

تحلیل اجزاء محدود ترک های نیم بیضی طولی و عرضی در مخازن استوانه ای CNG کامپوزیتی با آستری فلزی تحت فشار داخلی و بار حرارتی

ایجاد و گسترش ترک یکی از عوامل مهم در شکست قطعات مهندسی می باشد که می تواند باعث خسارات مالی و جانی زیادی گردد. لذا بررسی و مطالعه ترک های موجود در سازه های تحت بارگذاری بسیار ضروری می باشد. در این مقاله به بررسی و تحلیل ترک نیم بیضی در مخازن تحت فشار CNG کامپوزیتی با آستر فلزی پرداخته شده است. مخزن مورد بررسی یک مخزن تحت فشار CNG نوع سوم می باشد. در این مخزن که پوشش کامپوزیتی آن از جنس برون/اپوکسی، کولار/اپوکسی و کرین/اپوکسی است؛ ترک های داخلی طولی و عرضی و همچنین ترک خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که هندسه ترک تأثیر زیادی بر ضریب شدت تنش دارد. ترک نیم بیضی داخلی طولی بحرانی ترین ترک است و زمانی که این ترک در کنار ترک عرضی خارجی قرار بگیرد، بحرانی تر می شود و ضریب شدت تنش در ترک نیم بیضی طولی داخلی افزایش می یابد. کامپوزیت برون/اپوکسی مقاومت بیشتری نسبت به افزایش فشار داخلی دارد و افزایش تعداد لایه های کامپوزیت باعث افزایش ضریب شدت تنش ترک می شود. همچنین در مخزن با پوشش برون/اپوکسی، زاویه ۴۰ تا ۴۵ درجه نسبت به ترک طولی و عرضی برای قرارگیری الیاف بهترین حالت است. اگر این زاویه بیشتر یا کمتر باشد، ضریب شدت تنش افزایش می یابد.

محمد سالاری^۱
استادیار

زینب لطفی منش^۲
کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: مخزن CNG، ترک سطحی نیم بیضی، ضریب شدت تنش، کامپوزیت، تحلیل اجزاء محدود

۱- مقدمه

شکست ناگهانی بسیاری از تجهیزات و سازه های صنعتی علاوه بر عواقب جانی و ناگوار که در پی دارد، ضرر چشمگیر اقتصادی نیز به دنبال دارد.

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، ایران، m.salari@qom.ac.ir
^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، ایران، zeynablotfi1369@gmail.com

تحقیقات مختلف نشان داده است که اکثر موارد شکست و خرابی سازه‌های مکانیکی ناشی از گسترش ترک در آنها است. مواد و سازه‌های مهندسی، عموماً حاوی ترک‌ها و حفره‌های ریز هستند که در حین ساخت و یا در شرایط کارکرد به وجود می‌آیند [۱]. این ترک‌ها و حفره‌ها باعث ایجاد تمرکز تنش در داخل جسم شده و با رشد ترک ممکن است واماندگی ناگهانی سازه اتفاق بیافتد. مخازن تحت فشار به مخازنی اطلاق می‌گردد که فشاری بالاتر از اتمسفر داشته باشند. این مخازن به‌طور وسیعی در صنایع مختلف نظیر صنایع پتروشیمی، غذایی و دارویی، شیمیایی، هسته‌ای و... بکار می‌روند. به‌طور کلی در مخازن تحت فشار دو نوع ترک وجود دارد؛ ترک راه به در و ترک غیر راه به در. ترک راه به در ترکی است که در کل ضخامت قطعه انتشار می‌یابد. ترک غیر راه به در نیز ترکی است که فقط در قسمتی از ضخامت گسترش یافته و می‌تواند در داخل ضخامت یا روی سطح به‌صورت نیم‌بیضی گسترش یابد [۲]. ترک راه به در به آسانی قابل شناسایی است؛ چرا که در مخزن تحت فشار باعث نشت و همچنین افت فشار در مخزن می‌شود، از طرفی ترک غیر راه به در قابل تشخیص نیست و این عدم شناخت و تشخیص رفتار این نوع ترک لزوم بررسی ترک سطحی نیم‌بیضی را نشان می‌دهد. امروزه استفاده از سیستم‌های ترکیبی یا کامپوزیت روبه افزایش است؛ چرا که بشر به وسعت کاربرد این ترکیبات پی برده و لزوم استفاده از آنها را درک نموده است. البته در برخی از سازه‌ها و تجهیزات هنوز نیاز به استفاده از مواد ساده فلزی همچون آلومینیوم و فولاد وجود دارد و امکان جایگزینی آنها با مواد کامپوزیتی وجود ندارد و یا مقرون به‌صرفه نیست. با این حال در برخی کاربردهای مهندسی، مانند صنایع هوافضا، صنایع دریایی، حمل‌ونقل و امثال آنها نیاز به استفاده از مواد کامپوزیتی می‌باشد. خواص خوب کامپوزیت‌ها در کنار وزن سبک آنها باعث شده که از این ترکیب‌ها برای افزایش مقاومت مخازن تحت فشار CNG^۱ در مقابل رشد ترک‌ها و جلوگیری از انفجار استفاده کنند. تحقیقات تئوری و تجربی بیانگر آن است که ترک‌های اولیه موجود در جداره مخازن با هر شکل و ابعادی پس از اعمال بارگذاری دوره‌ای رشد کرده و به ترک نیم‌بیضی تبدیل می‌شوند [۳].

تحلیل و بررسی تنش پیش‌نیاز طراحی مخازن است، بنابراین با بررسی تأثیر کامپوزیت‌ها بر چگونگی رفتار ترک نیم‌بیضی در مخازن تحت فشار CNG که دارای آستری فلزی هستند می‌توان به پیش‌بینی رفتار ترک و در نهایت طراحی بهتر این مخازن پرداخت. مخازن CNG نوع ۲، اولین بار در دهه هفتاد میلادی در ایتالیا از یک آستر فلزی پیچیده شده با الیاف شیشه ساخته شدند. در سال ۱۹۸۲ به منظور سبک‌تر مخازن از آستر آلومینیمی استفاده شد. روند سبک کردن مخازن تا سال ۱۹۹۲ و با ارائه مخازن تمام کامپوزیتی با آستر پلاستیکی ادامه یافت. در این سال‌ها استانداردهای مختلفی در مورد ساخت مخازن تدوین گردید و بر اساس این استانداردها، مخازن CNG طبق شکل (۱) به چهار دسته زیر تقسیم‌بندی شدند:

- ۱- مخازن تمام فلزی نوع یک
- ۲- مخازن کامپوزیتی نوع دوم با آستر فلزی (دورپیچ)
- ۳- مخازن کامپوزیتی نوع سوم با آستر فلزی (تمام پیچ)
- ۴- مخازن کامپوزیتی نوع چهارم با آستر پلاستیکی [۴].

^۱ Compressed Natural Gas



شکل ۱- انواع مخازن CNG [۴]

تاکنون فعالیت‌های مختلفی در زمینه شکست در مخازن صورت گرفته است. شاهانی و خیرخواه ضریب شدت تنش حالت مود I برای یک ترک نیم‌بیضی محیطی در سطح داخلی یک مخزن CNG با روکش فولادی حلقه‌ای را محاسبه کرده‌اند که در این مقاله ضرایب شدت تنش در امتداد جلوی ترک به‌طور مستقیم با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی برای طیف گسترده‌ای از تغییرات هندسه ترک محاسبه شده است. همچنین تأثیر بسیاری از پارامترها از جمله فشار داخلی مخزن، ضخامت لایه کامپوزیت و خصوصیات ماده کامپوزیت بر روی ضریب شدت تنش ترک مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اعتبارسنجی نتایج و به دلیل عدم وجود نتایج برای یک ترک نیمه بیضی محیطی، یک ترک محوری نیم‌بیضی در یک استوانه فولادی با روکش کامپوزیت مدل شده و نتایج با آن‌ها مقایسه شده است [۵].

Chen و همکارش رفتار شکست در مخزن تحت فشار CNG که با لایه‌های کامپوزیت پیچیده شده برای ترک محوری در سطح داخلی را مورد بررسی قرار داده‌اند. با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی، ضرایب شدت تنش در امتداد جبهه ترک برای پروفیل‌های مختلف ترک به دست آمده است. اثرات هندسه مخزن، ضخامت لایه‌های کامپوزیت پیچیده شده و توزیع ویژگی لایه کامپوزیت بر ضریب شدت تنش به طور دقیق مورد بحث قرار گرفته است [۶]. Livieri و همکارش به بررسی ضرایب شدت تنش برای ترک‌های بیضی در مخازن استوانه‌ای و کروی پرداخته و تقریب بسیار دقیقی از ضریب شدت تنش ترک‌های بیضی جاسازی شده در مخازن استوانه‌ای و کروی ارائه دادند. آن‌ها ضریب شدت تنش را در امتداد کل مرز ترک ارزیابی کردند که این کار را با استفاده از یک تابع وزنی چند جمله‌ای بر اساس تقریب دوم انتگرال از نظر انحراف از کانتور از یک دیسک انجام دادند [۷].

Ai و همکارش اثر خنک‌کننده ژول تامسون بر روی روش نشت قبل از شکست (LBB)^۱ در مخازن تحت فشار استوانه‌ای را بررسی کردند. روش نشت قبل از شکست یک روش مهم برای حفظ یکپارچگی مخازن تحت فشار است که اثر خنک‌کننده ژول تامسون در حین نشت ممکن است بر اعتبار روش نشت قبل از شکست تأثیر بگذارد. در این مقاله یک مدل حلقه‌ای مبتنی بر نرم‌افزار MATLAB با شروع کار با گاز در دمای اتاق و فشار ۲۵۰ بار در ورودی ترک ایجاد شده است. از این مرحله فشار دما و دمای هوا در ابتدا محاسبه می‌شود که به نوبه خود بر خصوصیات گاز مانند چگالی، ویسکوزیته، هدایت حرارتی و ضریب انتقال گرما تأثیر می‌گذارد. انتقال گرما و تجزیه و تحلیل FEA با استفاده از یک مدل سه‌بعدی از صفحه با ترک مرکزی از طریق ضخامت انجام شده است [۸]. مهدی فکور و همکارانش تأثیر هندسه و خواص مکانیکی پوشش‌های کامپوزیتی بر ضرایب شدت تنش در مخازن تحت فشار حاوی ترک‌های سه‌بعدی نیم‌بیضی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۹].

صابر قدریان و علی قربان‌پور آرائی به بررسی توزیع تنش و کرنش در یک مخزن استوانه‌ای جدار نازک تحت دو فشار داخلی ۵۰ و ۵۰۰ مگاپاسکال ناشی از سیال پرداخته و همچنین به تحلیل و بررسی رفتار ترک بر روی دیواره خارجی مخزن و با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته‌اند [۱۰]. حیدری رارانی و احمدی جبلی مدل‌سازی المان محدود تخریب در مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با استفاده از افزونه WCM در نرم‌افزار آباکوس^۲ را انجام دادند که در این مقاله افزونه WCM به منظور شبیه‌سازی المان محدود متقارن محوری یا سه‌بعدی مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع III و IV برای نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است [۱۱].

Sharma و Borse با مدل‌سازی اجزاء محدود و تست، سه نوع مختلف از عدسی‌های انتهایی مخازن را مورد تحلیل قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که عدسی نیم‌کروی از نظر جابه‌جایی و تنش پیشنهاد مطلوبی نیست [۱۲].

Drazan و همکاران به تحلیل توزیع تنش در مخزن تحت فشار با تغییر هندسه انتهایی مخزن پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی و مقایسه دو نوع از عدسی‌های کاربردی یعنی بیضوی و کروی با استفاده از روش اجزای محدود و نیز تحلیل پرداختند. آن‌ها از سه نمونه مختلف المان SOLID95 PLANE183 و SHELL181 استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که المان‌های SHELL181 در هر دو نوع عدسی بهترین پاسخ را ارائه می‌دهد؛ زیرا تعداد المان‌های همگرا در آن کمترین است و نیز زمان تحلیل نیز کاهش می‌یابد [۱۳].

Jadav و Modi در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که تنش شعاعی در حالت انتهایی نیم‌کروی در مقایسه با دیگر نمونه‌های عدسی انتهایی کمتر می‌باشد. در این مقاله محققان به مقایسه سازه‌های مختلف از نظر هندسه مخزن با سه نوع متفاوت عدسی نیم‌کروی، تخت و بیضوی پرداختند [۱۴]. همچنین حبیبی و مرادی خواه به بررسی رفتار یک ترک نیم‌بیضی در مخازن تحت فشار استوانه‌ای از جنس فولاد با روش المان محدود تقویت شده یا XFEM توسط نرم‌افزار آباکوس پرداختند و ضریب شدت تنش ترک‌های نیم‌بیضی متغیر تحت فشارهای داخلی مختلف را در طول جبهه ترک بررسی کردند [۱۵]. نتایج به‌دست‌آمده با گزارش‌های قبلی مقایسه گردیده و همخوانی خوبی حاصل شده است که می‌تواند در بررسی احتمال شکست مخازن استوانه‌ای با ترک نیم‌بیضی مفید واقع شود.

¹ Leak Before Breake (LBB)

² Abaqus

Guven فشار شکست را در مخازن تحت فشار جدار نازک و ضخیم با استفاده از تئوری پلاستیسیته به دست آورد. او فشار شکست را در مخازن با آلیاژهای مس و برنج به دست آورده و تحلیل خود را با استفاده از تئوری و عددی صحنه‌سنجی نمود [۱۶]. Balicevic و همکاران یک روش جدید بر اساس تئوری ورق‌ها و پوسته‌های متقارن برای تعیین توزیع تنش در مخازن تحت فشار با عدسی بیضی ارائه دادند که در آن با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل حاکم، مقدار نیروی داخلی و خمش و جابه‌جایی در مخزن قابل استخراج می‌باشد [۱۷]. Raparla و Seshaiyah یک مخزن تحت فشار را بر اساس استاندارد ASME طراحی نموده و به دو شکل یک‌لایه و چندلایه آن را مدل نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تنش‌های به وجود آمده در مخازن چندلایه نسبت به مخازن تک‌لایه کاهش چشمگیری پیدا نمودند [۱۸].

همچنین Cohen و همکاران مطالعات خود را بر روی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با استفاده از روش اجزای محدود انجام دادند. آنها به بهینه‌سازی وزن و مقرون‌به‌صرفه بودن نوع کامپوزیت پرداخته و به این نتیجه رسیدند که مخازن کامپوزیتی می‌تواند در وزن‌های بسیار کمتر مورد استفاده قرار گرفته و پارامتر وزن در آن‌ها کمینه گردد [۱۹].

مقاله حاضر به بررسی ضریب شدت تنش ترک نیم‌بیضی در مخازن تحت فشار CNG نوع سوم پرداخته و هدف ارائه نتایج کلیه تأثیراتی است که پارامترهای جانبی بر ضریب شدت تنش ترک می‌گذارند. این پارامترها شامل هندسه ترک، خواص پوشش کامپوزیتی، ضخامت و تعداد لایه‌های کامپوزیتی، فشار داخلی، بارگذاری حرارتی و تأثیر نوع قرارگیری ترک به صورت طولی و عرضی است. تأثیر ترتیب لایه‌چینی لایه‌های کامپوزیت بر ضریب شدت تنش و بهینه‌ترین حالت ابعاد هندسی لایه کامپوزیتی و فلزی و لایه‌چینی کامپوزیت با توجه به مقدار مینیمم ضریب شدت تنش بررسی شده است. همچنین تأثیر بارگذاری حرارتی در تحلیل ترک بررسی شده است که در پژوهش‌های پیشین به این شکل مشاهده نمی‌گردد. شایان ذکر است از دیگر نوآوری‌های این مقاله وجود دو ترک به صورت هم‌زمان مدل‌سازی شده و تأثیر فاصله این دو ترک نسبت به هم است.

