



پیشنهاد یک نمونه جدید تست خستگی به منظور بررسی رفتار رشد ترک در مخازن استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار

احسان محمدی^۱، محمود شریعتی^{۲*}، مجید میرزایی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی ۳۱۶، mshariati@shahroodut.ac.ir

چکیده- در این مقاله، هدف ارائه یک نمونه هندسی جدید جهت تست خستگی تعیین رفتار رشد ترک نیمه بیضوی در دیواره مخازن استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار می‌باشد. در این پژوهش، رفتار رشد ترک در نمونه پیشنهادی به شکل مطلوب‌تری نسبت به نمونه‌های استاندارد، در مقایسه با رفتار رشد ترک در حالت واقعی، معادل‌سازی گردیده است. بدین معنی که تطابق بیشتری بین مقادیر ضریب شدت تنش در نمونه آزمایش و مخزن واقعی حاوی ترک در راستای دیواره در حین بارگذاری خستگی حاصل شود و در نتیجه سازگاری بهتری در رفتار رشد ترک خستگی و عمر قطعه بر حسب سیکل‌های بارگذاری به صورت عملی به دست آید. با معرفی نمونه جدید، نتایج حاصل از بارگذاری خستگی بر روی نمونه پیشنهادی با نتایج حاصل از بارگذاری خستگی مخزن و نمونه‌های استاندارد فعلی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. رفتار رشد ترک خستگی در نمونه پیشنهادی و مخزن تحت فشار با روش اجزای محدود (FEM) و روش تجربی محاسبه شده است. به منظور مقایسه نتایج اجزای محدود با نتایج تجربی، چند قطعه با هندسه نمونه جدید از جنس فولاد CK45 ساخته شده و تحت آزمون خستگی قرار گرفتند. نتایج حاصل از دو روش انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

کلیدواژه‌گان: ترک نیمه بیضوی، مخزن تحت فشار استوانه‌ای، ضریب شدت تنش، نمونه استاندارد، خستگی

A new fatigue test specimen in order to study of behavior of crack growth in thick-walled pressure vessels

E. Mohammadi¹, M. Shariati^{2*}, M. Mirzaei³

1- MSc., Mech. Eng., Shahrood Univ. of Technology, Shahrood, Iran

2- Prof., Mech. Eng., Shahrood Univ. of Technology, Shahrood, Iran

3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

* P. O. B. 361995161 Shahrood, mshariati@shahroodut.ac.ir

Abstract- The aim of this paper is design of a new geometrical specimen in fatigue to define the behavior of semi elliptical crack growth in thick-walled pressure vessels. This research emphasizes on the importance of the behavior of fatigue crack in test specimen and real conditions in vessels. In other word, there must be more adaptations between stress intensity factor in new specimen and real vessel that includes crack along the wall, so, under Fatigue loadings, as a result, more adaptation will be obtained between growth speed and relative crack lifetime according to loading cycles. By introducing this new specimen we compare the results of fatigue loading on propositional new specimen with results of vessel fatigue loading and standard specimen. We estimate the behavior of fatigue crack growth in specimen and pressure vessel with (FEM) and experimental method. In order to comparing of limit component with experimented results, some piece of with new specimen made of steel (Ck45) can be used and all of these must be under fatigue testing and results are obtained in these methods.

Keywords: Semi Elliptical Crack, Cylindrical Pressure Vessel, Stress Intensity Factor, Standard Specimen, Fatigue

۱- مقدمه

امروزه مخازن تحت فشار از لحاظ عملکرد، هندسه و نوع سیال تحت فشار به طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شوند. مخازن تحت فشار را می‌توان به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد [۱]:

۱- عملکرد: منابع ذخیره‌سازی، راکتورها، دیگ‌های بخار، مبدل‌های حرارتی

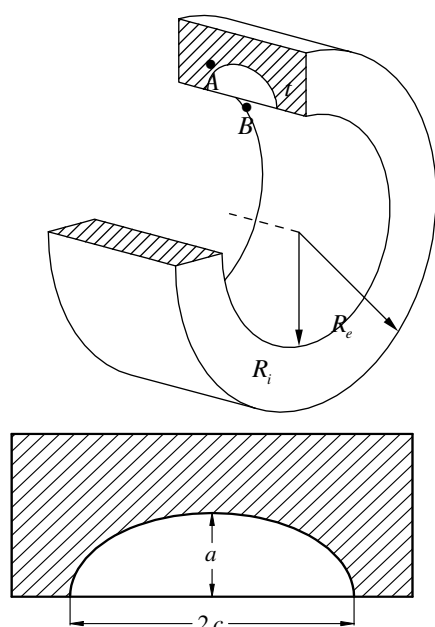
۲- هندسه: کروی، استوانه‌ای، استوانه‌ای با انتهای کروی، بیضوی یا مخروطی

۳- سیال تحت فشار: آب، انواع گازهای طبی، سوختی و یا صنعتی، انواع اسیدها و بازها با میزان خوردگی متفاوت

تا کنون تحقیقات بی‌شماری پیرامون مخازن استوانه‌ای تحت فشار انجام گردیده است که بیشترین تعداد این تحقیقات با اختلاف قابل توجهی مربوط به بررسی رشد ترک در این مخازن می‌باشد که این شاخص آماری خود گویای اهمیت بررسی رشد ترک در مخازن استوانه‌ای است. مرجع [۲] مقایسه جامعی پیرامون این تحقیقات ارائه می‌دهد.

در تحلیل مخازن استوانه‌ای جدارنازک، فرض بر ثابت بودن تنش کششی در راستای ضخامت دیواره می‌باشد، در حالی که در تحلیل مخازن جدارضخیم، توزیع تنش واقعی مد نظر قرار می‌گیرد. مخازن تحت فشار استوانه‌ای را می‌توان با خم کردن ورق‌های صاف و جوش دادن آن‌ها به یکدیگر و یا به صورت یکپارچه تولید کرد. از طرفی علاوه بر اینکه در حین تولید ممکن است عیوب سطحی در مخزن ایجاد شود، در بسیاری از موارد، علت اصلی خرابی مخازن تحت فشار خوردگی سطح داخلی مخزن در اثر ایجاد یک محیط نامساعد اسیدی و یا اکسیدشدن آن ناحیه در حضور سیال داخل مخزن است. در اثر این خوردگی‌ها، عیوب سطحی ریزی به صورت رشته‌ای از تخلخل‌های کوچک ایجاد شده و سبب ایجاد یک تمرکز تنش سطحی در ناحیه خوردگی می‌گردند. در مواردی که مخزن دارای خط جوش می‌باشد، ممکن است رشد ترک از همان عیوب سطحی ایجاد شده در خط جوش آغاز گردند. این عیوب سطحی رشته‌ای منشأ ایجاد و رشد ترک‌های نیمه‌بیضوی ریزی هستند که تا حدی رشد کرده و سپس به یکدیگر می‌پیوندند و مسیر خود را تا تبدیل شدن به یک ترک نیمه‌بیضوی بزرگ‌تر طی می‌کنند (شکل ۱). چنانچه اطلاعات و دیدگاه مناسبی نسبت به رشد این ترک‌های نیمه‌بیضوی موجود نباشد، نهایتاً با

