



Review Article



DOI: 10.22034/farayandno.2024.2019853.1948



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Simulation of Spherical Vessels for Identifying Crack-Induced Failures

Mohammad Javad Khoshgoftar^{1*}, Mohsen Ghasemipour², Reza Shafiei³

¹ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak

² Master of science Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak

³ Mechanical Engineering, Technical Inspection Department, Abadan Refinery, Abadan

Accepted: 20 May 2024 Received: 18 Dec 2023

Abstract

Pressure vessels play a crucial role in the oil, petrochemical, and power industries. Their maintenance, along with design and construction, is essential throughout their lifespan. This research examines a model of a cracked spherical pressure vessel using the finite element method. By modeling the fluid and considering the fluid-solid interaction, along with the wave propagation method, the position and dimensions of the crack are initially estimated. Based on the crack location and size, the stress distribution is determined. Four sensors identify the crack position, measuring 40 mm in length and 6 mm in depth, with a maximum stress of 367.5 MPa, exceeding the allowable limit. Identifying critical points around the crack, the geometric dimensions of the reinforcement should be chosen to ensure the highest safety factor. Additionally, the lifespan of these vessels can be predicted based on the damage assessment.

Keyword: Pressure Tanks, Spherical Tank, Crack Growth, Stress Analysis, Optimization

* m-khoshgoftar@araku.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Kjoshgoftar, M.J., Ghasemipour, M., Shafiei, R., "Simulation of Spherical Vessels for Identifying Crack-Induced Failures", Journal of Farayandno – Vol. 19 – No. 85, pp. 91-101, In Persian, (2024).



DOI: 10.22034/farayandno.2024.2019853.1948



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

شبیه‌سازی مخازن کروی با رویکرد شناسایی خرابی ناشی از ترک

محمد جواد خوش‌گفتار^{1*}، محسن قاسمی پور²، رضا شفیعی³

¹ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

² دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

³ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، اداره بازرسی فنی، پالایشگاه آبادان، آبادان

دریافت: 1402/09/27 پذیرش: 1403/02/31

چکیده

مخازن تحت فشار در صنایع نفت، پتروشیمی و نیروگاه‌ها نقش مهمی دارند. تعمیر و نگهداری از آنها علاوه بر طراحی و ساخت، در طول عمر آنها بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق، مدل یک مخزن کروی تحت فشار دارای ترک با استفاده از روش المان محدود بررسی شده است. با مدلسازی سیال و در نظر گرفتن برهم‌کنش بین سیال و جامد، همچنین روش انتشار امواج، ابتدا موقعیت و ابعاد ترک تخمین زده می‌شود. با توجه به محل و ابعاد ترک، نحوه توزیع تنش بدست خواهد آمد. با نصب چهار سنسور موقعیت ترک به ابعاد 40 و عمق 6 میلیمتر مشخص شده و تنش ماکزیمم اطراف آن 367/5 مگاپاسگال بوده که از حد مجاز بیشتر می‌باشد. با شناسایی نقاط بحرانی اطراف ترک، ابعاد هندسی تقویتی باید به گونه‌ای انتخاب شود که بیشترین ضریب اطمینان حاصل گردد. همچنین طول عمر این مخازن در اثر خرابی قابل پیش‌بینی خواهد بود.

