



به کارگیری انتشار امواج آکوستیکی برای پایش مداوم و کم‌هزینه یک اتصال چندپیچی

سید امیر حسینی سبزواری^{۱*}، مهدی آدینه^۱

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

چکیده

شل‌شدگی پیچ‌ها در اتصالات مکانیکی، یکی از چالش‌های جدی در پایداری سازه‌های صنعتی است. در این پژوهش، یک روش نوین برای پایش وضعیت پیچ‌ها در اتصال چندپیچی با استفاده از سیگنال‌های صوتی منتشرشده (AE) و نرخ نمونه‌برداری پایین ارائه شده است. با طراحی محیط آزمایش شامل اتصال چهارپیچی، داده‌های صوتی در شانزده وضعیت مختلف (جایگشت‌های مختلف وضعیت پیچ‌ها) ثبت شدند. برای تحلیل داده‌ها، از ضرایب کپستروم فرکانس مل (MFCC) جهت استخراج بردارهای ویژگی استفاده شده و شاخص آماری RMSD برای ارزیابی تغییرات سیگنال‌ها به کار گرفته شد. نتایج نشان دادند که شاخص آماری -زمانی RMSD نسبت به شل شدن پیچ‌ها حساسیت کمی از خود نشان می‌دهند. به نحوی که وابستگی معناداری بین تعداد پیچ‌های شل و مقدار این شاخص مشاهده نگردید. در ادامه، پنج سناریو برای طبقه‌بندی وضعیت اتصال طراحی شد و عملکرد یک شبکه عصبی پیش‌خور ارزیابی گردید. بالاترین دقت طبقه‌بندی برابر با ۹۴/۴۴٪ در سناریویی حاصل شد که اتصالات با یک پیچ شل و یا بیشتر از دیگر موارد تفکیک شده بودند. روش پیشنهادی، ضمن بهره‌گیری از سخت‌افزار ساده و داده‌های سبک، دقت بالایی در شناسایی زودهنگام شل‌شدگی پیچ‌ها نشان داده و قابلیت استفاده در سامانه‌های پایش پیوسته در محیط‌های صنعتی را دارد.

کلمات کلیدی: شل‌شدگی پیچ؛ انتشار امواج آکوستیک؛ نمونه‌برداری پایین؛ ضرایب کپستروم فرکانس مل.

Employing Acoustic Emission for Cost-Effective Continuous Monitoring of a Multi-Bolt Joint

Seyed Amir. Hoseini Sabzevari^{1*}, Mahdi. Adineh¹

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

Abstract

Bolt loosening in mechanical joints remains one of the critical challenges in maintaining the structural integrity of industrial systems. In this study, a novel approach is proposed for monitoring the loosening status of bolts in a multi-bolt joint using low-sampling-rate acoustic emission (AE) signals. An experimental setup consisting of a four-bolt connection was designed, and acoustic signals were recorded under sixteen different bolt-tightening configurations. To analyze the signals, Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs) were extracted as feature vectors, and the root mean square deviation (RMSD) index was employed to quantify signal variations. The results showed that bolt loosening led to a noticeable increase in RMSD compared to the healthy state. However, no significant correlation was observed between the number of loosened bolts and RMSD values. Subsequently, five classification scenarios were designed, and the performance of a feedforward neural network was evaluated. The highest classification accuracy of 94.44% was achieved in the scenario where connections with one loosened bolts or more were separated from the rest. The proposed method, while relying on simple hardware and lightweight data, demonstrated high accuracy in the early detection of bolt loosening and shows strong potential for integration into continuous structural health monitoring systems in industrial environments.

Keywords: Bolt loosening; Acoustic emission; Low sampling rate; Mel-frequency cepstral coefficients.

۱- مقدمه

در طراحی و بهره‌برداری از سازه‌های صنعتی و مهندسی، اتصالات مکانیکی نقش کلیدی در تضمین ایمنی و پایداری عملکرد بر عهده دارند [۱]. در این میان، پیچ‌ها به دلیل سادگی ساختار، سهولت در نصب و جداسازی، و همچنین هزینه نسبتاً کم، به یکی از رایج‌ترین روش‌های اتصال بدل شده‌اند. با این وجود، یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از این نوع اتصالات، پدیده‌ی شل‌شدگی تدریجی تحت اثر بارهای دینامیکی و ارتعاشی است؛ مشکلی که می‌تواند منجر به کاهش پیش‌بار، افزایش احتمال خرابی خستگی، و حتی فروپاشی کامل سیستم شود [۲]؛ بنابراین، توسعه روش‌هایی برای پایش مستمر و دقیق وضعیت پیش‌بار پیچ‌ها، به‌ویژه در شرایط واقعی بهره‌برداری، یک نیاز اساسی در صنایع گوناگون محسوب می‌شود.

روش‌های مختلفی برای پایش وضعیت پیچ‌ها با هدف تشخیص زودهنگام شل‌شدگی توسعه یافته‌اند که از نظر فناوری و عملکرد، تنوع قابل‌توجهی دارند. یکی از دسته‌بندی‌های رایج، این روش‌ها را به سه گروه کلی تقسیم می‌کند [۳]: تکنیک‌های مبتنی بر تحلیل ارتعاشات، روش‌های مبتنی بر امپدانس الکترومکانیکی، و رویکردهایی که از امواج آکوستیکی و فراصوت بهره می‌گیرند. در گروه نخست، تغییر در ویژگی‌های دینامیکی همچون فرکانس طبیعی، به‌عنوان نشانه‌ای از کاهش سختی سازه و در نتیجه بروز شل‌شدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش دوم، تغییرات امپدانس را با استفاده از حسگرهای پیزوالکتریک ثبت و شناسایی می‌کند؛ اما حساسیت بالای این روش به شرایط محیطی، کارایی آن را در شرایط واقعی کاهش می‌دهد.

از سوی دیگر، روش‌های مبتنی بر تحلیل امواج آکوستیکی (AE) و فراصوت، در سال‌های اخیر مورد توجه قابل‌توجهی قرار گرفته‌اند [۴]. این روش‌ها با بررسی نحوه عبور امواج تحریک‌شده از میان اتصال، می‌توانند تغییرات ایجادشده در ناحیه تماس پیچ‌ها را تحلیل کرده و وضعیت آن‌ها را مورد ارزیابی قرار دهند. برخی از پژوهش‌ها این روش‌ها را بر اساس نوع تجهیزات به‌کاررفته نیز تقسیم‌بندی کرده‌اند: از جمله روش‌های بینایی محور [۵] که با تحلیل تصاویر وضعیت پیچ را بررسی می‌کنند، روش‌های ضربه‌ای [۶] که از پاسخ دینامیکی به ضربه برای استخراج اطلاعات استفاده می‌کنند و نهایتاً

روش‌های حسگر محور که وابسته به داده‌های مستقیم یا غیرمستقیم حاصل از حسگرهای متصل به سازه هستند.

