

محاسبه ضرایب شدت تنش ترک‌های سه‌بعدی نیم‌بیضوی در لوله‌های با درز جوش طولی تحت بارگذاری مود ترکیبی

محمد رضا محمد علیها^۱، سید محمد نوید قریشی^۲، حسن فرح بخش^۳

۱ استادیار مرکز تحقیقات جوش و اتصال دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، mrm_aliha@iust.ac.ir

۲ دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۳ کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۱۱

چکیده

لوله‌های با درز جوش طولی از جمله انواع متداول لوله‌های مورد استفاده در صنایعی چون نفت، گاز، پتروشیمی و پالایشگاهی‌اند. واماندگی و شکست این دسته از لوله‌ها عمدتاً به‌واسطه رشد ترک‌ها و ناخالصی‌های موجود در ناحیه جوش یا ناحیه متأثر از حرارت^۱ می‌باشد. در این مقاله، پس از ارائه حل تحلیلی برای تعیین ضرایب شدت تنش ترک‌های موجود در لوله‌ها، برای شناسایی بحرانی‌ترین ترک در لوله‌های با درز جوش طولی، تعدادی ترک سه‌بعدی نیم‌بیضوی طولی با نسبت منظرهای ۰/۵ الی ۱ در امتداد خط جوش و در جداره‌های داخلی و خارجی لوله در نرم‌افزار آباکوس مدل می‌شوند و ضرایب شدت تنش مود ۱، ۲ و ۳ این ترک‌ها در سرتاسر جبهه ترک تحت بارگذاری توأمان فشار داخلی و پیچش محاسبه می‌شوند. بر اساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که تأثیر هر سه مود بارگذاری بر رفتار شکست این لوله‌ها مؤثر است و عامل فشار داخلی درون این لوله‌ها مهمتر از سایر پارامترها در رشد ترک‌های طولی ایجاد شده می‌باشد. همچنین از نتایج چنین برمی‌آید که ترک‌های طولی داخلی به‌عنوان بحرانی‌ترین ترک‌ها در لوله‌های با درز جوش طولی شناخته می‌شوند.

واژگان کلیدی

لوله با درز جوش طولی، ترک نیم‌بیضوی، ضرایب شدت تنش، بارگذاری مود ترکیبی، روش المان محدود

۱. مقدمه

صنایع همچون نفت، گاز، پتروشیمی و پالایشگاهی‌اند. در مقایسه با لوله‌های اسپیرال^۲، که قطر زیادی دارند، لوله‌های با درز جوش طولی، که معمولاً در تأسیسات پالایشگاهی مورد استفاده قرار

محصولات نفتی و پالایشگاهی غالباً توسط خطوط لوله جوشکاری شده منتقل و فرآوری می‌شوند. لوله‌های با درز جوش طولی از جمله انواع متداول لوله‌های مورد استفاده در بسیاری از

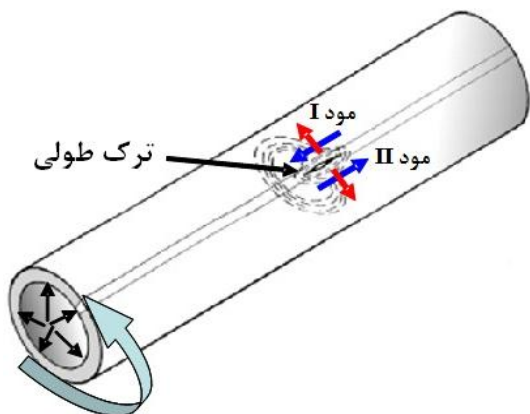
می‌گیرند، قطر کمتری دارند. همچنین در مقایسه با لوله‌های جوشکاری‌شده اسپیرال، لوله‌های با درز جوش طولی دارای صلبیت کمتر و توزیع تنش غیرهمگن‌تری می‌باشند. بنابراین درصد آسیب‌پذیری و صدمه‌دیدگی این لوله‌ها در مقایسه با لوله‌های اسپیرال بیشتر است. نتایج تحقیقات متعدد روی لوله‌های وامانده شده نشان می‌دهد که واماندگی و خرابی لوله از محل یک ترک یا عیب موجود در لوله شروع می‌شود [۱]. بنابراین یافتن عیوب و ترک‌های احتمالی در ساختار لوله‌ها اهمیت بسزایی دارد. از اینرو آزمایش‌های غیرمخربی چون روش چشمی، روش مایعات نافذ، روش فراصوتی، روش مغناطیس، جریان‌های گردابی، روش پرتوهای ایکس و جز این‌ها برای یافتن عیوب در لوله‌ها استفاده شده است. از جمله پرکاربردترین آزمایش‌های غیرمخرب برای یافتن عیوب در لوله‌ها می‌توان به آزمون فراصوت^۳ اشاره کرد. در این روش امواج فراصوت با بسامد بالا و دامنه کم به داخل ضخامت لوله فرستاده می‌شوند. این امواج پس از برخورد به هر گسستگی بازتابیده می‌شوند، قسمتی از این امواج به سمت حسگر می‌رود و حسگر آن را دریافت می‌کند. از روی دامنه و زمان بازگشت این امواج می‌توان به مشخصه‌های این گسستگی شامل موقعیت و ابعاد آن پی برد [۲].

نتایج آزمایش‌های غیرمخرب روی این دسته از لوله‌ها نشان می‌دهد که فلز جوش و قسمتی از خود لوله که در نزدیکی ناحیه جوشکاری شده (ناحیه متأثر از حرارت) قرار دارند، از شایع‌ترین محل‌های بروز و پیدایش ترک می‌باشند. در بررسی ترک‌های ایجادشده در اطراف جوش‌های طولی، معمولاً ترک‌های طولی در امتداد خط جوش نسبت به ترک‌های عرضی بحرانی‌تر بوده و در نتیجه غالباً به بررسی رفتار این‌گونه ترک‌ها پرداخته می‌شود. این ترک‌ها که عمدتاً در امتداد طولی لوله و در راستای خط جوش پدید می‌آیند می‌توانند هم در جداره داخلی و هم در جداره خارجی لوله ایجاد شوند. این ترک‌ها می‌توانند در حین عمر سرویس‌دهی و شرایط کاری لوله به‌طور ناگهانی و سریع رشد کنند و سبب شکست و حتی انفجار لوله شوند. بنابراین لازم است روش‌های مناسبی جهت تخمین و ارزیابی عملکرد مناسب و عاری از خطر لوله‌های جوشکاری شده با درز جوش طولی مورد استفاده قرار گیرد و استحکام، یکپارچگی و عمر سرویس‌دهی باقیمانده این لوله‌ها بررسی گردد. ترک‌های موجود در این لوله‌ها می‌توانند در معرض بارگذاری‌های پیچیده‌ای چون ترکیبی از بارهای کششی و

برشی قرار بگیرند. برای بررسی رفتار رشد ترک و شکست در چنین لوله‌های ترک‌داری تعیین ضرایب شدت تنش تحت شرایط شکست مود ترکیبی کششی - برشی امری ضروری است.

