

## پایش پیوسته‌ی مخازن تحت فشار به روش بفرست‌وبگیر با رویکرد بررسی تأثیر پیدایش خوردگی

سیدحمیدرضا هاشمی<sup>۱</sup>، حمیدرضا هوشیارمنش<sup>۲\*</sup>، مجتبی قدسی<sup>۳</sup>

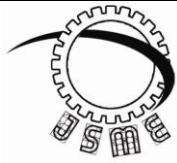
\* نویسنده مسئول: hrh1983@me.iut.ac.ir

واژه‌های کلیدی	چکیده
پایش سلامت سازه خوردگی مخازن تحت فشار عیب یابی پیزوالکتریک امواج هدایت شده	پایش سلامت سازه یکی از زمینه‌های پژوهشی در حال توسعه با کاربردهای چندگانه است که وضعیت سلامت سازه را طی پردازش داده‌ها و تفسیر مناسب آنها تخمین می‌زند و قادر است قبل از تخریب سازه آن را پیش‌بینی کند. آشکارسازی صدمات با استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک یکی از روش‌های مؤثر و قدرتمند در پایش سلامتی سازه است. تجهیزات تحت فشار از مهم‌ترین واحدهای صنایع فرآیندی نظیر صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی بوده که پایش سلامت آنها بسیار با اهمیت می‌باشد. پژوهش حاضر سعی دارد تا راهکاری برای آشکارسازی عیوب در این گونه از تجهیزات با استفاده از امواج هدایت شده ارائه دهد. بدین منظور جهت انجام پژوهش از نمونه سالم و دارای خوردگی از یک مخزن تحت فشار که حسگرهای پیزوالکتریک به طور جداگانه روی آن‌ها نصب و با سازه کوپل الکترومکانیکی شده‌اند، استفاده شده است. امواج به روش بفرست‌وبگیر در فشارهای داخلی متفاوت در مخزن تولید و از مخزن دریافت می‌شوند. نتایج تحقیق نشان داد پارامترهای آسیب شامل خوردگی و تغییرات فشار مخزن تأثیر بسزایی در سیگنال پاسخ دریافتی توسط حسگر پیزوالکتریک داشته است. پیدایش خوردگی در مخازن تحت فشار، دامنه‌ی سیگنال را در حوزه‌ی فرکانس حدود ۱۱٪ کاهش داد. از نتایج بدست آمده می‌توان برای رسیدن به راه‌کاری جهت پایش سلامت مخازن تحت فشار استفاده نمود.
تاریخ ارسال: ۹۴/۱۰/۰۲	
تاریخ بازنگری: ۹۴/۱۲/۲۴	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۲۰	

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، اصفهان/خمینی شهر، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، اصفهان/خمینی شهر، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

# Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



## A Pitch-Catch Based Online Structural Health Monitoring of Pressure Vessels, Considering Corrosion Formation.

Sayed Hamidreza Hashemi<sup>1</sup>, Hamidreza Hoshyarmanesh<sup>2\*</sup>, Mojtaba Ghodsi<sup>3</sup>

\* Corresponding Author: hrh1983@me.iut.ac.ir

### Abstract:

Structural health monitoring is a developing research field which is multifunctional and can estimate the health condition of the structure by data analyzing and also can prognosticate the structural damages. Illuminating the damages by using piezoelectric sensors is one of the most effective techniques in structural health monitoring. Pressurized equipments are very important components in process industries such as oil, gas, petrochemical and power plants, that their health monitoring is vital. The aim of this research is to introduce a technique to illuminate the damages in these equipments by using guided waves. Thereby, two different specimens were used as pressurized vessels at different conditions: pristine and corroded. Different internal pressures were also studied. Piezoelectric transducers were electromechanically coupled to the vessels and the guided waves were propagated by using pitch-catch method. The outcomes indicated that damage parameters in vessels such as corrosion and pressure changes have considerable effect on the signals that piezoelectric sensors receive. Corrosion, the most common damage in pressurized vessels, reduce the signal domain in frequency field to 11%. Also increasing pressure reduce the signal domain. We can use these outcomes to innovate a technique for structural health monitoring of pressure equipments.

### Key words:

Structural health monitoring.  
Pressurized vessels.  
Damage diagnosis.  
Smart piezoelectric sensor actuator.  
Guided waves.  
Frequency response.

1- MSc. Student, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch, Isfahan, Iran.

2- Assistant Prof., Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch, Isfahan, Iran.

3- Assistant Prof., Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

## ۱- مقدمه

۱-۱- پایش سلامت سازه<sup>۷</sup>

پایش سلامت سازه وضعیت سلامت سازه را طی پردازش داده‌ها و تفسیر مناسب آنها تخمین می‌زند و قادر است عمر باقی مانده‌ی آن را پیش‌بینی کند.

دسته بندی روش‌های مختلف پایش سلامتی سازه [۲] به شرح زیر است:

- پایش سلامتی سازه بر اساس ارتعاشات

- پایش سلامتی سازه بر اساس فیبرنوری

- پایش سلامتی سازه با استفاده از پیزوالکتریک

- پایش سلامتی سازه با روش‌های مقاومت الکتریکی

از میان روش‌های ذکر شده در بالا برای پایش سلامتی سازه، ترانسدوسرهای<sup>۸</sup> پیزوالکتریک بیش‌ترین کاربرد را در پایش سلامتی سازه دارد.

