

## Experimental Study and Leak Investigation of Composite Pressure Vessel by Acoustic Emission Method

Mansour Hazrati <sup>1</sup>, Hossein Heidary <sup>1\*</sup>, Mohammad Reza Boroomand <sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

2- Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

\*heidary@tafreshu.ac.ir

### Abstract

The focus of this article is on analyzing the behavior of pressure vessels by acoustic emission testing (AT) and assessment of the ability of experimental methods in detection of cylinder defects by measurement of strain on FRP composite tanks. To perform the experiments, the set-up is prepared by installing acoustic emission sensors and strain gauges on the composite tank. Then, the data is collected from acoustic emission sensors and strain gauges. It was observed that the composite tank was in the safe range at pressures less than 2 bar and holes up to diameters of 2-mm diameter did not lead to plastic deformation and development of defects. Under other operating conditions, no monitoring is necessary up to pressures of 5 bar or less where the strain dies bit act linearly any more. At higher pressures, it is necessary that other failure mechanisms, such as elastic-plastic deformation, cracking, etc to be monitored. It is concluded that the acoustic signals are mostly produced by failure mechanisms. The acoustic emission signals for a non-defective cylinder are much less than a defective cylinder. The signals usually start to show up when at the incipitation of a leakage.

**Keywords:** Composite Pressure Vessel, Acoustic Emission, Strain Gauge, Leakage, GFRP Composite

## مطالعه تجربی نشتی مخزن کامپوزیت تحت فشار به روش نشر آوایی

منصور حضرتی<sup>۱</sup>، حسین حیدری کلهرودی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا برومند<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

\*heidary@tafreshu.ac.ir

### چکیده

تمرکز اصلی این مقاله تحلیل رفتار مخزن تحت فشار به روش نشر آوایی و بررسی قابلیت روش تجربی در ردیابی و شناسایی عیوب مخازن با اندازه‌گیری کرنش و به دست آوردن حد فشار مخزن FRP است. برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا مجموعه آزمایشی با نصب حسگرهای نشر آوایی و کرنش سنج بر روی مخزن آماده سازی شد. سپس، به بررسی آزمایشگاهی رفتار مخزن تحت فشار با داده‌گیری از روش‌های یاد شده پرداخته شد. مشاهده شد که مخزن کامپوزیتی مورد مطالعه در فشارهای کمتر از ۲ بار در محدوده ایمن قرار دارد و نشتی‌های مخزن یاد شده با سوراخ‌های تا ۲ میلی‌متر خطرات تغییر شکل پلاستیک و متعاقباً گسترش عیب را ندارد. همچنین، در صورت دارا بودن سایر شرایط کاری، نیاز به پایش و ارزیابی نیست تا جایی که در فشارهای بالای ۵ بار تغییرات کرنش از فاز خطی خارج می‌شود. در فشارهای خیلی بالاتر سایر فرایندهای خرابی از جمله تغییر شکل الاستیک- پلاستیک، رشد ترک ماتریس و غیره نیز ظاهر می‌شود که باید مورد مطالعه قرار گیرد. این موضوع به معنای الزام پایش مخزن در فشارهای بالاتر و یا جلوگیری از به‌کارگیری آن است. نتیجه بررسی تجربی نشان داد که انتشار سیگنال‌های نشر آوایی بیش از همه به دلیل آغاز فرایندهای خرابی تولید می‌شود. لذا سیگنال‌های نشر آوایی در مخزن سالم در مقایسه با مخزن معیوب بسیار ضعیف‌تر است و افزایش فعالیت سیگنال در شروع نشتی قابل توجه و عیب نشتی قابل تشخیص است.

**واژگان کلیدی:** مخزن کامپوزیت تحت فشار، نشر آوایی، کرنش سنج، نشتی، کامپوزیت پلیمری با الیاف شیشه‌ای

### ۱- مقدمه

کامپوزیتی با پایه پلی اتیلن و تقویت شده با الیاف شیشه به روش رشته پیچی استفاده شده است. روش نشر آوایی بعنوان یکی از روش‌های تست غیرمخرب برای بررسی و تحلیل سازه است. مواد تشکیل دهنده یک سازه تحت بارگذاری، انرژی الاستیک خود را در محدوده فراسوتی ۲۰ تا ۱۰۰۰ کیلوهرتز آزاد می‌کنند و این انرژی مرجعی برای کار بازرسی تکنیک نشر آوایی است [۱]. در سال ۱۹۳۶ اولین مشاهدات نشر آکوستیک با وسایل اندازه‌گیری توسط فورستر<sup>۱</sup> و همکارانش گزارش شد. در سال ۱۹۵۰ کایزر<sup>۲</sup> نتیجه تحقیقات خود را در قالب پایان‌نامه دکتری ارائه کرد. در سال ۱۹۷۹ اسکرابی<sup>۳</sup> و وادلی<sup>۴</sup> قابلیت های نشر آوایی را در ارزیابی مخازن تحت فشار نیروگاه های هسته ای بررسی کردند. ایشان دریافتند این روش قابلیت

امروزه در صنایع فضایی و دریایی کامپوزیت ها جایگزین فلزات و آلیاژهای آن ها شده اند. لوله های کامپوزیتی اغلب در خطوط انتقال نفت از سکوها به پالایشگاه و مخازن کامپوزیتی در صنایع دریایی و حمل نقل بکار می روند. کامپوزیت های FRP پلیمرهای مسلح شده با الیاف می باشند. پایش وضعیت مخازن در صنایع یکی از بحث های مهم نگهداری و تعمیرات محسوب می شود. بطور کلی در مخازن در طول زمان کارکرد خود تحت بارهای نوسانی خستگی و دیگر مکانیزم های تخریب مانند تغییر شکل الاستیک، تغییر شکل پلاستیک، شکست ترد، خزش و خوردگی قرار میگیرند که می تواند باعث ایجاد نشتی و بعضا تخریب کل سازه گردد. در این پژوهش از یک مخزن

<sup>3</sup> C. B. Scruby

<sup>4</sup> H. N. G. Wadley

<sup>1</sup> Forster

<sup>2</sup> Joseph Kaiser

حین سرویس بوده و پتانسیل استفاده در سرویس های میان دوره و متوسط گاز را دارد. [۶].

در زمینه بررسی مکانیزم نشت، برومند و همکاران مکانیزم نشت آب شور از لوله های انتقال آب دریا را مطالعه کردند و روشی مبتنی بر فیبر نوری جهت شناسایی موقعیت نشت ارائه دادند [۷].

در سال ۲۰۰۷ اندریس<sup>۱۰</sup> و همکاران آزمون نشت لوله های فشار برای فشار صوتی گاز با استفاده از عناصر فیبر فعال به عنوان حسگر را ارائه دادند. در این آزمایش به کمک یک قطعه لوله ساخته شده از آلومینیوم با قطر ۵۰ میلی متر با استفاده از هوای فشرده شده (محیط گاز) و ایجاد نشت با استفاده از پیچ هایی با سوراخ هایی با قطرهای مختلف (بین ۰٫۱ تا ۱٫۲ میلی متر) شبیه سازی کردند که با نصب یک حس گر کامپوزیت با فیبر فعال به طور مستقیم بر روی سطح لوله و دو حس گر آکوستیک معمولی پارامترهای سیگنال و شکل موج آکوستیک در فشارهای مختلف با و بدون نشت شبیه سازی شده ثبت شده اند [۸].

در شکل ۲ نحوه نصب سنسورها و شبیه سازی نشی با ایجاد سوراخ های مختلف نشان داده شده است. ایشان دریافتند که در حالت بدون نشت فرکانس قابل توجه بالاتر از حدود ۱۶۰ کیلوهرتز وجود نداشته است. همچنین در حالت قطر متغیر و فشار ثابت، دامنه ولتاژ خروجی حس گر برای فرکانس های بالاتر از ۱۶۰ کوچک تر شده و در فرکانس های پایین تر دیده می شود. در فشارهای بالاتر نیز دامنه ولتاژ بالاتر است. این نشان می دهد که ممکن است حد پایینی برای اندازه قطر نشت وجود داشته باشد تا شناسایی شود.

در سال ۲۰۱۰ آقای هان جین<sup>۱۱</sup> و همکارانش به مطالعه تغییر شکل خمشی مخازن تحت فشار کامپوزیتی بر اساس سیگنال های نشر آوایی پرداختند. ایشان از آزمایش های تجربی به کمک روش نشر آوایی و روش های اندازه گیری جابه جایی (کرنش) برای اندازه گیری آسیب و تغییر شکل مخزن تحت فشار کامپوزیت با لاینر فلزی فوق نازک از لایه آلومینیوم استفاده کردند [۹].

تشخیص تغییر شکل، شکست و نشت را دارند و البته برای پایش مستمر سطوح بالای نویزها کمی پیچیدگی ایجاد خواهد کرد [۲].

در سال ۱۹۸۶ فلاچ<sup>۵</sup> پایش مخازن ذخیره کامپوزیتی تحت فشار به روش نشر آوایی تشخیص و ارزیابی دو نوع آسیب (شکست فیبر و لایه لایه شدگی) را با استفاده از دو نظریه توسعه یافته مرور کردند. همچنین این محقق دریافتند که میزان فعالیت آکوستیک امکان تشخیص تغییر شکل را دارد [۳].

در اواخر دهه ۸۰ ایده استفاده از روش نشر آوایی برای بررسی وضعیت کف مخازن در پالایشگاه فاولی<sup>۶</sup> انگلستان مطرح شد و یک گروه کاری متشکل از ۲۰ شرکت انگلیسی و آلمانی برای تحقیقات تشکیل شد [۳].

در سال ۱۹۹۰ اکرت<sup>۷</sup> به همراه همکارانش پروژه ای از طرف موسسه نفت آمریکا برای کار تجربی و استاندارد کردن این آزمون انجام دادند. [۴]

در سال ۲۰۰۳ آقای بیٹی<sup>۸</sup> پایش نشر آوایی برای آزمون فشار بالا مخزن فولادی راکتور را انجام دادند. در این مقاله ایشان به کمک سیستم مکان یابی نشر آوایی و کرنش سنج به بررسی و شبیه سازی مخزن فولادی که در سال ۱۹۹۶ دچار خرابی شده بود پرداختند. نتیجه اینکه با خوشه بندی سیگنال ها بیشترین انتشار در بخش پوسته مخروطی و در محدوده فشار بالای ۴٫۲ مگا پاسکال مشاهده شد. [۵]

در سال ۲۰۰۶ بوش<sup>۹</sup> و همکارانش مقاله ای با عنوان آزمون نشر آوایی سیلندرهای کامپوزیت با فشار بالا را منتشر کردند. در این مقاله با مطالعه سیگنال های آکوستیک، عیوب ساخت بر تولید میکرو آسیب ها در لایه های کامپوزیت بررسی شده است [۶].

شکل ۱ موقعیت سنسورهای بکار گرفته شده به همراه نمودار تغییرات کرنش بر حسب فشار را نشان می دهد.

ایشان برای تشخیص و نظارت بر رشد ترک خستگی، کرنش سنج ها در سطح بیرونی سیلندرها و نزدیک به شکاف نصب کردند و دریافتند که آزمون فشار به کمک آکوستیک روشی جایگزین برای آزمون هیدرو استاتیک نشی و بازرسی های

<sup>9</sup> Boshe J.

<sup>10</sup> Andreas J.