کلمات کلیدی: مخازن تحت فشار، مخزن کروی، رشد ترک، تحلیل تنش، بهینه‌سازی

* m-khoshgoftar@araku.ac.ir

1- مقدمه

مخزن تحت فشار طبق استاندارد ASME SEC VIII به مخزنی گفته می‌شود که فشار طراحی داخل آن بیش از 15 psi و کمتر از 3000psi (تا 206 بار) باشد. این مخازن فلزی معمولاً استوانه‌ای، کروی و یا چنبره‌ای برای نگهداری و یا انجام فرآیندهای شیمیایی مایعات و یا گازها می‌باشند که توانایی مقاومت در برابر بارگذاری‌های مختلف (فشار داخلی، فشار خارجی و خلا در داخل) را دارا می‌باشند. استاندارد اصلی برای طراحی این مخازن ASME Section VIII می‌باشد که توسط انجمن مهندسیین مکانیک آمریکا تدوین شده و هر چهار سال یکبار مورد بازنگری قرار می‌گیرد. معیار تبعیت از این استاندارد بیشتر بودن فشار داخلی مخزن از 15 psi می‌باشد. کاربرد عمده‌ی این مخازن در صنایع نفت و گاز است [1]. برابین¹ و همکارانش در سال 2010 و در مقاله‌ای تحلیل المان محدود مخازن تحت فشار کروی دارای نامیزانی در مفاصل پیرامونی را مورد مطالعه خود قرار دادند [2]. رحمتی و همکارانش در سال 2010 و در مقاله‌ای طراحی بهینه‌ی چند مرحله‌ای مخازن تحت فشار استوانه‌ای با کلگی کروی کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند [3]. در این مقاله، طراحی بهینه یک مخزن تحت فشار مرکب در چند سطح بررسی شده است. ژائو جینگ زنگ و یینگ ژنگ مطابق نتایج آزمایشگاهی از اندازه‌گیری کرنشها بوسیله کرنش سنج روی دریچه بزرگ و خواص ماده در دمای متوسط، عمر شروع ترک خستگی و عمر رشد ترک در مخزن تحت فشار را در دمای کارکرد ارزیابی کردند [4]. نسبت به مخازن با هندسه‌های کروی و استوانه‌ای، مخازن تحت فشار با هندسه‌ی چنبره‌ای به عنوان هندسه‌ی جایگزین با وزن کمتر توسط لی² [5] و چن³ [6] پیشنهاد شده است. کوسایس⁴ و همکارانش مسیر بهینه‌ی فیبر کامپوزیتی را برای مخازن کامپوزیتی کروی دارای ترک با استفاده تئوری شبکه⁵ با فرض اینکه بارها تنها بر روی فیبرها اعمال می‌شوند، را مورد مطالعه قرار دادند [7]. جمع‌زاده و همکارانش قطعی از ورق مخازن تحت فشار دارای ترک را مورد مطالعه خود قرار دادند [8]. در این مقاله یک روش طراحی برای تعیین پارامترهای پیش‌در مخازن تحت فشار کروی مطرح می‌شود که بر اساس روش تئوری و عددی المان محدود می‌باشد. توتونکو و همکاران [9] تحلیل تنشی در مخزن کروی تحت بارهای مکانیکی را مورد بررسی قرار دادند. نبه و همکاران [10]، با استفاده از تحلیل‌های عددی و تئوری، تاثیر فشار خستگی بر رفتار ارتعاشی و شکست مخزن کروی تحت فشار را مورد بررسی قرار دادند. خروجی کار آن‌ها، نشان از افزایش احتمال بروز شکست در بارگذاری متناوب داشته است که با استفاده از پشت بندهایی داخل مخزن کروی این نقیصه جبران شده است.

شبیه‌سازی و ارزیابی مخازن کروی دارای ترک به منظور شناسایی مخاطرات احتمالی و توسعه سناریوهای مقابله با آن‌ها شامل روش‌های متعددی است. تحلیل المان محدود در مطالعه توزیع تنش در نزدیکی نقص‌ها بسیار مهم است [11]، در حالی که استفاده از انتگرال J و شبکه‌های عصبی مصنوعی به پیش‌بینی انتگرال سه‌بعدی J در ترک‌های سطحی مخازن تحت فشار کمک می‌کند [12]. علاوه بر این، بررسی نرخ رشد ترک خستگی و عوامل شدت تنش از طریق روش‌های تحلیلی و عددی برای ارزیابی قابلیت بهره‌برداری ضروری است، که بر اهمیت تحلیل‌های دقیق در

¹ Brabin

² Li

³ Chen

⁴ Koussios

⁵ Netting theory

پیش‌بینی ایمنی تأکید دارد [13]. همچنین، استفاده از روش‌های مبتنی بر ریسک، نمودارهای ارزیابی شکست و پارامترهای مکانیک شکست می‌تواند درک جامعی از یکپارچگی ساختاری و ارزیابی عمر مخازن تحت فشار فراهم کند و نقش‌های مهندسان و مدیران در این فرآیند را برجسته کند [14]. علاوه بر این، تحلیل مخازن کروی خودفرسوده با ترک‌های داخلی نشان‌دهنده فواید خودفرسودگی در کاهش عوامل شدت تنش و افزایش عمر خستگی است، که بر اهمیت در نظر گرفتن اثر باشینگر در شبیه‌سازی‌ها تأکید دارد [15].