با توجه به کاربردهای فراوان لوله‌های انتقال نفت و گاز و اهمیت بررسی رفتار رشد ترک و شکست در آنها، تحقیقات فراوانی در زمینه تحلیل و بررسی ترک در چنین لوله‌هایی به‌روش اجزای محدود انجام شده و یا در حال انجام است. در بیشتر این پژوهش‌ها، پژوهشگران به بررسی و محاسبه پارامترهای شکست، از جمله ضریب شدت تنش نوک یا جبهه ترک در مود اول شکست پرداخته‌اند. در این راستا در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۲ م، نیومن و راجو [۳-۴] توانستند ضریب شدت تنش مود ۱ را برای بازه وسیعی از پارامترهای هندسی ترک‌های نیم‌بیضوی داخلی و خارجی ارائه کنند. آلتوری و کاتیرسان [۵]، همچنین مک‌گوان و ریموند [۶] توانستند ضریب شدت تنش را برای یک ترک سطحی نیم‌بیضوی با استفاده از روش‌های اجزای محدود به‌دست آورند. کاوه و آیت‌اللهی [۷] نیز به محاسبه ضرایب شدت تنش مود ۱ بارگذاری برای قطعه خمش سه‌نقطه‌ای شیاردار پرداختند. شهرآئینی و هاشمی [۸] نیز به بررسی اثر تغییرات طول و عمق ترک سطحی نیم‌بیضوی بر ایمنی لوله فولادی انتقال گاز پرداخته‌اند. نظری و عاصمی [۹] به تعیین ضریب شدت تنش برای ترک نیم‌بیضوی طولی در یک استوانه جدارضخیم تحت بارگذاری حرارتی هذلولی پرداختند. به تازگی نیز اثر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بر ضرایب شدت تنش گذرا در ترک‌های نیم‌دایروی طولی ایجادشده در محور استوانه‌ها توسط نبوی و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. علیپور و همکاران [۱۱] نیز به تعیین ضرایب شدت تنش حرارتی برای ترک نیم‌بیضوی طولی در یک پوسته استوانه‌ای با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند. بنهامن و همکاران [۱۲] به بررسی اجزای محدود ترک‌های نیم‌بیضوی موجود در لوله‌های پلی اتیلن تحت فشار داخلی پرداختند. باوجود تحقیقات فراوان، بررسی رفتار شکست لوله‌های دارای ترک تحت مود ترکیبی، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا در این مقاله برای شناسایی بحرانی‌ترین ترک در لوله‌های با درز جوش طولی، ضرایب شدت تنش ترک‌های سه‌بعدی نیم‌بیضوی طولی در سرتاسر نقاط جبهه ترک در جداره داخلی و خارجی لوله‌های با درز جوش طولی تحت بارگذاری توأمان فشار داخلی و پیچش تعیین شده است.

بارگذاری مود ۱ خالص همواره در امتداد راستای ترک اولیه است، اما در حالت بارگذاری مود ترکیبی، جهت و مسیر رشد ترک به نوع بارگذاری وابسته است؛ لذا تعدادی معیار شکست مود ترکیبی وجود دارد که با استفاده از آنها می‌توان زاویه شروع رشد ترک و بار بحرانی متناظر با لحظه شکست را پیش‌بینی کرد. برخی از این معیارها عبارت‌اند از معیار بیشترین تنش محیطی [۱۳]، بیشترین نرخ آزادسازی انرژی [۱۴] و کمترین چگالی انرژی کرنشی [۱۵].



شکل ۲. بارگذاری مود ترکیبی اعمال شده به یک ترک طولی

واقع در جداره لوله با درز جوش طولی

۳. حل تحلیلی برای ترک‌های سطحی موجود در لوله‌ها

در این بخش به حل تحلیلی و تعیین ضرایب شدت تنش ترک‌های سطحی موجود در لوله‌ها پرداخته شده است. فرض می‌شود x_1 و x_2 مختصات کارتیزین در صفحه ترک بیضوی و x_3 مختصات کارتیزین در عمود بر صفحه ترک بیضوی باشد. با توجه به شکل ۳ معادله مرز ترک بیضوی در مختصات کارتیزین را می‌توان به صورت ۱ نوشت [۱۶]:

$$\left(\frac{x_1}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{a_2}\right)^2 = 1, \quad a_1 > a_2 \quad (1)$$

به طوری که در این رابطه a_1 و a_2 به ترتیب قطر بزرگ و کوچک بیضی هستند. راحت‌تر است رابطه ۱ را در مختصات بیضی‌وار به صورت رابطه ۲ بیان نمود:

$$w(s) = 1 - \left(\frac{x_1^2}{a_1^2 + s}\right) - \left(\frac{x_2^2}{a_2^2 + s}\right) - \left(\frac{x_3^2}{s}\right) = 0 \quad (2)$$

فرض می‌شود که بردار تنش عمودی در امتداد سطح ترک به صورت رابطه ۳ باشد [۱۶]:

$$\sigma_{33}^{(0)} = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^m A_{3,m-n,n}^{(i,j)} x_1^{2m-2n+i} x_2^{2n+j} \quad (3)$$

۲. بارگذاری ترکیبی اعمال شده به ترک در لوله‌های با

درز جوش طولی

ترک‌های موجود در لوله‌های با درز جوش طولی می‌توانند در معرض بارگذاری‌های پیچیده‌ای قرار داشته باشند. مثلاً، در صنایع پالایشگاهی، لوله‌های با درز جوش طولی به صورت متقاطع و در جهات مختلف به یکدیگر جوش شده‌اند که به واسطه وجود فشار داخلی و افزایش طول به علت تغییرات دمایی، تغییر شکل‌های پیچیده‌ای را تجربه می‌کنند. در شکل ۱ مجموعه‌ای از این لوله‌ها در یک واحد پالایشگاهی نمایش داده شده است.



شکل ۱. لوله‌های متقاطع با درز جوش طولی در تأسیسات پالایشگاهی

چنانچه ترکی در قسمتی از خط جوش و در جداره داخلی یا خارجی لوله به وجود آید، این ترک می‌تواند در معرض ترکیبی از تغییر فرم کششی و بازشونده لبه‌های ترک (مود ۱ بارگذاری) ناشی از اعمال فشار داخلی و تغییر فرم برشی و لغزشی لبه‌های ترک روی هم (مود ۲ و ۳ بارگذاری) ناشی از بارهای پیچشی که لوله‌های متقاطع در اثر تغییرات دمایی روزانه یا فصلی به یکدیگر وارد می‌کنند، قرار بگیرد. در شکل ۲ این دو نوع تغییر فرم در یک لوله ترک‌دار با درز جوش طولی و تحت تغییر فرم کششی - برشی ناشی از بارهای فشار داخلی و پیچشی نمایش داده شده است. بنابراین در حالت کلی و در عمل، واماندگی بسیاری از لوله‌های تأسیسات پالایشگاهی جوشکاری شده با درز جوش طولی و دارای ترک در شرایط بارگذاری مود ترکیبی کششی - برشی به وقوع می‌پیوندد. مقدار و سهم تأثیر هر کدام از این مودها با استفاده از پارامترهایی به نام ضریب شدت تنش مود ۱ (K_I)، ضریب شدت تنش مود ۲ (K_{II}) و ضریب شدت تنش مود ۳ (K_{III}) به صورت کمی قابل بیان است. در حالی که جهت و زاویه شکست در

۸ را می‌توان با استفاده از روابط ۴ تا ۶ به فرم ماتریسی به صورت ۹ بیان نمود:

$$\{\sigma\} = [P] \{C\} \quad (9)$$

$N \times 1 \quad N \times N \quad N \times 1$

در رابطه اخیر [P] تابعی از مختصات کارترین (x_1, x_2, x_3) و N تعداد کل ضرایب A و C است. با ارضای شرایط مرزی بر روی سطح ترک، رابطه بین ثوابت A و C به صورت ۱۰ قابل بیان است:

$$\{A\} = [B] \{C\} \quad (10)$$

$N \times 1 \quad N \times N \quad N \times 1$

پس از اینکه ثوابت C با حل رابطه ۱۰ تعیین شدند، می‌توان ضریب شدت تنش مود ۱ را برای یک بارگذاری وارد شده به سطح ترک با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه کرد [۱۶].

