مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۹۰، جلد ۵۰، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۱۷-۲۵ – پژوهشی – DOI: 10.22034/jmeut.2020.9691

اثر وصله‌ی کامپوزیتی برضریب شدت تنش ترک شبه بیضوی در مخزن تحت فشارکروی

هادی اسکندری* استادیار، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران
فاطمه میرزاده دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران
مسلم قنبری دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

چکیده

هدف از این مقاله بررسی اثر وصله‌ی کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش (SIF) ترک شبه بیضوی داخلی و خارجی واقع در مخزن تحت فشار کروی است. وصله‌ی کامپوزیتی فقط در اطراف ترک پیچیده شده است. تجزیه و تحلیل سه بعدی با استفاده از روش المان محدود (FEM) انجام شده‌است. زبان طراحی پارامتری ANSYS (APDL) به منظور تسهیل در مدل‌سازی ترک شبه بیضوی در مخزن تحت فشار کروی مورد استفاده قرارگرفته‌است. با استفاده از این کد اثر پارامترهایی مانند هندسه ترک (نسبت عمق ترک به ضخات مخزن و نسبت عمق ترک به نصف طول ترک)، نسبت ضخامت کامپوزیت به ضخامت مخزن و نسبت پهنای وصله‌ی کامپوزیتی به نصف طول ترک وجنس ماده‌ی کامپوزیت روی مقادیر ضریب شدت تنش ، به تفصیل مورد بررسی و بحث قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که وصله‌ی کامپوزیتی منجر به کاهش قابل توجهی در ضرایب شدت تنش در نوک ترک می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که وصله‌ی کامپوزیتی برای ترک عمیق‌تر و باریک‌تر اثر بیشتری دارد. به علاوه، وصله‌ی کامپوزیتی در کاهش ضریب شدت تنش ترک خارجی در مقایسه با ترک داخلی ، موثرتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ضریب شدت تنش، مخزن تحت فشار کروی، ترک شبه بیضوی، وصله‌ی کامپوزیتی، روش المان محدود.

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

H. eskandari Abadan Institute of Technology, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran
F. Mirzade Abadan Institute of Technology, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran
M. Ghanbari 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.

۱- مقدمه

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

در مخازن کروی به دلیل هندسه‌ی آن، توزیع تنش یکنواخت‌تر می‌باشد و به همین دلیل نقطه‌ی ضعیف کمتری در سطح آن وجود دارد. برای تولید یک مخزن تحت فشار کروی یا استوانه‌ای، قطعات نورد شده به هم جوش داده می‌شوند. این مخازن تحت فشار از یک سری صفحات منحنی که در امتداد خطوط نصف‌النهاری جوش داده شده‌اند، ساخته می‌شوند[۴]. با توجه به حضور عامل خوردگی، تنش کششی باقی مانده، و شرایط بارگذاری چرخه‌ای، این مخازن تحت فشار حساس به ترک خوردگی می‌باشند. همچنین استفاده از فشار و شوک حرارتی نیز می‌تواند منجر به ترک در این ساختار شود. دلیل عمده دیگر برای شروع ترک ، ترک خوردگی تنشی (SCC) می‌باشد که ترک در یک محیط خورنده رشد می‌کند. در نتیجه پیدایش و رشد ترک در این گونه مخازن امری اجتناب‌ناپذیر است و جهت دستیابی به عمر ایمن و حد شکست استاتیکی ضروری است که محاسبه‌ی ضریب شدت تنش مدنظر قرارگیرد. مخازن تحت فشار پیچیده شده با لایه‌ی کامپوزیتی (COPV) از یک فلز زیرین غیر سازه‌ای نازک که با کامپوزیت الیافی در اطراف آن پیچده شده‌است، تشکیل و برای نگهداری یک سیال تحت فشار طراحی شده‌است. فلز زیرین یک مانع بین مایع و کامپوزیت، برای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: eskandari@put.ac.ir
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۱
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۰۴

