

اثر وصله کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش ترک شبه بیضوی در مخزن تحت فشار کروی

هادی اسکندری*

فاطمه میرزاده

مسلم قنبری

استادیار، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

چکیده

هدف از این مقاله بررسی اثر وصله کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش (SIF) ترک شبه بیضوی داخلی و خارجی واقع در مخزن تحت فشار کروی است. وصله کامپوزیتی فقط در اطراف ترک پیچیده شده است. تجزیه و تحلیل سه بعدی با استفاده از روش المان محدود (FEM) انجام شده است. زبان طراحی پارامتری ANSYS (APDL) به منظور تسهیل در مدل سازی ترک شبه بیضوی در مخزن تحت فشار کروی مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این کد اثر پارامترهایی مانند هندسه ترک (نسبت عمق ترک به ضخامت مخزن و نسبت عمق ترک به نصف طول ترک)، نسبت ضخامت کامپوزیت به ضخامت مخزن و نسبت پهنای وصله کامپوزیتی به نصف طول ترک و جنس ماده کامپوزیت روی مقادیر ضریب شدت تنش، به تفصیل مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که وصله کامپوزیتی منجر به کاهش قابل توجهی در ضرایب شدت تنش در نوک ترک می شود. همچنین می توان نتیجه گرفت که وصله کامپوزیتی برای ترک عمیق تر و باریک تر اثر بیشتری دارد. به علاوه، وصله کامپوزیتی در کاهش ضریب شدت تنش ترک خارجی در مقایسه با ترک داخلی، موثرتر می باشد.

واژه های کلیدی: ضریب شدت تنش، مخزن تحت فشار کروی، ترک شبه بیضوی، وصله کامپوزیتی، روش المان محدود.

The effect of composite patch on stress intensity factor of semi-elliptical crack in a spherical pressure vessel

H. eskandari

F. Mirzade

M. Ghanbari

Abadan Institute of Technology, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

Abadan Institute of Technology, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

Abadan Institute of Technology, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

Abstract

The purpose of this article is to investigate the effect of composite patch on stress intensity factor (SIF) for internal and external semi-elliptical crack located in spherical pressure vessel. The composite patch is wrapped only around the crack. The three dimensional analysis is done by Finite Element Method (FEM). ANSYS Parametric Design Language (APDL) codes are developed to facilitate modeling of semi-elliptical crack in spherical pressure vessel. By using these codes the effect of some parameters such as crack geometry (crack depth/thickness of vessel and crack depth/ half-length of crack), the ratio of composite thickness to metal thickness, the ratio of composite patch width to half-length of crack and composite material on stress intensity factor values are investigated and discussed in detail. The results show that composite patch has significant reduction in stress intensity factor at crack tip. Also it can be concluded that composite patch is more effective for deeper and slender crack. In addition composite patch is more effective to decrease stress intensity factor of external crack in comparison to internal crack.

Keywords: stress intensity factor, spherical pressure vessel, semi-elliptical crack, composite patch, Finite element method.

شده به هم جوش داده می شوند. این مخازن تحت فشار از یک سری صفحات منحنی که در امتداد خطوط نصف النهار جوش داده شده اند، ساخته می شوند [۴]. با توجه به حضور عامل خوردگی، تنش کششی باقی مانده، و شرایط بارگذاری چرخه ای، این مخازن تحت فشار حساس به ترک خوردگی می باشند. همچنین استفاده از فشار و شوک حرارتی نیز می تواند منجر به ترک در این ساختار شود. دلیل عمده دیگر برای شروع ترک، ترک خوردگی تنشی (SCC) می باشد که ترک در یک محیط خورنده رشد می کند. در نتیجه پیدایش و رشد ترک در این گونه مخازن امری اجتناب ناپذیر است و جهت دستیابی به عمر ایمن و حد شکست استاتیکی ضروری است که محاسبه ضریب شدت تنش مدنظر قرار گیرد. مخازن تحت فشار پیچیده شده با لایه کامپوزیتی (COPV) از یک فلز زیرین غیر سازه ای نازک که با کامپوزیت الیافی در اطراف آن پیچیده شده است، تشکیل و برای نگهداری یک سیال تحت فشار طراحی شده است. فلز زیرین یک مانع بین مایع و کامپوزیت، برای

۱- مقدمه

با توجه به [۱] ASME SEC VIII مخازن تحت فشار، مخازنی هستند که تحت فشار داخلی از ۱۵ PSI تا ۳۰۰۰ PSI قرار می گیرند. این مخازن تحت فشار در انواع برنامه های کاربردی در صنعت نفت و گاز، صنایع شیمیایی، نیروگاه حرارتی و هسته ای، در عمق اقیانوس و در سیستم تامین آب، بخار، گاز و هوا در صنایع مورد استفاده قرار می گیرند. از لحاظ نظری، استحکام مخازن تحت فشار کروی در حدود دو برابر استحکام مخزن تحت فشار استوانه ای با ضخامت دیوار یکسان است [۲] و معمولاً برای نگهداری مواد تحت فشار داخلی استفاده می شود [۳].

در مخازن کروی به دلیل هندسه ی آن، توزیع تنش یکنواخت تر می باشد و به همین دلیل نقطه ی ضعیف کمتری در سطح آن وجود دارد. برای تولید یک مخزن تحت فشار کروی یا استوانه ای، قطعات نورد