$$K_I = 8G \left(\frac{\pi}{a_1 a_2} \right)^{0.5} A^{0.25} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^k (-2)^{2k+i+j} (2k+i+j+1)! \frac{1}{a_1 a_2} \left(\frac{\cos \theta}{a_1} \right)^{2k-2l+i} \quad (11)$$

در رابطه فوق θ معرف زاویه بیضوی است که از محور x_1 اندازه‌گیری می‌شود؛ A نیز به صورت رابطه ۱۲ بیان می‌شود:

$$A = a_1^2 \sin^2 \theta + a_2^2 \cos^2 \theta \quad (12)$$

ضرایب شدت تنش مود ۲ و ۳ نیز به صورت روابط ۱۳ تا ۱۶ محاسبه می‌شوند [۱۶]:

$$K_{II} = 8G \left(\frac{\pi}{a_1 a_2} \right)^{0.5} A^{-0.25} \frac{1}{a_1 a_2} \times [H_1 a_2 \cos \theta + H_2 a_1 \sin \theta] \quad (13)$$

$$K_{III} = 8G \left(\frac{\pi}{a_1 a_2} \right)^{0.5} A^{-0.25} \frac{(1-\nu)}{a_1 a_2} \times [H_2 a_2 \cos \theta - H_1 a_1 \sin \theta] \quad (14)$$

$$H_1 = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^k (-2)^{2k+i+j} (2k+i+j+1)! \left(\frac{\cos \theta}{a_1} \right)^{2k-2l+i} \left(\frac{\sin \theta}{a_2} \right)^{2l+j} C_{l,k-l,l}^{(i,j)} \quad (15)$$

$$H_2 = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^k (-2)^{2k+2-i-j} (2k+3-i-j)! \left(\frac{\cos \theta}{a_1} \right)^{2k-2l+1-i} \left(\frac{\sin \theta}{a_2} \right)^{2l+1-j} C_{2,k-l,l}^{(1-i,1-j)} \quad (16)$$

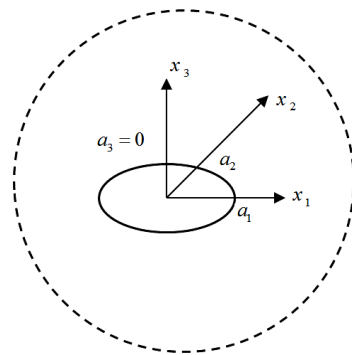
به طوری که در این رابطه، ضرایب A ثوابت تعیین نشده و پارامترهای i و j معرف تقارن بارگذاری نسبت به محورهای دستگاه مختصات می‌باشند. حل متناظر با بارگذاری بیان شده با رابطه ۳ برحسب تابع پتانسیل f_3 به صورت رابطه ۴ در نظر گرفته می‌شود:

$$f_3 = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^k C_{3,k-l,l}^{(i,j)} F_{2k-2l+i,2l+j} \quad (4)$$

در این رابطه ثوابت C ثوابتی تعیین نشده می‌باشند.

$$F_{2k-2l+i,2l+j} = \frac{\partial^{2k+i+j}}{\partial x_1^{2k-2l+i} \partial x_2^{2l+j}} \times \left\{ \int_{\xi_3}^{\infty} [w(s)]^{2k+i+j+1} \frac{ds}{\sqrt{Q(s)}} \right\} \quad (5)$$

$$Q(s) = s(s+a_1^2)(s+a_2^2) \quad (6)$$



شکل ۳. ترک بیضوی موجود در جسم

بنابراین میدان جابه‌جایی و تنش برحسب تابع پتانسیل f_3 به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$u_1 = (1-2\nu)f_{3,1} + x_3 f_{3,31} \quad (7)$$

$$u_2 = (1-2\nu)f_{3,2} + x_3 f_{3,32}$$

$$u_3 = -2(1-\nu)f_{3,3} + x_3 f_{3,33}$$

$$\sigma_{11} = 2G (f_{3,11} + 2\nu f_{3,22} + x_3 f_{3,311})$$

$$\sigma_{22} = 2G (f_{3,22} + 2\nu f_{3,11} + x_3 f_{3,322})$$

$$\sigma_{33} = 2G (-f_{3,33} + x_3 f_{3,333}) \quad (8)$$

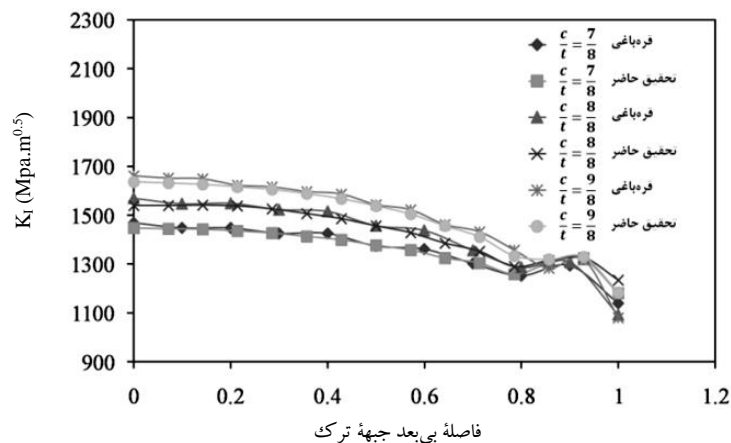
$$\sigma_{12} = 2G (f_{3,12} - 2\nu f_{3,12} + x_3 f_{3,312})$$

$$\sigma_{31} = 2G x_3 f_{3,331}$$

$$\sigma_{32} = 2G x_3 f_{3,332}$$

در روابط ۷ و ۸، G و ν به ترتیب مدول برشی و ضریب پواسون می‌باشند. برای راحتی، میدان تنش ارائه شده توسط رابطه

مگا پاسکال، منحنی‌های تغییرات ضریب شدت تنش را توسط فاصله بی بعد x/c در سرتاسر جبهه ترک و برای طول ترک‌های مختلف ارائه نمود. در اینجا برای اطمینان از روند مدلسازی و تحلیل، پوسته استوانه‌ای ترک‌دار فوق با مشخصات ذکر شده در نرم‌افزار آباکوس مدلسازی شده و نتایج مربوط به ضریب شدت تنش مود ۱ ترک‌ها با نتایج محاسبه شده توسط قره‌باغی مقایسه می‌شوند. در اینجا به دلیل تقارن موجود فقط نتایج مربوط به نیمی از طول ترک گزارش شده است. در شکل ۴ مقایسه نتایج محاسبه شده در این پژوهش با نتایج محاسبه شده توسط قره‌باغی نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج این پژوهش و نتایج قره‌باغی وجود دارد. این تطابق بین نتایج تحقیق حاضر با نتایج قره‌باغی، صحت روند مدلسازی و تحلیل‌های انجام شده در این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه مقادیر ضرایب شدت تنش مود ۱ بین نتایج محاسبه شده در تحقیق حاضر با نتایج محاسبه شده توسط قره‌باغی [۱۷]