در بین روش‌های وابسته به حسگر، دو رویکرد صریح و ضمنی مطرح است. در رویکرد صریح، رابطه‌ای مستقیم میان کمیت اندازه‌گیری‌شده (مانند نیروی پیش‌بار) و وضعیت پیچ برقرار است، در حالی که در روش ضمنی از پدیده‌هایی مانند تضعیف امواج، مدولاسیون صوتی، تحلیل بازگشت زمانی و یا مدل‌سازی امپدانس استفاده می‌شود تا وضعیت شل‌شدگی از طریق تحلیل‌های پیچیده‌تر شناسایی شود [۷، ۸].

از میان تمامی این روش‌ها، استفاده از سیگنال‌های AE به‌عنوان ابزاری برای پایش وضعیت پیچ‌ها، توجه ویژه‌ای در جامعه علمی به خود جلب کرده است. مزیت‌های اصلی این روش شامل هزینه پایین تجهیزات، سهولت استفاده از سخت‌افزار سبک و قابلیت به‌کارگیری در پایش‌های بلندمدت و مداوم است [۹]. در این رویکرد، مشابه برخی روش‌های دیگر، نقاط ارسال و دریافت سیگنال در دو سوی اتصال قرار گرفته و به بررسی سیگنال‌های عبوری پرداخته می‌شود.

ژانگ و همکاران [۱۰] نشان داده‌اند که انرژی سیگنال AE ارتباط مستقیمی با گشتاور باقیمانده و شرایط سطح تماس دارد؛ همچنین، بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی امکان دسته‌بندی وضعیت‌های گوناگون شل‌شدگی پیچ‌ها را با دقت بالا فراهم ساخته است.

نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که ویژگی‌هایی همچون مقدار RMS، فرکانس غالب و الگوی توزیع انرژی، می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط اصطکاک، لغزش و آغاز سایب در نواحی تماس پیچ‌ها فراهم کنند.

در همین راستا، تحقیقات جدیدتر به توسعه شاخص‌های کمی جدید با استفاده از ترکیب سیگنال‌های AE و الگوریتم‌های یادگیری عمیق یا تحلیل فرکانسی پرداخته‌اند. به‌طور مثال، برخی پژوهش‌ها باندهای فرکانسی خاصی (مانند بازه ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز) را معرفی کرده‌اند که نسبت به تغییرات ناشی از شل‌شدگی پیچ حساسیت بالاتری نشان می‌دهد [۱۱]. گروهی دیگر نیز تغییرات فاز امواج لمب هنگام عبور از اتصال پیچ‌ها را بررسی کرده و این تغییرات را به‌عنوان شاخصی برای شناسایی شل‌شدگی به کار گرفته‌اند [۱۲].

اگرچه پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه تشخیص شل‌شدگی در پیچ‌های منفرد به‌دست آمده است، اما پایش وضعیت در

صفحه مورد آزمایش درون یک قاب معلق قرار داده شد. امواج الاستیک تولید شده هنگام عبور از صفحه و اتصال، توسط حسگر دریافت و ذخیره شدند.

در منابع، روش‌های متنوعی برای ایجاد امواج پیشنهاد شده است. از جمله می‌توان به شکستن مغز مداد، رها کردن توپ از ارتفاع مشخص و اعمال ضربه مستقیم به صفحه اشاره کرد. با توجه به ویژگی‌های مکانیکی صفحه مورد آزمایش و به‌منظور کاهش اثر امواج بازتابی، در این پژوهش از روش ضربه مستقیم استفاده شده است. علاوه بر این، ضربه مستقیم نسبت به سایر روش‌ها ساده‌تر، تکرارپذیرتر و برای شرایطی که تحلیل بر حوزه فرکانس با نرخ نمونه‌برداری پایین متمرکز است، مناسب‌تر بوده و تفاوت معناداری در پاسخ نهایی نسبت به روش‌های دیگر ایجاد نمی‌کند.

بانک داده‌ی توسعه یافته شامل سیگنال‌های ثبت شده از آزمایش‌های متعدد و مجزا می‌باشد. این آزمایش‌ها شامل اتصال بدون ایراد و اتصال‌های دارای پیچ‌های شل با جایگشت‌های مختلف می‌شود. در تمام آزمایش‌ها، محل قرارگیری حسگر به‌طور ثابت در فاصله ۴۸ سانتی‌متری از محل ضربه قرار دارد. این فاصله بر اساس شرایط آزمایش و به‌صورت تجربی انتخاب شده است. این انتخاب باید به‌نحوی باشد که علاوه بر کاهش اثر اشباع و نویز محیطی در داده‌های ذخیره شده، موجب میرایی و تضعیف بیش از حد امواج منتشر شده، نگردد. لذا انتخاب مناسب این فاصله موجب بهبود نسبت سیگنال به نویز و افزایش تکرارپذیری آزمایش‌ها می‌گردد. شماتیک محیط آزمایش و موقعیت حسگر در شکل ۱ نمایش داده شده است. تجهیزات استفاده شده در این آزمایش‌ها در جدول ۱، فهرست شده‌اند.

جدول ۱- فهرست تجهیزات استفاده شده.

توضیحات	تجهیزات مورد استفاده
صفحات فولاد کربنی با ابعاد ۳۰ در ۱۰ سانتی-متر و ضخامت ۳ میلی‌متر، با چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	صفحه
چهار عدد پیچ M۸	پیچ
حسگر صوتی خازنی با بیشینه‌ی فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز و جرم ۰/۸ گرم	حسگر
قاب چوبی برای معلق نمودن صفحات هنگام انجام آزمایش	قاب آزمایش

اتصال‌های چندپیچی همچنان مسئله‌ای پیچیده و مورد توجه پژوهشگران است [۱۳]. در این مطالعه، رویکردی نوین برای تشخیص شل‌شدگی یک اتصال چندپیچی ارائه شده است. تمرکز اصلی این پژوهش، پایش وضعیت پیچ‌ها 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. روش پیشنهادی امکان تشخیص زود هنگام شرایط ناپایدار اتصال را با استفاده از تحلیل ویژگی‌های زمانی و فرکانسی سیگنال‌های ثبت شده فراهم می‌کند. در گام نخست، اتصال تک‌پیچ به‌صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته و ویژگی‌های کلیدی مؤثر در تشخیص شل‌شدگی استخراج می‌شوند. سپس با تعمیم این ویژگی‌ها به یک اتصال چهارپیچی، تأثیر حالت‌های مختلف شل‌شدگی (منفرد یا ترکیبی) تحلیل می‌گردد. روش ارائه شده به‌دلیل بهره‌گیری از داده‌های سبک و ساختار تحلیل ساده، قابلیت پیاده‌سازی در کاربردهای صنعتی را فراهم می‌آورد.

۲- روش پیشنهادی

۲-۱- محیط آزمایش

برای ایجاد بانک داده یک محیط آزمایش طراحی و ساخته شد. در این محیط، دو صفحه‌ی فلزی از جنس فولاد به ابعاد ۳۰ در ۱۰ سانتی‌متر، با ضخامت ۳ میلی‌متر و به جرم ۰/۷۱۰ کیلوگرم دو به دو به‌وسیله‌ی چهار پیچ M۸ به یکدیگر متصل شدند. لبه‌های صفحات پیش از اتصال با عملیات تمیزکاری آماده-سازی شدند. جهت دریافت صدای منتشر شده، از یک میکروفون خازنی با بیشینه فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز و جرم ۰/۸ گرم [۱۴]، به همراه یک کارت صدا با نرخ داده برداری ۴۴۱۰۰ داده بر ثانیه استفاده شد. دهنه‌ی دیافراگم میکروفون به‌گونه‌ای بر روی سطح صفحه ثابت شد که دریافت نویز محیط پیرامون را به حداقل برساند [۱۵].

