

## شبیه‌سازی پایش سلامت برخط سازه‌های دریایی با استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی

ناصرالدین سپهری<sup>۱\*</sup>، محمد احسانی<sup>۲</sup>، مهناز شمشیرساز<sup>۳</sup> و مجتبی صدیقی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، پژوهشکده فناوری نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
<sup>۴</sup> دانشیار، پژوهشکده فناوری نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶

### چکیده

روش امپدانس الکترومکانیکی از جمله روش‌های برخط پایش سلامت سازه به شمار می‌رود. بهره‌گیری از وصله‌های پیزوالکتریک برای تحریک فرکانس بالای سازه میزبان، منجر به تشخیص عیوب ریز می‌شود. از طرفی، انواع آسیب‌های محیطی از قبیل، خوردگی منجر به از کارافتادگی سازه‌های دریایی می‌شوند؛ بنابراین پایش سلامت این سازه‌ها به منظور بهینه‌سازی فرایند تعمیر و نگهداری آن‌ها ضروری است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی امکان استفاده از روش امپدانس الکترومکانیکی جهت شناسایی آسیب در سازه‌های دریایی است. در این راستا از یک شبیه‌سازی المان محدود چند فیزیکه وابسته برای مدل‌سازی نحوه ارتعاشات دائمی یک تیر مغروق در سیال و استخراج امپدانس الکترومکانیکی استفاده شد. جهت صحت‌گذاری مدل توسعه داده شده، ۵ فرکانس طبیعی اول ارتعاش عرضی تیر در سیال آب با نتایج تئوری موجود مقایسه شد. در ادامه، امپدانس الکترومکانیکی تیر سالم در سه عمق مختلف از آب استخراج و با حالت تیر قرار داده شده در هوا مقایسه شد. در نهایت، قابلیت شناسایی آسیب در سیال آب توسط روش امپدانس الکترومکانیکی، با شبیه‌سازی آسیب خوردگی با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات یکنوای شاخص آسیب مجذور میانگین مربعات خطا در هر دو محیط، نشان از قابلیت مناسب آن در شناسایی و پیش‌بینی آسیب دارد.

**کلمات کلیدی:** امپدانس الکترومکانیکی؛ سازه‌های دریایی؛ پایش سلامت سازه؛ خوردگی، روش المان محدود.

## Online Health Monitoring of Marine Structures using Electromechanical Impedance Spectroscopy: A Simulation Approach

N. Sepehry<sup>1\*</sup>, M. Ehsani<sup>2</sup>, M. Shamsirsaz<sup>3</sup>, M. Sadighi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Mechatronic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood.

<sup>2</sup> PhD Student, New Technologies Research Center (NTRC), Amirkabir University of Technology, Tehran.

<sup>3</sup> Associate Professor, New Technologies Research Center (NTRC), Amirkabir University of Technology, Tehran.

<sup>4</sup> Professor, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran.

### Abstract

Electromechanical impedance (EMI) spectroscopy is categorized as an online and real-time structural health monitoring methods. Taking advantage of the simultaneous actuation/sensing characteristics of piezoelectric patches to excite the host structure in high-frequency ranges, as well as recording the dynamic signature, enables the EMI to identify incipient damages. Marine structures are often exposed to a variety of environmental damage, including corrosion which necessitates the use of structural health monitoring methods in their maintenance programs. This study aims to investigate the possibility of using EMI spectroscopy to detect damage in marine structures. In this regard, a multi-physics finite element simulation was used to model the vibration of a submerged beam and extract the EMI spectrum. To validate the model, the first 5 eigenfrequencies of transverse vibration in water are compared with the existing experimental results. Next, the variation of the EMI of a pristine submerged was investigated at three different depths. Finally, a corrosion defect was applied to the beam to study the potential of damage detection in the fluid medium. The monotonic behavior of the root mean square deviation damage index indicates its adequacy for damage identification in submerged structures.

**Keywords:** Electromechanical Impedance Method; Marine Structures; Structural Health Monitoring; Corrosion; FEM.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر اهمیت تشخیص آسیب در سامانه‌های مکانیکی، عمرانی و هوافضا دوچندان شده است. روند تعمیر و نگهداری سازه‌ها در حال حاضر به‌صورت دوره‌ای برنامه‌ریزی می‌شود. سامانه‌های جدید عیب‌یابی عموماً با ویژگی‌های تشخیص بلادرنگ و برخط و تخمین عمر سازه طراحی می‌شوند. پایش سلامت سازه، جزء کلیدی فرایند شناسایی آسیب و تخمین عمر آن به شمار می‌رود. در حال حاضر مقدار قابل توجهی از انرژی مورد نیاز دنیا توسط گاز یا نفت تأمین می‌شود. لوله‌ها مغروق در کف دریاها و اقیانوس‌ها، معبر اصلی انتقال گاز یا نفت به شمار می‌روند [۲].

ایجاد و گسترش آسیب‌های پیش‌رونده در این لوله‌ها، منجر به شکست آن‌ها شده و خسارات جبران‌ناپذیر مالی و محیطی به همراه خواهد داشت. همین امر، پایش مداوم این خطوط انتقال را ضروری می‌سازد [۱]. سایش ناشی از ماسه‌های کف دریا، ضربه، تضعیف وضعیت تکیه‌گاهی لوله ناشی از فرورنشست، عیوب اولیه موجود در لوله‌ها ناشی از فرایند ساخت و البته خوردگی، از جمله عوامل تهدیدکننده سلامت لوله‌های انتقال زیردریایی را تشکیل می‌دهند. از این بین، خوردگی ناشی از سیال بیرونی و درونی، علت بخش عظیمی از خرابی‌های این سازه را تشکیل می‌دهد. ترکیب خوردگی و تنش‌های کششی، منجر به ترک‌خوردگی تنشی، نشتی و ازکارافتادگی نهایی می‌شوند [۵].