موجود در دیواره لوله‌ها، دانستن پارامترهای ضخامت دیواره لوله (t) ، شعاع لوله (R) ، طول ترک (c) و عمق ترک (a) لازم است. علاوه بر پارامترهای ذکر شده، ضریب الاستیسیته پوسته (E) و ضریب پواسون پوسته (ν) نیز جهت مدلسازی لوله ترک‌دار مورد نیاز است. در این مقاله، به منظور تشخیص بحرانی‌ترین ترک در لوله‌های با درز جوش طولی، با فرض ثابت بودن طول ترک به مدلسازی ۱۲ ترک طولی نیم‌بیضوی در نرم‌افزار آباکوس با نسبت منظرهای (a/c) ۰/۵ الی ۱ یک بار در جداره داخلی لوله و بار دیگر در جداره خارجی لوله پرداخته شده است. لوله مدلسازی شده از جنس فولاد با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و شعاع ۱۵ سانتی‌متر، ضخامت ۲ سانتی‌متر و طول

۴. صحت‌سنجی روند مدلسازی و تحلیل

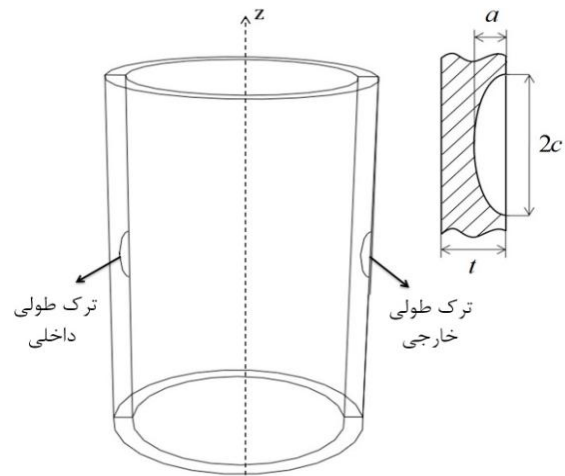
قبل از انجام مدلسازی عددی و تحلیل ترک‌های ایجاد شده در مخازن تحت فشار لازم است از روند مدلسازی و تحلیل اطمینان حاصل نمود. لذا در این راستا از کار تحقیقاتی قره‌باغی [۱۷] که به محاسبه ضریب شدت تنش مود ۱ پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار در معرض فشار داخلی پرداخته است، استفاده می‌شود. این پژوهشگر در کار خود چند ترک سه‌بعدی نیم‌بیضوی با طول‌های مختلف در امتداد خط جوش و در جداره خارجی پوسته استوانه‌ای آلومینیومی با شعاع ۲۵ سانتی‌متر، ضخامت ۴ میلی‌متر و طول ۰/۵ متر به صورت طولی در نظر گرفته است. عمق ترک‌ها برابر با ۲ میلی‌متر و نسبت عمق ترک به طول ترک (a/c) در محدوده ۰/۴ تا ۱ در نظر گرفته شده است. وی پس از محاسبه ضریب شدت تنش مود ۱ ترک‌ها تحت بارگذاری فشار داخلی برابر با ۱۰

۵. مدلسازی المان محدود ترک‌های نیم‌بیضوی طولی

در جداره داخلی و خارجی لوله‌های با درز جوش طولی

ترک‌های سطحی را می‌توان به صورت نیم‌بیضوی در نظر گرفت؛ زیرا بر اساس تحقیقاتی که لین و اسمیت [۱۸] در سال ۱۹۹۸ م انجام دادند، مشخص شد که ترک‌ها با هر شکل دلخواه، پس از کمی رشد به صورت نیم‌بیضوی درمی‌آیند و پس از آن به صورت نیم‌بیضوی رشد می‌کنند. در شکل ۵ نمایی شماتیک از ترک سطحی طولی نیم‌بیضوی در جداره داخلی و خارجی لوله نمایش داده شده است. معمولاً راستای طولی ترک را منطبق بر قطر بزرگ بیضی و راستای عمق ترک را منطبق بر قطر کوچک آن در نظر می‌گیرند. برای مشخص کردن هندسه ترک‌های نیم‌بیضوی

یک متر است. ترک‌های مدلسازی شده دارای طول ثابت ۲ سانتی‌متر و با توجه به نسبت منظر ترک‌ها دارای عمق ۵ الی ۱۰ میلی‌متر می‌باشند. مطابق شکل ۲ در تمام ۱۲ حالت ترک موجود، لوله تحت بارگذاری فشار داخلی ۵۰ بار و پیچش ۱۰۰۰۰ نیوتن متر قرار گرفته است.



شکل ۵. ترک سطحی طولی نیم‌بیضوی در جداره داخلی و خارجی لوله

به‌منظور مدلسازی تکنیکی موجود در مؤلفه‌های تنش و کرنش جبهه ترک، از المان‌های ویژه‌ای با نام المان‌های منفرد^۴ برای جبهه ترک استفاده می‌گردد. برای ایجاد المان‌های تکین اطراف ترک لازم است حجم کوچکی با عنوان تونل ترک که دربرگیرنده المان‌های تکین است در اطراف ترک طرح‌ریزی شود. برای انجام این کار در نرم‌افزار آباکوس ابتدا می‌بایست قسمت‌بندی مناسب و ویژه‌ای در اطراف ترک صورت پذیرد و سپس با استفاده از قابلیت نرم‌افزار، المان‌های مذکور در راستای جبهه ترک ایجاد شوند. نحوه مش‌بندی کل لوله و اطراف ترک برای یک ترک طولی خارجی و داخلی با نسبت منظر ۰/۸ به‌ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. برای مش‌بندی کل لوله و ترک خارجی و داخلی موجود در لوله به‌ترتیب از ۸۷۴۳۶ و ۸۵۹۰۰ المان مکعبی درجه دوم C3D20R با ۲۰ گره^۵ استفاده شده است. همچنین در این مقاله از بردار نرمال بر صفحه ترک برای تعریف جهت رشد ترک‌ها در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

۶. محاسبه ضرایب شدت تنش

ضرایب شدت تنش پارامترهای اساسی برای بررسی رفتار شکست سازه‌های ترک‌دار می‌باشند. این ضرایب در هر یک از موده‌های

بارگذاری در لوله‌های با درز جوش طولی تابعی از بار اعمالی، طول ترک، عمق ترک و هندسه لوله (شعاع و ضخامت لوله) هستند و به‌صورت رابطه ۱۷ بیان می‌شوند [۱۹]:

$$\begin{aligned} K_{I} &= Y_{I} \left(\frac{a}{c}, \frac{a}{R}, t \right) \times \sigma \sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= Y_{II} \left(\frac{a}{c}, \frac{a}{R}, t \right) \times \sigma \sqrt{\pi a} \\ K_{III} &= Y_{III} \left(\frac{a}{c}, \frac{a}{R}, t \right) \times \sigma \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (17)$$

در رابطه اخیر Y_{I} ، Y_{II} و Y_{III} به‌ترتیب ضرایب هندسی موده‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشند. در موارد خاص که هندسه و بارگذاری ساده است، می‌توان ضرایب شدت تنش را با استفاده از روش‌های تحلیلی محاسبه کرد، اما در اکثر موارد که مسئله پیچیده‌تر است (نظیر ترک‌های سه‌بعدی در لوله‌های با درز جوش طولی) به روش‌های عددی از جمله روش اجزای محدود نیاز است. در روش اجزای محدود، برای محاسبه ضرایب شدت تنش در سرتاسر جبهه ترک از روش انتگرال J استفاده می‌شود. روش انتگرال J به‌صورت رابطه ۱۸ بر روی کانتور Γ که نوک ترک را در بر می‌گیرد تعریف می‌شود [۲۰]:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (18)$$