جلوگیری 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 جلوگیری 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 انوع مختلف ترک در انوع 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 داده اند، 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 [۱۳-۱۱] 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 یا ترک هلالی در مخزن تحت فشار کروی از طریق روش المان محدود و با کارگیری المان تکین تعیین شده‌است. در مطالعه دیگری که Perl در سال ۲۰۱۱ [16] انجام داده‌است، تأثیر هندسه‌ی مخزن کروی یعنی نسبت شعاع بیرونی به شعاع داخلی $\eta = R_o/R_i$ ، 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 مخازن 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، ۱۷]. 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 وتأثیر 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 شبهه 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 قرارگرفته‌است. 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

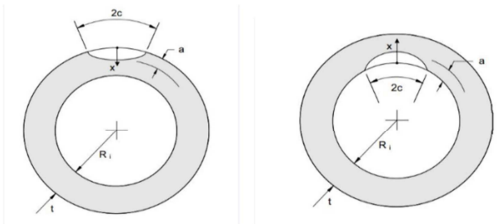
یک مخزن تحت فشار کروی با شعاع داخلی R_i و شعاع خارجی R_o با نسبت $R_o/R_i = 1.1$ در نظر گرفته شده‌است. مخزن مورد نظر از

جنس فولاد کروم- مولیبدیوم با نسبت پواسون ۰/۳و مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگا پاسکال می‌باشد. در این مقاله هم ترک داخلی و هم ترک خارجی به صورت جداگانه بررسی شده‌اند. به منظور بررسی اثر وصله‌ی کامپوزیتی بر رفتار شکست مخزن، لایه‌ی ارتوروپیکی در اطراف ترک و در شعاع خارجی مخزن پیچیده شده‌است. چهار نوع ماده مختلف کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته‌است که خواص مکانیکی این مواد کامپوزیتی در جدول ۱ [۲۲] آورده شده‌است.

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 وصله‌ی کامپوزیتی و همچنین عمق و طول ترک به ترتیب با W ، T ، a و c معرفی می‌شوند. در شکل ۱ پارامترهای ترک داخلی و خارجی طبق استانداردAPI 579/ASME FFS [۲۳] مشخص شده‌است.



ب الف

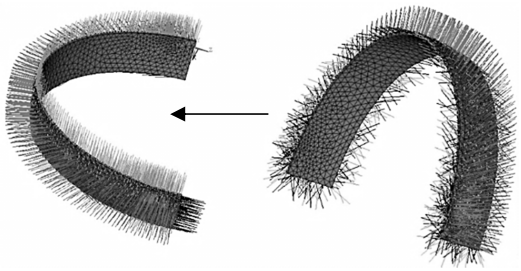
شکل ۱- تصویر سمت راست: ترک درونی تصویر سمت چپ: ترک بیرونی [۲۳]

در این مسأله فشار داخلی مخزن 25 MPa ، نسبت عمق ترک به ضخامت مخزن، a/t ، برابر با ۰/۲۵، ۰/۵و ۰/۷۵ و همچنین نسبت عمق ترک به طول ترک، a/c ، برابر ۰/۳۳، ۰/۶۶ و ۱ در نظر گرفته شده‌است. نسبت ضخامت کامپوزیت به ضخامت مخزن(T_C/T) از صفر تا یک و همچنین نسبت پهنای کامپوزیت به طول ترک (w/c) از ۱/۲۵ تا ۳ تغییر می‌کند.

۲-۱- مدلسازی المان محدود

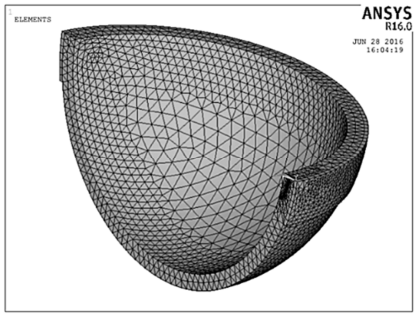
روش المان محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار ANSYS 16 [۲۲] انجام شده است. زبان طراحی پارامتری ANSYS(APDL)

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 انجایی 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 شکل۲ سیستم مختصاتی المان ها قبل و بعد از چرخاندن نشان داده شده است.

