



بررسی تجربی اثر دمپره‌های الاستیک بر امواج بازتابی از مرزهای یک صفحه به هنگام تشخیص موقعیت منبع صدا

سید امیر حسینی سبزواری^{۱*} و مجید معاونیان^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰

چکیده

در این پژوهش اثر دمپره‌های الاستیک روی امواج بازتابی از مرزهای یک صفحه بررسی شده است. تقریباً در تمامی پژوهش‌های منتشر شده در حوزه تشخیص موقعیت صدا در صفحات، از اثر بازتاب امواج از مرزها صرف نظر شده است. برای این منظور در بخش آزمایشگاهی تحقیق از صدای اصابت توپ پینگ‌پنگ به یک صفحه پلکسی، استفاده شده است. در این آزمایش‌ها اثر دمپره‌های الاستیک روی امواج بازتابی از مرزها بررسی شده است. در این راستا یک بانک داده صدا به وسیله یک میکروفن خازنی و یک میکروفن ارتعاشی با نرخ داده برداری پایین ایجاد شده است. بانک داده فوق حاوی صدای ایجاد شده ناشی از اصابت توپ به صفحه معلق در حالت مختلف قرارگیری دمپرها است. در روش پیشنهادی نخست داده‌های مربوط به انتشار امواج در صفحه، جداسازی می‌شود. سپس با استخراج یک فضای ویژگی مبتنی بر انرژی سیگنال، نحوه اثرگذاری دمپرها بر روی امواج بازتابی از مرزهای صفحه مورد اشاره بحث می‌شود. در ادامه به منظور بررسی صحت آزمایش‌های انجام شده، از روش‌های تحلیل آماری استفاده شده است. نتایج حاصل شده حاکی از تأثیرپذیری مستقیم سیگنال ذخیره شده از لایه‌های الاستیک در تمامی جهات با شدت‌های غیر یکسان است.

کلمات کلیدی: تشخیص موقعیت صدا؛ استخراج ویژگی؛ انرژی؛ امواج لمب.

Experimental Analysis of Elastic Dampers Effect on Reflected Waves from Plate Edges in Sound Localization

S. A. Hoseini Sabzevari^{1*}, M. Moavenian²

¹ Assist. Prof., Mech. Eng., University of Gonbad, Gonabad, Iran

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

In this study elastic dampers are implemented to a plate edges to find the damper influence on reflected waves. Most of the published papers in the sound localization on plates were not considered the effect of reflected waves on the final localization. As an experimental example, the sound caused by ping pong ball impact on a Plexiglas plate is used. The effect of the elastic dampers on reflected waves are experimentally analyzed. For this purpose, a database is gathered using recorded signals by low sampling rate electret and pickup microphones. These sound's signals were recorded for different dampers position on the plate edges. In the proposed method, first the data related to the propagated waves are detected and isolated from the whole signals which are sent by the microphone. Then the effect of elastic dampers on reflected waves are analyzed by a space feature extracted from the energy of recorded signals. Furthermore, in order to evaluate experiment results, statistical analysis are used. The results show reflected waves from edges are clearly influenced by all elastic dampers in different efficiency.

Keywords: Sound Localization; Feature extraction; Energy; Lamb waves.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱۵۷۲۲۹۸۰۲-۱۵۸؛ فکس: ۰۵۱-۵۷۲۵۵۹۶۹

آدرس پست الکترونیک: hoseini.sabzevari@gonabad.ac.ir

۱- مقدمه

با وجود گسترش روش‌های تشخیص موقعیت صدا در سال‌های اخیر و کاهش خطای تخمین موقعیت، تشخیص موقعیت در صفحات با در نظر گرفتن امواج بازتابی از مرزها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های این حوزه باقی مانده است [۱]. امواج بازتابی از مرزها می‌تواند با مود متفاوت نسبت به امواج ارسالی منتشر شود. این ویژگی در کنار تعدد امواج بازتابی، نقش مهمی در ایجاد خطای تشخیص موقعیت بر عهده دارد. در اکثر پژوهش‌های پیشین محدوده آزمایش در میان صفحه و با فاصله از مرزهای آن انتخاب شده است تا اثر این بازتاب کاهش داده شود [۲]. با این حال ضرورت پاسخ‌گویی به نیازهای صنعتی، پژوهش روی صفحات کوچک و بررسی اثر امواج بازتابی را اجتناب ناپذیر کرده است.

