

تأثیر هندسه و جهت ترک بر ضریب شدت تنش در مخازن استوانه‌ای آلایژ آلومینیوم 7075-T6 تحت فشار

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
ghodszad@ms.tabrizu.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، f_vakili@tabrizu.ac.ir

فارغ التحصیل دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
halimi@tabrizu.ac.ir

کوثر قدس زاد

فرید وکیلی تهامی*

حامد حلیمی خسروشاهی

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر هندسه ترک در مخازن استوانه‌ای و عوامل مرتبط با آن شامل موقعیت، جهت، اندازه، نوع ساختار، مود ترک و نیروی وارده بر ضریب شدت تنش با استفاده از روش المان محدود می‌باشد. در این تحقیق، مدل المان محدود مخزن با آلایژ آلومینیوم 7075-T6 ایجاد شده و پدیده شروع رشد ترک تحت فشار داخلی با نرم‌افزار ABAQUS مطالعه شده است. در مدل‌سازی، ترک‌های سطحی نیم‌بیضی در دو موقعیت محوری و محیطی، هر یک در دو جهت داخلی و خارجی تحلیل و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که شروع رشد ترک به هندسه آن وابسته بوده و با تغییر نسبت طول و عمق ترک، الگوی شروع رشد آن نیز تغییر می‌کند. کاهش نسبت عمق به طول ترک موجب افزایش ضریب شدت تنش در عمق ترک شده که موجب نشت قبل از شکست می‌شود. از سوی دیگر، افزایش این نسبت باعث شروع سریع‌تر رشد ترک در نوک آن می‌شود که می‌تواند به شکست ناگهانی مخزن بیانجامد. همچنین مقادیر عددی نشان می‌دهند که ترک‌های محوری به دلیل تأثیر جهت تنش‌های اصلی و تمرکز آنها در راستای طولی، ضریب شدت تنش بالاتری در مقایسه با ترک‌های محیطی دارند.

واژه‌های کلیدی: المان محدود، آلومینیوم 7075، مخازن تحت فشار، شروع ترک، ترک نیم‌بیضی، ترک سطحی.

The effect of crack geometry and direction on their stress intensity factor in 7075-T6 aluminum alloy cylindrical pressure vessels

K. Ghodszad

F. Vakili Tahami

H. halimi khosrowshahi

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

This research investigates the effect of crack geometry in vessels and related factors including position, direction, size, type of structure, crack mode, and applied force on the stress intensity factor using finite element method. In this research, a finite element model of a cylindrical tank with 7075-T6 aluminum alloy was developed and a series of analyses was performed under internal pressure with Abaqus software. In the modeling, semi-elliptical surface cracks in two axial and circumferential positions, in two internal and external directions were analyzed and compared. The results show that the risk of crack propagation mostly depends on its geometry and by changing the crack length to depth ratio, the pattern of its propagation also changes. Reducing the crack depth to length ratio, increases the stress intensity factor in the crack depth that leads to leakage before failure. On the other hand, by increasing this ratio the stress intensity factor increases causing faster crack propagation in tips, which can lead to the catastrophic failure of the reservoir. Also, numerical values show that axial cracks have a higher stress intensity factor compared to the peripheral cracks due to the direction of the principal stresses and their concentration in the longitudinal direction.

Keywords: finite element, aluminium 7075, pressure vessels, crack propagation, semi-elliptical crack, surface crack.

۱- مقدمه

نشت و شکست ناگهانی منجر شوند [۶]. معمولاً شروع رشد ترک زمانی آغاز می‌شود که میزان ضریب شدت تنش در نوک آن از مقدار بحرانی، تجاوز کند [۷]. بنابراین در مخازن استوانه‌ای تحت فشار داخلی با وجود ترک‌های محوری و محیطی تحلیل دقیق ضریب شدت تنش^۱ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۸]. این ضریب که وابسته به ویژگی‌های ماده، شرایط ترک و نوع بارگذاری است، معیاری اساسی در مکانیک شکست محسوب می‌شود و امکان پیش‌بینی رفتار ترک‌ها به منظور بهبود طراحی و کاهش خطرات شکست‌های ناگهانی را فراهم می‌کند [۹].

مخازن تحت فشار استوانه‌ای به عنوان یکی از رایج‌ترین سازه‌ها در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز [۱]، حمل و نقل [۲] و هوافضا [۳]، کاربرد گسترده‌ای دارند. در این راستا افزایش تقاضا برای کارایی و ایمنی این سیستم‌ها، ضرورت مطالعه در مورد رفتار مکانیکی و استحکام مخازن تحت فشار، به ویژه در شرایط دمای بالا و فشار داخلی را اجتناب ناپذیر می‌سازد [۴]. با توجه به محدودیت‌های فرآیند ساخت و مونتاژ، سازه‌ها ممکن است دچار نقص‌هایی نظیر ترک‌های سطحی شوند که باعث کاهش ایمنی مخازن می‌شود [۵]. این ترک‌ها تحت تأثیر بارگذاری و فشار داخلی قرار دارند و می‌توانند رشد پیدا کرده و به

¹ Stress Intensity Factor

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f_vakili@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۶/۰۳

افزایش ضریب شدت تنش موجب گسترش ترک و در نتیجه افزایش خطر نشت و شکست می‌شود [۱۰]. نشت قبل از شکست^۱ معمولاً به وجود ترک‌های کوچک و ناپیدا مرتبط می‌باشد که شناسایی و پیش‌بینی آن‌ها برای ارزیابی ریسک تحلیل ترک ضروری است [۱۱]. استفاده از تحلیل‌های عددی مانند روش المان محدود^۲ ابزارهای مؤثری برای شبیه‌سازی تحلیل رفتار ترک و پیش‌بینی نشت هستند [۱۲]. بنابراین برای ارزیابی و پیش‌بینی نشت قبل از شکست، شناخت ویژگی‌های مواد مورد استفاده در مخازن تحت فشار اهمیت زیادی دارد [۱۳]. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاص خود از جمله شکل‌پذیری و رسانایی گرمایی بالا در این زمینه کاربرد گسترده‌ای دارند. رسانایی گرمایی آلومینیوم باعث کاهش گرادیان‌های حرارتی در جداره مخازن و در نتیجه کاهش تنش‌های گرمایی می‌شود و عمر مفید مخازن را افزایش می‌دهد.

در میان آلیاژهای آلومینیوم، سری ۷۰۰۰ به دلیل استحکام و سختی بالا انتخابی بسیار مناسب برای ساخت مخازن تحت فشار هستند [۱۴]. یکی از شاخص‌ترین آلیاژهای این سری، آلیاژ ۷۰۷۵ است که معمولاً با عملیات حرارتی T6 برای افزایش استحکام مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵]. با توجه به اهمیت تحلیل رفتار مکانیکی مخازن تحت فشار و تأثیر ترک‌ها بر ایمنی آن‌ها، تحقیقات متعددی در زمینه ارزیابی ضریب شدت تنش، شروع ترک و پیش‌بینی نشت انجام شده است. این مطالعات عمدتاً به مدل‌های عددی، تأثیر ویژگی‌های مواد و شرایط بارگذاری پرداخته است. به دلیل اهمیت موضوع، بررسی‌های متعددی در این زمینه انجام گرفته است که در ادامه مهم‌ترین دستاوردهای پژوهشی در این حوزه و تحلیل‌های عددی ارائه خواهد شد. به عنوان نمونه‌ای از تحقیقات انجام شده می‌توان به مطالعه‌ای اشاره کرد که در آن لین و اسمیت [۱۶] با استفاده از روش المان محدود به محاسبه ضریب شدت تنش و پیش‌بینی هندسه شروع رشد ترک پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که ضریب شدت تنش به شدت به هندسه نوک ترک حساس است. کیم و همکاران [۱۷] برای لوله‌های جدار ضخیم، پارامترهای مرتبط با مکانیک شکست را در حضور ترک‌های سطحی محیطی داخلی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که روش المان محدود، تخمین مناسبی از تحلیل ترک را ارائه می‌دهد. ون ژیان و همکاران [۱۸] با استفاده از مدل‌سازی المان محدود سه‌بعدی، عمر باقی مانده مخازن تحت فشار را در حضور ترک‌های نیم‌بیضی محوری، محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تأثیر طول ترک بر عمر مخزن، بیشتر از عمق ترک است. زارعی و نبوی [۱۹] ضرایب شدت تنش ترک نیم‌بیضی محیطی را با استفاده نرم‌افزار ABAQUS و روش‌های عددی محاسبه کردند. آن‌ها نشان دادند که ضرایب شدت تنش برای این حالت ترک همواره در نقطه سطحی بیشینه است و از امتداد نوک ترک تا نقطه عمقی، کاهش می‌یابد. ریچ و پاولو [۲۰] با استفاده از روش المان محدود، ضریب شدت تنش را در لوله‌های جدار نازک و ضخیم با ترک‌های محیطی تحت بارگذاری مرکب کششی و پیچشی محاسبه کردند. آن‌ها راه‌حل‌های دقیق‌تری برای ترک‌های طولانی تحت بار پیچشی در پوسته‌های نازک ارائه