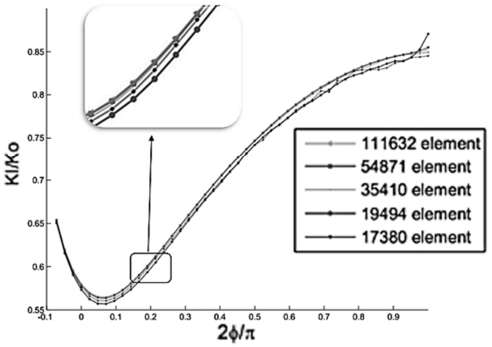


شکل ۲- نحوه جهت گیری دستگاه مختصات المان های وصله‌ی کامپوزیتی قبل و بعد از چرخش

به دلیل وجود تقارن در مسأله، برای استفاده از تعداد المان‌های کمتر،کافی است یک چهارم هندسه مخزن را مدل‌سازی کنیم. شکل ۳ هندسه مخزن بعد از مش‌بندی را نشان می‌دهد. برای بررسی مستقل بودن نتایج از تعداد المان‌ها، ازمون همگرایی انجام شده‌است که با توجه به آن از تعداد ۳۵۴۱۰ المان برای حل مسأله استفاده کرده‌ایم (شکل ۴).

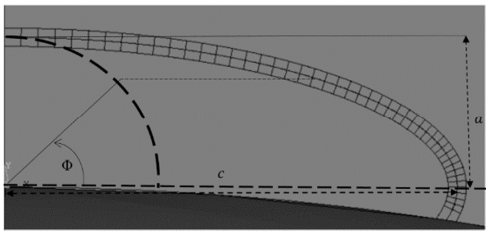


شکل ۳- مش بندی مخزن



شکل ۴- آزمون همگرایی

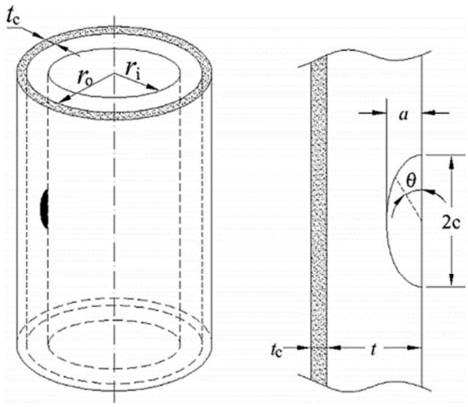
مقدار $\phi/\pi 2$ درمحور افقی،کمیتی بی بعد شده‌است که زاویه‌ی جبهه ی ترک را نشان می‌دهد. متغیر ϕ در شکل۵ نشان داده شده‌است. همچنین متغیرهای K_I وK_o در ادامه در رابطه ۱ و ۲ تعریف شده‌اند.



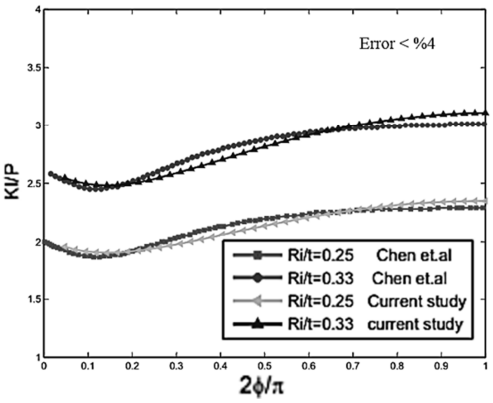
شکل ۵- تعریف متغیرهای ترک

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]



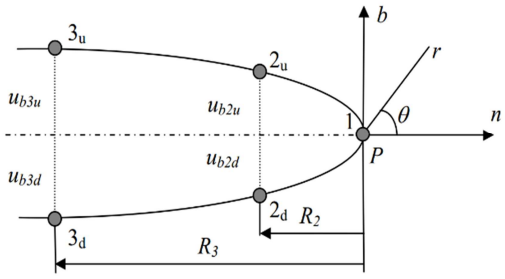
شکل۷- مقادیر نرمال شده‌ی ضرایب شدت تنش با مدل موجود در مقاله Chen [۲۱]

۳- نتایج

۳-۱- محاسبه ضریب شدت تنش به روش DCT

ضریب شدت تنش می تواند با استفاده از روش تکنیک همبستگی جابجایی(DCT[۱]) محاسبه شود. روش‌های محاسبه‌ی شدت تنش براساس جابجایی معمولا نیازمند دو شرط زیر هستند: ۱) در لایه اول المان های 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 درسطح 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.



