تحلیل اجزای محدود رشد ترک خستگی در خطوط لوله با در نظر گرفتن اثرات خوردگی

مهدی مرانلو (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

مهدی گنجیانی* (استادیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۹)
دوری ۳-۲، شماره ۲، ص. ۱۲-۳

خوردگی در سطح داخلی خط لوله با گرید ۵۲، به کمک روش‌های استاندارد تخمین استحکام خطوط لوله خورده شده و اجزای محدود، بررسی و نتایج پژوهش همراه با نتایج آزمایشگاهی بررسی شده و با در نظر گرفتن پدیده خستگی ناشی از تغییرات فشار کاری، رشد ترک ناشی از خستگی و خوردگی به صورت هم‌زمان از روش‌های تحلیلی و اجزای محدود توسعه یافته مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر عوامل مختلف در ایجاد و رشد ترک ناشی از خستگی به کمک تحلیل اجزای محدود توسعه یافته نیز بررسی شده است. مشخص شد که روش سطح موثر با بیشینه $3/83\%$ خطا نسبت به اجزای محدود، تطابق خوبی با نتایج اجزای محدود و روش آزمایشگاهی دارد. ضرایب تنش مود اول روش تحلیلی با خطای 43% نسبت به اجزای محدود توسعه یافته نشان از تطابق خوب نتایج روش‌های تحلیلی و اجزای محدود توسعه یافته در زمینه رشد ترک خستگی دارد.

واژگان کلیدی: خط لوله، فشار شکست، رشد ترک خستگی، خوردگی، اجزای

محدود توسعه یافته.

maranlou@gmail.com
ganjiani@ut.ac.ir

۱. مقدمه

این موضوع می‌توان ضمن در نظر گرفتن شرایط کاری، به تقریب زمانی رسیدن به این مرحله پی برد و از ایجاد ترک، نشت و حادثه از طریق تعمیر و نگهداری جلوگیری کرد.

راجو و نیومن^[۱] ضرایب شدت تنش را برای ترک طولی نیم‌بیضی یک استوانه با فشار داخلی محاسبه کردند و این ضرایب را برای ترک طولی در جدار داخلی و جدار خارجی لوله به دست آوردند. در سال ۱۹۹۱، کرخوپ و همکارانش^[۲] با استفاده از روش‌های اجزای محدود سه‌بعدی، ضریب شدت تنش سه‌بعدی ترک نیمه‌بیضی سطحی را برای یک مخزن تحت فشار محاسبه کردند.

در سال ۱۹۹۶ پل و لوی^[۳] با استفاده از روش‌های اجزای محدود و با کمک نرم‌افزار انسیس اثر وجود ترک در مخزن تحت فشار را برای ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین در تحلیل‌های خود ترک را با استفاده از اجزاء منفرد مدل‌سازی کردند که البته در مدل آنها فشار داخلی تنها بارگذاری موجود بود.

از سال ۱۹۵۰ میلادی بسیاری از محققین به بررسی چگونگی ایجاد ترک‌های خستگی پرداختند و مراحل آن را به دو بخش جوانه‌زنی و رشد ترک تقسیم کردند. در خستگی پرچرخه بیشترین زمان عمر ماده صرف جوانه‌زنی ترک می‌شود؛ به عکس در خستگی کم‌چرخه بیشترین زمان عمر ماده صرف رشد ترک می‌شود.

برای تشخیص مرز بین این دو چرخه خستگی - تبدیل ترک ریز به ترک درشت - یا برای تعیین مرز بین جوانه‌زنی ترک و رشد می‌توان از معادله‌ی پاریس^[۴] استفاده کرد. آنها روشی را برای مدل‌سازی رشد ترک ناشی از خستگی ارائه دادند