دادند. آیهان و همکاران [۲۱]، نشان دادند که با افزایش عمق و زاویه انحراف ترک، ضریب شدت تنش در مخازن کروی افزایش می‌یابد، در حالیکه در دیواره‌های ضخیم‌تر، این ضریب کمتر از مخازن نازک است. شریفی و همکاران [۲۲] با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، تأثیر هندسه ترک نیم‌بیضی سطحی داخلی و خارجی را بر ضریب شدت تنش در مخازن استوانه‌ای تحت فشار داخلی و بارگذاری خمشی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشینه ضریب شدت تنش در زاویه حدود ۶۰ درجه رخ داده و با افزایش نسبت عمق به طول ترک، مقدار بیشینه ضریب شدت تنش از مرکز جبهه ترک به لبه جبهه ترک منتقل می‌شود. شاهین و همکاران [۲۳] ضریب شدت تنش سه‌بعدی ترک‌های سطحی شیب‌دار در صفحات با ضخامت محدود تحت بارگذاری کششی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش نسبت طول ترک به ضخامت، ضریب شدت تنش افزایش یافته و با افزایش زاویه شیب ترک، کاهش می‌یابد. نبوی و زارعی [۲۴] در پژوهشی دیگر، ضرایب شدت تنش را در عمیق‌ترین نقطه یک ترک نیم‌بیضی محیطی واقع در سطح داخلی یک استوانه محاسبه کردند. آن‌ها تأثیر عمق نسبی ترک، نسبت ابعاد و نوع انتقال گرما را بر ضریب شدت تنش حرارتی بررسی نمودند. گلانت و همکاران [۲۵] با تحلیل المان محدود، تأثیر ضریب شدت تنش ترک‌های محوری در سطح داخلی و خارجی مخازن استوانه‌ای با نسبت‌های مختلف ضخامت به شعاع را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که به دلیل تأثیر تنش‌های حلقوی کششی، ترک‌های محوری در نازل‌های نفوذی بیشتر از ترک‌های محیطی رخ می‌دهند. سعیدی گوگرچین و همکاران [۲۶] مخزنی استوانه‌ای با ترک طولی نیم‌بیضی در جداره داخلی مخزن، تحت گرادیان محوری فشار را بررسی کردند و دریافتند که موقعیت نقطه بحرانی ترک، به نسبت ابعاد آن وابسته است. به طوریکه با افزایش این نسبت، نقطه بحرانی از سطح ترک به عمق آن منتقل می‌شود.

نشت قبل از شکست در مخازن استوانه‌ای جدار ضخیم به وضعیتی اشاره دارد که در آن، محتویات مخزن پیش از شکست کامل از آن خارج می‌شوند [۲۷]. این پدیده از دهه ۱۹۵۰ مورد توجه قرار گرفت و تحقیقات متعددی در خصوص ارزیابی استحکام و رفتار شکست مخازن و لوله‌های تحت فشار انجام شد. یکی از نخستین پژوهش‌ها در این زمینه توسط اروین در دهه ۵۰ میلادی مطرح شد. اکثر مطالعات بعدی بر روی نیروگاه‌ها و لوله‌های حامل سیالات دمای بالا متمرکز بوده است [۲۸]. پیشرفت‌های مکانیک شکست موجب بهبود درک رفتار مخازن و لوله‌ها شد و نشان داد که نقص‌های کوچک در دیواره‌ها می‌تواند از طریق نشت شناسایی گردد [۲۸]. این پیشرفت‌ها ضرورت توسعه معیارهای طراحی نشت قبل از شکست را مطرح کرد [۲۹]. در همین خصوص کتان و همکاران [۳۰] با انجام آزمایش‌هایی روشی برای ارزیابی نشت و شکست مخازن تحت فشار با ترک‌های سطحی ارائه دادند. آن‌ها بر اهمیت طراحی مناسب و انتخاب مواد برای پیشگیری از شکست زود هنگام تأکید کردند. سیلوا و همکاران [۳۱] با بررسی لوله‌های تحت فشار داخلی بالا نشان دادند که شکست معمولاً پیش از نشت رخ می‌دهد. آن‌ها پیشنهاد کردند که طراحی نشت قبل از شکست می‌تواند از وقوع شکست برشی دوطرفه جلوگیری کند. ژانگ و همکاران [۳۲] جابجایی نوک ترک و نرخ نشت خط لوله تحت فشار بالا را تحلیل کرده و با انجام آزمایش نشت قبل از شکست، مقادیر این پارامترها را

^۱ Leak Before Break^۲ Finite Element Method

مانند نوک ترک یا نقاط دیگر از طول ترک، با توجه به موقعیت آن، ϕ ، محاسبه شود:

$$K = \sqrt{\pi c} \cdot \sigma \cdot f(c/R, \phi, \theta, E) \quad (2)$$

در این رابطه σ تنش اعمالی، c طول ترک نیم‌بیضی (نصف طول ترک اصلی)، R شعاع منحنی سطح (در صورتیکه ترک روی سطح دایره‌ای باشد)، ϕ پارامتر زاویه جبهه ترک، θ ضریب پواسون و E مدول یانگ ماده است. همچنین تابع $f(c/R, \theta, E)$ به هندسه مخزن، (نسبت c/R) و خواص ماده بستگی دارد [۳۷]. این رابطه نشان‌دهنده اهمیت تجزیه و تحلیل دقیق ضریب شدت تنش برای پیش‌بینی رفتار ترک و ارزیابی ریسک‌های ناشی از آن است. معادله کامل ضریب شدت تنش در مود یک برای محاسبه ترک‌های سطحی نیم‌بیضی با استفاده از ضرایب تناسب تنش به صورت رابطه (۳) قابل محاسبه است [۲۵].

$$K_I = \left[G_0 \{ \sigma_0 + P_c \} + G_1 \sigma_1 \left(\frac{a}{t} \right) + G_2 \sigma_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + G_3 \sigma_3 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + G_4 \sigma_4 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] \quad (3)$$

که K_I ضریب شدت تنش در مود یک، G_i ثوابت تأثیر شدت تنش σ_i ، ضرایب تناسب عامل شدت تنش P_c فشار رویه ترک a عمق ترک نیم‌بیضی، t ضخامت دیواره است. تنش اعمالی به صورت رابطه (۴) قابل محاسبه است [۲۵].