شکل۸- نحوه قرارگیری گره‌ها در نوک ترک[۲۴]

[۱] Displacement Correlation Technique

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 می‌توان طبق رابطه (۱)که در آن از میزان جابجایی پنج نود نشان داده شده در شکل ۸، بدست آورد[۲۴]:

$$K_I = \frac{\sqrt{2\,\pi}}{8(1-\upsilon^2)}\left[\frac{R_3^{3/2}(u_{b2u}-u_{b2d}) - R_2^{3/2}(u_{b3u}-u_{b3d})}{\sqrt{R_2}\sqrt{R_3}(R_3-R_2)}\right] \quad (۱)$$

که در این رابطه u نشان‌دهنده جابجایی نود ها می‌باشد. 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_o که از رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید، نرمال شده‌است:

$$K_o = \sigma_{\theta\theta}\sqrt{\pi a/Q} \quad (۲)$$

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

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{PR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (۳)$$

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

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}; \qquad a/c < 1 \quad (۴)$$

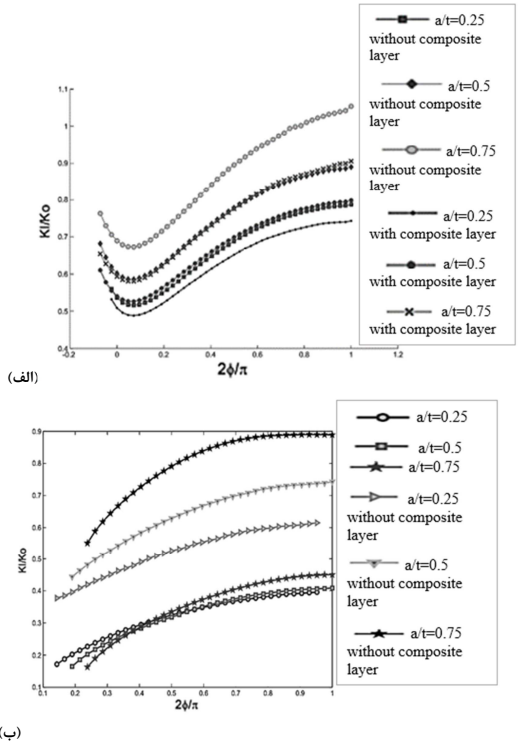
$$Q = 1 + 1.464(c/a)^{1.65}; \qquad a/c > 1 \quad (۵)$$

در ادامه نمودارهای K_I/K_o بر حسب $2\,\Phi/\pi$ برای ترک داخلی و خارجی رسم شده‌اند که برای بررسی نتایج از آنها استفاده می‌کنیم.

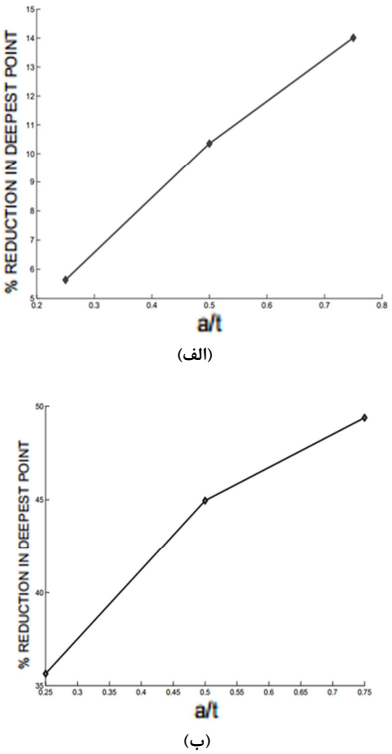
۳-۲- تأثیر هندسه‌ی ترک

برای بررسی اثر هندسه‌ی ترک دو پارامتر a/t و a/c در نظر گرفته شده‌است. در ابتدا نسبت a/c برابر با ۰/۳۳و a/t برابر با مقادیر ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۲۵ قرار داده شده‌است. همچنین نسبت T_C/T و w/c به ترتیب ۰/۲۵ و ۲ و جنس وصله‌ی کامپوزیتی گرافیت – اپوکسی در نظر گرفته شده‌است.