تاکنون از روش‌های پایش برخط و غیر برخط متعددی اعم از ردیابی اوایی، تساعد آکوستیک، روش‌های مبتنی بر نشتی میدان الکتریکی، روش جریان الکتریکی گردابه‌ای، روش‌های نگاشت میدان الکتریکی، رادیوگرافی و البته روش‌های مبتنی بر انتشار امواج فراصوت جهت پایش لوله‌ای موجود در زیر آب استفاده شده است [۳، ۴]. عدم دسترسی آسان به سازه‌های زیرآب، از جمله چالش‌های پایش سلامت این نوع از سازه‌ها محسوب می‌شود. روش‌های غیر برخط ارسال حسگر به محل نصب توسط ربات‌های خزنده هوشمند و یا سیستم‌های کنترل از راه دور را ایجاد می‌کنند که اغلب سامانه‌های پیچیده و پرهزینه‌ای به شمار می‌روند. از این‌رو، توسعه روش‌های برخط که در آن حسگرها (عملگرها) در صورت بهره‌گیری از روش‌های پایش فعال) در حین ساخت

یا بعد از آن کارگذاری می‌شوند، توجه محققان این حوزه را بیش از پیش به خود جلب نموده است. طیف‌سنجی امپدانس الکترومکانیکی، از جمله روش‌های قدرتمند پایش مبتنی بر انتشار امواج فراصوت ایستا در فرکانس بالا، به‌منظور تحلیل مودال سازه میزبان به شمار می‌رود. اساس این روش بر پایه تغییر در امپدانس مکانیکی سازه (جرم، سفتی، میرایی یا شرایط مرزی) سازه میزبان به‌واسطه وجود آسیب است. این تغییرات توسط حسگر به تغییر در امپدانس الکترومکانیکی وصله پیزوالکتریک تبدیل می‌شود. استفاده از گستره فرکانسی بالا (عموماً بالاتر از ۱۰ کیلوهرتز)، امکان شناسایی زود هنگام آسیب را در این روش فراهم می‌آورد. این در حالی است که برای این تحریک عموماً به ولتاژهای بسیار کم (معمولاً کمتر از یک ولت) نیاز بوده که آن را در زمره روش‌های نیازمند به انرژی کم قرار می‌دهد.

مدل‌سازی طیف امپدانس الکترومکانیکی ویفرهای عملگری/حسگری متصل به سازه میزبان، مزایای ویژه‌ای از جمله سنجش امکان بهره‌گیری از این تکنیک در شرایط واقعی و همچنین محل بهینه نصب تراگذارها ایجاد می‌کند. تاکنون، تلاش‌های متعددی در راستای شبیه‌سازی این تکنیک به‌صورت تحلیلی [۶]، نیمه عددی و عددی انجام شده است. سپهری و همکاران [۱۱]، با استفاده از روش تغییرات<sup>۱</sup> معادلات ارتعاشی عرضی وابسته سازه مجهز به وصله پیزوالکتریک را استخراج و در رهیافتی نیمه‌تحلیلی به کمک روش ریلی‌ریتر مورد بررسی قرار دادند. درنهایت با پاسخ ارتعاشی سازه با بهره‌گیری از قانون گاوس به امپدانس الکترومکانیکی خروجی پیزوالکتریک تبدیل شد. روش المان محدود طیفی برای مدل‌سازی امپدانس الکترومکانیکی، توسط سپهری و همکاران در [۱۳] مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در این مقاله نشان داده شد که برای سازه‌های باضخامت‌های کم، افزایش فرکانس منجر به کاهش دقت فرض میندلین برای شبیه‌سازی طیف امپدانس برای سازه میزبان ورق نسبت به مدل سه‌بعدی می‌شود. ین<sup>۲</sup> و همکاران از روش اجزا محدود برای مدل‌سازی امپدانس الکترومکانیکی

<sup>۱</sup> Variational Method

<sup>۲</sup> Yin

مدل‌سازی برای سازه‌های پیوسته بر اساس معادله لیانگ ارائه نمودند [۱۰].

از طرفی شبیه‌سازی ارتعاشات تیرهای میکروسکوپی و ماکروسکوپی مغروق یا شناور در حوزه‌های مختلف مورد توجه محققان بوده است. برخی از مدل‌های نظری برای مدل‌های میکروسکوپی [۱۸-۲۱]، اثرات لزجت را مورد بررسی قرار داده‌اند و تطابق مناسبی با اندازه‌گیری‌های تجربی دارند [۲۱، ۲۲]. چو<sup>۵</sup> با مدل‌سازی یک تیر ماکروسکوپی نشان داد که فرکانس‌های طبیعی عرضی یک تیر یکسر گیردار در سیال نسبت به هوا دارای جابجایی به سمت چپ است؛ همچنین معادله فرکانس طبیعی ارائه شده تطابق مناسبی با نتایج تجربی نشان داد [۲۳]. در [۲۴] ارتعاشات آزاد عرضی و پیچشی تیر یکسر گیردار داخل سیال هیدرو استاتیک مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله با اضافه نمودن یک ضریب تصحیح به معادله موجود در مرجع [۲۳]، تعداد بیشتری از فرکانس‌های طبیعی با نتایج تجربی مطابقت پیدا کردند. معروفی و شمشیرساز اثر سیال آب روی امپدانس الکترومکانیکی یک تیر یکسر گیردار با ابعاد میلی‌متری را مورد بررسی قرار دادند. در این مدل از تئوری اویلر و فرض مقاله [۲۳] استفاده شد [۲۵]. در [۲۶] اثرات سیال جاری بر روی ارتعاشات یک صفحه با استفاده از معادله برنولی برای سیال مورد بررسی قرار گرفت.