## ۲-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده

از سال ۲۰۰۵ تا به امروز تحقیقات بسیار گسترده‌ای بر روی پایش سلامت سازه‌ها صورت گرفته است [۳ تا ۸] که راه را برای تحقیقات آتی هموار ساخته ولی تاکنون پایش مخازن فلزی تحت فشار با رویکرد بررسی اثر پیدایش آسیب سطح و همچنین تغییرات فشار صورت نگرفته است.

## ۲- تعاریف و مبانی پژوهش

۲-۱- تجهیزات تحت فشار<sup>۹</sup>

بطور کلی هر تجهیزاتی که اختلاف فشار داخلی و خارجی آن برابر و یا بیشتر از 15 psi باشد، یک تجهیز تحت فشار نامیده می‌شود و شامل مقررات مندرج در ASME Sec. VIII Div.1 قرار می‌گیرند. مخازن تحت فشار نیز جزء این دسته از تجهیزات قرار می‌گیرند.

صنایع نفت، گاز و پتروشیمی جزو مهم‌ترین صنایع کشورهای صنعتی محسوب می‌گردد. آنچه که در این میان حائز اهمیت است، هزینه‌ی سرسام‌آور تعمیرات و خسارات ناشی از عدم تولید به دلیل تخریب تجهیزات در حین بهره‌برداری می‌باشد. علی‌رغم استانداردهای سخت‌گیرانه-<sup>۱</sup> ای که تدوین شده و کلیه‌ی صنایع مرتبط ملزم به رعایت آن می‌باشند و همچنین بازرسی‌های حین ساخت و تست نهایی قطعه، تاکنون به طور قطع از عیوبی که در طول بهره‌برداری مخزن در اثر عوامل محیطی، اپراتوری و... به وجود می‌آیند، پیشگیری نشده است [۱]. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، دلایل اصلی تخریب را می‌توان خطای بهره‌برداری یا نگهداری ضعیف، بهره‌برداری در بالاتر از ماکزیمم فشار مجاز، عمل نکردن شیر اطمینان، خوردگی<sup>۲</sup>، ترک<sup>۳</sup>، مشکلات جوشکاری، فرسایش<sup>۴</sup> و خستگی<sup>۵</sup> برشمرد.

با توجه به عوامل فوق مشخص است که اکثر حوادث به وجود آمده ناشی از عیوب پوسته<sup>۶</sup> و یا خارج شدن از حدود مجاز شرایط کاری می‌باشد. حال اگر بتوان با روشی به صورت هم‌زمان و مداوم شرایط پوسته را از نظر کاهش ضخامت مورد پایش قرار داد، می‌توان قبل از تخریب اقدام به کاهش فشار، خارج نمودن تجهیز از سرویس و رفع عامل مخرب نمود، که کاهش چشم‌گیر خطرات جانی و مالی را در پی خواهد داشت.

<sup>۱</sup> ASME (American Society of Mechanical Engineers), API (American Petroleum Institute)

<sup>۲</sup> Corrosion

<sup>۳</sup> Crack

<sup>۴</sup> Erosion

<sup>۵</sup> Fatigue

<sup>۶</sup> Shell

<sup>۷</sup> Structural Health Monitoring

<sup>۸</sup> Transducer

<sup>۹</sup> Pressure Equipment

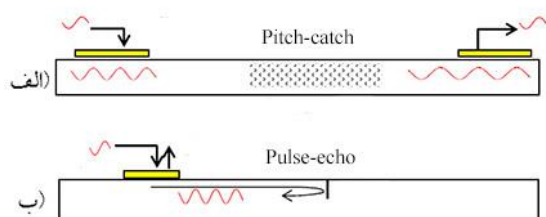
## ۲-۲- ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک

نحوه‌ی کار مواد پیزوالکتریک بر اساس قوانین بنیادین حاکم بر ساختارهای کریستالی می‌باشد [۴]. در یک بلور پیزوالکتریک بین ولتاژ سطح آن و فشار فیزیکی وارد بر آن تناسبی وجود دارد. این پدیده اثر پیزوالکتریک نامیده شد. محدودیت‌های ساخت این مواد از تجاری شدن آن‌ها جلوگیری می‌کرد اما این مسئله نیز پس از کشف تیتانات باریم<sup>۱</sup> و تیتانات زیرکونات سرب<sup>۲</sup> در دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ برطرف شد. این مواد دارای اثر پیزوالکتریسته قوی می‌باشند، که باعث استفاده گسترده از آنها در ساخت ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک (حسگرها و عملگرهای پیزوالکتریک) می‌شود.