امروزه در صنعت نفت و گاز، انتقال از طریق خطوط لوله در دما و فشارهای مختلف کاری در مسافت‌های طولانی یک ضرورت است. هزینه‌های زیاد مهندسی، خرید، ساخت و اجرای خطوط لوله از یک سو و اهمیت خطرات جانی و مالی، محیط زیست و نیز اتلاف محصولات از سوی دیگر، شرایط برای انجام تحقیق و بررسی‌های بیشتر برای بررسی مشکلات و دیدگاه‌های مهندسی در خطوط لوله را دشوار می‌سازد. پدیده‌ی شایع «خوردگی» در خطوط لوله می‌تواند ناشی از واکنش سیال در شرایط کاری با جدار داخلی لوله باشد، که به کاهش ضخامت لوله و نیز ایجاد بستر ترک می‌شود و به مرور به رشد ترک و شکست می‌انجامد. اتفاق دقیقی که در صنعت نفت و گاز رخ می‌دهد و شرایط را بحرانی می‌کند، اثر هم‌زمان تأثیرات خوردگی و خستگی ناشی از تغییرات فشار کاری در خطوط لوله است. این پدیده که به ایجاد سریع ترک و رشد آن کمک بسیاری می‌کند، معمولاً خیلی سریع اتفاق می‌افتد و بسیار خطرناک است.

تغییرات فشار باعث ایجاد بار خستگی می‌شود و به همراه شرایط محیطی و مکانیکی باعث رشد ترک اولیه می‌شود. در ترک‌های ناشی از خوردگی در خطوط لوله‌ی فشار بالا، گسترش ترک به دلیل تغییرات فشار کاری بالا سریع‌تر پیشروی می‌کند و چنانچه ترک به طول بحرانی برسد پدیده‌ی شکست اتفاق خواهد افتاد. با بررسی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۶/۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۳/۱۹، پذیرش ۱۳۹۹/۴/۱۰

DOI:10.24200/J40.2020.54140.1526

که رابطه‌ی بین نرخ رشد ترک و ضریب شدت تنش، و بر اساس آن ناحیه‌ی جواهره‌زنی و رشد ترک را مشخص کردند.

هادسون و اسکاردینا^[۵] به تأثیر نسبت تنش در شکست ناشی از خستگی پرداختند، پانگو و همکارانش^[۶] قانون کلی پاریس را برای رشد ترک ناشی از خستگی در انواع ترک با اندازه‌های مختلف ارائه دادند. به طور کلی مقایسه‌ی نتایج حل عددی با نتایج تجربی، نشان‌دهنده‌ی تشابه ترک خستگی در هر دو مورد است و برای رشد ترک در عمق و سطح در لحظات مختلف نتایج مشابه بین نمونه‌ی عددی و نتایج تجربی وجود دارد.

در تحقیق جالبی که کرونین و پیک^[۷] در سال ۲۰۰۲ انجام دادند، روش جدیدی برای پیشگویی فشار شکست در عیوب خوردگی ایجاد شده در خطوط لوله ابداع کردند. به این ترتیب که برای فشار شکست در لوله‌های بدون عیب یک حد بالا و برای فشار شکست در لوله‌های دارای شکاف طویل و عمیق یک‌نواخت یک حد پایین فشار شکست ارائه کردند؛ عمق شکاف مذکور مساوی عمق عمیق‌ترین قسمت عیب خوردگی است. یکی از معروف‌ترین تحقیقات درمورد عیوب خوردگی در خطوط لوله توسط کیفنر و همکارش^[۸] انجام شده است؛ نتایج تحقیقات آنها مبنای استاندارد تخمین استحکام خطوط لوله‌ی خورده شده^[۹] قرار گرفت که معیار محاسبه‌ی عیوب سطحی و تخمین عمر خط لوله در صنعت نفت و گاز است. این استاندارد ابزاری برای محاسبات مربوط به طول عمر و خوردگی در کانادا و ایالات متحده به شمار می‌رود.

در سال ۲۰۱۹ موندال و همکارش^[۱۰] فشار شکست خطوط لوله‌ی خورده شده را به کمک مکانیک شکست بررسی و نتایج را با مدل‌های مختلف مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که از روش انتگرال J می‌توان با تقریب خوبی برای محاسبه‌ی فشار شکست استفاده کرد و همین‌طور مطالعات آنها نشان داد که ترک‌هایی که عمق بیشتری دارند فشار شکست را به طور محسوسی کاهش می‌دهند. فولتی و همکارانش^[۱۱] در سال ۲۰۱۸، رفتار رشد ترک‌های کوچک در خستگی کم‌چرخه تحت بارگذاری چندمنظوره‌ی محوری را مطالعه کردند؛ آنان به طور خاص یک سری آزمایش در چرخه‌ی خستگی کوتاه در دمای محیط برای مشخص کردن رشد ترک تحت بارگذاری محوری، پیچشی و محوری - پیچشی انجام دادند.