هدف از این تحقیق، بررسی امکان به‌کارگیری تکنیک امپدانس الکترومکانیکی به‌منظور پایش سازه‌های دریایی و به‌ویژه آسیب خوردگی در آن‌ها است. برای این منظور از یک مدل المان محدود وابسته (مکانیکی، الکتریکی و شماره‌ای) برای شبیه‌سازی ارتعاشات یک تیر یکسر گیردار در یک سیال ساکن و همچنین محاسبه طیف امپدانس از روی ولتاژ خروجی وصله‌های پیزوالکتریک متصل به آن استفاده شد. برای صحت‌گذاری نتایج المان محدود، فرکانس‌های طبیعی تیر توسط یک تحلیل مقادیر ویژه محاسبه و با نتایج [۲۴] مقایسه شد. به‌علاوه، نحوه تأثیرگذاری آسیب خوردگی بر روی سیگنال‌های ضبط شده توسط وصله‌های پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفت. بررسی اثر عمق روی نتایج، از جمله چشم‌اندازهای دیگر مقاله حاضر به شمار می‌رود.

یک تیر مجهز به پیزوالکتریک استفاده کردند [۱۴]. وانگ و همکاران، از المان طیفی در حوزه فرکانس برای مدل‌سازی طیف امپدانس در تیر تیموشنکو ترک‌دار بهره گرفتند [۱۵]. تکنیک کاهش مرتبه مدل امپدانس الکترومکانیکی برای افزایش سرعت حل در روش المان محدود طیفی در [۱۶]، [۱۷] ارائه شد.

تئوری و پیاده‌سازی روش امپدانس برای پایش سلامت سازه برای اولین بار توسط لیانگ<sup>۱</sup> و همکارانش انجام شد [۶]. روش امپدانس برای تحریک سازه از فرکانس‌های بالا (عموماً بالاتر از ۱۰ کیلوهرتز) استفاده می‌کند. برای تولید این فرکانس‌های بالا، پیزوالکتریک‌ها عموماً به ولتاژهای خیلی کم (معمولاً کمتر از یک ولت) نیاز دارند. در این مدل‌سازی از سیستم یک درجه آزادی استفاده شد. لیانگ نشان داد که ادیمیتانس الکترومکانیکی (معکوس امپدانس الکترومکانیکی)، تابعی از امپدانس مکانیکی عملگر پیزوالکتریک و امپدانس مکانیکی سازه است. این امر سبب می‌شود که تغییرات در خواص مکانیکی سازه به‌وسیله امپدانس الکترومکانیکی قابل‌اندازه‌گیری باشد؛ بنابراین هر تغییری در امپدانس الکترومکانیکی، حاکی از تغییر در سازه و یا تغییر در شرایط محیطی است. با توجه به حساسیت بالای ضریب دی‌الکتریک به دما که در قسمت موهومی ظاهر می‌شود، قسمت موهومی ادیمیتانس به تغییرات دما حساس بوده و اغلب از قسمت حقیقی برای کاربردهای پایش مورد استفاده می‌شود. ونگ<sup>۲</sup> و همکارانش، مدل تئوری لیانگ را بسط دادند [۷]. در این مدل، عملگر پیزوالکتریک به هر دو طرف سازه متصل گردید، سپس توانایی‌های پیزوالکتریک را به‌عنوان حسگر/عملگر به‌صورت جزئی‌تر بررسی کرد. در این مدل، وابستگی ادیمیتانس الکتریکی به امپدانس مکانیکی سازه مشاهده و توانایی این روش برای کاربردهای پایش سلامت سازه، مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه گیورگیوتو<sup>۳</sup> و همکارانش، یک روش برای کاربرد این تئوری برای تیر و صفحه ارائه دادند [۸، ۹]. به‌الاه<sup>۴</sup> و همکارانش، یک

<sup>1</sup> Liang

<sup>2</sup> Wang

<sup>3</sup> Giurgiutiu

<sup>4</sup> Bhallah

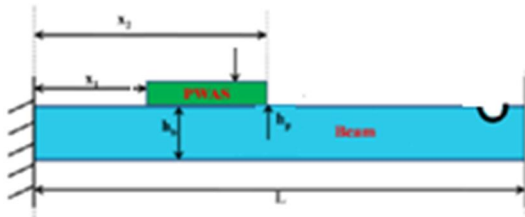
<sup>5</sup> Chu

## ۲- مدل‌سازی المان محدود

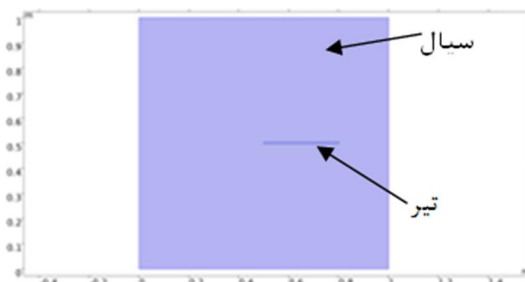
در این تحقیق سه فرض غیر لزج، کرنش‌های کوچک و غیر چرخشی برای سیال مورد نظر لحاظ گردید. بررسی آب به‌عنوان محیط سیال فرض اول را منطقی می‌سازد. از طرفی، دامنه ارتعاشات اجباری سازه میزبان، ناشی از تحریک پیزوالکتریک در روش امیدانس الکترومکانیکی بسیار ناچیز (حدود ۰/۱ میکرومتر) است. به‌این ترتیب، فرض دوم در مورد رفتار سیال در این گستره دامنه ارتعاشات با دقت مناسبی همراه خواهد بود. علیرغم فرکانس بالا، سرعت ارتعاشات سازه میزبان و در نتیجه سیال (شرط برابری سرعت در مرز) به قدری نیست که منجر به جریان مغشوش و غیر چرخشی در اطراف سازه میزبان در سیال شود (فرض سوم). این سه فرض منجر به حذف ترم‌های غیرخطی در معادله ساختاری سیال (معادلات نویر- استوکس) و تبدیل محیط سیال به محیط آکوستیک می‌شود [۲۷] و [۲۸].