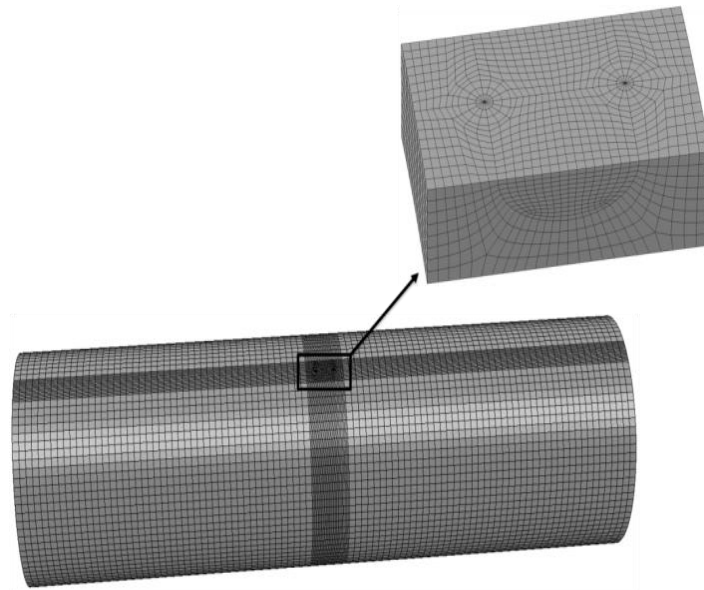
در محاسبات عددی معمولاً محاسبه انتگرال در رابطه ۱۸ مشکل است، به‌همین دلیل معمولاً رابطه ۱۸ را به‌صورت ۱۹ به انتگرال سطح تبدیل می‌کنند:

$$J = \int_A \left[\left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} - W \delta_{1j} \right) \frac{\partial q}{\partial x_1} \right] dA \quad (19)$$

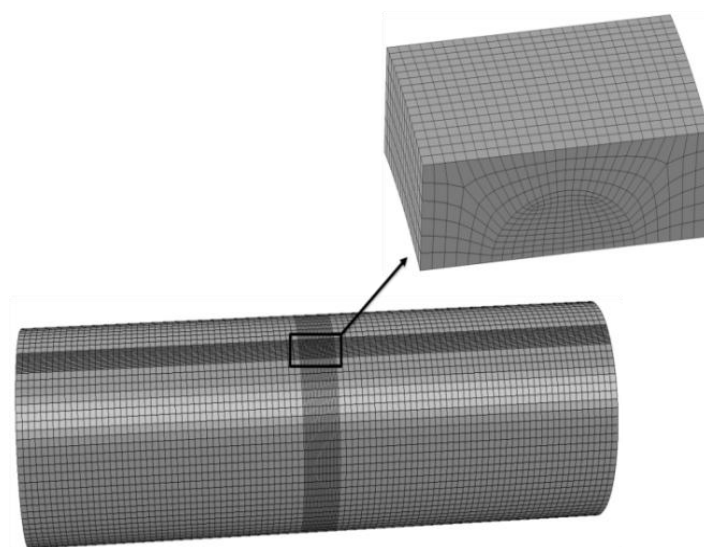
در رابطه ۱۹، A سطح بین دو کانتور دربرگیرنده ترک و q تابع وزنی همواری است که روی کانتور داخلی برابر با یک و روی کانتور بیرونی برابر با صفر می‌باشد؛ همچنین W بیانگر انرژی کرنشی است که به‌صورت ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$W = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (20)$$

در این مقاله مقادیر ضرایب شدت تنش در سرتاسر جبهه ترک توسط نرم‌افزار آباکوس به‌صورت مستقیم و با استفاده از روش انتگرال J استخراج شده است. در واقع پس از محاسبه انتگرال J که برابر میزان نرخ انرژی کرنشی در ترک تحت بارگذاری مونوتونیک می‌باشد، می‌توان این مقدار را برای شرایط الاستیک خطی برحسب ضرایب شدت تنش موده‌های مختلف بارگذاری با استفاده از روابط ۲۱ و ۲۲ بیان نمود.



شکل ۶. نمایی از مش بندی کل لوله و اطراف ترک طولی خارجی با نسبت منظر ۰/۸



شکل ۷. نمایی از مش بندی کل لوله و اطراف ترک طولی داخلی با نسبت منظر ۰/۸

داده شده است. در شکل ۹ نیز نمایی از جبهه ترک و نقاط روی آن برای ترک طولی خارجی، که ضرایب شدت تنش در آنها استخراج شده، نمایش داده شده است. برای سهولت در تعیین نقاط روی جبهه ترک، مطابق شکل ۹ مختصات x را تعریف نموده و نقاط روی جبهه ترک توسط فاصله بی بعد x/c مشخص می گردند.

۷. نتایج

نمودارهای تغییرات ضرایب شدت تنش در سرتاسر جبهه ترک برای ترک های طولی مدلسازی شده در جداره خارجی و داخلی

$$K_i = \sqrt{\frac{E J_i}{1-\nu^2}}, \quad i = I, II \quad (21)$$

$$K_{III} = \sqrt{\frac{E J_{III}}{1+\nu}} \quad (22)$$

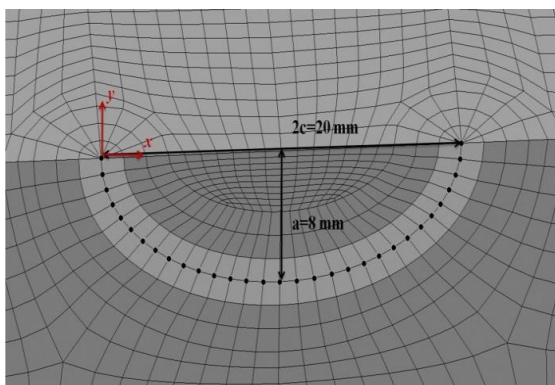
به طوری که در این روابط E و ν به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می باشند. البته همان گونه که اشاره شد، نرم افزار آباکوس بلافاصله پس از انجام تحلیل استاتیکی، مقدار انتگرال J و مقادیر هر یک از ضرایب شدت تنش مودهای کششی و برشی را به صورت مستقیم محاسبه و گزارش می نماید. در شکل ۸ مسیر و کانتورهای در نظر گرفته شده برای محاسبه انتگرال J نمایش

نسبت به ضریب شدت مود ۳ بحرانی‌تر است. بنابراین تأثیر برش داخل صفحه نسبت به برش خارج از صفحه در ترک‌های موجود در لوله‌ها بیشتر است. بر خلاف مود ۱ بارگذاری، که علامت منفی ضریب شدت تنش به معنای بسته شدن وجوه ترک می‌باشد، مقادیر منفی در ضرایب شدت تنش مود ۲ و ۳ تنها نشان‌دهنده تعویض جهت تنش برشی اعمالی است. بنابراین مقادیر مثبت و منفی این دو ضریب مود برشی تأثیر یکسانی در رفتار تغییر فرم برشی لبه‌های ترک دارد.

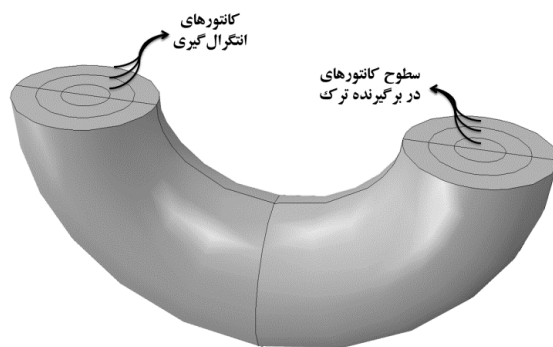
در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نیز برای مقایسه ضرایب شدت تنش ترک‌های طولی داخلی و خارجی، نتایج مربوط به ضرایب شدت تنش برای سه نسبت منظر ۰/۵، ۰/۷ و ۱ در ترک‌های داخلی و خارجی با یکدیگر مقایسه شده است. مطابق با این شکل‌ها مشخص می‌شود در یک نسبت منظر یکسان مقدار ضریب شدت تنش مود ۱ در سرتاسر جبهه ترک برای ترک‌های داخلی بحرانی‌تر می‌باشد. اما مقادیر ضرایب شدت تنش مود ۲ و ۳ در سرتاسر جبهه ترک برای ترک‌های خارجی بحرانی‌تر است.