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: eskandari@put.ac.ir

ترک هلالی در مخزن تحت فشار کروی از طریق روش المان محدود و با کارگیری المان تکین تعیین شده‌است. در مطالعه دیگری که Perl سال ۲۰۱۱ [16] انجام داده‌است، تأثیر هندسه‌ی مخزن کروی یعنی نسبت شعاع بیرونی به شعاع داخلی $R_o/R_i = \eta$ ، نسبت عمق ترک به ضخامت دیواره (a/t) ، نسبت عمق ترک به نصف طول ترک نیمه (a/c) بر ضرایب شدت تنش تعیین شده‌است. نتایج به دست آمده به وضوح نشان می‌دهد که SIF به صورت قابل توجهی توسط هندسه‌ی مخزن تحت فشار کروی ، تعداد ترک‌ها ، a/c ، a/t تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی یک راه کارآمد برای تعمیر ترک در سازه‌های شکسته شده با افزایش عمر خستگی آنها می‌باشد. تعمیر ترک با استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی به صورت قابل توجهی در کاهش ضریب شدت تنش در نوک ترک و در نتیجه افزایش عمر اجزای ساختار ترک خورده نقش داشته‌است [۷]. تجزیه و تحلیل سه بعدی و المان محدود از رفتار ترک محیطی در لوله که با پیچیدن کامپوزیت در اطراف لوله تعمیر شده، توسط Benyahia [۱۸] انجام شده‌است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که کامپوزیت تعمیری به طور قابل توجهی ضریب شدت تنش در نوک ترک در لوله‌های فولادی را کاهش می‌دهد، که می‌تواند طول عمر باقی مانده لوله را بهبود بخشد. در سال ۱۹۹۸ Sue و همکاران [۱۹] مخزن استوانه‌ای پایه فلزی با کامپوزیت پیچیده شده در اطراف، که دارای ترک شبه بیضوی محوری داخلی در بخش استوانه‌ای و فولادی است را با استفاده از روش المان محدود سه بعدی (FE) مدل‌سازی و تأثیر جنس کامپوزیت پیچیده شده، فشار داخلی و اندازه ترک در رفتار شکست سیلندر را بررسی کرده‌اند. شاهانی و خیرخواه [۲۰] ضریب شدت تنش برای یک ترک شبه بیضوی محیطی در سطح داخلی از مخزن CNG پیچیده شده با کامپوزیت ارائه کرده‌اند. در این مطالعه، ضرایب شدت تنش در جبهه ترک به طور مستقیم با استفاده از روش المان محدود سه بعدی برای طیف گسترده‌ای از هندسه ترک محاسبه شده‌است. همچنین تأثیر پارامترهای زیادی از جمله فشار داخلی مخزن ، ضخامت وصله‌ی کامپوزیتی ، و خواص مواد کامپوزیت بر ضریب شدت تنش مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در مطالعه‌ای که توسط Chen و همکاران [۲۱] انجام شده‌است، رفتار شکست سیلندر گاز طبیعی فشرده (CNG) با وصله‌ی کامپوزیتی پیچیده شده و دارای ترک محوری در سطح داخلی بررسی شده‌است. با کمک روش اجزاء محدود سه بعدی، ضرایب شدت تنش در جبهه‌ی ترک برای هندسه‌های مختلف به دست آمده‌است. اثرات هندسه سیلندر، ضخامت وصله‌ی کامپوزیتی پیچیده شده و خواص آن بر ضریب شدت تنش مورد بررسی قرار گرفته‌است. در تمام مطالعات گذشته که در بالا ذکر شد، اثر وصله‌ی کامپوزیتی فقط برای مخازن استوانه‌ای بررسی شده‌است و محاسبه‌ی ضرایب شدت تنش در مخازن کروی بدون در نظر گرفتن وصله‌ی کامپوزیتی بوده‌است، لذا در این مقاله اثر وصله‌ی کامپوزیتی بر مخزن کروی با حضور ترک داخلی و خارجی بررسی شده‌است.

۲- تعریف مسأله

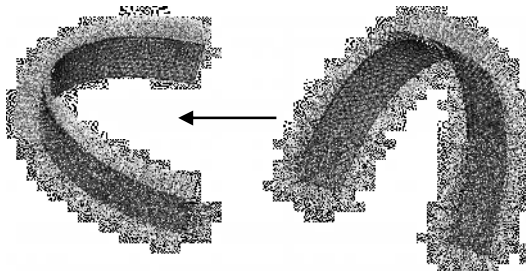
یک مخزن تحت فشار کروی با شعاع داخلی R_i و شعاع خارجی R_o با نسبت $R_o/R_i = 1.1$ در نظر گرفته شده‌است. مخزن مورد نظر از

جولوگیری از نشت و تجزیه شیمیایی ساختار فراهم می‌کند (که می‌تواند از طریق ترک ریز که شکست ساختاری ایجاد نمی‌کند، به سطح کامپوزیت برسد). مزیت اصلی یک COPV در مقایسه با مخازن تحت فشار فلزی با اندازه مشابه ، وزن پایین‌تر آن است زیرا ضخامت قسمت فلزی می‌تواند کاهش یابد [۵]. کامپوزیت تقویت شده با الیاف به دلیل استحکام بالا و وزن سبک کاربردهای زیادی دارد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که تعمیر ترک با استفاده از مواد کامپوزیتی کاهش قابل توجهی در مقادیر ضریب شدت تنش در نوک ترک ایجاد کرده‌است [۶، ۷].

مکانیک شکست با مسائل کنترل شکست سروکار دارد. برای جولوگیری از انفجار فاجعه‌بار مخزن، باید توجه بیشتری به استقامت شکست استاتیک شود که با محاسبه‌ی ضریب شدت تنش (SIF) در طول جبهه‌ی ترک امکان‌پذیر است. علاوه بر آن، محاسبات SIF در نشت قبل از انفجار (LBB) هم استفاده می‌شود. نشت قبل از انفجار ، مخازن تحت فشار طراحی شده را به گونه‌ای توصیف می‌کند که یک شکاف در مخزن در طول دیوار رشد می‌کند و اجازه می‌دهد که مایع موجود خارج و فشار را، قبل از رشد ترک که منجر به شکست می‌شود، کاهش دهد.