برای شبیه‌سازی مخازن کروی تحت فشار و شناسایی مخاطرات احتمالی ناشی از ترک‌ها، در حالی که به بررسی سناریوهای مقابله می‌پردازیم، می‌توان از روش‌ها و ابزارهای مختلفی استفاده کرد. مطالعات بر اهمیت مدل‌سازی دقیق هندسی و تحلیل تنش به منظور تضمین یکپارچگی مخزن تأکید دارند [16]. تحلیل المان محدود (FEA) نقش مهمی در ارزیابی تغییر مکان‌ها، تنش‌ها و تغییرات ساختاری به منظور افزایش ایمنی ایفا می‌کند [17]. تحلیل مکانیک شکست، همراه با شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی-مکانیکی، به درک انتشار ترک و ریسک‌های یکپارچگی کمک می‌کند [18]. علاوه بر این، استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی (CFD) می‌تواند بینش‌هایی در مورد افزایش فشار در معرض آتش‌سوزی فراهم کند و در مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی واکنش اضطراری مفید باشد [19]. تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند درک بهتری از رفتار مخزن تحت شرایط پیچیده فراهم کند و بر انتخاب مواد با چقرمگی شکست بالا و کنترل دقیق اندازه ترک‌ها به منظور بهبود ایمنی و عمر مفید تأکید دارد [20].

در این تحقیق به مدل‌سازی مخزن کروی دارای ترک به منظور شناسایی مکان رخداد آن پرداخته می‌شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی استفاده از روش‌های عددی برای بررسی محل وقوع ترک به منظور تحلیل طول عمر مخازن تحت فشار کروی دارای ترک و تنش‌های ناشی از بروز ترک در مخزن به منظور ارائه راهکار برای مخزن می‌باشد.

2- مدل سازی

در این تحقیق از مدل یکنواخت اویلرین مولتی‌فیز⁶ برای شبیه‌سازی فرایند تغییر فاز پس از نشت گاز مایع (LNG) استفاده شد. مدل اویلرین جزء پیچیده ترین روش‌های شبیه‌سازی جریان‌های دو و چند فازی در انسیس فلوئنت می‌باشد. مدل قابل تحقق $k-\epsilon$ دقت بیشتری در توزیع غلظت نسبت به مدل $k-\epsilon$ استاندارد داشت و با شبیه‌سازی آزمایش میدان انتشار گاز سنگین به خوبی اعتبارسنجی شده است. به همین دلیل، مدل قابل تحقق $k-\epsilon$ برای شبیه‌سازی آشفته‌گی انتشار گاز انتخاب شد.

در حال حاضر، مدل $k-\epsilon$ یکی از محبوب‌ترین مدل‌های آشفته‌گی برای شبیه‌سازی آشفته‌گی میدان در ساختارهای بزرگ مانند مخازن ذخیره‌سازی می‌باشد. مدل $k-\epsilon$ استاندارد که توسط لاند⁷ و اسپالدینگ⁸ ارائه شده است، نسبت به مدل‌های صفر و یک معادله بهبود قابل توجهی داشته است و به طور گسترده‌ای در محاسبات میدان جریان مهندسی مورد استفاده قرار گرفته و در عمل اعتبارسنجی شده است. با این حال، این مدل برای هر مولفه از تنش رینولدز ممکن است قابلیت مناسبی نداشته باشد. به عبارت دیگر، این مدل فرض می‌کند که ضریب آشفته‌گی تورمی ایزوتروپی است، در حالی که آشفته‌گی در موارد جریان در کنار دیواره‌های خمیده، جریان مستقیم خمیده یا جریان با

⁶ Eulerian multiphase

⁷ Launder

⁸ Spalding

پیچش قوی غیر ایزوتروپی است. بنابراین، توصیه می‌شود که از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد برای محاسبه میدان مخازن با جریان دیواره خمیده استفاده نشود.