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t} \right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t} \right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t} \right)^4 \quad (4)$$

که در آن x فاصله نوک ترک از سطح سیلندر است. همانطور که ملاحظه می‌شود، استفاده از روابط تحلیلی برای تعیین ضریب شدت تنش به خصوص در هندسه و نوع بارگذاری متفاوت، نیازمند محاسبات پیچیده می‌باشد [۲۵]. لذا غالباً از روش‌های عددی، به خصوص تحلیل المان محدود برای این منظور استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز از نرم‌افزار ABAQUS برای محاسبات مربوط به ترک‌های سطحی نیم‌بیضی، استفاده شده است. در ادامه، بررسی معیار نشت قبل از شکست به عنوان روشی برای جلوگیری از شکست‌های ناگهانی و ارتقای ایمنی مخازن مورد توجه قرار می‌گیرد. یکی از اولین روابط معیار نشت قبل از شکست توسط اروین [۳۸] ارائه شده است که به صورت رابطه ۵ قابل بیان است.

$$K_{IC} \geq \sigma_{ys} \sqrt{\pi(c_c + r_p^*)} \quad (5)$$

که در این رابطه K_{IC} چقرمگی شکست ماده (مقدار بحرانی ضریب شدت تنش)، σ_{ys} تنش تسلیم ماده، c_c نصف طول ترک بحرانی و r_p^* شعاع پلاستیک موثر است که از رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$r_p^* = \sigma_{ys}^2 \frac{c_c}{2 \pi \sigma_{ys}^2} \quad (6)$$

که شرط نشت قبل از شکست به صورت دو نامساوی رابطه ۷ قابل بیان است.

$$K_{IC}^2 \geq \left(\pi + \frac{1}{2} \right) c_c \sigma_{ys}^2 \text{ یا } \frac{K_{IC}^2}{\left(\pi + \frac{1}{2} \right) \sigma_{ys}^2} \geq c_c \quad (7)$$

برای شرایط نشت قبل از شکست، ضخامت مخزن باید کوچکتر از مقدار بحرانی باشد ($c_c \geq t_c$). روابط فوق به صورت ساده ذیل قابل تبدیل است [۳۷].

پیش‌بینی کردند. فرهنگ دوست [۳۳] رفتار ضریب شدت تنش در مخازن ترک‌دار تحت فشار را با روش اجزا محدود مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که مکانیزم غالب خرابی، ترکیبی از رشد ترک خزشی و شکست ترد در دماهای بالا است و نیز در برخی شرایط، نشت قبل از شکست رخ داده و می‌تواند به هشدار خرابی استفاده شود. آلکسیف و همکاران [۳۴] روشی برای محاسبه احتمال شکست و کاربرد مفهوم نشت قبل از شکست در شرایط دما و فشار بالا، ارائه دادند.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر آلیاژهای آهن متمرکز بوده و مطالعه کاملی بر آلیاژهای آلومینیومی با وجود کاربرد گسترده آنها به دلیل وزن پایین انجام نشده است. همچنین اثر هندسه و موقعیت ترک در مخازن به صورت مقایسه‌ای، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش با استفاده از روش المان محدود، تحلیل ترک‌های سطحی نیم‌بیضی محوری و محیطی داخلی و خارجی در مخازن استوانه‌ای جدار ضخیم از آلومینیوم 7075-T6 تحت فشار، برای ابعاد مختلف طول و عمق ترک مطالعه شده است. بنابراین هدف از این پژوهش، بررسی تحلیل ترک نیم‌بیضی و تعیین ضریب شدت تنش در این آلیاژ است.

۲- نظریه مسئله

برای یک مخزن استوانه‌ای توخالی از نوع جدار ضخیم با مشخصات شعاع داخلی r_i و شعاع خارجی r_o و جابجایی شعاعی u که تحت فشارهای یکنواخت لایه‌ی داخلی p_i و لایه‌ی خارجی p_o قرار دارد، روابط تنش‌های الاستیک به صورت روابط (۱) می‌باشند [۳۵].

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{r_i^2 p_i - r_o^2 p_o}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{r_i^2 r_o^2 (p_i - p_o)}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{r_i^2 p_i - r_o^2 p_o}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{r_i^2 r_o^2 (p_i - p_o)}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} \\ u = \frac{1 - \theta}{E} \frac{(a^2 p_i - r_o^2 p_o) r}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{1 + \theta}{E} \frac{r_i^2 r_o^2 (p_i - p_o)}{(r_o^2 - r_i^2) r} \end{cases} \quad (1)$$

که در این روابط، σ_r تنش شعاعی، σ_θ تنش زاویه‌ای، r شعاع، θ ضریب پواسون و E مدول الاستیسیته هستند. این روابط نشان می‌دهند که تغییرات تنش شعاعی بین سطوح داخلی و خارجی مخزن، از نوع غیرخطی می‌باشند. همچنین σ_r و σ_θ تنش‌های اصلی هستند. برای تحلیل رفتار مخازن تحت فشار، ابتدا باید تنش‌های موجود در آن را مشخص کرده و از نظر استحکام، ارزیابی نمود.

در صورت احتمال وجود ترک، لازم است ضریب شدت تنش را محاسبه کرده و احتمال تحلیل ترک بررسی شود. ضریب شدت تنش که با پارامتر K نشان داده می‌شود، شدت میدان تنش در اطراف ترک را توصیف می‌کند. عوامل مختلفی مانند اندازه و ویژگی‌های هندسی ترک (از جمله موقعیت، جهت و ابعاد آن)، مود ترک و نیروی اعمالی، بر محاسبات ضریب شدت تنش تأثیرگذار هستند و نقش مهمی در تعیین احتمال تحلیل ترک ایفا می‌کنند. به طور کلی با افزایش نیروی اعمالی و همچنین ابعاد ترک، مقدار ضریب شدت تنش نیز افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار بحرانی، ترک شروع به رشد می‌کند [۳۶]. معادله ضریب شدت تنش برای ترک نیم‌بیضی در یک مخزن استوانه‌ای جدار ضخیم، به شکل رابطه (۲) قابل بیان است [۳۷]. معادله ضریب شدت تنش می‌تواند برای هر نقطه خاص از جبهه ترک،

¹ Stress Intensity Factor Influence Coefficients

² Stress Fit Coefficients

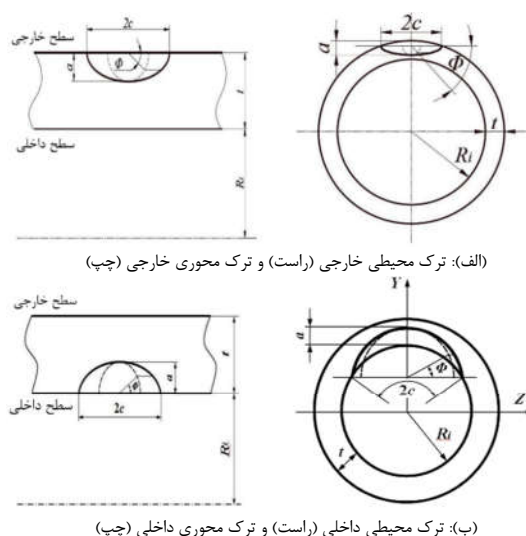
³ Crack Face Pressure

$$\frac{K_{IC}^2}{(\pi)\sigma_t^2} \geq t_c \text{ where } \sigma_t = \frac{Pr_i}{2t} \quad (8)$$

که در این رابطه σ_t تنش مماسی و K_{IC} چقرمگی شکست ماده است. در تحلیل نشت قبل از شکست، ترک باید به اندازه‌ای بزرگ شود که منجر به نشت شود ولی به K_{IC} نرسد، تا شکست ناگهانی اتفاق نیفتد [۳۷].

۳- هندسه و شرایط عملکردی

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود هندسه مسئله از یک مخزن استوانه‌ای دارای ترک‌های محوری و محیطی بر روی سطوح داخلی و خارجی از نوع نیم‌بیضی تشکیل شده است. چهار نوع ترک سطحی عبارتند از: ترک محیطی خارجی و ترک محوری خارجی (شکل ۱-الف)، ترک محیطی داخلی و ترک محوری داخلی (شکل ۱-ب). ترک‌های محوری ترک‌هایی هستند که قسمت طولی آنها، موازی با محور طولی مخزن است و ترک‌های محیطی، ترک‌های دایروی یا نیم‌دایروی هستند که در محیط مخزن واقع شده‌اند. در شکل ۱، R_i و R_o به ترتیب شعاع داخلی و شعاع خارجی سیلندر با مقادیر ۳۸۰ و ۴۱۸ میلی‌متر و t ضخامت سیلندر نیز برابر با ۳۸ میلی‌متر هستند. همچنین P_i فشار داخلی سیلندر برابر با ۱۵ مگاپاسکال است که به سطح داخلی سیلندر و صفحه‌ی ترک وارد می‌شود. پارامترهای a عمق ترک و c نصف طول ترک می‌باشند که عمق ترک به فاصله‌ی عمودی از سطح مخزن (سطح شروع ترک) تا عمیق‌ترین نقطه‌ی ترک گفته می‌شود و مقدار عمق ترک بیان‌کننده این است که ترک چقدر از سطح به درون ماده نفوذ کرده است. ϕ پارامتر زاویه‌ای ترک است که موقعیت جلوی ترک را مشخص می‌کند و به دلیل تقارن، جهت چرخش آن در خلاف جهت عقربه‌های ساعت فرض شده است، $\phi = 0$ زاویه‌ی شروع ترک می‌باشد و در راستای موقعیت طول ترک قرار دارد. $\frac{2\phi}{\pi} = 1$ زاویه‌ی موقعیت پیشانی ترک می‌باشد که در عمق ترک قرار دارد.