۲-۳- روش بفرست‌وبگیر<sup>۳</sup>

انواع روش‌های پرکاربرد پایش سلامت قطعات و سازه‌های مکانیکی با استفاده از حسگرهای پیزوالکتریک عبارتند از روش بفرست‌وبگیر، روش پژواک<sup>۴</sup>، روش آرایه‌های فازی<sup>۵</sup>، روش امپدانس الکترومکانیکی<sup>۶</sup> و روش گسیل صوتی<sup>۷</sup> [۵]. با توجه به نوع سازه‌ی مورد پایش، از روشی متناسب با آن استفاده می‌شود، به‌عنوان مثال هنگامی که فاصله‌ی عیوب از حسگر زیاد باشد، روش‌های بفرست‌وبگیر و پژواک مناسب‌تر است؛ ولی در مواردی که هندسه‌ی قطعه پیچیده باشد و فاصله تا عیوب زیاد نباشد از روش امپدانس الکترومکانیکی استفاده می‌گردد. در قطعات بزرگ، استفاده از دو روش پژواک و بفرست‌وبگیر به دلیل هزینه‌ی پایین تجهیزات مورد استفاده و سادگی روش انجام، بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در روش

پژواک از یک ترانسدیوسر پیزوالکتریک هم به عنوان محرک (فرستنده) و هم به عنوان حسگر (گیرنده) استفاده می‌شود (شکل ۱ ب). در این روش ترانسدیوسر موجی را به داخل نمونه می‌فرستد و موج مزبور در صورت برخورد با عیوب موجود منعکس می‌شود و بخشی از این موج منعکس شده بار دیگر توسط ترانسدیوسر دریافت می‌شود ولی در روش بفرست‌وبگیر از دو ترانسدیوسر استفاده می‌شود، یکی به عنوان فرستنده‌ی موج و دیگری به عنوان گیرنده‌ی موج عمل می‌نماید (شکل ۱ الف).



شکل (۱) شماتیک نحوه‌ی ارسال و دریافت امواج در روش‌های الف) بفرست‌وبگیر ب) پژواک [۱۰]

۲-۴- امواج لمب<sup>۸</sup>

یکی از مؤثرترین روش‌ها جهت عیب‌یابی مطمئن استفاده از امواج هدایت شده<sup>۹</sup> مافوق صوت<sup>۱۰</sup> می‌باشد. امواج هدایت شده اغتشاشاتی الاستیکی هستند که می‌توانند مسافت زیادی را در سازه با اتلاف ناچیز دامنه طی کنند. امواجی که داخل یک صفحه که دارای دو مرز موازی باشد و ضخامت آن کوچکتر از طول موج ارسالی باشد، انتشار می‌یابند به عنوان امواج لمب شناخته می‌شوند. این امواج در راستای ضخامت نیز پراکنده می‌شوند و بنابراین برای پایش ورق‌های نازک بسیار مناسب‌اند.

<sup>۱</sup> Barium Titanate (BT)

<sup>۲</sup> Lead Zirconate Titanate (PZT)

<sup>۳</sup> Pitch-catch Method

<sup>۴</sup> Pulse-echo Method

<sup>۵</sup> Phased Arrays Method

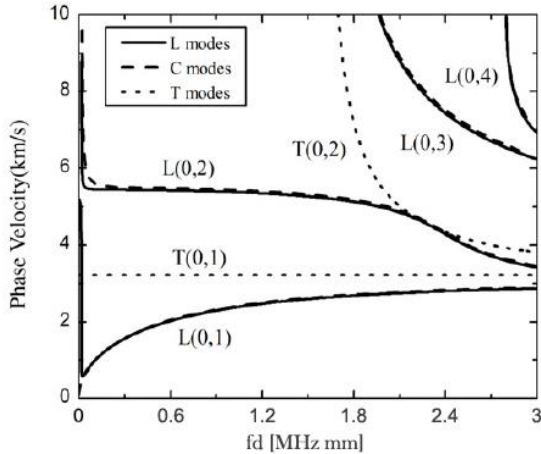
<sup>۶</sup> Electromechanical Impedance Method (EMI)

<sup>۷</sup> Acoustic Emission (AE)

<sup>۸</sup> Lamb Waves

<sup>۹</sup> Guided Waves

<sup>۱۰</sup> Ultrasonic



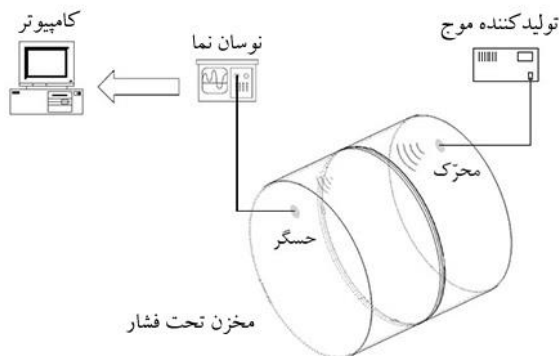
شکل (۳) دیاگرام پراکندگی موج در پوسته‌ی استوانه‌ای فولاد کربنی

با توجه به ضخامت مخزن مورد آزمایش (۷ میلی‌متر) و دیاگرام پراکندگی موج [۸] در پوسته‌ی استوانه‌ای فولاد کربنی (شکل ۳) مشخص می‌باشد که در فرکانس تحریک کمتر از ۲۰۰ کیلوهرتز تنها موج طولی ایجاد می‌گردد.

### ۳- فرآیند اجرایی تحقیق

#### ۱-۳- بیان مسأله

در این پژوهش در نظر است که با استفاده از حسگرها و محرک‌های پیزوالکتریک و روش بفرست‌وبگیر، به پایش مخازن تحت فشار جهت تشخیص پیدایش عیوب و شرایط بحرانی کاری پرداخته شود.