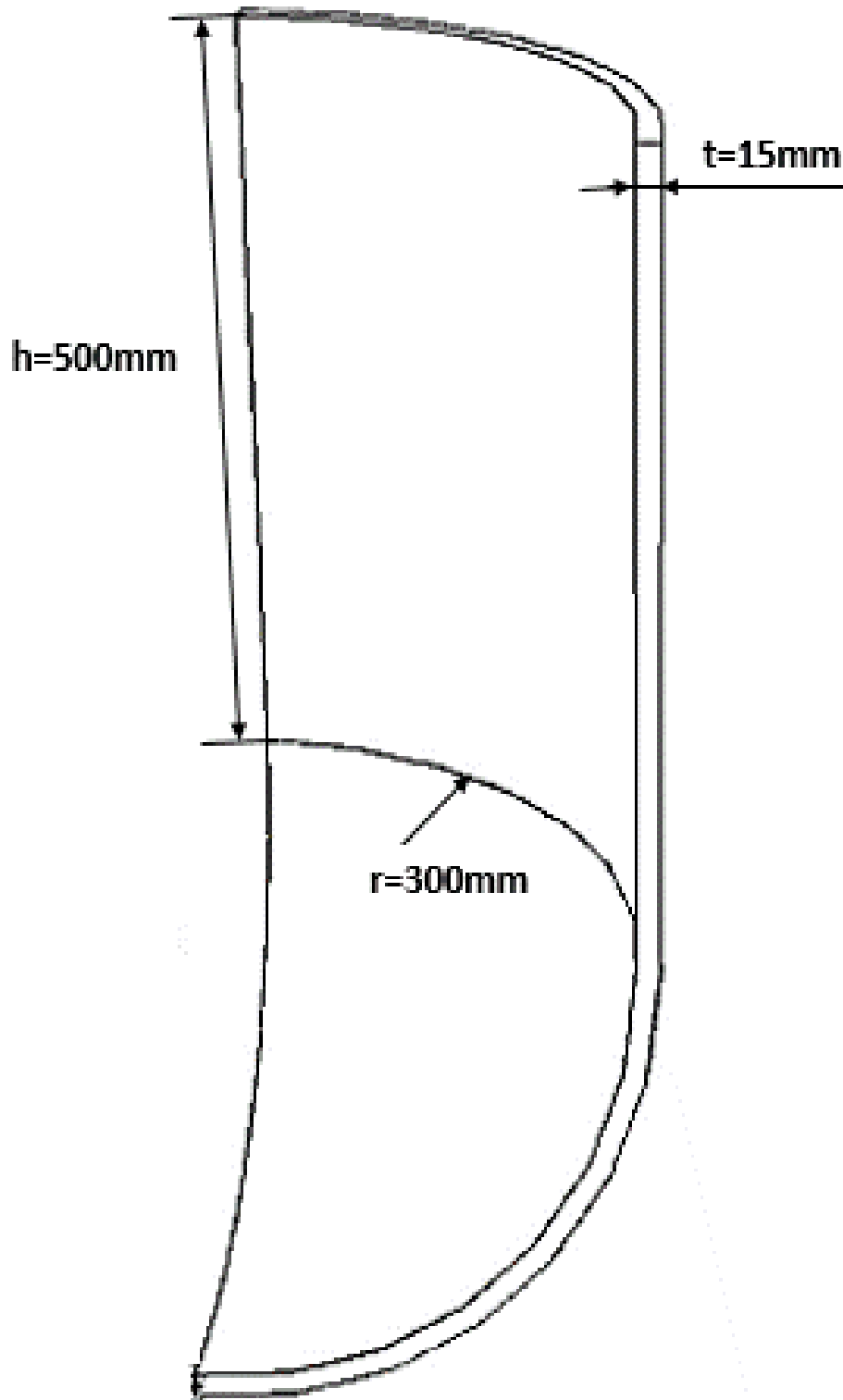
۱-۱- هندسه مخزن

در این پژوهش در ابتدا مخزن نوع اول مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت ضخامت به شعاع مخزن کمتر از $0/1$ است و در نتیجه یک مخزن جدار نازک محسوب می‌شود. هندسه این مخازن به این صورت است که قطر آن 600 میلی‌متر، ضخامت 15 میلی‌متر، طول استوانه مخزن 1000 میلی‌متر است. در ابتدا یک ترک نیم-دایره‌ای با عمق ترک 3 میلی‌متر، طول ترک 6 میلی‌متر به صورتی که نسبت (a/c) برابر 1 است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. فشار داخلی مخزن نیز 20 مگاپاسکال و تحلیل به صورت مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ است. برای مدل‌سازی این مخزن از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است.

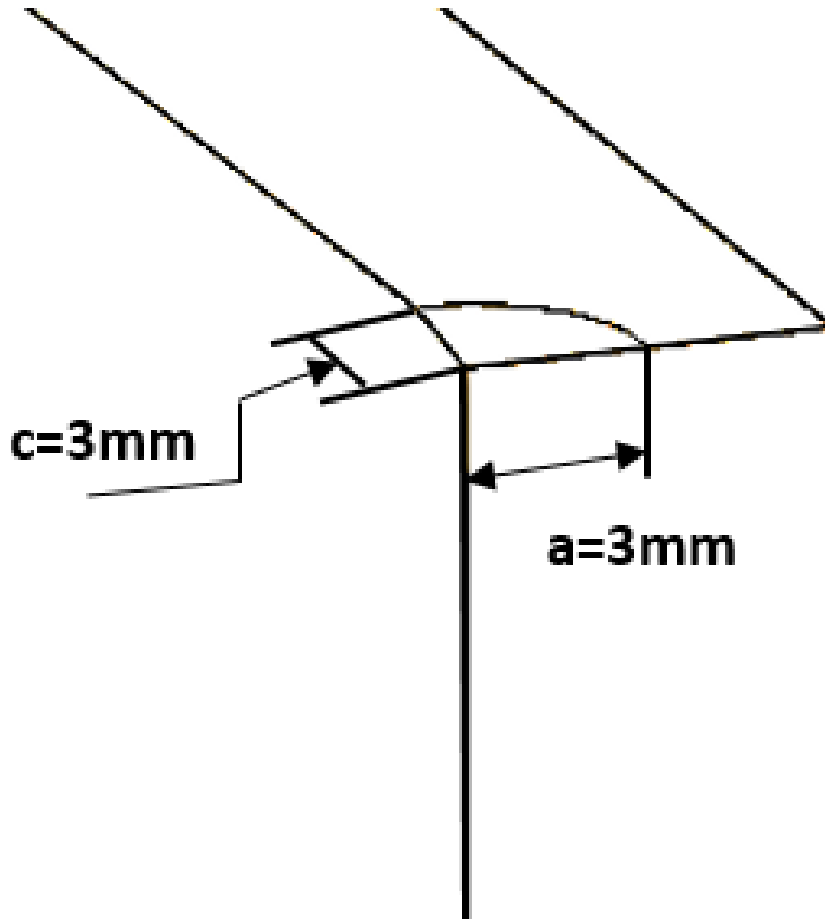
در مدل‌سازی‌هایی که در این پژوهش انجام شده با ثابت ماندن هندسه مخزن ضخامت مخزن به دو بخش فلزی و کامپوزیتی برای آستری و پوشش کامپوزیتی مخزن تبدیل می‌شود. هر چه آستر ضخیم‌تر باشد ضخامت بخش کامپوزیت کمتر می‌شود. پوشش کامپوزیتی شامل لایه‌های کامپوزیتی است که پس از مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزاء محدود به الیاف هر کدام از این لایه‌ها زاویه‌ای اختصاص داده می‌شود. همچنین برای استناد به

^۱ LEFM

نتایج به‌دست‌آمده در مدل‌سازی‌های مختلف با ثابت ماندن شرایط و هندسه مخزن، هندسه ترک متغیر است. از آنجایی‌که هندسه مدنظر با توجه به شرایط مرزی و بارگذاری متقارن است، برای صرفه‌جویی در وقت و کمتر شدن زمان تحلیل، یک‌هشتم مخزن مدل گردیده است. در شکل (۲) شماتیکی از هندسه مخزن و شکل (۳) نمای شماتیکی از هندسه ترک ارائه شده است.



شکل ۲- شماتیکی از هندسه مخزن استوانه‌ای



شکل ۳- شماتیکی از هندسه ترک

۲-۱- روابط تحلیلی تعیین ضریب شدت تنش

همان‌طور که پیشتر بیان شد ضریب شدت تنش پارامتر اساسی رفتار شکست سازه‌های ترک‌دار است. این ضریب تحت بارگذاری مود یک در مخزن تحت فشار استوانه‌ای جدارنازک از روابط زیر به دست می‌آید. برای محاسبه تنش عرضی و طولی در مخزن استوانه‌ای به ترتیب از رابطه (۱) و (۲) استفاده می‌گردد. روابط (۳) تا (۵) نیز برای تعیین ضریب شدت تنش در ترک هستند که در این روابط، (σ) تنش روی وجوه ترک، (P) فشار داخلی، (t) ضخامت و (r) شعاع داخلی مخزن، (a) شعاع کوچک و (c) شعاع بزرگ ترک نیم‌بیضی و (K_I) ضریب شدت تنش در مود یک است [۲۰].

$$\sigma_t = \frac{Pr}{t} \quad (1)$$

$$\sigma_l = \frac{Pr}{2t} \quad (2)$$

$$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\Phi} \left[\sin^2\theta + \left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2\theta \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

$$\Phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(\frac{c^2 - a^2}{c^2} \right) \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{4}} d\theta = \frac{\pi}{2} \left[\frac{3}{4} + \left(\frac{a}{2c} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$K_I = \frac{2\sigma\sqrt{\pi a}}{\pi \left[\frac{3}{4} + \left(\frac{a}{2c} \right)^2 \right]} \left[\sin^2 \theta + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \theta \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

۲- روش تحقیق

۲-۱- صحت‌سنجی و مدل‌سازی مخزن

برای تحلیل عددی و شبیه‌سازی هندسه مسئله به صورت سه‌بعدی از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. با توجه به اینکه نتایج و اطلاعات تحلیل ترک سه‌بعدی در مخزن CNG نوع سوم در مقالات قبلی یافت نشد؛ لذا در این تحقیق برای صحت‌سنجی نتایج عددی، از نتایج تحلیل مخزن CNG نوع اول و دوم استفاده می‌شود؛ یعنی یک بار مخزن بصورت نوع اول و یکبار بصورت نوع دوم مدل‌سازی شده و با روابط تحلیلی و نتایج پژوهش‌های قبلی مقایسه شده است. مخزن نوع دوم خیلی شبیه به نوع سوم است، با این تفاوت که در قسمت عدسی انتهایی دارای پوشش کامپوزیتی نمی‌باشد. در اینجا در ابتدا ترک نیم‌دایره‌ای در مخزن نوع اول تحت فشار داخلی مدل‌سازی شده و نتایج به دست آمده با نتایج تحلیلی حاصل از روابط موجود ضریب شدت تنش در مکانیک شکست (رابطه (۵)) مقایسه می‌شود.

جدول (۱) خواص مکانیکی آلومینیوم را نمایش می‌دهد. برای جواب‌های دقیق و زمان تحلیل کوتاه‌تر لازم است مدل به دو قسمت یا بلوک تقسیم شود. نوع المان مورد استفاده برای بلوک ترک از نوع درجه دو^۱ است و بلوک مخزن از نوع خطی^۲ و درجه یک است. از المان منفرد^۳ در بلوک ترک استفاده شده است. برای ایجاد این المان‌ها لازم است در نرم‌افزار آباکوس اطراف جبهه ترک پارتیشن‌بندی مناسبی ایجاد شود، سپس با استفاده از نرم‌افزار آباکوس المان‌های ذکر شده به این قسمت‌ها اختصاص داده می‌شود.

در قسمت بلوک ترک با استفاده از پارتیشن‌زدن‌های مناسب در نرم‌افزار آباکوس، جبهه ترک تعریف و مدل می‌شود. برای ایجاد پارتیشن‌ها از دستور Create partition و سپس گزینه Sketch و Sweep edges استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از دستور Create crack و انتخاب روش Contour integral مشخصات ترک تعریف می‌شود. نرم‌افزار در این روش یک کانتور یا مسیر در اطراف نوک ترک در نظر گرفته و در این مسیر مقدار انتگرال J را محاسبه می‌کند. این مقدار با ضرایب شدت تنش رابطه داشته و از روی آن می‌تواند مقادیر ضریب شدت تنش را محاسبه کند. این موارد در شکل (۴) قابل مشاهده است.