نمونه تحت بررسی شامل، یک تیر یکسر گیردار به طول ۳۰۰ میلی‌متر مجهز به یک وصله پیزوالکتریک ۵ میلی‌متری با ضخامت ۰/۲۷ میلی‌متر است (شکل ۲). فاصله پیزوالکتریک از تکیه‌گاه ۴۰ میلی‌متر لحاظ شد. شکل ۲ نحوه مدل‌سازی محیط سیال در اطراف لوله را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی خوردگی، یک حفره در نزدیکی سر آزاد به مدل‌های مربوط به حالت معیوب اضافه شد. برای شبیه‌سازی خوردگی، یک حفره نیم‌دایره در نزدیکی سر آزاد به مدل‌های مربوط به حالت معیوب اضافه شده است. از تحلیل مقادیر ویژه برای استخراج فرکانس‌های طبیعی سیال استفاده شد؛ همچنین طیف امیدانس الکترومکانیکی از تحلیل کوپل الکتریکی، مکانیکی و شاره‌ای نمونه مورد نظر و قرائت ولتاژ وصله‌های پیزوالکتریک به دست آمد.

ماده وصله‌های پیزوالکتریک متصل به سازه PZT-5H است. خواص مربوط به این پیزوالکتریک و تیر فولادی در جدول ۱ ارائه شده است؛ همچنین چگالی سیال ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سرعت صوت در سیال ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی، تحلیل‌ها در محیط دوبعدی انجام گرفت. شبیه‌سازی روش امیدانس الکترومکانیکی به‌عنوان یک مسئله فرکانس بالا، استفاده از مش بندی به‌اندازه کافی ریز را برای دستیابی به پاسخ‌های دقیق ایجاب می‌کند. این موضوع با کاهش پیاپی ابعاد مش در شبیه‌سازی‌های متوالی تا دستیابی به همگرایی نتایج، مدنظر قرار گرفت.



شکل ۱- شماتیک تیر تحت پایش مجهز به وصله پیزوالکتریک و دارای آسیب خوردگی در انتهای آن



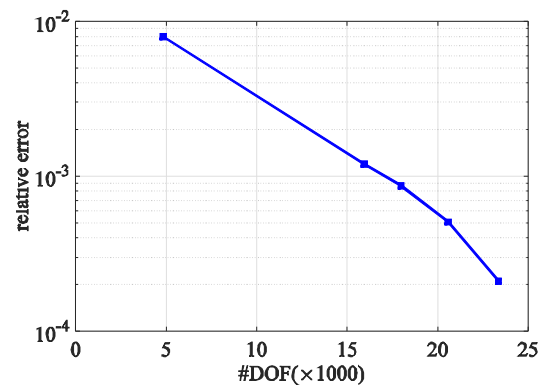
شکل ۲- شماتیک تیر همراه با محیط سیال (ابعاد برحسب متر)

جدول ۱- ماده وصله پیزوالکتریک [۲۹] و تیر فولادی [۳۰]

	ثابت الاستیک ( $N/m^2$ )			ثابت پیزوالکتریک ( $C/m^2$ )			گذردهی الکتریکی ( $F/m$ )	چگالی ( $kg/m^3$ )		
	$c_{11}$	$c_{13}$	$c_{33}$	$c_{44}$	$e_{31}$	$e_{33}$	$e_{15}$	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{33}$	$\rho$
پیزوالکتریک	$126 \times 10^9$	$84/1 \times 10^9$	$119 \times 10^9$	$23 \times 10^9$	-۶/۵	۲۳/۳	۱۷/۴۴	$15/0.3 \times 10^{-9}$	$13 \times 10^{-9}$	۷۵۰۰
فولاد	$230/76 \times 10^9$	$69/23 \times 10^9$	$230/76 \times 10^9$	$80/76 \times 10^9$	-	-	-	-	-	۷۸۵۰

## ۳- تحلیل مقادیر ویژه

شکل ۳ نتایج مربوط به نحوه همگرایی نتایج روش اجزاء محدود را به صورت میانگین خطای نسبی ۵۰ فرکانس طبیعی اول نسبت به تعداد درجات آزادی مدل نشان می‌دهد. در محاسبه شاخص همگرایی، نتایج تحلیل اجزاء محدود همگرا شده به عنوان پاسخ معیار در نظر گرفته شد. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، ابعاد مش بندی در نزدیکی آسیب خوردگی در مدل‌های معیوب کاهش یافت.



شکل ۳- شاخص همگرایی میانگین خطای نسبی ۵۰ فرکانس طبیعی اول برای روش اجزاء محدود

به منظور صحت سنجی دقت نتایج مدل عددی توسعه داده شده، مقادیر ویژه محاسبه شده با مقادیر مدل نظری ارائه شده مرجع [۲۴] مقایسه شد. در مدل نظری این مرجع، تیر مجهز به وصله پیزوالکتریک نیست. به همین خاطر در مدل المان محدود نتایج مربوط به فرکانس طبیعی صحنه‌گذاری شد. جدول ۲ نتایج مربوط به در پنج فرکانس طبیعی اول ارتعاشات عرضی تیر نشان داده شده است. نتایج حاکی از تطابق مناسب بین فرکانس‌های طبیعی تیر در ارتعاشات عرضی مدل المان محدود و مدل نظری [۲۴] هستند.

## ۴- امپدانس الکترومکانیکی در حالت سالم

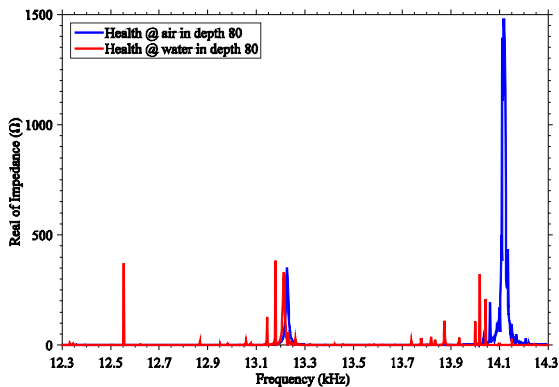
در این قسمت امپدانس الکترومکانیکی پیزوالکتریک در حالت سالم در محیط هوا و آب، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا در حالت سالم امپدانس الکترومکانیکی در سه مقطع  $x = 50$  و  $80$  و  $50$  و  $20$  سانتی‌متر در آب با هوا مقایسه می‌شود.