شکل (۴) نحوه‌ی قرارگیری مخزن تحت فشار و اتصال میان اجزا

#### ۲-۴-۱- انتشار امواج هدایت شده در پوسته‌ی استوانه‌ای

بررسی ساختار امواج هدایت شده ما را جهت انتخاب بهترین حالت موج<sup>۱</sup> و پارامترهای موج نظیر فرکانس تحریک<sup>۲</sup> یاری می‌نماید.

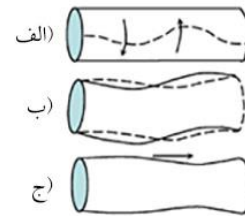
در پوسته‌ی استوانه‌ای با توجه به حرکات ذرات، امکان ایجاد چهار حالت موج زیر وجود دارد:

حالت محیطی<sup>۳</sup>

حالت پیچشی<sup>۴</sup>

حالت خمشی<sup>۵</sup>

حالت طولی<sup>۶</sup>



شکل (۵) شماتیک حالت موج ایجاد شده در پوسته‌ی استوانه‌ای

(الف) حالت پیچشی (ب) حالت خمشی (ج) حالت طولی

در حالت طولی موج (شکل ۲ ج) بردار حرکت ذرات در صفحه (r,z) می‌باشد. کلیه ذرات تنها در دو جهت محوری و شعاعی منتشر شده و جابه‌جایی محیطی ذرات صفر می‌باشد. بنابراین از ویژگی تحریک پذیری و تکرارپذیری بهتری برخوردار می‌باشد. در این حالت موج می‌توان تنها با یک حسگر و عملگر کل سازه را تحت بررسی قرار داد.

بنابراین در فرآیند SHM مخازن تحت فشار با استفاده از امواج هدایت شده، موج طولی بهترین گزینه انتخابی می‌باشد.

<sup>1</sup> Wave Mode

<sup>2</sup> Excitation Frequency

<sup>3</sup> Circumferential modes

<sup>4</sup> Torsional modes

<sup>5</sup> Flexural modes

<sup>6</sup> Longitudinal modes

### ۲-۳- طراحی مخزن تحت فشار

همانطور که پیش‌تر گفته شد مخازن تحت فشار بر طبق استاندارد ASME Sec.8 طراحی می‌شوند.

اطلاعات اولیه که جهت طراحی مخزن آزمایشی در نظر گرفته شده است عبارتند از:

فشار طراحی: ۳ بار گیج

فشار هیدروتست: ۵/۸ بار گیج

دمای طراحی: ۸۰ درجه سانتیگراد

قطر: ۲۱۹ میلیمتر

طول: ۵۰۰ میلیمتر

میزان خوردگی مجاز: ۲ میلیمتر

متریال: فولاد کربنی با استاندارد ASTM<sup>۱</sup> و کد SA516 Gr.70

### ۳-۳- ساخت مخازن تحت فشار

با توجه به محاسبات صورت گرفته و آماده سازی نقشه‌های کارگاهی با در نظر گرفتن الزامات استاندارد و بازرسی اقدام به ساخت ۲ عدد مخزن به شرح زیر گردید. در اینجا لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در این پروژه هدف تأثیر عیوب ایجاد شده در مخزن بر روی نتایج می‌باشد، تنها اختلاف باید همین عیوب باشد بنابراین برای ساخت مخازن فوق تمام تلاش جهت یکسان بودن مخازن شده است.

#### ۱-۳-۳- مخزن سالم

این مخزن بدون عیب و ایراد فیزیکی بوده و جهت استخراج اطلاعات پایه و مرجع<sup>۲</sup> ساخته شده است.

#### ۲-۳-۳- مخزن دارای خوردگی در پوسته

این مخزن جهت بررسی تأثیر خوردگی پوسته بر اطلاعات دریافتی از حسگر ساخته شده است. جهت مدل‌سازی خوردگی روی مخزن مقدار ۲ میلیمتر و به پهنای ۲۰۰

میلیمتر کاهش ضخامت بر روی سطح داخلی پوسته ایجاد شده است.

### ۴-۳- انتخاب و نصب ترانسدیوسر پیزوالکتریک

با توجه به عدم محدودیت در انتخاب ساینز ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک و نیاز به نوع قدرتمند جهت ارسال و دریافت امواج، از ترانسدیوسر پیزو الکتریک PWAS مدل AW16Y کمپانی Audio Well استفاده می‌گردد. مهم‌ترین علت استفاده از این ترانسدیوسرها دارا بودن دو الکتروود در روی و زیر سرامیک پیزو می‌باشد و در عمل محل اتصال حسگر به پوسته، خود نیز الکتروود می‌باشد که در این صورت دیگر نیازی به استفاده از چسب نقره<sup>۳</sup> جهت اتصال آن به پوسته نمی‌باشد.

### ۵-۳- انجام آزمایش

#### ۱-۵-۳- تجهیزات آزمایش

جهت انجام آزمایش در شرایط مورد نظر از تجهیزات آزمایشگاهی ذیل استفاده شده است:

- فانکشن ژنراتور<sup>۴</sup>: در آزمایشگاه مکاترونیک جهت ایجاد امواج برای تحریک عملگر از دستگاه فانکشن ژنراتور ساخت شرکت Good Will Instrument Co. استفاده شده است.

- اسیلوسکوپ<sup>۵</sup>: جهت دریافت پاسخ گرفته شده توسط حسگر از اسیلوسکوپ ساخت شرکت Good Will Instrument Co. استفاده شده است.