در سال ۲۰۱۵، هونگ^[۱۲] به بررسی پیشگویی عمر خستگی در خط لوله گاز طبیعی با جنس ۴۲L Gr. X۵API پرداخت. خطوط لوله گاز با بار خستگی مربوط به زمین و اتومبیل‌ها به خاطر بودن در عمق ۱/۵ متری به خاک سپرده شده مورد بررسی قرار گرفت. با این دلایل، بررسی خواص مکانیکی خطوط لوله گاز انجام شد و در این مطالعه، رفتار خستگی از این خط لوله گاز توسط روش آزمایشگاهی مطابق با استاندارد های صنعت نفت و گاز به دست آورده شد و نتایج آن‌ها با روش‌ها و نظریه‌های تئوری نیز به دست آورده شد، در نهایت به این نتیجه رسیدند که مدل پیش‌بینی شده در توافق خوبی با نتایج آزمون واقعی و آزمایشگاهی بود.

در سال ۲۰۱۸ شاری^[۱۳] رفتار رشد ترک خستگی نیمه‌بیضی برای یک خط لوله‌ی گاز تحت کشش را بررسی کرد. او نشان داد که پیش‌بینی رفتار رشد ترک خستگی از ترک‌های سطح نیمه‌بیضی برای خط لوله‌ی گاز با موفقیت انجام خواهد شد. طبیعی است که ضرایب شدت تنش بسیار مهم است، به ویژه اگر تحقیق مربوط به ترک‌های سطحی و مقایسه‌ی آن در مواد مختلف باشد ارزش زیادی برای تحقیق انجام شده به حساب می‌آید و می‌تواند راهگشای کاربردی در صنعت نیز باشد.

در سال ۲۰۱۶ گروهی از محققین^[۱۴] بررسی رشد ترک خستگی در خطوط لوله‌ی فراساحلی با ترک اولیه به کمک روش اجزای محدود توسعه‌یافته^۲ را مورد بررسی قرار دادند. آنها در بررسی ترک‌های مختلف تأثیر طول ترک و شدت تنش را

بر رشد ترک خستگی مورد مطالعه قرار دادند و در نهایت تخمینی از عمر خط لوله را نیز در حالت‌های مختلف به دست آوردند. مقایسه‌ی نتایج حل عددی به کمک نرم‌افزار آباکوس با نتایج استانداردهای مربوط به خطوط لوله‌ی دریایی نشان داد که استفاده از روش اجزای محدود توسعه‌یافته قابل قبول‌تر و مطمئن‌تر است. در سال ۲۰۱۸ مارتینا و همکارانش^[۱۵] با بررسی رشد ترک در سطح مخزن تحت فشار را به کمک روش اجزای محدود توسعه‌یافته، ضرایب شدت تنش و مسیر رشد ترک در طول مسیر ترک را به دست آوردند. آنان به کمک ضرایب شدت تنش به محاسبه‌ی طول نهایی ترک و تعداد چرخه تا شکست پرداختند.

در سال ۲۰۱۹ گروهی از محققین^[۱۶] تأثیر ترتیب و شرایط بارگذاری در رشد ترک خستگی در خطوط لوله با جنس X۶۵ را بررسی کردند. آنها با بررسی شرایط بارگذاری از کم به زیاد و زیاد به کم، شرایط رشد ترک را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نرخ رشد ترک و تعداد چرخه‌ی لازم برای ترک بحرانی در شرایط بارگذاری‌ها، متفاوت و متأثر از شرایط بارگذاری است. آنها نتیجه گرفتند که تغییرات بارگذاری از بالا به پایین باعث تأخیر و عقب افتادگی نرخ رشد ترک نسبت به حالت معکوس دارد.

در سال ۲۰۱۹ گروهی از محققین به بررسی رشد ترک خستگی ناشی از خوردگی تنش در اتصالات جوشی خطوط لوله با جنس API ۵L X۷۰ پرداختند.^[۱۷] آنها ترک ناشی از خوردگی تنش را که ناشی از محیط خورنده است با در نظر گرفتن تأثیر ناحیه‌های جوشکاری شده و تحت تأثیر حرارت جوشکاری،^۳ در خطوط لوله بررسی کردند. نتایج تحقیقات و آزمایش‌های تجربی آنها نشان داد که خوردگی تنش در هر دو محیط جوشکاری شده و ناحیه‌ی متأثر از جوشکاری اتفاق می‌افتد و رشد ترک خستگی در کنار خوردگی تنش ناشی از محیط، در شرایط بارگذاری، پدیده‌ی وابسته به زمان است که وابسته و ناشی از تأثیر ضریب‌های مکانیکی و محیطی است.