شکل ۱- نمایایی از ترک سطحی نیم‌بیضی تحت فشار در جداره سیلندر الف) ترک محیطی خارجی و ترک محوری خارجی، ب) ترک محیطی داخلی و ترک محوری داخلی [۳۹]

۴- مشخصات آلیاژ آلومینیوم

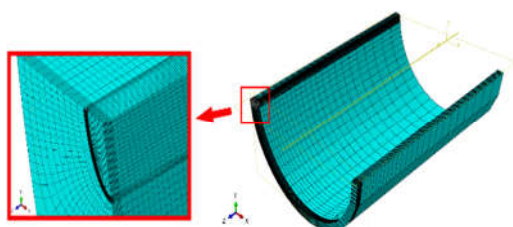
به دلیل کاربرد گسترده آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف، در این مطالعه از آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 برای مشخصات سیلندر مورد نظر استفاده شده است. تحلیل ترک در این آلیاژ به شدت به تنش و دما بستگی دارد. آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 دارای ویژگی‌هایی همچون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت مناسب در برابر خوردگی و هدایت گرمایی بالا می‌باشد [۴۰]. جدول ۱ خصوصیات مکانیکی و سایر مشخصات آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 در دمای محیط [۱۵]

نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	چگالی (gr/mm ³)
۰٫۳۳	۷۱٫۱	۵۰۳	۵۷۲	۲٫۸۱

۵- مدل‌سازی المان محدود

به منظور شبیه‌سازی عددی مسئله، یک مدل المان محدود از مخزن استوانه‌ای دارای ترک با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS ساخته شده و تحت بارگذاری قرار گرفته است. مدل المان محدود به همراه یکی از حالت‌های ترک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- مدل المان محدود مخزن استوانه‌ای با جدار ضخیم برای ترک محیطی داخلی

مدل المان محدود با استفاده از المان سه‌بعدی C3D8 ساخته شده و به دلیل تقارن، فقط یک چهارم استوانه شبیه‌سازی شده است. فرض بر این است که مخزن در دمای ۴۲۳ درجه کلوین کار می‌کند، بنابراین برای مدول یانگ از مقدار ۳۷٫۰۷۳ گیگاپاسکال و برای ضریب پواسون از مقدار ۰٫۳ در مدل‌سازی استفاده شده است [۱۵]. مدل نهایی با توجه به اندازه و موقعیت ترک شامل ۳۷۰۰۰ تا ۱۰۲۰۰۰ المان می‌باشد. همچنین ناحیه نوک ترک با ۲۰ المان احاطه شده است. مدل المان محدود تحت بارگذاری فشاری داخلی قرار گرفته و فشار داخلی به سطح داخلی سیلندر و صفحه ترک اعمال شده است. علاوه بر این، به جای درپوش، در انتهای مخزن بار کششی محوری ناشی از فشار داخلی وارد شده است.

مقدار ضریب شدت تنش، که با پارامتر K نشان داده می‌شود، می‌توان به صورت عددی با استفاده از کدهای داخلی نرم‌افزار ABAQUS محاسبه کرد. تحت شرایط حالت پایدار، این مقدار تقریباً مستقل از مسیر می‌باشد و اندازه آن ثابت باقی می‌ماند. برای محاسبه ضریب شدت تنش، شش مسیر انتگرال‌گیری مختلف در نظر گرفته

جدول ۳- مقایسه نتایج ضریب شدت تنش در امتداد جبهه ترک برای نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۱/۳ حاصل از این پژوهش و

نتایج راجو و نیومن [۱۸]

$K(N/mm^{3/2})$	$a/t = 0.2$	$a/t = 0.4$	$a/t = 0.6$
نیومن - راجو ($\phi = 0$)	۲۲۰	۳۲۸	۵۲۰
کار حاضر ($\phi = 0$)	۲۲۲	۳۲۹	۵۳۳
درصد خطا	۰/۹۱	۰/۳۰	۴/۵
مکانیزم غالب خرابی	نشت در $\phi = \pi/2$	نشت در $\phi = \pi/2$	نشت در $\phi = \pi/2$
نیومن - راجو ($\phi = \pi/2$)	۳۲۲	۵۳۰	۷۴۰
کار حاضر ($\phi = \pi/2$)	۳۲۵	۵۳۳	۷۴۵
درصد خطا	۰/۹۳	۰/۵۷	۰/۶۸
مکانیزم غالب خرابی	نشت در $\phi = \pi/2$	نشت در $\phi = \pi/2$	نشت در $\phi = \pi/2$

۷- نتایج

در ادامه مقادیر ضریب شدت تنش در طول ترک‌هایی با هندسه‌های مختلف که از تحلیل‌های عددی بدست آمده‌اند، ارائه می‌شود. در نمودارها برای اختصار به جای عبارت ترک سطحی محوری داخلی از IAC^1 ، ترک سطحی محیطی داخلی از ICC^2 ، ترک سطحی محوری خارجی از EAC^3 و ترک سطحی محیطی خارجی از ECC^4 استفاده خواهد شد.

در شکل ۳، مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش حاصل از تحلیل عددی سیلندر در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک‌های محوری و محیطی در جهت داخلی و خارجی با نسبت عمق به ضخامت (a/t)، برابر با ۰/۲ و نسبت عمق به طول (a/c) برابر با ۰/۶ ارائه شده است. این نمودار بیانگر این است که در تمامی چهار حالت با طول ترک متوسط (a/c) برابر با ۰/۶ ضریب شدت تنش در موقعیت‌های مختلف آن تقریباً یکسان است. در نتیجه، احتمال شروع ترک از هر دو سمت آن وجود دارد، هر چند به علت بالا بودن مقدار ضریب شدت تنش در پیشانی ترک، احتمال نشت قبل از شکست، اندکی بیشتر است.

ترک‌های داخلی، به دلیل تماس مستقیم با فشار داخلی مخزن، تنش‌های مماسی بالاتری نسبت به ترک‌های خارجی تجربه می‌کنند. لذا ترک‌های محوری و محیطی داخلی مقادیر ضرایب شدت تنش بالاتری نسبت به ترک‌های محوری و محیطی خارجی دارند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان بیان کرد که ترک‌های داخلی موجود در مخزن از نظر آسیب‌زا بودن، خطرناک‌تر از ترک‌های خارجی هستند.

شده است. میانگین مقادیر پنج کانتور آخر به عنوان مقدار نهایی این پارامتر انتخاب می‌شود [۱۵]، زیرا مسیر اول به دلیل نزدیکی زیاد به نوک ترک، نتایج دقیقی ارائه نمی‌دهد. این کار ناشی از مشکلات عددی و عدم دقت در مش‌بندی در این ناحیه است، که به دلیل تمرکز بالای تنش و تغییر شکل‌های بزرگ در ناحیه‌ی نزدیک به نوک ترک رخ می‌دهد. بدین ترتیب ضریب شدت تنش در هر نقطه از جلوی ترک قابل محاسبه است. در جدول ۲ مقادیر ضریب شدت تنش به عنوان نمونه برای ترک محوری خارجی با نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۰/۸ و عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۳ در پنج مسیر انتگرال‌گیری ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که با حرکت از کانتور اول به سمت کانتورهای بالاتر، مقادیر ضریب شدت تنش به یک مقدار پایدار و همگرا نزدیک می‌شوند.