- پمپ دستی هیدروتست<sup>۶</sup>: جهت ایجاد فشار در مخزن از پمپ دستی هیدروتست مدل 140 - PHP استفاده شده است.

<sup>3</sup> Silver Conductive Epoxy Adhesive

<sup>4</sup> Function Generator

<sup>5</sup> Oscilloscope

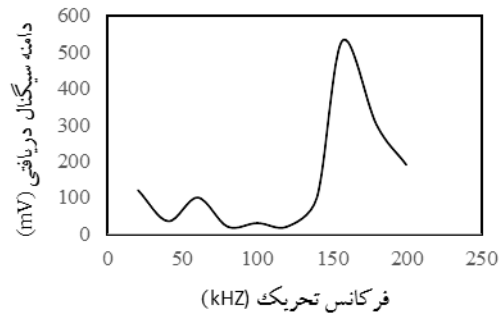
<sup>6</sup> Manual Hydrostatic Test Pump

<sup>1</sup> American Society for Testing and Materials (ASTM)

<sup>2</sup> Reference

### ۳-۵-۲ فرآیند آزمایش

باید قبل از انجام پایش مخازن نمونه، اقدام به انتخاب فرکانس مناسب تحریک شود. بدین منظور مابین فرکانس ۲۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز اقدام به انجام آزمایش با گام‌های ۲۰ کیلوهرتزی شد. نمودار دامنه‌ی سیگنال دریافتی به فرکانس تحریک در زیر آورده شده است.



شکل (۵) نمودار دامنه‌ی سیگنال دریافتی به فرکانس تحریک مخزن تحت فشار

آنچه که از ماکزیمم نمودار مشخص می‌باشد، فرکانس مناسب تحریک مقدار ۱۵۷ کیلوهرتز می‌باشد. آزمایش را در فرکانس ۱۵۷ کیلوهرتز و با توجه به جدول ذیل تکرار و داده‌ها را براساس کد درج شده در جدول ثبت گردید:

جدول (۱) جدول کدهای اطلاعات برداشت شده از آزمایش

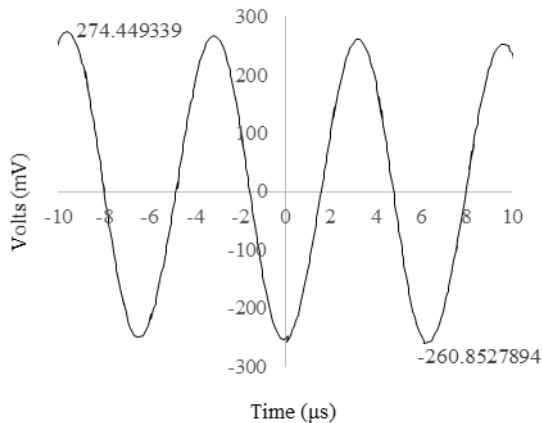
شرایط مخزن	فشار محیط	فشار کاری	فشار هیدروتست
مخزن سالم	۱-۱	۲-۱	۳-۱
مخزن خوردگی	۱-۲	۲-۲	۳-۲

### ۴- نتایج و تحلیل

#### ۴-۱-۱-۴ نتایج

##### ۴-۱-۱-۴-۱-۱-۴ (مخزن سالم - فشار محیط)

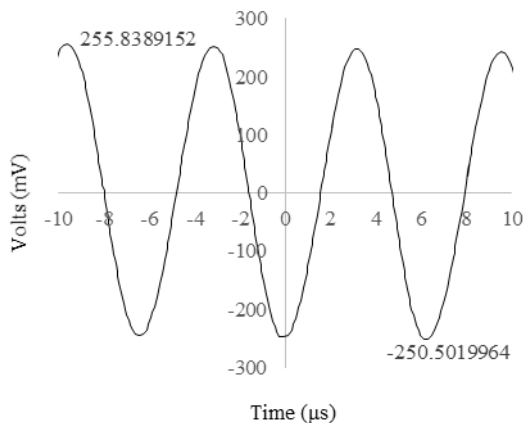
در شکل ۶ نمودار خروجی پاسخ تحریک حسگر در آزمایش مخزن سالم در فشار محیط آورده شده است.



شکل (۶) نمودار پاسخ تحریک آزمایش ۱-۱

##### ۴-۱-۲-۱-۴ (مخزن سالم - فشار طراحی)

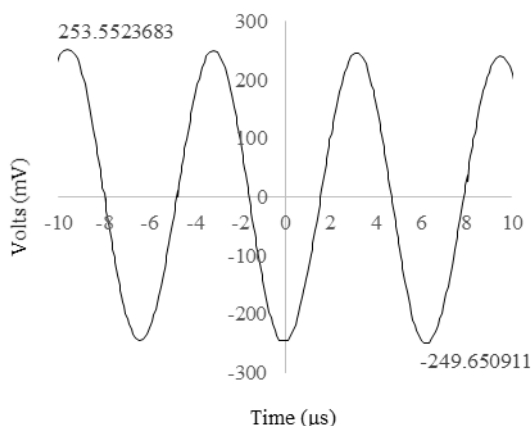
در شکل ۷ نمودار خروجی پاسخ تحریک حسگر در آزمایش مخزن سالم در فشار طراحی آورده شده است.