رشد آن‌ها و رسیدن به طول ترک بحرانی، زوال رخ خواهد داد. از این رو، با دانستن معادلات حاکم بر رفتار ترک، می‌توان تخمینی از عمر مخزن را به دست آورد و از احتمال انفجار مخزن پیشگیری کرد [۳-۴].



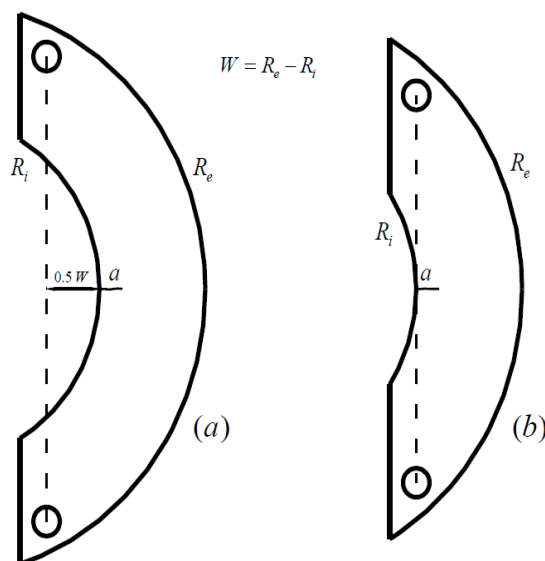
شکل ۱ نمایشی از یک ترک طولی نیمه‌بیضوی در مقطع دیواره یک مخزن استوانه‌ای جدار ضخیم

تحقیقاتی که تا کنون انجام گرفته است منجر به یافتن راه‌های جدید و سریع جهت پیش‌بینی ضریب شدت تنش در نقاط مختلف یک ترک نیمه‌بیضوی تحت انواع بارهای ترکیبی شده است. از جمله این روش‌ها، می‌توان به روش توابع وزنی در مورد ترک‌های نیمه‌بیضوی اشاره کرد [۵-۶]. همچنین، پژوهش‌هایی پیرامون خرابی مخازن حاوی ترک با اعمال فشار بحرانی و منظور کردن تنش اعمالی به مقطع ترک نخورده نیز صورت گرفته است [۷]. هندسه ترک نیز تحت بارگذاری‌های خستگی از دیگر زمینه‌های مورد بررسی بوده است [۸-۱۰]. اما، با وجود پژوهش‌های بسیار در زمینه ترک‌های نیمه‌بیضوی در مخازن استوانه‌ای، در آزمون‌های تجربی همواره هندسه نمونه‌های استاندارد موجود به عنوان مبنای اندازه‌گیری داده‌های تجربی استفاده شده است. با این حال، در سالیان اخیر، تلاش قابل توجهی برای معرفی نمونه‌هایی با رفتاری واقع بینانه‌تر برای رشد ترک خستگی در مخازن انجام نگرفته است.

۲- نمونه‌های آزمایش

۲-۱- نمونه‌های استاندارد موجود

برای بررسی رفتار ترک خستگی در مخازن استوانه‌ای، استاندارد ASTM - E399 دو نمونه تست را تحت عنوان نمونه‌های قوسی شکل، با هندسه‌ای که در شکل ۲ نمایش داده شده است، معرفی می‌نماید [۱۱].

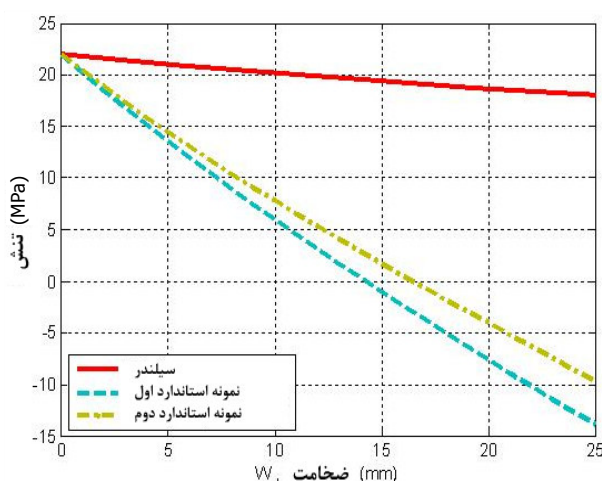


شکل ۲ نمونه‌های قوسی استاندارد برای تحلیل رشد ترک در مخازن و لوله‌ها، (a) نمونه نوع اول، (b) نمونه نوع دوم [۱۱]

نمونه‌های فوق را می‌توان به عنوان نمونه‌های تقریبی استاندارد برای پیش‌بینی رفتار رشد ترک‌ها، اعم از ترک‌های نیمه‌بیضوی و یا سراسری، در مخازن تحت فشار مورد استفاده قرار داد. رفتار رشد ترک خستگی در نمونه‌های استاندارد فوق به طور کامل منطبق بر رفتار رشد ترک خستگی در ترک‌های موجود در دیواره مخازن جدار ضخیم تحت فشار نمی‌باشد، زیرا توزیع تنش در این نمونه‌ها هماهنگ با توزیع تنش واقعی در دیواره مخازن نیست. لذا هدف از این تحقیق، بهبود رفتار رشد ترک خستگی در نوک یک ترک نیمه‌بیضوی در عمق دیواره مخزن (نقطه A) در شکل ۱ می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان اختلافی را که میان طول عمر یک مخزن تحت فشار حاوی یک ترک نیمه‌بیضوی و نمونه‌های استاندارد فعلی تحت شرایط رشد ترک برابر وجود دارد تا حد امکان کاهش داد. در واقع، با یکسان قرار دادن عمق اولیه یک ترک نیمه‌بیضوی در دیواره یک مخزن