<sup>11</sup> Liu Hongjun

<sup>5</sup> C. Le.Floc'h

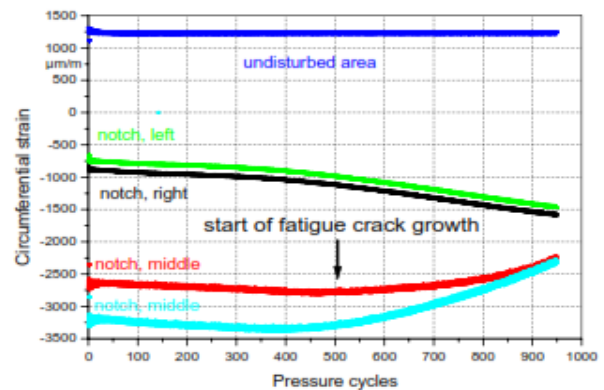
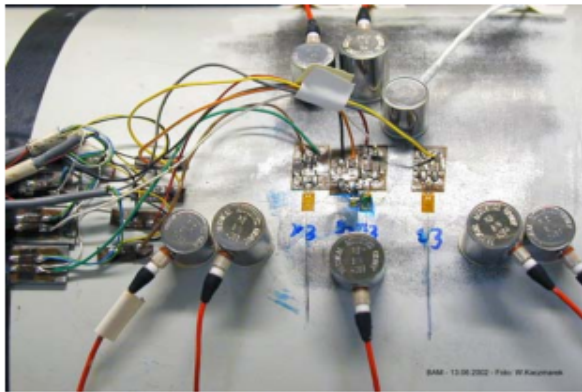
<sup>6</sup> Fawly

<sup>7</sup> Eric G. Eckert

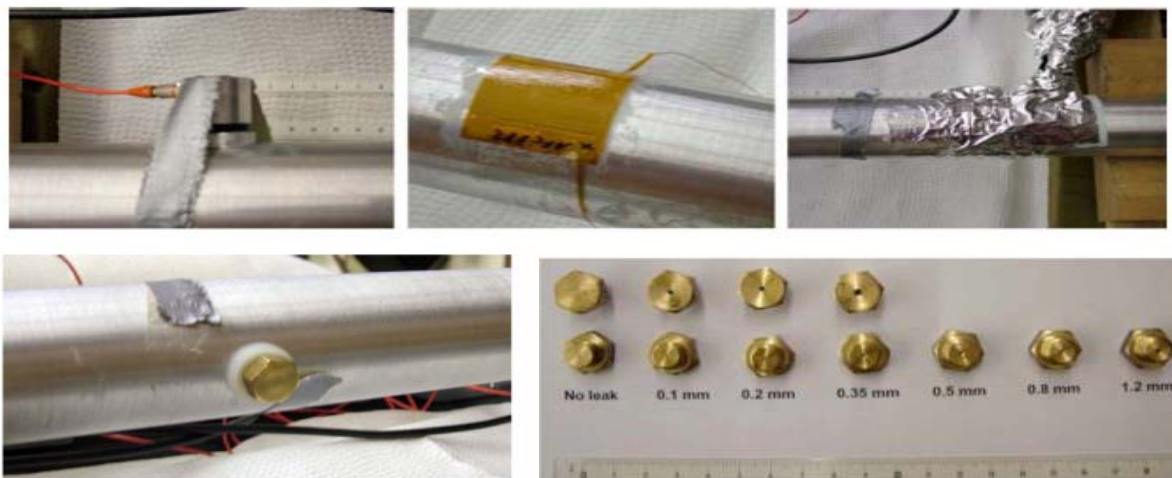
<sup>8</sup> A. G. Beattie

فرایند های آسیب مانند لایه لایه شدن و شکستن فیبر (که در دامنه بالاتر باید باشند) مشاهده نشد. در سال ۲۰۱۴ احمدی نجف آبادی و همکاران مقاله ای با عنوان "نشر آوایی ابزاری برای پایش وضعیت مخازن تحت فشار" ارائه دادند. این پژوهشگران استفاده از الگوریتم های مکان یابی را برای تعیین محل عیب مرور کردند. همچنین ایشان روش تبدیل موجک را برای تشخیص نوع فرایند خرابی بکار گرفتند. ایشان پس از انجام آزمایش های دریافتند که مخازن معیوب در مقایسه با مخازن سالم فعالیت آکوستیک به مراتب بیشتری داشته لذا تشخیص معیوب بودن مخزن با روش نشر آوایی قابل شناسایی است [۱۰].

مطابق با استاندارد ASTM E1067-01 سیگنال های آکوستیک با دامنه بالاتر از ۸۰ دسی بل می تواند آسیب عمده مخازن پلاستیکی تقویت شده توسط الیاف FRP را نشان دهند. نتایج تجربی نشان داد سیگنال های دامنه بالا (بالتر از ۸۰ دسی بل) در مرحله برداشتن بار نشان دهنده تغییر شکل خمشی لاینر مخزن کامپوزیت هستند. همچنین مشاهده شد دامنه تغییر شکل پلاستیک آلیاژ آلومینیم کمتر از ۴۰ دسی بل بوده و ترک ماتریس در محدوده ۴۰-۶۰ دسی بل اتفاق افتاد. در مرحله بارگذاری کاهش ناگهانی سیگنال های آکوستیک به دلیل عدم رشد ترک ماتریس لایه کامپوزیت و تغییر شکل پلاستیک لاینر بوده است. در مرحله برداشتن بار دوباره تعداد سیگنال ها افزایش می یابد. برخی سیگنال های دامنه بالا (بالتر از ۸۰ دسی بل) در مرحله بارگذاری مشاهده شدند اما برخی



شکل ۱- موقعیت سنسورهای آکوستیک و کرنش سنج برای پایش رشد ترک و نتایج اندازه گیری کرنش [۶]



شکل ۲- نحوه نصب سنسورها و شبیه سازی نشی با ایجاد سوراخ روی لوله [۸]

سنسورهای آکوستیک به تشریح خروجی و نتایج کار آزمایشگاهی و نمودارها پردازیم.

## ۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

با توجه به اهمیت کنترل و بازرسی مخازن، نتایج این پژوهش می تواند سبب کاهش خرابی های متداول، جلوگیری از خرابی های مخاطره انگیز در طول عمر مفید آن ها و هزینه های ناشی از خسارت گردد. اهداف اصلی این پژوهش تحلیل رفتار مخزن تحت فشار به روش تجربی و بررسی قابلیت این روش در ردیابی و شناسایی عیوب مخازن به کمک سیگنال ها و داده های حاصل از آزمایش عملی است که با نصب کرنش سنج و حس گرهای نشر آوایی بر روی مخزن FRP انجام می گیرد.

مطابق با استاندارد ASTM-1067 حس گرهای آکوستیک را در فواصل معین نصب می کنند. مطابق با استاندارد پس از نصب حس گرهای آکوستیک و کرنش سنج، مخزن را به کمک کمپرسور تحت فشار داخلی قرار می دهیم بدین صورت که چند مرحله بارگذاری و برداشتن بار تکرار می شود تا بتوان سیگنال های مورد نظر را دریافت و متعاقباً تحلیل نمود. سیگنال های یاد شده با انجام آزمون بر روی دو مخزن که یکی سالم و دیگری معیوب (دارای نشستی) است دریافت و توسط دیتالاگر ثبت می شود و در ادامه آن ها را مقایسه و نتیجه گیری می کنیم.

مخزن فایبرگلاس (FRP) یک مخزن با جنس داخلی پلی اتیلن و تقویت کننده E-Glass اپوکسی است. خصوصیات مکانیکی مخزن در جدول زیر ارائه شده است. رشته پیچی مخزن کامپوزیتی با دو نوع لایه چینی صورت می گیرد؛ لایه ها به ضخامت ۰,۳ میلی متر و با زاویه  $\pm 25$  درجه و لایه ها به ضخامت ۰,۵ با زاویه صفر درجه. طول و قطر داخلی مخزن برابر ۱۱۰۹ و ۲۰۴ میلی متر است.

آقای بوش و همکاران الگوئی برای تعیین محل نصب سنسورهای آکوستیک و کرنش سنج بر روی مخزن ارائه نمودند. گرچه بحث اصلی ایشان رشد ترک خستگی و عیوب ساخت بوده ولی بحث اصلی پژوهش کنونی عیب نشستی و پایش فشار و حد فشار می باشد. بهر حال برخی خروجی ها و نمودارها مثل زمان - دامنه، انرژی - زمان، نیرو - زمان و ... شباهت کاری هر دو پژوهش می باشد؛ و با توجه به تست های تعریف شده و شرایط آزمون، سایر عیوب در پژوهش کنونی بررسی نشده است.

آقای هان جین و همکارانش نیز علاوه بر سنسورهای آکوستیک از کرنش سنج و اندازه گیری جابجایی (کرنش) به کمک آن برای اندازه گیری آسیب و تغییر شکل مخزن استفاده شده است. البته مخزن مورد آزمایش ایشان تحت فشار ۴۵ بار قرار گرفته است و شرایط آزمون های پژوهش کنونی به شکلی بوده است که فشار مخزن به مراتب پایین تر بوده و در نتیجه انتظار تغییر شکل پلاستیک رشد ترک و ... نداشتیم ولی بطور کلی نتایج و داده های ثبت شده برای تشخیص مخزن معیوب نسبت به مخزن سالم در هر دو پژوهش با هم مطابقت دارد. بهر حال از سیکل های بارگذاری و تخلیه فشار و بررسی دامنه ها و سیگنال های آکوستیک و مقایسه دو مخزن با شرایط مختلف در انجام کار آزمایشگاهی ایده گرفته شده است.

آقای اندریس و همکارانش اعمال نشت های متفاوت و قطر سوراخ های متفاوت را ایده گرفته شد. لذا نمودارهای دامنه - زمان و محدوده فرکانس بر اساس قطر سوراخ و میزان فشارها بحث مشترک مقاله یاد شده با پژوهش کنونی می باشد.

در این مقاله قصد داریم با نصب سنسورهای نشر آوایی و کرنش سنج ها در مجموعه آزمایشی، ایجاد عیب نشستی و قطرهای متفاوت و اعمال فشارهای متفاوت و بررسی سه فاکتور اصلی قطر نشستی، میزان فشار داخلی مخزن و محل

جدول ۱- نصب خصوصیات مکانیکی مخزن کامپوزیتی

مدول الاستیسیته (GPa)			ضریب پواسون			مدول برشی (GPa)			Item
$E_1$	$E_2$	$E_3$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_2$	$G_3$	$G_3$	
۴۵	۱۲	۱۲	۰,۱۹	۰,۱۹	۰,۳۱	۶	۶	۵	مقدار



شکل ۳- مجموعه آزمون در شرکت مهندسان پایش وضعیت امیرکبیر

در نقطه ۴۰۰ میلی متر نصب شده و سوراخ نشی در مراحل بعدی در همین محل ایجاد گردید. همچنین محل نصب در دو محل متفاوت نزدیک به دو سر مخزن (در ارتفاع ۱۵۰ و ۶۵۰ میلی متر) و نزدیک به مرکز مخزن و حول کرنش سنج (در ارتفاع ۴۳۵ و ۳۷۵ میلی متر) در نظر گرفته شد.

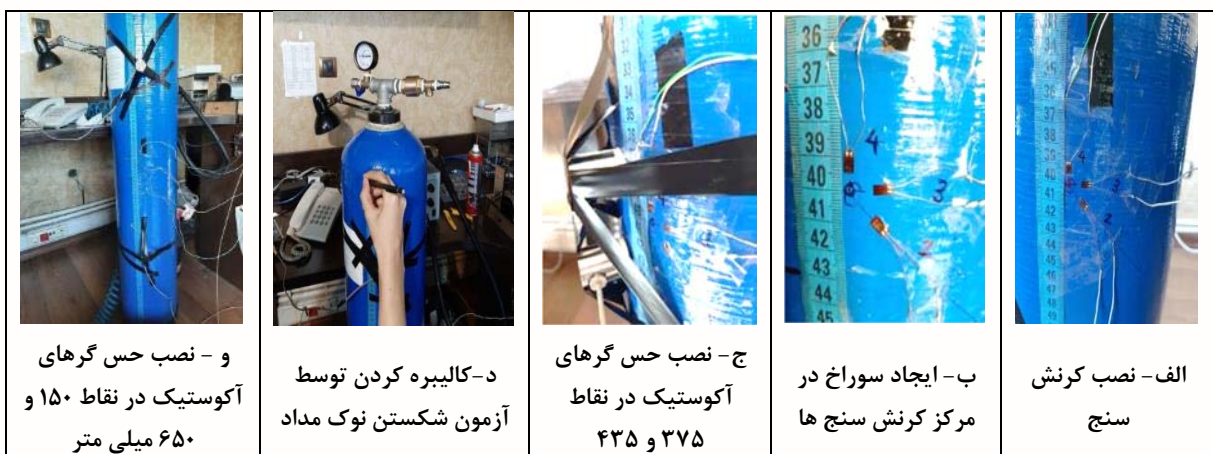
### ۳- نتایج آزمایش و تحلیل خروجی ها

#### ۳-۱- سیگنال ها

دو نمونه از سیگنال های انفجاری برای مخزن سالم (فشار ۲ بار) و مخزن دارای نشی ۰٫۵ میلی متر (فشار ۱ بار) در شکل ۵ آورده شده است ولی در عمل معمولاً با گرفتن FFT از سیگنال ها به بررسی سیگنال های آکوستیک پرداخته می شود.