لوله در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ نمایش داده شده است. مطابق با این شکل‌ها مشخص می‌شود که حداکثر مقدار ضریب شدت تنش مود ۱ در ترک‌های طولی خارجی و داخلی با نسبت منظرهای ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ که ترک بیشتر حالت بیضوی دارد در عمیق‌ترین نقطه ترک اتفاق می‌افتد و هرچه از عمیق‌ترین نقطه ترک به سمت سطح آزاد ترک حرکت می‌گردد، مقدار این ضریب کاهش می‌یابد. اما در ترک‌ها با نسبت منظرهای ۰/۸، ۰/۹ و ۱ که ترک بیشتر حالت دایروی دارد، حداکثر مقدار ضریب شدت تنش مود ۱ در سطح آزاد ترک و حداقل مقدار آن در عمیق‌ترین نقطه ترک اتفاق می‌افتد.

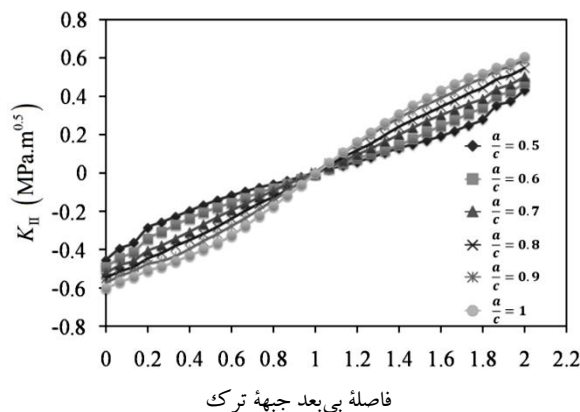
حداکثر مقادیر ضریب شدت تنش مود ۲ و ۳ نیز در ترک‌های طولی خارجی و داخلی بدون توجه به نسبت منظر ترک به ترتیب در سطح آزاد ترک و عمیق‌ترین نقطه ترک اتفاق می‌افتد. با توجه به مقادیر ضرایب شدت تنش مودهای ۲ و ۳ نیز مشخص می‌شود که هم در ترک‌های موجود در جداره داخلی و هم در ترک‌های موجود در جداره خارجی، مقدار مطلق ضریب شدت تنش مود ۲



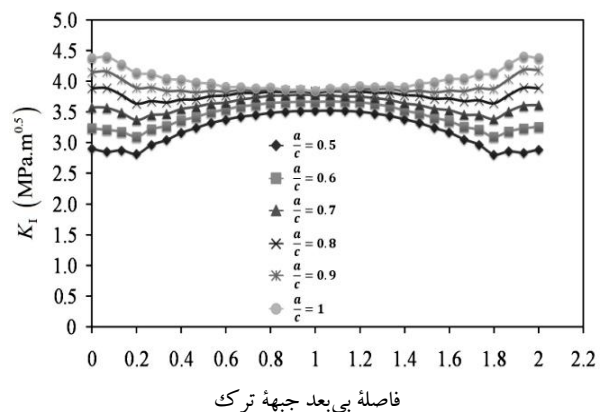
شکل ۹. جبهه ترک و نقاط آن برای ترک طولی خارجی با نسبت منظر ۰/۸



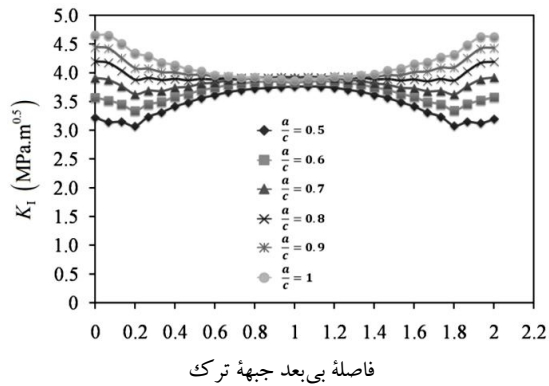
شکل ۸. مسیر و کانتورهای در نظر گرفته شده برای محاسبه انتگرال J



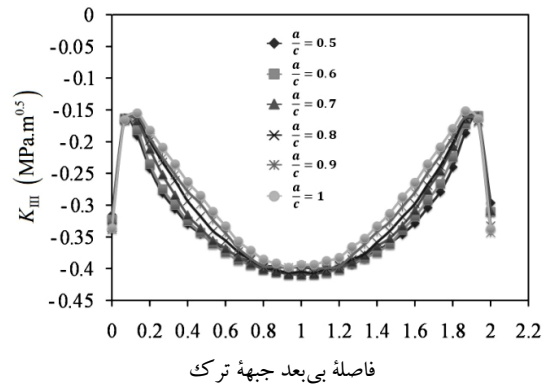
شکل ۱۱. تغییرات ضریب شدت تنش K_{II} در سرتاسر جبهه ترک خارجی



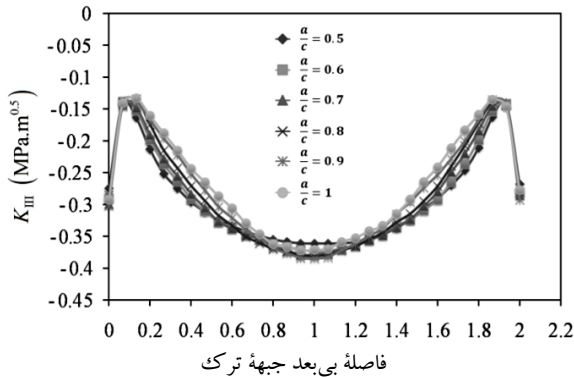
شکل ۱۰. تغییرات ضریب شدت تنش K_I در سرتاسر جبهه ترک خارجی



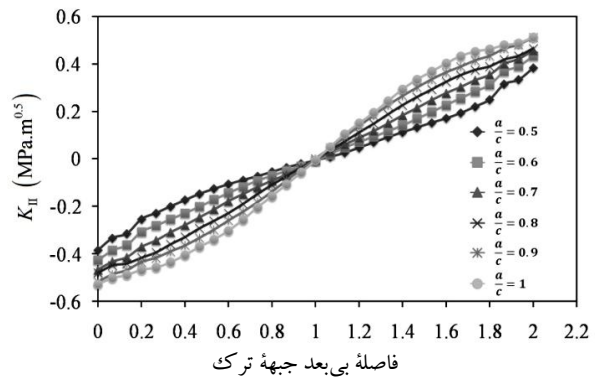
شکل ۱۳. تغییرات ضریب شدت تنش K_I در سرتاسر جبهه ترک داخلی



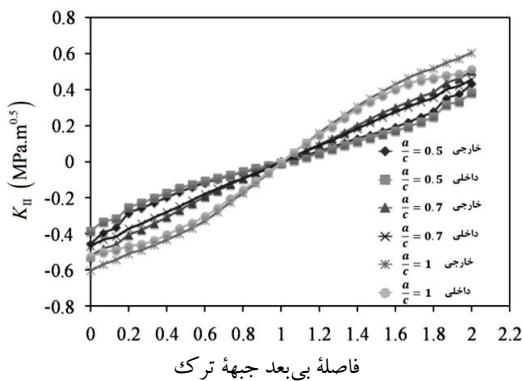
شکل ۱۲. تغییرات ضریب شدت تنش K_{III} در سرتاسر جبهه ترک خارجی