معادلات انرژی آشوب تپشی k و نرخ مصرف ε برای مدل $k-\varepsilon$ استاندارد به صورت روابط زیر تعریف می‌شود.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 \varepsilon G_b) - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + \nu \varepsilon - \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}} + C_4 \varepsilon \frac{k}{C_3 \varepsilon G_b} \quad (2)$$

در این معادلات، k نشان‌دهنده انرژی آشوب تپشی؛ ε نرخ مصرف انرژی آشوب تپشی؛ G_k انرژی آشفتگی آشوب ناشی از گرادیان سرعت میانگین؛ G_b انرژی آشفتگی آشوب ناشی از پیچش؛ Y_M اثر پلاسمای تورمی تپشی فشاری بر نرخ کل زیاد شدن c_2 است. همچنین σ_k و σ_ε نرخ‌های Prandtl انرژی آشوب تپشی و نرخ مصرف آشفتگی هستند. برای این مقادیر از مقادیر پیش‌فرض نرم افزار استفاده شده که این پارامترها در جدول (1) آورده شده است. همچنین مشخصات مخزن طراحی شده در جدول 2 آورده شده است.

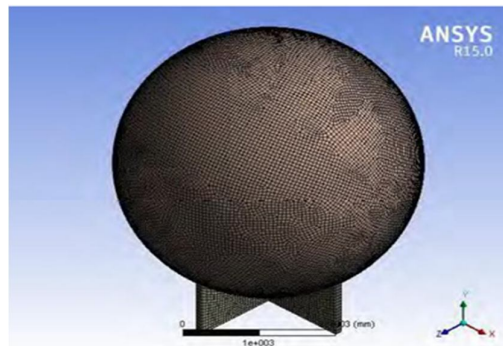
جدول 1- مقادیر پیش‌فرض مدل $k-\varepsilon$

$c_1 \varepsilon$	1.44	c_1	1.9
c_2	1.9	σ_k	1.0
$c_3 \varepsilon$	0.09	σ_ε	1.2

جدول 2- مشخصات مخزن طراحی شده جهت بررسی

مشخصات	مقدار
ابعاد مخزن	قطر 5 متر، ارتفاع 10 متر
شکل مخزن	کروی
مواد سازنده مخزن	فولاد کربنی
فشار داخلی	10 بار
فشار خارجی	1 بار
بارهای زنده	500 کیلوگرم
بارهای زنده‌ی خصوصی	50 کیلوگرم
تنش‌های برشی حداکثر	100 MPa
تنش‌های کششی حداکثر	200 MPa
خصوصیات ترک	طول 40 میلی متر، عمق 6 میلی متر، ضخامت 3 میلی متر، محل ترک در نیمه پایین مخزن
شرایط محیطی	دما 25 درجه سلسیوس، رطوبت 60 درصد

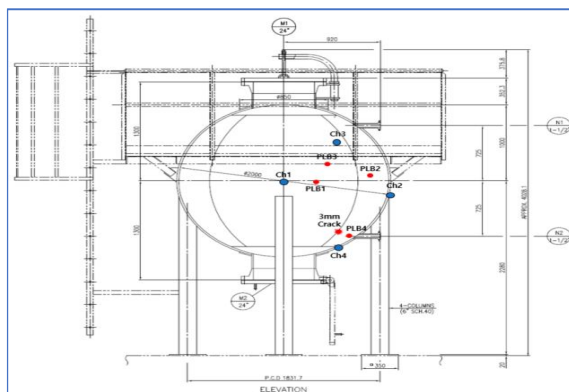
برای تحلیل عددی ساختار مخزن کروی، از یک مدل دقیق المان محدود استفاده می‌شود که با کمک روتین‌های موجود در نرم‌افزار المان محدود انسیس توسعه داده شده است. پوسته کروی و ستون‌های پشتیبان با استفاده از 3310 عدد المان پوسته چهارگوشه با شش درجه آزادی برای هر گره مدل‌سازی شده‌اند. همچنین از المان فلوئید هشت گوشه‌ای با سه درجه آزادی برای هر گره استفاده شده تا محتوای مایع غیرقابل فشردگی را نمایش دهد. در این مطالعه، برای حالتی که مخزن تا 89 درصد پر شده است، از 1793 عدد المان هشت گوشه استفاده می‌شود. در شکل 1 المان بندی استفاده شده قابل مشاهده می‌باشد. مطالعه مش بر اساس میزان جابجایی مخزن انجام شده و مدل با این تعداد المان همگرا شده است.