تقریباً در تمامی پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه تشخیص موقعیت منبع صدا در صفحات از اثر بازگشت امواج از مرزها صرف نظر شده است [۳]. در واقع اکثر پژوهشگران به نادیده گرفتن اثر این ساده‌سازی در زیرمجموعه خطای نهایی تخمین موقعیت رضایت داده‌اند. از اندک پژوهش‌هایی که در آن به این اثر اشاره شده است، پژوهش صورت گرفته توسط ناکاتانی^۱ و همکاران [۴] است. در پژوهش فوق نویسندگان از بخش ابتدایی سیگنال ذخیره شده جهت محاسبه زمان رسیدن امواج به حسگرها استفاده کرده‌اند. آنان به‌صورت تجربی افزایش دقت در پاسخ نهایی را نشان داده‌اند. ناکاتانی اشاره کرده است که بخش اولیه سیگنال، کمترین تأثیر را از بازتاب امواج از مرزها در خود دارا است؛ لذا با استفاده از این تکنیک اثر بازتاب مرزها در پاسخ نهایی کاهش می‌یابد. روش مورد اشاره دارای دو ویژگی منفی (نقطه ضعف) عمده است: الف) وابستگی شدید به نرخ بالای داده برداری با در نظر گرفتن ابعاد صفحه و سرعت انتشار امواج در آن و ب) عدم حل مشکل بازتاب از مرزها.

نقش امواج بازتابی از مرزها در تشخیص ایجاد عیب ترک (موقعیت و ابعاد) در سازه‌ها بر خلاف حوزه تشخیص موقعیت

منبع صدا از اهمیت دوچندان برخوردار است. به نحوی که در بسیاری از موارد امکان دسترسی به پاسخی مناسب بدون در نظر گرفتن این موضوع غیرممکن می‌نماید. از طرفی با توجه به استفاده از روش‌های فعال در این گونه پژوهش‌ها (بر خلاف پژوهش حاضر) و امکان تحریک و انتشار امواج در یک بازه زمانی و فرکانسی محدود و مشخص، بررسی اثر مرزها روی امواج بازتابی قابلیت بحث و پیگیری پیدا می‌نماید.

بررسی اثر مرزها روی بازتاب امواج لمب در مقالات متعدد و با اشکال مرزهای مختلف، مورد بحث قرار گرفته است [۵-۱۱]. در این مقالات با مدل سازی اجزای محدود و بعضاً مقایسه‌های تجربی میزان عبور و بازتاب هر یک از مودهای متقارن و نامتقارن امواج لمب به‌صورت درصدی گزارش شده است.

یکی از کامل‌ترین پژوهش‌ها پیرامون نحوه تأثیر مرزها روی بازتاب امواج لمب توسط زایر اسرار بن احمد^۲ انجام شده است [۱۲، ۱۳]. احمد در رساله دکتری خود به‌صورت نیمه تحلیلی اثر اشکال مختلف مرزها و تقویت کننده‌ها را روی تغییر مود و بازتاب امواج لمب مورد بحث قرار داده است. پژوهش‌های فوق دارای تفاوت‌های ساختاری شدیدی با پژوهش حاضرند که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- تحریک در یک مود مشخص امواج لمب (با منحنی پراکنش مشخص).
- ۲- نرخ بالای داده برداری که امکان مشاهده اثر مرزها در داده‌های ذخیره شده را ایجاد می‌نماید.
- ۳- استفاده از روش‌های فعال که اطلاعات با ارزشی به‌خصوص در حوزه زمان برای ما ایجاد می‌نماید.

با توجه به موارد فوق و محدودیت‌های پژوهش حاضر، امکان بررسی بازتاب از مرزها مشابه آنچه در پژوهش‌های پیشین انجام شده است، وجود ندارد. در ادامه (باوجود محدودیت‌ها فوق) سعی شده است، به‌جای بررسی بازتاب امواج از مرزها به حذف آن‌ها بپردازیم. در این حوزه نیز، پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است [۱۴-۱۸]. در اکثر

² Zair Asrar Bin Ahmad

¹ Nakatani

مجموعه تجهیزات و لوازم مورد استفاده در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