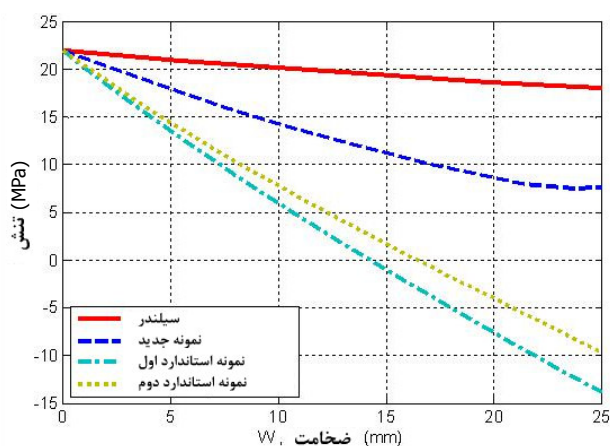
تحت فشار با طول ترک اولیه در نمونه آزمون، هدف یافتن هندسه‌ای جدید برای نمونه است که رفتار ترک خستگی آن تا لحظه شکست تا حد امکان به رفتار مکان هندسی نوک ترک در عمق ترک نیمه‌بیضوی، با نسبت a/c اولیه معلوم، نزدیک باشد. باید توجه داشت این مسئله در شرایطی صادق است که ضریب شدت تنش بحرانی در نوک ترک در عمق دیواره رخ دهد نه در نوک ترک واقع بر روی سطح داخلی مخزن.

توزیع تنش در یک مخزن واقعی در طول دیواره تماماً کششی است، حال آنکه در نمونه‌های استاندارد فعلی چنین نمی‌باشد؛ یعنی توزیع تنش در نزدیکی دیواره داخلی نمونه‌ها کششی و در نزدیکی دیواره خارجی آن‌ها فشاری است. وضعیت تنش‌ها برای نمونه‌های استاندارد و دیواره واقعی مخزن نسبت به عرض نمونه‌ها و ضخامت مخزن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مقادیر تنش‌ها در نمونه‌های استاندارد، در مقادیر عرض بیشتر از حدود ۱۵ میلی‌متر، منفی می‌شود، حال آنکه مقادیر تنش در دیواره مخزن واقعی در طول ضخامت آن همواره مثبت است. همین موضوع باعث می‌گردد که طول عمر خستگی پیش‌بینی شده توسط نمونه‌های استاندارد با طول عمر واقعی مخزن تفاوت داشته باشد. علاوه بر آن، در نمونه‌های استاندارد، شدت تغییرات تنش در نزدیکی دیواره داخلی زیاد است و همین موضوع سبب می‌شود تا این نمونه‌ها دقت کافی در پیش‌بینی رفتار ترک را نداشته باشند.



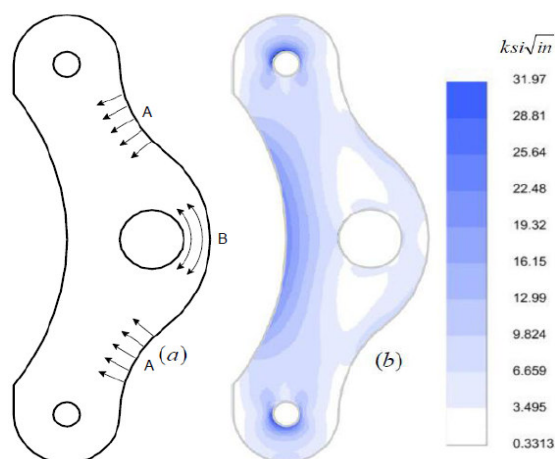
شکل ۳ مقایسه منحنی‌های توزیع تنش در راستای دیواره بین مخزن تحت فشار و نمونه‌های استاندارد

راستای دیواره تماماً کششی می‌باشند، از شدت تغییرات تنش در نزدیکی دیواره داخلی نیز به میزان قابل توجهی کاسته شده است. در مقایسه با نمونه جدید، تفاوت چندانی بین دو نمونه استاندارد موجود دیده نمی‌شود.



شکل ۵ مقایسه منحنی‌های توزیع تنش در راستای دیواره بین مخزن تحت فشار، نمونه‌های جدید و نمونه‌های استاندارد

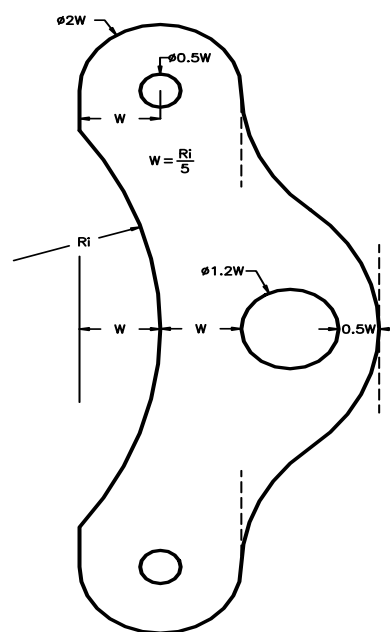
در نمونه جدید، وجود انحنایی که در ناحیه A در شکل ۶ مشاهده می‌شود، سبب ایجاد بارهای فشاری ملایمی در نواحی دیواره داخلی در راستای ضخامت نمونه شده و موجب کاهش تغییرات سریع تنش در امتداد دیواره خارجی می‌گردد. از طرفی ناحیه B نیز با تحمل بارهای فشاری ناشی از ممان خمشی ایجادشده در اثر نیروی اعمالی، باعث حذف نسبی این بارهای فشاری در نواحی دیواره خارجی می‌گردد.



شکل ۶ (a) شماتیک نحوه عملکرد نمونه جدید از لحاظ توزیع نیروهای داخلی، (b) نمایشی از کانتورهای توزیع تنش در نمونه جدید

۲-۲- نمونه آزمایش پیشنهادی جدید

در واقع اگر بتوان نمونه‌ای ارائه داد که در آن توزیع تنش به گونه‌ای باشد که تنش‌ها در طول ضخامت دیواره کششی باشند، به طوری که از شدت تغییرات تنش در نزدیکی دیواره داخلی نیز کاسته شود و منحنی ضریب شدت تنش در حین رشد ترک در طول دیواره نمونه بیشترین تطابق را با منحنی ضریب شدت تنش در نوک ترک در عمق دیواره مخزن داشته باشد، شاید آن نمونه، نمونه‌ای ایدئال برای بررسی رشد ترک در مخازن تحت فشار باشد. پس از تحلیل هندسه‌های مختلف، نمونه‌ای با هندسه خاص، مطابق آنچه در شکل ۴ دیده می‌شود، انتخاب گردید. این نمونه هم از نظر منحنی توزیع تنش در راستای دیواره و هم از لحاظ منحنی ضریب شدت تنش نسبت به نمونه‌های استاندارد فعلی، مطابقت بیشتری با منحنی‌های توزیع تنش و ضریب شدت تنش در دیواره یک مخزن تحت فشار دارد.