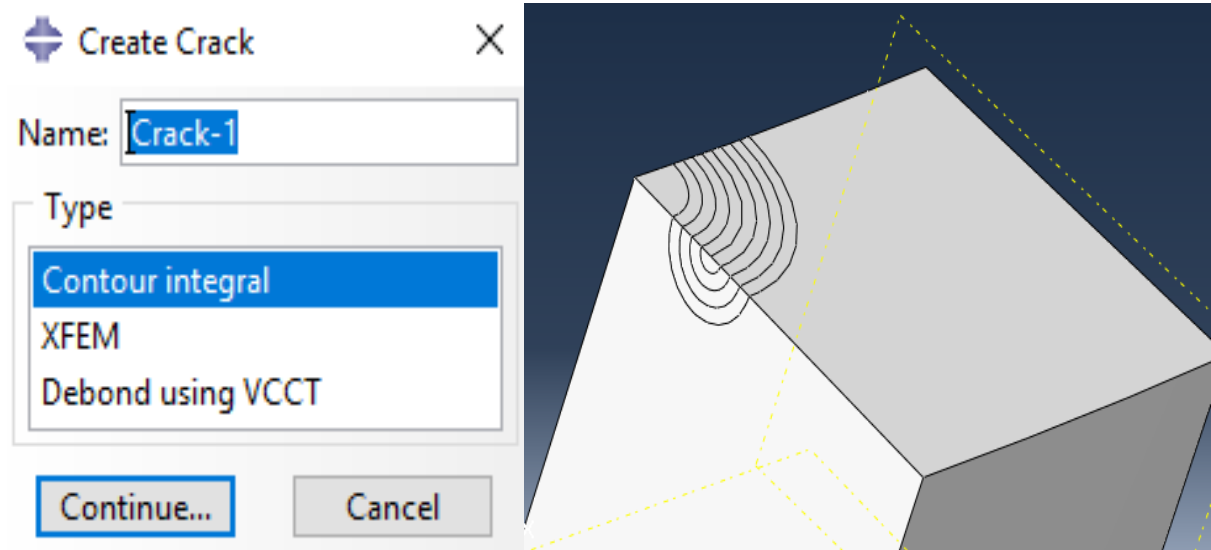
¹ Quadratic

² Linear

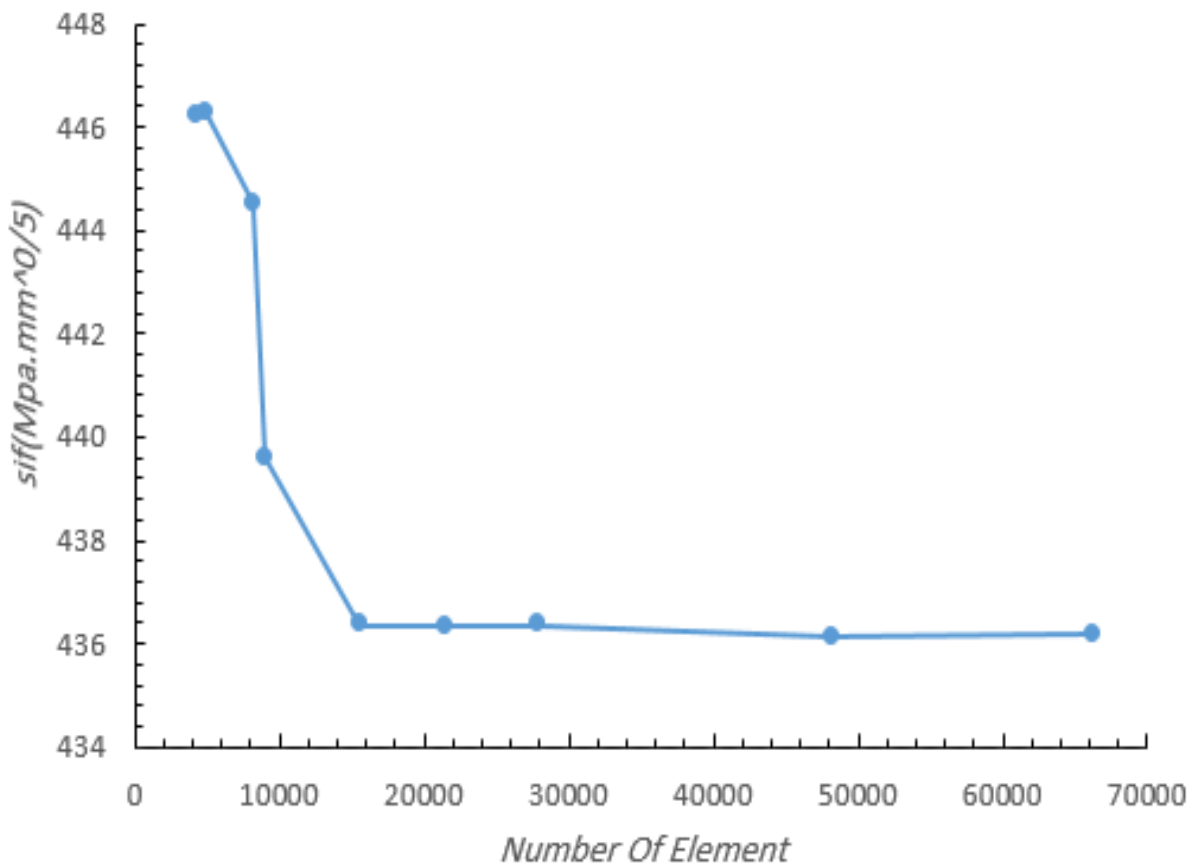
³ Singular Element

جدول ۱- خواص مکانیکی آلومینیوم

نوع آلیاژ	ضریب پواسون (ν)	مدول الاستیسیته E (MPa)
Al6061	۰/۳	۷۰۰۰۰

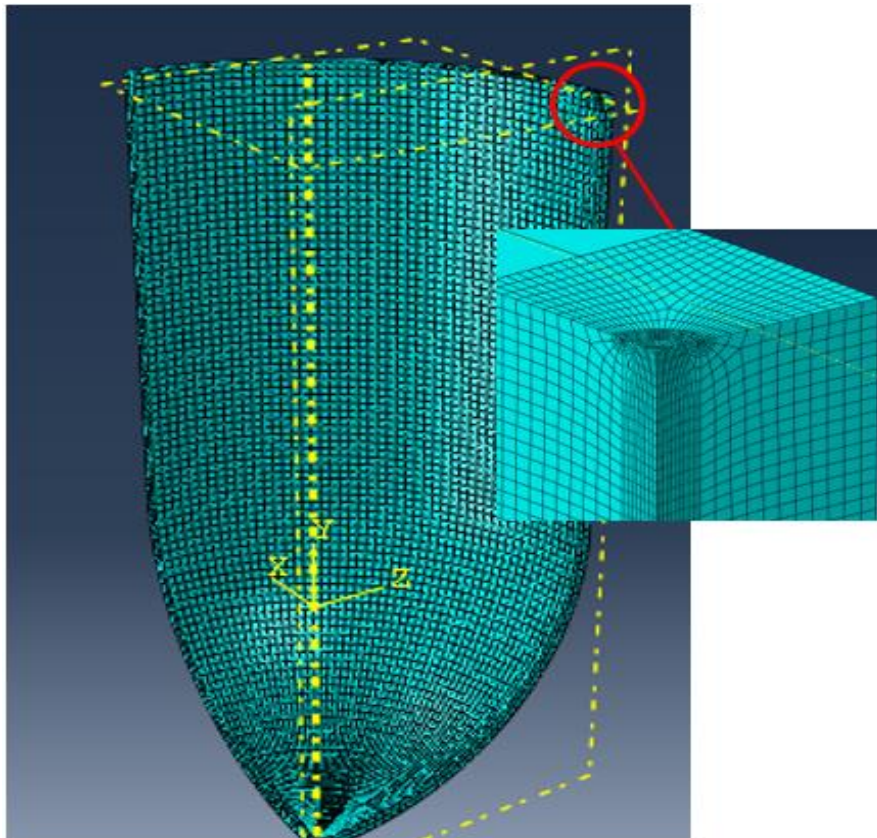


شکل ۴- نحوه پارتیشن‌بندی جبهه ترک و تعریف ترک در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۵- آزمون همگرایی المان (عدم وابستگی ضریب شدت تنش به اندازه المان)

شکل (۵) آزمون همگرایی مش را نشان می‌دهد. همگرایی نتایج از ۱۵۵۷۰ المان آغاز شده است. این همگرایی شامل ۵۸۱۲۸ گره و ۱۹۶۶۵ المان جامد^۱ است که تعداد ۹۷۷۵ المان شش وجهی درجه دوم^۲، ۲۴۵ المان گوه‌ای درجه دوم^۳ و ۹۶۴۵ المان خطی شش وجهی^۴ می‌باشد. شکل (۶) نیز مش‌بندی نهایی مدل را نشان می‌دهد. تغییرات ضریب شدت تنش در تحلیل اجزاء محدود و روابط تحلیلی در ۵ کانتور برای صحت تحلیل در جدول (۲) آورده شده است.



شکل ۶- مش‌بندی نهایی مدل

جدول ۲- مقایسه نتایج ضریب شدت تنش ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$) تحلیل عددی با نتایج به‌دست آمده از روابط تئوری

درصد خطا	ضریب شدت تنش از تحلیل عددی	ضریب شدت تنش از رابطه تحلیلی
۹/۰۵	۴۳۷/۸۰۳	۴۸۱/۴
۸/۷۷	۴۳۹/۱۳۴	۴۸۱/۴
۸/۰۱	۴۴۲/۷۹۴	۴۸۱/۴
۶/۲۷	۴۵۱/۲۱۶	۴۸۱/۴
۲/۵	۴۶۹/۱۴۳	۴۸۱/۴

¹ Solid

² Quadratic hexahedral

³ Quadratic wedge

⁴ Linear hexahedral

جدول ۳- مقایسه نتایج ضریب شدت تنش ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$) تحلیل عددی با نتایج مرجع [۵]

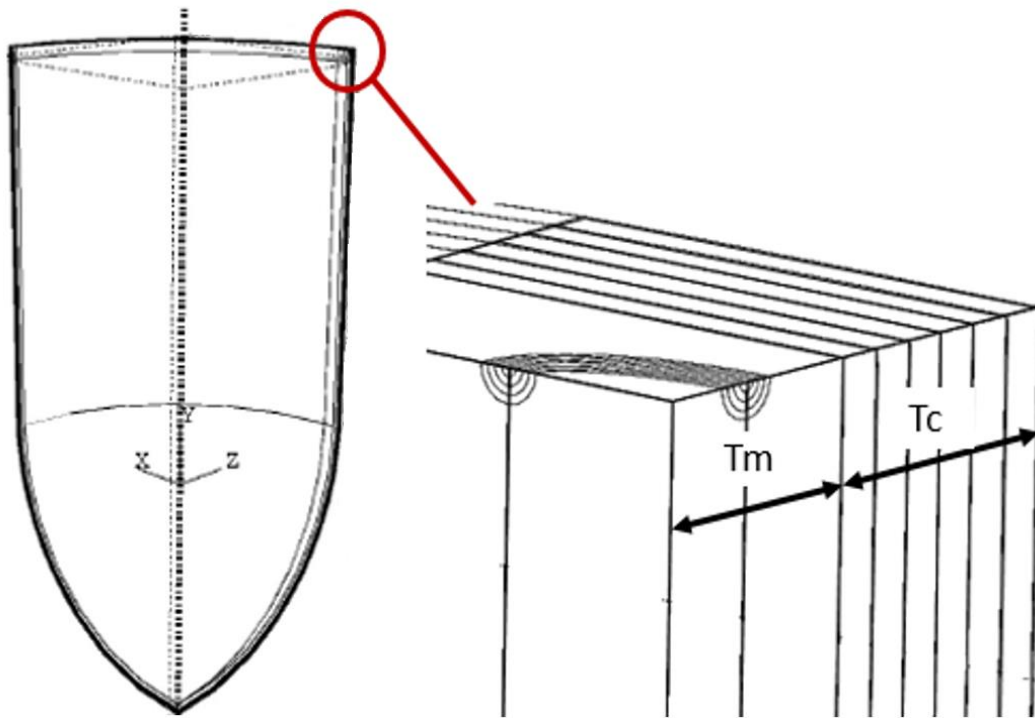
شماره گره	ضریب شدت تنش مرجع K/K_0 [۲]	ضریب شدت نرم‌افزار K/K_0	درصد خطا
گره ۱	۹/۲۶	۸/۳۵	۹/۲
گره ۲	۸/۶۹	۹/۱۹	۶/۸
گره ۳	۸/۰۹	۸/۸۰	۸/۷
گره ۴	۸/۰۲	۸/۷۷	۹/۳
گره ۵	۸/۱	۸/۶۴	۸/۷
گره ۶	۷/۹۴	۸/۶۰	۸/۳
گره ۷	۷/۹	۸/۵۷	۸/۴

همان‌طور که مشخص است خطای بین تحلیل صورت گرفته در آباکوس و نتیجه به دست آمده از روابط تحلیلی زیر ۱۰ درصد است. تطابق خوبی در نتایج مشاهده می‌شود که حاکی از صحت روند شبیه‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. همچنین برای مقایسه مدل موجود با مخزن ترکدار نوع دوم از مقاله شاهانی و خیری‌خواه برای محاسبه ضریب شدت تنش در یک مخزن نوع دوم استفاده شده است [۵]. هندسه این مخزن به این صورت است که شعاع داخلی مخزن $۱۶۴/۵$ میلیمتر، ارتفاع استوانه مخزن $۵۴۸/۴$ میلیمتر، ضخامت آستر فلزی $۵/۸$ میلیمتر و ضخامت پوسته کامپوزیتی ۷ میلیمتر است. کامپوزیت از نوع شیشه E بوده و مخزن تحت فشار داخلی $۲۵/۸۵$ MPa است. همچنین هندسه ترک به این صورت است که عمق ترک $۱/۴۵$ میلیمتر و طول ترک $۲/۹۰$ میلیمتر است. نتایج به دست آمده تطابق خوبی با نتایج حاصل از تحقیق بررسی شده دارد. نتایج این مقایسه در جدول (۳) نشان داده شده است.

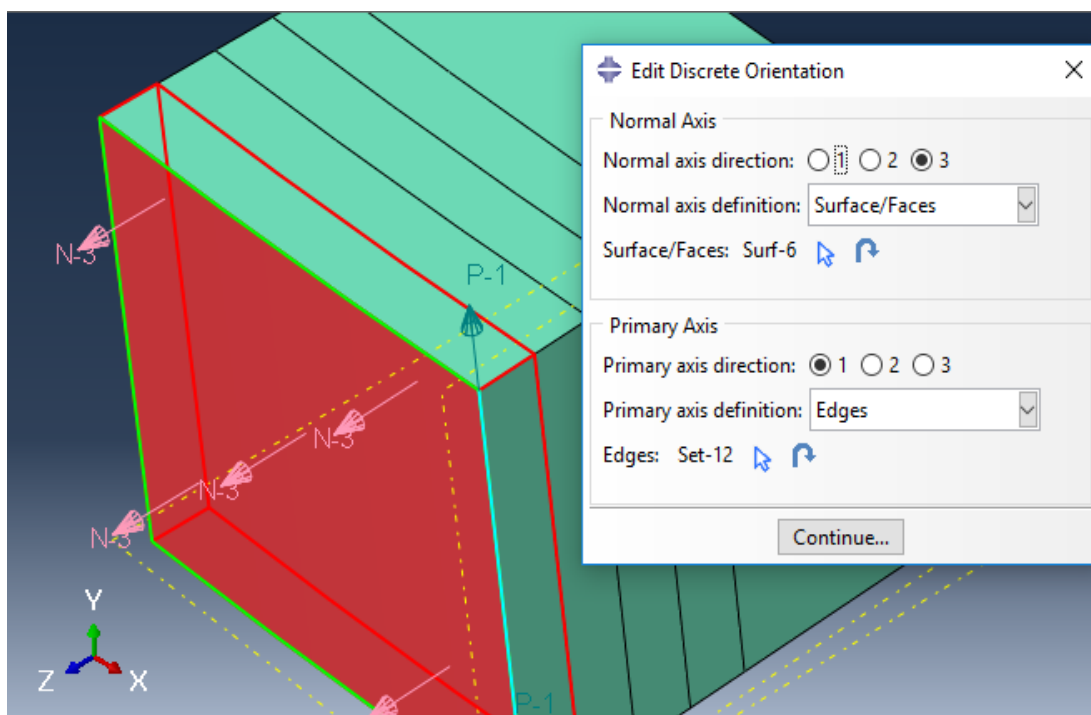
۲-۲- مدل‌سازی المان محدود ترک‌های نیم‌بیضی در مخازن تحت فشار CNG

پس از صحت‌سنجی روند مدل‌سازی، در این بخش به بررسی تأثیر هندسه ترک، بارگذاری، خواص مکانیکی مواد استفاده شده، تعداد لایه‌ها و ضخامت لایه‌ها بر ضریب شدت تنش در ترک طولی و عرضی داخلی و خارجی در مخازن نوع سوم پرداخته می‌شود. در این مدل‌سازی آستری فلزی از جنس آلومینیوم بوده و همچنین لایه‌های کامپوزیتی از جنس کربن-اپوکسی [۲۱ و ۲۲]، کولار-اپوکسی [۲۳ و ۲۴] و برون-پوکسی [۲۵] می‌باشد؛ خواص مکانیکی این مواد در جدول (۴) نشان داده شده است. مخزن مدل‌سازی شده دارای هندسه‌ای مشابه مخزن نوع اول در صحنه‌سنجی است، با این تفاوت که ضخامت به دو بخش کامپوزیت و فلزی تقسیم می‌شود. همچنین هندسه ترک در این مقاله با نسبت a/c نمایش داده می‌شود که از $۰/۵$ تا ۱ متغیر است. شکل (۷) مخزن تحت فشار CNG نوع سوم که دارای ۶ لایه کامپوزیت است را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد. در کلیه حالات، ترک نیم‌بیضی در قسمت آستر فلزی مدل شده است. در ماژول خواص، جهت الیافها در هر لایه مشخص می‌شود. به این صورت که با استفاده از ابزار Assign Material Orientation یکی از لایه‌ها را انتخاب کرده در قسمت Select CSYS کلیک کرده و سپس Discrete انتخاب می‌شود. در قسمت Orientation راستای الیاف مشخص می‌شود و همچنین در بخش Additional Rotation زاویه موردنظر به

الیاف یک‌لایه داده می‌شود و جهات الیاف در دیگر لایه‌ها را به همین صورت می‌توان مشخص کرد. از آنجایی که برای مدل‌سازی لایه‌ها از یک پارت استفاده شده و لایه‌ها توسط پارتیشن‌بندی ایجاد شده‌اند، اتصال لایه‌های فلزی و کامپوزیتی به صورت یکپارچه و چسبیده به یکدیگر مدل شده است. در شکل (۸) نحوه تعریف لایه‌ها مشاهده می‌شود.