۲-۲- ماهیت امواج منتشر شده

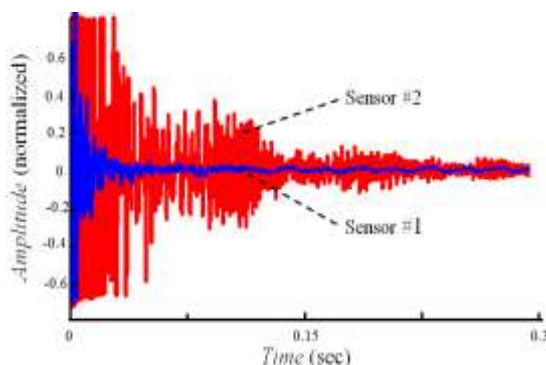
اصابت توپ پینگ پنگ رها شده به صفحه پلکسی، باعث ایجاد و انتشار امواج الاستیک در آن می‌شود. چگونگی انتشار این امواج پیش‌تر توسط نویسندگان بحث و بررسی شده



شکل ۱- تجهیزات آزمایش روی صفحه‌ی پلکسی



شکل ۲- نحوه‌ی اتصال حسگر به سطح صفحه



شکل ۳- سیگنال‌های ذخیره شده، ایجاد شده به وسیله ضربه در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از حسگرها

این مقالات به بررسی نحوه جذب امواج توسط دمپرها‌ی جاذب پرداخته شده است.

در این مقاله با قراردادن دمپرها‌ی الاستیکی روی مرزها، امواج بازتابی از مرزها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور با استفاده از یک حسگر صوتی خازنی و یک حسگر صوتی ارتعاشی که روی یک صفحه معلق (دهنه‌ی ورودی دیافراگم حسگر در حالت چسبیده به سطح صفحه قرار گرفته است) نصب شده‌اند، داده‌های مربوط به اصابت توپ پینگ‌پنگ به صفحه با حضور دمپرها‌ی الاستیکی در مرزها ذخیره می‌شود. در ادامه با بررسی و پردازش داده‌های ذخیره شده، نحوه‌اترگذاری دمپرها روی امواج بازتابی، مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- روش پیشنهادی

۲-۱- محیط آزمایش

در این بخش با طراحی آزمایش‌های متعدد کارایی استفاده از دمپرها‌ی الاستیکی در کاهش اثر امواج بازتاب شده نشان داده خواهد شد. مطابق شکل ۱ یک صفحه پلکسی با ابعاد $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ به عنوان سطح آزمایش در نظر گرفته شد. صفحه فوق به وسیله چهار فنر درون یک قاب متصل می‌شود، به گونه‌ای که می‌تواند آزادانه در راستای عمود بر سطح افق نوسان داشته باشد. محل اتصال دو حسگر و ضربه اعمالی در شکل نشان داده شده است. امواج صوتی به دو صورت: (۱) برخورد توپ پینگ-پنگ از ارتفاع ۶ سانتی‌متری (۲) برخورد جسم سخت به صفحه، ایجاد و منتشر می‌شود.

لایه‌های الاستیک که به شکل u تهیه شده‌اند، به نوبت مرزها را پوشش می‌دهند و داده‌های حاصل از اصابت برخوردها توسط دو حسگر ذخیره می‌شود. نحوه اتصال حسگرها به صفحه در شکل ۲ نشان داده شده است. داده‌های ذخیره شده ناشی از یک بار اصابت توپ به صفحه توسط دو حسگر فوق در شکل ۳ نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که هرچند میکروفون ارتعاشی به نوبت محیطی حساسیت بسیار کمتری نسبت به میکروفون خازنی از خود نشان می‌دهد، به علت فیلتر داخلی به همان میزان در دریافت امواج ناشی از بازتاب از مرزها ضعیف است. لذا در ادامه از داده‌های میکروفون خازنی استفاده گردید؛ همچنین

جدول ۱- شرایط و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش

توضیحات	تجهیزات مورد استفاده
	صفحه آزمایش
	پلکسی در ابعاد ۶۰ در ۶۰ سانتی‌متر به ضخامت ۵ میلی‌متر
	حسگر
	میکروفن خازنی با بیشینه فرکانسی ۳۰ کیلوهرتز دارای مدار تقویت کننده‌ی ۵ آمپری
	نحوه اتصال
	دهنده‌ی ورودی دیافراگم در دو حسگر چسبیده به سطح میز می‌باشد
	داده‌برداری
	کارت صدای TASCAM

$$\vec{u} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (۴)$$

حال با اعمال شرط کرنش صفحه‌ای معادلات به شکل رابطه (۵) ساده می‌شود [۲۰].

$$C_p \nabla^2 \varphi = \ddot{\varphi}, \quad C_p = (\lambda + 2\mu) / \rho$$

$$C_s \nabla^2 H_z = \ddot{H}_z, \quad C_s = \mu / \rho \quad (۵)$$

در آن C_p و C_s به ترتیب نشان دهنده سرعت انتشار موج فشاری و برشی در محیط است. برهم کنش میان دو موج نشان داده شده در رابطه (۵) و بازتاب‌های آن‌ها از سطوح صفحه، باعث ایجاد امواج لمب^۵ می‌شوند [۲۱].