## جدول ۲- مقایسه پنج مقدار ویژه اول ارتعاشات عرضی (هرتز)

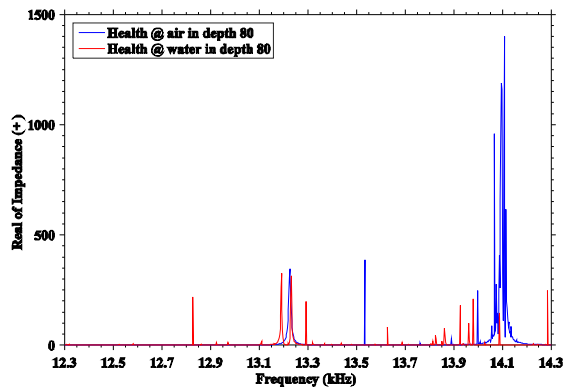
خطای نسبی (%)	مقاله (آب) [۲۲]	المان محدود (آب)	المان محدود (هوا)
۰/۵۶	۴۱/۰۷	۴۱/۳	۴۵/۳
۰/۶۷	۲۵۷/۵۰	۲۵۹/۲۳	۲۸۳/۸۸
۰/۷۲	۷۲۱/۱۰	۷۲۶/۳۲	۷۹۴/۸۷
۰/۷۷	۱۴۳۱/۶۰	۱۴۲۴/۵۸	۱۵۵۷/۶۸
۰/۷۵	۲۳۳۹/۷۰	۲۳۵۷/۴۳	۲۵۷۴/۹۱

شکل‌های ۴ تا ۶ به ترتیب مقایسه امپدانس الکترومکانیکی تیر بین هوا و آب را در سه مقطع نشان می‌دهد.

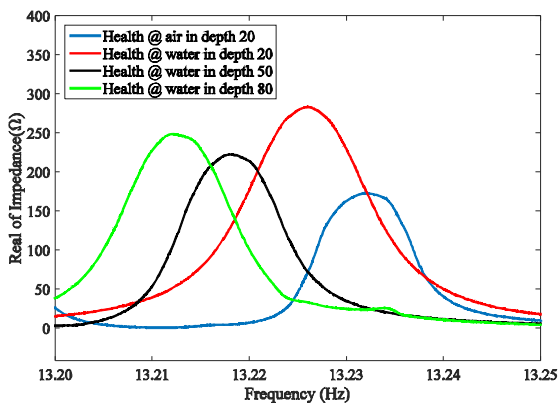
نتایج نشان می‌دهد که جابجایی فرکانسی اتفاق می‌افتد. شکل ۷ بزرگنمایی طیف امپدانس الکترومکانیکی را در بازه  $13/20$  تا  $13/25$  کیلوهرتز نشان می‌دهد. با توجه به اینکه اثرات فشار هوا روی طیف امپدانس در عمق‌های مختلف بسیار کم است. در این شکل از عمق  $20$  سانتیمتری برای مقایسه طیف امپدانس هوا با عمق‌های  $20$ ،  $50$  و  $80$  سانتیمتری سازه مغروق در آب استفاده شده است. همان‌طور که مرجع [۲۴] نشان داده است، فرکانس طبیعی سازه در عمق  $20$  سانتیمتری در آب نسبت به همان عمق در هوا به سمت چپ جابجا شده است. علاوه بر آن با افزایش عمق آب این جابجایی بیشتر نیز شده است. دلیل این امر، این است که جرم افزوده شده بیشتری از سیال در عمق بیشتر، روی سازه قرار دارد. این افزایش جرم روی سازه، سبب افزایش جابجایی فرکانس طبیعی در سازه خواهد شد [۲۶]. در فرکانس‌های بالاتر تراکم فرکانس‌های طبیعی بیشتر است. فرکانس‌های طبیعی مشاهده شده در روش امپدانس الکترومکانیکی در محیط هوا بازه مدنظر تعداد کمی است. یکی از دلایلی که به آن می‌توان اشاره نمود، این است که پیزوالکتریک روی نودهای بیشتری از سازه در این بازه فرکانسی قرار دارد که این امر سبب کاهش تعداد فرکانس‌های طبیعی در این بازه می‌شود؛ ولی در محیط آب فرکانس‌های بازه‌های بالاتر به این بازه جابجا شده‌اند؛ در نتیجه در محیط آب تراکم فرکانس طبیعی بیشتر است و نشان می‌دهد، پیزوالکتریک روی نودهای کمتری این سازه در این بازه فرکانسی قرار دارند.



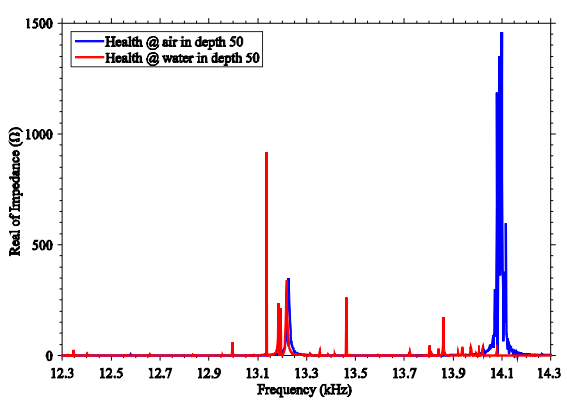
شکل ۶- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم در عمق ۸۰



شکل ۴- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم در عمق ۲۰



شکل ۷- بزرگنمایی امپدانس الکترومکانیکی در بازه ۱۳/۲۰ تا ۱۳/۲۵ کیلوهرتز



شکل ۵- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم در عمق ۵۰

### ۵- امپدانس الکترومکانیکی در حالت معیوب

در این قسمت نیز تیر معیوب در همان سه مقطع قسمت قبل نشان داده شده مغروق شده است؛ همچنین سه شعاع خوردگی به اندازه ۱ و ۲ و ۳ میلی‌متر جهت بررسی اندازه عیب در محیط هوا و آب مورد بررسی قرار گرفته است. از شاخص عیب مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> جهت بررسی عیب استفاده شده است که رابطه آن در زیر ارائه شده است.

