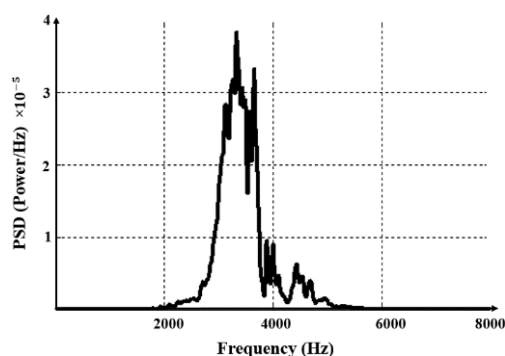
۴- از وجود حباب هوا در فصل مشترک صفحه و سیال به‌ویژه در آزمایش دوم صرف نظر شده است.

۴- بحث

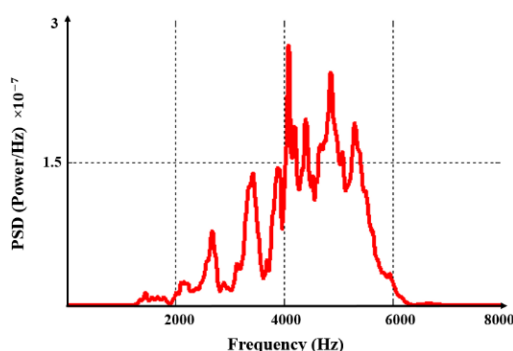
مطابق داده‌های گزارش شده در قسمت قبل، میانگین انرژی سیگنال‌های منتشر شده در آزمایش دوم نسبت به آزمایش اول کاهش ۶۳٪ از خود نشان می‌دهد. این درحالی است که با غوطه ورشدن کامل صفحه در آزمایش سوم، این مقدار با کاهش ۹۸٪ نسبت به آزمایش اول و کاهش ۹۶٪ نسبت به آزمایش دوم مواجه شده است. با توجه به شرایط محیط آزمایش از جمله: فاصله نسبتاً کم دو حسگر از یکدیگر، ضخامت ناچیز صفحه و مدت زمان کوتاه انتشار امواج انتظار می‌رود سه مکانیسم "الف"، "ب" و "د" کمترین تأثیر را بر میرایی امواج داشته باشند. لذا با توجه به موارد بیان شده در

۵۰۰۰ هرتز، انرژی به مرور افت کرده و مقدار PSD تقریباً به چند برابر مرتبه‌های کوچک‌تر کاهش می‌یابد، امری که ماهیت تضعیف‌شونده امواج در محیط هوا را تأیید می‌کند.

در شکل ۱۰ توزیع انرژی در حالت تماس صفحه با آب ارائه شده است. برخلاف آزمایش اول، منحنی میانگین انرژی در این حالت رفتار کاملاً متفاوتی نشان می‌دهد. بیشترین مقادیر PSD اکنون در سطحی حدود 10^{-7} قرار گرفته که تقریباً دو مرتبه کوچک‌تر از مقدار مشاهده‌شده در آزمایش اول است. علاوه بر کاهش کلی دامنه، طیف در این حالت چند قله با دامنه کمتر و فاصله‌های نامنظم دارد که نشان‌دهنده پراکندگی انرژی و تأثیر قابل توجه محیط سیال بر ساختار فرکانسی است.



شکل ۹- انرژی میانگین ۳۰ داده‌ی آزمایش اول در باندهای مختلف فرکانسی.



شکل ۱۰- انرژی میانگین ۳۰ داده‌ی آزمایش سوم در باندهای مختلف فرکانسی.

حضور آب باعث تغییر مرزهای انتشار موج، افزایش تلفات و نشت انرژی از صفحه به محیط سیال شده و در نتیجه انرژی به‌جای تمرکز در یک باند مشخص، در گستره بزرگ‌تری با دامنه ضعیف‌تر پخش شده است. همچنین پستی‌وبلندی‌های

