

پایش سلامت و تشخیص عیب سازه قاب شکل آلومینیومی با روش امپدانس الکترومکانیکی

محسن محسن زاده^۱

کارشناسی ارشد

سیدرضا حمزه‌لو^۲

استادیار

علی پورکمالی انارکی^۳

دانشیار

پایش سلامت سازه بر پایه امپدانس و با استفاده از مواد هوشمند پیزوالکتریک یکی از قدرتمندترین تکنیک‌های بازرسی غیرمخرب است. تحقیقات زیادی بر پایه روش‌های تجربی در این زمینه انجام شده اما مطالعات بر روی سازه قاب شکل (تیرال شکل^۴) انجام نگرفته است. در این مقاله روشی تحلیلی برای بدست آوردن طیف امپدانس الکترومکانیکی سازه قاب شکل و معادلات حاکم بر آن معرفی شده است. پس از انجام آزمونهای تجربی، مدلی تحلیلی امپدانس الکترومکانیکی بر اساس معادلات اویلر-برنولی سازه قاب شکل ارائه شده است. مقایسه همزمان طیف‌های امپدانس حاصل از آزمایش‌های تجربی بر روی سازه سالم و سازه معیوب و همچنین اندیس‌های خرابی بدست‌آمده، تطابق و هماهنگی بین میزان سختی و امپدانس سازه را نشان می‌دهد. همچنین طیف حقیقی امپدانس بدست‌آمده از روش تحلیلی برای سازه قاب در شرایط مرزی یکسرگیردار با تقریب مناسبی نسبت به طیف تجربی محاسبه شده است. DOI: 10.30506/ijmep.2020.90780.1442

واژه‌های راهنما: امپدانس الکترومکانیکی، قاب آلومینیومی، ارزیابی سلامت سازه قاب، پیزو الکتریک

۱- مقدمه

مانیتورینگ بلادرنگ سلامت سازه‌ها (SHM) که امروزه مورد توجه محققین و صنعتگران قرار گرفته می‌تواند نوآوری بزرگی در زمینه تشخیص عیب و اطمینان از عملکرد سازه‌ها می‌باشد. روش‌های متنوعی به منظور ارزیابی سلامت سازه‌ها وجود دارد که معمولاً پایه و اساس آنها همان روش‌های متداول ارزیابی غیرمخرب می‌باشد و بنا بر کاربرد مورد نیاز این روش‌ها توسعه می‌یابند. روش امپدانس الکترومکانیکی یکی از این روش‌ها است که با استفاده از تغییرات امپدانس مکانیکی سازه که به واسطه حضور آسیب ایجاد می‌شود، سلامت سازه را بررسی می‌کند. تشخیص تغییرات امپدانس مکانیکی سازه با استفاده از معادل الکتریکی این روش امکان‌پذیر است که روش امپدانس الکترومکانیکی بوجود می‌آید. روش امپدانس الکترومکانیکی یک از آزمون‌های غیر مخرب است که امکان بازرسی تجهیزات به‌صورت پیوسته و درحین خدمت رسانی را امکان‌پذیر می‌سازد.

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران mohsen.mohsenzadeh88@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران rehamzeloo@srttu.edu

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران ali_pourkamali@srttu.edu

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۰۶، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۴

یکی از ابزارهای مورد استفاده برای شناسایی امپدانس الکترومکانیکی استفاده از مبدل‌های ورقه‌ای پیزوالکتریک است که به سازه متصل می‌گردد و با توجه به جرم ناچیز مبدل نسبت به سازه، توانایی حس کردن تغییرات ایجاد شده در سازه را داراست که بطور روز افزون برای ارزیابی سلامت سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند. ثبت طیف امپدانس الکترومکانیکی سازه سالم برای پایش سلامت سازه لازم است. با مقایسه هر لحظه طیف امپدانس سازه با طیف سازه مرجع می‌توان تغییرات ایجاد شده در امپدانس سیستم را مشاهده کرد و میزان سلامت سازه را بصورت بلادرنگ تشخیص داد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، مطالعات زیادی روی سازه تیر، هم به لحاظ بدست آوردن معادلات امپدانس به روش تئوری و هم به لحاظ انجام روش تجربی و مقایسه با روش تئوری صورت گرفته است. گام بعدی تشخیص عیب در سازه‌های پیچیده‌تر مانند سازه قاب است، که در این راستا اولین گام بررسی تیر ال شکل می‌باشد که این شکل سازه‌ها کاربردهای بسیاری در سازه‌های هوایی، صنایع نظامی و... به عنوان اتصال دهنده و نگهدارنده دارند که نیاز به بازرسی مداوم در آنها ضروری می‌باشد. در ادامه به بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته خواهد شد.

حمزه لو و همکاران در سال (۲۰۱۲) تشخیص عیب داخلی در استوانه‌های توخالی فلزی آلومینیومی و آهنی در ضخامت‌های مختلف را با روش اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی، مورد بررسی قرار دادند [۱]. آخوندی و همکاران در سال (۲۰۱۱) به بررسی عیوب ناشی از خوردگی در تیر یکسرگیردار و تاثیر عوامل ناشی از آن در امپدانس الکترومکانیکی تیر پرداختند [۲]. در سال (۱۹۹۴) تحقیقات لیانگ^۱ و همکارانش در زمینه خواص کوپلینگ وصله پیزوالکتریک متصل به یک تیر و استخراج امپدانس الکترومکانیکی سیستم منتشر شد [۳]. چودری^۲ و همکارانش تحقیقات را ادامه داده و با استفاده از محرکه‌های پیزوالکتریک که در دوطرف سازه متصل کرده بودند، توانایی تحریک و حس کردن پیزوالکتریک‌ها را با جزئیات آن بررسی و وابستگی ادیمیتانس الکتریکی به امپدانس سازه را برای اولین بار مشاهده کردند [۴]. این آزمایش امکان مانیتور کردن رفتار سازه را با اندازه‌گیری ادیمیتانس پیزوالکتریک ایجاد کرد. وانگ^۳ و همکارانش در سال (۱۹۹۷) یک مدل ریاضی ارائه کردند که سازگاری تغییر شکل بین وصله پیزوالکتریک و تیر یا ورق را بیان می‌کرد [۵].

جورجیتو^۴ و زاگری^۵ در سال (۲۰۰۰) آنالیز تک بعدی سنسور فعال پیزوالکتریک را انجام داده و مدل تحلیلی بر پایه تئوری ارتعاش سازه‌ای و تئوری پیزوالکتریک توسعه یافته را استخراج کرده و از آن برای پیش‌بینی پاسخ امپدانس الکترومکانیکی قابل اندازه‌گیری استفاده کردند [۶]. اینمن^۶ و پارک^۷ در سال (۲۰۰۱) امکان استفاده از روش امپدانس برای مانیتورینگ خطوط لوله را بررسی کرده و عیوب مربوط به شل شدن پیچ‌ها و اتصالات را مورد مطالعه قرار دادند [۷].