هوای فشرده به کمک کمپرسور کوچک با فشارسنج ۰-۸ بار به مخزن انتقال داده می شود. هم زمان با اعمال بارگذاری مخزن، سیگنال های نشر آوایی توسط حس گرهای نصب شده روی مخزن اندازه گیری و به کمک سایر تجهیزات در کلیه مراحل آزمون ثبت می شوند. پس از آنالیز داده های آکوستیک، بر اساس مشخصات سیگنال انواع فرایند های خرابی، منابع تولید سیگنال شناسایی می شوند. در شکل ۳ و ۴ مجموعه تست شامل دستگاه نشر آوایی، حس گرهای کرنش سنج، مخزن کامپوزیت و کامپیوتر ثبت کننده داده ها نشان داده شده است.

تعریف آزمون ها بر مبنای فشار داخلی اعمال شده توسط کمپرسور هوا به مخزن است که در بازه ۰-۲ بار و برای مخزن سالم و شبیه سازی عیب نشی با ایجاد سوراخ های قطر ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ میلی متر انجام گرفت. کرنش سنج ها



و - نصب حس گرهای آکوستیک در نقاط ۱۵۰ و ۶۵۰ میلی متر

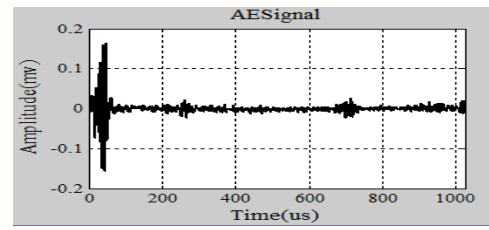
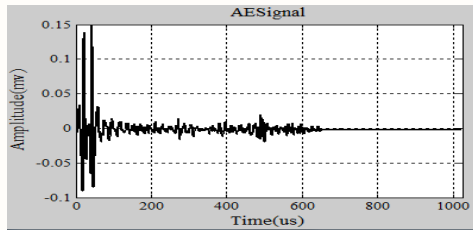
د- کالیبره کردن توسط آزمون شکستن نوک مداد

ج- نصب حس گرهای آکوستیک در نقاط ۴۳۵ و ۳۷۵

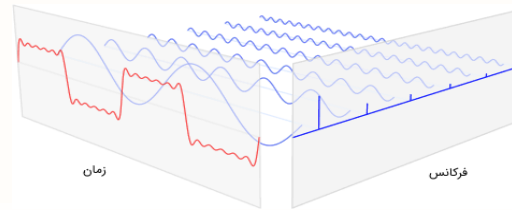
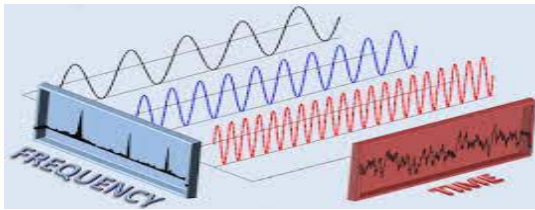
ب- ایجاد سوراخ در مرکز کرنش سنج ها

الف- نصب کرنش سنج

شکل ۴- تنظیمات روی مخزن



شکل ۵- شکل سیگنال های دریافتی ناشی از نشت



شکل ۶- نمایش تابع غیرخطی به صورت ترکیبی از امواج سینوسی [۱۱]

آنالیز FFT سیگنال های دریافتی معرف خیلی از ویژگی های نشت است و می تواند به عنوان یکی از شاخص های تمایز و شناسایی نشت استفاده شود. در شکل های ۷ تا ۱۰ تبدیل فوریه سریع بدست آمده از آزمون های مختلف مطالعه کنونی برای مخزن بدون نشت و با نشتی ۰،۵، ۱ و ۱،۵ میلیمتر در فشارهای ۰،۵، ۱، ۱،۵ و ۲ بار ارائه شده است. قابل ذکر است با مقایسه فرکانس غالب این سیگنال ها با فرکانس طبیعی جسم یا سازه مورد نظر اطلاعاتی در خصوص پدیده رزونانس به دست می آید. در واقع زمانی که فرکانس های غالب یک سیستم، متناظر با فرکانس های طبیعی آن باشند، ارتعاش های رخ داده می توانند به دلیل رزونانس تقویت شوند. ادامه آن می تواند منجر به آسیب دیدن و تخریب یک سازه گردد.

برخی نتایج حاصل از بررسی نمودارهای FFT به شرح زیر آورده شده است:

بیشترین محدوده دامنه ولتاژ به مقدار ۵،۵ میلی ولت در نشتی ۱ میلی متر و فشار ۰،۵ بار بوده است. با افزایش فشار دامنه کاهش پیدا کرده است. مخزن با نشتی قطر ۰،۵ میلی متر دامنه های کمتری را ثبت کرده است ولی در ادامه مخزن با نشتی قطر ۱ میلی متر دامنه های بزرگ تری را نسبت به مخزن سالم دارد. این نشان می دهد که ممکن است حد پایینی برای اندازه قطر نشت وجود داشته باشد تا شناسایی شود.

## ۲-۲- آنالیز FFT

تبدیل فوریه یکی از مفیدترین ابزارهای ریاضی در زمینه های مختلف علوم مهندسی است. تبدیل فوریه در پردازش سیگنال، فیزیک، ارتباطات و مخابرات، مباحث نور، پردازش صدا و تصویر و ... کاربرد دارد. این روش یک تابع یا مجموعه ای از اطلاعات را از حوزه زمان یا نمونه به حوزه فرکانس منتقل می کند. این بدان معناست که تبدیل فوریه می تواند بخش فرکانسی را برای یک مجموعه از اطلاعات زمانی نمایش دهد. در این مطالعه ما به مبحث تبدیل فوریه در پردازش صوت می پردازیم.

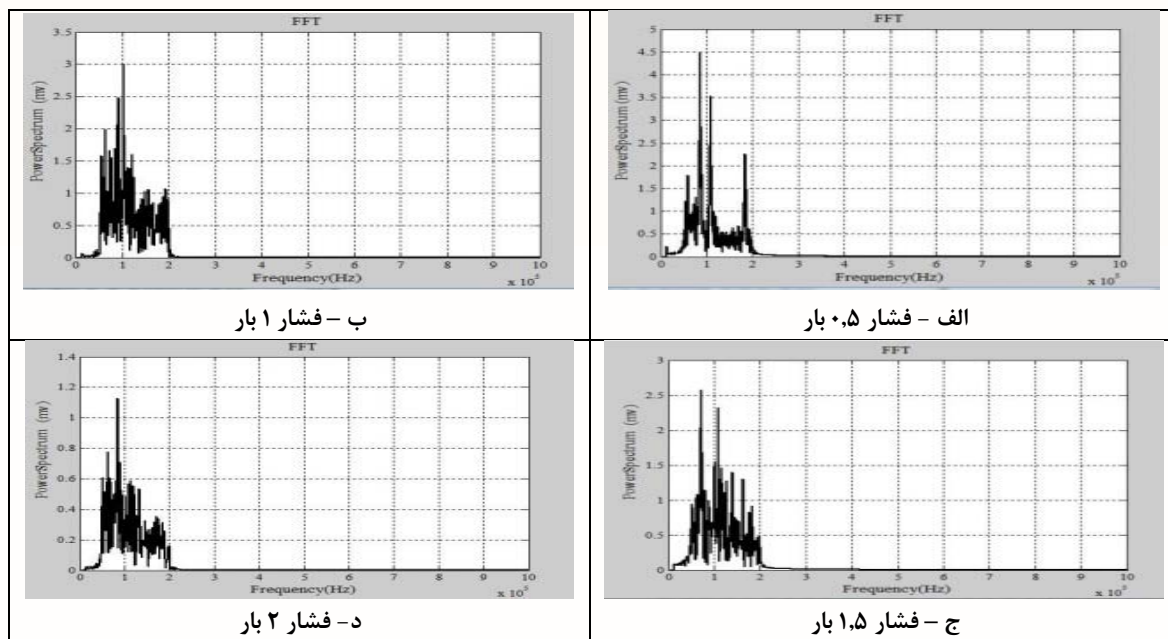
تبدیل فوریه گسسته (DFT) اطلاعات گسسته را از حوزه نمونه ها به حوزه فرکانس منتقل می کند. هر تابع غیرخطی را می توان توسط مجموعه ای از امواج سینوسی نمایش داد. این مفهوم که از اصول تبدیل فوریه است در شکل ۶ نمایش داده شده است [۱۱].

تبدیل فوریه سریع (FFT) یک راه بهینه و الگوریتمی برای محاسبه و انجام تبدیل مستقیم و معکوس گسسته فوریه است. در واقع تبدیل فوریه سریع از طریق تجزیه ماتریس تبدیل فوریه گسسته به حاصل ضرب ماتریس های "Sparse" که در آن ها اکثر درایه های ماتریس صفر هستند، محاسبات را تسریع می بخشد؛ در نتیجه پیچیدگی محاسبات را کاهش می دهد و زمان حل مسئله را بیش از ۹۰ درصد کاهش می دهد.

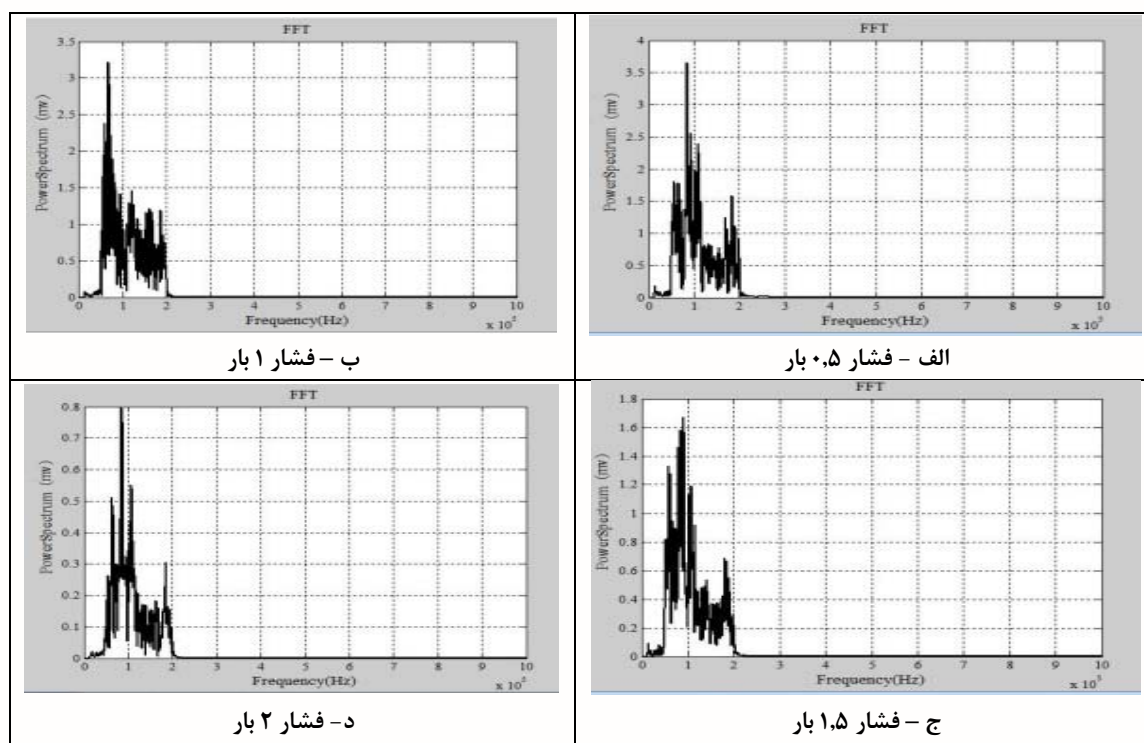
## مطالعه تجربی نشی مخزن کامپوزیت تحت فشار به روش نشرآوایی

ماده را نشان دهد. در ادامه داده ها به صورت تجمعی و به دست آمده از آزمون های انجام گرفته به تفکیک چهار مخزن آورده شده است.