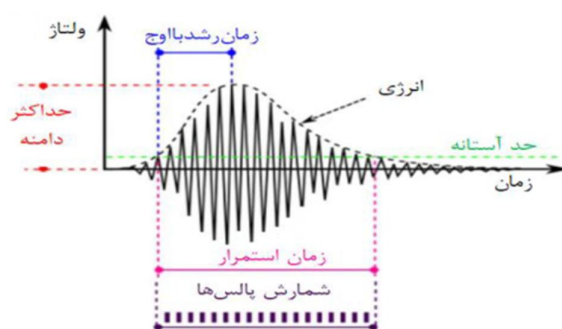
شکل 1- شبکه بندی مدل المان محدود مخزن کروی

آزمایش آکوستیک امیشن⁹ یکی از رایج ترین تست های بازرسی مخازن کروی است. در این روش مخازن کروی به طور کامل با سیال مشخصی پر می شوند تا تنش ها به حداکثر مقدار ممکن برسند. پس از آن حسگرهای آکوستیک امیشن بسیار حساس به دیواره مخزن متصل می شوند. به این ترتیب ترک ها و شکستگی های احتمالی توسط سیگنال های انتشار صوتی شناسایی می شوند تا اقدامات لازم برای تعمیر و نگهداری انجام شوند. در شکل 2 نمایش شماتیک از مخزن طراحی شده به همراه سنسورهای تجزیه و تحلیل انتشار امواج صوتی در نقاط مختلف مخزن برای مدلسازی آورده شده است. در شکل 3 یک نمونه سیگنال آکوستیک امیشن برای شناسایی پارامترهای موجود در نمودارهای آزمایش آکوستیک آورده شده است.

⁹ Acoustic Emission



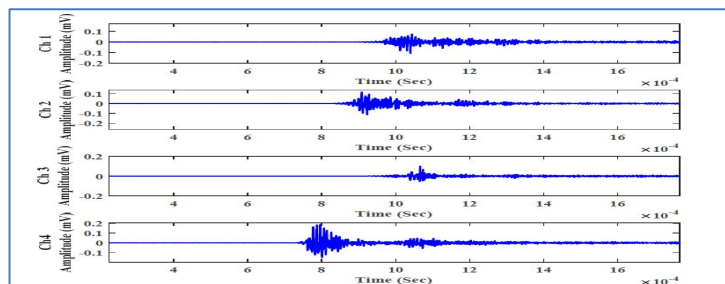
شکل 2- نمایش شماتیک از مخزن طراحی شده به همراه سنسورهای انتشار صوتی



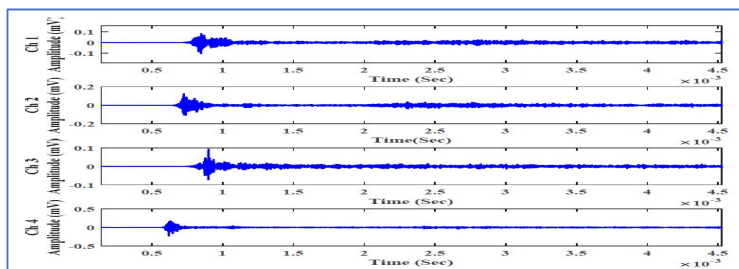
شکل 3- یک نمونه سیگنال آکوستیک امیشن و شناسایی پارامترها