۲. مدل‌سازی اجزای محدود ناحیه‌ی خوردگی

یکی از مهم‌ترین روش‌های عددی مورد استفاده در تحلیل مسائل مختلف مهندسی، نظیر موارد مرتبط با مکانیک شکست، روش اجزای محدود است که هم‌زمانی بسیار دارد و هم معایبی که در برخی موارد شرایط ساخت مدل را بسیار پیچیده می‌کند. با گذشت سال‌ها، روش اجزای محدود به روش‌هایی مانند روش اجزای محدود توسعه یافته تبدیل شد تا علاوه بر بهبود نتایج و تولید روش کامل‌تر، مشکلات روش اجزای محدود را کاهش دهد.

در این تحقیق ابتدا خوردگی موضعی و تأثیر آن بر فشار شکست بر اساس مدل خوردگی مرسوم صنعت نفت و گاز، استاندارد تخمین استحکام خطوط لوله‌ی خورده شده^۴ بررسی شده، که نتایج حاصل با مدل اجزای محدود و نتایج آزمایش‌های تجربی مقایسه خواهد شد. در ادامه با در نظر گرفتن اثرات خوردگی و با به دست آوردن فشار شکست، رشد ترک خستگی بررسی خواهد شد و با استفاده از معادله‌ی پاریس و به کمک مدل اجزای محدود، نتایج به دست آمده بررسی خواهد شد. برای این کار سه مدل با ضخامت و جنس یکسان در نرم‌افزار آباکوس (نسخه ۲-۶/۱۴) ساخته شده است و برای قسمت خوردگی سه نسبت متفاوت خوردگی به ضخامت خط لوله در نظر گرفته شده است تا بتوان تأثیر پارامترهای مختلف را در نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با مدل خوردگی و همین‌طور آزمایش‌های تجربی به دست آورد. نسبت عمق خوردگی به ضخامت به ترتیب ۲۲٪، ۴۵٪ و ۶۱٪ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مطابق استاندارد مذکور حداقل نسبت پیشنهاد شده‌ی عمق

نمودار ۱. نمودارهای فشار شکست در روش‌های مختلف.

نمودار ۲. تفاوت فشار شکست نتایج اجزای محدود و تجربی (درصد).

۳. نتایج بیشینه فشار شکست

نوع حل‌گر به صورت استاتیک عمومی با بیشترین بازه ۱۰۰ و طول گام ۰/۰۱ انتخاب شده است تا در هر بازه، فشار مربوطه از نمودار شدت فشار داخلی برای آن انتخاب شود و متناسب با آن مقدار تنش وارده بر مدل بررسی شود. با توجه به پیشنهاد استاندارد برای مشخص شدن فشار شکست از متوسط تنش بیشینه‌ی تسلیم و تنش بیشینه‌ی نهایی استفاده شده است. در نمودار ۱ فشار شکست در روش‌های مختلف قابل مشاهده است و همان طور که ملاحظه می‌شود روش سطح موثر با نتایج اجزای محدود و تجربی، نسبت به دو روش دیگر استاندارد نتایج بهتری دارد.

همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌کنیم با استفاده از سه مدل معرفی شده‌ی استاندارد و در سه حالت مختلف مورد مطالعه، نتایج فشار شکست و فشار ایمن پیشنهادی که با ضریب ایمنی ۷۲٪ فشار شکست است مشخص شده است. با توجه به اعداد فشار شکست و مقایسه با فشار حاصل از روش اجزای محدود که در استاندارد به عنوان روش مرحله‌ی سوم معرفی شده است، روش مرحله‌ی دوم یا روش سطح موثر از دقت بسیار بالایی در ضخامت‌ها و عمق خوردگی‌های متفاوت برخوردار است. همچنین، با توجه به این که روش B31G تغییر یافته^۷ در سال‌های بعد از روش B31G معمولی به استاندارد معرفی شد، نسبت به روش ابتدایی دقت بسیار بالاتری دارد. نمودار ۲ نیز درصد تغییرات و خطای اجزای محدود و آزمایشگاهی را برای حداکثر فشار شکست در سه مدل نشان می‌دهد، چنان که مشاهده می‌شود در هر سه مدل تفاوت بسیار کمی وجود دارد.