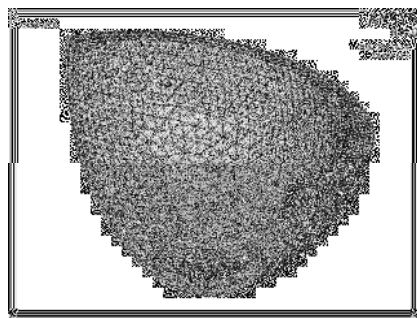
از آنجا که مخازن تحت فشار استوانه‌ای و کروی به طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شوند و پیدایش ترک در این مخازن اجتناب ناپذیر است، محاسبه‌ی ضرایب شدت تنش برای انواع مختلف ترک در انواع مختلف سازه بسیار مهم است. در گذشته بسیاری از محققان به ارزیابی SIF برای موارد مختلف پرداخته‌اند. مطالعات مختلفی با در نظر گرفتن ترک شبه بیضوی در مخازن تحت فشار استوانه‌ای انجام شده‌است. در سال ۱۹۸۲ راجو و نیومن [۸] ضرایب شدت تنش برای ترک‌های سطحی شبه بیضوی داخلی و خارجی در مخازن استوانه‌ای تحت بارگذاری مکانیکی را محاسبه کرده‌اند. شاهانی و نبوی [۹] ضرایب شدت تنش برای ترک طولی داخلی شبه بیضوی، در یک سیلندر جداره ضخیم تحت بارگذاری مکانیکی و حرارتی را به دست آوردند. در مطالعه دیگری که شاهانی و نبوی [۱۰] انجام داده‌اند، ضرایب شدت تنش را برای ترک شبه بیضوی طولی داخلی در یک طول محدود سیلندر جداره ضخیم بدست آورده‌اند. همانطور که در بالا ذکر شد، بسیاری از مطالعات انجام شده، ترک شبه بیضوی را در مخزن استوانه‌ای در نظر گرفته‌اند [۱۱-۱۳] اما در مقابل تنها چند محقق ترک شبه بیضوی در مخازن تحت فشار کروی را بررسی کرده‌اند. در سال ۱۹۸۹ ضرایب شدت تنش برای ترک داخلی و خارجی کامل در پوسته کروی توسط چائو و همکاران تعیین شده‌است [۱۴]. در مطالعه انجام شده توسط حکیمی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۰۸ مسائل پوسته‌های استوانه‌ای و همچنین تعداد کمی از مسائل مربوط به پوسته‌ی کروی، از جمله انواع نقص عملی، یعنی متقارن و یا شبه بیضوی ، هر دو ترک داخلی و خارجی را در نظر گرفته‌اند. محاسبه‌ی ضرایب شدت تنش در حوزه الاستیک خطی و انتگرال J در محدوده الاستوپلاستیک با استفاده از روش المان محدود انجام شده‌است. همه‌ی نتایج عددی، برای طیف گسترده‌ای از پوسته و هندسه‌ی ترک، با استفاده از جداول و منحنی‌های مناسب به منظور بررسی معیار شکست به تصویر کشیده شده‌اند. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۰ توسط Perl و همکارانش [۴] انجام شد ضرایب شدت تنش سه بعدی برای آرایه‌ای از ترک شعاعی داخلی و با

در طول مدل سازی سه بعدی به منظور تسهیل در مدل سازی استفاده شده است. پس از حل مسائل با به دست آوردن میزان جابجایی در اطراف جبهه ی ترک، ضرایب شدت تنش با استفاده از تکنیک همبستگی جابجایی (DCT) محاسبه شده است. برای مش بندی نوک ترک المان های singular solid 186 و برای مش بندی وصله ی کامپوزیتی المان های لایه ای solid 186 به کار برده شده است. از آنجایی که خواص کامپوزیت ها در جهات مختلف یکسان نیست، در مدل سازی وصله ی کامپوزیتی، تعریف دستگاه مختصاتی هر المان بسیار حائز اهمیت است. در این مسأله به دلیل انحنای موجود و عدم هماهنگی سیستم مختصاتی المان ها، نیاز به چرخاندن و هم-جهت کردن همه آنهاست. در شکل ۲ سیستم مختصاتی المان ها قبل و بعد از چرخاندن نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه جهت گیری دستگاه مختصات المان های وصله ی کامپوزیتی قبل و بعد از چرخش

به دلیل وجود تقارن در مسأله، برای استفاده از تعداد المان های کمتر، کافی است یک چهارم هندسه مخزن را مدل سازی کنیم. شکل ۳ هندسه مخزن بعد از مش بندی را نشان می دهد. برای بررسی مستقل بودن نتایج از تعداد المان ها، از مون همگرایی انجام شده است که با توجه به آن از تعداد ۳۵۴۱۰ المان برای حل مسأله استفاده کرده ایم (شکل ۴).



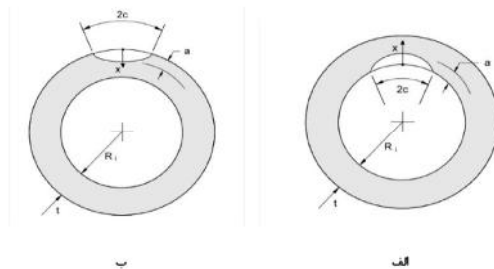
شکل ۳- مش بندی مخزن

جنس فولاد کروم- مولیبدوم با نسبت پواسون 0.3 و مدول الاستیسیته 200 گیگا پاسکال می باشد. در این مقاله هم ترک داخلی و هم ترک خارجی به صورت جداگانه بررسی شده اند. به منظور بررسی اثر وصله ی کامپوزیتی بر رفتار شکست مخزن، لایه ی ارتوروپیکتی در اطراف ترک و در شعاع خارجی مخزن پیچیده شده است. چهار نوع ماده مختلف کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است که خواص مکانیکی این مواد کامپوزیتی در جدول ۱ [۲۲] آورده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی [۲۲]

جنس ماده	E_1	E_2	ν_{12}	ν_{23}	G_{12}
گرافیت- اپوکسی	۱۷۲/۴	۱۰/۳۴	۰/۳	۰/۱۸	۴/۸۲
کربن- اپوکسی	۱۳۲	۱۰/۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۱۲
کولار- اپوکسی	۷۶	۵/۵	۰/۳۴	۰/۳۴	۲/۲
شیشه- اپوکسی	۴۵	۱۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۴/۴

پهنا و ضخامت وصله ی کامپوزیتی و همچنین عمق و طول ترک به ترتیب با a ، T ، W و c معرفی می شوند. در شکل ۱ پارامترهای ترک داخلی و خارجی طبق استاندارد API 579/ASME FFS [۲۳] مشخص شده است.