انتشار امواج لمب به صورت مجموع دو پاسخ متقارن و نامتقارن در نظر گرفته می‌شود. با توجه به روابط اصابت توپ رها شده، باعث ایجاد و انتشار امواج الاستیک از نوع لمب در دو مود متقارن و نامتقارن می‌شود [۲۲، ۲۳].

امواج منتشر شده به وسیله میکروفون به صورت یک سیگنال زمانی ذخیره می‌شود و شامل اطلاعات هر دو مود منتشر شده در صفحه است.

۲-۳- نحوه انجام آزمایش

به منظور بررسی هرچه بهتر نحوه تأثیر این لایه‌های بر امواج منتشر شده آزمایش فوق ۱۶ مرتبه تکرار و داده‌ها ذخیره شدند. شماتیک صفحه مورد آزمایش و ابعاد آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

با تحلیل و آنالیز داده‌های ذخیره شده می‌توان نحوه عملکرد لایه‌های الاستیکی در کاهش بازتاب از مرزها را نشان داد. به منظور بررسی دقیق و با توجه به حجم بالای داده‌های ذخیره شده، این داده‌های در گروه‌های کوچکتری تقسیم بندی و بررسی شدند.

لازم به ذکر است که با توجه به مشخصات فنی حسگرهای مورد استفاده، هرچه میزان نوسان داده‌های ذخیره شده کاهش بیشتری داشته باشد، این نشان دهنده عملکرد بهتر لایه‌های استفاده شده در کاهش بازتاب امواج از

است [۳]. در حالت کلی پاسخ انتشار امواج مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۹]:

$$\vec{u} = \vec{u}_p + \vec{u}_{SV} + \vec{u}_{SH} \quad (۱)$$

که در آن u_p ، u_{SV} و u_{SH} به ترتیب نشان دهنده موج فشاری^۱، موج برشی در صفحه عمودی^۲ و موج برشی در صفحه افقی^۳ است؛ همچنین جابجایی \vec{u} را می‌توان به صورت رابطه (۲) در نظر گرفت.

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

که در آن φ و \vec{H} به ترتیب توابع پتانسیل اسکالر و برداری، $\nabla \times$ نشان دهنده اپراتور کرل است. با جاگذاری معادلات حاکم بر امواج منتشر مطابق رابطه (۳) حاصل می‌شود.

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

که در آن ρ چگالی، λ و μ ضرایب لامه^۴ نامیده می‌شوند. با ساده‌سازی و صرف نظر کردن از یک بعد به علت ضخامت ناچیز صفحه پلکسی در مقایسه با دو بعد دیگر، رابطه (۴) حاصل می‌شود.

^۱ P-Wave

^۲ Shear-Vertical Wave

^۳ Shear-Horizontal Wave

^۴ Lamé

^۵ Lamb Waves

محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای این پژوهش و همچنین با اتکا به فرض شماره ۲، به منظور بررسی کمی اثر بازتاب امواج از مرزها از انرژی سیگنال در یک بازه ۲۵۰ میلی‌ثانیه‌ای استفاده شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۳ گزارش شده است. انرژی سیگنال مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} v^2(t) dt \quad (6)$$

که در آن $v(t)$ ، سیگنال صوتی ذخیره شده است.

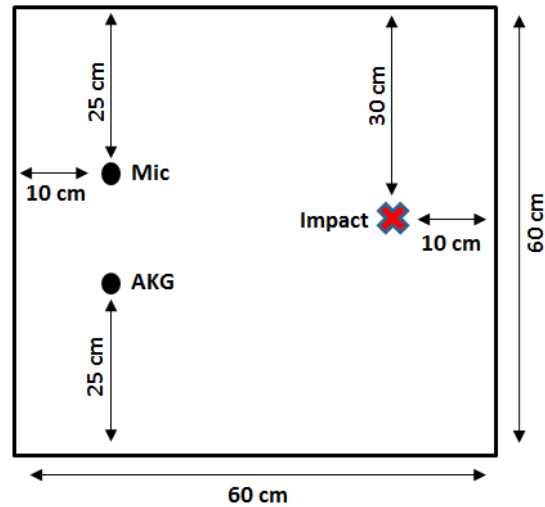
۳- بحث

مطابق داده‌های جدول ۲، تأثیر لایه‌های الاستیکی در کاهش بازتاب از مرزها به خوبی روشن می‌باشد. مطابق با نتایج بدست آمده تعیین الگوی مشخص میان محل قرارگیری لایه‌های الاستیکی با نرخ کاهش انرژی سیگنال دشوار است.