¹Liang²Chaudhry³Wang⁴Giurgiutiu⁵Zagari⁶Inman⁷Park

جورجیتو و همکارانش در سال (۲۰۰۱) مدلی تئوریک برای در نظر گرفتن اثر کوپلینگ دینامیکی بین قطعه پیزوالکتریک و تیر ارائه کردند [۸]. سان^۱ و بهالا^۲ نشان داده اند که قسمت حقیقی امپدانس حساسیت بیشتری نسبت به عیوب و تغییرات سازه نسبت به قسمت مختلط دارد [۹]، در حالی که اکثر مطالعات براساس اندازه گیری قسمت حقیقی امپدانس انجام گرفتند، بهالا و همکارانش یک مدل بر اساس قسمت فعال امپدانس ارائه دادند. تسنگ^۳ نیز در سال (۲۰۰۵) یک مدل تئوری برای پیزوالکتریک دوبعدی متصل به ورق مستطیلی ارائه کرد [۱۰]. همچنین وی مدلی تئوری برای ورق با سوراخ های مربعی نیز ارائه کرد که در آن اثر سوراخ ها به صورت کاهش ماتریس سفتی در نظر گرفته شد. در سال (۲۰۰۳)، اینمن دسته بندی و مرور تحقیقات بر روی روش امپدانس را منتشر نمود [۱۱]. وانگ با کمک همکارانش در سال (۲۰۰۶) یک تحلیل جامع تئوری از کوپلینگ دینامیکی بین سطوح یک سنسور پیزوالکتریک و یک نیم صفحه الاستیک انجام داد و نحوه تبدیل تغییر شکل های ایجاد شده مکانیکی تحت بارهای دینامیکی به سیگنال های الکتریکی و تأثیر پارامترهای مختلف در آن را بررسی کرد [۱۲]. دکتر شمشیرساز و همکاران در سال (۲۰۱۰) مدل سازی امپدانس الکترومکانیکی تیرهای یکسرگردار با مبدل پیزوالکتریک تعبیه شده روی تیر را انجام دادند، تیر پایه مورد مطالعه قرار گرفته و مدل های معادلات مربوط اویلر برنولی. کرنش و انرژی جنبشی در تیر و پیزوالکتریک به عنوان محرک با استفاده از مدل کل سیستم که در آن ماتریس جرم و سختی تیر و پیزوالکتریک یکپارچه است محاسبه شده است. این مدل یک رویکرد نظری کلاسیک پیوسته برای حل معادلات دینامیکی سیستم های مختلف از مدل های قبلی فراهم می کند. نتایج عددی مدل با استفاده از روش ریلی ریتز محاسبه شده است. سپس معادلات مربوط به پیزوالکتریک به عنوان حسگر برای به دست آوردن امپدانس الکتریکی خروجی از پیزوالکتریک پیاده سازی شده است [۱۳]. هیونگ^۴ جین لیم^۵ و همکاران در سال (۲۰۱۱) امپدانس مبتنی بر تشخیص آسیب تحت شرایط متنوع دما و بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفت [۱۴]. جی یونگ مین^۶ و همکاران در سال (۲۰۱۲) ترکیب روش امپدانس و تکنیک شبکه عصبی برای شناسایی نوع و شدت آسیب را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. سانگ^۷ و همکاران در سال (۲۰۱۳) اندازه گیری امپدانس الکترومکانیکی برای سازه های بزرگ با استفاده از یک مبدل پیزوالکتریک دوگانه را آزمایش کردند [۱۶]. جورجیتو و همکاران در سال (۱۹۹۹) بر روی بهبود معادلات امپدانس الکترومکانیکی تیر کامپوزیتی کار کرده و با شبیه سازی صورت گرفته مقایسه کرده اند [۱۷]. با توجه به بررسی های انجام شده تاکنون امپدانس سازه قاب شکل و معادلات حاکم بر آن مورد مطالعه قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر سازه قاب شکل آلومینیومی (تیر ال شکل) یکسرگردار و وصله پیزوالکتریک متصل به آن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا تشخیص عیوب ایجاد شده و تاثیر پارامترهای آن بر روی سازه قاب شکل به کمک روش تجربی امپدانس الکترومکانیکی و در ادامه بدست آوردن معادلات حاکم بر امپدانس سازه قاب شکل و مقایسه با نتایج تجربی بدست آمده می باشد.

¹Sun²Bhallah³Tseng⁴Hyung⁵Jin Lim⁶J Yong Min⁷sang

۲- روش تحقیق

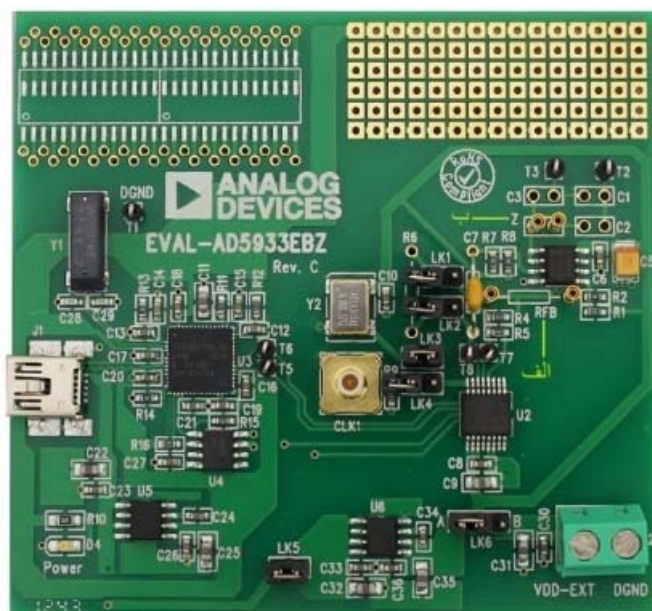
برای صحت‌گذاری روش امپدانس الکترومکانیکی در تشخیص عیوب ایجاد شده بر روی قاب، آزمایش‌های پایش سلامت سازه به روش امپدانس انجام گرفته است. در این بخش ابتدا تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری امپدانس پرداخته می‌شود. پس از آن به بررسی نوع و ابعاد نمونه‌های آزمایش و نحوه ایجاد عیوب شیاری بر روی آن پرداخته می‌شود.

۲-۱- آزمایش‌های تجربی

هدف از انجام آزمایش‌ها بررسی توانایی تشخیص عیوب شیاری بر روی سازه قاب به روش امپدانس الکترومکانیکی است. روش امپدانس الکترومکانیکی بر مبنای تشخیص تغییر سختی سازه بر اثر ایجاد عیب عمل می‌کند.

۲-۱-۱- تجهیزات اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی سنسورهای پیزوالکتریک نصب شده روی سازه، از برد متعلق به شرکت آنالوگ دیوایس^۱ که در شکل (۱) نشان داده شده، استفاده شده است. پهنای باند این برد ۱۰۰ کیلوهرتز است، بنابراین بیشتر آزمایش‌های روش امپدانس در این محدوده فرکانسی انجام شده است. برد مذکور حاوی بخش خودسنجی^۲ می‌باشد که امکان اندازه‌گیری امپدانس از یک سنسور/ محرکه (یعنی فقط از یک مکان هم برای تحریک و هم برای دریافت) را فراهم می‌سازد. سنسورهای پیزوالکتریک مورد استفاده دارای ابعاد $۱۲ \times ۰,۲۶۷$ میلی‌متر می‌باشد که به وسیله چسب بر روی سازه قاب قرار گرفته‌اند. مشخصات پیزوالکتریک در جدول (۱) نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۱- برد EVAL-AD5933EBZ برای اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی [۱۸]

^۱Analog Device

^۲Self-Sensing

جدول ۱- مشخصات ماده پیزو الکتریک

عناوین	واحد	مقدار	نماد
نوع پیزوالکتریک	-	PSI-5H4E	
ثابت دی الکتریک نسبی	-	3800	K_{T3}
ضریب کشش پیزوالکتریک	متر بر ولت	$650e - 12$	d_{33}
		$-320e - 12$	d_{31}
ضریب ولتاژ پیزوالکتریک	ولت متر بر نیوتن	$19e - 3$	g_{33}
		$-9.5e - 3$	g_{31}
ضریب اتصال (کوپلینگ)	-	0.75	k_{33}
		0.44	k_{31}
چگالی	کیلوگرم بر مترمکعب	7800	ρ
مدول الاستیک	نیوتن بر متر مربع	$5e10$	Y_{E3}
		$6.2e10$	Y_{E1}

ابتدا امپدانس نمونه‌ها در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰ کیلو هرتز اندازه‌گیری شده و سپس بازه ۲۰ تا ۴۰ کیلوهرتز به دلیل دارا بودن پیک‌های بیشتر برای تمامی نمونه‌ها انتخاب شده است.