موج تنها در محیط هوا انجام گرفته، دامنه قله‌های طیفی در ناحیه فرکانسی حدود ۳۰۰۰ تا ۴۲۰۰ هرتز به مقادیر نسبتاً بالای ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۶ می‌رسد. این مقدار بیانگر تمرکز انرژی در یک باند مشخص و پایداری انتشار امواج در محیط بدون سیال است. همچنین تغییرات بین ۳۰ تکرار بسیار محدود بوده و هم‌پوشانی طیف‌ها نشان‌دهنده یکنواختی شرایط آزمایش و ثبات انتشار موج است. در حالتی که صفحه در آب قرار گرفته است (آزمایش سوم)، کاهش شدیدی در دامنه همان باند فرکانسی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که بیشینه دامنه در گستره ۳۰۰۰ تا ۴۵۰۰ هرتز تنها حدود ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۰۶ است. این مقدار تقریباً دوازده برابر کمتر از دامنه‌های مشاهده شده در آزمایش اول است. این امر نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از انرژی موج در مرز مشترک صفحه-سیال مستهلک شده و به محیط آب نشت کرده است. علاوه بر کاهش دامنه، طیف آزمایش سوم پراکندگی بیشتری داشته و قله‌ها شکل منسجم کمتری دارند که خود نشانه‌ای از افزایش تلفات، پراکندگی انرژی و تغییر رفتار انتشار امواج لمب در حضور سیال است. به منظور بررسی دقیق‌تر توان طیفی سیگنال‌های ذخیره شده در آزمایش اول و سوم در شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است. توان طیفی، با استفاده از روش Welch محاسبه گردید. در این روش از پنجره Hamming با طول ۲۰۴۸ نمونه و هم‌پوشانی ۵۰ درصد (۱۰۲۴ نمونه) استفاده شد. طول FFT برابر ۴۰۹۶ نمونه و فرکانس نمونه‌برداری نیز ۴۴/۱ کیلوهرتز در نظر گرفته شد. چگالی طیفی توان نهایی از میانگین‌گیری طیف توان محاسبه‌شده برای قطعات مختلف سیگنال به دست آمد.

شکل ۹ میانگین توان طیفی حاصل از ۳۰ تکرار آزمایش اول را در حوزه فرکانس نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، انرژی سیگنال عمدتاً در یک ناحیه محدود از فرکانس متمرکز است و بیشترین مقادیر PSD در حوالی بازه‌ی ۳۰۰۰ تا ۴۲۰۰ هرتز ظاهر می‌شود. این تمرکز انرژی بیانگر آن است که در حالت عدم تماس صفحه با سیال، انتشار امواج با کمترین اتلاف صورت گرفته و بخش عمده انرژی تحریک در همین باند منتقل می‌شود. از سوی دیگر، یکنواختی منحنی میانگین در این بازه نشان می‌دهد که بین تکرارهای مختلف رفتار طیفی تقریباً پایدار بوده و تغییر قابل توجهی در شکل کلی طیف دیده نمی‌شود. در فرکانس‌های پایین‌تر و به‌ویژه بالاتر از حدود

مشاهده اختلافات ظریف تر را فراهم می کند. همان طور که از نمودار مشخص است، مقدار اختلاف در برخی نقاط فرکانسی به حدود ۳۰ تا ۳۵ دسی بل می رسد که نشان دهنده تغییر بسیار قابل توجه انرژی طیفی در اثر حضور سیال است. در مقابل، در بخش هایی مانند بازه های ۱۰۰۰-۱۵۰۰ هرتز و ۵۵۰۰-۷۰۰۰ هرتز اختلاف به حدود ۰ تا ۵ دسی بل کاهش می یابد که بیانگر نزدیکی پاسخ دو حالت است.

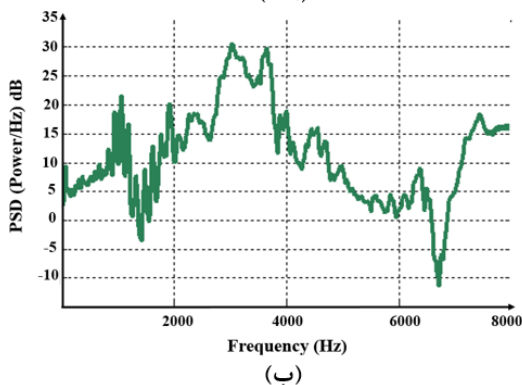
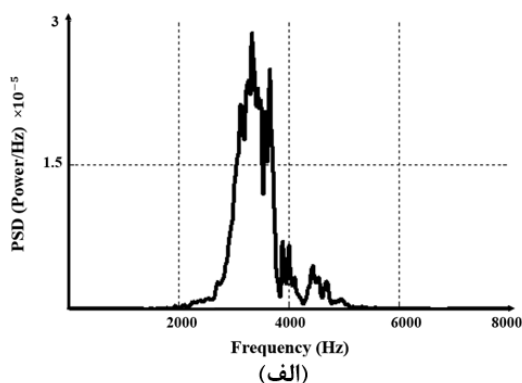
استفاده از مقیاس dB باعث می شود تفاوت های کوچک در نواحی کم انرژی نیز قابل مشاهده شوند و رفتار فرکانسی در گستره کامل ۰ تا ۸۰۰۰ هرتز به خوبی بررسی شود.