داده های آکوستیک، کیفیت و سلامت سازه را بررسی می کنند و داده های مکانیکی برای بدست آوردن شاخص کمی در رفتار مواد بکار می رود؛ مطالعه رفتار ماده می تواند آسیب کامپوزیت در اثر بارگذاری های مختلف و استحکام



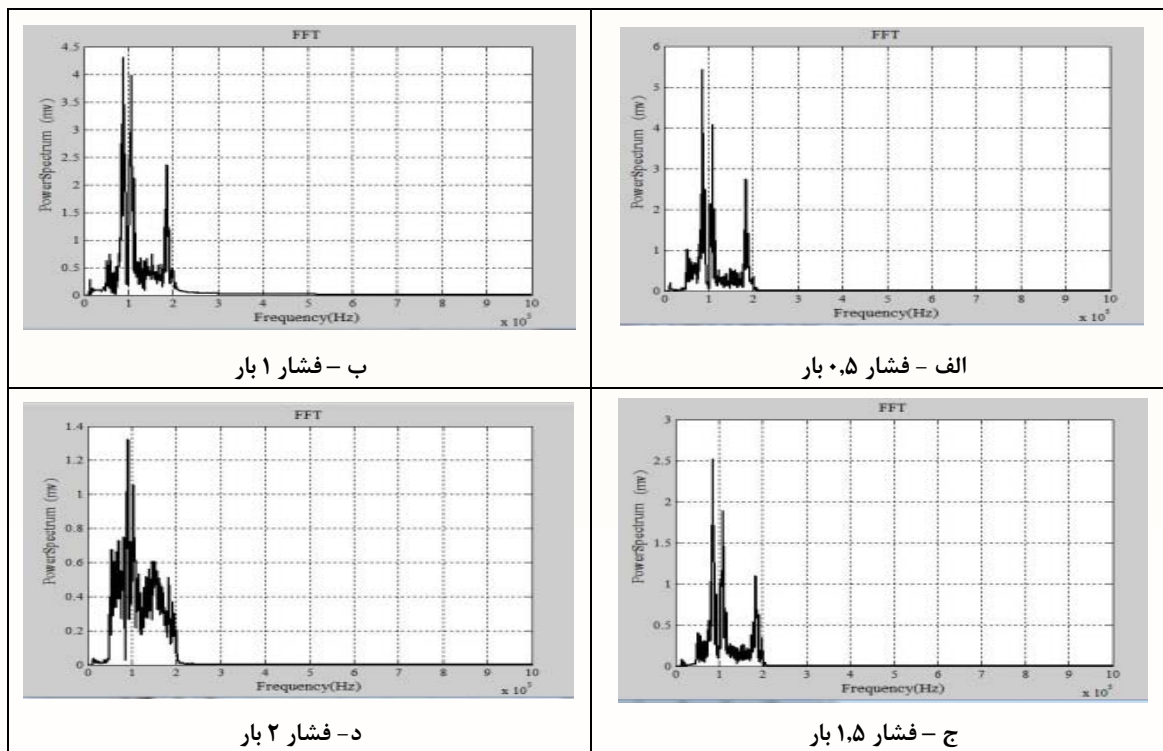
شکل ۷- تبدیل فوریه سریع برای مخزن بدون نشی



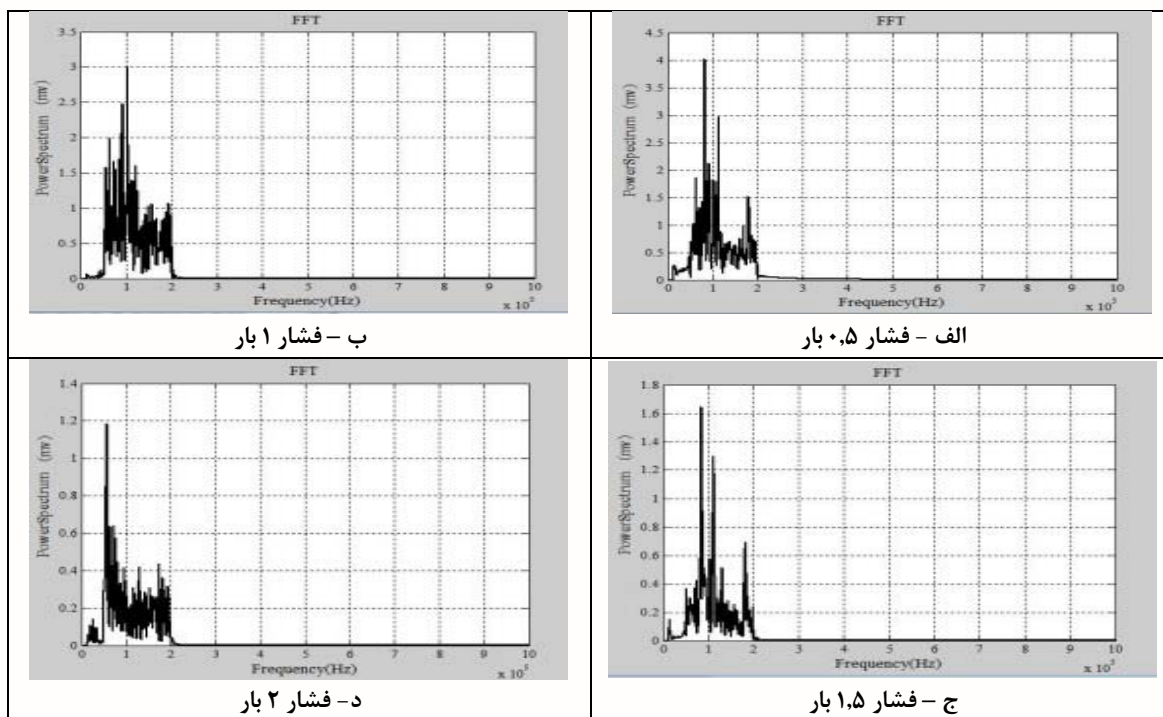
شکل ۸- تبدیل فوریه سریع برای مخزن با نشی ۰,۵ میلی متر



مطالعه تجربی نشی مخزن کامپوزیت تحت فشار به روش نشرآوایی



شکل ۹- تبدیل فوریه سریع برای مخزن با نشی ۱ میلی متر



شکل ۱۰- تبدیل فوریه سریع برای مخزن با نشی ۱,۵ میلی متر

پایین تری ثبت شده است. در حالت دارای نشی در ابتدا دامنه افزایش سپس کمی کاهش می یابد. بیشترین دامنه سیگنال ها در محدوده ۴۰ تا ۷۰ دسی بل و در مرحله

۳-۳- دامنه - زمان

نمودارهای دامنه - زمان برای چهار مخزن در شکل ۱۱ ارائه شده است. در حالت بدون نشی تقریباً دامنه های

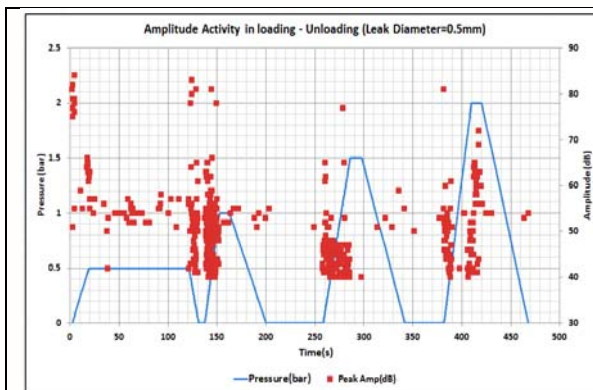
نشان از افزایش فشار و شروع تغییر شکل الاستیک دارد (مخزن چهارم افزایش نسبی مشاهده شد). بدیهی افزایش فشار از حد فشار اعمالی و در محدوده بالای ۵ بار وقایع بیشتر ناشی از تغییر شکل را می تواند نشان دهد.

### ۳-۴- فرکانس - زمان

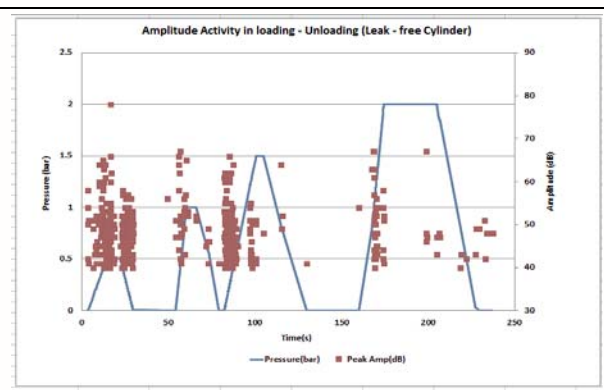
خروجی نمودار فرکانس دامنه که در شکل ۱۲ ارائه شده است مشابه با خروجی های دامنه - زمان می باشد. فرکانس های بالای ۱۶۰ کیلوهرتز که در حالت دارای نشی و به ویژه در فشارهای بالاتر (برای مخزن چهارم)، دلیل افزایش داده ها و ثبت فرکانس های بالاتر در این تست می باشد.

بارگذاری به مراتب بیشتر از مرحله تخلیه بار بوده است. تعداد دامنه ها در نشی قطر ۱,۵ میلی متر زیاد است. در مرحله تخلیه بار و حالت بدون نشی با افزایش فشار دامنه بالاتر می رود ولی در حالت دارای نشی با افزایش فشار دامنه کاهش می یابد. در حالت تخلیه بار دامنه ها به مراتب کمتر هستند. با تغییر محل حس گرها و نزدیک شدن به محل نشی، وضعیت تغییرات دامنه تفاوت نداشته اما حد بالای دامنه ها بیشتر از حالت حسگرهای دور از محل نشی ثبت شده است.

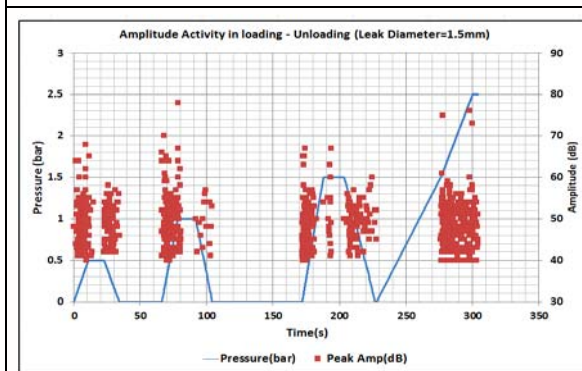
نتیجه اینکه دامنه های بالای ۷۰ دسیبل در مخزن معیوب دیده شده که به معنای شناسایی نشی و تشخیص شروع عیب می باشد. همچنین افزایشی شدن تعداد دامنه ها