3- نتایج

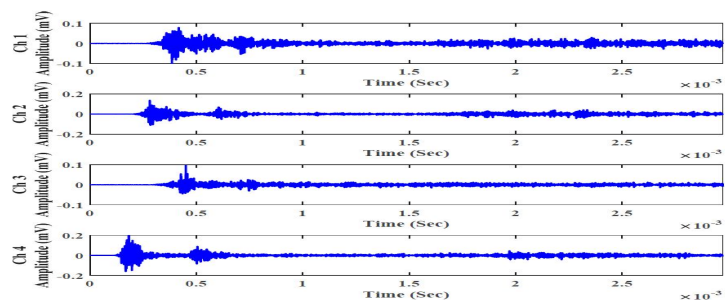
تشخیص مکان تخمینی ترک را می‌توان با تجزیه و تحلیل شکل موج سیگنال‌های صوتی در مدلسازی به دست آمده در طی چهار آزمایش آکوستیک ادغام کرد. از نظر تئوری، محل ترک نزدیک به سنسوری است که حداقل زمان رسیدن سیگنال‌ها را دارد. زمان رسیدن سیگنال به حسگر را می‌توان از شکل موج سیگنال بدست آورد. در این مطالعه، چهار آزمایش آکوستیک برای تحریک ترک و دریافت سیگنال ترک انجام شد. سیگنال‌های به دست آمده در طی چهار آزمایش آکوستیک در شکل 4، شکل 5، شکل 6 و شکل 7 آورده شده است. بدیهی است که در هر چهار آزمایش، کانال 4 ابتدا سیگنال‌ها را دریافت کرده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که کانال 2 در مقایسه با کانال 4 کمی دیرتر سیگنال‌ها را دریافت کرد و کانال بعدی در ردیف کانال 1 است. در تمام تست‌ها، کانال 3 آخرین سیگنال‌ها را دریافت کرد، زیرا زمان رسیدن سیگنال در این مورد حداکثر است. یکی دیگر از ویژگی‌های قابل توجه این است که دامنه سیگنال‌های کانال 4 در مقایسه با سیگنال‌های کانال‌های دیگر در تمام آزمایش‌های آکوستیک بیشتر بود. این همچنین نشان می‌دهد که کانال 4 نزدیک به محل ترک بوده است، زیرا سیگنال‌های این کانال در طول هر چهار آزمایش آکوستیک با تضعیف کمی مواجه شده اند.



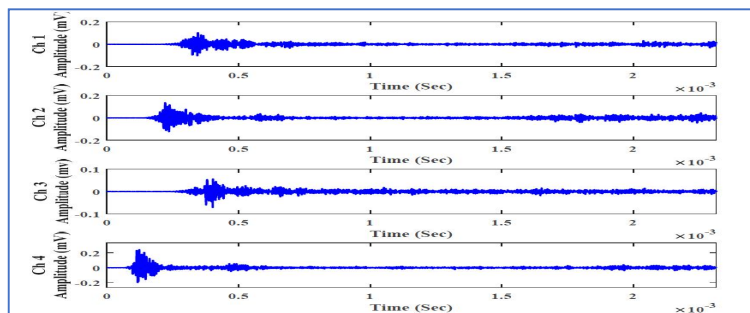
شکل 4- سیگنال‌های گسیل صوتی به دست آمده از آزمایش آکوستیک 1



شکل 5- سیگنال‌های گسیل صوتی به دست آمده از آزمایش آکوستیک 2

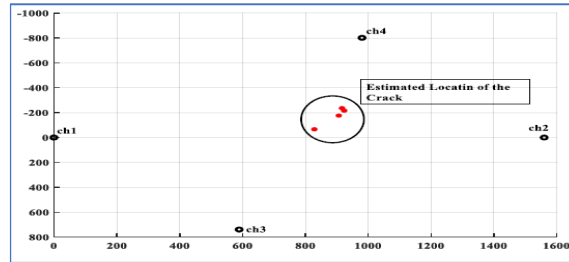


شکل 6- سیگنال‌های گسیل صوتی به دست آمده از آزمایش آکوستیک 3



شکل 7- سیگنال‌های گسیل صوتی به دست آمده از آزمایش آکوستیک 4

در شکل 8 یک نمودار مسطح با استفاده از مدل‌سازی هندسی حسگرها ارائه شده است. نقاط قرمز مکان تخمین زده شده در مورد منبع منشاء سیگنال‌های تجزیه و تحلیل انتشار صوتی را برای تست‌های شکستگی نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که چگالی نقاط برآورد شده نزدیک به کانال 4 بوده و بنابراین می‌توان حدس زد که محل سیگنال‌های منشاء از ترک نزدیک به این کانال بوده است.

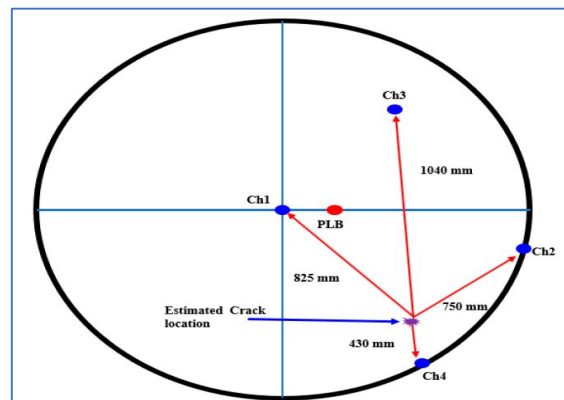


شکل 8- نمودار محل تخمینی ترک بر حسب میلی متر

علاوه بر این، برای بررسی بیشتر اینکه آیا محل تخمینی ترک درست است یا خیر، فاصله ترک را بر اساس زمان رسیدن و سرعت سیگنال‌های صوتی تست آکوستیک محاسبه شده است. زمان رسیدن با استفاده از عبارت زیر محاسبه می‌شود.