همانطور که درشکل ۹ نشان داده شده‌است برای مقدار ثابت $a/c = 0.33$ با افزایش نسبت عمق به ضخامت مخزن(a/t) مقادیر ضریب شدت تنش افزایش می‌یابند. به عبارتی ترک‌هایی با عمق بیشتر خطرناک‌تر محسوب می‌شوند. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که بیشترین ضریب شدت تنش در عمیق‌ترین نقطه در جبهه‌ی ترک رخ داده‌است یعنی عمیق‌ترین نقطه در نوک ترک زودتر از سایر نقاط رشد خواهدکرد. همان‌گونه که در شکل ۹مشخص است، وصله‌ی کامپوزیتی سبب کاهش مقادیر ضریب شدت تنش شده‌است. در شکل ۱۰ درصد کاهش مقادیر ضریب شدت تنش در عمیق‌ترین نقطه‌ی ترک بر اساس a/t رسم شده‌اند. قابل مشاهده است که برای ترک‌هایی با a/t بزرگتر درصد کاهش، بیشتر شده‌است به عبارتی وصله‌ی کامپوزیتی برای ترک‌هایی با a/t بزرگتر موثرتر واقع شده‌اند و نقش مهمی در کاهش ضرایب شدت تنش داشته‌اند.

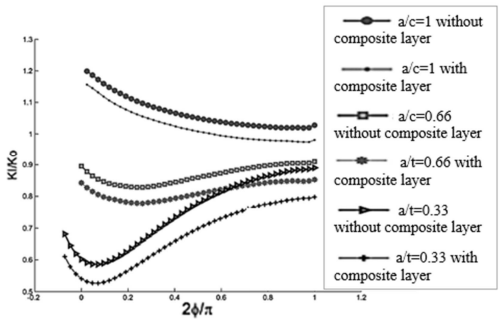


شکل۹- توزیع مقادیر ضریب شدت تنش در جبهه‌ی ترک برای $a/c = 0.33$ و a/t های مختلف ،الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

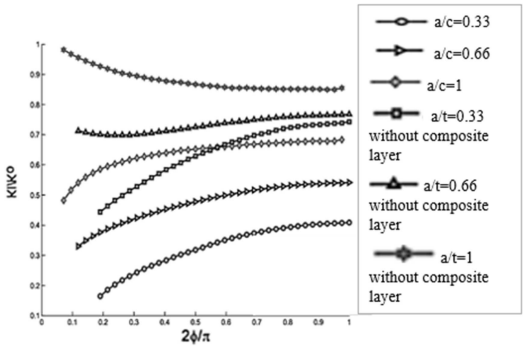


شکل ۱۰- درصد کاهش مقادیر ضریب شدت تنش در عمیق ترین نقطه‌ی ترک برای a/t های مختلف، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

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 وصله‌ی کامپوزیتی سبب کاهش مقادیر ضریب 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 وصله‌ی 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 ترک های باریک‌تر $(a/c$ کمتر) درصد کاهش ضریب شدت تنش با اعمال وصله‌ی کامپوزیتی بیشتر می‌شود یا به عبارتی وصله‌ی کامپوزیتی برای ترک‌های باریک‌تر موثرتر واقع شده‌است.

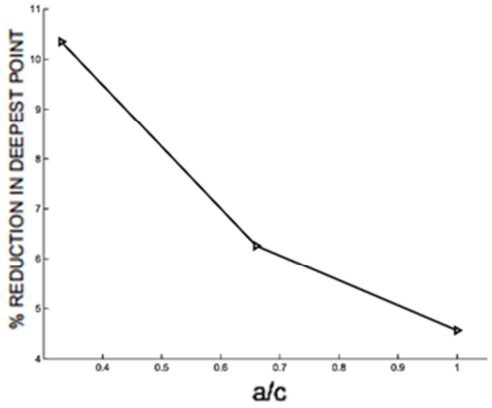


(الف)