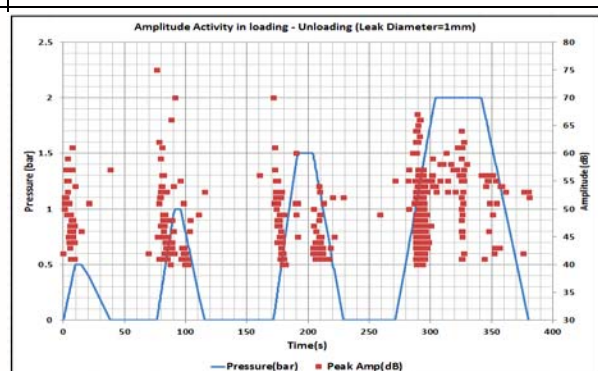
ب - مخزن با سوراخ قطر ۰,۵ میلیمتر



الف - مخزن سالم و بدون نشی

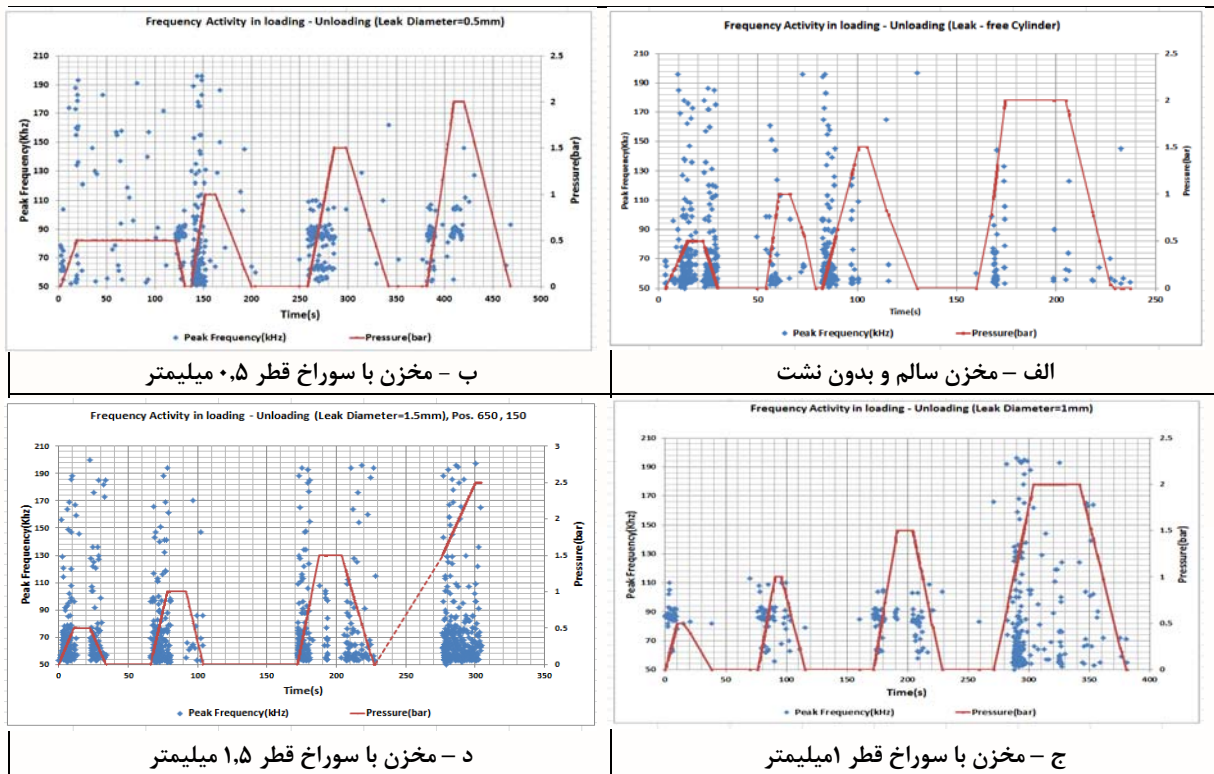


د - مخزن با سوراخ قطر ۱,۵ میلیمتر



ج - مخزن با سوراخ قطر ۱ میلیمتر

شکل ۱۱- نمودارهای دامنه - زمان برای چهار مخزن



شکل ۱۲- نمودارهای فرکانس - زمان برای چهار مخزن

نمودارهای انرژی آکوستیکی روش مناسبی برای رصد شروع عیب می باشد. در شکل ۱۴ نمودارهای انرژی - دامنه برای هر چهار مخزن آورده شده است؛ در اینجا به برخی نتایج مربوط به نمودارهای انرژی - زمان می پردازیم.

با افزایش فشار، انرژی ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد (کمترین اعداد را در فشار ۱ بار می بینیم). در حالت دارای نشی نسبت به حالت بدون نشی (بدون سوراخ) انرژی بیشتر است. در حالت بدون نشی انرژی در مرحله تخلیه بار بیشتر است ولی در حالت دارای نشی انرژی در مرحله بارگذاری بیشتر است. با جابجایی محل نصب حس گرهای آکوستیک، مقدار انرژی با نزدیک شدن حس گرها به محل نشی افزایش داشته است.

نتیجه اینکه دلیل افزایش دامنه انرژی و پیک در فشار ۱ بار در مخزن اول شروع تغییرشکل الاستیک ماده است در حالی که پیک انرژی در مخزن دو با شروع نشی هم خوانی دارد و این به معنای پتانسیل و قابلیت شناسایی و تشخیص عیب در روش آکوستیک و از طریق پایش وقایع آکوستیک و بررسی ماکزیمم انرژی و پیک های نمودار انرژی آکوستیکی می باشد.

### ۳-۵- تعداد سیگنال ها

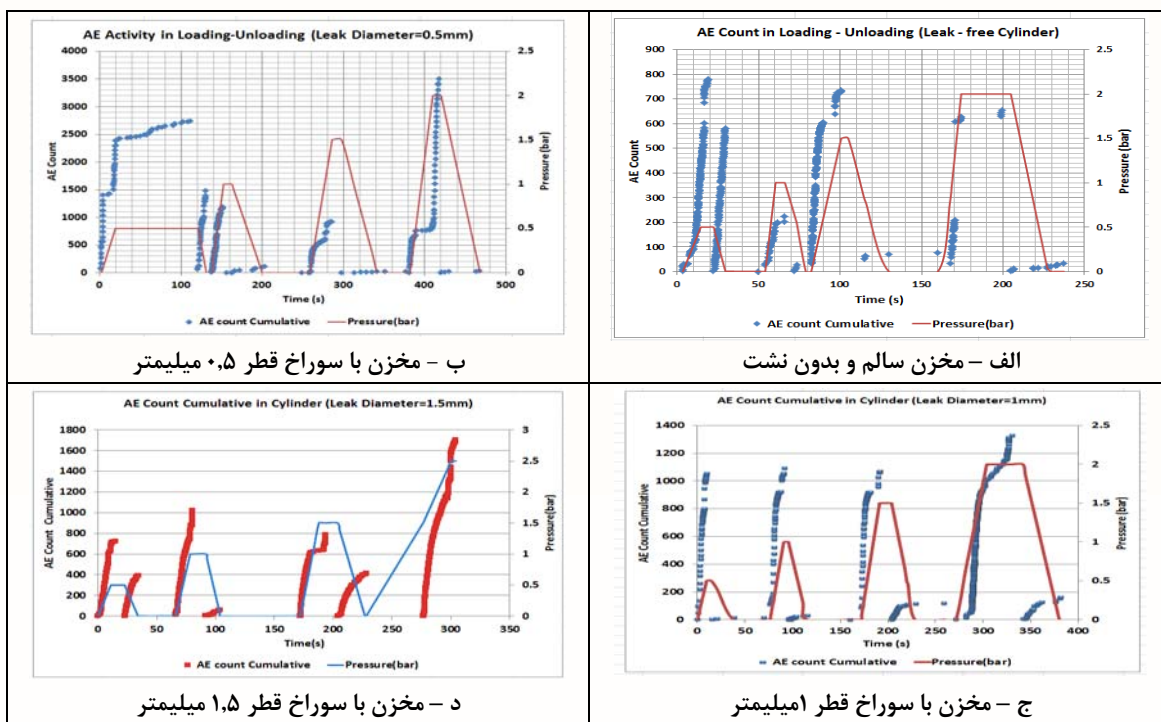
در شکل ۱۳ نمودار داده های تعداد سیگنال ارائه شده است؛ برخی نتایج بررسی و مقایسه داده های AE Count در زیر ارائه شده است:

در حالت بدون نشی با افزایش فشار تا ۱,۵ بار تعداد سیگنال ها افزایش می یابد و در حالت تخلیه بار با افزایش فشار تعداد سیگنال ها کاهش می یابد و بعد از فشار ۱,۵ بار معکوس می شود. تعداد سیگنال ها در نشی قطر ۰,۵ نسبت به بدون نشی افزایش می یابد و در نشی های بالاتر کاهش می یابد. با افزایش فشار در حالت دارای نشی تعداد سیگنال ها کاهش می یابد. تعداد سیگنال ها در حالت تخلیه بار با افزایش قطر نشی افزایش می یابد و با افزایش فشار نیز افزایش می یابد که این افزایش در وضعیت حس گرهای نزدیک تر بیشتر و تشدید شده است. نتیجه اینکه تعداد سیگنال ها با شروع نشی افزایش می یابد و این به معنای شناسایی عیب توسط نشر آوایی و مشاهده وقایع جدید است.