انتخاب این تجهیزات ساده و کم‌هزینه، مزیتی مهم نسبت به روش‌های مبتنی بر امپدانس یا حسگرهای پیزوالکتریک محسوب می‌شود؛ چراکه علاوه بر سهولت نصب، داده‌های سبک‌تری تولید کرده و حساسیت کمتری به تغییرات محیطی دارند. این ویژگی‌ها امکان استفاده از روش پیشنهادی را برای پایش بلندمدت و پیاده‌سازی صنعتی فراهم می‌کند؛ همچنین،

که در آن چگالی، λ و μ ضرایب لامه^۵ نامیده می شوند. با ساده سازی معادلات و صرف نظر کردن از یک بعد (به دلیل ضخامت ناچیز صفحه فولادی در مقایسه با دو بعد دیگر) رابطه (۴) حاصل می شود.

$$\vec{u} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (4)$$

با اعمال شرط کرنش صفحه، معادلات به شکل رابطه (۵) ساده می شوند [۱۸].

$$C_p^2 \nabla^2 \phi = \ddot{\phi} \quad C_p = (\lambda + 2\mu) / \rho \quad (5)$$

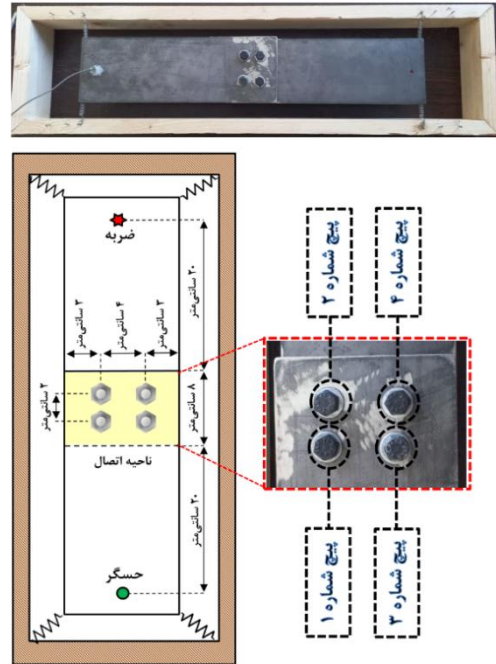
$$C_s^2 \nabla^2 H_z = \ddot{H}_z \quad C_s = \mu / \rho$$

که در آن C_p و C_s به ترتیب سرعت انتشار موج فشاری و برشی هستند. برهم کنش این امواج و بازتاب های آنها از سطح صفحه، منجر به ایجاد امواج لمب^۶ می شود. این امواج ترکیبی از دو مود متقارن و نامتقارن هستند که در اثر ضربه، هر دو مود در صفحه ایجاد و منتشر می شوند [۱۹].

سیگنال های دریافت شده توسط میکروفون به صورت داده های زمانی ذخیره می شوند و اطلاعات هر دو مود را در بر دارند. با این حال، به دلیل نرخ نمونه برداری پایین، تفکیک این مودها امکان پذیر نیست.

۲-۳- میانگین جذر مربعی انحراف ها^۷ (RMSD)

در پایش سلامت سازه ها، شاخص های آماری متعددی به منظور شناسایی آسیب ها از طریق تحلیل تغییرات امپدانس توسعه یافته اند. در میان این شاخص ها، میانگین جذر مربعی انحراف ها عملکرد مناسبی در شناسایی شل شدگی پیچ ها از خود نشان داده است. این شاخص هم زمان تحت تأثیر جابه جایی های عمودی و افقی در سیگنال امپدانس قرار دارد؛ به گونه ای که جابه جایی های عمودی نشان دهنده تغییرات دامنه و جابه جایی های افقی بیانگر تغییرات فرکانسی هستند. میانگین جذر مربعی انحراف ها مطابق رابطه (۶) محاسبه می شود.



شکل ۱- صفحه مورد آزمایش و موقعیت قرارگیری پیچ ها

۲-۲- امواج منتشر شده

اعمال ضربه بر صفحات فولادی موجب تولید امواج الاستیک می شود [۱۶]. این امواج هنگام عبور از محل اتصال، تحت تأثیر وضعیت پیچ ها موجود قرار گرفته و توسط حسگر دریافت و ذخیره می شوند. انتشار این امواج در صفحه مطابق رابطه (۱) تعریف می شود [۱۷]:

$$\vec{u} = \vec{u}_p + \vec{u}_{SV} + \vec{u}_{SH} \quad (1)$$

که در آن u_p ، u_{SV} و u_{SH} به ترتیب نمایانگر موج فشاری^۱، موج برشی در صفحه عمودی^۲ و موج برشی در صفحه افقی^۳ هستند. جابجایی \vec{u} را می توان به صورت رابطه (۲) بیان کرد.

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \phi + \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (2)$$

که در آن ϕ و \vec{H} به ترتیب توابع پتانسیل اسکالر و برداری، ∇ نشان دهنده اپراتور گرادینان و $\nabla \times$ نمایانگر اپراتور کرل است. با جاگذاری رابطه (۲) در معادله ناویر^۴، معادلات حاکم بر امواج منتشر شده به صورت رابطه (۳)، بیان می شوند.

$$\vec{\nabla} \left((\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi - \rho \ddot{\phi} \right) + \vec{\nabla} \times \left(\mu \nabla^2 \vec{H} - \rho \ddot{\vec{H}} \right) = 0 \quad (3)$$

⁵ Lamé

⁶ Lamb Waves

⁷ Root Mean Square Deviation

¹ P-wave

² Shear-Vertical wave

³ Shear-Horizontal wave

⁴ Navier

$$S_i(k) = \sum_{n=1}^N S_i(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (8)$$

پس از آن، طیف توان سیگنال با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P = \frac{|FFT(x_i)|^2}{N} \quad (9)$$

برای تطابق بهتر با ویژگی‌های ادراکی انسان، فرکانس‌های به دست آمده به مقیاس مل (Mel Scale) نگاشت می‌شوند. این تبدیل غیرخطی از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$Mel(f) = 2595 \ln\left(1 + \frac{f}{700}\right) \quad (10)$$

سپس طیف توان با استفاده از یک بانک فیلتر مثلثی در حوزه مل فیلتر می‌شود. این فیلترها به نحوی طراحی شده‌اند که فرکانس‌های پایین با دقت بالاتر و فرکانس‌های بالا با دقت کمتر تفکیک شوند. در نهایت، برای کاهش هم‌خطی میان ضرایب و تسهیل در تحلیل‌های آماری یا مدل‌سازی‌های یادگیری ماشین، از تبدیل کسینوسی گسسته (DCT) استفاده می‌شود. ضرایب MFCC با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شوند:

$$C(n) = \sum_{m=0}^{N-1} s(m) \cos\left(\frac{\pi n(m-0.5)}{M}\right), \quad n = 1.2 \dots L \quad (11)$$

که در آن L تعداد ضرایب خروجی و M تعداد فیلترهای مثلثی در بانک فیلتر مل است.