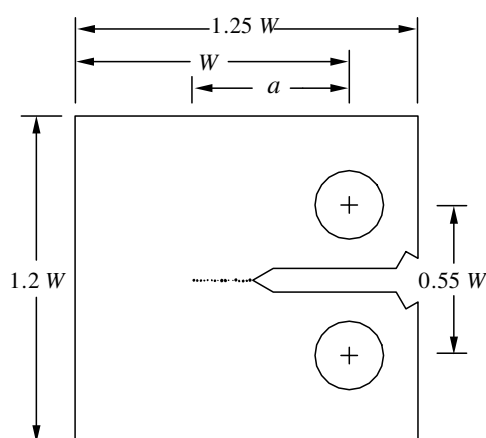
شکل ۴ هندسه نمونه پیشنهادی جدید بر اساس ملاحظات مکانیک شکست

در شکل ۵، منحنی توزیع تنش در دیواره نمونه‌های استاندارد، نمونه جدید و دیواره مخزن، تحت یک تنش برابر در دیواره داخلی برای یک ماده خاص (فولاد Ck45) با مشخصات جدول ۱ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه جدید علاوه بر آنکه مؤلفه‌های تنش در

$$K_I = \frac{T}{t\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

که در آن K_I ضریب شدت تنش، T نیروی اعمالی به نمونه، t ضخامت نمونه، W عرض نمونه و $f(a/W)$ تابعی از نسبت طول ترک a به عرض نمونه W است که از رابطه $f(x)$ تبعیت می‌کند.

$$f(x) = (2+x)(1-x)^{-3/2} \\ \times (0.886 + 4.64x - 13.32x^2 + 14.72x^3 - 5.64x^4)$$



شکل ۷ هندسه نمونه CT

نحوه به‌دست آوردن پارامترهای C و n در جدول ۱ از ترسیم منحنی da/dN بر حسب ΔK در مقیاس لگاریتمی حاصل می‌شود؛ بدین ترتیب که شیب ناحیه خطی برابر n و عرض از مبدا آن برابر $\text{Log}(C)$ می‌باشد. شکل ۸ منحنی عمر خستگی بر حسب طول ترک برای نمونه CT مورد آزمایش را نشان می‌دهد. این منحنی با منحنی حاصل از به‌کارگیری رابطه (۱) توسط نرم‌افزار نسگرو برای محاسبه ضریب شدت تنش و عمر نمونه، با استفاده از مشخصات به‌دست آمده برای جنس ماده در جدول ۱، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مطابقت بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و روش اجزای محدود دیده می‌شود که حاکی از دقتی است که در به‌دست آوردن مشخصات مکانیکی ماده مورد آزمایش به‌کار گرفته شده است. همچنین در شکل ۹ منحنی da/dN بر حسب ΔK برای ماده مورد آزمایش برای دو نمونه CT (تجربی) و نمونه جدید (اجزای محدود) در مقیاس لگاریتمی ترسیم شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور

۳- تحلیل مسئله به روش اجزای محدود (FEM)

نتایج تحلیل عددی برای نمونه جدید توسط نرم‌افزار FRANC2D^۱، که نرم‌افزاری جهت تحلیل اجزای محدود و به‌طور ویژه بررسی رشد ترک در هندسه‌های دوبعدی می‌باشد، انجام گرفته است. این نرم‌افزار توسط محققان دانشگاه کورنل تهیه و در اختیار عموم قرار گرفته است. نرم‌افزار دیگر مورد استفاده، نرم‌افزار نسگرو^۲ می‌باشد. این نرم‌افزار توسط سازمان فضایی ایالات متحده، ناسا، تهیه شده است و برای تحقیقات پیرامون رشد ترک خستگی در هندسه‌ها و بارگذاری‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار قادر است از معادلات مختلف رشد ترک خستگی به منظور پیش‌بینی عمر خستگی نمونه استفاده نماید. همچنین، در این نرم‌افزار مباحث مربوط به خرابی در اثر تنش خالص مقطع در حضور ترک نیز در پیش‌بینی عمر قطعه بررسی می‌شود. از ویژگی‌های دیگر این نرم‌افزار می‌توان به بهره‌گیری از روش توابع وزنی برای برخی از هندسه‌ها از جمله ترک نیمه‌بیضی در یک مخزن اشاره کرد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمون خستگی نمونه CT برای ماده مورد آزمایش (نوعی فولاد با نام تجاری CK45) و خواص مکانیکی ماده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات ماده مورد آزمایش

E (Mpa)	σ_{ys} (Mpa)	σ_{ult} (Mpa)	C	n	$\Delta K_{th} _{R=0}$ (Mpa $\sqrt{\text{mm}}$)	$K_{cI} _{l=10\text{mm}}$ (Mpa $\sqrt{\text{mm}}$)
۲۰۲۰۰۰	۵۵۰	۶۲۰	۲/۱۶E-۱۵	۳/۶۹	۶۹۴	۱۵۹۷

دستگاه آزمون دستگاه هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ است که توسط یک رایانه کنترل می‌گردد و قادر است انواع بارهای خستگی را برای آزمون‌های رشد ترک خستگی مطابق با استاندارد ASTM E647 اعمال نماید. هندسه و ابعاد یک نمونه CT در شکل ۷ نشان داده شده است که مطابق استاندارد ASTM E24، ضریب شدت تنش در نوک ترک از طریق رابطه (۱) قابل محاسبه است.