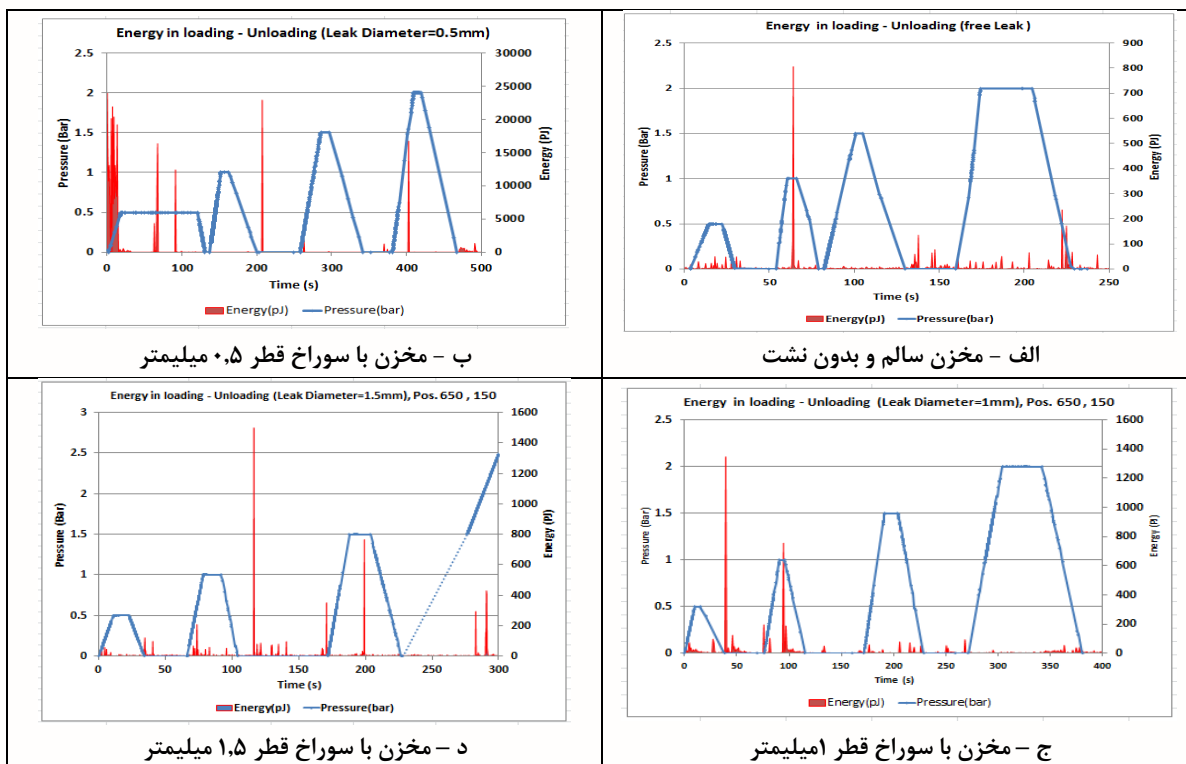
### ۳-۶- انرژی - زمان

بررسی ها نشان دهنده آن است که روش نشر آوایی و

مطالعه تجربی نشی مخزن کامپوزیت تحت فشار به روش نشر آوایی



شکل ۱۳- نمودارهای تعداد سیگنال ها برای چهار مخزن

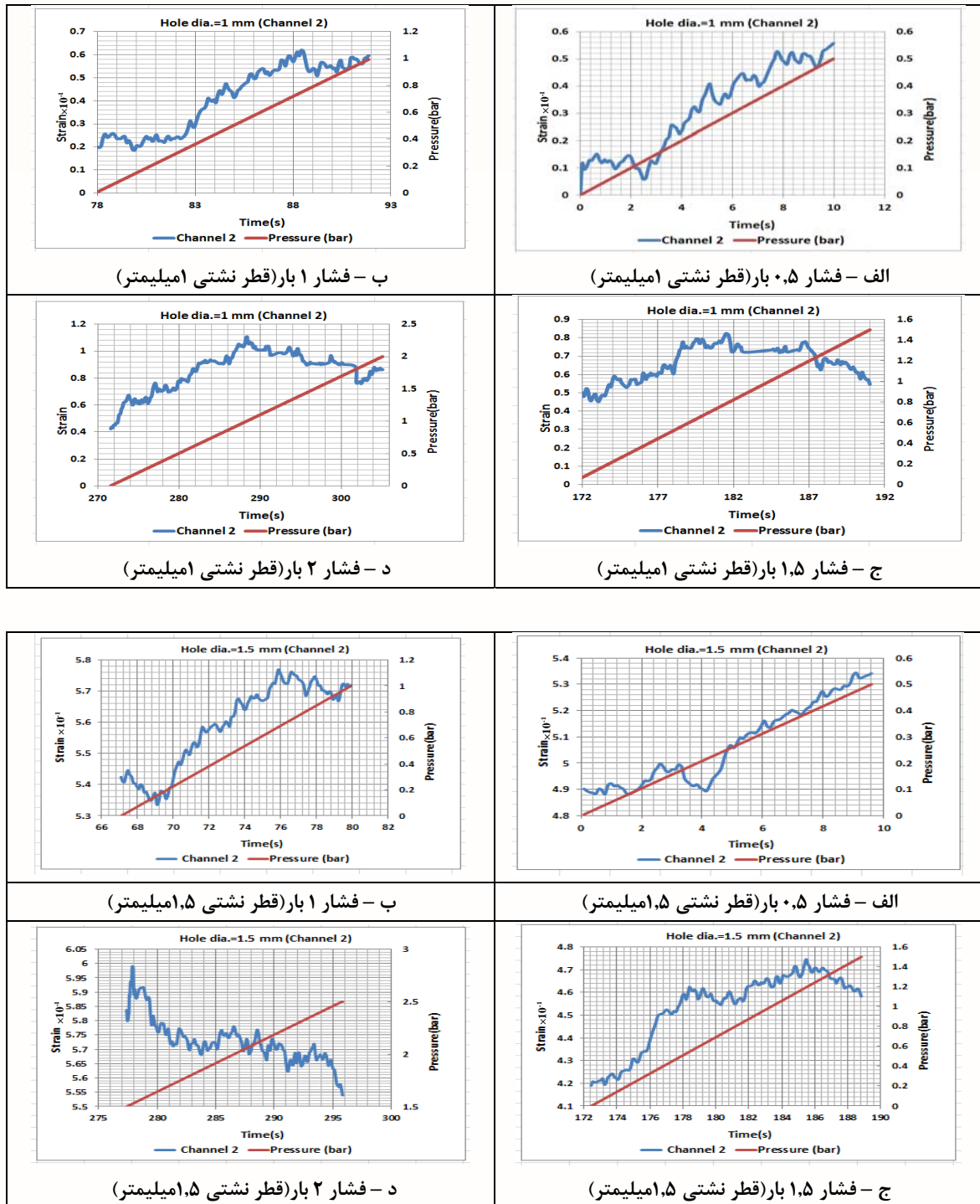


شکل ۱۴- نمودارهای انرژی - دامنه برای چهار مخزن

نتایج پردازش داده های کرنش سنج به صورت تجمعی در هر حس گر (کانال ۲ و ۳ و ۴) برای آزمون های بارگذاری و تخلیه بار ۰,۵ تا ۲ بار و در هر چهار مخزن سالم، دارای نشی قطر ۰,۵، ۱، ۱,۵ میلی متر در شکل ۱۶ آورده شده است.

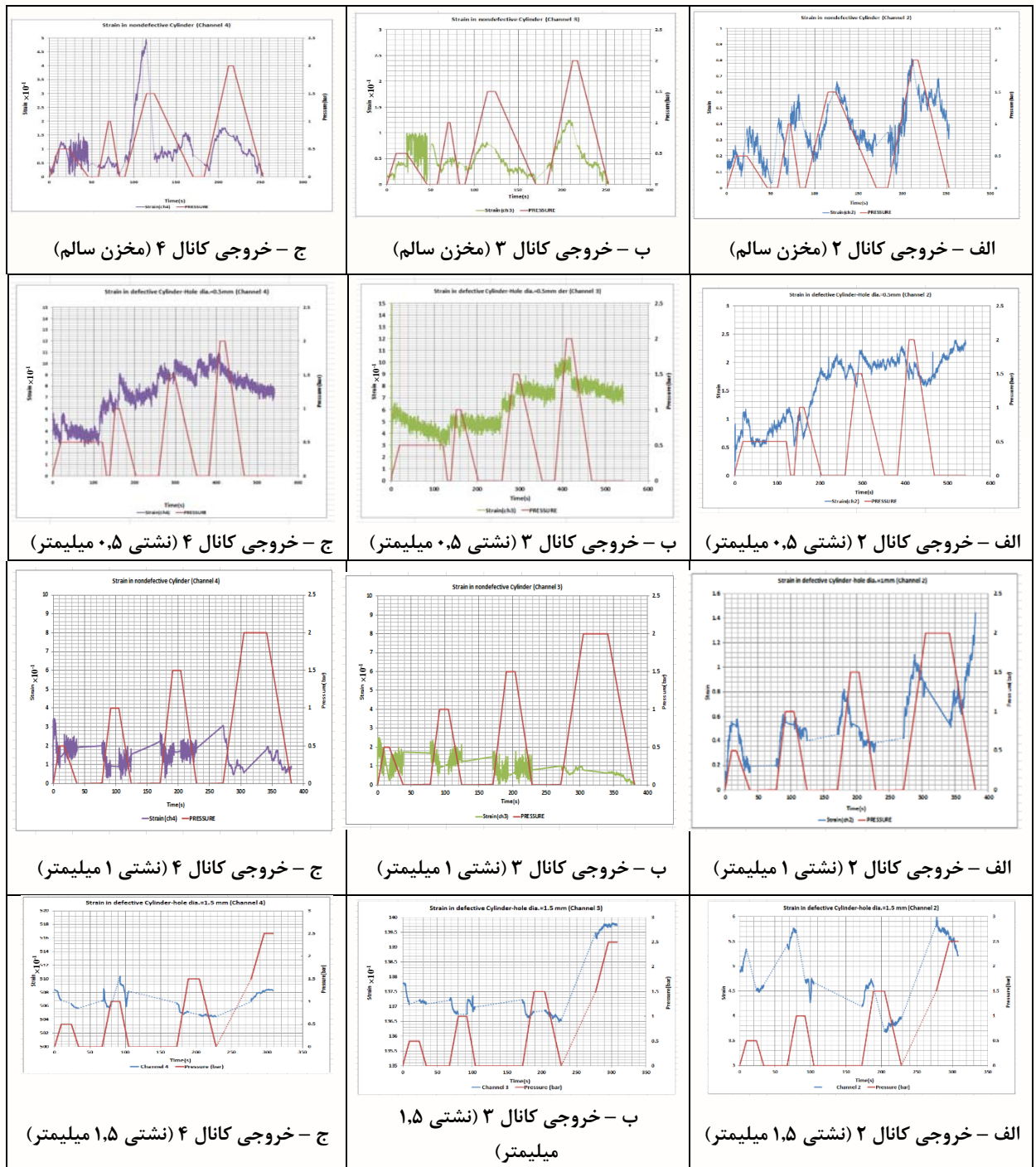
### ۷-۳- کرنش - زمان

شکل سیگنال ها و داده های به دست آمده از خروجی حس گر شماره ۲ کرنش سنج برای مخزن با سوراخ ۱ و ۱,۵ میلی متر در شکل ۱۵ آورده شده است.



شکل ۱۵- نمودارهای کرنش - زمان (بارگذاری فشار ۰,۵ تا ۲ بار)؛ مخزن با نشی قطر ۱ و ۱,۵ میلی متر

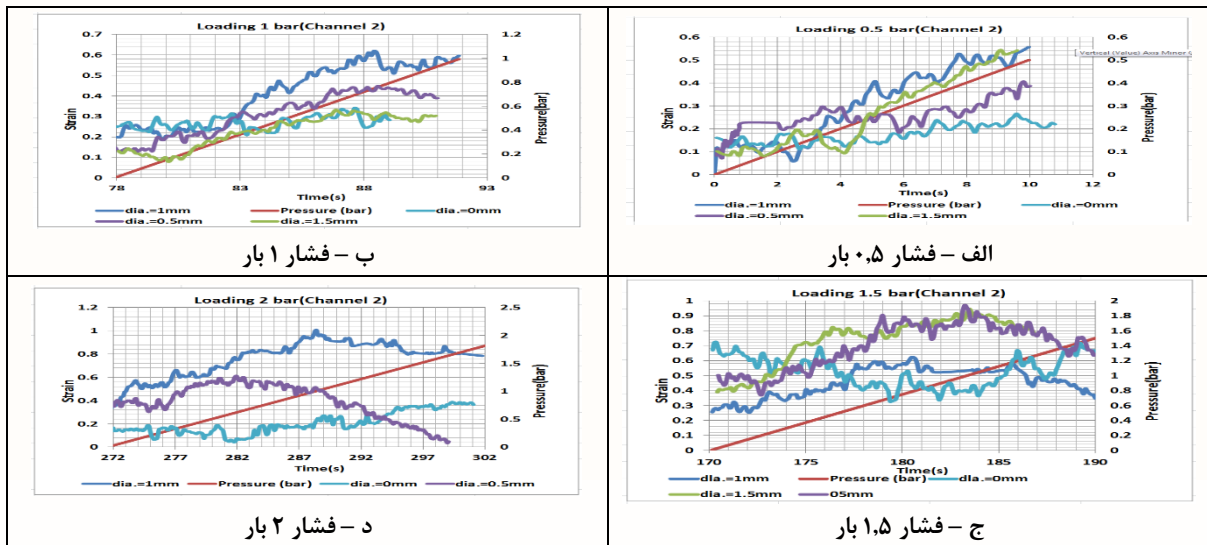
مطالعه تجربی نشئی مخزن کامپوزیت تحت فشار به روش نشر آوایی



شکل ۱۶- نمودارهای خروجی کرنش سنج کانال ۲ و ۳

خطی نیست و تقریباً در یک بازه ثابت و تغییرات کاهشی قرار می گیرد. نتیجه اینکه شروع تغییر شکل الاستیک - پلاستیک در فشارهای بالاتر بوده و با افزایش کرنش (جابجایی) انتظار می رود که توسط کرنش سنج قابل تشخیص و پایش می باشد.

در شکل ۱۷ خروجی کانال ۲ برای هر چهار مخزن ارائه شده است؛ در کانال ۲ با افزایش فشار، به همان نسبت افزایش کرنش دیده می شود. افزایش کرنش در مخزن با سوراخ ۱ و ۱٫۵ میلی متر بیشتر بوده و در مخزن سالم و بدون نشئی در یک بازه تقریباً ثابتی بوده است. با افزایش فشار حدود ۲٫۵ بار و بیشتر از آن نسبت کرنش به فشار



شکل ۱۷: مقایسه خروجی کانال ۲ کرنش سنج در هر چهار مخزن

در این پژوهش تعریف تست ها بر اساس سه فاکتور فشار، قطر نشت و محل قرارگیری حس گر انجام و بررسی شده است.

در این پژوهش تعریف تست ها بر اساس سه فاکتور فشار، قطر نشت و محل قرارگیری حس گر انجام و بررسی شده است.

### ۳-۸- فاکتور فشار

تست های انجام گرفته بر روی این مخزن با اعمال و بارگذاری فشار ۰.۵، ۱، ۱.۵، ۲ بار بوده و نمودارهای خروجی حاصل بر اساس فشارهای مختلف بررسی شده است. مشاهده شد در خروجی ثبت شده کرنش سنج با افزایش فشار مقدار کرنش افزایش می یابد. تعداد تجمعی سیگنال ها در مخزن دارای نشتی افزایش می یابد ولی در مخزن سالم فعالیت کمی مشاهده می شود. فعالیت فرکانس در مخزن دارای نشتی با افزایش فشار افزایش می یابد ولی در مخزن سالم فعالیت کمتری دیده می شود. فعالیت دامنه سیگنال ها در مخزن دارای نشتی، بیشتر از مخزن سالم است.

### ۳-۹- فاکتور نشتی

نشتی های اعمال شده در مخزن به قطرهای ۰.۵، ۱، ۱.۵ میلی متر بوده و به عنوان یک فاکتور برای مقایسه نتایج در نظر گرفته شده است. گرچه فعالیت دامنه در مخزن معیوب نسبت به مخزن سالم بیشتر است ولی بیشترین اندازه دامنه در قطر نشتی کوچک، ماکزیمم اندازه بوده است. تعداد و پیک فرکانس ها نیز مشابه با دامنه سیگنال های آکوستیک

### ۳-۱۰- فاکتور محل نصب حس گرها

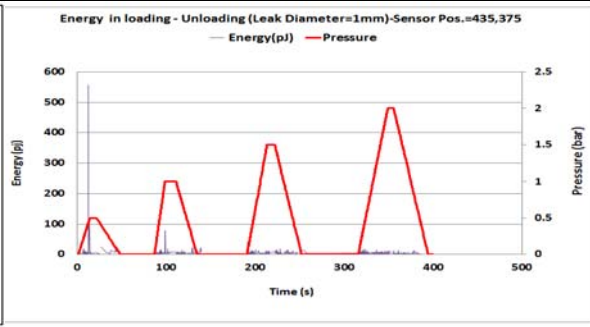
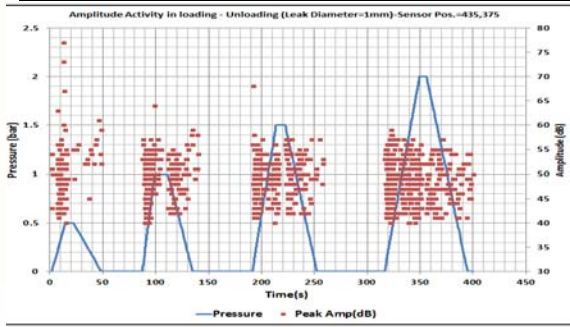
با جایجایی محل نصب حس گرهای آکوستیک از نقاط ۱۵۰ و ۶۵۰ میلی متر به نقاط ۳۷۵ و ۴۳۵ میلی متر، داده های به دست آمده از آزمون های هر دو را باهم مقایسه کردیم. تست های تکرار شده در هر دو فاصله برای قطر نشتی ۱ و ۱.۵ میلی متر تعریف شده و نمودار وقایع آکوستیک و نتایج آن در شکل های ۱۸ تا ۲۱ آورده شده است.