جدول ۲- مقادیر ضریب شدت تنش ($N/mm^{3/2}$) برای ترک

محوری خارجی با نسبت ($a/c = 0.8$) و ($a/t = 0.3$) در پنج مسیر

انتگرال‌گیری

کانتور اول	کانتور دوم	کانتور سوم	کانتور چهارم	کانتور پنجم
۵۷۶/۰۲۲	۵۷۳/۹۶۸	۵۶۴/۰۶	۵۶۳/۵۲۵	۵۶۸/۹۲۶

۶- اعتبارسنجی حل عددی ترک محوری داخلی

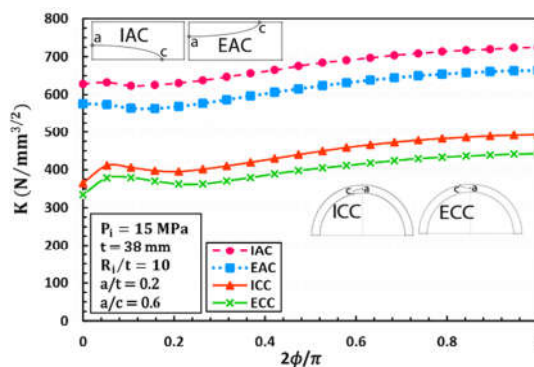
بررسی و تأیید صحت مدل‌سازی یکی از گام‌های اساسی در تحلیل‌های المان محدود است. به منظور ارزیابی دقت مدل عددی ارائه شده، نتایج بدست آمده از مدل تدوین شده در این پژوهش با نتایج ارائه شده توسط راجو و نیومن [۱۸] برای آلیاژ Cr-Mo تحت شرایط دمای ثابت، مقایسه شده است. در مدلسازی از مدول یانگ برابر با ۱۶۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ برای آلیاژ Cr-Mo استفاده شده است [۱۸]. نتایج این تطبیق در جدول ۳ برای ترک نیم‌بیضی با نسبت‌های عمق به طول ($a/c = 1.3$) و عمق به ضخامت ($a/t = 0.2$ و 0.4 و 0.6) قابل مشاهده است. مطابق جدول ۳، تطابق مناسبی میان نتایج مدل المان محدود حاضر و داده‌های نیومن و همکاران مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که برای نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۱/۳، با افزایش نسبت عمق به ضخامت ترک (a/t)، مقدار ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با فاصله گرفتن از نوک ترک و نزدیک شدن به عمق ترک، مقدار ضریب شدت تنش نیز بیشتر می‌شود. این تحلیل تأکید می‌کند که مدل عددی ارائه شده قادر است رفتار مکانیکی ترک را با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

¹ Internal Axial Crack

² Internal Circumferential Crack

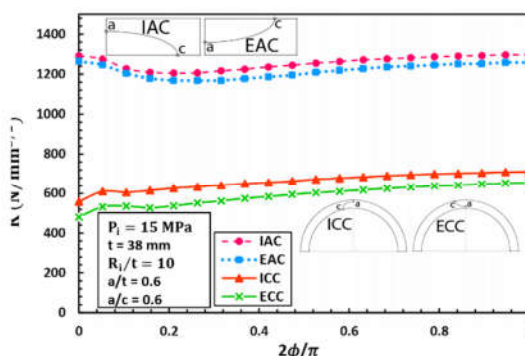
³ External Axial Crack

⁴ External Circumferential Crack



شکل ۳- مقدار ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک با نسبت عمق به ضخامت ترک برابر با ۰/۲ و نسبت عمق به طول برابر با ۰/۶

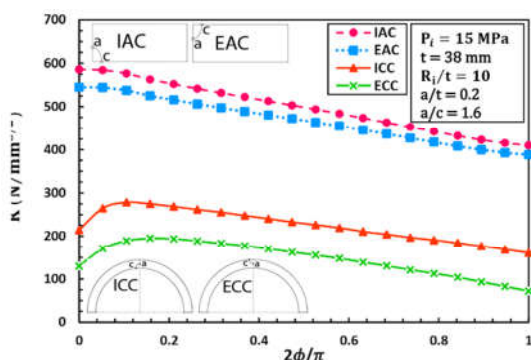
شکل ۴ مقایسه دیگری بین ترک‌های محوری و محیطی داخلی و خارجی برای مقادیر ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی این بار با نسبت عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۶ و نسبت عمق به طول (a/c) برابر با ۰/۶، ارائه داده است. یادآور می‌شود که در این حالت عمق ترک نسبت به نتایج ارائه شده در شکل ۳ بیشتر شده است. همان‌گونه که از شکل ۴ قابل مشاهده است، در این حالت نیز بالاترین نرخ شروع ترک مربوط به ترک‌های داخلی محوری و محیطی است و کمترین نرخ رشد، مربوط به ترک‌های خارجی محوری و محیطی می‌باشد. همچنین، با افزایش عمق ترک، مقدار ضریب شدت تنش نسبت به ترک‌های کم‌عمق افزایش یافته است که بیانگر تأثیر مستقیم عمق ترک بر تمرکز تنش در اطراف آن است. با این حال، در ترک‌های عمیق، چون تنش مماسی وارد بر ترک‌های داخلی و خارجی به مقدار یکسانی میل می‌کند، ضریب شدت تنش برای این دو حالت به هم نزدیک می‌شود. علاوه بر آن، مشاهده می‌شود که تغییرات ضریب شدت تنش برای نقاط مختلف ترک کمتر از حالت قبل (شکل ۳) می‌باشد. به همین دلیل در این حالت، هر دو احتمال پدیده‌های نشت و شکست وجود دارد.



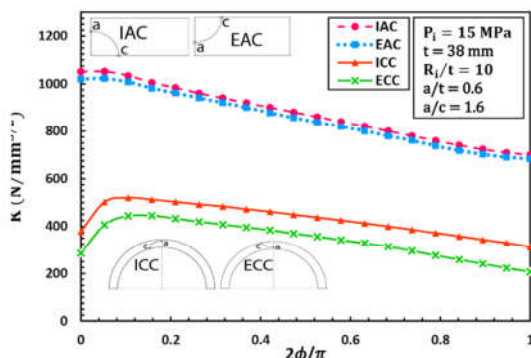
شکل ۴- مقدار ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک با نسبت عمق به ضخامت ترک برابر با ۰/۶ و نسبت عمق به طول برابر با ۰/۶

در شکل ۵ مقایسه دیگری بین ترک‌های محوری و محیطی در جهت داخلی و خارجی برای طول ترک کوتاه با نسبت عمق به ضخامت (a/t)، برابر با ۰/۲ و نسبت عمق به طول (a/c) برابر با ۱/۶ به منظور

بدست آوردن مقادیر ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی، انجام شده است. نتایج حاصل از این نمودار تأثیر طول ترک کوتاه (نسبت عمق به طول (a/c) برابر با ۱/۶) را برای هر چهار حالت ترک بیان می‌کند که ترک‌های داخلی، ضریب شدت تنش بالاتری نسبت به ترک‌های خارجی متناظر خود دارند. همچنین، در ترک‌های کوتاه‌تر، بیشینه مقدار ضریب شدت تنش در نوک ترک ($\phi = 0$) اتفاق می‌افتد که منجر به حالت ترکیبگی ناگهانی در مخزن خواهد شد که با خطرات زیادی همراه است.



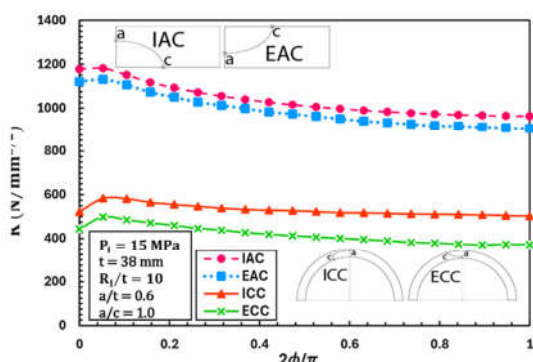
شکل ۵- مقدار ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک با نسبت عمق به ضخامت ترک برابر با ۰/۲ و نسبت عمق به طول برابر با ۱/۶



شکل ۶- مقدار ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک با نسبت عمق به ضخامت ترک برابر با ۰/۶ و نسبت عمق به طول برابر با ۱/۶