مزیت اصلی استفاده از این ضرایب نسبت به شاخص‌های کلاسیک ساده‌تر مانند RMSD یا دامنه پیک، توانایی آن در نمایش الگوی فرکانسی سیگنال در قالب داده‌های فشرده و قابل پردازش است. این ویژگی موجب آموزش شبکه عصبی با داده‌های پایدارتر و با ابعاد کمتر می‌گردد؛ لذا توانایی شبکه در تفکیک و آشکارسازی اتصال سالم از معیوب افزایش می‌یابد.

۳- آزمایش

در روش پیشنهادی امواج لمب حاصل از ضربه‌ی اعمالی پس از عبور از اتصال، توسط حسگر صوتی ذخیره می‌گردد. فاصله‌ی میان حسگر و محل ۴۸ سانتی‌متر بوده و موج منتشر شده با عبور از محل اتصال، تحت تاثیر وضعیت چهار پیچ موجود قرار

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{[H^*(w_i) - H(w_i)]^2}{[H(w_i)]^2} \right]} \quad (6)$$

که در آن $H(w)$ و $H^*(w)$ به ترتیب سیگنال‌های ذخیره شده در وضعیت بدون عیب و وضعیت نامعین هستند؛ همچنین N تعداد نقاط فرکانسی موجود در طیف سیگنال ذخیره شده است.

مطالعات تجربی نشان داده‌اند که شاخص RMSD در برابر نویز مقاومت بیشتری نسبت به دیگر شاخص‌ها دارد. شایان ذکر است که نوع شاخص‌ها، صرفاً معیارهایی آماری هستند که فاقد معنا یا تفسیر فیزیکی مشخص می‌باشند؛ بنابراین تنها به‌عنوان ابزاری برای سنجش میزان اختلاف بین وضعیت مرجع (سالم) و وضعیت فعلی سازه به کار می‌روند [۲].

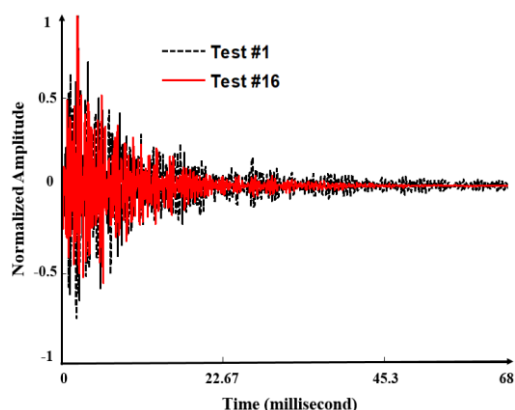
۲-۴- استخراج ویژگی با استفاده از ضرایب کپسترال فرکانس مل

در تحلیل سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی، یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای استخراج ویژگی، ضرایب کپستروم فرکانس مل (MFCC) به شمار می‌رود [۲۰]. این ضرایب ابتدا برای تشخیص گفتار توسعه داده شدند، اما به دلیل شباهت ویژگی‌های ادراکی سیستم شنوایی انسان با پاسخ سیستم‌های مکانیکی به تحریک‌های دینامیکی، به‌طور گسترده در تحلیل‌های غیرکلامی مانند شناسایی عیوب نیز استفاده می‌شوند.

در این روش، ابتدا سیگنال خام به بازه‌های زمانی کوتاه تقسیم می‌شود (Framing) تا بتوان ویژگی‌های گذرای سیگنال را با دقت بهتری بررسی کرد. برای جلوگیری از ناپیوستگی لبه‌های بازه‌ها، پنجره‌گذاری بر روی هر فریم انجام می‌شود. در این پژوهش از پنجره‌ی همپینگ با تابع زیر استفاده شده‌است:

$$W(n, a) = (1 - a) - \text{acos}\left(\frac{2\pi n}{N - 1}\right), \quad 0 < n \leq N - 1 \quad (7)$$

که در آن N طول پنجره و a ضریب شکل‌دهنده است. در گام بعد، با استفاده از تبدیل فوریه سریع، سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل می‌شود. این تبدیل به‌صورت زیر انجام می‌گیرد:



شکل ۲- مقایسه حوزه زمان سیگنال‌های ذخیره شده در آزمایش‌های ۱ و ۱۶ (میانگین ۳۰ مرتبه تکرار آزمایش)

جدول ۳- متوسط مقدار میانگین جذر مربعی انحراف داده‌های ذخیره شده در ۳۰ مرتبه تکرار آزمایش.

انحراف معیار	RMSD		شماره آزمایش
	در فرکانس غالب	RMSD	
۰/۰۰۷۵	۰/۰۳۹۸	۰/۰۴۲۹	۱
۰/۰۰۸۶	۰/۰۶۳۵	۰/۰۶۶۰	۲
۰/۰۰۷۹	۰/۰۵۶۰	۰/۰۵۸۲	۳
۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۲۹	۴
۰/۰۰۵۸	۰/۰۶۰۲	۰/۰۶۴۴	۵
۰/۰۰۴۳	۰/۰۶۹۸	۰/۰۷۳۵	۶
۰/۰۰۸۴	۰/۰۴۵۶	۰/۰۴۷۸	۷
۰/۰۰۵۶	۰/۰۶۲۸	۰/۰۶۴۳	۸
۰/۰۰۶۶	۰/۰۶۳۳	۰/۰۶۶۳	۹
۰/۰۱۰۳	۰/۰۳۸۸	۰/۰۴۱۶	۱۰
۰/۰۱۱۰	۰/۰۶۸۵	۰/۰۷۱۰	۱۱
۰/۰۰۷۰	۰/۰۶۸۲	۰/۰۷۱۶	۱۲
۰/۰۱۳۹	۰/۰۳۲۲	۰/۰۳۲۵	۱۳
۰/۰۱۰۷	۰/۰۶۴۲	۰/۰۶۶۸	۱۴
۰/۰۰۶۱	۰/۰۷۵۶	۰/۰۷۹۱	۱۵
۰/۰۰۷۶	۰/۰۴۹۸	۰/۰۵۲۷	۱۶

به منظور بررسی اثر تعداد پیچ‌های شل، در شکل ۳ مقدار میانگین جذر مربعی انحراف برای پنج گروه زیر ارائه شده است:

گروه اول: همه پیچ‌ها سفت (آزمایش ۱)

گروه دوم: سه پیچ سفت (آزمایش‌های ۲، ۳ و ۹)

گروه سوم: دو پیچ سفت (آزمایش‌های ۴، ۷، ۱۰، ۱۱ و ۱۳)

گروه چهارم: یک پیچ سفت (آزمایش‌های ۸، ۱۲، ۱۴ و ۱۵)

می‌گیرد. به نحوی که سیگنال ذخیره شده حاوی اطلاعات ارزشمندی از وضعیت پیچ‌ها در اتصال خواهد بود.