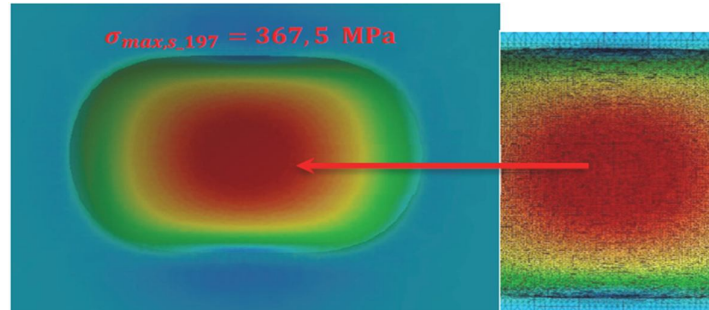
$$v = d/t \quad (3)$$

که در آن v نشان دهنده سرعت سیگنال‌ها، d فاصله یک سنسور خاص از محل ترک و t زمان رسیدن سیگنال به سنسور است. در این مورد، سرعت سیگنال 3032407 میلی متر بر ثانیه بوده است. به این ترتیب با تحلیل اطلاعات سرعت و زمان رسیدن، می‌توان محل ترک را تخمین زد. فواصل تخمینی ترک از چهار کانال در شکل 9 آورده شده است. از شکل مشخص است که فاصله بین محل تخمینی ترک و کانال 4 در مقایسه با سایر کانال‌ها حداقل بوده است. همچنین مشاهده شد که کانال 4 سیگنال را به خوبی قبل از سایر کانال‌ها از زمان ورود دریافت کرده است. بنابراین براساس تمامی اطلاعات می‌توان فرض کرد که ترک در مجاورت کانال 4 بوده است.



شکل 9- تخمین موقعیت ترک از طریق تکنیک سرعت و زمان

حداکثر تنش روی پوسته مخزن کروی در ناحیه پایین ترک با هندسه طول 40 میلی متر، عمق 6 میلی متر و ضخامت 3 میلی متر ایجاد می‌شود. در شکل 10 نحوه توزیع تنش در ترک آورده شده است که نشان می‌دهد 367/5 MPa، بزرگتر از تنش محلی مجاز 360 MPa می‌باشد. بنابراین، با این شرایط بارهای مانند بارهای لرزه‌ای باعث تنش‌های فشاری و کششی در مخزن شده که احتمال گسترش ترک را افزایش می‌دهد.



شکل 10- میدان تنش برای اندازه ترک mm (6×3×40)

4- نتیجه گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی و تحلیل مخازن کروی به منظور شناسایی مخاطرات احتمالی ناشی از ترک‌ها انجام شد. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی و تعیین مخاطرات احتمالی مرتبط با ترک‌های مخازن ذخیره به منظور بهبود ایمنی و اطمینان این تأسیسات بود. ابتدا مدل المان محدود یک مخزن کروی با استفاده از روش‌های عددی و نرم‌افزار شبیه‌سازی انسیس طراحی شد. با مدل سازی سیال و در نظر گرفتن برهم کنش جامد و سیال، روش انتشار موج برای شناسایی محل وقوع ترک به کار گرفته شد. با تشخیص محل ترک و همچنین مشخصات آن مانند طول و عمق آن، نحوه توزیع تنش در اطراف آن بدست آمد. با شناسایی محل و توزیع تنش در ترک، تحلیل جامع و مخاطرات احتمالی آن قابل شناسایی و ارزیابی بوده و بر اساس آن اقدامات بعدی آن قابل تصمیم گیری خواهد بود. اقدامات بعدی شامل تعمیر محل ایجاد ترک و یا تخمین عمر مخزن با توجه به نحوه توزیع تنش در اطراف آن می‌باشد. با شناسایی دقیق نقاط بحرانی و به‌کارگیری تدابیر مناسب می‌توان ضریب اطمینان استفاده از این مخازن را بهبود بخشید و خطرات ناشی از ترک‌ها را کاهش داد.