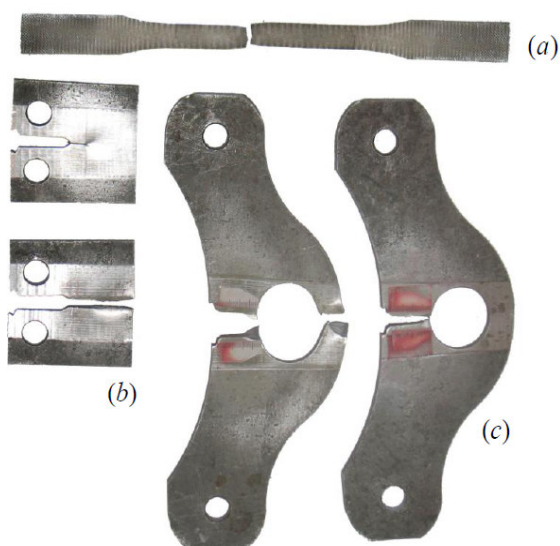
1. FRacture ANalysis Code
2. NASGRO



شکل ۱۰ تصویری از نمونه جدید که بر روی دستگاه جهت انجام آزمون خستگی قرار گرفته است

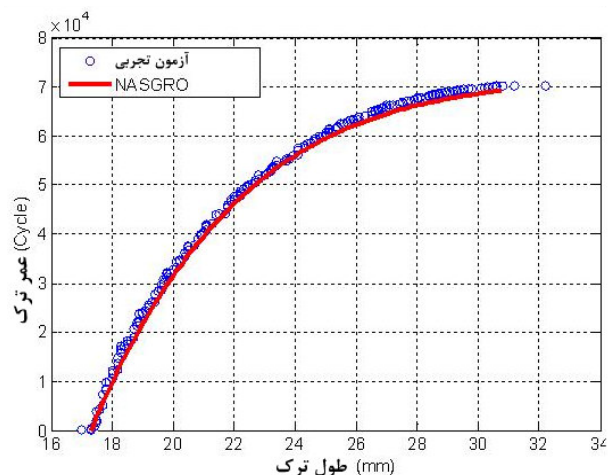
جدول ۲ مشخصات هندسه ترک در نمونه جدید

R_i (mm)	$W = R_e - R_i$ (mm)	ضخامت (mm)	طول ترک اولیه (mm)
۱۲۵	۲۵	۱۰	۶

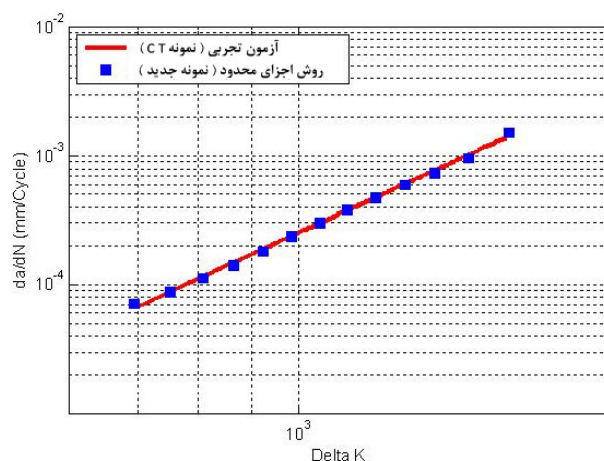


شکل ۱۱ نمایشی از نمونه‌های مورد آزمایش پس از آزمون‌های کشش و خستگی، (a) نمونه استاندارد تست کشش (b) نمونه CT و (c) نمونه تست پیشنهادی جدید

که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، با آنکه هندسه نمونه‌ها متفاوت است، مطابقت بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد.



شکل ۸ مقایسه منحنی طول عمر ترک نمونه CT به دست آمده از نرم‌افزار نسگرو با نتایج حاصل از آزمون تجربی خستگی

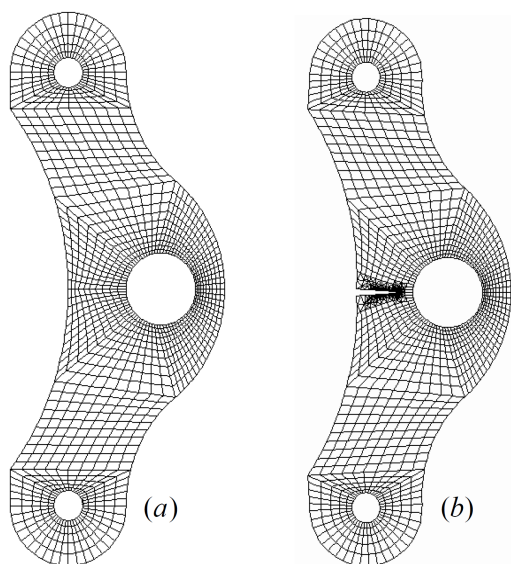


شکل ۹ مقایسه منحنی da/dN بر حسب ΔK حاصل از آزمون تجربی خستگی نمونه CT و نتایج تحلیل اجزای محدود رشد ترک خستگی در نمونه جدید

۵- آزمون خستگی نمونه جدید

سه قطعه مطابق با هندسه نمونه جدید توسط یک دستگاه وایرکات CNC با دقت 0.01 mm ساخته شدند و مطابق شکل ۱۰ تحت بارگذاری متناوب جهت تست عمر خستگی قرار گرفتند. ابعاد نمونه و هندسه ترک اولیه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. تصویر نمونه‌های استاندارد کشش، CT و نمونه جدید در انتهای آزمایش‌های مربوطه در شکل ۱۱ آورده شده‌اند.

چه از لحاظ طول عمر خستگی و چه از لحاظ شکل منحنی طول عمر بر حسب طول ترک برقرار است. در نمونه سوم تحت آزمایش اختلافی بین نتایج آزمون و تحلیل اجزای محدود مشاهده می‌گردد که بیانگر افزایش طول عمر خستگی می‌باشد که این مسئله می‌تواند ناشی از عدم تقارن دقیق در بارگذاری و در نتیجه جابه‌جایی نقطه خرابی نهایی از عمق ترک باشد. شکل ۱۴ نیز نحوه شبکه‌بندی نمونه را جهت تحلیل اجزای محدود نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی نمونه جدید، می‌توان گفت آزمون‌های عملی مؤید نتایج تحلیل اجزای محدود در پیش‌بینی نحوه رشد ترک خستگی‌اند.