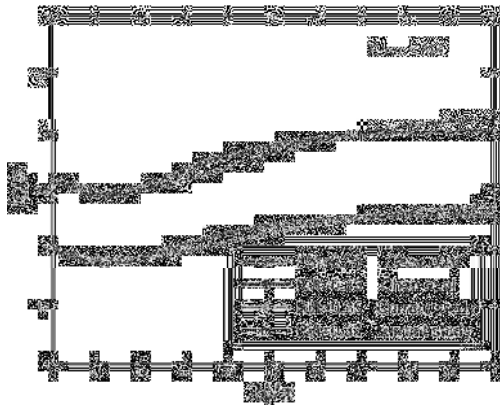
شکل ۱- تصویر سمت راست: ترک درونی تصویر سمت چپ: ترک

بیرونی [۲۳]

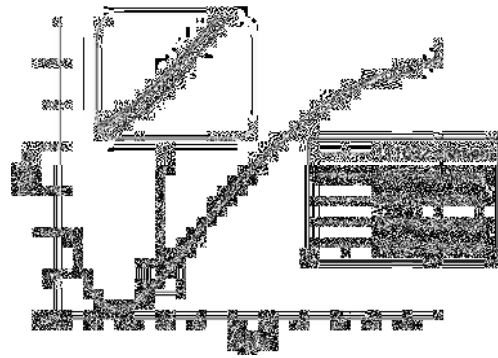
در این مسأله فشار داخلی مخزن 25 MPa ، نسبت عمق ترک به ضخامت مخزن، a/t ، برابر با 0.25 ، 0.15 و 0.75 و همچنین نسبت عمق ترک به طول ترک، a/c ، برابر 0.33 ، 0.66 و 1 در نظر گرفته شده است. نسبت ضخامت کامپوزیت به ضخامت مخزن (T_C/T) از صفر تا یک و همچنین نسبت پهنا ی کامپوزیت به طول ترک (w/c) از $1/25$ تا 3 تغییر می کند.

۱-۲- مدلسازی المان محدود

روش المان محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار ANSYS 16 [۲۲] انجام شده است. زبان طراحی پارامتری (APDL) ANSYS



شکل ۷- مقادیر نرمال شده‌ی ضرایب شدت تنش با مدل موجود در مقاله Chen [۲۱]



شکل ۴- آزمون همگرایی

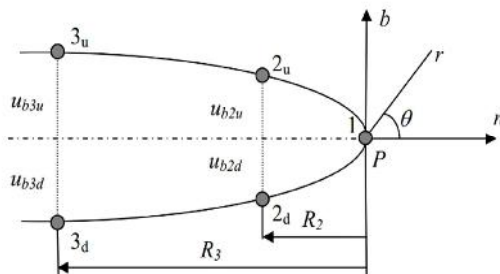
مقدار $\phi/\pi 2$ در محور افقی، کمیتی بی بعد شده‌است که زاویه‌ی جبهه ی ترک را نشان می‌دهد. متغیر ϕ در شکل ۵ نشان داده شده‌است. همچنین متغیرهای K_I و K_{II} در ادامه در رابطه ۱ و ۲ تعریف شده‌اند.

۳- نتایج

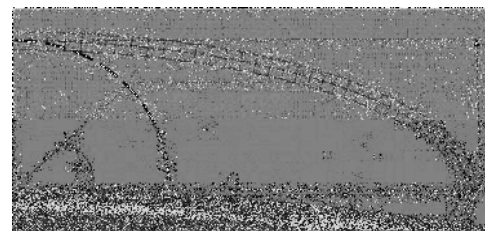
۳-۱- محاسبه ضریب شدت تنش به روش DCT

ضریب شدت تنش می‌تواند با استفاده از روش تکنیک همبستگی جابجایی (DCT^۱) محاسبه شود. روش‌های محاسبه‌ی شدت تنش براساس جابجایی معمولاً نیازمند دو شرط زیر هستند: (۱) در لایه اول المان‌های موجود در نوک ترک باید از المانهای Quarter-point استفاده شود، و (۲) مش‌بندی در ناحیه نزدیک نوک ترک باید به نحوی انجام شود تا هنگام مدل‌سازی و حل مسئله نتایج قابل قبولی بدست آید.

روال محاسبه‌ی زیر توسط کاسکر [۲۴] به منظور محاسبه میزان ضریب شدت تنش با استفاده از روش DCT انجام شده‌است. جابجایی پنج گره در این محاسبات استفاده شده‌است اولین گره نقطه‌ای است که در نوک ترک قرار دارد. نودهای دوم و سوم گره‌هایی هستند که پس از گره اول در سطح بالایی ترک قرار دارند و گره‌هایی چهارم و پنجم گره‌هایی هستند که همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در سطح پایینی ترک قرار دارند.



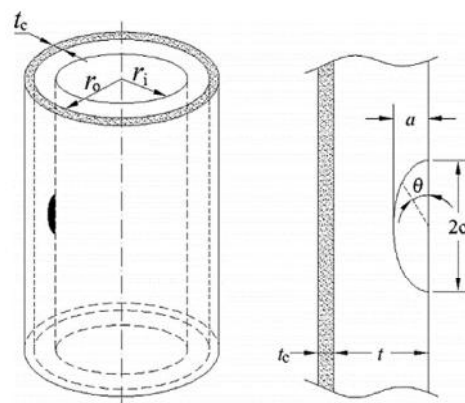
شکل ۸- نحوه قرارگیری گره‌ها در نوک ترک [۲۴]



شکل ۵- تعریف متغیرهای ترک

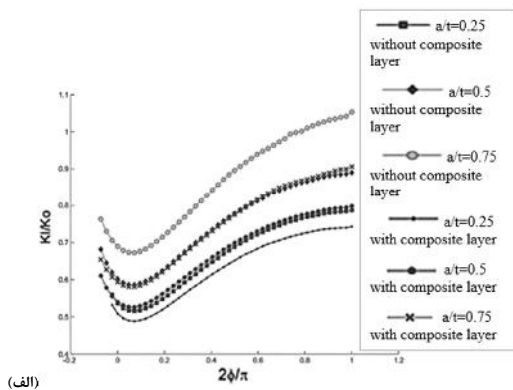
۲-۲- اعتبار بخشی به نتایج

جهت اعتبار بخشیدن به نتایج حاصل از این مسأله، یک مخزن استوانه‌ای حاوی ترک که با وصله‌ی کامپوزیتی اطراف آن پیچیده شده است (شکل ۶)، مدل‌سازی و با نتایج Chen [۲۱] مقایسه شده‌است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نتایج همخوانی خوبی با مدل Chen [۲۱] دارند.