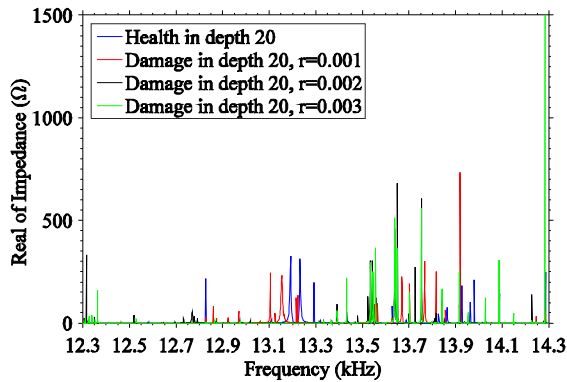
$$RMSD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_i^0 - Z_i^1)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_i^0)^2}}$$

<sup>۱</sup> RMSD

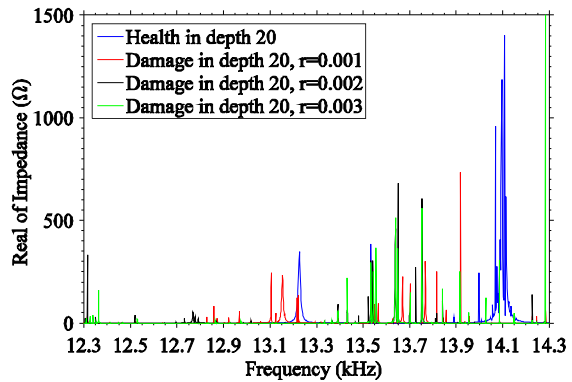
که در آن  $N$  تعداد کل داده‌های امپدانس در بازه فرکانسی مدنظر،  $Z_i^0$  قسمت حقیقی امپدانس در حالت سالم و  $Z_i^1$  قسمت حقیقی امپدانس در حالت ثانویه است. شکل‌های ۸ تا ۱۰ امپدانس الکترومکانیکی تیر سالم و معیوب در هوا به ترتیب در عمق ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتیمتر برای شعاع خوردگی ۱ و ۲ و ۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. در حالت سالم در هوا در بازه فرکانسی ۱۲/۳ تا ۱۴/۳ کیلوهرتز تعداد فرکانس‌های طبیعی کمی در سازه وجود دارد؛ اما باوجود عیب تعداد فرکانس‌های طبیعی سازه افزایش یافته است. هرچقدر اندازه عیب بزرگ‌تر شده است، این افزایش چشمگیرتر است. تغییر در اندازه عیب سبب تغییر در دامنه و فرکانس‌های طبیعی سازه شده است. هرچند اندازه عیب کوچک است، ولی به دلیل ماهیت فرکانس بالا بودن روش این تغییرات در روش امپدانس الکترومکانیکی به راحتی قابل

خوردگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که اشاره شد، فرکانس‌های طبیعی سازه سالم در محیط آب در این بازه فرکانسی دارای تراکم زیادی است. از طرفی ایجاد عیب و

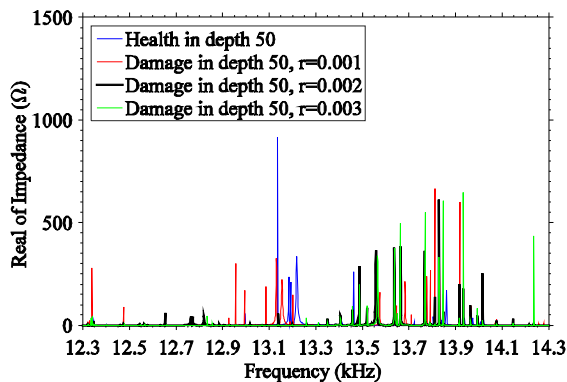
شناسایی است؛ همچنین شکل‌ها ۱۱ تا ۱۳ امپدانس الکترومکانیکی تیر سالم و معیوب در آب به ترتیب در عمق ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی‌متر برای همان شعاع‌های



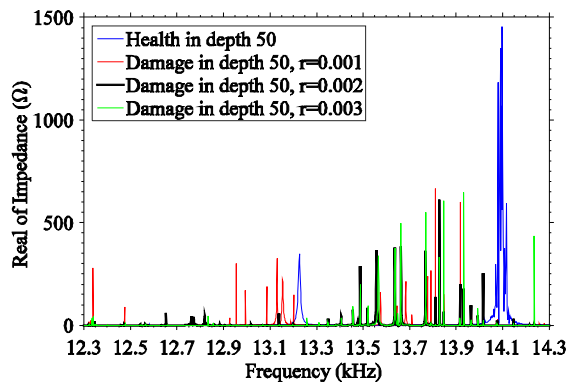
شکل ۱۱- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم و معیوب در عمق ۲۰ در آب



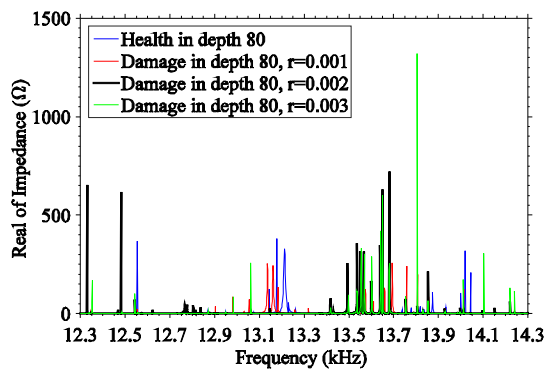
شکل ۸- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم و معیوب در عمق ۲۰ سانتی‌متر در هوا