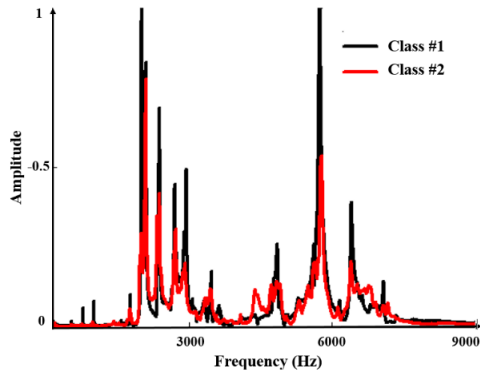
در این پژوهش وضعیت پیچ‌ها در صرفاً دو حالت: کاملاً سفت و شل در نظر گرفته شده است. جایگشت‌های مختلف وضعیت چهار پیچ در اتصال شکل ۱، مطابق جدول ۲، در قالب شانزده آزمایش بررسی و تحلیل می‌گردد.

در شکل ۲، سیگنال ذخیره شده در آزمایش‌های شماره ۱ و ۱۶ با یکدیگر مقایسه و در حوزه زمان ترسیم شده‌اند. به منظور مقایسه دقیق و کمی سیگنال‌های ذخیره شده، مقدار میانگین جذر مربعی انحراف داده‌های ذخیره برای تمامی آزمایش‌ها طی ۳۰ تکرار محاسبه و در جدول ۳ گزارش شده است. بیشترین مقدار ۰/۰۷۹۱ و کمترین مقدار ۰/۰۳۲۵ به ترتیب مربوط به آزمایش‌های پانزدهم و سیزدهم بوده است.

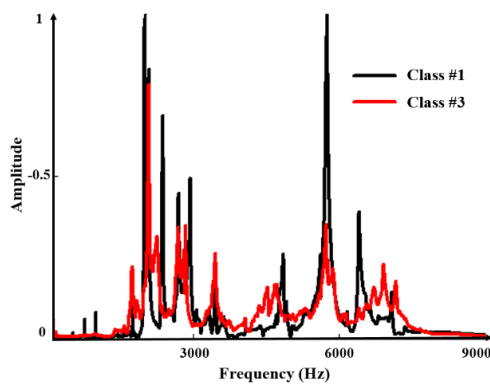
جدول ۲- وضعیت پیچ‌ها در اتصال.

شماره آزمایش	موقعیت پیچ			
	۴	۳	۲	۱
۱	سفت	سفت	سفت	سفت
۲	شل	سفت	سفت	سفت
۳	سفت	شل	سفت	سفت
۴	شل	شل	سفت	سفت
۵	سفت	سفت	شل	سفت
۶	شل	سفت	شل	سفت
۷	سفت	شل	شل	سفت
۸	شل	شل	شل	سفت
۹	سفت	سفت	سفت	شل
۱۰	شل	سفت	سفت	شل
۱۱	سفت	شل	سفت	شل
۱۲	شل	شل	سفت	شل
۱۳	سفت	سفت	شل	شل
۱۴	شل	سفت	شل	شل
۱۵	سفت	شل	شل	شل
۱۶	شل	شل	شل	شل

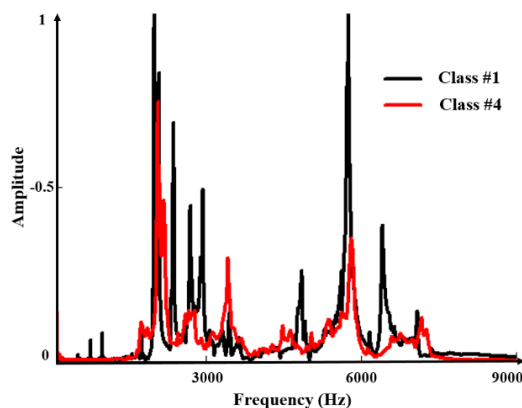
سیگنال‌ها در این محدوده تأثیر محسوسی در تغییر جذر مربعی انحراف داده‌ها، ایجاد نکرده است.



شکل ۴- مقایسه حوزه فرکانس میانگین سیگنال‌های ذخیره شده در آزمایش‌های گروه اول و گروه دوم



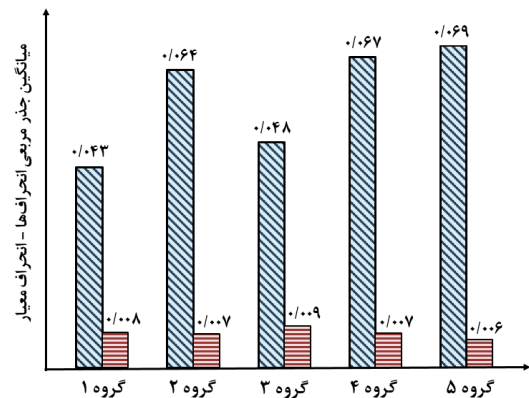
شکل ۵- مقایسه حوزه فرکانس میانگین سیگنال‌های ذخیره شده در آزمایش‌های گروه اول و گروه سوم



شکل ۶- مقایسه حوزه فرکانس میانگین سیگنال‌های ذخیره شده در آزمایش‌های گروه اول و گروه چهارم

گروه پنجم: همه پیچ‌ها شل (آزمایش ۱۶)

مطابق داده‌های گزارش شده در شکل ۳، وجود پیچ شل در اتصال موجب افزایش قابل توجه میانگین جذر مربعی انحراف نسبت به اتصال سالم (گروه اول- همه پیچ‌ها سفت- در مقایسه با دیگر گروه‌ها) می‌گردد. هیچ ارتباط معناداری میان تعداد پیچ‌های شل و محل پیچ‌های شل، با این مقدار ملاحظه نمی‌شود. این موضوع با توجه به رفتار غیرخطی و موضعی تغییر سختی در اتصال، قابل توجیه می‌باشد. مطابق داده‌های شکل ۳ و همچنین پژوهش‌های پیشین، همانطور که انتظار می‌رفت، تفاوت چندانی در میان داده‌های ذخیره شده در حوزه زمان مشاهده نمی‌شود. این موضوع با توجه به نرخ پایین داده برداری و ابعاد هندسی اتصال قابل انتظار و توجیه است.



شکل ۳- میانگین جذر مربعی انحراف‌های پنج‌گانه

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر شل شدن پیچ‌ها، سیگنال‌های ذخیره شده از آزمایش‌های مختلف به حوزه فرکانس منتقل و میانگین طیف فرکانسی هر گروه محاسبه شد. نتایج حاصل در شکل‌های ۴ الی ۷ گزارش شده‌است. در این شکل‌ها طیف فرکانسی میانگین گروه اول (وضعیت مرجع با همه پیچ‌های سفت) در مقایسه با سایر گروه‌ها نمایش داده شده‌است.