۲-۱-۲- نمونه‌های آزمایش

مشخصات مکانیکی و هندسی نمونه‌های قاب آلومینیومی مورد استفاده جهت آزمایش تجربی در جدول (۳) آورده شده است. سازه قاب شکل مورد نظر یک تیر به طول ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد که از وسط (در فاصله ۳۰ سانتی متری از سرتیر) به اندازه ۹۰ درجه خم شده است. وصله پیزوالکتریک نیز در فاصله ۲۵ میلی‌متری از ابتدای تیر (شکل (۲)) نصب شده است. در این آزمایش‌ها امپدانس نمونه‌های سالم با شرایط مرزی یک سرگیردار اندازه‌گیری می‌شود، سپس بر روی نمونه‌ها عیوب شیاری در راستای عرض تیر ایجاد شده و مجدداً امپدانس نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله بعد با مقایسه طیف‌های امپدانس اندازه‌گیری شده اندیس‌های خرابی بدست می‌آیند. در مرحله اول عیوب شیاری با عرض ۱,۵ و عمق یک میلی‌متر همانند شکل (۳) در نقاط a و b و c به ترتیب بر روی تیر اول قاب (تیر افقی) ایجاد می‌گردند، به این شکل که شیارها در هر مرحله از پیزوالکتریک دور می‌شوند. سه عیب متوالی با فاصله‌های مساوی ۵۰ میلی‌متر از هم که شیار اول از سرتیر (کنار وصله پیزوالکتریک) در فاصله ۱۵۰ میلی‌متری قرار دارد.

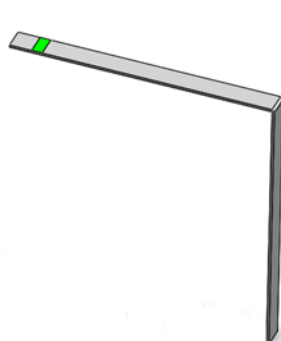
در مرحله بعد روی تیر دوم قاب (تیر عمودی) مطابق شکل (۴)، در نقاط a و b و c به ترتیب شیاری به عرض ۱,۵ و عمق ۱ میلی‌متر ایجاد می‌کنیم به طوری که شیارها در هر مرحله به وصله پیزوالکتریک نزدیک می‌شوند. پس از ایجاد شیارها در هر گام مقدار امپدانس قاب اندازه‌گیری می‌شود. برای هر نمونه سالم و همچنین پس از اعمال هر عیب، طیف امپدانس هر نمونه برداشته شده و به ترتیب سیگنال امپدانس مربوط به هر حالت دریافت، پردازش و نتایج اندیس خرابی از آن استخراج شده است.

۲-۲- تئوری روش امپدانس الکترومکانیکی

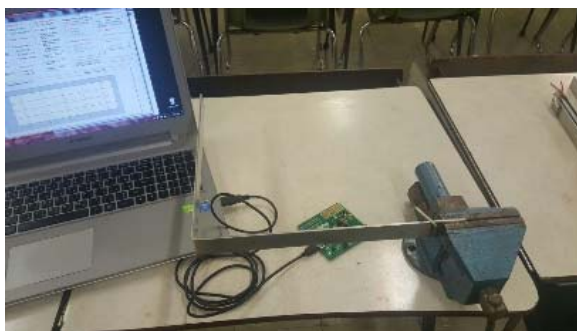
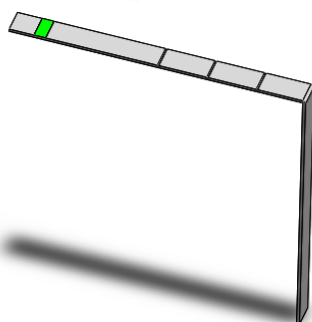
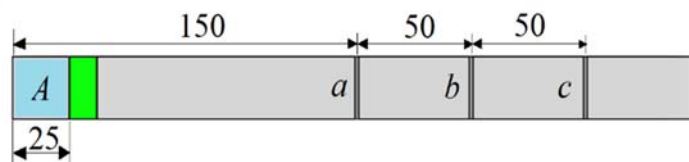
امپدانس الکترومکانیکی روشی برای پایش سلامت و تشخیص عیب سازه‌ها می‌باشد، که از طریق کوپلینگ مکانیکی بین سنسور پیزوالکتریک و سازه قاب و هدایت الکترومکانیکی درون سنسور پیزوالکتریک، امپدانس نقطه‌ای سازه به صورت مستقیم در امپدانس الکتریکی موثر منعکس می‌شود. روش امپدانس الکترومکانیکی با استفاده از تغییرات ایجاد شده در امپدانس، در نقطه‌ای که پیزوالکتریک روی سازه متصل شده، آسیب بوجود آمده در سازه را تشخیص می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات و ابعاد قاب آلومینیومی

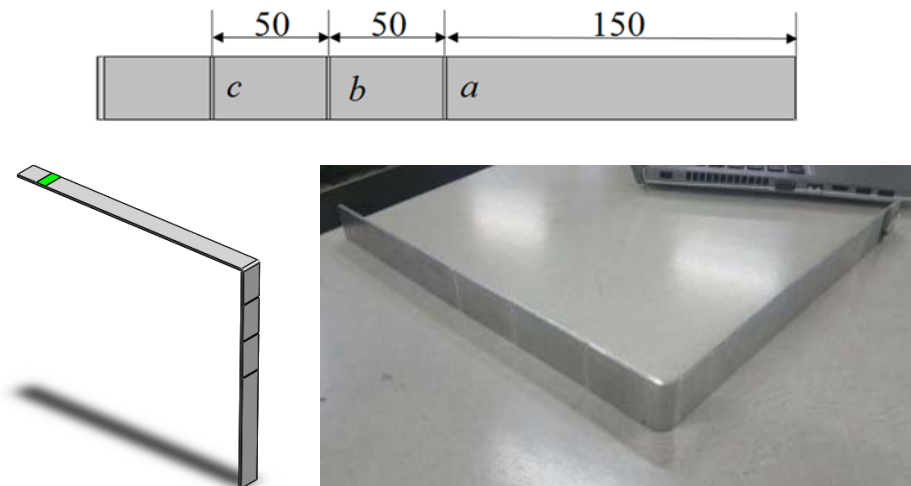
عناوین	واحد	مقدار
طول کل	متر	$6e - 1$
عرض	متر	$25e - 3$
ضخامت	متر	$3e - 3$
چگالی	کیلوگرم بر متر مکعب	2700
مدول الاستیسیته	نیوتن بر متر مربع	$70e9$



شکل ۲- قاب آلومینیومی و وصله پیزوالکتریک متصل شده روی آن



شکل ۳- نواحی ایجاد شیار بر روی تیر اول در قاب



شکل ۴- نواحی ایجاد شیار بر روی تیر دوم در قاب

جهت اندازه‌گیری امپدانس مکانیکی از معادل الکتریکی آن استفاده می‌شود که به این روش، امپدانس الکترومکانیکی گویند. برای اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی از سنسور پیزوالکتریک استفاده می‌گردد که مطابق شکل (۵) مدل می‌شود.