شکل (۷) نمودار پاسخ تحریک آزمایش ۲-۱

##### ۴-۱-۳-۱-۴ (مخزن سالم - فشار هیدروتست)

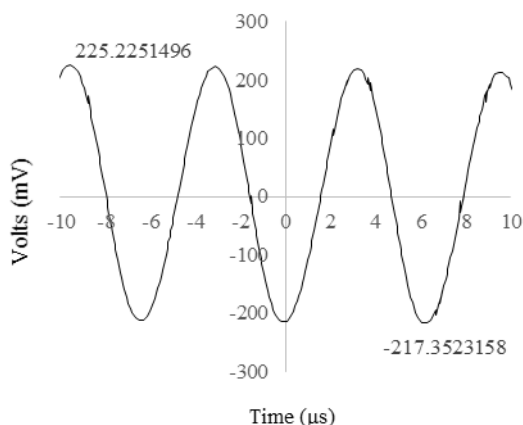
در شکل ۸ نمودار خروجی پاسخ تحریک حسگر در آزمایش مخزن سالم در فشار هیدروتست آورده شده است.



شکل (۸) نمودار پاسخ تحریک آزمایش ۳-۱

۴-۱-۶- آزمایش ۲-۳ (مخزن دارای خوردگی - فشار هیدروتست)

در شکل ۱۱ نمودار خروجی پاسخ تحریک حسگر در آزمایش مخزن دارای خوردگی در فشار هیدروتست آورده شده است.

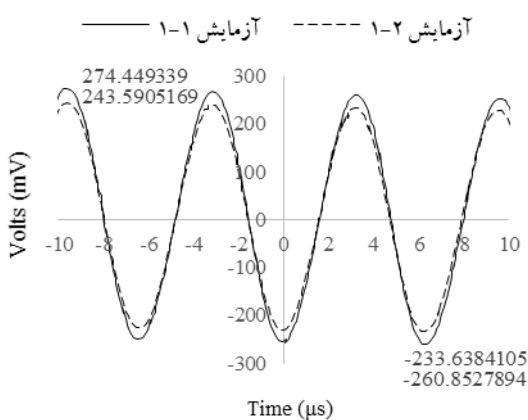


شکل (۱۱) نمودار پاسخ تحریک آزمایش ۲-۳

۴-۲- تحلیل

در این بخش به بررسی و تحلیل پاسخ دریافتی از حسگرها با توجه به وضعیت سلامت مخزن پرداخته می‌شود. برای این کار در شرایط برابر فشار داخلی با مقایسه‌ی نمودارهای بدست آمده، به بررسی پاسخ شده است.

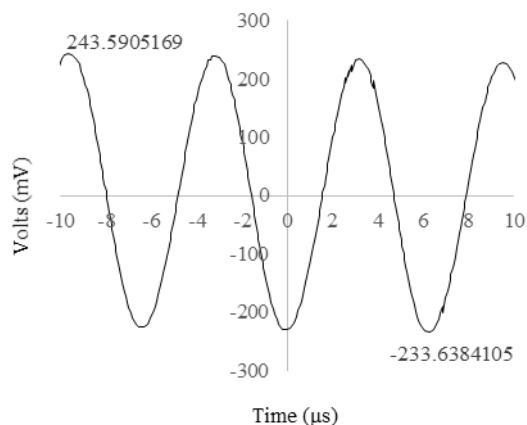
۴-۲-۱- مقایسه‌ی مخزن سالم با مخزن دارای خوردگی در فشار محیط



شکل (۱۲) مقایسه‌ی اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌های ۱-۱ و ۱-۲

۴-۱-۴- آزمایش ۲-۱ (مخزن دارای خوردگی - فشار محیط)

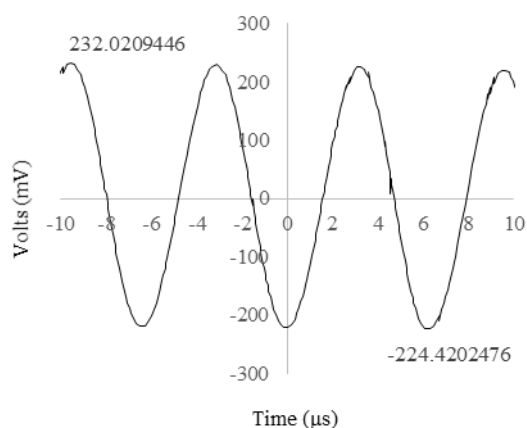
در شکل ۹ نمودار خروجی پاسخ تحریک حسگر در آزمایش مخزن دارای خوردگی در فشار محیط آورده شده است.



شکل (۹) نمودار پاسخ تحریک آزمایش ۲-۱

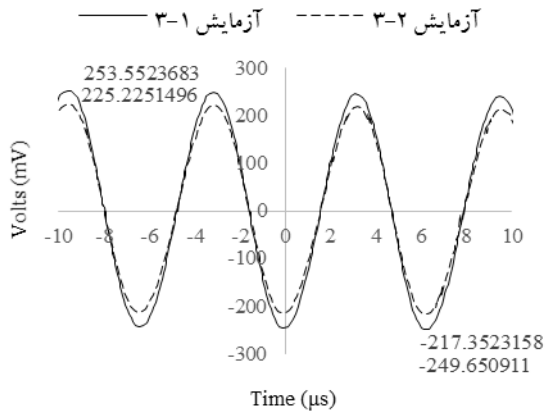
۴-۱-۵- آزمایش ۲-۲ (مخزن دارای خوردگی - فشار طراحی)

در شکل ۱۰ نمودار خروجی پاسخ تحریک حسگر در آزمایش مخزن دارای خوردگی در فشار طراحی آورده شده است.