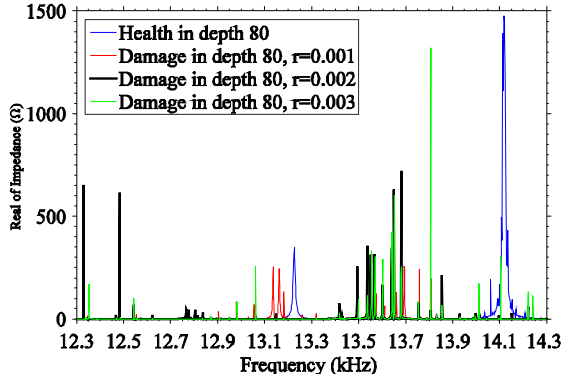
شکل ۱۲- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم و معیوب در عمق ۵۰ سانتی‌متری در آب



شکل ۹- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم و معیوب در عمق ۵۰ سانتی‌متر در هوا



شکل ۱۳- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم و معیوب در عمق ۸۰ سانتی‌متری در آب



شکل ۱۰- امپدانس الکترومکانیکی حالت سالم و معیوب در عمق ۸۰ سانتی‌متر در هوا

باهم مقایسه شد. مشخص شد که به دلیل لزجت سیال دامنه فرکانس‌های طبیعی کاهش پیدا می‌کند. از طرفی با توجه به جرم افزوده شده سیال روی سازه، فرکانس‌های طبیعی به سمت چپ جابجا می‌شوند؛ همچنین اثر خوردگی روی تیر در محیط هوا و سیال در همان سه عمق مقایسه شد. در بازه فرکانسی مورد نظر تراکم فرکانس طبیعی در آب کم است، ولی با توجه به اینکه فرکانس‌های طبیعی بالاتر در محیط آب به این بازه منتقل شده‌اند تراکم فرکانس‌های طبیعی در محیط آب بیشتر شد. در نهایت از شاخص عیب RMSD برای شناسایی عیب خوردگی در هر دو محیط هوا و سیال استفاده شد. در هر دو محیط آب و هوا به دلیل ماهیت فرکانس بالا بودن روش حتی با وجود اندازه کم عیب شاخص تغییرات چشمگیری را نشان داد. با توجه به انتخاب مناسب بازه فرکانسی، در هر دو محیط سیال آب و هوا شاخص عیب با افزایش اندازه عیب افزایش پیدا کرد. به دلیل بازه ارتفاعی کم در حالت سالم و معیوب امیدانس الکترومکانیکی تغییرات چندانی با تغییرات ارتفاع نداشت همین امر سبب شد که شاخص عیب نیز در هر سه عمق و هر سه اندازه عیب تقریباً ثابت باشد؛ ولی در همین بازه تغییرات عمق کم در سیال، به دلیل تراکم بیشتر فرکانس‌های طبیعی در آب نسبت به هوا شاخص عیب در آب تغییرات بیشتری نسبت به هوا دارد، ولی در عمل به دلیل دامنه کمتر امیدانس الکترومکانیکی در آب نسبت به هوا باید به مسئله نوبه نیز توجه داشت.

## ۷- مراجع

- [1] Ho M, El-Borgi S, Patil D, Song G (2020) Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper. *Struct Health Monit* 19(2): 606-645.
- [2] Kaiser MJ (2018) The global offshore pipeline construction service market 2017-Part I. *Ships Offshore Struct* 13(1): 65-95.
- [۳] سالاری م، ناصرالاسلامی ا (۱۳۹۴) آنالیز مودال صفحه مستطیلی قائم نیمه‌مغروق در آب با شرایط تکیه‌گاهی مختلف. کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی صنایع و مهندسی مکانیک.
- [۴] ناصرالاسلامی ا، سالاری م (۱۳۹۴) آنالیز مودال پوسته استوانه‌ای با شرایط مرزی و حالت‌های غوطه‌وری مختلف در تماس با سیالات تراکم‌ناپذیر. *مجله مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۵۵۸-۵۵۴ (۱): ۹.

افزایش عیب در سازه نیز مانند محیط هوا، سبب افزایش تغییرات امیدانس الکترومکانیکی در سازه خواهد شد.

جدول ۳ نتایج RMSD بین حالت سالم و معیوب را در محیط آب و هوا نشان می‌دهد. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد بازه موردنظر به‌خوبی انتخاب‌شده است که با افزایش اندازه عیب در هر دو محیط سیال آب و هوا افزایش شاخص عیب مشاهده می‌شود. از طرفی در هر دو محیط، آب و هوا با توجه به کوچک بودن اندازه عیب افزایش زیادی در شاخص عیب مشاهده می‌شود که دلیل این امر ماهیت فرکانس بالا بودن روش امیدانس الکترومکانیکی است. در محیط آب شاخص عیب در هر سه عمق تقریباً در یک محدوده ثابت است. با توجه به اینکه کل بازه تغییرات ارتفاع سازه در آب ۶۰ سانتی‌متر است و در این بازه فشار هوا تقریباً کم است، در هر دو حالت سالم و معیوب شاخص عیب تقریباً ثابت است. شاخص عیب در محیط آب تغییرات بیشتری نسبت به شاخص عیب در محیط هوا در هر سه عمق دارد. دلیل آن تراکم فرکانس طبیعی بیشتر آب نسبت به هوا است.

هرچند به دلایلی که گفته شد، به‌ظاهر تغییرات شاخص عیب در آب نسبت به هوا بیشتر است، ولی به علت میرایی بیشتر سازه در محیط آب نسبت به هوا دامنه پیک‌های فرکانسی در محیط آب کمتر است و در عمل امکان دارد، به دلیل وجود نوبه تشخیص این پیک‌ها بعضاً دچار مشکل شود؛ همچنین تغییرات یکنوای شاخص آسیب مجذور میانگین مربعات خطا که نشان‌دهنده افزایش شاخص عیب با افزایش اندازه عیب است در هر دو محیط، نشان‌دهنده قابلیت روش برای تشخیص عیب است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت تکنیک امیدانس الکترومکانیکی جهت تشخیص عیب در یک تیر فولادی مغروق مورد بررسی قرار گرفت. دامنه کم ارتعاشات سازه (اعمال ولتاژ کم توسط عملگر) و ماهیت هیدرو استاتیک آب در اعماق زیاد، امکان مدل‌سازی از محیط آکوستیک برای سیال استفاده شد. نتایج پنج فرکانس طبیعی اول عرضی تیر بین مقاله مرجع و روش المان محدود ارائه شده در این مقاله تطابق خوبی را نشان داد؛ همچنین امیدانس الکترومکانیکی پیزوالکتریک در هوا و سیال هیدرو استاتیک برای تیر سالم در سه عمق مختلف