رابطه امپدانس الکترومکانیکی برای سنسور پیزوالکتریک متصل شده روی سازه به شکل زیر می‌باشد.

$$Z(\omega) = \frac{1}{i\omega C} (1 - K_{31}^2 r(\omega))^{-1} \quad (۱)$$

که در آن $Z(\omega)$ امپدانس الکترومکانیکی، ω فرکانس تحریک، C ظرفیت پیزواکتریک در بار صفر و K_{31} ضریب کوپلینگ الکترومکانیکال پیزوالکتریک می‌باشد که مطابق رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$K_{31} = d_{31} / \sqrt{S_{11} \varepsilon_{33}} \quad (۲)$$

و همچنین $r(\omega)$ نسبت سختی دینامیکی بین سازه قاب و وصله پیزوالکتریک نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

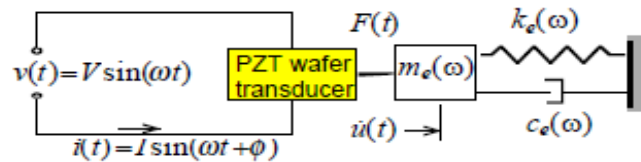
$$r(\omega) = \frac{k_{str}(\omega)}{k_{PZT} + k_{str}(\omega)} \quad (۳)$$

که $k_{str}(\omega)$ و $k_{PZT}(\omega)$ نیز به ترتیب سختی دینامیکی سازه و وصله پیزوالکتریک می‌باشند. با در نظر گرفتن وصله پیزوالکتریک به طول l_a ، عرض b_a ، و ضخامت t_a ، که تحت تاثیر میدان الکتریکی E_3 جابه‌جایی به اندازه u_1 دارد، معادلات مواد پیزوالکتریک به صورت روابط (۴) و (۵) است.

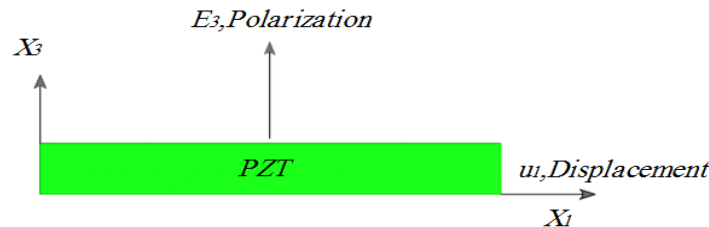
$$S_{11} = S_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad (۴)$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_3^T E_3 \quad (۵)$$

که در آن S_{11} کرنش مکانیکی، S_{11}^E ضریب کوپلینگ مکانیکی در بار الکتریکی صفر ($E = 0$)، T_1 تنش مکانیکی، d_{31} ضریب کوپلینگ پیزوالکتریک بین متغیرهای مکانیکی و الکتریکی، D_3 جابه‌جایی الکتریکی، ε_3^T ثابت دی‌الکتریک در تنش مکانیکی صفر می‌باشد ($T = 0$).



شکل ۵- نحوه اتصال الکترومکانیکی بین پیزوالکتریک و سازه [۱۷]



شکل ۶- مدل شماتیک وصله پیزوالکتریک [۱۷]

سختی وصله پیزوالکتریک با توجه به جابه جایی اعمال شده در راستای x_1 طبق معادله (۶) است.

$$k_{PZT} = \frac{A_a}{s_{11}l_a} \quad (۶)$$

که A_a مساحت سطح مقطع پیزوالکتریک و l_a طول پیزوالکتریک می باشد. وصله پیزوالکتریک همانند شکل (۷) بر روی سازه نصب شده است. وصله پیزوالکتریک که دارای طول l_a می باشد در فاصله x_a از ابتدای تیر قرار داده شده است. هنگامی که وصله پیزوالکتریک تحریک می شود کرنشی به اندازه ϵ_{PZT} در آن ایجاد شده و بنابراین نیروی عکس العمل F_{PZT} در سازه قاب شکل ایجاد می شود. نیروی عکس العمل در تار خنثی به شکل نیروی محوری N_{PZT} و نیروی خمشی M_{PZT} بر سازه وارد می شود. از ارتعاشات محوری در فرکانس های بالا اتفاق می افتد، به همین دلیل از آن صرف نظر شده است. با در نظر گرفتن ارتعاشات حاصل از نیروی خمشی، سختی دینامیکی سازه از رابطه (۷) بدست می آید [۱۷].

$$k_{str} = \frac{F_{PZT}}{\hat{u}_{PZT}} = \left\{ \left(\frac{h}{2} \right)^2 \sum_n \frac{[Y'_n(x_a) - Y'_n(x_a + l_a)]^2}{\omega_n^2 + 2i\zeta\omega\omega_n - \omega^2} \right\}^{-1} \quad (۷)$$

شکل مدها در قاب L شکل اوایلر- برنولی یکسرگیردار، با توجه به حل معادله دیفرانسیل جزئی حرکت دو بخش قاب و شرایط مرزی آنها، که در آن قاب به شکل ایزوتروپیک با سطح مقطع ثابت در نظر گرفته شده، از روابط (۴) و (۵) به ترتیب برای تیر اول و دوم سازه قاب بدست می آید.

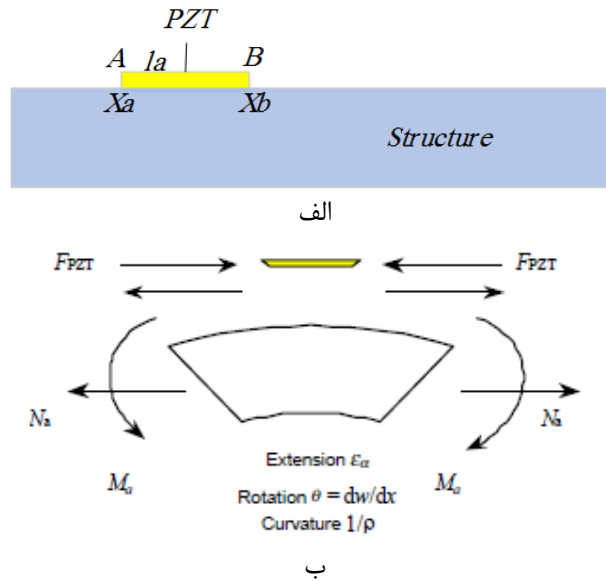
$$Y_v(x_1) = C_1 \sin(\mu_v x_1) + C_2 \cos(\mu_v x_1) + C_3 \sinh(\mu_v x_1) + C_4 \cosh(\mu_v x_1) \quad (۸)$$

$$Y_w(x_1) = D_1 \sin(\mu_w x_2) + D_2 \cos(\mu_w x_2) + D_3 \sinh(\mu_w x_2) + D_4 \cosh(\mu_w x_2) \quad (۹)$$

$$\mu_v^4 = \omega_{in}^2 \frac{m_1}{D_\zeta} \quad (۱۰)$$

$$D_\zeta = E \frac{bh^3}{12} \quad (۱۱)$$

که در آن m جرم، E مدول الاستیسیته، b عرض و h ضخامت تیر می باشند همچنین ضرایب C و D بر حسب C_1 بدست می آیند [۱۹].