نتایج بدست آمده به وضوح کاهش اثر بازتاب‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های گزارش شده در جدول ۲ بیان رفتار مشخصی در کاهش بازتاب‌ها با توجه به موقعیت قرارگیری لایه‌های الاستیکی دیده نمی‌شود.

این عامل می‌تواند از دو دیدگاه مورد بررسی قرار گیرد: نحوه محاسبه انرژی سیگنال به این گونه بوده است که بعد از تعیین شروع ضربه، سیگنال به مدت ۲۵۰ میلی‌ثانیه، مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، انرژی محاسبه شده ارتباط شدیدی به دقت تعیین نقطه شروع ضربه دارد. در روش‌های فعال تعیین این زمان با توجه به تحریک صورت گرفته آسان است، در صورتی که در روش‌های غیرفعال (مانند این پژوهش) این نقطه تنها با استفاده از داده‌های ذخیره شده پس از انجام آزمایش قابل محاسبه است. هرگونه تغییر کوچک در تعیین نقطه شروع می‌تواند پاسخ نهایی را دستخوش تغییر نماید. ماهیت و ساختار لایه‌های مورد استفاده در این پژوهش یکسان است. به عبارت دیگر از خلل و فرج ایجاد شده در این لایه‌ها که در حین فرآیند قالب‌گیری ایجاد شده، صرف نظر شده است.

با توجه به موارد فوق بحث پیرامون تأثیر موقعیت قرارگیری لایه‌ها (و نه اصل وجودی آن) با توجه به محدودیت‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش و نرخ پایین داده برداری دشوار است.



شکل ۴- ویژگی‌های هندسی صفحه مورد آزمایش

مرزها است. همچنین در تمامی آزمایش‌ها فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۱. فنرهای نگه‌دارنده صفحه مورد بررسی در تمامی آزمایش‌ها افقی فرض شده‌اند. از جابجایی عمودی آن‌ها صرف نظر شده است.
 ۲. ضربات اعمالی در تمامی آزمایش‌ها از نظر شدت و بازه برخورد یکسان در نظر گرفته شده‌اند.
- با توجه به نرخ پایین داده برداری در این پژوهش (۴۴۱۰۰ داده بر ثانیه) در مقایسه با سرعت انتشار امواج در صفحه و ابعاد آن، تقریباً تمامی داده‌های ذخیره شده مستعد آلودگی به امواج بازتاب شده از مرزها می‌باشند. نکته مهم در اینجا فرض شماره ۲ است. این فرض به همراه نرخ پایین داده برداری ایجاد شرایط مناسب جهت انجام مقایسه دقیق را بسیار سخت می‌نماید.

لذا بررسی دقیق‌تر این پدیده نیازمند استفاده از روش‌های فعال (ایجاد موج تحریک در زمان و فرکانس مشخص و شدت یکسان) و نرخ داده برداری بالا (متناسب با محیط آزمایش) است. ناکاتانی و همکاران [۴] با انتخاب بخش اولیه سیگنال‌های ذخیره شده، نشان دادند که این بخش کمترین آلودگی به امواج بازتاب داده شده از مرزها را دارا است. در پژوهش صورت گرفته توسط ایشان از نرخ داده برداری ۱۰۰ میلیون داده بر ثانیه استفاده شده است. در این نرخ امکان بررسی جز به جز سیگنال و تأثیر اثر بازتاب از مرزها روی خود سیگنال وجود دارد. با توجه به

جدول ۲- انرژی سیگنال نرمالایز شده برای پنج بار تکرار آزمایش در ۱۶ حالت مختلف قرارگیری دمپرها