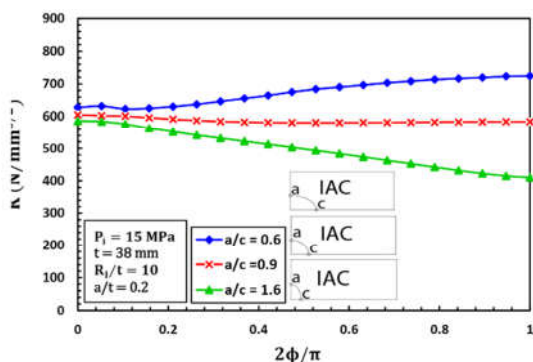
شکل ۶ نیز مقایسه نتایج مقادیر ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک‌های محوری و محیطی در جهت داخلی و خارجی با نسبت عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۶ و نسبت عمق به طول (a/c) برابر با ۱/۶ ارائه شده است. قابل ذکر است که نتایج بدست‌آمده برای ترک‌هایی با نسبت عمق به طول (a/c) برابر با ۱/۶، بیشتر از مقادیر متناظر در شکل ۵ (با نسبت عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۲) است، که بیانگر تأثیر افزایش نسبت عمق به ضخامت ترک بر تمرکز تنش است. نتایج نشان می‌دهند که در هر چهار حالت ترک سطحی، ترک‌های داخلی محوری و محیطی، همواره مقادیر ضریب شدت تنش بالاتری نسبت به ترک‌های خارجی محوری و محیطی متناظر دارند. همچنین، در ترک‌های عمیق با طول کوتاه، تنش مماسی

شکست در مخزن وجود دارد.



شکل ۸- مقدار ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک با نسبت عمق به ضخامت ترک برابر با ۰/۶ و نسبت عمق به طول برابر با ۱/۰

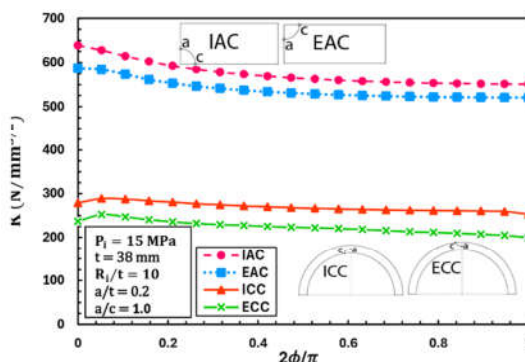
شکل ۹ تأثیر پارامترهای مختلف هندسی بر مقدار ضریب شدت تنش برای ترک محوری داخلی را ارائه می‌دهد. در این تحلیل، نسبت عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۲ و نسبت عمق به طول (a/c) در سه مقدار ۱/۶، ۰/۹ و ۰/۶ بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تغییر طول ترک تأثیر قابل توجهی بر مقدار ضریب شدت تنش دارد. برای نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۱/۶، خطر شروع گسترش ترک در نوک آن بیشینه است که می‌تواند موجب شکست ناگهانی در مخزن شود. در نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۰/۹، مقدار ضریب شدت تنش در موقعیت‌های مختلف ترک تقریباً یکنواخت شده به همین دلیل در این حالت، احتمال وقوع نشت و شکست در مخزن یکسان می‌باشد. برای نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۰/۶، روند تغییرات متفاوت است. در این حالت مقدار ضریب شدت تنش در عمق ترک افزایش یافته و ریسک رشد آن در این ناحیه بیشتر می‌شود. این تغییر رفتار می‌تواند به وقوع حالت نشت قبل از شکست، در مخزن منجر شود. بنابراین، با تغییر نسبت هندسی ترک، حالت شکست در مخزن برای نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۱/۶، به حالت نشت در نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۰/۶ تبدیل می‌شود.



شکل ۹- مقدار ضریب شدت تنش برای ترک محوری داخلی با نسبت عمق به ضخامت برابر با ۰/۲ و نسبت عمق به طول‌های ۱/۶، ۰/۹ و ۰/۶

وارد بر ترک‌های محوری داخلی و خارجی به مقدار یکسانی میل می‌کند، به همین دلیل ضریب شدت تنش برای این دو نوع ترک به هم نزدیک می‌شود و در این حالت، احتمال پدیده شکست بیشتر از نشت وجود دارد. برای ترک‌های محیطی داخلی و خارجی، نیز مقادیر ضریب شدت تنش بدست آمده در ابتدای ترک ($\phi = 0$) بیشینه است و به همین دلیل شکست ناگهانی در مخزن اتفاق خواهد افتاد.

در شکل ۷ تأثیر پارامترهای هندسی برای نسبت عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۲ و نسبت عمق به طول (a/c) برابر با ۱/۰، با هدف مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش برای ترک‌های محوری و محیطی داخلی و خارجی در محیط ترک سطحی نیم‌بیضی تحلیل شده است. نتایج نمودار برای هر چهار حالت ترک حاکی از آن است که مقدار ضریب شدت تنش در موقعیت‌های مختلف ترک یکسان است. بنابراین، احتمال شروع رشد ترک از هر دو سمت آن وجود دارد، هر چند که در ترک‌های محوری داخلی و خارجی به دلیل بالا بودن مقدار ضریب شدت تنش در نوک ترک ($\phi = 0$)، احتمال شکست کمی بیشتر از نشت است. از سوی دیگر، در ترک‌های محیطی داخلی و خارجی ریسک شروع رشد ترک تقریباً یکنواخت است، در نتیجه احتمال نشت و شکست از هر دو سمت ترک یکسان می‌باشد. در این حالت، بالاترین احتمال شروع رشد ترک مربوط به ترک‌های داخلی محوری و محیطی است و کمترین نرخ شروع رشد مربوط به ترک‌های خارجی محوری و محیطی می‌باشد.



شکل ۷- مقدار ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک با نسبت عمق به ضخامت ۰/۲ و نسبت عمق به طول ۱/۰

شکل ۸ مقایسه‌ای دیگری از مقادیر ضریب شدت تنش در محیط ترک نیم‌بیضی برای ترک‌های محوری و محیطی داخلی و خارجی با نسبت عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۶ و نسبت عمق به طول ترک (a/c) برابر با ۱/۰ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از ترک‌هایی با نسبت عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۶، بیشتر از مقادیر متناظر در شکل ۷ برای نسبت عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۲ است، که نشان‌دهنده تأثیر افزایش نسبت عمق به ضخامت ترک، بر میزان تمرکز تنش می‌باشد. میزان احتمال شروع رشد ترک برای ترک‌های محوری داخلی و خارجی در نوک ترک ($\phi = 0$) نسبتاً بیشترین مقدار است، بر این اساس احتمال شکست در مخزن وجود خواهد داشت. در مقابل، ترک‌های محیطی داخلی و خارجی نیز شروع ترک یکسانی را نشان می‌دهند و در این دو حالت می‌توان گفت که احتمال نشت یا

۸- نتایج و بحث

به منظور تحلیل دقیق تر و مقایسه تغییرات حاصل از نیم بیضوی شدن سطح ترک با افزایش نسبت عمق به طول (a/c) و افزایش نسبت عمق به ضخامت (a/t)، نتایج تحلیل المان محدود برای ترک محوری داخلی و خارجی و نیز ترک محیطی داخلی و خارجی زوایای $\phi = 0$ و $\phi = \frac{\pi}{2}$ در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مقایسه مقادیر ضرایب شدت تنش ترک های محوری و محیطی داخلی و خارجی