5- منابع

- [1] Bruce E. Ball and Will J. Carter, CASTI Guidebook to ASME Section VIII, Pressure Vessels, 2012.
- [2] Brabin. T, Christopher. T, Rae. B, Finite element analysis of cylindrical pressure vessels having a misalignment in a circumferential joint, International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 197- 201, 2010.
- [3] صادق رحمتی، علی‌خانی، طراحی بهینه چند مرحله‌ای مخازن تحت فشار مرکب، مجله بین المللی طراحی پیشرفته و تکنولوژی ساخت (ADMT)، شماره 1، پاییز 1390، ص 9.
- [4] Zhou J, Chen J, Zheng Y, et al. Dome shape optimization of filament-wound composite pressure vessels based on hyperelliptic functions considering both geodesic and non-geodesic winding patterns. *J Compos Mater* 2016;51(14).
- [5] Li SG, Cook J. An analysis of filament overwound toroidal pressure vessels and optimum design of such structures. *J Pressure Vessel Technol*, 124(2): pp. 215–22, 2012.
- [6] Chen RX. Design analysis on the filament-wound toroidal pressure vessel. *J Solid Rocket Technol*, 29(6): pp. 446–50, 2016.
- [7] Koussios S, Beukers A. Composing composites: a paradigm of reversed design. *J Design Res*; 5(3): pp. 302–16, 2017.
- [8] Saidi A. R., Jomezadeh E., an analytical approach for stress analysis of FGM anular sector plates, *Int. J Material & design*, pp. 3679–3685, 2019.

- [9] Tutunku. N, Ozturk M., exact solution for stress in FGM pressure vessels, *Int. J Material & design*, 683–686, 2020.
- [10] M. Nebe, T. Asijee, C. Braun, J. van Campen, F. Walther, Experimental and analytical analysis on the stacking sequence of composite pressure vessels, *Compos. Struct.* 247, 112429, 2020.
- [11] Guillaume, Sibertin-Blanc. Stress Analysis of a Spherical Pressure Vessel with Multiple Notches. *Lecture notes in control and information sciences - proceedings*, 2022.
- [12] Xin, Zhang., Yifeng, Hu., Junping, Shi., H., Liang., Yong, Xu., Xiaoshan, Cao. A safety assessment approach to pressure vessels based on machine learning. *Frontiers in Materials*, 2022.
- [13] J, Jamali., E, Mohamadi., T, Naraghi. Fitness for Service Approach (FFS) in Fatigue Life Prediction for a Spherical Pressure Vessel Containing Cracks. *Journal of Solid Mechanics*, 2020.
- [14] Aleksandar, Sedmak., Snezana, Kirin., Igor, Martić., Lazar, Jeremić., Ivana, Vučetić., Tamara, Golubović., Simon, Sedmak. Structural Integrity and Life Assessment of Pressure Vessels - Risk Based Approach., 2020.
- [15] M., Perl., M., Steiner. Numerical evaluation of an internally cracked autofrettaged spherical pressure vessel, 2019.
- [16] Rijul, Singla., Cosmin, Anitescu., S.K., Singh., Indra, Vir, Singh., B.K., Mishra., Timon, Rabczuk., Xiaoying, Zhuang. Modelling of fracture in pressure vessels by thin shell isogeometric analysis, 2021.
- [17] Kristaq, Hazizi., Mohammad, Ghaleeh. Design and Analysis of a Typical Vertical Pressure Vessel Using ASME Code and FEA Technique. *Designs*, 2023.
- [18] Antoine, Wautier. (2022). Numerical Fracture Analysis of a Reactor Pressure Vessel based on Abaqus-FRANC3D Co-simulation Method. *Procedia structural integrity*.
- [19] Giordano, Emrys, Scarponi., Gabriele, Landucci., A., M., Birk., Valerio, Cozzani. An innovative three-dimensional approach for the simulation of pressure vessels exposed to fire. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, 2019.
- [20] Tianyang, Zhang. Reliability Analysis of Pressure Vessels Marine Engineering Based on Numerical Simulation Analysis. *Journal of Coastal Research*, 2019.