شماره آزمایش	انرژی سیگنال (واحد دلخواه)					میانگین
	تکرار اول	تکرار دوم	تکرار سوم	تکرار چهارم	تکرار پنجم	
۱	۱۱۶۵	۱۰۸۶	۱۰۴۴	۱۱۸۰	۱۱۱۵	۱۱۱۸
۲	۹۴۰	۸۷۹	۷۶۹	۱۰۲۲	۹۳۰	۹۰۸
۳	۱۰۶۷	۹۷۶	۱۱۱۱	۹۹۶	۹۸۰	۱۰۲۶
۴	۸۰۵	۸۵۹	۸۶۲	۸۷۴	۸۳۰	۸۴۶
۵	۷۹۶	۸۸۲	۸۶۷	۸۳۵	۹۰۵	۸۵۷
۶	۸۱۸	۸۷۱	۸۹۳	۸۰۶	۸۱۲	۸۴۰
۷	۷۶۳	۷۴۵	۷۲۷	۷۲۴	۷۲۱	۷۳۶
۸	۷۹۶	۷۹۳	۸۲۱	۸۰۷	۸۴۳	۸۱۲
۹	۸۳۱	۸۴۶	۸۴۰	۸۲۷	۸۲۱	۸۳۶
۱۰	۶۹۸	۷۰۹	۶۷۰	۶۷۸	۶۴۵	۶۸۰
۱۱	۷۲۲	۷۵۱	۷۰۴	۷۳۰	۶۹۳	۷۲۴
۱۲	۶۸۳	۶۶۷	۶۳۰	۶۳۶	۶۵۹	۶۵۵
۱۳	۷۰۴	۶۷۸	۷۱۵	۶۸۱	۶۸۲	۶۹۲
۱۴	۶۲۶	۶۷۱	۶۷۸	۶۲۹	۶۳۱	۶۴۷
۱۵	۶۸۷	۷۱۳	۶۹۸	۷۹۵	۶۷۲	۶۹۳
۱۶	۵۹۵	۶۱۲	۵۹۹	۶۱۶	۶۰۸	۶۰۶

۳-۱- تحلیل آماری

به منظور بررسی صحت آزمایش‌های انجام شده و مدل پیشنهاد شده از سه روش تحلیل آماری نمودارهای باقیمانده، کمیت‌های $R-sq$ و $R-sq(adj)$ و تکرار پذیر و تکثیر پذیری (Gage R&R) استفاده شد [۲۴].

نمودارهای باقیمانده: نمودارهای باقیمانده در شکل ۵ نشان داده شده‌اند که عبارت‌اند از: نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها و نمودار هیستوگرام.

نمودار احتمال نرمال در حالت ایده آل باید به صورت خط راستی با شیب ثابت باشد و به عنوان یک قانون کلی، باید سعی شود تا خط مورد نظر نقاط بین درصدهای ۲۵ الی ۷۵ را پوشش دهد. در زمان بررسی نزدیک بودن نقاط به خط راست باید تصور کنیم که می‌خواهیم یک مداد نسبتاً کلفت را بر روی مسیر نقاط قرار دهیم. همچنین حدود ۹۵ درصد از نقاط باید بین ۲ و ۲- قرار گیرند [۲۵]. نظر به اینکه نقاط رسم شده در این نمودار آزمون مداد را با موفقیت پشت سر گذاشته‌اند، لذا برداشت کلی که از این نمودار می‌توان داشت این است که توزیع خطاها تقریباً نرمال بوده است.

نمودار هیستوگرام در حالت کلی باید زنگوله‌ای شکل باشد. نمودار باقیمانده‌ها بر حسب مقادیر پیش بینی شده، نباید روند خاصی را نشان بدهد. نمودار باقیمانده‌ها بر حسب ترتیب اجرا، عدم وابستگی داده‌های آزمون را به زمان نشان می‌دهد و مانند نمودار قبلی باید تصادفی بوده و در اطراف خط صفر توزیع شده باشند [۲۴]. با توجه به مطالب بیان شده، تمامی نمودارها در شکل ۶ قابل قبول می‌باشند.

کمیت‌های $R-sq$ و $R-sq(adj)$: کمیت $R-sq$ ، میزان هماهنگی بین نتایج تجربی و محاسبه شده توسط مدل را نشان می‌دهد [۲۵]. $R-sq(adj)$ نوع دیگری از $R-sq$ متداول است که تعداد عوامل موجود در مدل در آن مورد توجه قرار می‌گیرند. در آزمایش‌های صورت گرفته کمیت‌های $R-sq$ و $R-sq(adj)$ به ترتیب ۹۳/۶۲ و ۹۲/۱۳ درصد گزارش شده است. اختلاف کم میان این دو مقدار نشان دهنده عدم وجود عوامل غیر مؤثر در مدل است.

تکرار پذیر و تکثیر پذیری (Gage R&R): مقدار مطلق این پارامتر ۲۷/۳۹ درصد گزارش شده است. هنگامی که این مقدار بین ۱۰ الی ۳۰ درصد گزارش می‌شود (مشابه پژوهش حاضر) بدان معنا است که سیستم اندازه‌گیری شده با در نظر گرفتن اهمیت اندازه‌گیری صورت گرفته، هزینه لوازم مورد استفاده و هزینه تعمیرات احتمالی قابل قبول است [۲۴].