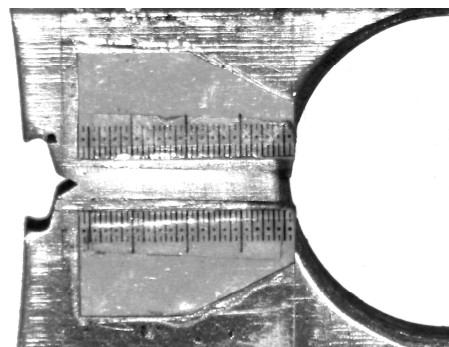


شکل ۱۴ نحوه شبکه‌بندی نمونه جدید برای تحلیل اجزای محدود، (a) نمونه بدون ترک (b) نمونه ترک‌دار

۶- ملاک طراحی بر اساس رشد ترک خستگی

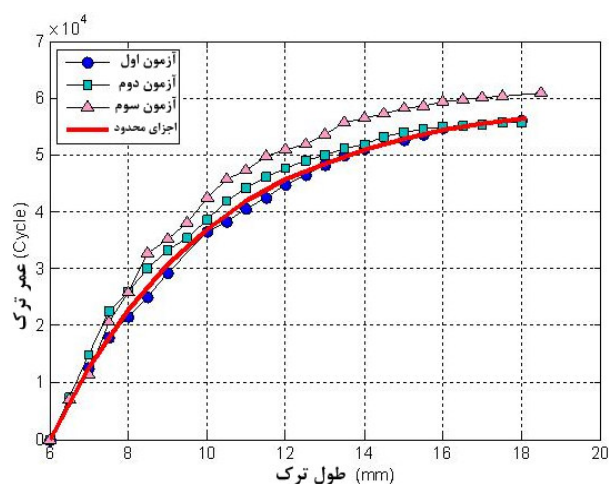
در مبحث طراحی مربوط به رشد ترک خستگی در مخازن جدارضخیم تحت فشار، باید توجه کرد که یافتن اطلاعاتی دقیق پیرامون هندسه ترک ایجادشده در یک مخزن تحت فشار کار چندان ساده‌ای نیست. از این رو باید بدترین حالت به معنای محتاطانه‌ترین وضعیت ممکن را در نظر گرفت تا بتوان از دیدگاه طراحی بر اساس تحمل خرابی، مسئله رشد ترک در مخازن تحت فشار را، با ضریب ایمنی مناسب، مورد بررسی قرار داد. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، با افزایش نسبت a/c از ۰/۱ به ۰/۲ برای ماده مورد آزمایش، خرابی بر روی سطح داخلی در نقطه B رخ می‌دهد؛ علاوه بر آنکه طول

برای خواندن صحیح طول ترک، مطابق شکل ۱۲، شاخص‌هایی بر روی نمونه‌های جدید در دو سمت ترک مقابل یکدیگر نصب شده و برای تشخیص هر چه دقیق‌تر مکان نوک ترک و به دلیل سهولت کاربرد، از روش مایع نافذ استفاده شد.



شکل ۱۲ نمایی از شاخص نصب‌شده بر روی نمونه‌های جدید به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری طول ترک خستگی

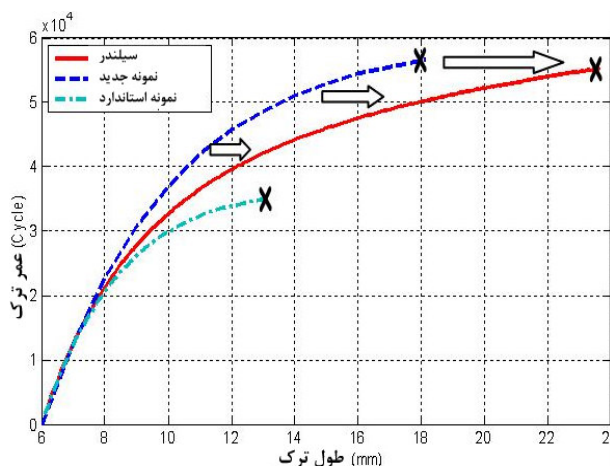
نمونه‌ها تحت بارگذاری متناوب به صورت سینوسی و با دامنه‌ای در حدود ۲۰ kN و نسبت بار $R \cong 0$ قرار گرفتند. نتایج حاصل از همه آزمون‌ها با نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در شکل ۱۳ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.



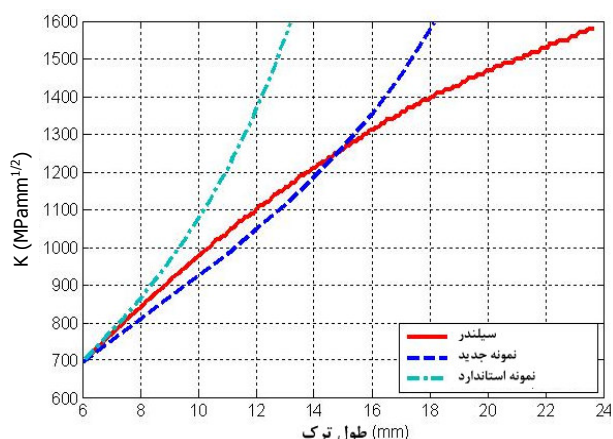
شکل ۱۳ مقایسه منحنی طول عمر ترک حاصل از نتایج آزمون خستگی نمونه جدید با نتیجه حاصل از تحلیل اجزای محدود (FRANC 2D)

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بین نتایج آزمایشگاهی سه نمونه و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود (FRANC 2D) با در نظر گرفتن خطای ثبت، مطابقت دقیقی

انطباق را می‌توان تا محدوده‌ای معین از طول ترک (حدود ۶۵ درصد از ضخامت دیواره) معتبر دانست که در آن مقادیر ضریب شدت تنش اختلاف چشمگیری با یکدیگر ندارند.



شکل ۱۵ مقایسه منحنی‌های عمر خستگی بر حسب طول ترک در نمونه استاندارد، نمونه جدید و مخزن استوانه‌ای



شکل ۱۶ مقایسه منحنی‌های ضریب شدت تنش بر حسب طول ترک برای نمونه استاندارد، نمونه جدید و مخزن استوانه‌ای که به روش اجزای محدود به دست آمده‌اند

در جدول ۴ بیشترین عمری که مخزن، نمونه جدید و نمونه استاندارد، هر کدام پس از رسیدن به حد آستانه ضریب شدت تنش خواهند داشت بر حسب تغییرات طول ترک اولیه آورده شده است. بدین معنی که با افزایش طول ترک اولیه، میزان بار تا حدی کاهش یافته است که ضریب شدت تنش در نوک ترک برابر ضریب شدت تنش حد آستانه گردد. از این رو با افزایش طول ترک اولیه و کاهش بار ممکن است عمر خستگی