جدول ۱. مشخصات خواص مکانیکی خط لوله.

ضریب پواسون	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	مدل بانگ (GPa)
۰/۳۹	۴۵۵-۷۵۸	۳۵۹-۵۳۱	۲۰۰

جدول ۲. مشخصات ابعادی مدل‌های اجزای محدود.

ردیف	عمق خوردگی (mm)	نسبت خوردگی به ضخامت (%)
۱	۱/۲۵	۲۲٪
۲	۲/۵۶	۴۵٪
۳	۳/۴۷	۶۱٪

شکل ۱. نوع مش‌بندی.

خوردگی به ضخامت توسط استاندارد ۱٪ و بیشینه‌ی آن ۸٪ است. برای این شبیه‌سازی، یک قسمت از خط لوله به طول ۹۰۰ میلی‌متر، قطر ۵۰۸ میلی‌متر و ضخامت ۵/۷ میلی‌متر و با جنس API 5L Gr. X52 در نظر گرفته شده است. مشخصات خواص مکانیکی^[۱۸] خط لوله به شرح جدول ۱ است.

مدل از نوع سه بعدی^۵ و تغییرشکل پذیر^۵ است؛ ناحیه‌ی خوردگی مستطیلی به ابعاد ۳۰۰ میلی‌متر در طول و ۳۰ میلی‌متر در عرض مدل شده و با توجه به حالات مختلف نسبت عمق ناحیه‌ی خوردگی به نسبت ضخامت لوله در حالت‌های ۲۲٪، ۴۵٪ و ۶۱٪ به ترتیب برابر با ۱/۲۵ میلی‌متر، ۲/۵۶ میلی‌متر و ۳/۴۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مشخصات ابعادی مدل‌های مختلف درج شده است.

برای تخمین فشار شکست در قسمتی از لوله که با خوردگی همراه است به علت وجود قسمت خورده شده، مش‌بندی قطعه کار سختی خواهد بود که با کمک پارتیشن‌بندی و تبدیل مدل به دو قطعه لوله و یک قطعه لوله با خوردگی شرایط مش‌بندی را بهتر کرده و با کیفیت بالاتر، خطای مش‌بندی به صفر کاهش یافته است. نوع مش‌بندی از نوع گوه‌یی و خطی و نوع اجزاء نیز تنش سه بعدی استاندارد است. تعداد اجزاء مش ۷۷۱۰ است و نوع اجزاء C3D6 است که در شکل ۱ قابل مشاهده است.

تمامی مدل حاوی مشخصات یک نوع ماده است و از پارتیشن‌بندی برای تقسیم قطعه به سه قسمت برای بهبود کیفیت مش خصوصاً در قسمت خوردگی استفاده شده است. بیشترین فشار داخلی برای مدل‌های ۲۲٪، ۴۵٪ و ۶۱٪ به ترتیب برابر با ۱۴، ۱۰ و ۷ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. برای تخمین فشار شکست از بارگذاری افزایشی پیوسته استفاده شده است تا در زمان‌های مختلف تنش وارد بر قطعه متناسب با افزایش فشار داخلی سنجیده شود.

شکل ۲. مش بندی مدل برای به دست آوردن ضرایب شدت تنش.

بحرانی آن باشد، ترک شروع و رشد پیدا خواهد کرد. با انجام تحلیل اجزای محدود و مقایسه‌ی نتایج پارامترهای شکست از جمله ضرایب شدت تنش با نتایج نظری یا نتایج آزمایشگاهی می‌توان به ارزیابی ترک پرداخت. با توجه به محدودیت‌های روش اجزای محدود در مدل‌سازی در زمینه‌ی ترک خصوصاً در مدل‌های پیچیده و تحلیل ناپیوستگی‌ها همچون مدل خوردگی در خط لوله، استفاده از روش اجزای محدود توسعه یافته بسیار مؤثر خواهد بود.