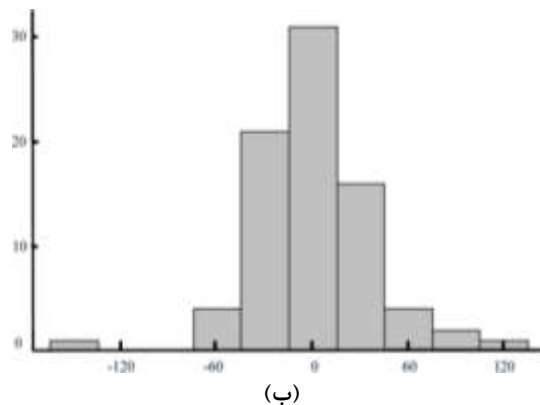
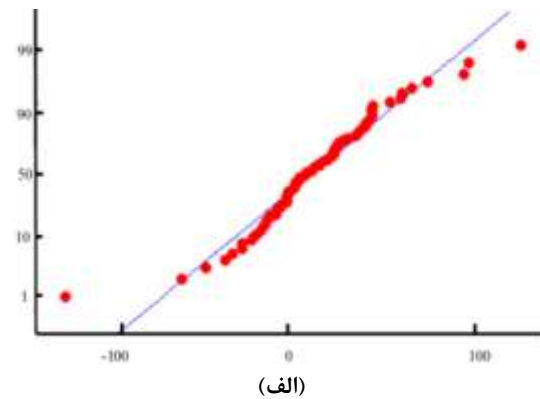
همچنین تأثیر وجود و یا عدم وجود دمپر الاستیکی روی انرژی سیگنال بررسی گردید. مطابق نتایج این بررسی، افزودن لایه‌های الاستیکی کاهش انرژی سیگنال شده است.

سیگنال ذخیره شده از لایه‌های الاستیکی در تمامی جهات با شدت‌های غیر یکسان است. بررسی اثر مرزها و بازتاب امواج منتشر شده و تأثیر آن در پاسخ نهایی به‌منظور تشخیص موقعیت منبع صدا در صفحات، در قدم‌های ابتدایی خود می‌باشد. این مهم نیازمند پژوهش‌های منسجم و هدفمندتری است که از فرصت پژوهش حاضر خارج است. انتظار می‌رود در آینده نزدیک با فراهم کردن اسباب و لوازم سخت افزاری مورد نیاز توفیق بررسی جامع و دقیق‌تری فراهم گردد.

۵- مراجع

- [1] Hoseini Sabzevari SA, Moavenian M (2017) Sound localization in an anisotropic plate using electret microphones. *Ultrasonics* 73: 114-124.
- [۲] حسینی سبزواری س ا، معاونیان م (۱۳۹۴) تشخیص موقعیت دو بعدی منبع صدا در صفحه شیشه‌ای با نرخ داده برداری پایین. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۳۹۳-۳۸۷: ۱۵(۱۲).
- [۳] حسینی سبزواری س ا، معاونیان م (۱۳۹۴) تشخیص موقعیت منبع صدا در صفحات بوسيله حسگرهای صوتی ارزان قیمت. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۱۹۶-۱۹۰: ۱۵(۶).
- [4] Nakatani H, Kundu T, Takeda N (2014) Improving accuracy of acoustic source localization in anisotropic plates. *Ultrasonics* 54(7): 1776-1788.
- [5] Ratassepp M, Klauson A, Chati F, Léon F, Déculot D, Maze G, Fritzsche M (2015) Application of orthogonality-relation for the separation of Lamb modes at a plate edge: Numerical and experimental predictions. *Ultrasonics* 57(2): 90-95.
- [6] Park I, Jun Y, Lee U (2014) Lamb wave mode decomposition for structural health monitoring. *Wave motion* 51(2): 335-347.
- [7] Moreau L, Castaings M, Hosten B, Predoi M (2006) An orthogonality relation-based technique for post-processing finite element predictions of waves scattering in solid waveguides. *J Acoust Soc Am* 120(2): 611-620.
- [8] Morvan B, Wilkie-Chancellier N, Duflo H, Tinel A, Duclos J (2003) Lamb wave reflection at the free edge of a plate. *J Acoust Soc Am* 113(3): 1417-1425.
- [9] Lowe M, Diligent O (2002) Low-frequency reflection characteristics of the S0 Lamb wave from a rectangular notch in a plate *J Acoust Soc Am* 111(1): 64-74.
- [10] Lowe M J, Cawley P, Kao J, Diligent O (2002) The low frequency reflection characteristics of the fundamental antisymmetric Lamb wave a0 from a rectangular notch in a plate. *J Acoust Soc Am* 112(6): 2612-2622.