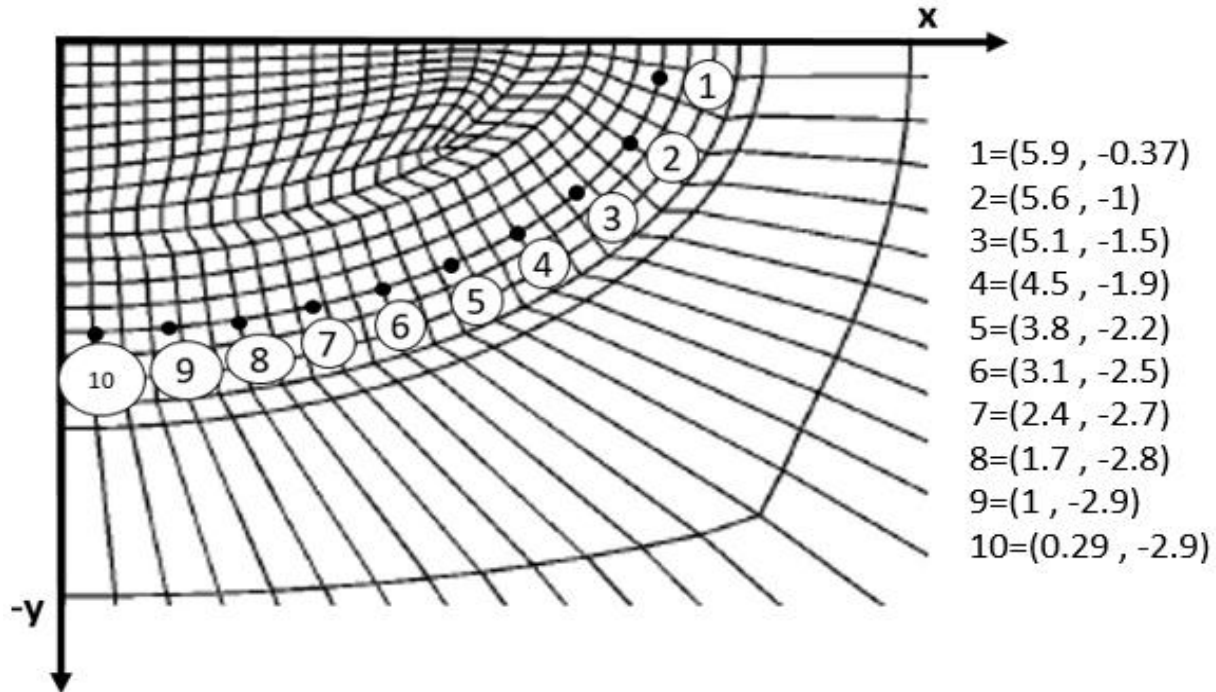
شکل ۷- شماتیک مخزن تحت فشار CNG نوع سوم



شکل ۸- نحوه تعریف زوایای الیاف در لایه‌های کامپوزیت

۳- بحث و نتایج

اشکال (۱۰) تا (۲۲) تغییرات ضریب شدت تنش سرتاسر جبهه ترک طولی و عرضی داخلی و طولی و عرضی خارجی را در مخزن نوع سوم نشان می‌دهد.

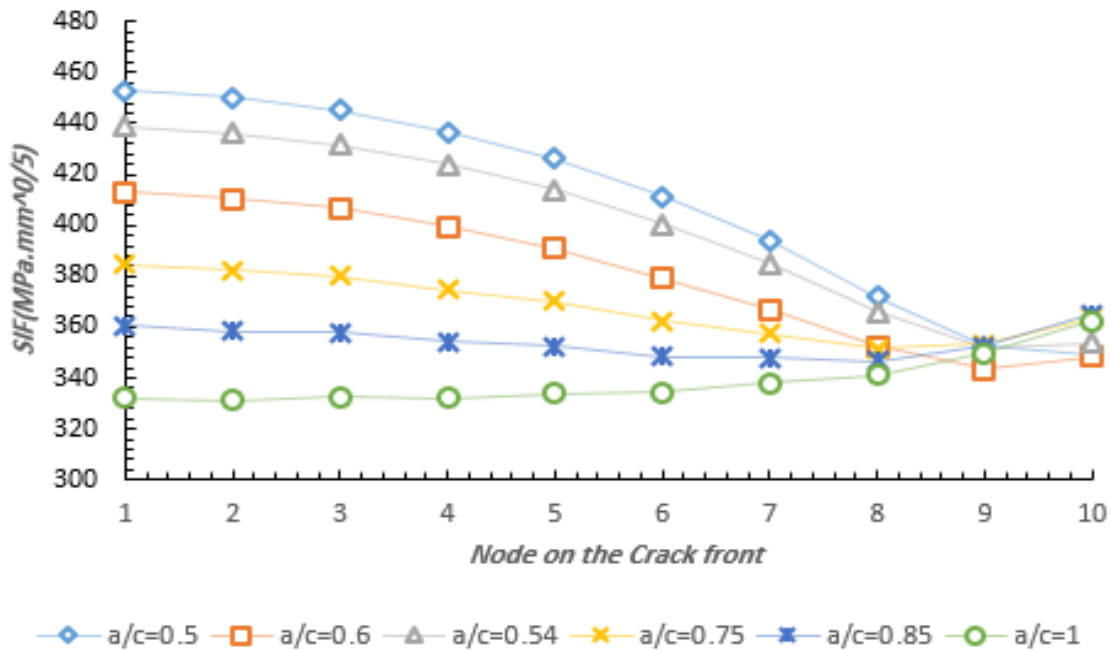


شکل ۹- نمایش موقعیت گره‌ها روی جبهه ترک

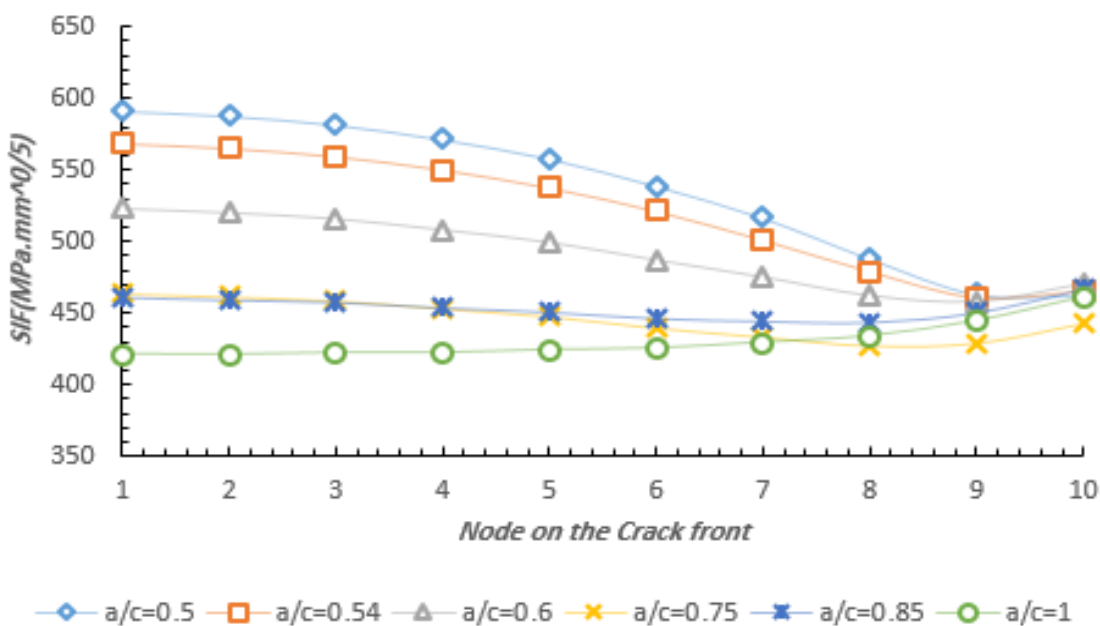
جدول ۴- خواص فیزیکی و حرارتی مواد مورد استفاده [۲۱-۲۵].

پارامتر	کولار/اپوکسی	برون/اپوکسی	کربن/اپوکسی	آلومینیوم ۶۰۶۱
E_1 (GPa)	۸۰	۲۰۱	۱۸۱	۷۰
E_2 (GPa)	۵/۵	۲۱/۷	۱۰/۳	۷۰
G_{12} (GPa)	۲/۲	۵/۴	۵/۸۶	۲۶/۹۲
ν_{12}	۰/۳۴	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۳
ν_{23}	۰/۴	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۳
K_1 در جهت موازی الیاف (W/m. k)	۱۱/۱	۲/۲۹	۷/۴۶	۱۷۳
K_2 در جهت عمود بر الیاف (W/m. k)	۰/۸۷	۰/۵۹	۰/۵۶	۱۷۳
α_1 ضریب انبساط حرارتی در جهت موازی الیاف (1/K)	$-۰/۲ \times ۱۰^{-۶}$	$۶/۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۳/۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۲۳/۵ \times ۱۰^{-۶}$
α_2 ضریب انبساط حرارتی در جهت عمود بر الیاف (1/K)	۶۰×۱۰^{-۶}	۳۰×۱۰^{-۶}	$۲۴/۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۲۳/۵ \times ۱۰^{-۶}$
C_p ظرفیت گرمایی (J/kg. K)	۹۳۵	۱۱۲۲	۸۰۰	۷۹۸
ρ چگالی (kg/m^3)	۱۴۰۰	۲۰۳۰	۱۶۰۰	۲۷۰۰

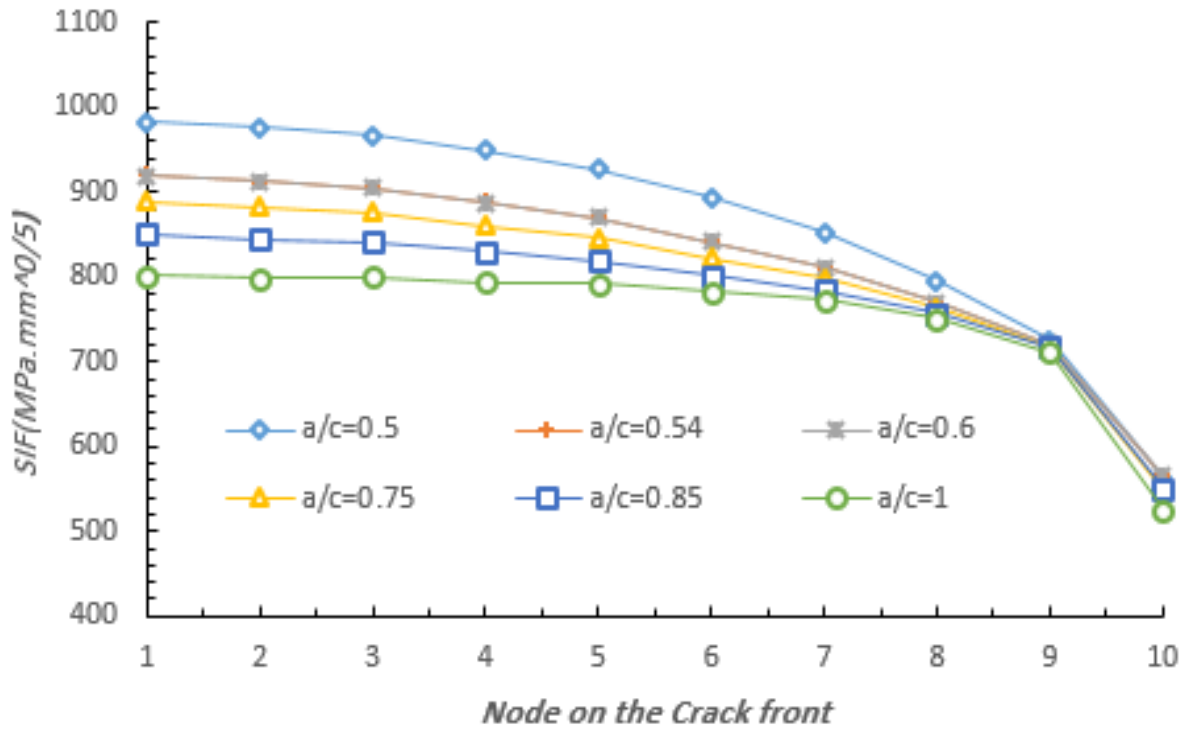
محور افقی در اشکال (۱۰) تا (۱۷) بیانگر شماره گره‌هایی است که در شکل (۹) موقعیت این نقاط در جبهه ترک نشان داده شده است. تغییرات ضریب شدت تنش متأثر از پارامترهای مختلف بوده که نتایج حاصل بر حسب a/c و a/t تقسیم‌بندی شده‌اند. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) این تغییرات در طول قوس ترک به ترتیب برای ترک‌های با نسبت طول به ضخامت $a/t=0.27$ و $a/t=0.4$ نشان داده شده است. برای هر کدام از این حالات نسبت‌های a/c نیز از $a/c=0$ تا $a/c=1$ تغییر داده شده و نتایج آن نشان می‌دهد که در شرایط مشابه مخزن هر چه نسبت a/c کمتر باشد، ضریب شدت تنش بیشتر می‌شود. در واقع می‌توان گفت که هر چه شکل ترک از حالت دایروی به بیضی تغییر پیدا کرده و تیزتر می‌شود، ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد.