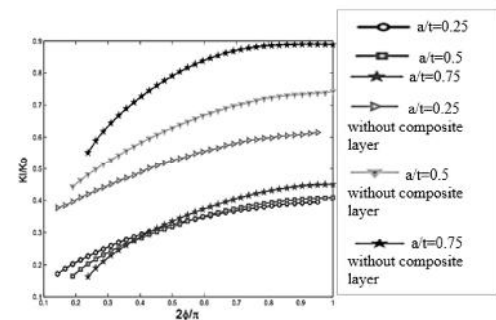


شکل ۶- مخزن استوانه‌ای حاوی ترک شبه بیضوی درونی با کامپوزیت پیچیده شده در اطراف آن [۲۱]

^۱ Displacement Correlation Technique

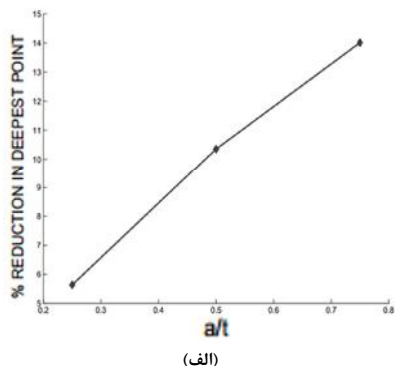


(الف)

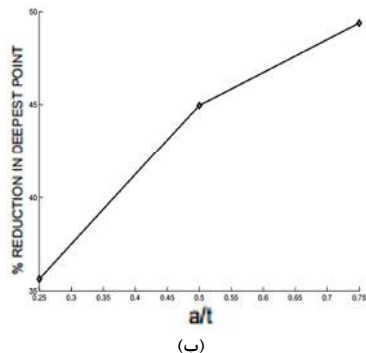


(ب)

شکل ۹- توزیع مقادیر ضریب شدت تنش در جبهه‌ی ترک برای $a/c = 0.33$ و a/t های مختلف، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- درصد کاهش مقادیر ضریب شدت تنش در عمیق ترین نقطه‌ی ترک برای a/t های مختلف، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

با تعریف سیستم های مختصات محلی که عمود و موازی با سطح ترک در هر نقطه از جبهه ترک هستند می توان میزان جابجایی گره‌های مورد نظر جهت محاسبه میزان شدت تنش در نقطه در جبهه ترک را بدست آورد. مقادیر ضریب شدت تنش برای مود اول را می توان طبق رابطه (۱) که در آن از میزان جابجایی پنج نود نشان داده شده در شکل ۸، بدست آورد [۲۴]:

$$K_I = \frac{\sqrt{2\pi}}{8(1-\nu^2)} \left[\frac{R_3^{3/2}(u_{b2u} - u_{b2a}) - R_2^{3/2}(u_{b3u} - u_{b3a})}{\sqrt{R_2} \sqrt{R_3} (R_3 - R_2)} \right] \quad (1)$$

که در این رابطه u نشان دهنده جابجایی نود ها می باشد. به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلفی از جمله هندسه‌ی ترک، ضخامت و پهنای ترک و جنس وصله‌ی کامپوزیتی مسایل متعددی بررسی شده است. ضرایب شدت تنش با مقدار K_0 که از رابطه‌ی (۲) بدست می آید، نرمال شده است:

$$K_0 = \sigma_{\theta\theta} \sqrt{\pi a / Q} \quad (2)$$

که در این رابطه $\sigma_{\theta\theta}$ میانگین تنش در طول ضخامت مخزن تحت فشار کروی می باشد که از رابطه‌ی (۳) محاسبه می شود:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{PR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (3)$$

و Q مربوط به فاکتور شکل ترک است که طبق رابطه‌ی (۴) و (۵) بدست می آید [۲۵]:

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}; \quad a/c < 1 \quad (4)$$

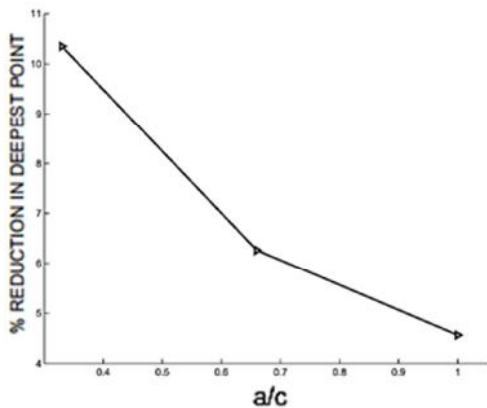
$$Q = 1 + 1.464(c/a)^{1.65}; \quad a/c > 1 \quad (5)$$

در ادامه نمودارهای K_I/K_0 بر حسب $2\Phi/\pi$ برای ترک داخلی و خارجی رسم شده اند که برای بررسی نتایج از آنها استفاده می کنیم.