اختلاف میانگین طیفی آزمایش اول و سوم نشان می دهد که حضور سیال موجب تغییرات قابل توجهی در انرژی طیفی صفحه می شود. بیشترین اختلاف در بازه ی ۳ تا ۴/۵ کیلوهرتز رخ می دهد؛ جایی که اختلاف به مقادیر بالا (تا حدود ۳۰ دسی بل) می رسد و نشان دهنده بیشترین حساسیت پاسخ فرکانسی به حضور سیال است. در مقابل، در فرکانس های کمتر از ۱/۵ کیلوهرتز و بالاتر از ۶ کیلوهرتز اختلاف بسیار ناچیز بوده و دو طیف تقریباً هم پوشانی دارند. نمایش خطی و لگاریتمی هر دو تأیید می کنند که تغییرات اصلی ناشی از سیال در باند فرکانسی میانی متمرکز است و اثر آن در فرکانس های کم انرژی کمتر مشاهده می شود.

بررسی نتایج نشان می دهد که اثر سیال مجاور صفحه تنها به کاهش دامنه محدود نشده، بلکه ساختار طیفی و الگوی انتقال انرژی را نیز به طور اساسی تغییر می دهد. در آزمایش اول، توزیع انرژی طیفی از الگوی منسجم و پایدار پیروی می کند و بیشترین انرژی در یک باند مشخص—عمدتاً در محدوده ۳۰۰۰ تا ۴۲۰۰ هرتز—متمرکز بوده است. اما با قرار گرفتن صفحه در سیال، این تمرکز از بین رفته و انرژی در بازه ی وسیع تری پخش می گردد. گزارش های اولیه در پژوهش های پیشین نیز نشان داده اند محیط سیال موجب آشفتگی شاخه های مودال و شکل گیری امواج نشتی می شود [۷، ۸]. نتایج این پژوهش نیز—با وجود نرخ نمونه برداری پایین—همین الگو را تأیید می کند و نشان می دهد که کاهش انرژی صرفاً یک افت ساده نیست، بلکه تغییر ماهوی الگوی انتشار موج است.

از دیدگاه فیزیکی، بروز این تغییرات را می توان به نقش امپدانس صوتی سیال نسبت به صفحه نسبت داد. اختلاف

متعدد طیف نشان می دهد که سیستم در حضور سیال نسبت به تغییرات کوچک در شرایط انتشار حساس تر شده است. اختلاف میانگین طیفی آزمایش اول و سوم در شکل ۱۱ گزارش شده است. در بخش (الف) این شکل، اختلاف طیف توان میانگین دو آزمایش در مقیاس خطی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در بازه ی ۲۰۰۰ تا ۴۵۰۰ هرتز—جایی که بیشترین انرژی هر دو سیگنال متمرکز است—بیشترین اختلاف رخ می دهد و مقدار اختلاف به طور قابل توجهی افزایش می یابد. در فرکانس های کمتر از حدود ۱۵۰۰ هرتز و بیش از ۶۰۰۰ هرتز مقدار اختلاف بسیار کم و نزدیک به صفر است که نشان دهنده همگرایی رفتاری دو طیف در این نواحی است.



شکل ۱۱- اختلاف انرژی میانگین آزمایش اول و آزمایش سوم در باندهای مختلف فرکانسی.