شکل (۱۰) نمودار پاسخ تحریک آزمایش ۲-۲





شکل (۱۴) مقایسه‌ی اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌های ۳-۲ و ۳-۱

با استفاده از نمودار بالا، مقدار تغییرات ولتاژ در نقاط مینیمم و ماکزیمم را برحسب درصد بدست آورده شده است:

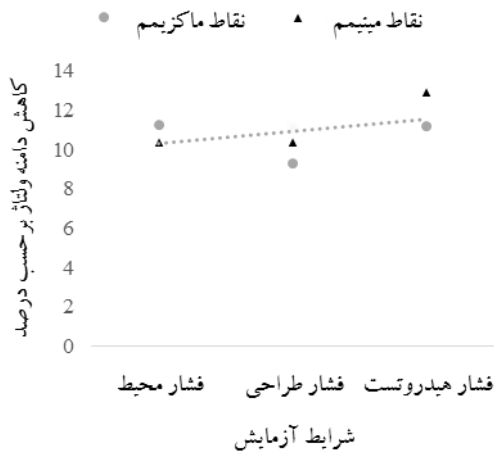
$$\Delta V_{\max \text{ point}} = \left(1 - \frac{225.2251496}{253.5523683}\right) * 100 \approx 11.17\%$$

$$\Delta V_{\min \text{ point}} = \left(1 - \frac{217.3523158}{249.650911}\right) * 100 \approx 12.94\%$$

مشخص است که با افزایش بیشتر فشار داخلی مخزن، کاهش بیشتر دامنه‌ی ولتاژ دریافتی را خواهد داشت.

### ۳-۴- جمع‌بندی

جهت مشخص نمودن چگونگی رفتار حسگر در مقابل خوردگی بر روی پوسته، اطلاعات بدست آمده وارد نرم-افزار اکسل شده است.



شکل (۱۵) نمودار چگونگی رفتار حسگر در مقابل خوردگی بر روی پوسته در شرایط مختلف

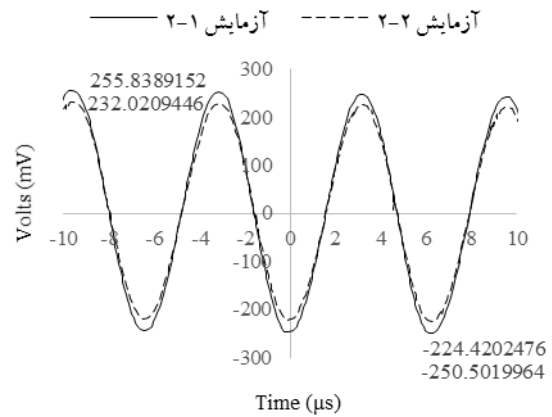
با استفاده از نمودار بالا، مقدار تغییرات ولتاژ در نقاط مینیمم و ماکزیمم را برحسب درصد بدست آورده شده است:

$$\Delta V_{\max \text{ point}} = \left(1 - \frac{243.5905169}{274.449339}\right) * 100 \approx 11.24\%$$

$$\Delta V_{\min \text{ point}} = \left(1 - \frac{233.6384105}{260.8527894}\right) * 100 \approx 10.43\%$$

با توجه به کاهش دامنه‌ی ولتاژ خروجی حسگر مشخص است که موج هنگام عبور از ناحیه دارای خوردگی، به دلیل تغییر مقطع سطح عبوری متأثر خواهد شد.

### ۲-۲-۴- مقایسه‌ی مخزن سالم با مخزن دارای خوردگی در فشار طراحی



شکل (۱۳) مقایسه‌ی اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌های ۲-۲ و ۲-۱

با استفاده از نمودار بالا، مقدار تغییرات ولتاژ در نقاط مینیمم و ماکزیمم را برحسب درصد بدست آورده شده است:

$$\Delta V_{\max \text{ point}} = \left(1 - \frac{232.0209446}{255.8389152}\right) * 100 \approx 9.31\%$$

$$\Delta V_{\min \text{ point}} = \left(1 - \frac{224.4202476}{250.5019964}\right) * 100 \approx 10.41\%$$

مشخص می‌باشد که علاوه بر خوردگی، افزایش فشار نیز بر کاهش دامنه‌ی ولتاژ مؤثر می‌باشد.

### ۳-۲-۴- مقایسه‌ی مخزن سالم با مخزن دارای خوردگی در فشار هیدروتست

استفاد کرد، تا بدین گونه بتوان به طور صحیح تغییرات پاسخ خروجی حسگر پیزوالکتریک را تفسیر نمود.

#### ۵-۲- پیشنهادها

پیشنهادهای زیر جهت ادامه مسیر این پژوهش و بهبود آن ارائه می‌گردد:

- در فرکانس‌های متفاوت آزمایش صورت گرفته و کاهش دامنه‌ی ولتاژ بررسی گردد.

- جهت پی بردن به چگونگی رفتار موج در برابر خوردگی، خوردگی‌هایی با عمق‌های متفاوت آزمایش شود.