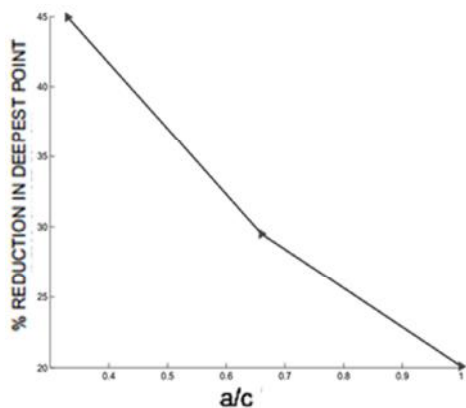
۳-۲- تأثیر هندسه‌ی ترک

برای بررسی اثر هندسه‌ی ترک دو پارامتر a/t و a/c در نظر گرفته شده است. در ابتدا نسبت a/c برابر با 0.33 و a/t برابر با مقادیر 0.25 ، 0.5 ، و 0.75 قرار داده شده است. همچنین نسبت T_c/T و w/c به ترتیب 0.25 و 2 و جنس وصله‌ی کامپوزیتی گرافیت- اپوکسی در نظر گرفته شده است.

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است برای مقدار ثابت $a/c = 0.33$ با افزایش نسبت عمق به ضخامت مخزن (a/t) مقادیر ضریب شدت تنش افزایش می یابند. به عبارتی ترک هایی با عمق بیشتر خطرناک تر محسوب می شوند. با توجه به نمودار مشاهده می شود که بیشترین ضریب شدت تنش در عمیق ترین نقطه در جبهه‌ی ترک رخ داده است یعنی عمیق ترین نقطه در نوک ترک زودتر از سایر نقاط رشد خواهد کرد. همان گونه که در شکل ۹ مشخص است، وصله‌ی کامپوزیتی سبب کاهش مقادیر ضریب شدت تنش شده است. در شکل ۱۰ درصد کاهش مقادیر ضریب شدت تنش در عمیق ترین نقطه‌ی ترک بر اساس a/t رسم شده اند. قابل مشاهده است که برای ترک هایی با a/t بزرگتر درصد کاهش، بیشتر شده است به عبارتی وصله‌ی کامپوزیتی برای ترک هایی با a/t بزرگتر موثرتر واقع شده اند و نقش مهمی در کاهش ضرایب شدت تنش داشته اند.



الف



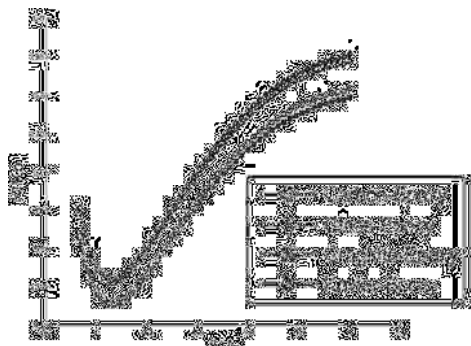
ب

شکل ۱۲- درصد کاهش ضریب شدت تنش برای مقادیر مختلف a/c ،

الف: ترک درونی ب: ترک بیرونی

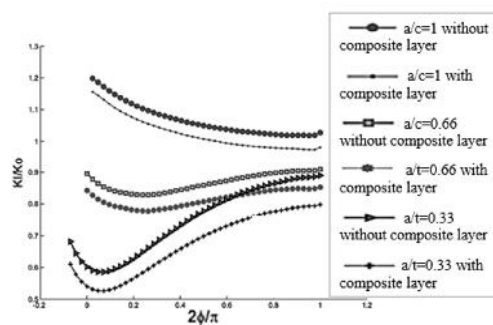
۳-۳- تأثیر جنس وصله کامپوزیتی

با توجه به شکل ۱۳ از میان چهار ماده کامپوزیتی، گرافیت اپوکسی موثرترین ماده در کاهش ضریب شدت تنش می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ماده‌ای با مقدار بزرگتر E_1 ، در مقابل شکست مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. قابل ذکر است که جهت لایه های کامپوزیتی به گونه‌ای قرار گرفته‌است که E_1 در جهت عمود بر جبهه ی ترک باشد تا حداکثر کاهش ضریب شدت تنش را داشته باشد.

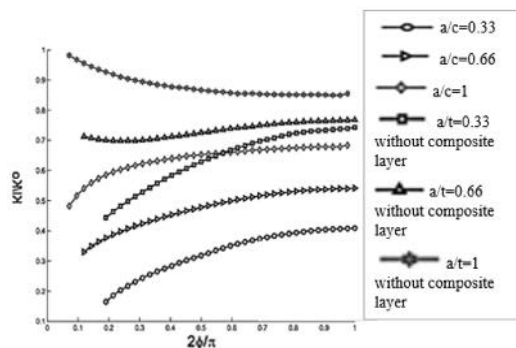


(الف)

برای بررسی اثر نسبت عمق ترک به نصف طول ترک (a/c) این بار $a/t = 0.5$ و $a/c = 0.33, 0.66, 1$ در نظر گرفته شده‌است. شکل ۱۱ توزیع ضرایب شدت تنش در نوک ترک برای مقدار ثابت a/t و مقادیر مختلف a/c را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش a/c مقادیر ضریب شدت تنش نیز افزایش یافته‌اند و همچنین در هر مورد وصله کامپوزیتی سبب کاهش مقادیر ضریب شدت تنش شده است. همانگونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، برای حالت $a/c < 1$ بیشینه ضریب شدت تنش در عمیق‌ترین نقطه‌ی نوک ترک قرار دارد اما برای حالت $a/c = 1$ بیشینه ضریب شدت تنش به گوشه‌های ترک جابه جا می‌شود. این بدین معنی است که در حالت $a/c = 1$ رشد ترک از نقاط گوشه شروع خواهد شد. شایان ذکر است که در ترک بیرونی در حالت $a/c = 1$ با اعمال وصله کامپوزیتی نقطه‌ی بیشینه به نقطه کمینه تبدیل می‌شود و بیشینه ضریب شدت تنش به عمیق‌ترین نقطه جابه جا می‌شود. شکل ۱۲ درصد کاهش ضریب شدت تنش در عمیق‌ترین جای ترک را برای مقادیر مختلف a/c نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که برای ترک‌های باریک‌تر (a/c کمتر) درصد کاهش ضریب شدت تنش با اعمال وصله کامپوزیتی بیشتر می‌شود یا به عبارتی وصله کامپوزیتی برای ترک‌های باریک‌تر موثرتر واقع شده‌است.