مطابق با آزمایش‌های صورت گرفته، دمپر الاستیکی در بالای صفحه بیشترین تأثیر و دمپر الاستیکی در پایین صفحه کمترین تأثیر را داشته است. انتظار می‌رود با تغییر موقعیت محل قرارگیری حسگر و همچنین ضربه اعمالی، میزان اثر گذاری فاکتورها نیز تغییر نماید.



شکل ۵- نمودارهای مربوط به باقیمانده‌ها، الف) نمودار احتمال نرمال و ب) نمودار هیستوگرام

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی اثر دمپرهای الاستیکی روی امواج بازتابی از مرزهای یک صفحه پرداخته شد. با قرارگیری دمپرها روی مرزهای یک صفحه پلکسی جایگشت‌های مختلف آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در روش پیشنهادی انرژی سیگنال ذخیره شده توسط حسگرهای نصب شده روی صفحه محاسبه و چگونگی نرخ تغییرات آن نسبت به محل قرارگیری دمپرها بحث شد. در ادامه به‌منظور بررسی صحت آزمایش‌های انجام شده، از روش‌های تحلیل آماری استفاده شده است. نتایج حاصل حاکی از تأثیرپذیری مستقیم

- problems in honeycomb and CFRP plates using dashpot elements. *Compos Part B-Eng* 54(1): 1-10.
- [19] Graff K F (1975) *Wave motion in elastic solids*. Courier Dover Publications.
- [20] Dieulesaint E, Royer D (1980) *Elastic waves in solids: Applications to signal processing*. J Wiley New York.
- [۲۱] مختاری ا، اوحدی ع، امین‌داور ح (۱۳۹۴) بازسازی شکل عیب در ورق آلومینیومی توسط امواج هدایت شده‌ی لمب و استفاده از روش بازسازی چندضلعی در توموگرافی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۲۴۶-۲۳۹: ۱۵(۴).
- [22] Nakatani H, Hajzargarbashi T, Ito K, Kundu T, Takeda N (2013) Locating point of impact on an anisotropic cylindrical surface using acoustic beamforming technique. *Key Eng Mat* 558(2): 331-340.
- [23] Koabaz M, Hajzargarbashi T, Kundu T, Deschamps M (2011) Locating the acoustic source in an anisotropic plate. *Struct Health Monit* 11(3): 315-323.
- [24] Young HD (1962) *Statistical treatment of experimental data*. McGraw-Hill
- [25] Zamani H, Moghiman M, Kianifar A (2015) Optimization of the parabolic mirror position in a solar cooker using the response surface method (RSM). *Renew Energ* 81(2): 753-759.
- [11] Alleyne D, Cawley P (1991) A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals, *J Acoust Soc Am* 89(3): 1159-1168.
- [12] Ahmad Z, Vivar-Perez J, Gabbert U (2013) Semi-analytical finite element method for modeling of lamb wave propagation. *Aeronaut J* 4(1): 21-33.
- [13] Ahmad Z (2011) *Numerical Simulations of Lamb waves in plates using a semi-analytical finite element method*. Thesis, Magdeburg, Universität, Diss.
- [14] Shen Y, Giurgiutiu V (2015) Effective non-reflective boundary for Lamb waves: Theory, finite element implementation, and applications. *Wave Motion* 58(3): 22-41.
- [15] Hosseini S, Willberg C, Kharaghani A, Gabbert U (2014) Characterization of the guided wave propagation in simplified foam, honeycomb and hollow sphere structures. *Compos Part B-Eng* 56(2): 553-566.
- [16] Hosseini S, Kharaghani A, Kirsch C, Gabbert U (2013) Numerical simulation of Lamb wave propagation in metallic foam sandwich structures: a parametric study. *Compos Struct* 97(4): 387-400.
- [17] Hosseini S, Gabbert U (2013) Numerical simulation of the Lamb wave propagation in honeycomb sandwich panels: a parametric study. *Compos Struct* 97(3): 189-201.
- [18] Hosseini S, Gabbert U (2013) Non-reflecting boundary condition for Lamb wave propagation