در مخزن با نشتی ۱ میلی متر نتایج زیر مشاهده شد: دامنه صوت در محل نزدیک تر غالباً زیر ۶۰ دسی بل بوده است و فعالیت دامنه بیشتر و متمرکزتر است. فعالیت فرکانس در محل نزدیک تر بیشتر بوده و در محل دورتر تعداد کمتر و طیف آن غالباً زیر ۱۲۰ کیلوهرتز است. با نزدیک شدن حس گرها به محل نشتی اندازه پیک و تعداد پیک های انرژی کاهش پیدا کرده است. (در محل نزدیک ۵۴۴ و در محل دورتر ۱۳۴۶ پیکوژول ثبت شده است).

در مخزن با نشتی ۱.۵ میلی متر نتایج زیر مشاهده شد: دامنه صوت در محل نزدیک تر غالباً زیر ۵۵ دسی بل بوده است و فعالیت دامنه بیشتر و متمرکزتر است.

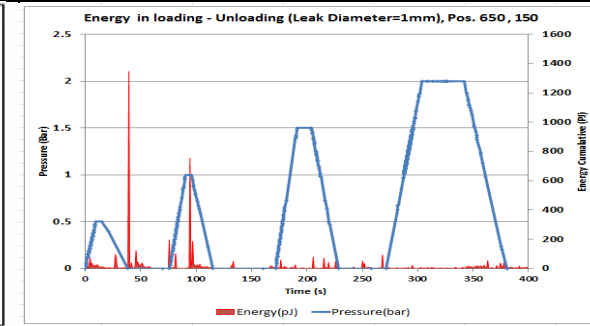
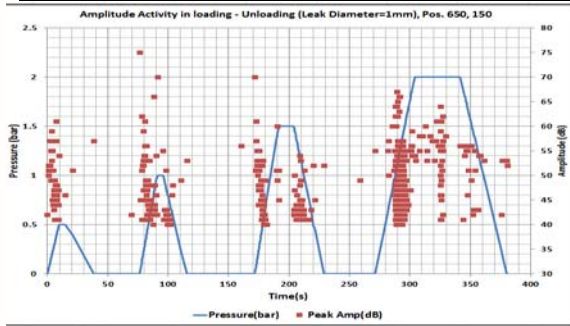
پیدا کرده است (پیک انرژی در محل نزدیک ۵۶۰ پیکوژول در محل دورتر ۱۴۹۹ پیکوژول ثبت شده است). با جابجایی حس گرها و نزدیک شدن آن ها تعداد سیگنال ها به خصوص در حالت تخلیه بار افزایش قابل توجهی دارد.

فرکانس در محل نزدیک تر بیشتر بوده و غالباً زیر ۹۰ کیلوهرتز و در محل دورتر تعداد کمتر و طیف آن غالباً زیر ۱۲۰ کیلوهرتز است. با نزدیک شدن حس گرها به محل نشی بزرگ ترین پیک و تعداد پیک های انرژی کاهش



ب- نمودار دامنه - زمان ( محل نصب سنسورها ۳۷۵ و ۴۳۵)

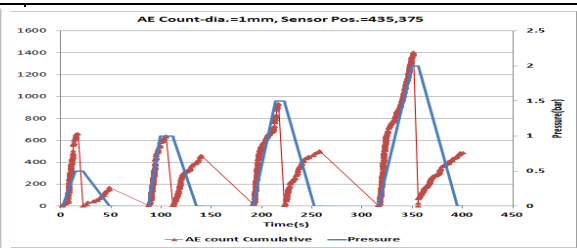
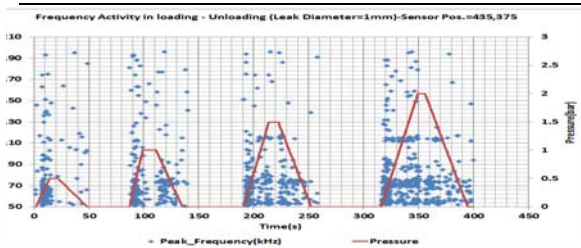
الف - نمودار انرژی - زمان ( محل نصب سنسورها ۳۷۵ و ۴۳۵)



د - نمودار دامنه - زمان ( محل نصب سنسورها ۱۵۰ و ۶۵۰)

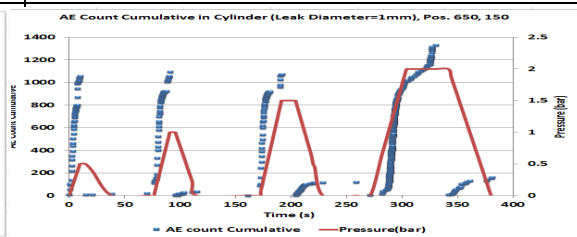
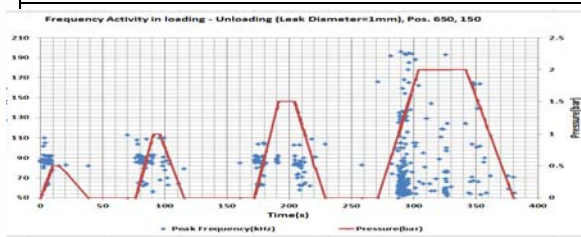
ج - نمودار انرژی - زمان ( محل نصب سنسورها ۱۵۰ و ۶۵۰)

شکل ۱۸- نمودارهای انرژی-زمان و دامنه-زمان (نشی ۱ میلی متر)



ب- نمودار فرکانس - زمان ( محل نصب سنسورها ۳۷۵ و ۴۳۵)

الف - نمودار تعداد تجمعی سیگنالها - زمان ( محل سنسورها ۳۷۵ و ۴۳۵)

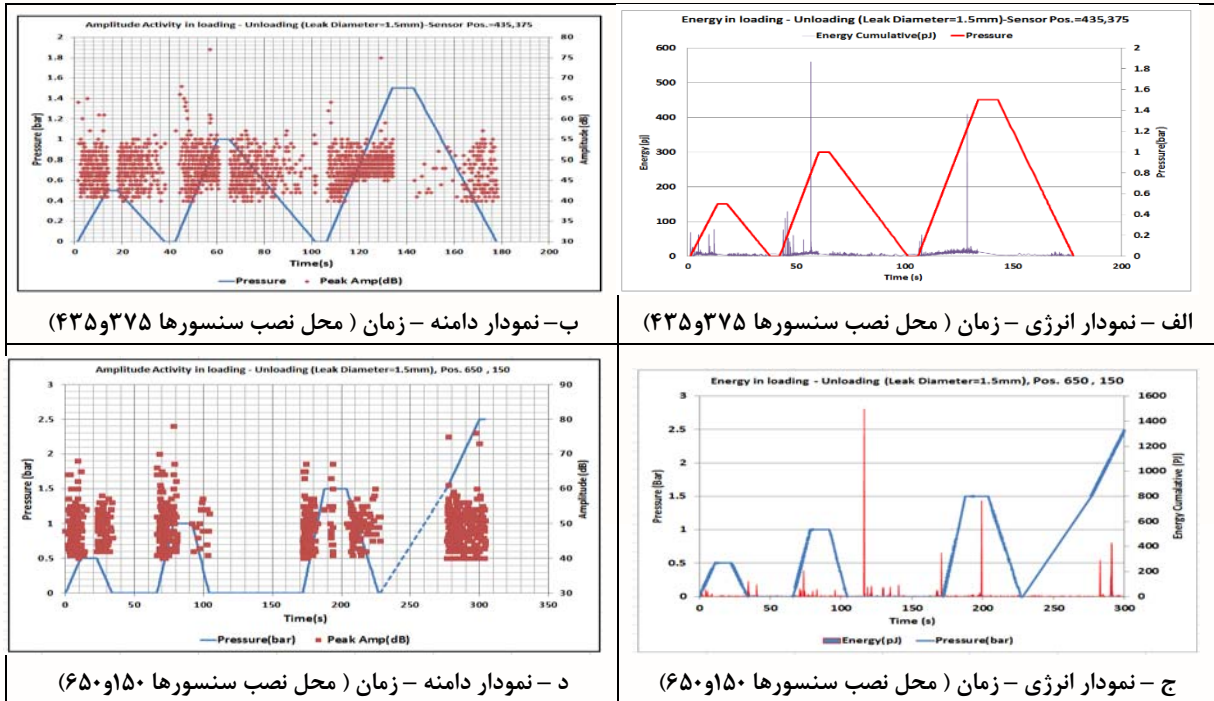


د - نمودار فرکانس - زمان ( محل نصب سنسورها ۱۵۰ و ۶۵۰)

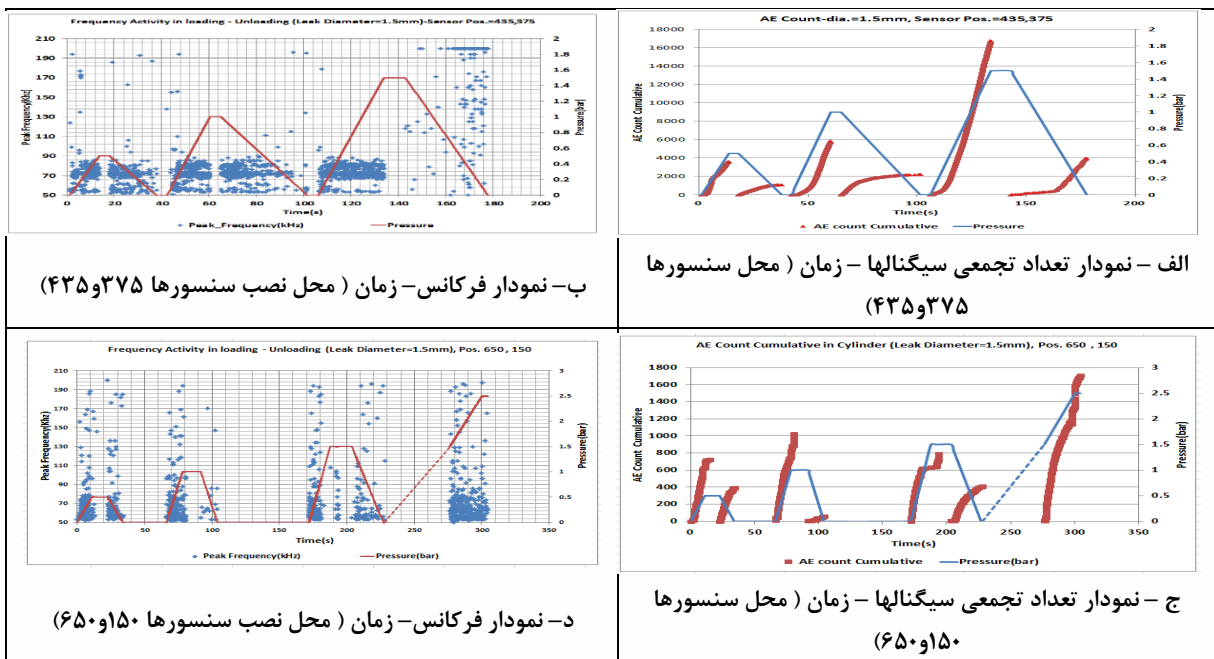
ج - نمودار تعداد تجمعی سیگنالها - زمان ( محل سنسورها ۱۵۰ و ۶۵۰)

شکل ۱۹- نمودارهای فرکانس-زمان و تعداد تجمعی سیگنالها- زمان (نشی ۱)





شکل ۲۰- نمودارهای انرژی- زمان و دامنه- زمان (نشی ۱,۵ میلی متر)