شکل ۷- نحوه تعامل سنسور پیزوالکتریک و لایه‌ای از سازه [۱۷]

۲-۳- محاسبه اندیس خرابی

این آزمایش‌ها بر اساس اندازه‌گیری طیف امپدانس الکتریکی سنسور پیزوالکتریک متصل به نمونه‌های سالم و معیوب می‌باشد و با مقایسه طیف‌ها با تکنیک‌های آماری تفاضل مجذور مربعات و میانگین انحراف درصد مطلق، کمیتی عددی به عنوان اندیس خرابی استخراج می‌گردد. پس از هر بار اندازه‌گیری طیف امپدانس مربوط به سازه‌های معیوب، این طیف با سیگنال مبنا مربوط به طیف امپدانس سازه سالم که قبل از ایجاد عیب اندازه‌گیری شده بود توسط روش‌های آماری که روابط مربوط به آنها در فرمول‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است [۱-۲]، مقایسه می‌گردد و مقدار حاصل به عنوان اندیس خرابی استخراج و در بخش نتایج به صورت نمودارهای ستونی نمایش داده می‌شود.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Re(Z_i) - Re(Z_i^0))^2}{\sum_{i=1}^N (Re(Z_i^0))^2}} \quad (12)$$

$$MAPD = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Re(Z_i) - Re(Z_i^0)}{Re(Z_i^0)} \right| \quad (13)$$

در این روابط $Re(Z_i)$ قسمت حقیقی سیگنال امپدانس بدست آمده در هر مرحله پس از ایجاد عیب و $Re(Z_i^0)$ قسمت حقیقی سیگنال امپدانس برای سازه سالم، قبل از ایجاد عیب می‌باشند. و i مربوط به تک فرکانس‌های موجود در بازه فرکانسی است که از ۱ تا n وابسته به رزولوشن سیگنال می‌باشد. پس از مقایسه و استخراج تفاضل سیگنال‌ها در بازه‌ی فرکانسی مشخص، اندیس‌های خرابی محاسبه شده مورد مطالعه قرار می‌گیرند تا بتوان از این طریق حضور عیب و همچنین تشخیص تغییر در پارامترهای عیب پرداخت.

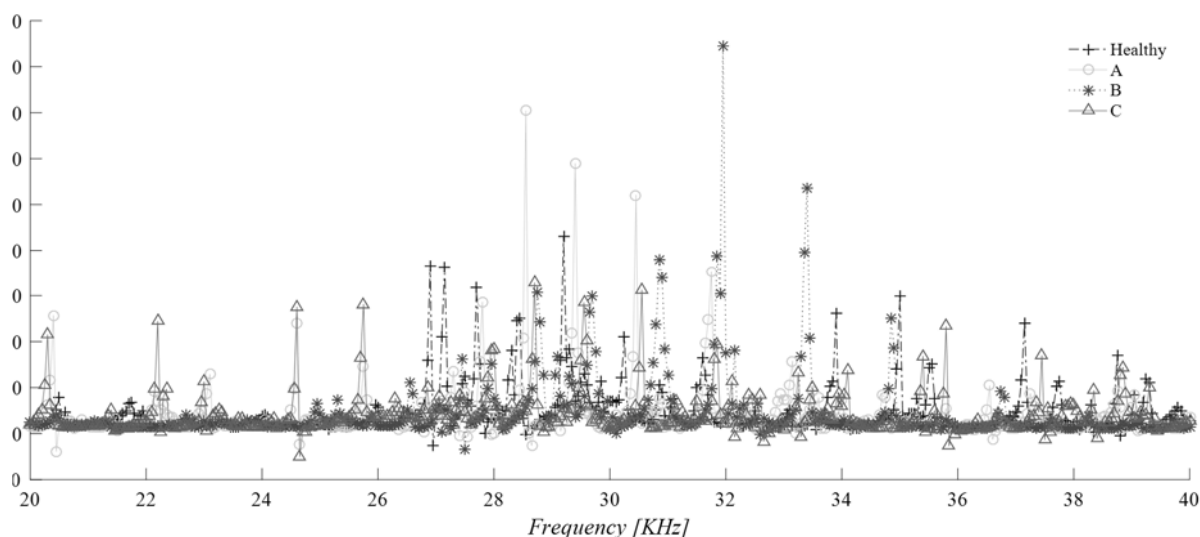
۳-نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از آزمون‌های امپدانس الکترومکانیکی بر روی سازه قاب و اندیس‌های خرابی به روش تفاضل مجذور مربعات^۱ و میانگین انحراف درصد مطلق^۲ مربوط به عیوب متوالی در دو مرحله قبل و بعد از خم در بازه فرکانسی ۲۰ تا ۴۰ کیلوهرتز استخراج و ارائه شده است. همچنین نمودار امپدانس الکترومکانیکی قاب که با استفاده از روابط بخش ۲-۴ بدست آمده نیز با نمودار امپدانس حاصل از کار تجربی در شرایط یکسرگیردار مقایسه شده است.

۳-۱- تأثیر عیوب شیار در قبل از خم بر طیف حقیقی امپدانس پیزوالکتریک در شرایط یکسرگیردار (نقطه A)

در شکل (۵) طیف‌های حقیقی امپدانس الکترومکانیکی سازه قاب آلومینیومی در شرایط یکسرگیردار نشان داده شده است. چهار طیف داخل شکل مربوط به حالت‌های سازه سالم و سازه همراه با شیارهای a و b و c می‌باشد که به صورت متوالی روی نمونه آزمایش ایجاد شده‌اند. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود تغییر اندازه در دامنه‌ی پیک‌های طیف حقیقی امپدانس و جابه‌جایی در فرکانس پیک‌ها، بوجود آمده که نشان از وجود عیب در سازه، در مقایسه با سازه سالم می‌باشد.

تغییر اندازه دامنه‌ی پیک‌های امپدانس به دلیل تغییر سختی سازه در اثر ایجاد شدن عیب است، به این صورت که با ایجاد کردن عیب در آن سختی سازه k_{str} کاهش و به تبع آن میزان نسبت سختی دینامیکی سازه قاب و وصله پیزوالکتریک^۲ نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۸- مقایسه طیف حقیقی امپدانس حاصل از وجود شیار در قبل از خم، برای قاب یکسرگیردار

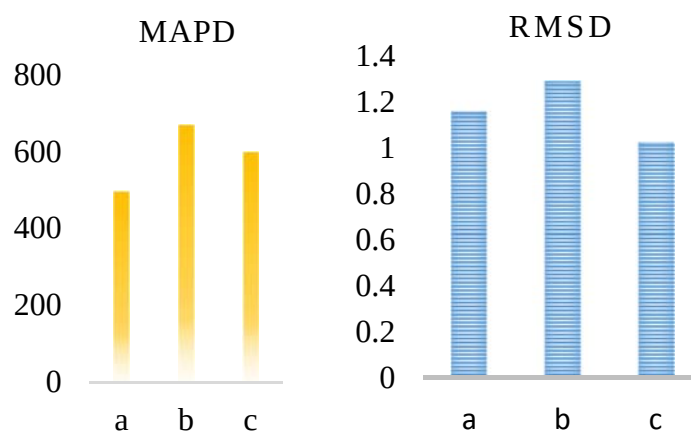
¹ RMSD

² MAPD

از آنجا که مقدار امپدانس با سختی رابطه عکس دارد، با کاهش سختی مقدار امپدانس افزایش می‌یابد، که این موضوع در شکل (۵) و در نمودارهای مربوط به شیارهای a و b در بازه فرکانسی ۲۵ تا ۳۵ کیلوهرتز به وضوح نمایان است که هرچه تعداد عیب‌ها بیشتر شده، دامنه‌ی پیک‌ها نیز افزایش یافته است. با ایجاد شیار سوم (c) مقدار ماکزیمم دامنه پیک‌ها کاهش می‌یابد و همچنین دامنه پیک‌ها در فرکانس‌های پایین‌تر افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با توجه به رابطه سختی استاتیکی (رابطه (۶)).