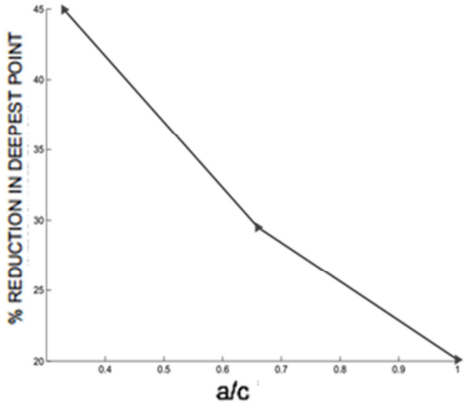


(ب)

شکل ۱۱- توزیع مقادیر ضریب شدت تنش در جبهه‌ی ترک برای و $a/t = 0.5$ های مختلف، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی



الف

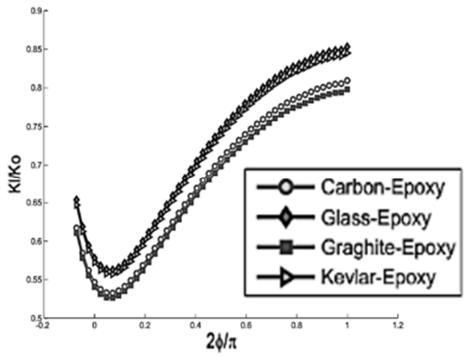


ب

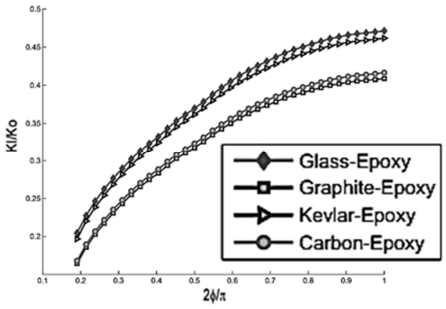
شکل ۱۲- درصد کاهش ضریب شدت تنش برای مقادیر مختلف a/c ، الف: ترک درونی ب: ترک بیرونی

۳-۳- تأثیر جنس وصله‌ی کامپوزیتی

با توجه به شکل ۱۳ از میان چهار ماده‌ی مختلف کامپوزیتی، گرافیت اپوکسی موثرترین ماده در کاهش ضریب شدت تنش می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ماده‌ایی 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)

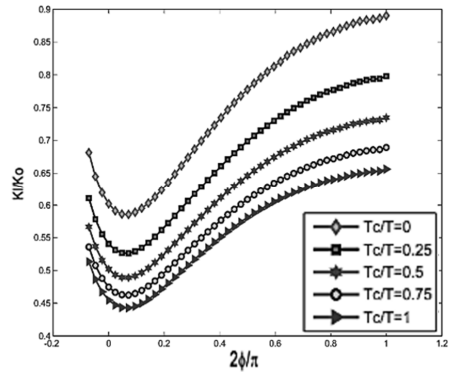


(ب)

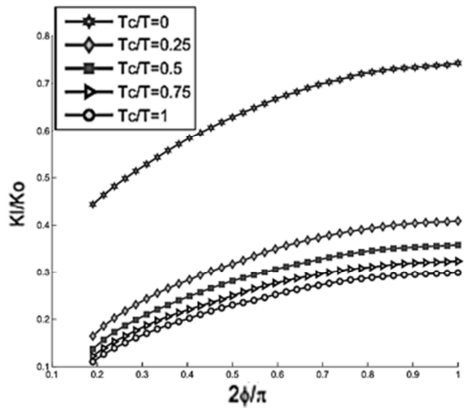
شکل ۱۳- اثر جنس ماده‌ی کامپوزیتی بر ضرایب شدت تنش، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

۳-۴- تأثیر ضخامت وصله‌ی کامپوزیتی

اثر نسبت ضخامت وصله‌ی کامپوزیتی به ضخامت مخزن (T_C/T) برای هر دو مورد ترک درونی و بیرونی، در شکل ۱۴ مورد بررسی قرار گرفته‌است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت ضخامت وصله‌ی کامپوزیتی به ضخامت مخزن (T_C/T) مقادیر ضریب شدت تنش کاهش می‌یابند. با مقایسه درصد کاهش ضریب شدت تنش در عمیق-ترین جای ترک برای مقادیر مختلف T_C/T ، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ضخامت کامپوزیت کاهش بیشتری در مقادیر ضریب شدت تنش رخ می‌دهد اما این روند خطی نیست .