مطابق نتایج حاصل شده، فرکانس‌های غالب در سیگنال‌های ذخیره شده عمدتاً در بازه‌ی ۱۵۰۰ الی ۷۵۰۰ هرتز قرار دارند؛ لذا مقدار میانگین جذر مربعی انحراف داده‌های ذخیره شده در این بازه فرکانسی، مجدداً محاسبه و در جدول ۳ گزارش شد. داده‌های این جدول نشان می‌دهد که فیلتر کردن

پنهان گردد. در مقابل، در حوزه فرکانس همان تغییرات به شکل جابه‌جایی و تغییر شکل پیک‌های طیفی نمایان می‌گردند. بنابراین، نتایج به‌دست آمده ضرورت استفاده از تحلیل حوزه فرکانس در فرآیند استخراج ویژگی و تشخیص وضعیت اتصال را برجسته می‌کند.

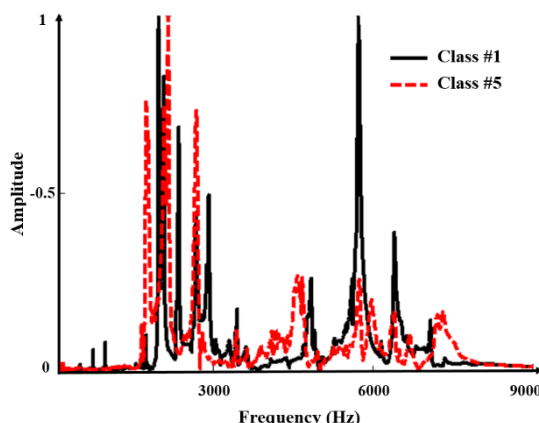
بر اساس مقایسه‌های انجام‌شده در شکل‌های ۴ تا ۷، مشخص شد که تغییرات ناشی از شل‌شدگی پیچ‌ها در برخی بازه‌های فرکانسی مانند ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ هرتز و همچنین حوالی ۶۰۰۰ هرتز برجسته‌تر ظاهر می‌شوند. این نواحی از طیف به تغییرات سختی اتصال حساسیت بیشتری نشان می‌دهند و اختلاف میان اتصال سالم و معیوب را واضح‌تر منعکس می‌کنند.

به بیان دیگر، در این بازه‌ها جابه‌جایی و تغییر شکل پیک‌های طیفی به‌طور محسوس رخ می‌دهد، در حالی که در سایر بخش‌های طیف هم‌پوشانی بیشتری بین حالت‌های مختلف دیده می‌شود. البته انتظار می‌رود موقعیت دقیق این نواحی فرکانسی با تغییر شرایط آزمایشگاهی (مانند ابعاد و جنس صفحات یا تعداد پیچ‌ها) دچار تغییر شود. هرچند یافتن ارتباط دقیق‌تر نیازمند بررسی کمی است؛ لذا در بخش ۴، به بررسی دقیق و کمی این تغییرات می‌پردازیم.

۴- بحث

مطابق نتایج گزارش شده در بخش قبل، سیگنال‌های ذخیره شده نسبت به وضعیت پیچ‌ها در حوزه فرکانس حساسیت بیشتری در مقایسه با حوزه زمان، از خود نشان دادند؛ لذا به منظور استخراج ویژگی‌های مناسب جهت تعیین وضعیت پیچ‌ها در اتصال، هر سیگنال ذخیره شده به‌وسیله‌ی یک بردار ویژگی بیان خواهد شد. این بردار ویژگی شامل ضرایب استخراج شده با استفاده از ضرایب کپسترال فرکانس مل در هر آزمایش است.

مطابق رابطه ۱۰، برای هر سیگنال ذخیره شده یک بردار ویژگی به طول ۵۰ درایه ایجاد می‌شود: اگر سیگنال ذخیره شده در هر آزمایش را به‌وسیله‌ی بردار $S(t, i) = [S_1, S_2, \dots, S_N]$ بیان شود. که در آن معرف دامنه‌ی سیگنال در زمان t_n در i آمین تکرار (با بیشینه‌ی تعداد داده‌ی N) است. در این صورت هر سیگنال به‌وسیله‌ی یک بردار ویژگی



شکل ۷- مقایسه حوزه فرکانس میانگین سیگنال‌های ذخیره شده در آزمایش‌های گروه اول و گروه پنجم.

شکل ۴ مقایسه طیف فرکانسی گروه اول و دوم (سه پیچ سفت) را نشان می‌دهد. اگرچه الگوی کلی طیف‌ها مشابه است، اما در برخی بازه‌های فرکانسی مانند بازه‌های ۲۵۰۰-۳۵۰۰ هرتز و همچنین حدود ۶۰۰۰ هرتز اختلافاتی مشاهده می‌شود. شکل ۵ تفاوت میان گروه اول و سوم (دو پیچ سفت) را نمایش می‌دهد. در این حالت، تفاوت‌ها نسبت به گروه دوم، به‌ویژه در نواحی فرکانسی پایین‌تر از ۳۰۰۰ هرتز و نزدیک به ۷۰۰۰ هرتز برجسته‌تر هستند.

شکل ۶ مربوط به مقایسه گروه اول و چهارم (تنها یک پیچ سفت) است. در این نمودار، میزان اختلاف در طیف فرکانسی افزایش یافته و دامنه برخی پیک‌های طیف کاهش محسوس نسبت به حالت مرجع داشته است. این تغییرات در بازه‌های ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ هرتز محسوس‌تر هستند.

شکل ۷ تفاوت میان گروه اول و پنجم (همه پیچ‌ها شل) را نمایش می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، تفاوت‌ها در این حالت بیشترین مقدار را دارند و پیک‌های اصلی طیف دچار جابه‌جایی و تغییر شکل محسوس شده‌اند.

بررسی صورت گرفته در حوزه فرکانس، نشان می‌دهد با کاهش تعداد پیچ‌های سفت، تغییرات در این حوزه بسیار واضح‌تر از حوزه زمان است. هرچند در حوزه زمانی تفاوت‌های چشمگیری میان سیگنال‌ها دیده نمی‌شود، اما بررسی‌ها در حوزه فرکانس حاکی از وجود الگوهای متمایز در شرایط مختلف شل شدن پیچ‌ها است. علت این موضوع به ماهیت گذرای سیگنال ضربه و نیز نرخ نمونه‌برداری پایین باز می‌گردد که باعث می‌شود تغییرات ناشی از شل‌شدگی در حوزه زمان

جهت طبقه‌بندی بانک داده‌ی ایجاد شده، از شبکه عصبی [۲۱] استفاده شده‌است. شبکه عصبی طراحی شده، از نوع پیش‌خور بوده و شامل دو لایه پنهان با تعداد نرون‌های ۱۵۰ و ۱۰۰ به ترتیب در لایه اول و دوم است. انتخاب پارامترهای شبکه عصبی بر پایه‌ی آزمون‌های تجربی و عملکرد مناسب روی داده‌های اعتبارسنجی صورت گرفت. بدین ترتیب شبکه ظرفیت کافی برای تفکیک الگوهای غیرخطی را پیدا کرد و درعین حال پیچیدگی آن در حدی نگه‌داشته شد که بتواند برای مجموعه‌داده حاضر کارآمد باقی بماند. برای جلوگیری از بیش‌برازش، مجموعه داده به سه بخش آموزش (۷۰٪)، اعتبارسنجی (۱۵٪) و آزمون (۱۵٪) تقسیم گردید. حداکثر تعداد دوره‌های آموزشی، حداقل گرادیان و نرخ یادگیری اولیه

جدول ۴- نتایج شبکه‌های آموزش داده شده برای سناریوهای مختلف.