K (N/mm ^{3/2})	ترک محوری				مکانیزم غالب خرابی
	داخلی		خارجی		
	0	π/2	0	π/2	
φ					
a/t = ۰.۲ a/c = ۰.۶	۶۲۷.۹	۷۲۶.۷	۵۷۶	۶۶۵.۲	نشست در φ = π/2
a/t = ۰.۶ a/c = ۰.۶	۱۲۹۱.۸	۱۳۰۱	۱۲۶۴	۱۲۷۳	نشست در φ = π/2
a/t = ۰.۲ a/c = ۱.۶	۵۸۶	۴۰۸.۸	۵۴۵.۱	۳۸۷	شکست در φ = 0
a/t = ۰.۶ a/c = ۱.۶	۱۰۵۱.۳	۶۹۸.۲	۱۰۲۰	۶۸۲.۷	شکست در φ = 0
a/t = ۰.۲ a/c = ۱.۰	۶۳۸.۴	۵۵۱.۵	۵۸۷	۵۲۱	شکست در φ = 0
a/t = ۰.۶ a/c = ۱.۰	۱۱۸۷.۴	۹۶۳	۱۱۱۹	۹۰۰.۹	شکست در φ = 0
K (N/mm ^{3/2})	ترک محیطی				مکانیزم غالب خرابی
	داخلی		خارجی		
	0	π/2	0	π/2	
φ					
a/t = ۰.۲ a/c = ۰.۶	۳۶۴.۴	۴۸۷.۳	۳۳۴.۴	۴۳۷.۹	نشست در φ = π/2
a/t = ۰.۶ a/c = ۰.۶	۵۱۷.۷	۶۷۹.۸	۴۸۰.۶	۶۳۴.۹	نشست در φ = π/2
a/t = ۰.۲ a/c = ۱.۶	۲۱۴.۶	۱۸۹.۱	۱۳۰.۱	۸۷.۷	شکست در φ = 0
a/t = ۰.۶ a/c = ۱.۶	۳۷۷.۹	۳۳۷.۷	۲۸۵.۹	۲۲۰.۱	شکست در φ = 0
a/t = ۰.۲ a/c = ۱.۰	۲۷۸.۹	۲۳۰.۸	۲۳۶.۷	۱۸۶.۴	شکست در φ = 0
a/t = ۰.۶ a/c = ۱.۰	۵۲۲.۲	۵۱۵.۱	۴۴۳.۳	۳۷۲.۳	شکست در φ = 0

نتایج جدول ۴ نشان می دهد که ترک های محوری ضریب شدت تنش بالاتری نسبت به ترک های محیطی متناظر دارند و در شرایط مشابه، بحرانی تر هستند. به عنوان مثال، برای نسبت های عمق به طول (a/c) برابر با ۱/۶ و عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۶، ضریب شدت تنش ترک محوری داخلی در زاویه $\phi = 0$ بیشتر از ترک محیطی داخلی است. همچنین، ترک های داخلی در مقایسه با ترک های خارجی، در همه نسبت های عمق به طول (a/c) برابر با ۱/۶ و عمق به ضخامت (a/t) برابر با ۰/۶، ضرایب شدت تنش بالاتری نشان می دهند. این تفاوت در ترک های محوری برجسته تر از ترک های محیطی است. با افزایش عمق ترک (نسبت a/t) ضرایب شدت تنش نیز افزایش می یابند، که نشان دهنده خطر بیشتر شروع گسترش ترک های عمیق تر است. همچنین تغییر در نسبت (a/c) باعث تغییر ضرایب شدت تنش در

زوایای مختلف ϕ می شود. به طور مثال ضریب شدت تنش برای نسبت های عمق به طول (a/c) برابر با ۰/۲ و ۰/۶ در زاویه $\phi = \frac{\pi}{2}$ بیشتر از زاویه $\phi = 0$ است که نشان می دهد نوک ترک در زاویه $\phi = \frac{\pi}{2}$ تحت تنش های بیشتری قرار می گیرد. این اختلاف در ترک های عمیق، مشهودتر است. در مجموع می توان نتیجه گرفت که نوع، موقعیت و زاویه ترک تأثیر قابل توجهی بر ضریب شدت تنش دارند و باید در طراحی و ارزیابی سازه های تحت فشار به دقت مورد توجه قرار گیرند. به طور خاص ترک های محوری، به ویژه ترک های داخلی، به دلیل موقعیت و تأثیر مستقیم فشار داخلی مخزن، ضرایب شدت تنش بالاتری نسبت به ترک های محیطی دارند و باید در هنگام طراحی مخازن، به دقت بررسی شوند.

۹- نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل عددی المان محدود برای مخزن استوانه ای تحت فشار داخلی با ترک نیم بیضوی سطحی در راستای محوری و محیطی که هر یک در دو جهت داخلی و خارجی هستند تدوین شده است. رفتار این مدل به صورت سه بعدی توسط نرم افزار ABAQUS تحلیل و در حالت های مختلف، مقایسه شده است. با انجام آنالیز بر روی شرایط مسئله، نتایج زیر به دست آمده است:

- هندسه ترک تأثیر قابل توجهی بر الگوی افزایش یا کاهش ضریب شدت تنش در نمودارها دارد.
- در شرایط مشابه، ترک های داخلی در مخزن جدار ضخیم به دلیل تأثیر مستقیم فشار داخلی از اهمیت بیشتری نسبت به ترک های خارجی برخوردار هستند.
- در شرایط مشابه، خطر شروع گسترش ترک های محوری در مخزن جدار ضخیم بیشتر از ترک های محیطی است.
- با افزایش نسبت (a/c) (کاهش طول ترک با عمق ثابت)، ضریب شدت تنش کاهش یافته و تغییرات رفتار ترک در نوک آن بیشتر می شود و به شکست ناگهانی مخزن (ترکیدگی) می انجامد، که خطرات زیادی دارد.
- با کاهش نسبت (a/c) (افزایش طول ترک با عمق ثابت)، ضریب شدت تنش افزایش می یابد و احتمال شروع ترک در عمق آن بیشتر است و قبل از شکست، منجر به نشست می شود که در طراحی مخازن تحت فشار حالت مطلوبی است.
- در نسبت (a/c) برابر یک (عمق و طول ترک برابر)، احتمال شروع گسترش ترک در نوک و در عمق آن یکسان است که در این حالت خطر وقوع نشست و شکست در مخزن تقریباً یکسان است.
- ترک های سطحی محوری داخلی، ضریب شدت تنش بالاتری نسبت به ترک های سطحی محوری خارجی دارند. همچنین، ترک های سطحی محیطی داخلی نیز ضریب شدت تنش بالاتری نسبت به ترک های محیطی خارجی دارند.
- در حالت کلی ترک های محوری داخلی خطرناک ترین نوع ترک هستند که در مخزن می تواند اتفاق بیفتد.

۱۱- مراجع

- [1] Alghamdi M, Jung J. Assessing the Geometric Integrity of Cylindrical Storage Tanks: A Comparative Study Using Static Terrestrial Laser Scanning and Total Station. Korean Journal of Remote Sensing. 2024;40(3):243-55.
- [2] Cheng Q, Zhang R, Shi Z, Lin J. Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners. International journal of lightweight materials and manufacture. 2024 Mar 1;7(2):269-84.
- [3] Rompokos P, Rolt A, Nalianda D, Sibilli T, Benson C. Cryogenic fuel storage modelling and optimisation for aircraft applications. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air; 2021 Jun 7 : American Society of Mechanical Engineers.
- [4] Chandra C, Kiranchand G, Teja CK, Srinivasarao B, Babu MN, Narasaiah N. Crack growth behaviour of P91 steel under trapezoidal loading at high temperature. Procedia Structural Integrity. 2024 Jan 1;60:165-76.
- [5] Cui P, Guo W. A predicting model for three-dimensional crack growth in power-law creeping solids. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2022 Nov 1;168:105029.
- [6] Cao M, Tang L, Zhong X, Tang L. Stress Intensity Factor of Surface Cracks in the Tubing of High-Temperature and High-Pressure Deep Wells. Arabian Journal for Science and Engineering. 2025 Apr;50(7):4913-26.
- [7] Li Y, Hu T, Li Q, Wu Y, Wang L, You Y, Wang B. Evaluation of the stress corrosion crack growth behaviour of high-strength marine steel based on model of crack tip mechano-electrochemical effect. Journal of Materials Science & Technology. 2024 Aug 10;190:93-105.
- [8] Cui J, Li H, Qian C, Wu Z. Study on the Stress Intensity Factor of Tilt Crack on the Inner Surface of Pipeline. In Journal of Physics: Conference Series; 2024 Sep 1: IOP Publishing.
- [9] Huang J, Wang H, Zhou L, Zhu Z, Deng Z, Deng A. Analysis of stress intensity factor for a crack emanating from elliptical hole subjected to compressive stress and shear stress. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2022 Aug 1;120:103413.
- [10] Campilho RD, Madani K, Belhouari M. Introduction to Fracture Mechanics. Complimentary Copy. 2024:1.
- [11] El-Sayed M, El Domiaty A, Mourad AH, Thekkuden DT. Leak before break fracture assessment of pressurized unplasticized PVC pipes with axial surface crack: Experimental and analytical analysis. Engineering Fracture Mechanics. 2022 May 1;266:108394.
- [12] BAlAc M, GrBovic A, Petrovic A, Popovic V. FEM analysis of pressure vessel with an investigation of crack growth on cylindrical surface. Eksploatacja i Niezawodność. 2018;20(3).
- [13] Bong Yoon K, Gyu Park T, Saxena A. Creep crack growth analysis of elliptic surface cracks in pressure vessels. The International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2003;80(7-8):465-79.
- [14] Reda R, Ashraf A, Magdy I, Ragab M, Eldabaa N, Abo Elmagd M, et al. An investigation on the potential of utilizing aluminum alloys in the production and storage of hydrogen gas. Materials. 2024 Aug 14;17(16):4032.
- [15] Seraj F, Fadaie-Vash L, Vakili-Tahami F, Adibeig MR. Obtaining optimum creep lifetime of Al 7075-T6 rotating pressurized vessel based on the experimental data, using reference stress method (RSM). International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2021 Aug 1;192:104390.
- [16] Lin XB, Smith RA. Finite element modelling of fatigue crack growth of surface cracked plates: Part I: The numerical technique. Engineering Fracture Mechanics. 1999 Jul 1;63(5):503-22.
- [17] Kim Y-J, Kim J-S, Lee Y-Z, Kim Y-J. Non-linear fracture mechanics analyses of part circumferential surface cracked pipes. International Journal of Fracture. 2002 Aug;116(4):347-75.
- [18] Wen J-F, Tu S-T, Gong J-M, Sun W. Creep fracture mechanics parameters for internal axial surface cracks in pressurized cylinders and creep crack growth analysis. International journal of pressure vessels and piping. 2011;88(11-12):452-64.
- [۱۹] امین ز، سید مهدی ن. آنالیز ضریب شدت تنش جبهه ترک نیم بیضوی محیطی عمیق در استوانه جدار نازک به روش اجزا محدود سه بعدی. اولین همایش ملی مهندسی سازه، تهران، ایران ۱۳۹۳.