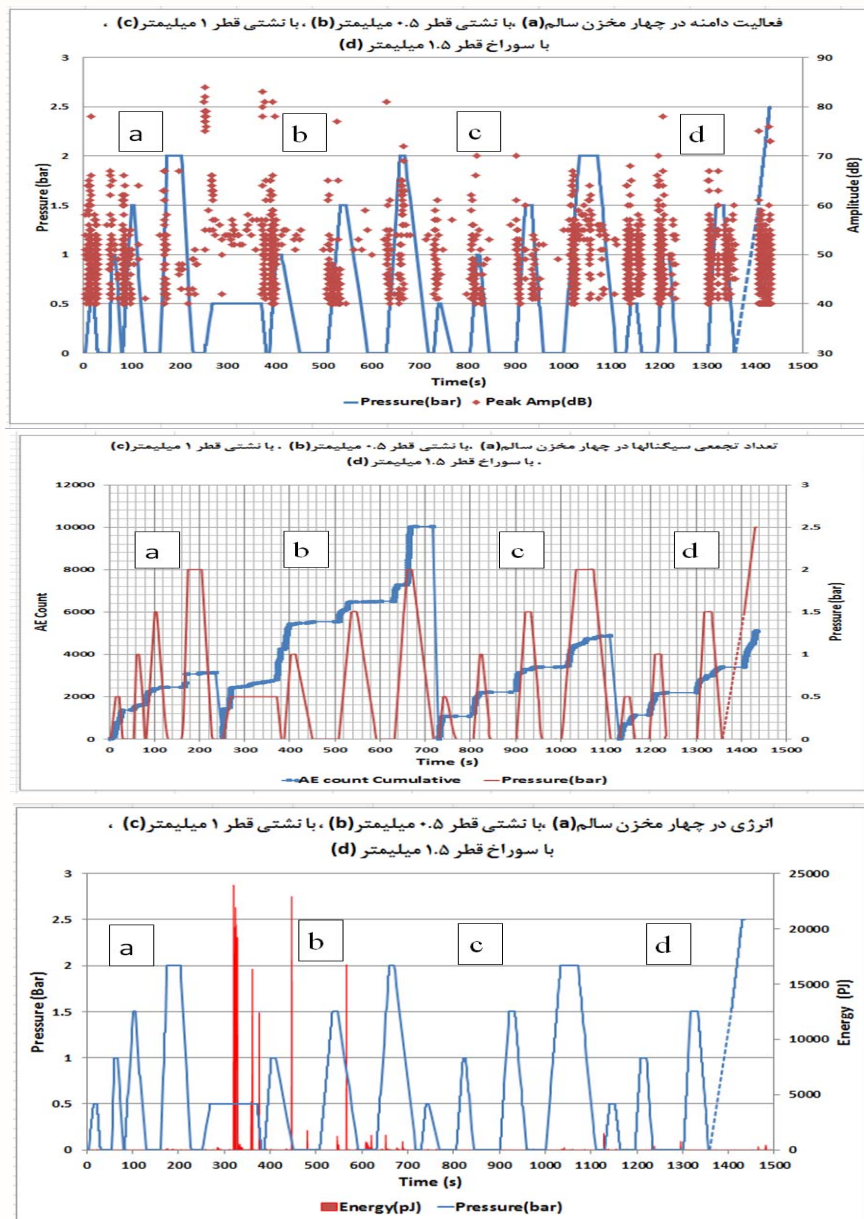
شکل ۲۱- نمودارهای فرکانس- زمان و تعداد تجمعی سیگنالها- زمان (نشی ۱,۵)

در شکل ۲۲ نتایج به دست آمده از مطالعه و مقایسه داده ها به صورت ترکیبی و تجمعی آورده شده است. بیشترین سیگنال های ثبت شده در زمان شروع نشی (سوراخ به قطر ۰,۵ میلی متر) برای مخزن با ثبت شده است که به طور تجمعی ۱۰۰۳۰ سیگنال آکوستیک دارد؛

نتیجه اینکه بیشترین وقایع ثبت شده نزدیک به سر مخزن می تواند ناشی از تغییر شکل الاستیک در این نقاط از مخزن باشد که در ادامه و در فشارهای بالاتر و شروع تغییر شکل الاستیک - پلاستیک و یا عیوب ترک و رشد ترک نیاز به پایش و کنترل دارد.

و ۱۴۹۸ پیکوژول می باشد. نتیجه اینکه واضح است مخزن b که شروع عیب نشی را در آن نشانه گذاری کرده ایم در داده های تجمعی (تعداد سیگنال ها و انرژی و دامنه) قابل شناسایی و پایش است و با توجه به اینکه عیب دیگری در ادامه تست ها و در مخازن c,d ایجاد نشده است سطح انرژی و سیگنال ها کاهش می یابد؛ لذا از این ویژگی می توان برای اهداف پایش مخزن تا زمان پدید آمدن عیوب دیگر استفاده کرد.

در مقابل کمترین سیگنال ها برای مخزن سالم ثبت شده است که به طور تجمعی ۳۱۳۲ سیگنال داشته است. مخزن c,d به ترتیب ۴۸۸۹ و ۵۰۹۹ سیگنال ثبت کرده اند. دامنه بالای ۷۰ دسی بل برای مخزن b بیشترین دامنه ثبت شده است. میانگین دامنه در مخزن b به مقدار ۵۰ دسی بل و در سایر مخازن ۴۸ دسی بل است. بیشترین سطح انرژی برای مخزن b به مقدار ۲۳۹۶۴ پیکوژول و بیشترین انرژی برای مخزن a به مقدار ۸۰۶ پیکوژول ثبت شده است. پیک انرژی در مخزن c,d هم به ترتیب ۱۳۴۶



شکل ۲۲- مقایسه سیگنال ها، دامنه و انرژی (تجمعی) برای هر چهار مخزن (a,b,c,d) و برای آزمایش های مختلف

## ۴- نتیجه گیری

نتایج خروجی آزمون‌ها برای مقایسه با نتایج شبیه سازی بررسی شد. در حالت کلی مطالعه یک مخزن تحت فشار حین بارگذاری با نشر آوایی با یک مشکل عمده مواجه است که عبارت است از تداخل سیگنال‌های ناشی از جریان سیال به داخل مخزن با سیگنال‌های مربوط به فرایند‌های خرابی سازه، سیگنال‌های ناشی از جریان سیال عمدتاً ناشی از میدان‌های تنش و کرنش موضعی دیواره مخزن و مجاری انتقال سیال بوده و فاقد اطلاعات مفید است؛ بنابراین سعی می‌شود از به وجود آمدن آن‌ها جلوگیری گردد. بدین منظور نرخ پر کردن مخزن تا حدی پایین آورده شد (حدود یک بار بر دقیقه) و همچنین سعی شده از ایجاد شوک و ضربه در هنگام آزمون خودداری شود تا امکان ردیابی سیگنال‌های مربوط به نشتی وجود داشته باشد. با افزایش فشار منابع تولید نشر آوایی در مخزن معیوب نسبت به مخزن سالم فعالیت بارز بیشتری را از خود نشان می‌دهند. لذا از این جهت تشخیص نشتی امکان پذیر بوده و این روش به خوبی پاسخگوی نیازهای بازرسی مخازن است. به طور کلی منابع بالقوه در بازرسی مخازن معیوب می‌تواند تغییر شکل پلاستیک دیواره مخزن، تشکیل و رشد ترک‌ها و حفره‌ها و نشتی سیال باشد.

در این بخش خلاصه نتایج پژوهش ارائه شده است. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل رفتار مخزن تحت فشار به روش تجربی و بررسی قابلیت این روش در ردیابی و شناسایی عیوب مخازن است. بدین صورت به کمک سیگنال‌ها و داده‌های حاصل از آزمون تجربی که با نصب کرنش سنج و حس گرهای نشر آوایی بر روی مخزن FRP انجام گرفته و نتایج آن را به منظور صحت سنجی نتایج آزمون عملی با یکدیگر مقایسه کردیم.

کاربرد و خروجی این مطالعه در کنترل و پایش مخازن در صنایع مختلف به جهت نگهداری و تعمیرات به موقع، جلوگیری از گسترش عیوب و نهایتاً جلوگیری از ایجاد خسارات سنگین دارای اهمیت زیادی است. مخازن نگهداری مواد شیمیایی و سوخت در حین کارکرد و در طول سرویس دهی خود ممکن است دچار عیوبی از جمله نشتی شوند که عدم پایش و تشخیص به موقع آن خسارات جانی و مالی بسیار زیادی را بر جا می‌گذارد. عیوب می‌تواند به دلایل مختلفی پدید آیند. با صرف نظر کردن از نواقص و

خطاهای ناشی از روش ساخت، مواد و نحوه نگهداری مخازن بر اثر فشارهای داخلی و خستگی و محیط کاری به وجود آمدن این عیوب ناگریز هستند. نتایج و نکات به دست آمده از این مطالعه به طور کلی شامل موارد زیر است:

۱- بر اساس حجم و مشخصات سیگنال‌ها و داده‌های به دست آمده مشاهده شد که فعالیت نشر آوایی در مخزن سالم در مقایسه با مخزن معیوب بسیار کمتر است. معمولاً افزایش فعالیت سیگنال در شروع نشتی قابل توجه بوده و عیب نشتی قابل تشخیص است.

۲- در پاسخ به سؤال اصلی پژوهش می‌توان گفت مخزن کامپوزیتی مورد مطالعه در فشارهای کمتر از ۲ بار در محدوده ایمن قرار دارد و نشتی‌های مخزن یادشده با سوراخ‌های تا ۲ میلی‌متر خطرات تغییر شکل پلاستیک و متعاقباً گسترش عیب را ندارد و در صورت دارا بودن سایر شرایط کارکردی نیاز به پایش و ارزیابی ندارد تا جایی که در فشارهای بالای ۵ بار تغییرات کرنش از فاز خطی خارج می‌شود و در فشارهای خیلی بالاتر سایر فرایندهای خرابی از جمله تغییر شکل الاستیک-پلاستیک، رشد ترک ماتریس و غیره نیز بر سیگنال‌ها افزوده شده و می‌بایست مورد مطالعه قرار گیرد و این موضوع به معنای الزام پایش مخزن در فشارهای بالاتر است.

۳- به کمک روش‌های پردازش سیگنال‌های نشر آوایی می‌توان نوع فرایند خرابی از جمله نشتی را در هر لحظه از بارگذاری و یا حین سرویس دهی آن تشخیص داد.

## ۵- منابع

- [1] H. Heidary, The Study on Pressure Corrosion by Acoustic Emission Method, Master Thesis, Amirkabir University of Technology, 2008. (in Persian).
- [2] C. B. Scruby, H. N. G. Wadley, An Assessment of Acoustic Emission for Nuclear Pressure Vessel Monitoring, 1979.
- [3] C. Le Floch, Acoustic Emission Monitoring of Composite High-Pressure Fluid Storage Tanks, 1986.
- [4] A. Ahmadi, Simulation of Acoustic Emission Waves Caused by Leakage, Master Thesis, Amirkabir University of Technology, 2008. (in Persian).
- [5] A. G. Beattie, Acoustic Emission Monitoring of a High Pressure Test of a Steel Reactor Containment Vessel Model, 2003.
- [6] J. Boshe, G. W. Mair, P. Novak, Acoustic Emission Testing of High-Pressure Composite Cylinders, 2006, Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.13-14.267.
- [7] M. R. Boroomand, N. Safar Razavi, A. Eshghi, Investigation of leak detection systems for saltwater

[11] J. Teimory, A. Ebrahimian, A. Najafabadi, Acoustic Emission: The Tool for Monitoring the Condition of Pressure Vessels, 8th Condition Monitoring & Fault Diagnosis Conference, Sharif University of Technology, 2014. (in Persian).

transmission lines, Journal of Applied Research in Water and Wastewater, Vol. 8, No. 2, pp. 107-112, 2021.

[8] J. Andreas Brunner, M. Barbezat, Acoustic Emission Leak Testing of Pipes for Pressurized Gas Using Active Fiber Composite Elements as Sensors ", 2007.

[9] J. Andreas Brunner, M. Barbezat, Acoustic Emission Leak Testing of Pipes for Pressurized Gas Using Active Fiber Composite Elements as Sensors ", 2007.

[10] H. Zhaohui, L. Hongjun, W. Rongguo, HeXiaodong, MaLi, The Study on Buckling Deformation of Composite Pressure Vessel Based on Acoustic Emission Signals, 2010, Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.87-88.445.