بنابراین ناحیه اصلی حساسیت صفحه نسبت به حضور سیال، عمدتاً در حوالی ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز مشاهده می شود. در بخش (ب) شکل ۱۱، همین اختلاف طیفی در مقیاس لگاریتمی (dB) نمایش داده شده است. این نمایش امکان

امپدانس قابل توجه بین آب و فولاد ضدزنگ [۳۲] موجب می شود در هر برخورد موج با مرز مشترک صفحه-سیال، بخشی از انرژی به محیط آب منتقل شود. این پدیده که در پژوهش های کلاسیک امواج سطحی و لمب مورد توجه بوده است [۱۲]، منجر به ایجاد امواج نشتی و در نتیجه کاهش دامنه مودهای اصلی متقارن و نامتقارن می شود. علاوه بر این، حضور سیال باعث تغییر در شرایط مرزی و شکل گیری ساختارهای فرعی تری در طیف می گردد که در نمودارهای آزمایش سوم (شکل های ۸ و ۱۰) با پراکندگی بیشتر و قله های با دامنه ی بسیار کوچک تر مشاهده می شود. این پدیده با نتایج گزارش شده در مطالعات [۱۴، ۱۵] انتقال انرژی در محیط های سیالی سازگار است.

در پژوهش [۱۰] با استفاده از مدل نیمه تحلیلی نشان داد شد، تغییرات جزئی در مرز سیال-جامد می تواند منجر به تغییرات محسوس در سرعت فاز و دامنه گردد. در پژوهش حاضر، این تغییرات در داده های واقعی و با استفاده از حسگرهای ارزان قیمت پیزوالکتریک قابل مشاهده است. همچنین روند افزایش پراکندگی فرکانسی و تضعیف پیک های غالب، با نتایج پژوهش [۱۷] درباره ی تاثیر چگالی و ویسکوزیته سیال بر رفتار امواج لمب کاملاً همخوان است. در واقع، نتایج کنونی یک تأیید تجربی ارزشمند بر پیش بینی های تئوریک پژوهش های پیشین ارائه می کند؛ آن هم در شرایطی ساده تر، کم هزینه تر و مبتنی بر نرخ نمونه برداری پایین.

از منظر کاربردی، این نتایج دارای اهمیت قابل توجهی است. مشاهده ی اختلاف های شدید در توان طیفی-به ویژه در محدوده ی ۳ تا ۴۵ کیلوهرتز که اختلاف آن ها به مقدار ۳۰ تا ۳۵ دسی بل می رسد- نشان می دهد که تحلیل فرکانسی می تواند به عنوان ابزاری حساس برای تشخیص تماس یا غوطه وری صفحه با سیال به کار گرفته شود.

لازم به ذکر است، با توجه به اینکه تحریک به صورت جاروب فرکانسی در بازه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز انجام شده است، پاسخ سیستم در یک فرکانس خاص مبنای تحلیل قرار نگرفته است. اگرچه فرکانس تشدید حسگرها در حدود ۳۲۰۰ هرتز می تواند موجب افزایش نسبی دامنه سیگنال در این ناحیه شود، اما از آنجا که تحلیل ها مبتنی بر ویژگی های کلی سیگنال در کل بازه فرکانسی بوده است، نتایج ارائه شده وابستگی مستقیمی به فرکانس تشدید حسگرها ندارد.

همچنین مطابق با پیش بینی های نظری تغییرات کوچک در شوری، دما یا خواص فیزیکی سیال-که در کاربردهای صنعتی محتمل است- می تواند با تغییر در امپدانس سیال بر شدت پدیده نشتی به ویژه در مرزهای ناهمگن تأثیرگذار باشد. این امر به ویژه برای پایش سلامت سازه های غوطه ور، مخازن، لوله ها یا صفحات نازکی که در معرض محیط های مرطوب قرار دارند، کاربردی است. استفاده از حسگرهای ارزان قیمت AE و نرخ نمونه برداری پایین یک مزیت مهم است؛ زیرا بر خلاف بسیاری از مطالعات پیشین که بر تجهیزات پیچیده و گران قیمت اتکا داشتند، این پژوهش نشان می دهد که تشخیص نشت انرژی امواج لمب حتی در سیستم های ساده نیز قابل اعتماد است.