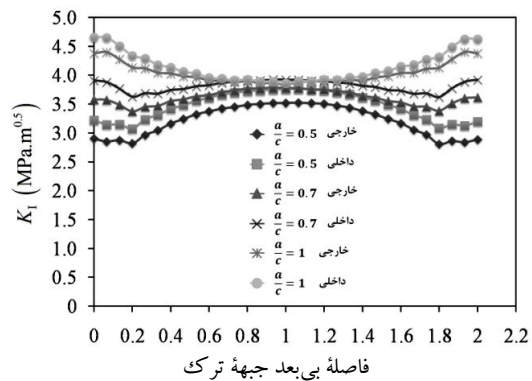
شکل ۱۵. تغییرات ضریب شدت تنش K_{III} در سرتاسر جبهه ترک داخلی



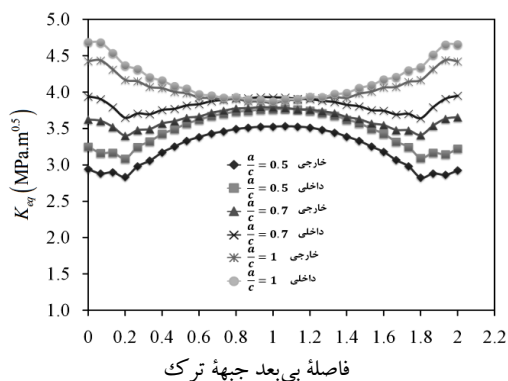
شکل ۱۴. تغییرات ضریب شدت تنش K_{II} در سرتاسر جبهه ترک داخلی



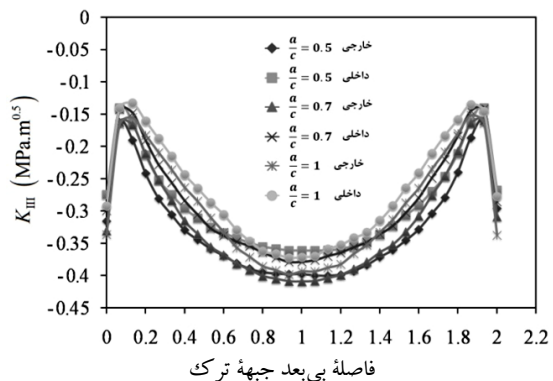
شکل ۱۷. مقایسه ضریب شدت تنش K_{II} ترک‌های داخلی و خارجی



شکل ۱۶. مقایسه ضریب شدت تنش K_I ترک‌های داخلی و خارجی



شکل ۱۹. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش معادل در سرتاسر جبهه ترک برای ترک‌های طولی داخلی و خارجی



شکل ۱۸. مقایسه ضریب شدت تنش K_{III} ترک‌های داخلی و خارجی در سرتاسر جبهه ترک

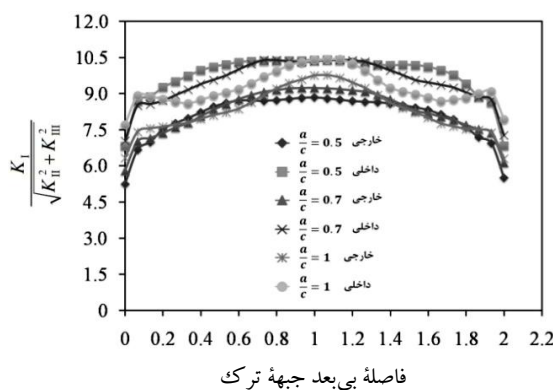
بنابراین برای تعیین بحرانی‌تر بودن ترک‌های طولی داخلی یا خارجی به تعریف یک ضریب شدت تنش معادل نیاز است که تأثیر هر سه ضریب شدت تنش را در نظر گرفته باشد. در مراجع مختلف مکانیک شکست تعاریف متعددی برای ضریب شدت تنش معادل در نظر گرفته شده است. یکی از متداول‌ترین تعاریف که بر اساس معیار چگالی انرژی کرنشی تعریف شده و در اینجا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر است [۲۱]:

$$K_{eq} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + \nu K_{III}^2} \quad (23)$$

در شکل ۱۹ نمودارهای تغییرات ضریب شدت تنش معادل در سرتاسر جبهه ترک برای ترک‌های طولی داخلی و خارجی با نسبت منظرهای ۰/۵، ۰/۷ و ۱ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود در هر سه نسبت منظر، ضریب شدت تنش معادل برای ترک‌های طولی داخلی بحرانی‌تر می‌باشد. بنابراین در کل می‌توان گفت که ترک‌های طولی داخلی در لوله‌های با درز جوش طولی به عنوان بحرانی‌ترین ترک‌ها شناخته می‌شوند.

با توجه به بارگذاری همزمان فشار و پیچش اعمالی، ترک موجود در جداره داخلی یا خارجی این لوله‌ها شرایط بارگذاری مرکب کششی - برشی را تجربه می‌نمایند. وجود مقادیر غیر صفر K_I ، K_{II} و K_{III} برای هر یک از ترک‌های تحلیل شده در این مقاله مؤید این مطلب است. با وجود این باید تعیین گردد که کدام عامل کشش یا برش در شکست چنین لوله‌هایی نقش اساسی‌تر و مهمتری دارد. در این راستا در شکل ۲۰ منحنی تغییرات ضریب شدت تنش کششی به ضرایب شدت تنش برشی برای سه نسبت منظر ۰/۵، ۰/۷ و ۱ برای ترک‌های طولی داخلی و خارجی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود هم در ترک‌های داخلی و هم در ترک‌های خارجی، نسبت ضریب شدت تنش کششی به ضرایب شدت تنش برشی به مقدار قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از یک می‌باشد. حداقل این نسبت ۵ (در لبه آزاد ترک خارجی) و حداکثر آن ۱۰/۵ (در عمیق‌ترین نقطه ترک داخلی) می‌باشد که این مقادیر بیشینه و کمینه در نسبت منظر ۰/۵ اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، در حالتی که ترکی با نسبت منظر ۰/۵ در جداره خارجی وجود داشته باشد، عامل فشار داخلی حداقل ۵ و حداکثر ۹ برابر پیچش در احتمال شکست و رشد ترک لوله مؤثر می‌باشد و در حالتی که همان ترک در جداره داخلی ایجاد شده باشد عامل فشار داخلی، تا ۱۰/۵ برابر عامل پیچش در

رشد ترک‌های طولی ایجاد شده می‌تواند مؤثر باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در نسبت منظرهای دیگر ترک نیز تأثیر عامل فشار داخلی نسبت به پیچش بیشتر است. این نسبت وقتی ترک در جداره خارجی لوله قرار داشته باشد، در نسبت منظرهای ۰/۷ و ۱ به ترتیب برابر با ۵/۵ و ۶/۳ و وقتی ترک در جداره داخلی ایجاد گردد در هر دو نسبت منظر برابر با ۱۰/۵ می‌باشد. بنابراین در مجموع می‌توان گفت تنش‌های کششی مود ۱ (ناشی از فشار داخلی) نقش بسیار اساسی‌تری در رفتار شکست لوله‌های ترک‌دار در مقایسه با تنش‌های برشی مود ۲ و ۳ (ناشی از پیچش) داشته و در نتیجه عامل فشار داخلی درون لوله‌های با درز جوش طولی، مهمترین پارامتر در رشد ترک‌های طولی ایجاد شده می‌باشد.