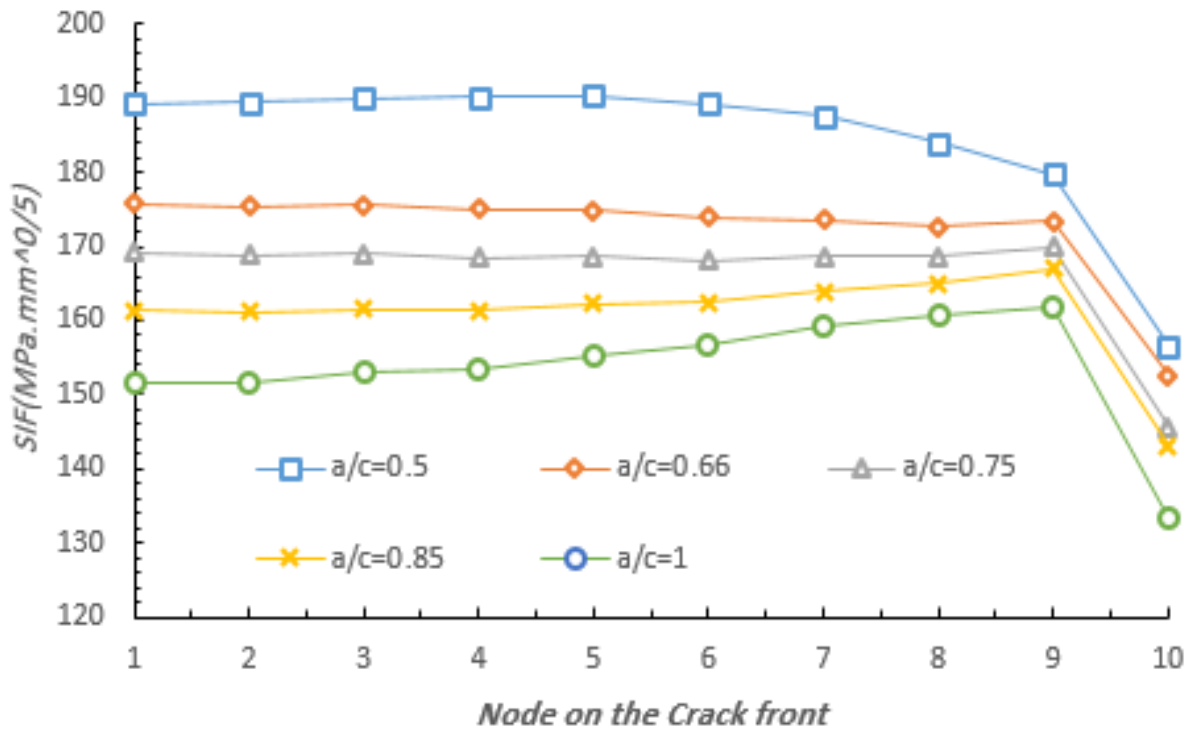
شکل ۱۰- مخزن CNG نوع سوم حاوی ترک عرضی داخلی با $a/t=0.27$



شکل ۱۱- مخزن CNG نوع سوم حاوی ترک عرضی داخلی با $a/t=0.4$

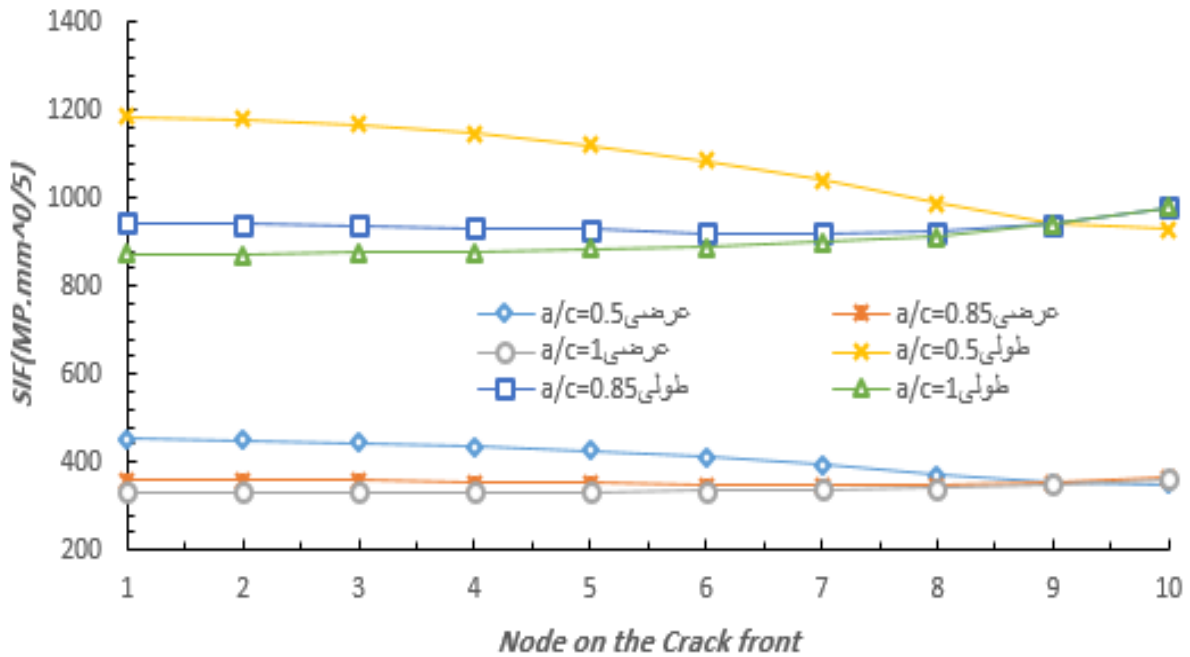


شکل ۱۲- مخزن CNG نوع سوم حاوی ترک طولی خارجی با $a/t=0.42$

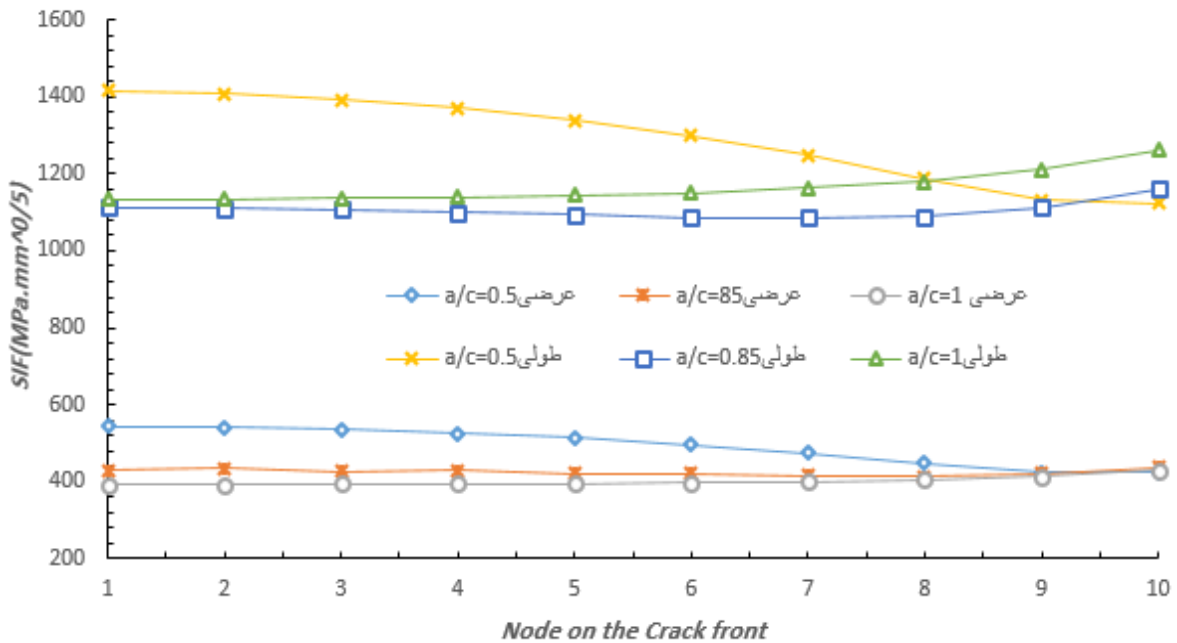


شکل ۱۳- مخزن CNG نوع سوم حاوی ترک عرضی خارجی با $a/t=0.42$

با توجه به شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود ضریب شدت تنش در ترک داخلی طولی از ترک عرضی داخلی بیشتر است. چون تنشی که به سطح ترک طولی وارد می‌شود تنش محیطی است که دو برابر تنش طولی است که به ترک عرضی وارد می‌شود.

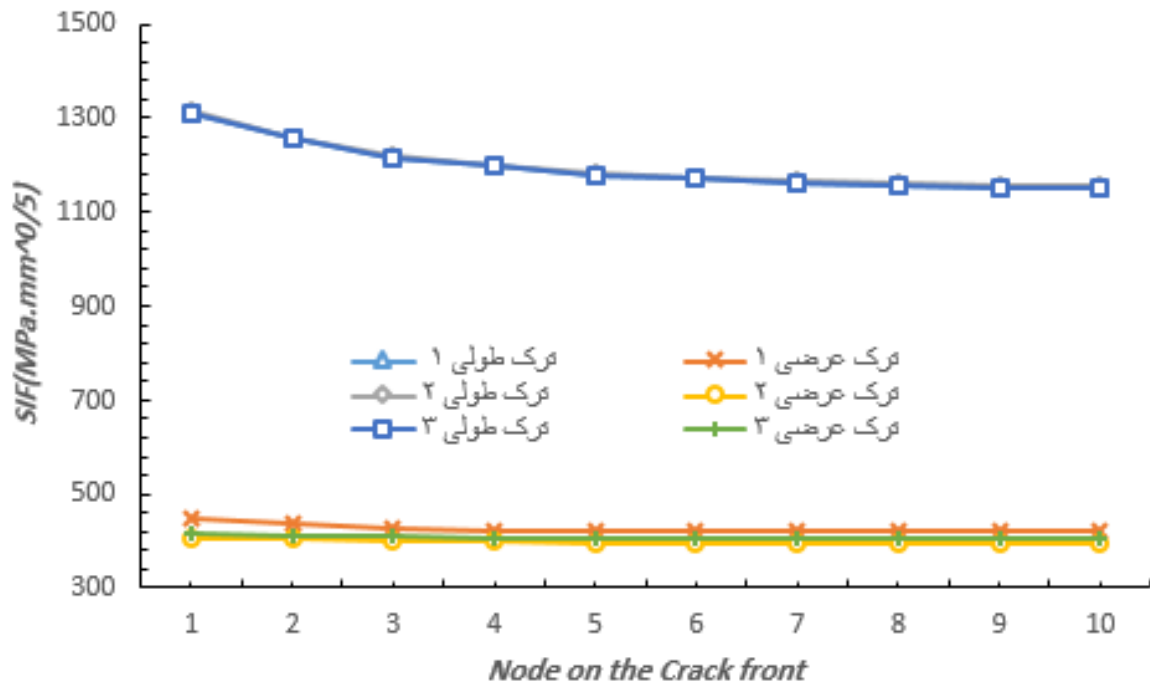


شکل ۱۴- مقایسه نوع قرارگیری ترک‌های طولی و عرضی داخلی با $a/t=0.27$

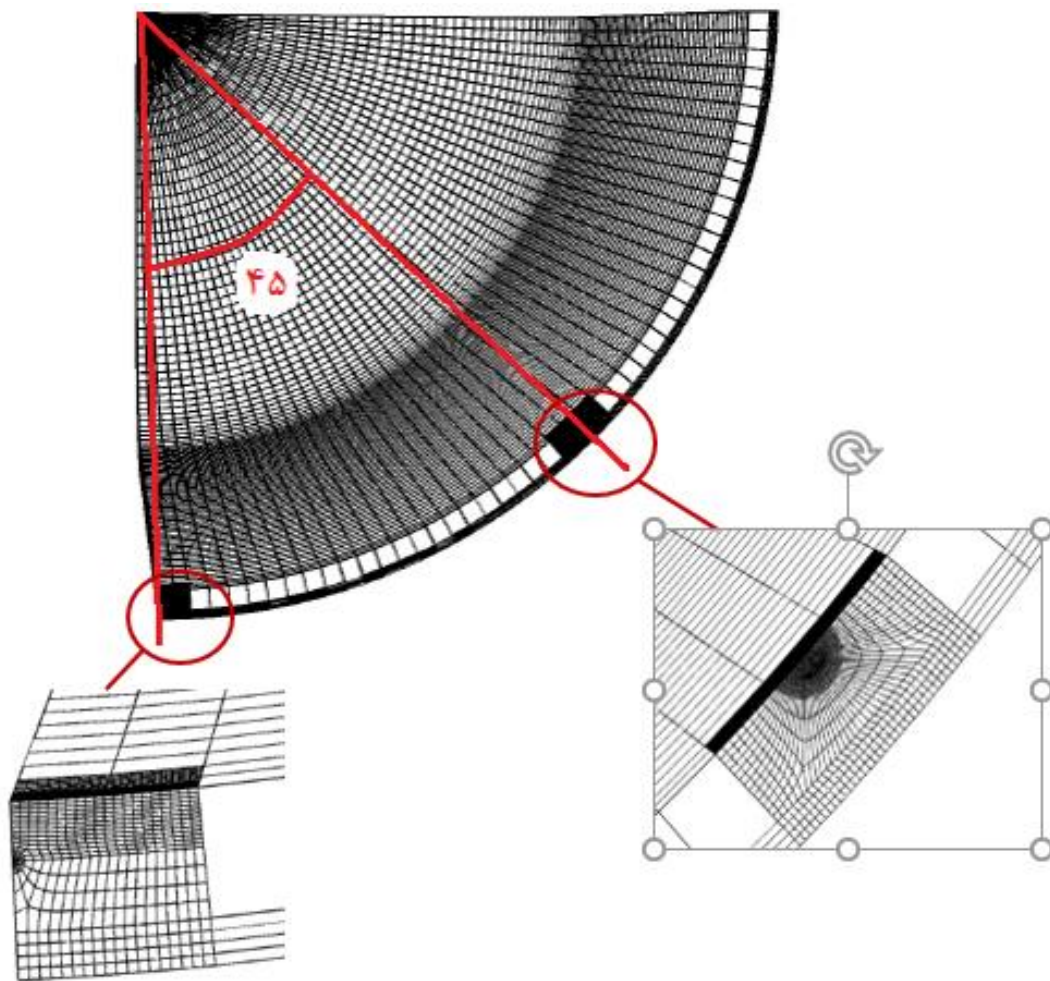


شکل ۱۵- مقایسه نوع قرارگیری ترک‌های طولی و عرضی داخلی با $a/t=0.36$

شکل (۱۶) تأثیر دو ترک طولی و عرضی داخلی را به صورت هم‌زمان در یک مخزن نشان می‌دهد؛ به صورتی که زاویه موقعیت بین ترک طولی ۱ و عرضی ۱ در مخزن ۹۰ درجه، زاویه بین ترک طولی ۲ و عرضی ۲ برابر ۴۵ درجه و در ترک طولی ۳ و عرضی ۳ برابر ۲۰ درجه است. تأثیر هم‌زمان دو ترک طولی و عرضی داخلی به این صورت است که وجود ترک عرضی تقریباً هیچ تأثیری بر ترک طولی ندارد. همان‌طور که در شکل (۱۶- الف) مشاهده می‌شود، گراف‌های ترک طولی روی هم افتاده است ولی ترک طولی به مقدار کمی بر ترک عرضی مؤثر واقع می‌شود. این امر به دلیل تغییر توزیع تنش روی وجوه ترک به دلیل تأثیرات متقابل ترک‌ها می‌باشد.