(الف)

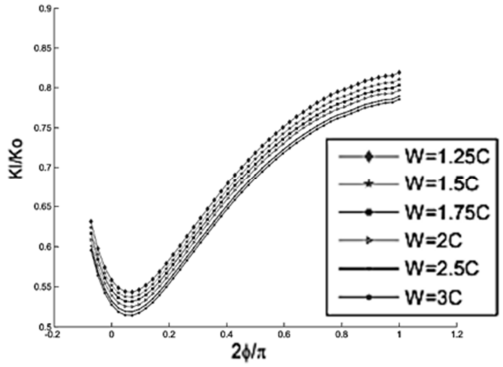


(الف)

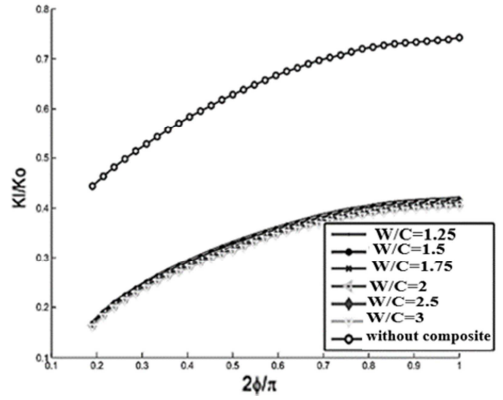
شکل ۱۴- توزیع ضرایب شدت تنش برای نسبت‌های مختلف ضخامت ارتوروپیک به ضخامت مخزن ، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

۳-۵- تأثیر پهنای وصله ی کامپوزیتی

به منظور یافتن اثر پهنای وصله‌ی کامپوزیتی ، مقادیر مختلفی از نسبت پهنای کامپوزیت به نصف طول ترک (w/c) در نظرگرفته شده-است. شکل ۱۵ توزیع ضرایب شدت تنش در جبهه‌ی ترک را برای مقادیر مختلف w/c نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده‌است، افزایش مقادیر w/cسبب کاهش ضرایب شدت تنش می‌شود اما این روند خطی نیست.



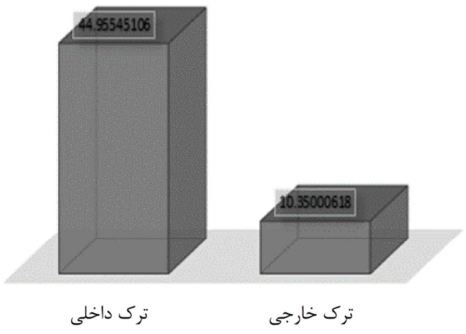
(الف)



(ب)

شکل ۱۵- توزیع ضرایب شدت تنش برای نسبت‌های مختلف پهنای وصله‌ی کامپوزیتی به نصف طول ترک w/c، الف: ترک درونی، ب: ترک بیرونی

درحالت کلی با مقایسه بیشینه درصد کاهش ضریب شدت تنش برای ترک خارجی و داخلی برای مقادیر یکسانی از a/c و a/t ، مطابق با شکل ۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که اعمال وصله‌ی کامپوزیتی برای ترک خارجی، در کاهش ضریب شدت تنش تأثیر بیشتری دارد.



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

۴- نتیجه گیری

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

۱- لایه ارتوروپیک منجر به کاهش قابل توجهی در مقادیر SIF در نوک ترک می‌شود.

۲- با افزایش مقدار a/c درصد کاهش ضریب شدت تنش در اثر اعمال وصله‌ی کامپوزیتی کمتر می‌شود، به عبارتی وصله‌ی کامپوزیتی برای ترک‌های باریک موثرتر واقع می‌شوند.

۳- با افزایش مقدار a/t درصد کاهش ضریب شدت تنش در اثر اعمال وصله‌ی کامپوزیتی افزایش می‌یابد، به عبارتی وصله‌ی 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 وصله‌ی 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 وصله‌ی کامپوزیت
W	پهنای وصله‌ی کامپوزیت
FEM	روش المان محدود
LBB	نشت قبل از شکست
SIF	ضریب شدت تنش
$\emptyset$	زاویه‌ی پارامتری ترک
v	نسبت پواسون

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 Grognec 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.

[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.