در این پژوهش، مشاهده نشتی انرژی در مقیاس بالا نشان دهنده کویل قوی بین موج هدایت شده در صفحه و محیط سیال مجاور است که با پیش بینی های نظری مبتنی بر عدم تطابق امپدانس صوتی سازگار می باشد. نتایج تجربی نشان دادند که اگرچه استفاده از نرخ نمونه برداری پایین امکان تفکیک مودهای انتشار را فراهم نمی کند، اما همچنان قادر است تغییرات کلی انرژی موج را با دقت قابل قبول نشان دهد. این موضوع نشان می دهد که در کاربردهای صنعتی که سادگی و هزینه پایین اهمیت دارد، می توان از حسگرهای ارزان قیمت برای پایش رفتار انتشار امواج لمب استفاده نمود، بدون آنکه نیاز به تجهیزات پیچیده آزمایشگاهی باشد. این نتیجه می تواند مسیر توسعه ی سامانه های پایش صنعت محور را با هزینه کمتر و پیچیدگی پایین تر هموار سازد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار انتشار امواج لمب در یک صفحه فلزی نازک در شرایط مختلف تماس با سیال به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. از محدودیت های این پژوهش می توان به عدم تفکیک مود های متقارن و نامتقارن به دلیل نرخ نمونه برداری پایین و ثابت بودن ضخامت صفحه در آزمایش ها اشاره نمود. با این حال، هدف اصلی مطالعه بررسی تغییرات نسبی انرژی موج بوده که نتایج ارائه شده را همچنان معتبر می سازد. بر اساس نتایج به دست آمده، نکات کلیدی زیر قابل جمع بندی است:

- [6] Ray A, Khalid MA, Demčenko A, Daloglu M, Tseng D, Reboud J, Ozcan A (2020) Holographic detection of nanoparticles using acoustically actuated nanolenses. *Nat Commun* 11(1), 171.
- [7] Rokhlin SI, Chimenti DE, Nayfeh AH (1989) On the topology of the complex wave spectrum in a fluid-coupled elastic layer. *JASA* 85(3), 1074-1080.
- [8] Shuvalov AL, Poncelet O, Deschamps M (2006) Analysis of the dispersion spectrum of fluid-loaded anisotropic plates: leaky-wave branches. *JSV* 296(3), 494-517.
- [9] Banerjee S, Kundu T (2007) Ultrasonic field modeling in plates immersed in fluid. *Int J Solids Struct* 44(18-19), 6013-6029.
- [10] Glushkov YV, Glushkova NV, Yereimin AA, Mikhas'kiv VV (2009) The layered element method in the dynamic theory of elasticity. *ZAMM* 73(4), 449-456.
- [11] Boyle RW, Froman DK (1929) Reflection of sound energy and thickness of plate reflector-ultrasonic method. *Can J Res* 1(5), 405-424.
- [12] Aanes M, Lohne KD, Lunde P, Vestrheim M (2016) Beam diffraction effects in sound transmission of a fluid-embedded viscoelastic plate at normal incidence. *JASA* 140(1), EL67-EL72.
- [13] Simonetti F, Lowe MJS (2005) On the meaning of Lamb mode nonpropagating branches. *JASA* 118(1), 186-192.
- [14] Nedospasov IA, Mozhaev VG, Kuznetsova IE (2017) Unusual energy properties of leaky backward Lamb waves in a submerged plate. *Ultrasonics* 77, 95-99.
- [15] Viktorov I A (1977) Calculation of phase velocities of surface-waves on boundary of a solid half-space with a liquid layer. *Soviet Physics Acoustics* 23(6), 541-542.
- [16] Wu J, Zhu Z (1992) The propagation of Lamb waves in a plate bordered with layers of a liquid. *JASA* 91(2), 861-867.
- [17] Zheming ZHU, Jian LI, Wei ZOU (1996) The propagation of Lamb waves in a plate bordered with liquid layers. *Acta Acustica* 21(2), 174-181.
- [18] Xiaoliang ZHAO, Zheming ZHU, Gonghuan DU (1999) Acoustic streaming induced by ultrasonic quasi-Lamb waves in a plate. *Acta Acustica* 24(5), 463-469.
- [19] Danisman M, Tuncol G, Kaynar A, Sozer EM (2007) Monitoring of resin flow in the resin transfer molding (RTM) process using point-voltage sensors. *Compos Sci Technol* 67(3-4), 367-379.
- [20] Di Fratta C, Klunker F, Ermanni P (2013) A methodology for flow-front estimation in LCM processes based on pressure sensors. *Compos A Appl Sci Manuf* 47, 1-11.