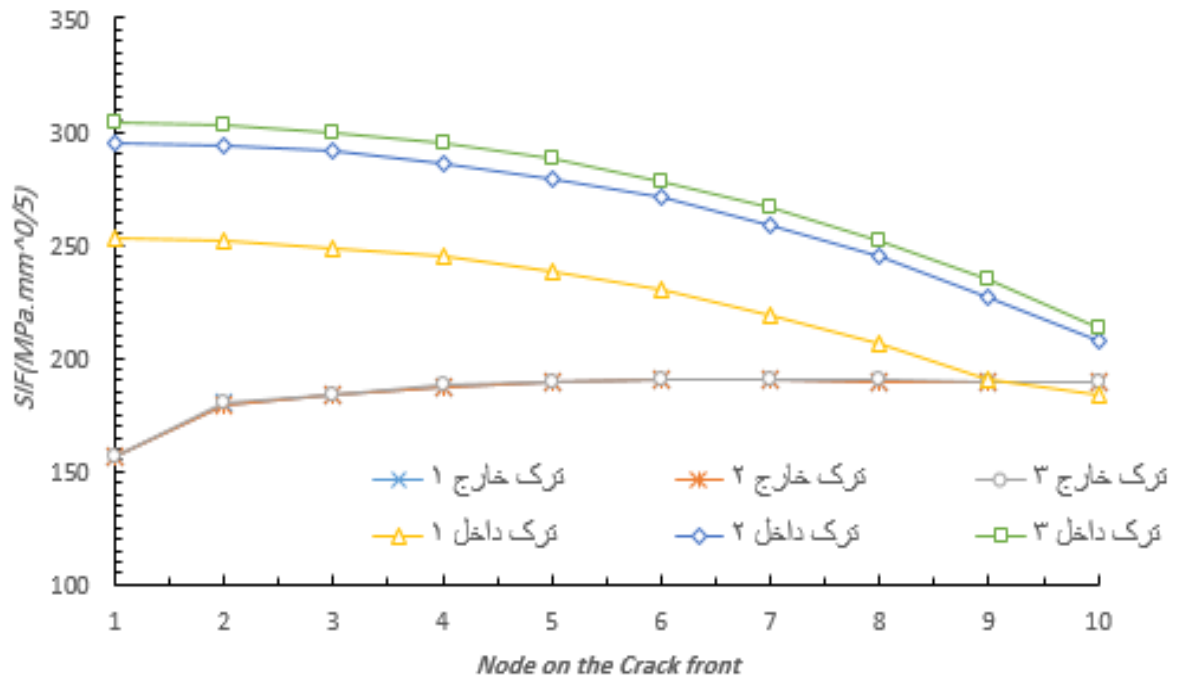


(الف)

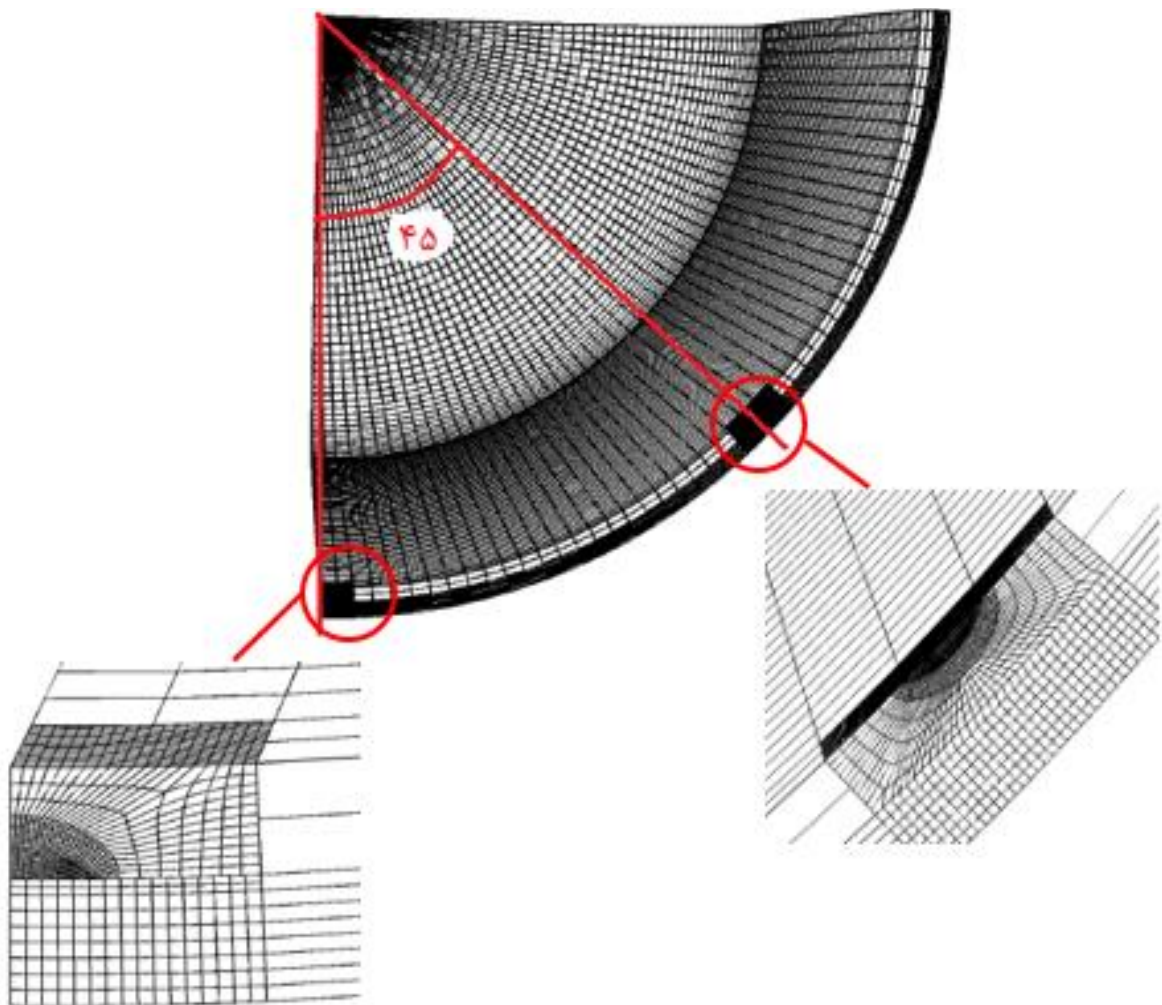


(ب)

شکل ۱۶- (الف) بررسی دو ترک داخلی طولی و عرضی هم‌زمان در مخزن CNG نوع سوم، (ب) نمایش زاویه بین دو ترک ۲



(الف)

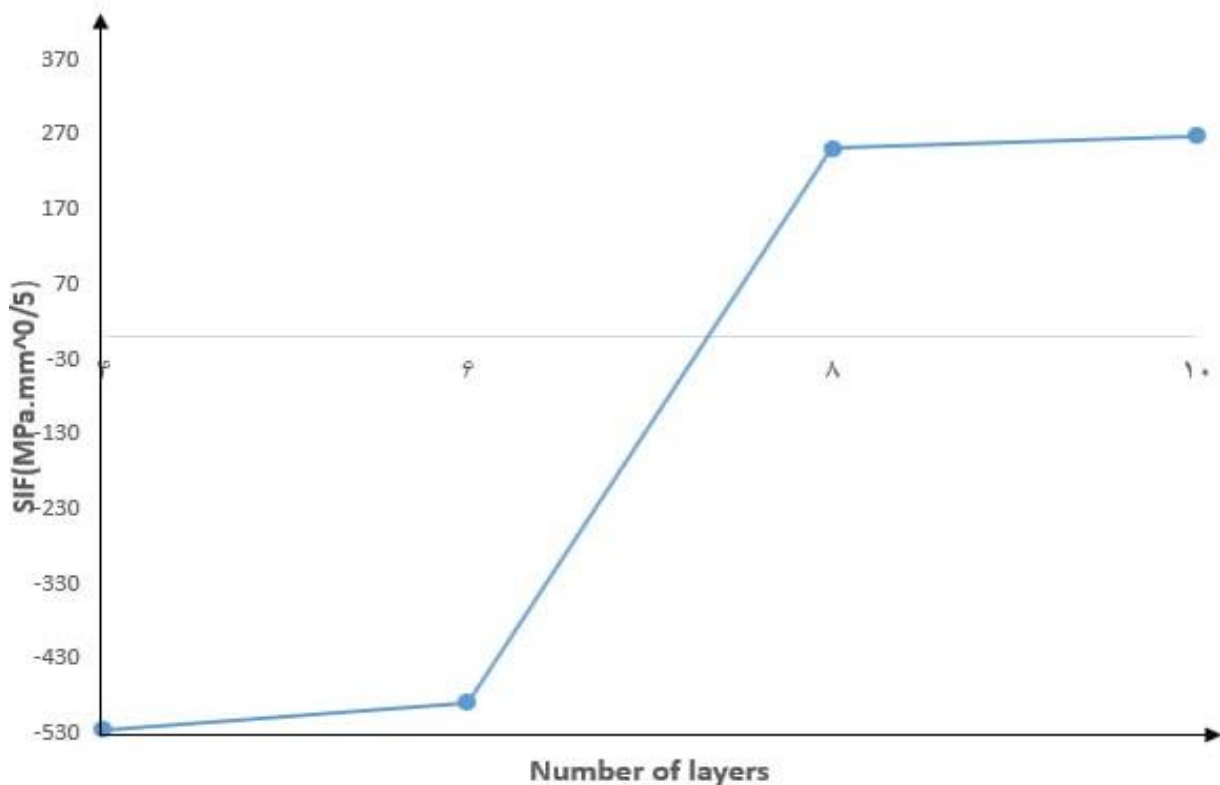


(ب)

شکل ۱۷- (الف) بررسی دو ترک عرضی داخلی و خارجی هم‌زمان در مخزن CNG نوع سوم، (ب) نمایش زاویه بین دو ترک ۲

در شکل (۱۷) تأثیر ترک داخلی و خارجی به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است. برای بررسی تأثیر وجود ترک داخلی و خارجی کنار هم در یک مخزن ابتدا مخزنی بررسی شده که فقط دارای یک ترک است؛ سپس در بررسی‌های دیگر این دو ترک هم‌زمان در یک مخزن وجود خواهند داشت و تأثیر آن‌ها کنار یکدیگر در یک مخزن با مخزنی که فقط یک ترک دارد مقایسه شده است. ترک خارج (۱) و ترک داخل (۱) معرف مخزنی هستند که یک ترک در آن‌ها وجود دارد، اما ترک‌هایی با شماره (۲) و (۳) معرف وجود دو ترک در یک مخزن هستند که ترک خارج (۲) و ترک داخل (۲) با زاویه ۴۵ درجه نسبت به هم قرار دارند. ترک خارج (۳) و ترک داخل (۳) با زاویه ۲۰ درجه نسبت به هم قرار دارند. در مورد تأثیر ترک داخلی و خارجی عرضی نشان داده می‌شود که هر چه این دو ترک به هم نزدیک‌تر شود تقریباً هیچ تغییری در ضریب شدت تنش در ترک خارجی ایجاد نمی‌شود و همان‌طور که در شکل (۱۷-الف) مشاهده می‌شود، نمودارهای ترک خارجی روی هم منطبق شده‌اند، اما تأثیر نزدیک شدن ترک خارجی به ترک داخلی به این صورت است که با نزدیک شدن این دو ترک ضریب شدت تنش در ترک داخلی به دلیل تأثیرات متقابل ترک‌ها در توزیع تنش افزایش پیدا می‌کند.

در شکل (۱۸) تأثیر تعداد لایه‌های کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش ترک عرضی داخلی مشاهده می‌شود، در همه حالات ضخامت کل جداره مخزن یکسان می‌باشد. در کلیه حالات ضخامت آستر فلزی و پوشش کامپوزیتی ثابت و به‌صورت $T_c/T_m=1.142$ است. الیاف کامپوزیت نسبت به هم زاویه ۴۵ دارند. تعداد لایه‌های پوشش کامپوزیتی تأثیر زیادی بر ضریب شدت تنش می‌گذارد؛ به‌صورتی که هرچه این تعداد لایه‌ها افزایش یابد، مؤثرتر واقع می‌شوند. وقتی تعداد لایه‌ها بیشتر می‌شود توزیع تنش در جبهه ترک تغییر می‌کند و بر روی ضریب شدت تنش تأثیر می‌گذارد. نمودار نشان می‌دهد در یک پوشش کامپوزیت با ضخامت ثابت هرچه تعداد لایه‌ها کمتر باشد ضریب شدت تنش کمتر است.

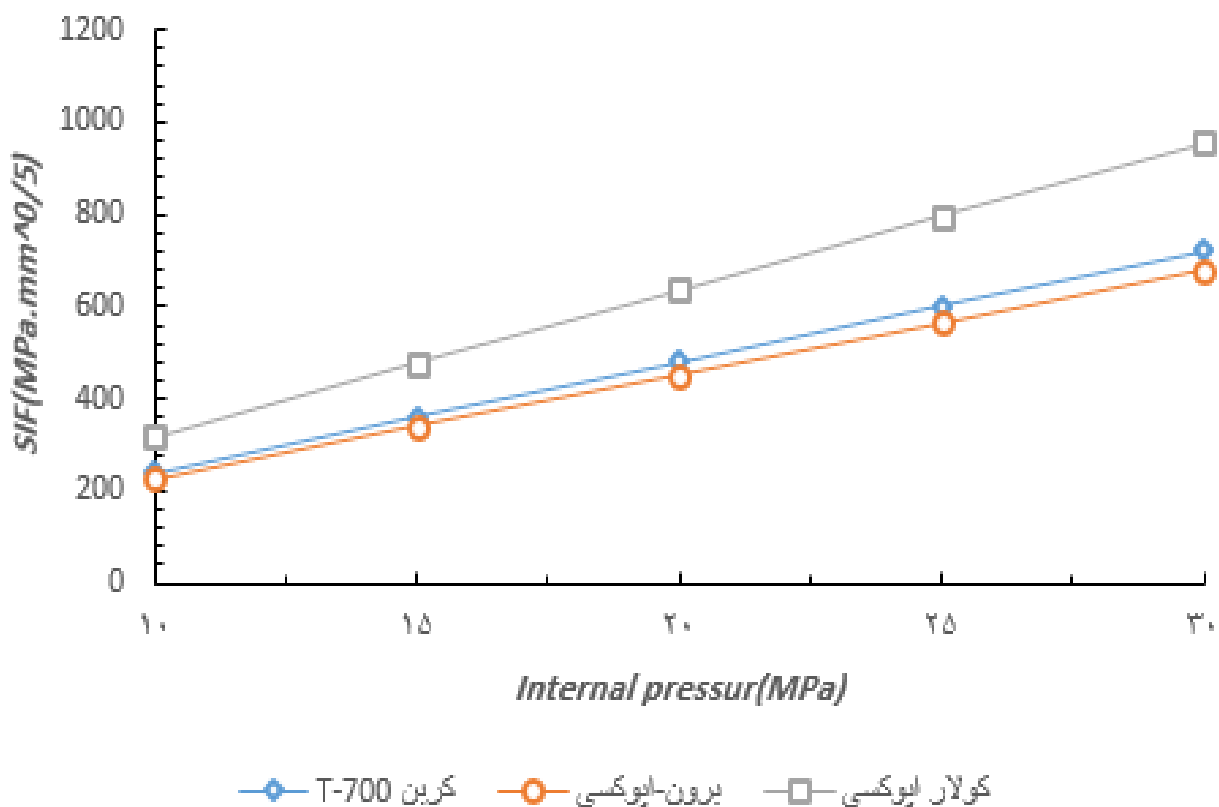


شکل ۱۸- تأثیر تعداد لایه‌های کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش

اگر این پوشش کامپوزیتی به تعداد لایه‌های بیشتری تقسیم شود ضریب شدت تنش با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد. منفی به مثبت شدن ضریب شدت تنش در این نمودار به این دلیل است که توزیع تنش در جبهه ترک از فشاری به کششی تغییر می‌کند و ترک باز می‌شود.