سناریو	تعداد گروه	دقت (%)
اول	۱۶	۴۷/۲۲
دوم	۵	۷۰/۸۳
سوم	۲	۸۳/۳۰
چهارم	۲	۹۰/۹۷
پنجم	۲	۹۴/۴۴

به ترتیب ۵۰۰، ۱۰^{-۷} و ۰/۰۱ انتخاب شده است. نتایج آزمون حاصل شده از شبکه‌های آموزش داده شده برای سناریوهای مختلف در جدول ۴، گزارش شده‌است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۴، می‌توان مشاهده کرد که دقت طبقه‌بندی در سناریوهای مختلف به طور معناداری با یکدیگر متفاوت است. در سناریو اول که شامل ۱۶ گروه مجزا برای هر آزمایش است، پایین‌ترین دقت طبقه‌بندی با مقدار ۴۷/۲۲ درصد به دست آمده است. این موضوع قابل انتظار است، چراکه در این سناریو، شبکه عصبی باید بین تعداد زیادی از کلاس‌های مشابه تمایز قائل شود و به دلیل پیچیدگی بالا و احتمال هم‌پوشانی ویژگی‌ها میان کلاس‌ها، عملکرد مدل کاهش می‌یابد.

$ES(t, i) = [ES_1, ES_2, \dots, ES_{50}]$ معرفی می‌گردد که در آن ES_n معرف ضریب n ام فرکانس مل هست.

سیگنال‌های ذخیره شده، شامل ۳۰ تکرار در ۱۶ آزمایش متفاوت و مجموعاً ۴۸۰ سیگنال است. هر کدام از این ۴۸۰ سیگنال به وسیله یک بردار ویژگی به طول ۵۰ درایه نمایش داده می‌شود.

برای بررسی دقیق‌تر، پنج سناریو طراحی شد که در آن‌ها تلاش شده است آزمایش‌ها با رفتار فیزیکی و دینامیکی مشابه در یک گروه قرار گیرند.

۱- **سناریو اول:** هر آزمایش به عنوان گروه مستقل و در مجموع ۱۶ گروه مجزا در نظر گرفته شده است.

۲- **سناریو دوم:** آزمایش‌ها به پنج گروه مجزا به شرح زیر تقسیم شده‌اند:

- گروه اول: همه‌ی پیچ‌ها سفت (آزمایش شماره ۱).
- گروه دوم: سه پیچ سفت (آزمایش‌های شماره ۵، ۳، ۲ و ۹).
- گروه سوم: دو پیچ سفت (آزمایش‌های شماره ۴، ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱).
- گروه چهارم: یک پیچ سفت (آزمایش‌های شماره ۱۴، ۱۲، ۸ و ۱۵).
- گروه پنجم: همه‌ی پیچ‌ها شل (آزمایش شماره ۱۶).
- ۳- **سناریو سوم:** آزمایش‌ها به دو گروه مجزا تقسیم شده‌اند:
 - گروه اول: سه پیچ سفت و یا بیشتر (آزمایش‌های شماره ۹، ۵، ۳، ۲، ۱ و ۹).
 - گروه دوم: دو پیچ شل و یا بیشتر (آزمایش‌های شماره ۴، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶).
- ۴- **سناریو چهارم:** تقسیم بندی آزمایش‌ها در دو گروه مجزا به شرح زیر است:
 - گروه اول: دو پیچ سفت و یا بیشتر (آزمایش‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۳).
 - گروه دوم: سه پیچ شل و یا بیشتر (آزمایش‌های شماره ۸، ۱۲، ۱۴، ۱۵ و ۱۶).
- ۵- **سناریو پنجم:** آزمایش‌ها در دو گروه به شرح زیر دسته‌بندی شدند:
 - گروه اول: همه پیچ‌ها سفت (آزمایش شماره ۱).
 - گروه دوم: یک پیچ شل و یا بیشتر (آزمایش‌های شماره ۱، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک روش نوین برای پایش وضعیت اتصال چندپیچی با استفاده از سیگنال‌های آکوستیکی در نرخ نمونه‌برداری پایین معرفی شد.

در قدم اول، یک بانک داده‌ی صوتی به‌وسیله‌ی یک میکروفون ساده ایجاد گردید. بانک داده‌ی فوق حاوی ۴۸۰ سیگنال منتشر شده از یک اتصال چهارپیچی در شانزده وضعیت متخلف پیچ‌ها است. به‌منظور تحلیل داده‌ها دو فضای ویژگی با استفاده از شاخص آماری RMSD در حوزه زمان و فرکانس و ضرایب کپستروم فرکانس مل (MFCC) استخراج گردید. در ادامه، چند سناریو برای طبقه‌بندی وضعیت پیچ‌ها طراحی و عملکرد شبکه عصبی پیش‌خور ارزیابی گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده:

- شاخص‌های حوزه زمان در تشخیص شل‌شدگی پیچ دقت محدودی داشتند، در حالی‌که شاخص‌های حوزه فرکانس حساسیت بیشتری از خود نشان دادند.
 - شاخص RMSD اگرچه توانست حضور یا عدم حضور پیچ شل شده در اتصال را نمایان نماید، اما این شاخص حساسیت مشخصی با تعداد پیچ‌های شل شده نشان نداد.
 - ویژگی‌های استخراج‌شده با شاخص MFCC با توجه به ثبت تغییرات مناسب الگوی فرکانسی در وضعیت‌های مختلف اتصال، به عنوان ورودی برای طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفتند.
 - انتخاب مرزهای طبقه‌بندی متناسب با رفتار فیزیکی سازه، می‌تواند توانایی مدل در تفکیک وضعیت‌ها را به‌طور معناداری افزایش دهد. در حالی‌که سناریو اولیه دارای شانزده کلاس مجزا تنها دقت ۴۷/۲۲٪ را ثبت کرد، سناریوهای چهارم و پنجم با تعریف دو گروه بر اساس شل بودن بیش از دو پیچ، دقت قابل‌توجه به‌تریب ۹۰/۹۷٪ و ۹۴/۴۴٪ را به‌دست آوردند.
 - روش پیشنهادی با تکیه بر سخت‌افزار سبک و داده‌های کم‌حجم، قابلیت پیاده‌سازی در سامانه‌های پایش پیوسته را دارد.
- همچنین با توجه به نتایج حاصل شده از این پژوهش، موارد زیر جهت بررسی در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد:
- توسعه سامانه پایش مداوم در مقیاس صنعتی و آزمایش در مدل‌های واقعی با بارگذاری دینامیکی متنوع.

در سناریوی دوم، که آزمایش‌ها در قالب ۵ گروه تقسیم شده‌اند، دقت شبکه به میزان قابل توجهی افزایش یافته و به ۷۰/۸۳ درصد رسیده است. این بهبود را می‌توان به کاهش تعداد کلاس‌ها و هم‌گروه‌سازی آزمایش‌هایی با شرایط فیزیکی نسبتاً مشابه (تعداد پیچ‌های سفت) نسبت داد. در این شرایط، مدل توانسته الگوهای مشترک میان داده‌های هر گروه را بهتر یاد بگیرد.