(الف)



(ب)

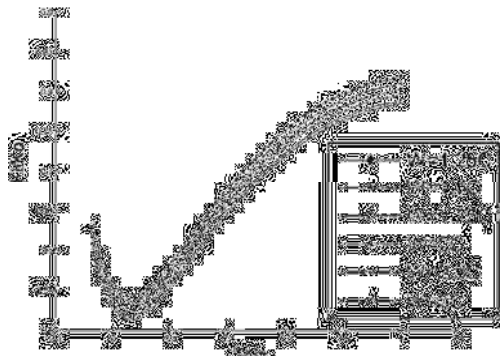
شکل ۱۱- توزیع مقادیر ضریب شدت تنش در جبهه‌ی ترک

$a/t = 0.5$ برای و a/c های مختلف، الف: ترک درونی، ب: ترک

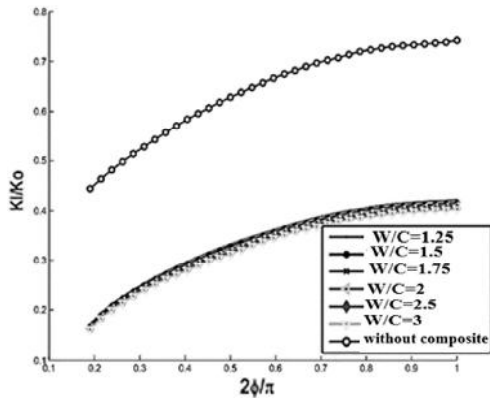
بیرونی

۳-۵- تأثیر پهنای وصله ی کامپوزیتی

به منظور یافتن اثر پهنای وصله ی کامپوزیتی ، مقادیر مختلفی از نسبت پهنای کامپوزیت به نصف طول ترک (w/c) در نظر گرفته شده- است. شکل ۱۵ توزیع ضرایب شدت تنش در جبهه ی ترک را برای مقادیر مختلف w/c نشان می دهد. همان طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، افزایش مقادیر w/c سبب کاهش ضرایب شدت تنش می شود اما این روند خطی نیست.



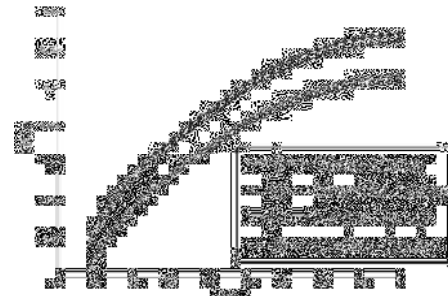
(الف)



(ب)

شکل ۱۵- توزیع ضرایب شدت تنش برای نسبت های مختلف پهنای وصله ی کامپوزیتی به نصف طول ترک w/c . الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

در حالت کلی با مقایسه بیشینه درصد کاهش ضرایب شدت تنش برای ترک خارجی و داخلی برای مقادیر یکسانی از a/c و a/t ، مطابق با شکل ۱۶ می توان نتیجه گرفت که اعمال وصله ی کامپوزیتی برای ترک خارجی، در کاهش ضرایب شدت تنش تأثیر بیشتری دارد.

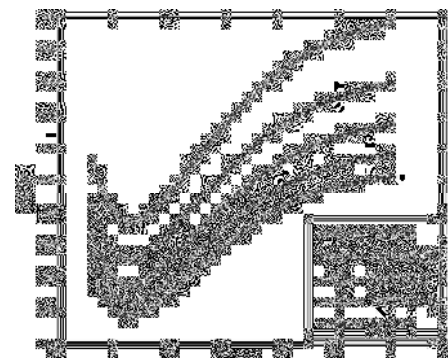


(ب)

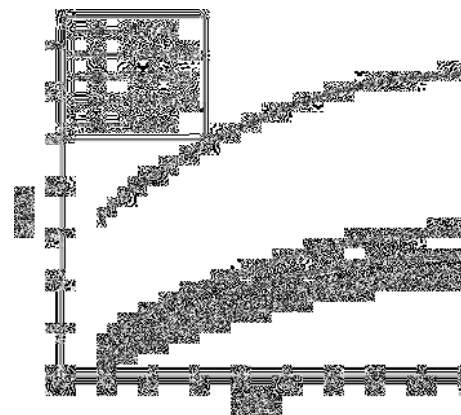
شکل ۱۳- اثر جنس ماده ی کامپوزیتی بر ضرایب شدت تنش، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

۳-۴- تأثیر ضخامت وصله ی کامپوزیتی

اثر نسبت ضخامت وصله ی کامپوزیتی به ضخامت مخزن (T_c/T) برای هر دو مورد ترک درونی و بیرونی، در شکل ۱۴ مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده می شود که با افزایش نسبت ضخامت وصله ی کامپوزیتی به ضخامت مخزن (T_c/T) مقادیر ضرایب شدت تنش کاهش می یابند. با مقایسه درصد کاهش ضرایب شدت تنش در عمیق ترین جای ترک برای مقادیر مختلف T_c/T ، می توان مشاهده کرد که با افزایش ضخامت کامپوزیت کاهش بیشتری در مقادیر ضرایب شدت تنش رخ می دهد اما این روند خطی نیست.



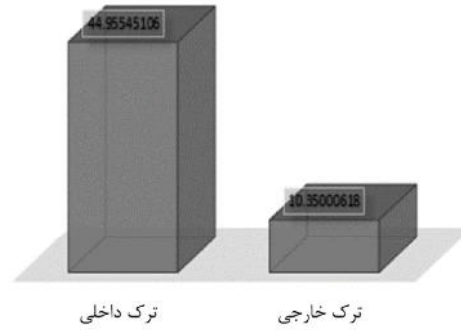
(الف)



(الف)

شکل ۱۴- توزیع ضرایب شدت تنش برای نسبت های مختلف ضخامت ارتورویپیک به ضخامت مخزن، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

FEM	روش المان محدود
LBB	نشت قبل از شکست
SIF	ضریب شدت تنش
\emptyset	زاویه‌ی پارامتری ترک
ν	نسبت پواسون



اثر وصله کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش ترک ...