اولین گام برای شروع شبیه‌سازی مسئله، مدل‌سازی آن است. برای این منظور از پارامترهای تعریف شده در مدل خوردگی خط لوله با نسبت عمق خوردگی به ضخامت برابر با ۰/۶۱ استفاده خواهد شد و با توجه به نیاز به تغییر در مش‌بندی و بارگذاری متفاوت مدل برای رشد ترک، این مدل فیل جداگانه‌ی خواهد داشت. مدل لوله از نوع سه‌بعدی و قابل تغییر شکل است. برای مدل‌سازی ترک از اجزاء دوبعدی ورق به طول ۵۰ میلی‌متر و عرض ۲ میلی‌متر استفاده شده است. در بخش تعریف خواص فولاد API 5L درجه X52، مدول الاستیسیته مقدار 2×10^5 مگا پاسکال و ضریب پواسون نیز ۰/۳۹ است. مقدار انرژی شکست 4350 میلی‌ژول و دامنه‌ی تغییر فشار داخلی از فشار ایمن به دست آورده شده در قسمت قبل که کم‌تر از فشار شکست است. در گام بعد پس از وارد کردن نمونه در ماژول اسمبلی و اختصاص ماده به آن، در ماژول مراحل ۱۰ باید به تعریف نوع حل گر پرداخته شود. در این قسمت باید برای محاسبه‌ی ضرایب شدت تنش ترک از حل استاتیکی و برای حل رشد ترک در بارگذاری خستگی از حل مستقیم^{۱۱} استفاده کرد که نیازمند تعریف خواص خستگی ماده در محیط اسکریپت نرم‌افزار است. با توجه به این که ضریب شدت تنش ترک در آباکوس فقط برای ترک ایستاست و نرم‌افزار قادر به انجام محاسبه‌ی ضریب تمرکز تنش در حین رشد ترک نیست، بنابراین نوع تحلیل‌گر به نوع استاتیکی تغییر می‌کند تا میزان ضریب شدت تنش ترک قابل محاسبه شود.

در ماژول بارگذاری و شرایط مرزی مقدار فشار داخلی برابر ۳/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است و در بارگذاری متناوب برای خستگی بیشینه فشار داخلی را ۵/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته که دامنه‌ی تغییرات آن ۲ مگاپاسکال است و از کمینه فشار داخلی ۳/۵ به بیشینه فشار داخلی ۵/۵ مگاپاسکال خواهد رسید. در ماژول مش‌بندی برای به دست آوردن بهترین نتایج پارتیشن‌بندی شده تا امکان استفاده از نوع مش شش وجهی^{۱۲} فراهم شود و نیز میزان مش‌بندی در بستر ترک تعداد اجزاء به صورت دستی به عدد بسیار بالاتری نسبت به بقیه مدل افزایش پیدا کرده است (شکل ۲). تعداد اجزای مش مربوطه حدود ۱۲۳۵۱۶ جزء است؛ در شکل ۳ تقسیم‌بندی بستر ترک با تعداد مش‌بندی بالاتر قابل مشاهده است.

	۲۲٪	۴۵٪	۶۱٪
روش سطح موثر	۱۱/۸	۸/۷۳	۶/۴۱
المان محدود	۱۲/۰۴	۹/۸	۶/۲۳

نمودار ۳. فشار شکست در روش اجزای محدود و روش سطح موثر.

با توجه به نتایج بررسی شده مشخص شد که در بین روش‌های پیشنهادی در استاندارد تخمین استحکام خطوط لوله‌ی خورده شده، روش سطح موثر بهترین نتایج این استاندارد را ارائه می‌دهد که در نمودار ۳ تفاوت آن با روش اجزای محدود قابل مشاهده است.

چنان که مشاهده می‌شود اعداد مربوط به فشار شکست در روش سطح موثر نزدیک به روش اجزای محدود است. پارامترهای مهم در این قسمت برای تخمین فشار شکست شامل ضخامت خط لوله، عمق خوردگی، نسبت عمق به ضخامت لوله، فشار داخلی، مساحت ناحیه‌ی خورده شده و جنس خط لوله است که با بالا بردن درجه‌ی مواد خط لوله، تنش تسلیم و تنش نهایی بالاتر رفته و فشار شکست نیز به مراتب بالاتر می‌رود.