عمر ترک خستگی بیش از ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. بر این اساس، نسبت $a/c=0.1$ مینای محتاطانه و مناسبی برای محاسبات خواهد بود، زیرا با این نسبت هندسی هم خرابی در عمق ترک در دیواره، نقطه A، رخ می‌دهد و هم کمترین تعداد سیکل برای عمر خستگی ترک به عنوان محتاطانه‌ترین حالت ممکن در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳ تاثیر نسبت a/c بر بیشترین طول عمر ممکن برای ترک نیمه بیضوی در یک مخزن استوانه‌ای

نقطه زوال (شکل ۱)	نسبت a/c	فشار داخلی (MPa)	عمر خستگی (تعداد سیکل)
A	۰/۱	۲۱/۸	۵۵۳۰۰
B	۰/۲	۲۳/۳	۹۱۷۰۰

در شکل ۱۵ منحنی عمر خستگی ترک برای نمونه استاندارد نوع اول، نمونه جدید و مخزن واقعی مقایسه شده است. در نقاط انتهایی نمودارها خرابی نمونه‌ها رخ داده است. با توجه به شکل، نمونه جدید هم از نظر طول ترک بحرانی و هم از نظر طول عمر خستگی ترک تا هنگام خرابی، مطابقت بیشتری با مخزن استوانه‌ای دارد که این مسئله برتری نمونه جدید را در مقایسه با نمونه‌های استاندارد موجود نشان می‌دهد. با این وجود، در طول ترک برابر، منحنی مربوط به نمونه جدید طول عمر بیشتری را طی نموده است که از نظر مهندسی محتاطانه نمی‌باشد و نمی‌تواند مبنای محاسبه قرار گیرد. لذا با اعمال ضریب تصحیح می‌توان این مسئله را نیز تا حد خوبی اصلاح نمود. ضریب تصحیح می‌تواند یک رابطه خطی باشد که با دقت مناسبی منحنی نمونه جدید را بر منحنی مربوط به مخزن منطبق می‌سازد و از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$\text{Crack Length}_{\text{Vessel}} \cong 1.63 \times \text{Crack Length}_{\text{New Specimen}} - 5.22 \quad (2)$$

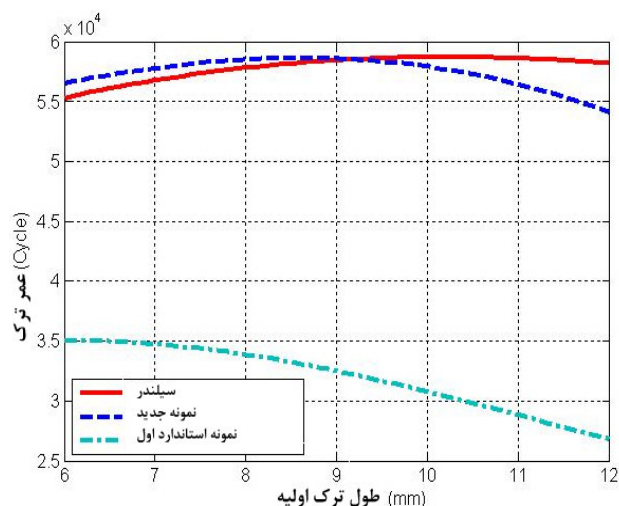
بدین ترتیب منحنی طول عمر خستگی بر حسب طول ترک برای یک مخزن استوانه‌ای با دقت قابل توجهی توسط نمونه جدید قابل محاسبه است.

در شکل ۱۶ نیز منحنی‌های ضریب شدت تنش تا هنگام خرابی برای هر یک از نمونه‌ها با منحنی مربوط به مخزن واقعی مقایسه شده‌اند که باز هم تطابق بیشتری بین ضریب شدت تنش در مخزن و نمونه جدید مشاهده می‌شود. البته این

در این پژوهش، همچنین سعی شده است تاثیر نوع ماده نیز مورد بررسی قرار گیرد. لذا مطابق جدول ۵ دو ماده با خواص مکانیکی متفاوت در نظر گرفته شده است. با استفاده از اطلاعات جدول ۵ با تغییر جنس نمونه‌ها و نحوه بارگذاری برای دو نوع فولاد، عمر ترک خستگی مجدداً برای نمونه استاندارد، نمونه جدید و مخزن استوانه‌ای در جدول ۶ مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، نمونه جدید برتری مشخصی در پیش‌بینی طول عمر خستگی ترک با مقایسه درصد خطاها دارا می‌باشد.

مطلب دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد این است که برای چه نسبت شعاعی $n = R_e / R_i$ نمونه جدید قابل استفاده می‌باشد. در شکل ۱۸ منحنی طول عمر خستگی یک مخزن از جنس ماده A با مشخصات جدول‌های ۵ و ۶ در نسبت‌های شعاعی مختلف در محدوده $1/1 \leq n \leq 2$ ترسیم شده است. بررسی این منحنی نشان می‌دهد که طول عمر خستگی مخزن در بیشترین مقدار خود در نسبت شعاعی $n=2$ در حدود ۵۸۰۰۰ سیکل و کمترین آن در محدوده مورد نظر در $n=2$ و حدود ۵۳۰۰۰ سیکل می‌باشد.

افزایش یابد. این تغییرات همچنین در نمودار شکل ۱۷ نیز مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نمونه جدید و مخزن استوانه‌ای برقرار است.



شکل ۱۷ مقایسه عمر خستگی ترک بر حسب تغییرات طول ترک اولیه بین نمونه استاندارد، نمونه جدید و مخزن استوانه‌ای

جدول ۴ مقایسه بیشترین عمر خستگی برای مخزن و نمونه جدید پس از رسیدن ضریب شدت تنش به حد آستانه

طول ترک اولیه (mm)	عمر خستگی سیلندر (Cycle)	عمر خستگی نمونه جدید (Cycle)	عمر خستگی نمونه استاندارد ۱ (Cycle)	خطای مربوط به نمونه استاندارد ۱ (درصد)	خطای مربوط به نمونه جدید (درصد)
۶	۵۵۳۰۰	۵۶۵۰۰	۳۵۰۰۰	-۳۶/۷	۲/۱۷
۸	۵۷۸۰۰	۵۸۵۰۰	۳۳۹۰۰	-۴۱/۳۵	۱/۲۱
۱۰	۵۸۷۰۰	۵۷۹۰۰	۳۰۸۰۰	-۷۴/۵۳	-۱/۳۶
۱۲	۵۸۲۰۰	۵۴۱۰۰	۲۶۸۵۰	-۵۳/۸۷	-۷/۰۴

جدول ۵ مشخصات مکانیکی دو ماده مختلف که طول عمر خستگی ترک در آن‌ها مطابق جدول ۶ محاسبه شده است