$$k = \frac{AE}{L} \quad (۱۴)$$

که در آن A سطح مقطع سازه، E مدول الاستیسیته و L طول سازه است، با توجه به رابطه (۶)، مقدار سختی k با طول سازه L رابطه عکس دارد، با کاهش طول سازه سختی افزایش می‌یابد. در نمونه آزمایشی نیز با ایجاد شیار سوم طول موثر و به تبع آن تاثیر سختی موثر سازه روی وصله پیزوالکتریک، تغییر می‌کند. کاهش طول موثر تیر باعث افزایش سختی سازه و کاهش میزان امپدانس می‌شود. در این حالت انرژی بین پیک‌ها تقسیم می‌شود. همچنین با توجه به نمودار حقیقی امپدانس در شکل (۵) مشخص است که هرچه عیب از وصله پیزوالکتریک دورتر می‌شود، فرکانس پیک‌ها نیز افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر فرکانس‌های طبیعی سازه افزایش می‌یابند. برای بررسی میزان عیب بوجود آمده در سازه قاب از روش‌های آماری تفاضل مجذور مربعات و میانگین انحراف درصد مطلق استفاده شده است. مقادیر تفاضل مجذور مربعات بدست آمده در کار تجربی در فاصله ۲۰ تا ۴۰ کیلوهرتز در شکل (۷) رسم گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار $RMSD$ با ایجاد شیار در نقطه b از ۴۹۷٫۷۲ در نقطه a به ۶۶۸٫۹۲ افزایش یافته است اما با اضافه شدن در نقطه c مقدار آن به ۵۹۹٫۶ کاهش یافته که دلیل آن همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، با توجه به نمودار حقیقی امپدانس در شکل (۵)، کاهش طول موثر سازه می‌باشد، که با کاهش دامنه پیک‌ها، نشان داده شده است. در روش آماری $MAPD$ همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود با ایجاد شدن شیار b مقدار آن از ۴۹۷٫۷۲ در نقطه a به ۶۶۸٫۹۲ افزایش یافته اما با اضافه شدن شیار c به دلیل کاهش طول موثر تیر مقدار آن به ۵۹۹٫۶ کاهش یافته است. این نتایج در چند نمونه تست انجام شده تکرار شده است.



شکل ۹- مقایسه مقادیر تفاضل مجذور مربعات و میانگین انحراف درصد مطلق بدست آمده از تست، در شرایط وجود شیار بر روی تیر افقی و قبل از خم قاب یکسرگیردار

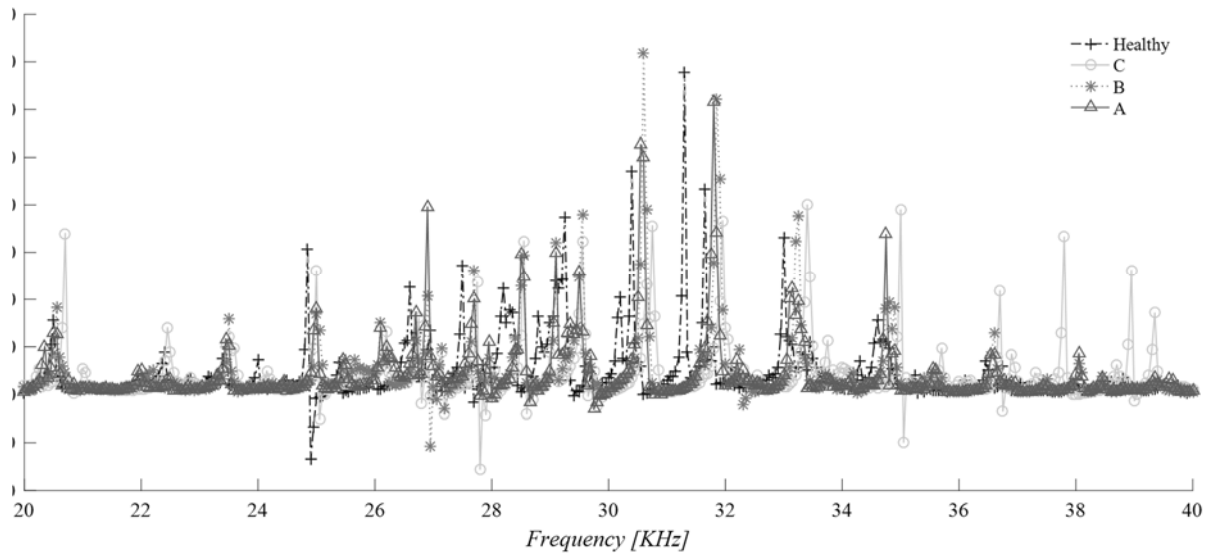
۳-۲- تأثیر عیوب شیار در بعد از خم بر طیف حقیقی امپدانس پیزوالکتریک در شرایط یکسرگیردار (نقطه A) با توجه به طیف حقیقی امپدانس قاب در شرایط یکسرگیردار در سمت وصله پیزوالکتریک، در حالت های سالم و دارای شیار که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، در این حالت که شیارها در بعد از خم (روی تیر دوم) و با فاصله ی بیشتر نسبت به مکان سنسور پیزوالکتریک ایجاد شده نیز نمودار امپدانس تقریباً شبیه به نمودار قاب در شرایط یکسرگیردار با شیارهای موجود در تیر اول است. به طوری که با ایجاد عیب در نقاط a , b میزان سختی کاهش و میزان دامنه امپدانس افزایش می یابد، و هرچه عیب به وصله پیزوالکتریک نزدیک تر می شود، فرکانس پیک ها در اینجا تقریباً ثابت مانده یا مقدار کمی جابه جا می شود. اما در نقطه C با ایجاد شیار میزان طول موثر تیر کاهش و میزان سختی با توجه به رابطه (۶) افزایش می یابد، در نتیجه مقدار امپدانس قاب کاهش پیدا کرده است. با توجه به نمودار حقیقی امپدانس در شکل (۱۰)، کاهش طول موثر قاب باعث کاهش دامنه پیک ها و تقسیم شدن انرژی بین آنها شده است. اما در شکل (۶) و (۱۰) با مقایسه ی نمودارهای امپدانس در حالت ایجاد شیار سوم، مشاهده می شود زمانی که عیوب در فاصله ی دورتری از سنسور پیزوالکتریک قرار دارند، مقدار کاهش دامنه ی پیک های امپدانس نسبت به حالتی که عیوب نزدیک به سنسور پیزوالکتریک هستند، کمتر است. در این حالت نیز مشاهده می شود که با مقایسه ی مقادیر امپدانس قاب به وسیله ی روش های آماری در حالت یکسرگیردار، مقدار اندیس خرابی با افزایش عیب روند مناسبی در دو عیب اول دارد اما با ایجاد شیار سوم به دلیل کاهش طول موثر قاب، سختی سازه افزایش یافته و به تبع آن امپدانس کاهش می یابد، میزان دامنه پیک ها در نمودار قسمت حقیقی امپدانس کاهش یافته و موجب کاهش یافتن مقدار نتایج بدست آمده از روش های تفاضل مجذور مربعات و میانگین انحراف درصد مطلق شده است. به طوری که در روش $RMSD$ با ایجاد شیار کردن شیار b مقدار اندیس خرابی از ۱,۱۸۲ در نقطه a ، به ۱,۲۲۹ افزایش یافته است، اما با اضافه شدن شیار c مقدار آن به ۱,۱۱۴ کاهش یافته و در بررسی به روش $MAPD$ نیز با ایجاد کردن شیار b مقدار اندیس خرابی از ۱۶۳۵,۳۲ در نقطه a ، به ۴۰۵۵,۵۳ افزایش یافته، ولی با اضافه شدن شیار c مقدار آن به ۲۹۱۰,۸۴ کاهش یافته است. در هر دو روش با ایجاد شدن شیار c مقدار اندیس خرابی کاهش یافته که نشان دهنده کاهش طول موثر سازه روی وصله پیزوالکتریک می باشد.