- با افزایش عمق ترک و تمرکز بیشتر تنش در نوک آن، ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد، که این امر خطر شروع گسترش ترک‌های عمیق را نسبت به ترک‌های کم عمق بیشتر می‌کند.
- ضریب شدت تنش در ترک‌های عمیق، به دلیل تنش مماسی وارد بر ترک‌های داخلی و خارجی به مقدار یکسانی میل می‌کند، که مقدار ضریب شدت تنش برای این دو حالت به هم نزدیک می‌شود.

۱۰- فهرست علائم و نمادها

a	عمق ترک (mm)
c	نصف طول ترک نیم بیضوی (mm)
E	مدول الاستیسیته (Pa)
G_i	ثوابت تأثیر شدت تنش
K	ضریب شدت تنش ($N/mm^{3/2}$)
K_I	ضریب شدت تنش در مود یک ($N/mm^{3/2}$)
K_{IC}	مقدار بحرانی ضریب شدت تنش در مود یک ($N/mm^{3/2}$)
p	فشار (Pa)
P_C	فشار رویه ترک (Pa)
Q	ضریب شکل
r	شعاع (m)
r_p^*	شعاع پلاستیک موثر (m)
R	شعاع منحنی سطح (m)
t	ضخامت سیلندر (mm)
u	جابجایی شعاعی (m)
x	فاصله از سطح سیلندر (m)
IAC	ترک سطحی محوری داخلی
ICC	ترک سطحی محیطی داخلی
EAC	ترک سطحی محوری خارجی
ECC	ترک سطحی محیطی خارجی

علائم یونانی

σ	تنش (Pa)
ν	ضریب پواسون
γ	کشش سطحی مایع داخل ترک (N/m)
α	زاویه بازشدگی ترک (درجه)
ϕ	پارامتر زاویه‌ای ترک (درجه)

زیر نویس‌ها

i	داخلی
o	خارجی
r	شعاعی
θ	زاویه‌ای

- [40] Zhang Y, Yang L, Fan Z, Pang S, Chen W. Evaluation of tensile creep behavior of spray formed and extruded 7075 aluminum alloy by equivalent stress. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023 Jan 1;22:1476-90.
- [20] Rege K, Pavlou DG. Stress intensity factors for circumferential through-wall cracks in thin-walled cylindrical shells subjected to tension and torsion. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2019 May;42(5):1062-74.
- [21] Ayhan AO, Kurt E. Three-dimensional mixed-mode stress intensity factors for deflected external surface cracks in thin and midsize-thick-walled spherical pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2022 Feb 1;195:104596.
- [۲۲] سیدمحمدحسین ش، غلامرضا ر، هادی ا، محمدامین م. تاثیرپذیری ضریب شدت تنش از پارامترهای هندسی ترکدار مخازن استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی و فشار داخلی. دومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران، ایران ۱۳۹۶.
- [23] Şahin H, Ayhan AO, Yaren MF. Three-dimensional mixed-mode stress intensity factor solutions for inclined surface cracks in plate structures subjected to uniaxial and biaxial uniform tensile loading. *Marine Structures*. 2024 Jul 1;96:103631.
- [24] Nabavi SM, Zareei A. Determination of steady state thermal stress intensity factors for semi-elliptical circumferential cracks in cylinders. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2018 Feb 20;49(4):665-72.
- [25] Glunt N, Udyawar A, Ng C. Stress Intensity Factor Influence Coefficients for Semi-Elliptical Axial Surface Flaws for Cylindrical Components With Large Thickness to Radius Ratios. *Pressure Vessels and Piping Conference*; 2014 Jul 20: American Society of Mechanical Engineers.
- [۲۶] حامد سعیدی گ، رحمت الله ق، زهره س. تعیین ضریب شدت تنش ترک‌های سطحی در استوانه‌ای جدارضخیم تحت فشار با گرادیان محوری. بیست و یکمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، تهران، ایران ۱۳۹۲.
- [27] Zhu XK, Wiersma B, Johnson WR, Sindelar R. Burst pressure solutions of thin and thick-walled cylindrical vessels. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2023 Aug 1;145(4):041303.
- [28] Blassat S, Hartmann M, Courtin E, Nicaise N, Nana A. Leak-before-break and other concepts of break-exclusion. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2024 Jun 1;209:105197.
- [29] Wilkowski GM, Olson RJ, Scott PM. State-of-the-art report on piping fracture mechanics. US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC (United States). Div...; 1998 Jan 1.
- [30] Kannan P, Amirthagadeswaran KS, Christopher T, Rao BN. A simplified approach for assessing the leak-before-break for the flawed pressure vessels. *Nuclear Engineering and Design*. 2016 Jun 1;302:20-6.
- [31] da Silva IGF, de Andrade AHP, Monteiro WA. Leak-before-break methodology applied to different piping materials: a performance evaluation. *Fracture and Structural Integrity*. 2019 Aug 10;13(50):46-53.
- [32] Zhang L, Wang C, Tan T, Chen L, Xu Y. Experimental verification of characteristic parameter analysis method for pipeline leak before break. *Journal of Physics: Conference Series*; 2024 Sep 1: IOP Publishing.
- [۳۳] خلیل فرهنگ د، پیمان ه. بررسی فاکتور شدت تنش در مخازن تحت فشار با روش المان محدود. نهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید، بیرجند، ایران ۱۳۸۷.
- [34] Alekseev AT, Alekseev PV, Loskutov OD, Tutnov AA. An approach to the probabilistic justification of a leak before break concept and break elimination for VVER secondary circuit pipelines. *Atomic Energy*. 2024 Mar;135(5):275-82.
- [35] Murakami Y. *Theory of elasticity and stress concentration*: John Wiley & Sons; 2016 Nov 30.
- [36] Ritchie RO, Liu D. *Introduction to fracture mechanics*. Elsevier; 2021 May 27.
- [37] Woodford DA. *Mechanical behaviour of materials*: Norman E. Dowling Prentice-Hall, 1993, ISBN 0-13-579046-8, 773 pp.
- [38] Irwin GR. *Fracture of pressure vessels. Materials for missiles and spacecraft*. 1963:204-29.
- [39] Tan XM, Wang GZ, Tu ST, Xuan FZ. Comparisons of creep constraint and fracture parameter C^* of different types of surface cracks in pressurized pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2019 May 1;172:360-72.