در سناریوی سوم، تقسیم‌بندی تنها در دو گروه انجام شده است، اما مرز تفکیک بین این دو گروه به گونه‌ای تعریف شده که همچنان شامل گروه‌هایی با رفتار دینامیکی نسبتاً متفاوت است. به همین دلیل دقت طبقه‌بندی در این سناریو به ۸۳/۳۰ درصد افزایش یافته که نسبت به سناریوی دوم بیشتر است.

در مقابل، سناریوهای چهارم و پنجم بالاترین دقت طبقه‌بندی را با مقدار چشمگیر به‌تریب ۹۰/۹۷ و ۹۴/۴۴ درصد به خود اختصاص داده است. این موفقیت را می‌توان به تعریف بهینه‌تر مرز بین کلاس‌ها نسبت داد؛ به گونه‌ای که تمایز دینامیکی میان دو گروه در این سناریو بیشتر از سایر تقسیم‌بندی‌ها بوده و در نتیجه، شبکه توانسته است به‌خوبی تفاوت بین الگوهای صوتی حاصل از اتصالات با تعداد زیاد پیچ شل و اتصالات با پیچ‌های نسبتاً سفت را بیاموزد. به بیان دیگر، در این سناریو یک گروه شامل اتصالاتی است که بخش عمده‌ای از سختی خود را حفظ کرده‌اند و گروه دیگر شامل اتصالاتی است که کاهش محسوسی در سختی دارند؛ همین مرزبندی روشن باعث شد داده‌ها هم‌پوشانی کمتری داشته باشند و مدل با دقت بالاتری الگوهای صوتی را تفکیک کند.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که نحوه تعریف گروه‌ها و ساختار تقسیم‌بندی، تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد مدل طبقه‌بندی دارد. افزایش تعداد کلاس‌ها و شباهت بین داده‌های گروه‌های مختلف، دقت تشخیص را کاهش می‌دهد؛ در حالی که انتخاب تقسیم‌بندی‌هایی با تفاوت‌های فیزیکی و دینامیکی واضح، باعث افزایش قدرت تفکیک‌پذیری مدل می‌شود. بر این اساس، سناریوهای چهارم و پنجم به عنوان مناسب‌ترین روش‌های طبقه‌بندی برای مسأله مورد بررسی معرفی می‌شوند. این یافته‌ها می‌تواند راهنمایی ارزشمند برای طراحی سیستم‌های پایش وضعیت مبتنی بر صوت در سازه‌های مکانیکی باشد.

- [9] Wang X, Zhang J, Liu Z, He T, Tang G (2025) Full lifecycle quantitative monitoring and early warning of bolt loosening based on acoustic emission. *Struct Health Monit.* 14759217241313309.
- [10] Zhang Z, Xiao Y, Su Z, Pan Y (2019) Continuous monitoring of tightening condition of single-lap bolted composite joints using intrinsic mode functions of acoustic emission signals: a proof-of-concept study. *Struct Health Monit.* 18(4):1219-34.
- [11] Wang X, Yue Q, Liu X (2024) Bolted lap joint loosening monitoring and damage identification based on acoustic emission and machine learning. *MSSP.* 1(220):111690.
- [12] Sun J, Yang H, Li D, Xu C (2023) Experimental investigation on acoustic emission in fretting friction and wear of bolted joints. *JSV.* 18(558):117773.
- [13] Li D, Nie JH, Wang H, Ren WX (2024) Loading condition monitoring of high-strength bolt connections based on physics-guided deep learning of acoustic emission data. *MSSP.* 1(206):110908.
- [14] Hoseini Sabzevari SA, Javadpour SM (2023) Leakage localization in an underground pressurized pipeline in steady-state. *Press Vessel Pip.* 1(205):104979.
- [15] Hoseini Sabzevari SA, Moavenian M (2016) Sound Localization in Glass Plate Using Low Sampling Rate. *MME.* 15(12):387-93.
- [16] Hoseini, Sabzevari SA, and M. Moavenian. (2018) Experimental Analysis of Elastic Dampers Effect on Reflected Waves from Plate Edges in Sound Localization. *JSFM* 8(3): 205-212.
- [17] Hoseini Sabzevari SA, Moavenian M (2015) Sound localization in plates using low cost acoustical sensors. *MME.* 15(6):190-6.
- [18] Dieulesaint E, Royer D (1980) Elastic waves in solids: applications to signal processing.
- [19] Hoseini, Sabzevari SA (2023) Leakage localization in a pressurized gas pipe. *JSFM* 12(6):181-190.
- [20] Abdul ZK, Al-Talabani AK (2022) Mel frequency cepstral coefficient and its applications: A review. *IEEE Access.* 18(58):122136.
- [21] Homaeinezhad MR, Sabzevari SA, Ghaffari A, Daevaeiha M (2012) High-accuracy characterization of ambulatory Holter electrocardiogram events: a comparative study between Walsh-Hadamard transform, first-derivative-based and intelligent techniques. *IJSBBT* 1(3):40-71.

- ترکیب و مقایسه داده‌های آکوستیکی با سایر حسگرها با هدف افزایش اطمینان در تشخیص شل‌شدگی پیچ.
- بررسی معماری‌های ساده‌تر برای شبکه عصبی و به‌کارگیری روش‌های منظم‌سازی (مانند ایست‌زودهنگام یا جستجوی بهینه‌سازی معماری) به‌منظور ایجاد تعادل میان دقت و پیچیدگی محاسباتی.

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] Nguyen TT, Ta QB, Ho DD, Kim JT, Huynh TC (2023) A method for automated bolt-loosening monitoring and assessment using impedance technique and deep learning. *J Environ Dev.* 1(14):100122.
- [3] Yuan R, Lv Y, Wang T, Li S, Li H (2022) Looseness monitoring of multiple M1 bolt joints using multivariate intrinsic multiscale entropy analysis and Lorentz signal-enhanced piezoelectric active sensing. *Struct Health Monit.* 21(6):2851-73.
- [4] Zhao Y, Zhang Y, Wang J, Yue Q, Chen H (2025). Comparison of non-destructive testing methods of bolted joint status in steel structures. *Measurement,* 1 (242): 116318.
- [5] Meng Y, Lei W, Yuan F, Yi T, Shi Y, Ke Y, Guo J, Wu T (2025) Automated vision-based bolt loosening detection and localization for operating hydraulic turbine rotors. *Struct Health Monit.* 13:14759217241305537.
- [6] Liu P, Wang X, Wang Y, Zhu J, Ji X (2024) Research on percussion-based bolt looseness monitoring under noise interference and insufficient samples. *MSSP.* 15(208):111013.
- [7] Li X, Wang S, Li Z, Yang R, Li Z (2024) Measurement of bolt axial stress using a combination of trailing wave and shear wave ultrasound. *NDT E Int.* 1(143):103056.
- [8] Li J, Wen B, Zhang Z, Li Q, He Y, Su Z (2024) Interface behaviors of elastic-plastic waves and its impact on uncertainties in vibro-acoustic modulation (VAM) for structural health monitoring (SHM) of bolt loosening. *MSSP.* 15(212):111268.