۳-۳- مقایسه نمودارهای امپدانس الکترومکانیکی حاصل از روش تجربی و تئوری

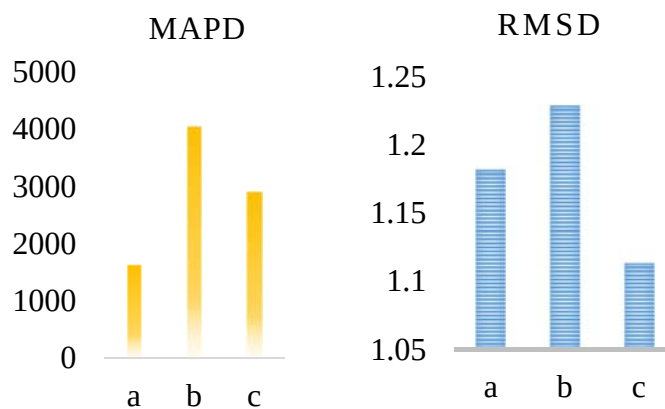
در این قسمت برای صحت گذاری روش تحلیلی امپدانس (بخش ۲-۲) قسمت حقیقی نمودار امپدانس بدست آمده از سازه قاب در حالت یکسرگیردار در نقطه A، در حالت تجربی و تحلیلی مقایسه خواهد شد. فرکانس های طبیعی قاب آلومینیومی که با استفاده از شبیه سازی در نرم افزار آباکوس^۱ بدست آمده اند، در جدول (۳) نشان داده شده است. در بخش تجربی مشاهده شد که پیک ها در بازه فرکانسی ۲۶ تا ۳۸ کیلوهرتز برای نمونه آزمایش تجربی بوجود آمده اند، همانطور که در شکل (۱۲) نیز مشهود است در نمودار بدست آمده از روش تحلیلی نیز پیک ها در همان بازه و با همان الگو بدست آمده است. دانسیته پیک های طیف تحلیلی تقریباً با طیف تجربی برابری می کند، همچنین از لحاظ مقدار میانگین نیز در اکثر طول طیف، با خطای کمتر از ۷٪ این طیف تخمین زده شده است. مکان پیک های نمودار تحلیلی که بیانگر فرکانس های طبیعی سازه و وصله

¹Abaqus

پیزوالکتریک هستند تقریباً در اطراف مکان پیک‌های تجربی تکرار شده است که در بیشترین حالت خطایی برابر با ۲٪ نسبت به حالت تجربی دارد و همچنین دامنه پیک که به نحوی بیانگر انرژی آن پیک می‌باشد، با تقریب مناسبی محاسبه شده است.



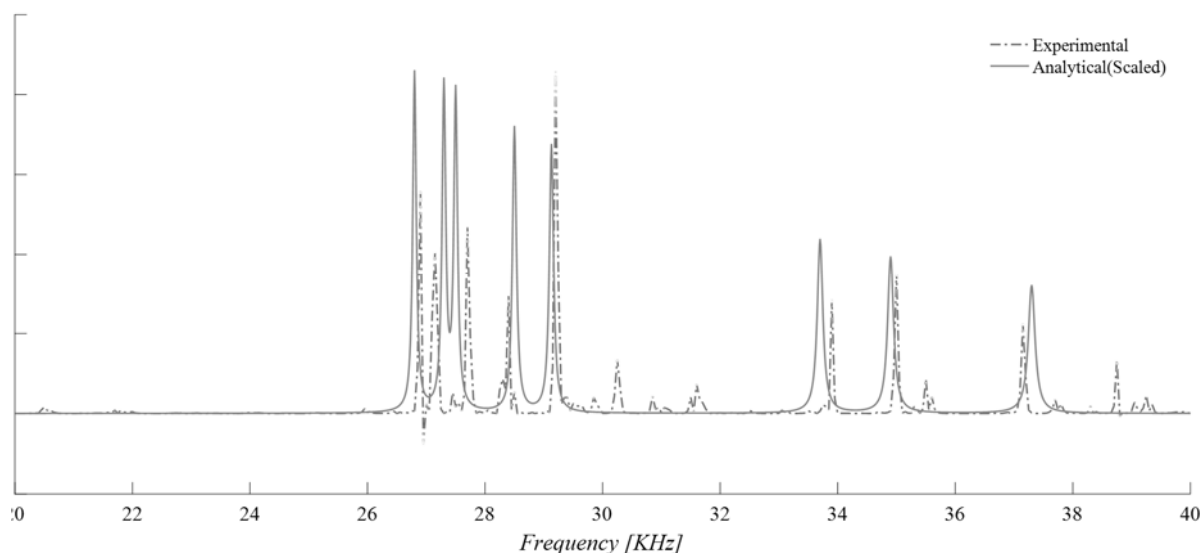
شکل ۱۰- مقایسه طیف حقیقی امپدانس حاصل از وجود شیار در بعد از خم، برای قاب یکسرگیردار



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر تفاضل مجذور مربعات و میانگین انحراف درصد مطلق بدست آمده از تست، در شرایط وجود شیار بر روی تیر عمودی و بعد از خم قاب یکسرگیردار

جدول ۳- فرکانس‌های طبیعی سازه قاب در بازه ۲۰ تا ۴۰ کیلوهرتز

26.8	27.3	27.5	28.5	29.13	33.7	34.9	37.3	فرکانس‌های طبیعی سازه قاب
------	------	------	------	-------	------	------	------	------------------------------



شکل ۱۲- مقایسه نمودارهای قسمت حقیقی امپدانس الکترومکانیکی حاصل از روش تجربی و تئوری

۴- بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون امپدانس الکترومکانیکی برای سازه قاب L شکل آلومینیومی، استفاده از طیف حقیقی امپدانس الکترومکانیکی روش مناسبی جهت تشخیص حضور آسیب و بررسی شدت آسیب است، زیرا با به وجود آمدن عیب در سازه همان‌طور که مشاهده شد، تغییرات در دامنه طیف حقیقی امپدانس و جابه‌جایی فرکانس ایجاد می‌گردد. تغییر اندازه در میزان دامنه پیک‌های امپدانس به دلیل تغییر سختی سازه در اثر ایجاد شدن عیب است، به این صورت که با ایجاد کردن عیب در آن سختی سازه k_{str} کاهش و به تبع آن میزان نسبت سختی دینامیکی سازه قاب و وصله پیزوالکتریک r نیز کاهش می‌یابد. از آنجا که مقدار امپدانس با سختی و نسبت سختی رابطه عکس دارد، مقدار امپدانس افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودارها مشاهده شد، به ازای شیارهای اول و دوم با توجه به کاهش میزان سختی سازه، دامنه‌ی پیک‌های طیف حقیقی امپدانس افزایش می‌یابد، اما با ایجاد شیار سوم و جمع شدن اثر عیوب، مقدار ماکزیمم دامنه طیف حقیقی امپدانس کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه تحلیل کرد که با توجه به رابطه سختی استاتیکی (رابطه ۱۴)، با کاهش طول سازه سختی افزایش می‌یابد، در قاب مورد بررسی نیز با ایجاد شیار سوم طول موثر و به تبع آن سختی موثر سازه روی وصله پیزوالکتریک، تغییر می‌کند. این کاهش طول موثر تیر باعث افزایش سختی سازه و نسبت سختی و کاهش میزان دامنه‌ی پیک‌های طیف حقیقی امپدانس می‌شود و در حقیقت انرژی بین پیک‌ها تقسیم می‌شود. مقایسه نتایج نشان می‌دهند، زمانی که چند آسیب با هم پدیدار می‌شوند، روش‌های آماری به دلیل جابه‌جایی فرکانس و تغییر در سختی سازه در حضور آسیب همواره

روش مناسبی جهت تشخیص روند رشد آسیب نیستند، مگر زمانی که تغییرات فرکانس و دامنه امپدانس لحاظ گردند. همانطور که در نتایج دیده شد، هرچه عیب ها در تیر اول از قاب که حسگر پیزوالکتریک روی آن نصب شده است دورتر شود، میزان فرکانس پیک ها افزایش می یابد، اما با ایجاد شیار در تیر دوم (بعد از خم) این جابه جایی فرکانس ها خیلی مشهود نیستند. همچنین نمودار امپدانس بدست آمده از روش تحلیلی برای سازه قاب شکل در شرایط مرزی یکسرگیردار تطابق مناسبی با روش تجربی دارد و فرکانس های طبیعی در نمودار تحلیلی در بیشترین حالت دارای خطایی برابر با ۲ درصد نسبت به حالت تجربی می باشد.