۶- مراجع

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, *Rules for Construction of Pressure Vessels*. American Society of Mechanical Engineers, New York, 2013.
- [2] Hearn E.J., *Mechanics of Materials 2: The mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural materials*. Butterworth-Heinemann, 1997.
- [3] Nilsen K., *Development of low pressure filter testing vessel and analysis of electrospun nanofiber membranes for water treatment*. Wichita State University, 2011.
- [4] Perl M. and Bernshtein V., 3-D stress intensity factors for arrays of inner radial lunular or crescentic cracks in a typical spherical pressure vessel. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No.3, pp. 535-548, 2010.
- [5] McLaughlan, P.B., et al., *Composite overwrapped pressure vessels: a primer*. National Aeronautics and Space Administration, Johnson Space Center, 2011.
- [6] Baker A. and Jones R., *Bonded repair of aircraft structures*, Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1988.
- [7] Kaddouri K., Ouinas D. and Bouiadjra B.B, FE analysis of the behaviour of octagonal bonded composite repair in aircraft structures, *Computational materials science*, Vol. 43, No.4, pp. 1109-1111, 2008
- [8] Raju I. and Newman J., Stress-intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical vessels, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 104, No.4, pp. 293-298, 1982
- [9] Shahani A. and Nabavi S., Closed form stress intensity factors for a semi-elliptical crack in a thick-walled cylinder under thermal stress, *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No.8, pp. 926-933, 2006
- [10] Nabavi S. and Shahani A., Calculation of stress intensity factors for a longitudinal semi-elliptical crack in a finite-length thick-walled cylinder, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 31, No.1, pp. 85-94, 2008.
- [11] Shahani A. and Habibi S., Stress intensity factors in a hollow cylinder containing a circumferential semi-elliptical crack subjected to combined loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, No.1, pp. 128-140, 2007.
- [12] Miura N., et al., Comparison of stress intensity factor solutions for cylinders with axial and circumferential cracks, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, No.2, pp. 423-434, 2008.
- [13] Aydin L. and Artem H.S.A., Axisymmetric crack problem of thick-walled cylinder with loadings on crack surfaces, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No.6, pp. 1294-1309, 2008.
- [14] Chao Y. J. and Chen H., Stress intensity factors for complete internal and external cracks in spherical shells, *International journal of pressure vessels and piping*, Vol. 40, No.4, pp. 315-326, 1989.
- [15] El Hakimi, A., Le Grogneq P. and Hariri S., Numerical and analytical study of severity of cracks in cylindrical and spherical shells, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No.5, pp. 1027-1044, 2008.
- [16] Perl, M. and Bernshtein, V., 3-D stress intensity factors for arrays of inner radial lunular or crescentic cracks in thin and thick spherical pressure vessels, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, No.7, pp. 1466-1477, 2011.

شکل ۱۶- پیشینه درصد کاهش ضریب شدت تنش برای ترک درونی و بیرونی

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش المان محدود، اثر وصله کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش ترک شبه بیضی داخلی در مخزن کروی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- لایه ارتوروپیک منجر به کاهش قابل توجهی در مقادیر SIF نوک ترک می‌شود.
- ۲- با افزایش مقدار a/c درصد کاهش ضریب شدت تنش در اثر اعمال وصله کامپوزیتی کمتر می‌شود، به عبارتی وصله کامپوزیتی برای ترک‌های باریک موثرتر واقع می‌شوند.
- ۳- با افزایش مقدار a/t درصد کاهش ضریب شدت تنش در اثر اعمال وصله کامپوزیتی افزایش می‌یابد، به عبارتی وصله کامپوزیتی برای ترک‌های عمیق موثرتر واقع می‌شوند.
- ۴- از میان چهار ماده‌ی مختلف کامپوزیتی، گرافیت اپوکسی موثرترین ماده در کاهش ضریب شدت تنش می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کامپوزیت با مقدار بزرگتر E_1 ، در مقابل شکست مقاومت بیشتری نشان می‌دهد.
- ۵- با افزایش ضخامت کامپوزیت کاهش بیشتری در مقادیر ضریب شدت تنش رخ می‌دهد اما این روند خطی نیست.
- ۶- با افزایش پهنای کامپوزیت کاهش بیشتری در مقادیر ضریب شدت تنش رخ می‌دهد اما این روند خطی نیست و می‌توان مقدار بهینه‌ای برای پهنای وصله کامپوزیت به کار برد.

۵- نمادها

a	عمق ترک
C	نصف طول ترک
E	مدول الاستیسیته
K_I	ضریب شدت تنش حالت اول
R_i	شعاع داخلی مخزن
R_o	شعاع خارجی مخزن
T	ضخامت مخزن
T_c	ضخامت وصله کامپوزیت
W	پهنای وصله کامپوزیت

- [17] Baker A., Bonded repair of aircraft structures. Vol. 7. Springer Science & Business Media, 2012.
- [18] Benyahia F., Albedah A. and Bouiadjra B.B., Stress intensity factor for repaired circumferential cracks in pipe with bonded composite wrap. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 136, No.4, pp. 041201, 2014.
- [19] Su B. and Bhuyan G., Effect of composite wrapping on the fracture behavior of the steel-lined hoop-wrapped cylinders, International journal of pressure vessels and piping, Vol. 75, No.13, pp. 931-937, 1998.
- [20] Shahani A. and Kheirikhah M., Stress intensity factor calculation of steel-lined hoop-wrapped cylinders with internal semi-elliptical circumferential crack, Engineering fracture mechanics, Vol. 74, No.13, pp.2004-2013, 2007.
- [21] Chen, J. and Pan, H., Stress intensity factor of semi-elliptical surface crack in a cylinder with hoop wrapped composite layer, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 110, pp.77-81, 2013.
- [22] Committee, A.I.H., Engineered Materials Handbook: Adhesives and Sealants. Vol. 3. CRC. 1990.
- [23] API, A. 579-1/ASME FFS-1: Fitness-for-Service. American Society of Mechanical Engineers. 2007.
- [24] ANSYS 16.0, FE program package, ANSYS Inc. 2016.