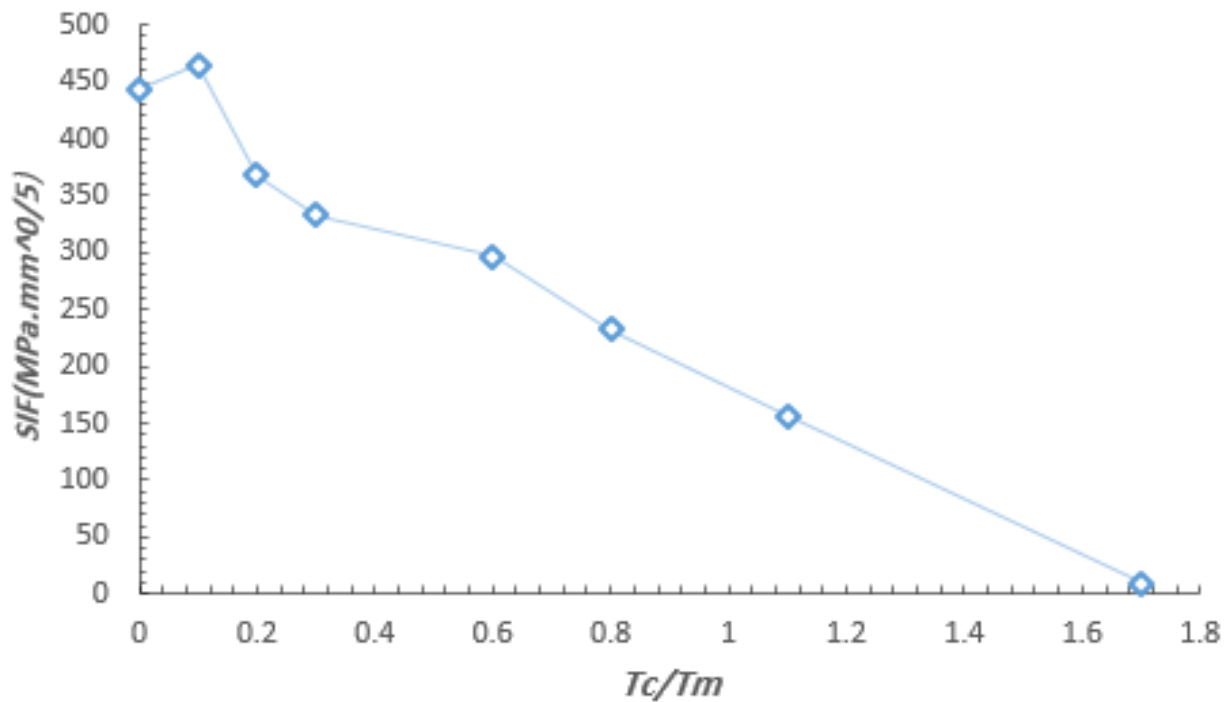
شکل (۱۹) تأثیر خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش را نشان می‌دهد؛ هندسه مخزن و هندسه ترک در این مقایسه یکسان می‌باشد. ضخامت کل مخزن ۱۵ میلیمتر که شامل ۴ لایه کامپوزیتی به ضخامت ۱ میلیمتر و ضخامت آستر فلزی ۱۱ میلیمتر می‌باشد. ترک عرضی به صورت دایره‌ای با شعاع ۳ میلیمتر است. زاویه قرارگیری الیاف در سه حالت بررسی شده به صورت [45/-45/45/-45] است. بررسی انجام شده نشان می‌دهد به ازای یک فشار یکسان، برون اپوکسی کمترین ضریب شدت تنش و کولار اپوکسی بیشترین ضریب شدت تنش را دارد. این امر به دلیل خواص مکانیکی و سفتی متفاوت این مواد و تأثیر آن‌ها بر باز شدن ترک است.

شکل (۲۰) تأثیر ضخامت لایه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد. هندسه مخزن و هندسه ترک در کلیه حالات یکسان است. ترک عرضی به صورت دایره‌ای به شعاع ۳ میلیمتر است. پوشش کامپوزیتی مخزن در تمامی حالات از برون اپوکسی تشکیل شده است. زاویه قرارگیری الیاف در همه حالات یکسان و به صورت [45/-45/45/-45] است. با توجه به بررسی انجام شده اگر ضخامت لایه‌ها کم باشد، به صورتی که باعث افزایش تنش در دیواره مخزن شود، ضریب شدت تنش نسبت به حالتی که کل مخزن فلزی است افزایش پیدا می‌کند. با افزایش ضخامت لایه‌های کامپوزیتی ضریب شدت تنش تقریباً خطی کاهش پیدا می‌کند؛ به صورتی که در $T_c/T_m=1.7$ نسبت به $T_c/T_m=0.2$ ضریب شدت تنش بیش از ۹۷ درصد کاهش می‌یابد.

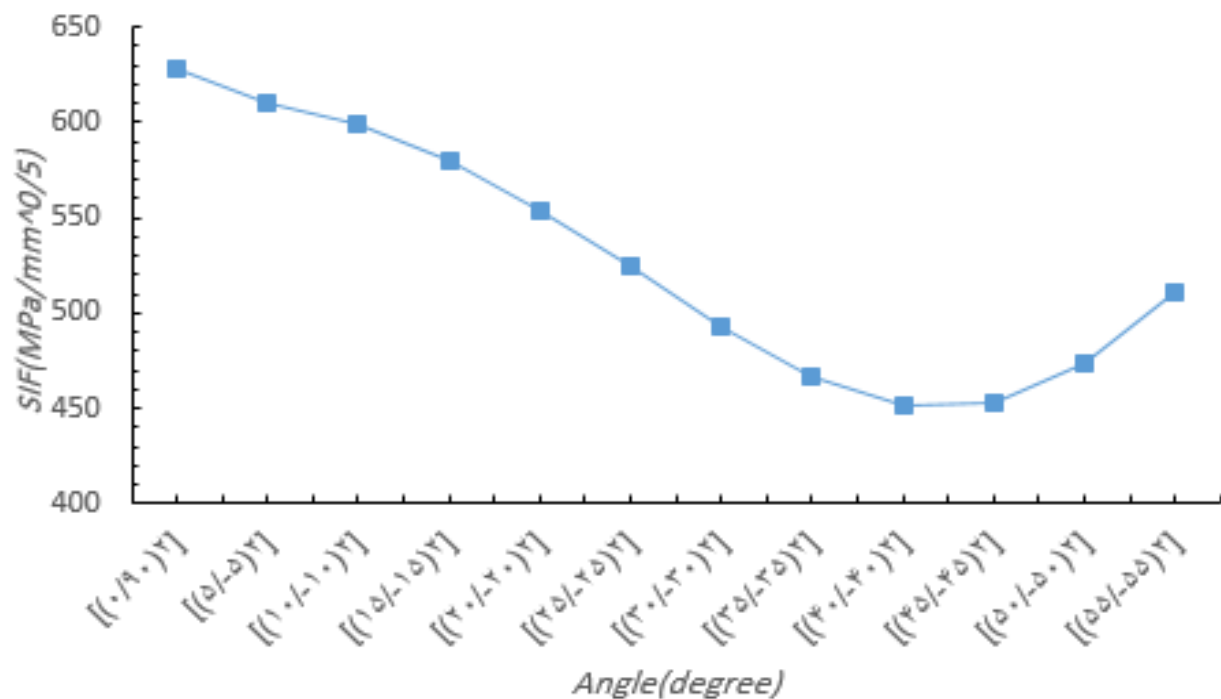


شکل ۱۹- تأثیر فشار داخلی بر ضریب شدت تنش به ازای پوشش‌های کامپوزیتی متفاوت

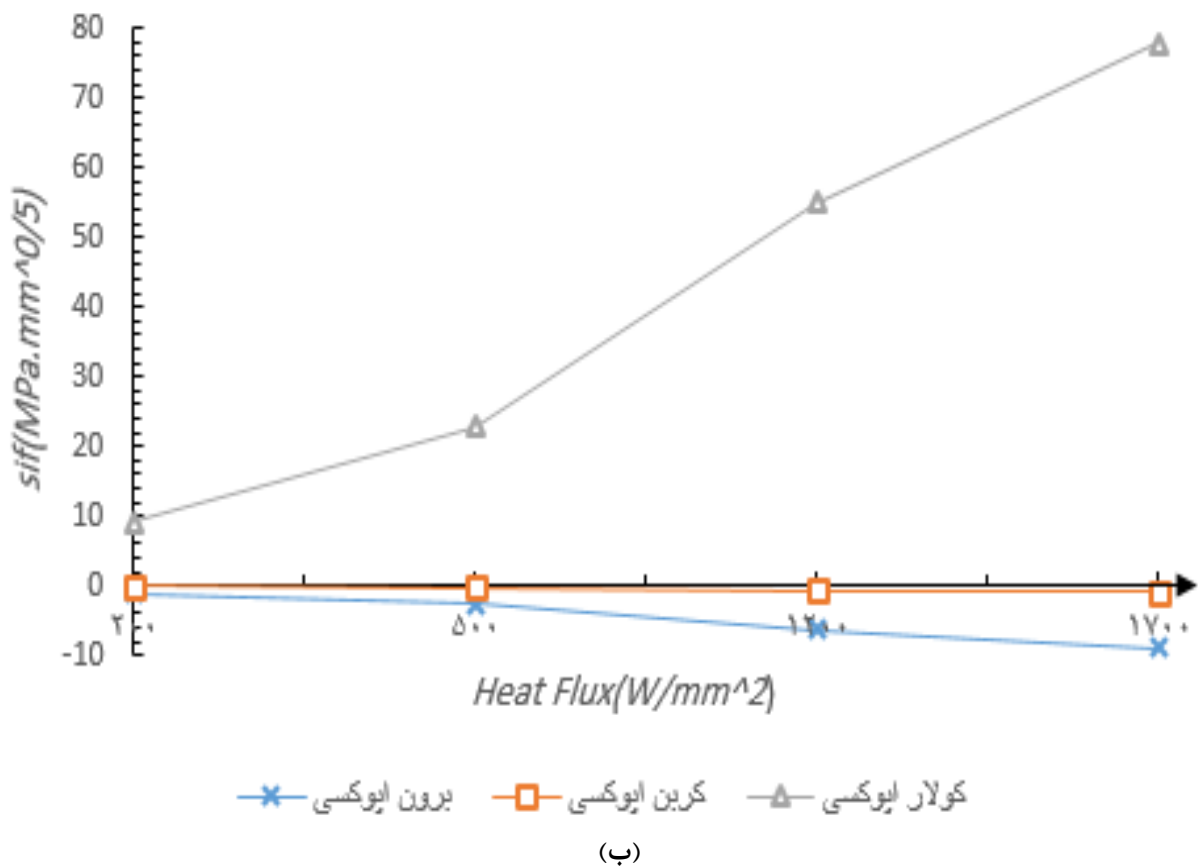
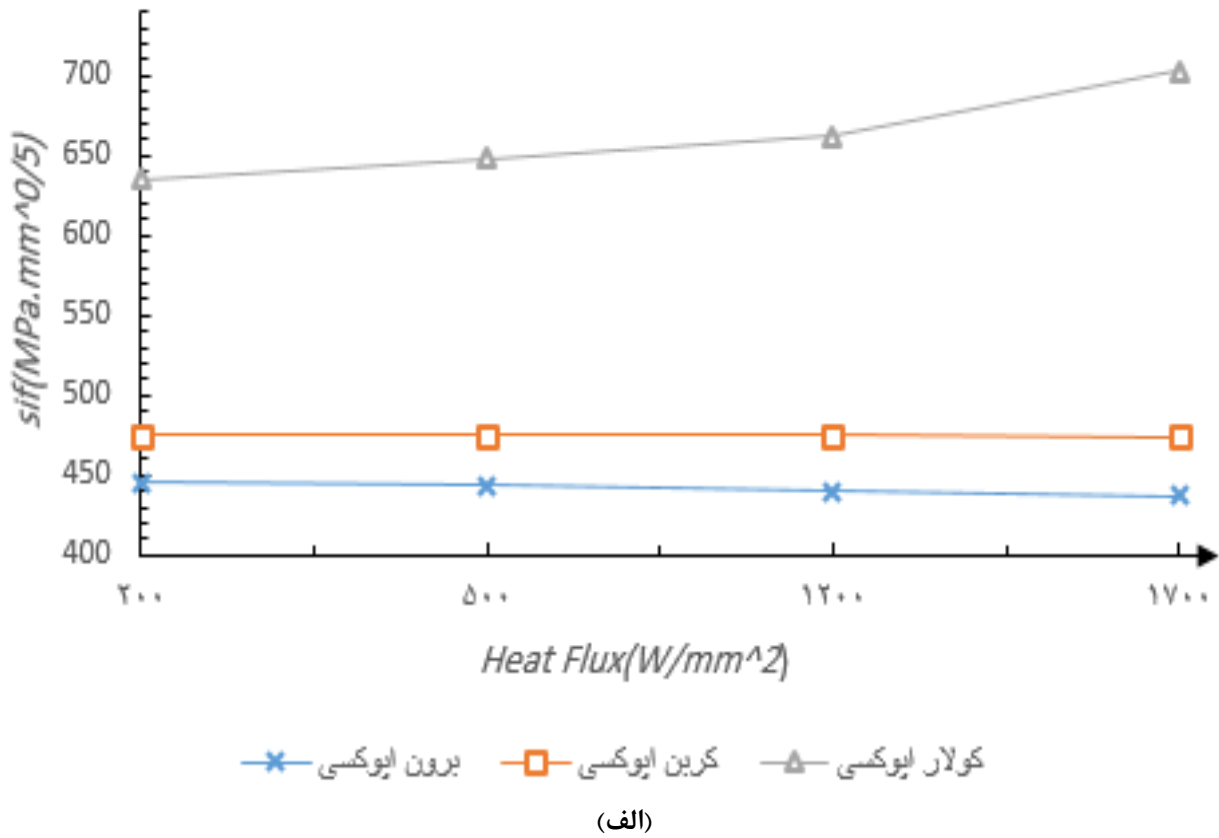
شکل (۲۱) نشان می‌دهد اگر زاویه قرارگیری الیاف کامپوزیت به صورتی باشد که با ترک طولی و عرضی زاویه ۴۰ تا ۴۵ درجه بسازد، در بهترین حالت است و ضریب شدت تنش کمتری ایجاد می‌کند؛ زیرا در این حالت کمترین تنش روی وجوه ترک ایجاد می‌شود. هرچه این زاویه افزایش یا کاهش پیدا کند، ضریب شدت تنش بیشتر می‌شود.



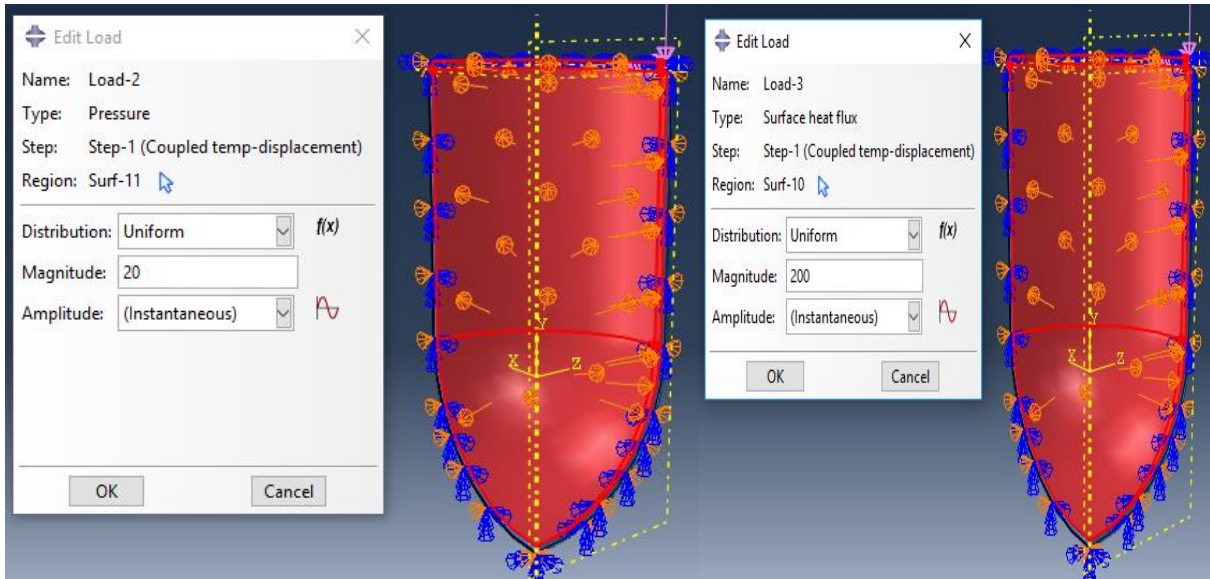
شکل ۲۰- تأثیر نسبت ضخامت لایه‌های کامپوزیت به فلز از جنس برون اپوکسی بر ضریب شدت تنش (زاویه الیاف -/45) [45/45/-45]



شکل ۲۱- تأثیر زاویه الیاف کامپوزیت برون اپوکسی بر ضریب شدت تنش



شکل ۲۲- (الف) تأثیر تغییرات شار حرارتی بر ضریب شدت تنش ترک در مخزن CNG نوع سوم تحت فشار داخلی ثابت 20 MPa، (ب) تأثیر تغییرات شار حرارتی بر ضریب شدت تنش ترک در مخزن CNG نوع سوم با فشار داخلی صفر



شکل ۲۳- سطح اعمال فشار داخلی و شار حرارتی

به‌طور کلی می‌توان گفت که با تغییر فشار و نسبت ضخامت و زاویه الیاف لایه‌های کامپوزیتی، توزیع تنش در اطراف جبهه ترک تغییر می‌کند که این به نوبه خود باعث تغییر در میزان ضریب شدت تنش ترک می‌گردد. در تحلیل حرارتی مخزن، به بررسی اثر دما و فشار به طور هم‌زمان بر ضریب شدت تنش پرداخته شده است. انجام این تحلیل در دمای اولیه مخزن ۲۵ درجه سانتی‌گراد، فشار ثابت ۲۰ مگاپاسکال و مقدار شار حرارتی‌های متفاوتی که در شکل (۲۲) آورده شده صورت‌گرفته است. شار حرارتی به سطح داخلی مخزن اعمال می‌شود. دمای مخزن در حین مسئله افزایش یافته و تحلیل ترموالاستیک انجام شده است.