۴. مدل‌سازی آنالیز رشد ترک خستگی

با توجه به ساختار مواد ایجاد خرابی‌ها و خوردگی‌ها مانند تخلخل، نقص در اتصالات جوشی، سوراخ‌شدگی و نیز انواع خوردگی موضعی و یکنواخت ممکن است با گذشت زمان باعث ایجاد و رشد ترک شود. برآورد ترک در زمینه‌های مختلف مانند صنعت نفت، گاز و پتروشیمی بسیار پراهمیت است. وقتی ضریب شدت تنش ترک به اندازه‌ی بحرانی برسد حتی در تنش‌های کم‌تر از تنش اسمی ماده می‌تواند باعث ایجاد شکست و خرابی‌های جبران‌ناپذیر در خطوط لوله شود. به طور کلی مکانیک شکست را می‌توان به مکانیک شکست کشسان خطی و مکانیک شکست کشسانی - خمیری تقسیم‌بندی کرد. در مواردی که اندازه‌ی ناحیه‌ی خمیری در نوک ترک در مقایسه با طول ترک کوچک‌تر باشد، مکانیک شکست کشسان خطی نتایج خوبی برای پیش‌بینی شکست ارائه می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان به پارامترهای زیر در مکانیک شکست دست یافت:

- ضرایب شدت تنش در هر سه حالت شکست، نظیر K_I ، K_{II} و K_{III} ؛
- انتگرال J که انتگرال مستقل از مسیر^{۱۳} است و نرخ انرژی کرنشی آزاد شده را محاسبه می‌کند و به کمک آن می‌توان شدت ضرایب تنش در نوک ترک را ارزیابی کرد.

نرخ انرژی آزاد شده^{۱۴} (G) که میزان نرخ انرژی کرنشی آزاد شده در حین شکست را ارزیابی می‌کند و در صورتی که مقدار این انرژی در نوک ترک بیشتر از مقدار

جدول ۳. ضرایب شدت تنش مود اول با فشار ۳/۵ مگاپاسکال.

نمونه	تحلیلی $MPa\sqrt{m}$	اجزای محدود توسعه یافته $MPa\sqrt{m}$	خطا/%
مدل ۶۱٪ با ترک تمام عمق محوری	۶۸٫۷	۶۹	۰٫۴۳
مدل ۶۱٪ با ترک تمام عمق عمودی	۱۴	۱۵٫۵	۹٫۶۷

جدول ۴. ضرایب شدت تنش مود اول ترک تمام عمق با فشار ۵/۵ مگاپاسکال.

نمونه	تحلیلی $MPa\sqrt{m}$	اجزای محدود توسعه یافته $MPa\sqrt{m}$	خطا/%
مدل ۶۱٪ با ترک محوری	۱۰۷٫۹	۱۰۸٫۱	۰٫۱۸
مدل ۶۱٪ با ترک عمودی	۲۲	۲۴	۸٫۳۳

نمودار ۴. ضرایب شدت تنش مود اول با افزایش طول ترک.

و در بیشترین عمق بیشترین ضریب شدت تنش وجود دارد. بنابراین برای طراحی ایمن تر و مناسب تر رعایت بیشترین مقدار ضریب شدت تنش ضرورت دارد. چنان که مشاهده می شود مقادیر ضریب شدت تنش در ترک عمودی بسیار کم تر از ترک طولی است و همین علت رخ ندادن ترک عمودی در نمونه های خوردگی است. با افزایش فشار، با توجه به افزایش تنش حلقوی ضریب شدت تنش ترک نیز افزایش خواهد یافت یا با کاهش ضخامت لوله و یا افزایش عمق خوردگی نیز شاهد افزایش ضریب شدت تنش خواهیم بود (جدول ۴).

علاوه بر ضرایب شدت تنش مود اول ارائه شده در بالا که مود باز شدگی بود، در مودهای دوم و سوم که مربوط به حالت های لغزشی و پارگی است نیز قابل مشاهده است. مقدار ضرایب شدت تنش مدهای مختلف ترک با افزایش فشار به صورت خطی بالا می رود ولی مطابق نمودار ۴ با افزایش طول ترک از ۲ میلی متر تا ۶ میلی متر، ضرایب شدت تنش در مدهای مختلف با کاهش همراه بود و علت این امر این است که با افزایش و رشد ترک میزان نیروی لازم برای ادامه رشد ترک کم تر می شود. در نمودار ۴ ضرایب شدت تنش در مدهای مختلف در فشار ۳/۵ مگاپاسکال قابل مشاهده است.