- حضور سیال موجب کاهش قابل توجه انرژی موج می‌شود، به‌طوری‌که انرژی سیگنال در آزمایش سوم نسبت به حالت بدون سیال حدود ۹۸٪ افت نشان می‌دهد.
- تحلیل حوزه زمان نشان داد که سیگنال‌ها در حضور آب علاوه بر کاهش دامنه، تغییرات پایداری و افزایش عدم قطعیت نیز دارند.
- تحلیل فرکانسی نشان داد که بیشترین انرژی امواج در بازه ۳ تا ۴/۲ کیلوهرتز متمرکز است و همین ناحیه بیشترین حساسیت را به حضور سیال دارد.
- دامنه طیفی در این باند در آزمایش سوم ۱۰ تا ۱۲ برابر کمتر از آزمایش اول است که بیانگر بروز شدید پدیده نشتی انرژی است.
- نتایج PSD نشان داد که در حضور سیال، انرژی طیفی به‌جای تمرکز در یک باند باریک، در ناحیه‌ای وسیع‌تر با دامنه ضعیف‌تر پخش شده و ساختار مودال طیف دچار پراکندگی شده است.
- نمودار اختلاف طیفی نشان داد که مقدار اختلاف در برخی فرکانس‌ها به ۳۰-۳۵ dB می‌رسد که یک شاخص واضح از تغییر شرایط مرزی است.
- نتایج نشان می‌دهد که حتی با استفاده از حسگرهای ارزان‌قیمت و نرخ نمونه‌برداری پایین نیز می‌توان اثرات نشتی امواج را با دقت بالا پایش کرد.

مراجع

- [1] Hoseini Sabzevari SA (2025) Detection of Cracks and Lack of Fusion in Butt Joint Arc Welding Using Low Cost Acoustical Sensors. *NDT Tech*, 4(1) 14-24.
- [2] Hoseini Sabzevari SA, Jalal Kamali MH (2025) Looseness monitoring of Multi-Bolt connection using acoustic emission. *Ultrasonics*, 107895.
- [3] Qing X, Liu X, Zhu J, Wang Y (2021) In-situ monitoring of liquid composite molding process using piezoelectric sensor network. *Struct Health Monit* 20(5), 2840-2852.
- [4] Hoseini, Sabzevari SA, Javadpour SM (2023) Leakage localization in an underground pressurized pipeline in steady-state. *Int J Prres Ves Pip*, 205, 104979.
- [5] Hoseini, Sabzevari SA (2023) Leakage localization in a pressurized gas pipe. *JSFM* 12(6):181-190.

- [27] Drinkwater BW, Castaings M, Hosten B (2003) The measurement of A0 and S0 lamb wave attenuation to determine the normal and shear stiffnesses of a compressively loaded interface. *JASA* 113(6), 3161-3170.
- [28] Hoseini Sabzevari SA, Vakili-Azghandi M (2022) Acoustic source localization in an isotropic plate: Damper's coverage length optimization based on response surface method (RSM). *Meas* 199, 111476.
- [29] Hoseini Sabzevari SA, Moavenian M (2019) Performance analysis of non-reflective boundary conditions on sound localization problem in an isotropic plate. *Ultrasonics* 95, 22-31.
- [30] Mori N, Biwa S, Hayashi T (2013) Reflection and transmission of Lamb waves at an imperfect joint of plates. *J Appl Phys* 113(7).
- [31] Mori N, Biwa S (2015) Interaction of Lamb waves with an imperfect joint of plates: reflection, transmission and resonance. *Phys Procedia* 70, 480-483.
- [32] Boccaccio M, Fierro GPM, Meo M, Bolton G (2021) Development and focusing enhancement of nonlinear air-coupled acoustic technique for damage characterization in materials. *Mater Today* 34, 266-274.
- [21] Fan Z, Zhou Y, Wu T, Peng P (2021) The excitation and detection of Lamb waves in a droplet-loaded plate using air-coupled ultrasonic transducers. *Meas* 172, 108954.
- [22] Hoseini Sabzevari SA, Moavenian M (2015) Sound localization in plates using low cost acoustical sensors. *MME* 15(6), 190-196.
- [23] Pollock AA (1986) Classical wave theory in practical AE testing. *Progress in acoustic emission III-JAP society of non-destructive testing*, 708-721.
- [24] Schmidt D, Sadri H, Szewieczek A, Sinapius M, Wierach P, Siegert I, Wendemuth A (2013) Characterization of Lamb wave attenuation mechanisms. In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems* 8695, 9-16.
- [25] Schubert KJ, Herrmann AS (2011) On attenuation and measurement of Lamb waves in viscoelastic composites. *Compos Struct* 94(1), 177-185.
- [26] Fan Z, Jiang W, Cai M, Wright WM (2016) The effects of air gap reflections during air-coupled leaky Lamb wave inspection of thin plates. *Ultrasonics* 65, 282-295.