جدول ۳- RMSD امیدانس الکترومکانیکی حالت سالم و معیوب در هوا و آب

RMSD (%)	هوا			آب		
	عمق ۲۰	عمق ۵۰	عمق ۸۰	عمق ۲۰	عمق ۵۰	عمق ۸۰
شعاع ۱mm	۱۰۱/۳۰	۱۰۲/۷۷	۱۰۱/۴۷	۱۲۰/۴۱	۱۳۸/۷۶	۱۲۰/۹۹
شعاع ۲mm	۱۰۲/۴۹	۱۰۳/۱۲	۱۰۴/۳۱	۱۴۷/۷۶	۱۴۳/۴۸	۱۵۷/۳۴
شعاع ۳mm	۱۰۲/۵۶	۱۰۳/۹۰	۱۰۷/۶۱	۱۵۰/۱۰	۱۵۲/۵۹	۱۹۴/۳۵

- Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications, IEEE, 554-558.
- [15] Wang D, Song H, Zhu H (2015) Electromechanical impedance analysis on piezoelectric smart beam with a crack based on spectral element method. *Math Probl Eng* 4: 713501
- [16] Sepehry N, Asadi S, Shamshirsaz M, Bakhtiari Nejad F (2018) A new model order reduction method based on global kernel k-means clustering: Application in health monitoring of plate using Lamb wave propagation and impedance method. *Struct Contr Health Monit* 25(9): e2211.
- [17] Sepehry N, Shamshirsaz M, Bakhtiari Nejad F (2017) Low-cost simulation using model order reduction in structural health monitoring: Application of balanced proper orthogonal decomposition. *Struct Contr Health Monit* 24(11): e1994.
- [18] Green CP, Sader JE (2002) Torsional frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope. *JAP* 92(10): 6262-6274.
- [19] Dorignac J, Kalinowski A, Erramilli S, Mohanty P (2006) Dynamical response of nanomechanical oscillators in immiscible viscous fluid for in vitro biomolecular recognition. *PhRvL* 96(18): 186105.
- [20] Paul M, Clark M, Cross M (2006) The stochastic dynamics of micron and nanoscale elastic cantilevers in fluid: fluctuations from dissipation. *Nanot* 17(17): 4502.
- [21] Paul M, Cross M (2004) Stochastic dynamics of nanoscale mechanical oscillators immersed in a viscous fluid. *PhRvL* 92(23): 235501.
- [22] Chon JW, Mulvaney P, Sader JE (2000) Experimental validation of theoretical models for the frequency response of atomic force microscope cantilever beams immersed in fluids. *JAP* 87(8): 3978-3988.
- [23] Chu W (1963) Technical report no. 2, DTMB, Contract NObs-86396 (X), Southwest Research Institute. San Antonio, Texas.
- [5] Anderson CM, LaBelle RP (2000) Update of comparative occurrence rates for offshore oil spills. *Spill Sci Technol Bull* 6(5): 303-321.
- [6] Liang C, Sun FP, Rogers CA (1997) Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *JIMSS* 8(4): 335-343.
- [7] Wang X, Ehlers C, Neitzel M (1996) Electro-mechanical dynamic analysis of the piezoelectric stack. *SmMaS* 5(4): 492.
- [8] Giurgiutiu V (2007) Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors. Elsevier.
- [9] Giurgiutiu V, Gresil M, Lin B, Cuc A, Shen Y (1012) Roman C, Predictive modeling of piezoelectric wafer active sensors interaction with high-frequency structural waves and vibration. *AcMec* 223(8): 1681-1691.
- [10] Bhalla S, Naidu ASK, Ong CW, Soh CK (2002) Practical issues in the implementation of electromechanical impedance technique for NDE. in: *Smart Structures, Devices, and Systems*, International Society for Optics and Photonics 484-494.
- [11] Sepehry N, Shamshirsaz M, Bastani A (2011) Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature. *Struct Health Monit* 10(6): 573-585.
- [12] Rajabi M, Shamshirsaz M, Naraghi M (2017) Crack detection in rectangular plate by electromechanical impedance method: modeling and experiment. *Smart Struct Syst* 19(4): 361-369.
- [13] Sepehry N, Bakhtiari-Nejad F, Shamshirsaz M (2017) Discrete singular convolution and spectral finite element method for predicting electromechanical impedance applied on rectangular plates. *JIMSS* 28(18): 2473-2488.
- [14] Yin XR, Li GQ, Xu W, Miao YY (2010) Analysis of beams with piezoelectric stack by using finite element method and impedance method. in: *Proceedings of the 2010 Symposium on*

- [27] Sandberg G, Wernberg PA, Davidsson P (2008) Fundamentals of fluid-structure interaction. in: Computational aspects of structural acoustics and vibration. Springer 23-101.
- [28] Ricci A, Giuri E (2009) FSI analysis of microcantilevers vibrating in fluid environment. in: Proceedings of the Proc of the COMSOL Conf.
- [29] <https://www.piezo.com/>
- [30] <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- [24] Van Eysden CA, Sader JE (2006) Resonant frequencies of a rectangular cantilever beam immersed in a fluid. JAP 100(11): 114916.
- [25] Maroufi M, Shamshirsaz M (2015) Resonant behavior study of PZT sensor partially immersed in liquid using PSO method: modeling and experiment. AICSP 82(3): 583-597.
- [26] Kerboua Y, Lakis A, Thomas M, Marcouiller L (2008) Vibration analysis of rectangular plates coupled with fluid. Appl Math Model 32(12): 2570-2586.