شکل ۲۰. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش کششی به ضرایب شدت تنش برشی در سرتاسر جبهه ترک در ترک‌های داخلی و خارجی

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از ارائه حل تحلیلی برای تعیین ضرایب شدت تنش ترک‌های موجود در لوله‌ها، به تعیین عددی ضرایب شدت تنش ترک‌های سه‌بعدی نیم‌بیضوی در جداره داخلی و خارجی لوله‌های با درز جوش طولی تحت بارگذاری مود ترکیبی پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های المان محدود انجام شده نشان می‌دهد که در اثر اعمال بارگذاری توأمان فشار داخلی و پیچش، هر سه تغییر شکل اصلی وجوه ترک (بازشدگی، لغزش داخل صفحه و لغزش خارج صفحه) در لبه‌های ترک نیم‌بیضوی مدل شده مشاهده شده و ترکیبی از ضرایب شدت تنش K_I ، K_{II} و K_{III} می‌تواند سبب واماندگی و شکست نهایی لوله‌های با درز جوش طولی گردد. در نتیجه باید از معیارهای شکست مود ترکیبی کششی - برشی که تأثیر تمامی مودهای سه‌گانه شکست را در نظر می‌گیرند، برای بررسی بار بحرانی شکست و شرایط واماندگی

مقادیر ضریب شدت تنش مود ۲ و ۳ نیز در ترک‌های طولی خارجی و داخلی بدون توجه به نسبت منظر ترک به ترتیب در سطح آزاد و عمیق‌ترین نقطه ترک اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که ترک‌های طولی داخلی به‌عنوان بحرانی‌ترین ترک‌ها در لوله‌های با درز جوش طولی شناخته می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود تنش‌های کششی مود ۱ (ناشی از فشار داخلی) نقش بسیار اساسی تری در رفتار شکست این لوله‌ها در مقایسه با تنش‌های برشی مود ۲ و ۳ (ناشی از پیچش) داشته و در نتیجه عامل فشار داخلی درون این لوله‌ها مهمترین پارامتر در رشد ترک‌های طولی ایجاد شده می‌باشد.

چنین لوله‌های ترک‌داری در کاربردهای عملی استفاده نمود. با توجه به نتایج حاصل برای ضرایب شدت تنش مشخص می‌شود که حداکثر مقدار ضریب شدت تنش مود ۱ در ترک‌های خارجی و داخلی با نسبت منظرهای ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ که ترک بیشتر حالت بیضوی دارد، در عمیق‌ترین نقطه ترک اتفاق می‌افتد. نتایج نشان می‌دهد هرچه از عمیق‌ترین نقطه ترک به سمت سطح آزاد ترک حرکت شود، مقدار این ضریب کاهش می‌یابد. اما در ترک‌ها با نسبت منظرهای ۰/۸، ۰/۹ و ۱ که ترک بیشتر حالت دایروی دارد، حداکثر مقدار ضریب شدت تنش مود ۱ در سطح آزاد ترک و حداقل مقدار آن در عمیق‌ترین نقطه ترک اتفاق می‌افتد. حداکثر

۹. مأخذ

- [1] Powell, G.W., *Metals handbook: Failure analysis and prevention, Asm Intl*, 1986.
- [2] Halmshaw, R. "Introduction to the non-destructive testing of welded joints." *Elsevier*, 1997.
- [3] Newman, J.C., I. Raju. "Stress-intensity factors for internal surface cracks in cylindrical pressure vessels." *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 102, No. 4, 1980, pp. 342-346.
- [4] Raju, I., J. Newman. "Stress-intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical vessels." *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 104, No. 4, 1982, pp. 293-298.
- [5] Atluri, S. N., K. Kathiresan. "3D analyses of surface flaws in thick-walled reactor pressure-vessels using displacement-hybrid finite element method." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 51, No. 2, 1979, pp. 163-176.
- [6] McGowan, J., M. Raymund. "Stress intensity factor solutions for internal longitudinal semi-elliptical surface flaws in a cylinder under arbitrary loadings." *ASTM STP*, Vol. 677, 1979, pp. 365-380.
- [7] کاوه، زهره، مجیدرضا آیت‌اللهی. "محاسبه ضرایب شدت تنش مود I بارگذاری برای قطعه خمش سه نقطه‌ای شیاردار." *مهندسی مکانیک مدرس* ۱۳ (۵)، ۱۳۹۲، ص. ۸۲-۷۴.
- [8] شهر آئینی، سید ایمان، سید حجت هاشمی. "بررسی اثر تغییرات طول و عمق ترک سطحی نیم‌بیضوی بر ایمنی لوله فولادی انتقال گاز." *مهندسی مکانیک مدرس* ۱۴ (۵)، ۱۳۹۳، ص. ۳۲-۲۶.
- [9] نظری، محمد باقر، امید عاصمی. "ضریب شدت تنش برای ترک نیم‌بیضوی طولی در یک استوانه جدار ضخیم تحت بارگذاری حرارتی هذلولی." *مهندسی مکانیک مدرس* ۱۴ (۱۶)، ۱۳۹۳، ص. ۱۵۱-۱۴۳.
- [۱۰] نبوی، سید مهدی، کریم علیپور، فاضل رحیمی. "اثر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بر ضرایب شدت تنش گذرا در ترک‌های نیم‌دایروی طولی در استوانه‌ها." *دانش و فناوری هوافضا* ۳ (۲)، ۱۳۹۳، ص. ۷۵-۶۵.
- [11] Alipour, K., S.M. Nabavi, F. Rahimi. "Local thermal stress intensity factors for an axial semi-elliptical crack in a hollow cylinder using the finite element method." *Strength, Fracture and Complexity*, 8.3, 2014, pp. 167-178.
- [12] Benhamena, A., B.B. Bouiadjra, A. Amrouche, G. Mesmacque, N. Benseddig M. Benguediab. "Three finite element analysis of semi-elliptical crack in high density poly-ethylene pipe subjected to internal pressure." *Materials & Design*, 31.6, 2010, pp. 3038-3043.
- [13] Erdogan, F., G. Sih. "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear."

Journal of Fluids Engineering, Vol. 85, No. 4, 1963, pp. 519-525.

- [14] Sih, G. C. *Methods of analysis and solutions of crack problems*, Springer, 1973.
- [15] Hussain, M., S. Pu, J. Underwood. "Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II." *Fracture analysis*, Vol. 560 (1), 1974.
- [16] O'donoghue, P. E., T., Nishioka, S.N. Atluri. "Multiple surface cracks in pressure vessels." *Engineering Fracture Mechanics*, 20(3), 1984, pp. 545-560.

[۱۷] قره‌باغی، حسین. "محاسبه عددی ضریب شدت تنش استوانه‌های جدار نازک جوشکاری شده آلومینیومی ترک‌دار

در معرض فشار داخلی و تنش‌های پسماند"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت. ۱۳۹۰.

- [18] Lin, X., R. Smith. "Fatigue growth prediction of internal surface cracks in pressure vessels." *Journal of pressure vessel technology*, Vol. 120, No. 1, 1998, pp. 17-23.
- [19] Knott. J. F. "Fundamentals of fracture mechanics." *Gruppo Italiano Frattura*, 1973.
- [20] Broek, D. "Elementary engineering fracture mechanics." *Springer Science & Business Media*, 1982.
- [21] Anderson, T.L., *Fracture mechanics: fundamentals and applications*, CRC press, 2005.

پی‌نوشت

-
1. heat affected zone (HAZ)
 2. spiral pipes
 3. ultrasonic
 4. singular element
 5. node