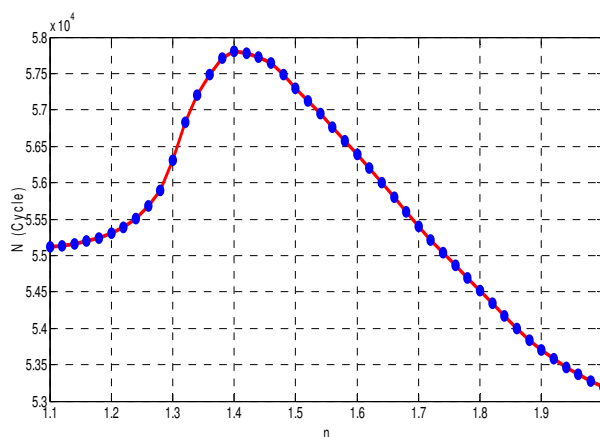
نوع ماده	C	n	$\Delta K_{th} _{R=0}$	$K_{max} _{a=6mm}$ (MPa \sqrt{mm})	$K_c _{l=10mm}$ (MPa \sqrt{mm})
ماده A	-۱۵E۲/۱۶	۳/۶۹	۶۹۴	۶۹۵	۱۵۹۷
ماده B	-۱۰E۲/۷۳	۲	۱۱۸	۱۱۱۰	۲۷۳۱

جدول ۶ مقایسه طول عمر خستگی ترک با طول اولیه ۶ میلی‌متر از زمان رسیدن ضریب شدت تنش به حد آستانه برای مواد با مشخصات جدول ۵

نوع ماده	سیلندر $a/c=0.1$ (تعداد سیکل)	نمونه جدید (تعداد سیکل)	نمونه استاندارد نوع ۱ (تعداد سیکل)
ماده A	۵۵۳۰۰	۵۶۵۰۰ (خطا: ۲/۱۷٪)	۳۵۰۰۰ (خطا: -۳۶/۷٪)
ماده B	۲۰۵۰۰	۱۷۶۰۰ (خطا: -۱۴/۱۵٪)	۱۱۲۰۰ (خطا: -۴۵/۴٪)

۸- مراجع

- [1] Shigley J. E., Mischke C. R., Brown T. H., *Standard handbook of machine design*, McGraw-Hill, 2004.
- [2] Mackerle J., "Finite Elements in the Analysis of Pressure Vessels and Piping, an Addendum: A Bibliography (2001-2004)", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, 2005, pp. 571-592.
- [3] Nageswara B., Acharia A. R., "Failure Assessment on 34Cr Mo4 Grade Steel Cylindrical Pressure Vessels with an Axial Surface Crack", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 72, 1997, pp. 157-163.
- [4] Nageswara B., Acharia A. R., "Failure Assessment on M300 Grade Maraging Steel Cylindrical Pressure Vessels with an Internal Surface Crack", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, 1998, pp. 537-543.
- [5] Mettu S. R., Raju I. S., Forman R. G., *Stress Intensity Factors for Part-Through Surface Cracks in Hollow Cylinders*, NASA Technical Report No. JSC 25685, LESC 30124, 1992.
- [6] Zheng X. J., Kiciak A., Glinka G., "Weight Functions and Stress Intensity Factors for Internal Surface Semi-Elliptical Crack in Thick-Walled Cylinder", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 58, 1997, pp. 207-221.
- [7] Perl M., Levinsohn J. A., "Measurement of the Actual Fracture Toughness of a Maraging-300 Pressurized Cylinder using the Vessel as the Test Specimen", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, 1989, pp. 525-530.
- [8] Shlyannikov V. N., "Fatigue Shape Analysis for Internal Surface Flaw in a Pressurized Hollow Cylinder", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 77, 2000, pp. 227-234.
- [9] El Khalil Hashi B., Rechak S., Belkacemi Y., Maurice G., "Modelling of Elliptical Cracks in an Infinite Body and in a Pressurized Cylinder by a Hybrid Weight Function Approach", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, 2005, pp. 917-924.
- [10] Bong Yoon K., Gyu Park T., Saxena A., "Creep Crack Growth Analysis of Elliptic Surface Cracks in Pressure Vessels", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 80, 2003, pp. 465-479.
- [11] ASTM designation E-399-83, *Standard Method of Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*, ASTM Annual Standards, 03.01, 1985.



شکل ۱۸ نمایش تغییرات طول عمر خستگی ترک نیمه بیضوی به طول $a = 6 \text{ mm}$ و نسبت $a/c = 0.1$ در مخزن با تغییرات نسبت شعاعی n

در مقایسه با نمونه جدید، که عمر آن ۵۶۵۰۰ سیکل است، خطای پیش‌بینی عمر خستگی توسط نمونه جدید، برای هر نسبت شعاعی n ، در محدوده $39 < \text{خطا} < 37 +$ درصد می‌باشد که دقت خوبی محسوب می‌گردد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که نمونه جدید نمونه‌ای مناسب جهت بررسی رشد ترک در مخازن جدار ضخیم تحت فشار می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت، نمونه جدیدی جهت آزمون خستگی برای بررسی رشد ترک در مخازن استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار معرفی گردید که چه از دیدگاه توزیع تنش، چه از نظر رفتار رشد ترک خستگی و در نتیجه عمر خستگی ترک، تطابق بیشتری به مخازن استوانه‌ای جدار ضخیم نسبت به نمونه‌های استاندارد موجود دارد. در این پژوهش نمونه جدید به طور خاص برای مخزنی با نسبت شعاعی $n=1/2$ و طول اولیه ترک $a=6 \text{ mm}$ در ترک نیمه بیضوی با نسبت شعاعی اولیه $a/c = 0.1$ ، که تحت آن خرابی در عمق ترک در دیواره رخ می‌دهد، مورد مقایسه قرار گرفت و نهایتاً اثر نسبت شعاعی مخزن، n ، بر عمر خستگی ترک بررسی شد. نتایج حاصل دلالت بر تاثیر ناچیز اثر نسبت شعاعی مخزن بر عمر خستگی دارد. از این رو پیشنهاد می‌گردد در بررسی‌هایی که بر مبنای رشد ترک در مخازن استوانه‌ای تحت فشار جدار ضخیم استوار است، نمونه جدید به عنوان یک نمونه پیشنهادی برای بررسی رشد ترک‌های نیمه بیضوی مورد استفاده قرار گیرد.