- مخازن نمونه در ابعاد مختلف (قطر، طول و ضخامت) و همچنین مواد متفاوت ساخته شده و آزمایش در شرایط یکسان بر روی آن‌ها صورت گرفته تا چگونگی تأثیر تغییرات ابعاد و جنس مخزن مورد بررسی قرار گیرد. همچنین محدوده‌ی جوابگویی روش مورد آزمایش بر روی تجهیزات مختلف مشخص گردد.

- مخزن مورد آزمایش در نرم‌افزارهای المان محدود نظیر آباکوس نیز مدل شود تا چگونگی رفتار موج به صورت تئوری بررسی شده و با حالت آزمایشی واقعی مقایسه گردد.

#### منابع

- [1] Ladokun T., Nabhani F., and Zarei S., *Accidents in Pressure Vessels: Hazard Awareness*, Proceedings of the World Congress on Engineering, 30 June – 2 July 2010, London, U.K.
- [2] Balages D., Fritzen C., Güemes A., *Structural Health Monitoring*, Wiley-ISTE, 2006.
- [3] Ennaceur C., Laksimi A., Herve´ C. and Cherfaoui M., Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, 2005, pp. 197–204.
- [4] Frias C., Faria H., Frazão O., Vieira P. and Marques A.T., Manufacturing and testing composite overwrapped pressure vessels with embedded sensors, *Materials and Design*, vol. 31, 2010, pp. 4016–4022.
- [5] Dongyu X., Xin C., Shifeng H. and Minhua J., Identifying technology for structural damage based on the impedance analysis of

آنچه که از نمودار فوق مشخص می‌باشد، با ایجاد خوردگی بر روی پوسته به طور متوسط حدود ۱۱ درصد از دامنه‌ی ولتاژ دریافتی حسگر کاهش خواهد یافت.

#### ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

##### ۵-۱- نتیجه‌گیری

پیش از پرداختن به تحلیل نهایی و نتیجه‌گیری باید چند مورد را مدنظر قرار داد. با توجه به اینکه آزمایش‌ها در روزهای مختلف صورت گرفته‌اند ممکن است شرایط محیطی، آزمایشگاه و مواردی از این دست بر جواب‌های دریافتی تأثیرگذار بوده باشند، که البته چون هدف تغییرات کیفی می‌باشد می‌توان از این مسئله نیز چشم‌پوشی نمود.

با توجه به اینکه در این پژوهش سعی شده است در هر آزمایش یک پارامتر تغییر کند و بقیه پارامترهای مؤثر در آزمایش ثابت بماند می‌توان رفتار حسگر را در واقعیت بر اساس تغییر آن پارامتر پیش‌بینی نمود. در صورتی که حدود ۱۱ درصد کاهش دامنه ولتاژ رخ دهد در صورت محقق شدن شرایط ذکر شده می‌توان انتظار پیدایش خوردگی بر سطح پوسته را داشته باشیم. البته آنچه مشخص است این است که اگر به صورت ناگهانی تغییرات ۱۱ درصدی بر روی پاسخ حسگر داشته باشیم مطمئناً خوردگی نبوده و باید دنبال علل دیگری باشیم. زیرا خوردگی با مرور زمان ایجاد شده و به صورت آنی اتفاق نخواهد افتاد. پس بدین منظور می‌توان از سیستم‌هایی جهت ثبت پاسخ در بلند مدت استفاده نمود تا با فیدبک بر روی اطلاعات قبلی بتوان پاسخ‌های صحیح‌تری را پیش‌بینی نمود. همچنین با استفاده از نتایج بدست آمده مشخص است که در صورت افزایش فشار، در صورت ثابت بودن سایر متغیرها کاهش دامنه‌ی ولتاژ پاسخ حتمی خواهد بود.

ولی با توجه به این مسئله که در عمل چندین پارامتر تغییر می‌یابند، باید سازوکاری جهت رفع این مشکل پیش‌بینی شود. جهت این مهم پیشنهاد می‌شود که علاوه بر ترانس‌دیوسرهای پیزوالکتریک از حسگرهای فشار نیز

- [10] Giurgiutiu V., Lamb Wave Generation with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring, *10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, 2002.
- [11] Lin B., Giurgiutiu V., Modeling Power and Energy Transduction of Embedded Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring, *SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, 2010, pp. 47-97.
- [12] Mohd A.W. and Farhan M., "An Investigation of Non Destructive Testing of Pressure Vessel", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Issue 1, vol. 3, 2013.
- piezoelectric sensor, *Construction and Building Materials*, vol. 24, 2010, pp. 2522–2527.
- [6] Giurgiutiu V., Structural Damage Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 305, 2011.
- [7] Mohd Aris K.D., Mustapha F., Sapuan S.M. and Dayang A.M., A Structural Health Monitoring of a Pitch Catch Active Sensing of PZT Sensors on CFRP Panels: A Preliminary Approach, InTech, 2012.
- [8] Li F., Liu Z., Sun X., Li H. and Meng G., Propagation of guided waves in pressure vessel, *Wave Motion*, vol. 52, 2014, pp. 216–228.
- [9] Giurgiutiu V., *Structural Health Monitoring With Piezoelectric Wafer Active Sensors*, Second Edition, Columbia, SC, USA, University of South Carolina, 2014.