مراجع

- [1] Hamzeloo, S. R., Shamshirsaz M., and Rezaei, S. M., "Damage Detection on Hollow Cylinders by Electro-mechanical Impedance Method: Experiments and Finite Element Modeling", Journal of Comptes Rendus Mecanique, Vol. 340, pp. 668-677, (2012).
- [2] Akhundi, B., Shamshirsaz, M., and Hamzeloo, S. R., "Real-time Detection of Defects Caused by Corrosion in the Contilever Beam with Electro-mechanical Impedance Method", Iranian Conference on Manufacturing Engineering, ICME12_336, Tehran, Iran, December 27-29, (2011). (In Persian)
- [3] Liang, C., Sun, F. P., and Rogers, C. A., "Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material System-determination of Actuator Power Consumption and System Energy Transfer", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 12-20, (1994).
- [4] Sun, F., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C. A., "Truss Structure Integrity Identification using PZT Sensor-actuator", Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 6, pp. 134-139, (1995).
- [5] Wang, X. M., Ehlers C., and Neitzel, M., "An Analytical Investigation of Static Models of Piezoelectric Patches Attached to Beams and Plates", Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 6, pp. 204-213, (1997).
- [6] Giurgiutiu, V., Zagrai, A., and Bao, J., "Characterization of Piezoelectric Wafer Active Sensors", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, pp. 959-976, (2000).
- [7] Park, G., Cudney, H., and Inman, D. J., "Feasibility of using Impedance-based Damage Assessment for Pipeline System", Earthquake Engineering & Structural Dynamics Journal, Vol. 30, No. 10, pp. 204-213, (2001).
- [8] Bhala, S., Naidu, A. S. K., and Soh, C. K., "Embedded Self-sensing Piezoelectric Active Sensors for On-line Structural Identification", Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, Vol. 124, No. 1, pp. 116-125, (2001).
- [9] Giurgiutiu, V., and Zagrai, A., "Influence of Structure-actuator Interactions and Temperature Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE", Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, Vol. 5062, No. 1, pp. 263-269, (2003).

- [10] Tseng, K. K., and Wang, L., "Structural Damage Identification for Thin Plates using Smart Piezoelectric Transducers", Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 194, pp. 3192-3209, (2005).
- [11] Inman, D. J., Park, G., Sohn, H., and Farrar, C. R., "Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward", Journal of the Shock and Vibration Digest, Vol. 35, No. 6, pp. 451-463, (2003).
- [12] Wang, X. D., and Huang, G. L., "The Coupled Dynamic Behavior of Piezoelectric Sensors Bonded to Elastic Media", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 17, pp. 883-894, (2005).
- [13] Sepehry, N., Shamshirsaz, M., and Bastani, A., "Electromechanical Impedance Modeling of Cantilever Beams with Embedded PZT Transducers", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 569-574, Montreal, Canada, July 6-9, (2005).
- [14] Lim, H. J., Kim, M. K., Sohn, H., and Park, C. Y., "Impedance Based Damage Detection under Varying Temperature and Loading Conditions", Journal of NDT&E International, Vol. 44, pp. 740-750, (2011).
- [15] Min, J., Park, S., Yun, C., Lee, C., and Lee, C., "Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporation Neural Network Technique for Identification of Damage Type and Severity", Journal of Engineering Structures, Vol. 39, pp. 210-220, (2012).
- [16] Song, H., Lim, H. J., and Sohn, H., "Electromechanical Impedance Measurement from Large Structures using a Dual Piezoelectric Transducer", Journal of Sound and Vibration, Vol. 332, No. 25, pp. 6580-6595, (2013).
- [17] Giurgiutiu, V., and Rogers, C. A., "Modeling of Electromechanical (E/M) Impedance of a Damaged Composite Beam", Journal of Adaptive Structures and Material Systems Symposium, Vol. 87, pp. 39-46, (1999).
- [18] PIEZO SYSTEMS, INC. CATALOG #8, (2011). www.piezo.com.
- [19] Georgiades, F., Warminski, J., and Cartmell, M. P., "Linear Modal Analysis of L-shaped Beam Structure", Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 38, pp. 312-332, (2013).

فهرست نمادهای انگلیسی

i, j	واحد موهومی
C	ظرفیت پیزواکتریک در بار صفر
$Z(\omega)$	طیف امپدانس مکانیکی و الکتریکی مختلط
K_{31}	ضریب کوپلینگ الکترومکانیکال پیزواکتریک
r	نسبت سختی

ضریب کوپلینگ پیزوالکتریک بین متغیرهای مکانیکی و الکتریکی	d_{31}
کرنش مکانیکی	S_{11}
ضریب کوپلینگ مکانیکی	S_{11}^E
سختی دینامیکی سازه	k_{str}
سختی دینامیکی وصله پیزوالکتریک	k_{PZT}
تنش مکانیکی	T_1
جابه‌جایی	E_3
جابه‌جایی الکتریکی	D_3
طول پیزوالکتریک	l_a
عرض پیزوالکتریک	b_a
ضخامت پیزوالکتریک	t_a
مساحت سطح مقطع پیزوالکتریک	A_a
نیروی عکس‌العمل پیزوالکتریک	F_{PZT}
جابه‌جایی پیزوالکتریک	$\hat{u}_{PZT}$
جابه‌جایی سازه	Y'_n
جرم	m
مدول الاستیسیته	E
عرض تیر	b
ضخامت تیر	h
سطح مقطع تیر	A
چگالی	ρ
قسمت حقیقی سیگنال امپدانس	$\text{Re}(Z_i)$
فرکانس تحریک	ω
فرکانس طبیعی سازه	ω_n
ثابت دی‌الکتریک در تنش مکانیکی صفر	ϵ_3^T
ضریب میرایی	ζ

Abstract

The electro-mechanical impedance method identified as a suitable method for structural health monitoring and damage detection in structures. The basis of the electro-mechanical impedance method is to identify the detections due to the change in the stiffness of the structure, and it depends on geometry and properties of the materials to be studied. Detecting the defects that created on frame structure (L-shaped beam) by electro-mechanical impedance method and validation the analytical method by comparison with the experimental method is this paper's objective. Defects are created in the groove shape before and after the bend and the real impedance spectrum of damaged frame that obtained from the experimental method at each step compared with healthy frame, and the damage index figure have been extracted.

Also, the real spectrum of the impedance obtained from the experimental tests will be compared with the real spectrum of the impedance that obtained from analytic method. Comparison of the impedance spectrum and also the damage indexes from experimental tests for a healthy structures and defective structures shows compliance between the Stiffness and impedance of structure. Also the spectrum of real part of impedance obtained from the analytical method for the frame structure in the case of a cantilever boundary conditions has a correlation with the experimental tests.