شکل (۲۲-الف) تأثیر شار حرارتی هم‌زمان با اعمال فشار داخلی بر ضریب شدت تنش را نشان می‌دهد و شکل (۲۲-ب) تأثیر شار حرارتی بدون فشار داخلی مخزن را نشان می‌دهد. این دو شکل گویای این است که در مخزنی که پوشش آن برون-اپوکسی و کربن-اپوکسی است ضریب شدت تنش ترک با افزایش شار حرارتی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در مخزنی که پوشش آن برون-اپوکسی است بیشتر است. کاهش در مخزنی که پوشش آن کربن-اپوکسی می‌باشد، قابل چشم‌پوشی است. ضریب شدت تنش در مخزنی که شامل کولار-اپوکسی است، در مقابل افزایش شار حرارتی افزایش پیدا می‌کند. این پدیده به دلیل خواص حرارتی متفاوت از جمله ضریب انتقال حرارت متفاوت این مواد است. شکل (۲۳) سطح اعمال فشار داخلی و شار حرارتی را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

کاربرد گسترده مخازن در صنعت این را می‌طلبد که مخازن تحت فشار مقاومت خوبی از خود نشان دهند تا عمر کاری و ایمنی آن‌ها افزایش یابد. یکی از راه‌های افزایش مقاومت مخازن تحت فشار فلزی استفاده از پوشش‌های کامپوزیتی است. در این مقاله به بررسی تأثیر هندسه ترک، خواص مکانیکی، خواص حرارتی، تعداد و ضخامت لایه‌های کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش در یک ترک نیم‌بیضی طولی و عرضی داخلی و طولی و عرضی خارجی در مخازن نوع سوم CNG پرداخته شده است. ضریب شدت تنش در این ترک‌ها با استفاده از

بارگذاری فشاری داخلی در مخازنی با پوشش کامپوزیتی از جنس برون-اپوکسی، کولار-اپوکسی و کربن-اپوکسی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترک طولی داخلی بحرانی‌تر از ترک عرضی است. چون تنش‌هایی که به سطح ترک طولی وارد می‌شود دو برابر تنش‌هایی است که به ترک عرضی وارد می‌شود. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های کامپوزیتی ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد. وقتی تعداد لایه‌ها بیشتر می‌شود توزیع تنش در جبهه ترک تغییر کرده و بر روی ضریب شدت تنش تاثیر می‌گذارد.

بررسی تاثیر خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی بر ضریب شدت تنش نشان می‌دهد که به ازای یک فشار یکسان، برون اپوکسی کمترین ضریب شدت تنش و کولار اپوکسی بیشترین ضریب شدت تنش را دارد. همچنین با افزایش ضخامت لایه‌های کامپوزیتی ضریب شدت تنش تقریباً به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند به صورتی که در $T_c/T_m=1.7$ نسبت به $T_c/T_m=0.2$ ضریب شدت تنش بیش از ۹۷ درصد کاهش می‌یابد. در مخزن نوع سوم که پوشش کامپوزیتی آن برون اپوکسی است، زاویه ۴۰ تا ۴۵ درجه نسبت به ترک طولی و عرضی برای قرارگیری الیاف بهترین حالت است. اگر این زاویه بیشتر یا کمتر باشد، ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد. در این محدود زاویه الیاف، توزیع تنش کمترین مقدار را در جبهه ترک داشته که به نوبه خود باعث کاهش ضریب شدت تنش می‌شود.

تاثیر هم‌زمان دو ترک طولی و عرضی داخلی به این صورت است که وجود ترک عرضی تقریباً هیچ تأثیری بر ترک طولی ندارد؛ ولی ترک طولی به مقدار کمی بر ترک عرضی مؤثر واقع می‌شود. همچنین تأثیر دو ترک خارجی و داخلی عرضی بر هم نشان می‌دهد که وجود ترک خارجی عرضی باعث افزایش ضریب شدت تنش در ترک داخلی می‌شود. در نهایت تأثیر شار حرارتی بر ضریب شدت تنش به صورتی است که در مخزنی که پوشش آن برون - اپوکسی و کربن - اپوکسی است با افزایش شار حرارتی ضریب شدت تنش کاهش پیدا می‌کند این کاهش در مخزنی که پوشش آن برون - اپوکسی است بیشتر است؛ اما ضریب شدت تنش در مخزنی که شامل کولار - اپوکسی است در مقابل افزایش شار حرارتی افزایش پیدا می‌کند. این پدیده به این دلیل است که تحت بارگذاری هم‌زمان فشار و شار حرارتی، برخی تنش‌های مکانیکی و حرارتی منفی و برخی مثبت است و با افزایش شار حرارتی ممکن است در بعضی حالات، تنش مجموع کمتر و یا بیشتر شود و این باعث کاهش یا افزایش ضریب شدت تنش می‌شود.

مراجع

[1] B. Doostvandi, A. Zeinedini, "Repair of Inclined Notches in the Pressurized Steel Pipes using Laminated Composites," *Material Design & Processing Communications*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-5, 2019, <https://doi.org/10.1002/mdp2.49>.

[2] T.L. Anderson, "Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications", Third Edition (3rd ed.), Boca Raton: CRC Press, 2005, <https://doi.org/10.1201/9781420058215>.

[3] D. Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics," Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, 1st Edition, 1982, <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4333-9>.

[4] A. Aghamoradi, and A. Rajaie rad, "An overview of the manufacturing process of various types of CNG tanks", The Second International Conference on the Application of Materials and

Advanced Manufacturing in Industries, Document National Code: IAAMM02, 20-21 July 2022, Iran University of Science and Technology, Teharn, Iran, [In Persian], <https://civilica.com/doc/1493524>.

[5] A. R. Shahani, and M. M. Kheirikhah, "Stress Intensity Factor Calculation of Steel-lined Hoop-wrapped Cylinders with Internal Semi-elliptical Circumferential Crack," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 2004-13, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.10.014>.

[6] J. Chen, and H. Pan, "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, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.04.026>.

[7] P. Livieri, and F. Segala, "Stress Intensity Factors for Embedded Elliptical Cracks in Cylindrical and Spherical Vessels", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 86, pp. 260-6, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.07.009>.

[8] G. Ai, and Y. H. Liu, "Effect of the Joule-thomson Cooling on the Leak-Before-Break Approach", *Procedia Engineering*, Vol. 130, pp. 1343-58, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.304>.

[9] M. Fakoor, S. M. N. Ghoreishi, and N. Mehri Khansari, "Investigation of Composite Coating Effectiveness on Stress Intensity Factors of Cracked Composite Pressure Vessels," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 3119-26, 2016, <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0621-8>.

[10] S. Qaderian, and A. Gorbanpour Arani, "Investigation and Analysis of Cracks Created on Thin-walled Tanks under Pressure Containing Fluid using Abaqus Software," 14th National Conference on Construction and Production Engineering of Iran, Document National Code: ICME14, 24 October 2017, Arak, Iran, [In Persian], <https://civilica.com/doc/713594/>. S.

[11] M. Heidari-Rarani, and M. Ahmadi-Jebeli, "Finite Element Modeling of Failure in IV Type Composite Pressure Vessel using WCM Plug-in in ABAQUS Software," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, pp. 191-200, 2018, [In Persian], [DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.31.4](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1397.18.4.31.4)

[12] Y. Borse, and A. Sharma, "Modelling of Pressure Vessels with Different End Connections using Pro Mechanica," *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, No. 3, pp. 1493-1497, 2012, https://www.ijera.com/papers/Vol2_issue3/IY2314931497.pdf.

[13] K. Drazan, S. Ivan, S. Antun, I. Zeljko, and D. Darko, "Stress Analyses of Cylindrical Vessel with Changeable Head Geometry", *Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology*, Vol. 23, pp. 93-104, 2009, <https://www.proquest.com/docview/880041319/CBC1445A540445ECPQ/1?accountid=34283&sourcetype=Scholarly%20Journals>.

[14] A. J. Modi, and C.S. Jadav, "Structural Analysis of Different Geometry Heads for Pressure Vessel using Ansys Multiphysics," The 5th International Conference on Advance in Mechanical Engineering, 2011, <https://conferencealerts.com/show-event?id=ca1i8hhs>.

- [15] N. Habibi, and R. Moradikhah, "Calculation of Stress Intensity Factor for Cylindrical Tanks with Semi-elliptical Cracks under Internal Pressure," The Second National Conference on Oil, Gas, Petrochemicals and Sustainable Development, Document National Code: OGPCONF02, 19 March 2016, Mehr Arvand Higher Education Institute, Tehran, Iran, [In Persian], <https://civilica.com/doc/474976/>.
- [16] U. Guven, "A Comparison on Failure Pressures of Cylindrical Pressure Vessels, Mechanics Research Communications," Vol. 34, pp. 466-471, 2007, doi:[10.1016/j.mechrescom.2007.05.001](https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2007.05.001).
- [17] P. Balicevic, D. Kozak, and T. Mrcela, "Strength of Pressure Vessels with Ellipsoidal Heads," *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 54, No. 10, pp. 685-692, 2008.
- [18] S.K., Raparla, T. Seshaiyah, "Design and Analysis of Multilayer High Pressure Vessels," *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, pp. 355-361, 2021.
- [19] D. Cohen, Y.T. Toombes, A.K. Johnson, and M.F. Hansen, "Pressurized Ring Test for Composite Pressure Vessel Hoop Strength and Stiffness Evaluation," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 331-340, 1995, <https://doi.org/10.1520/CTR10453J>.
- [20] R. Karim Dadashi, M.A. Mohtadi, and H.R. Qayedi, "Fracture Mechanics, 1st Edition, Tehran, Iran, Nashre Atran, [In Persian], 2018.
- [21] A. A. Masoumi, Gh. H. Rahimi Sharbaf Moghadas, and Gh. H. Liyaghat, "Transient Heat Transfer Analysis in Composite Metal Cylindrical Vessel using the Layerwise Theory and Differential Quadrature Method", *Journal of Science and Technology of Composites*, [In Persian], Vol. 4, pp. 347-58, 2017.
- [22] O. Ayakdaş, L. Aydın, M. Savran, N. Küçükdoğan, and S. Öztürk, "Optimal Design of the Type III Hydrogen Storage Tank for Different Carbon/Epoxy Materials by Modified Differential Evolution Method", *Research on Engineering Structures and Materials*, Vol. 5, pp. 189-201, 2019, <http://dx.doi.org/10.17515/resm2019.65is0909>.
- [23] M. H. Kayhani, M. Shariati, M. Norouzi, "An Analytical Solution of Steady State Conductive Heat Transfer in Cylindrical Composite Laminates," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, pp. 135-52, 2009, [In Persian], [DOR: 20.1001.1.10275940.1388.9.1.13.7](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1388.9.1.13.7).
- [24] P. Karthikeyan, R. Gobinath, L. Ajith Kumar, and D. Xavier Jenish, "Design and Analysis of Drive Shaft using Kevlar/Epoxy and Glass/Epoxy as a Composite Material," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sathyabama University, Chennai, India: IOP Publishing, pp. 012048, 2017, [DOI: 10.1088/1757-899X/197/1/012048](https://doi.org/10.1088/1757-899X/197/1/012048).
- [25] A. Naraki, and P. Ghabezi, "Analysis of Thick-walled Composite Cylindrical Pressure Vessels under the Effect of Cyclic Internal Pressure and Cyclic Temperature," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 3, pp. 15-32, 2013, [In Persian], [DOI: 10.22044/jsfm.2013.172](https://doi.org/10.22044/jsfm.2013.172).

فهرست نمادهای انگلیسی

a	عمق ترک (mm)
c	طول ترک (mm)
E_1	مدول یانگ موازی الیاف (GPa)
E_2	مدول یانگ عمود بر الیاف (GPa)
K_I	ضریب شدت تنش ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$)
P	فشار مخزن (MPa)
r	شعاع داخلی مخزن (mm)
t	ضخامت جداره مخزن (mm)
T_m	ضخامت آستر فلزی (mm)
T_C	ضخامت پوشش کامپوزیت (mm)
U_{12}	ضریب پواسون در صفحه (۱-۲)
U_{23}	ضریب پواسون در صفحه (۲-۳)
σ_t	تنش عرضی (MPa)
σ_l	تنش طولی (MPa)
θ	زاویه قرارگیری الیاف

Finite Element Analysis of Longitudinal and Transverse Semi-elliptical Cracks in Composite CNG Cylindrical Tanks with Metal Lining under Internal Pressure and Thermal Loading

*Corresponding author: **Mohammad Salari**

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Engineering Faculty,
University of Qom, Qom, Iran
m.salari@qom.ac.ir

Zeinab Lotfimanesh

MSc Graduated Student, Department of Mechanical Engineering, Technical and Engineering Faculty,
University of Qom, Qom, Iran
zeynablotfi1369@gmail.com

Abstract

Crack formation and propagation is one of the important factors in the failure of engineering components, which can cause great financial and human losses. Therefore, it is very necessary to investigate and study the cracks in structures under load. In this paper, a semi-elliptical crack in composite CNG pressure tanks with a metal liner is investigated. The tank under study is a type III CNG pressure tank. In this tank, whose composite coating is made of Boron/epoxy, Kevlar/epoxy, and carbon/epoxy; longitudinal and transverse internal cracks as well as external cracks have been investigated. The results show that the crack geometry has a great influence on the stress intensity factor. The internal longitudinal semi-elliptical crack is the most critical crack and when this crack is located next to the external transverse crack, it becomes more critical and the stress intensity factor in the internal longitudinal semi-elliptical crack increases. The Boron/epoxy composite has a greater resistance to increased internal pressure and increasing the number of composite layers increases the crack stress intensity factor. Also, in a tank with Boron/epoxy coating, an angle of 40 to 45 degrees to the longitudinal and transverse cracks is the best position for fiber placement. If this angle is greater or less, the stress intensity factor increases.

Keywords: CNG tank, Semi elliptical surface crack, Stress intensity factor, Composite, Finite element analysis