برای بررسی بیشتر تأثیر پارامتر عمق ترک و طول ترک در نمونه یی با خوردگی ۶۱٪، مقادیر ضرایب شدت تنش در هر سه مود مختلف در فشار ۳/۵ مگاپاسکال به عنوان ضرایب شدت تنش کمیته و در فشار ۵/۵ مگاپاسکال به عنوان ضرایب شدت

شکل ۳. پارتیشن بندی بستر ترک با تعداد مش بالاتر.

برای وارد کردن ترک در مدل آنالیز در روش اجزای محدود توسعه یافته، مش بندی خاص و تعریف نوک ترک و مسیر آن لازم نیست. برای این کار در مازول اثر متقابل^{۱۳} کافی است ترک و دامنه ی ترک که لوله است انتخاب شود.

۵. نتایج شبیه سازی مکانیک شکست

۱.۵. ضریب شدت تنش

برای به دست آوردن ضریب شدت تنش ترک در ترک خستگی از روابطی مختلفی می توان استفاده کرد؛ در نظریه های مربوط به ضریب شدت تنش ترک خستگی معمولاً از رابطه ی ۱ استفاده می کنند.^[۱۹]

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (۱)$$

که در آن σ تنش، Y ضریب شکل و a نصف طول ترک است. با توجه به مشکلات یافتن مقدار مناسب ضریب شکل روابط زیادی به وجود آمده اند؛ برای به دست آوردن ضریب شکل می توان از روابط تجربی یا نمودارهای موجود استفاده کرد. ضریب شدت تنش بین دو مقدار K_{min} و K_{max} که متناسب با تنش وارده می باشند تغییر می کند و عامل اصلی کنترل کننده رشد ترک خستگی اختلاف ضریب شدت تنش بین بیشترین و کم ترین ضریب شدت تنش است. همین طور برای مثال با استفاده از تابع ENRRTXFEM در محیط اسکریپت آباکوس نرخ انرژی آزاد شده در بازه های زمانی برای اجزای مختلف محاسبه خواهد شد یا استفاده از خروجی انتگرال J در روش اجزای محدود توسعه یافته قادر به مشاهده ی مقدار انرژی آزاد شده ی ترک خواهیم بود. با استفاده از رابطه ی ۲ می توان مقدار ضریب شدت تنش را در نوک ترک برای موقعیت های مختلف به دست آورد.^[۲۰]

$$K_I = \sqrt{G_I E} \quad (۲)$$

با تعریف ترک ایستا در مدل به صورت پارتیشن یا مدل دوبعدی ترک، نرم افزار می تواند ضرایب شدت تنش را با استفاده از نظریه حداکثر انرژی آزاد شده به دست آورد. در جدول ۳ نتایج حاصل از ضرایب شدت تنش مود اول برحسب واحد، با استفاده از دو روش تحلیلی و روش اجزای محدود توسعه یافته برای ترک تمام عمق درج شده است؛ چنان که مشاهده می شود مقایسه ی نتایج و خطای بین آنها نشان می دهد که نتایج از دقت خوبی برخوردار است و در فشار ۳/۵ مگاپاسکال نمونه ی ۶۱٪، ضرایب شدت تنش مود اول در ترک تمام عمق محوری در روش تحلیلی دارای خطای ۰٫۴۳٪ نسبت به روش اجزای محدود توسعه یافته است. لازم به ذکر است که ضرایب شدت تنش در موقعیت سطح لوله نسبت به عمق آن مقدار کم تری دارد،

نمودار ۷. ضرایب شدت تنش مود اول در ترک به طول ۴ میلی متر.

نمودار ۵. ضرایب شدت تنش مود اول در ترک به طول ۲ میلی متر.

نمودار ۸. ضرایب شدت تنش مود اول در ترک به طول ۵ میلی متر.

نمودار ۶. ضرایب شدت تنش مود اول در ترک به طول ۳ میلی متر.

نمودار ۹. ضرایب شدت تنش مود اول در ترک به طول ۶ میلی متر.

تنش بیشینه بررسی شده است. با توجه به این که عمق باقی مانده در قسمت خورده شده برابر ۲/۲۲ میلی متر است و با افزایش عمق ترک در بازه های ۰/۵ میلی متری تا رسیدن به عمق نهایی، ضرایب شدت تنش و میدان تنش در این بازه ها بررسی خواهند شد. در نمودار ۵ ضرایب شدت تنش در ترک به طول ۲ میلی متر قابل مشاهده است. چنان که توضیح داده شد در ترک تمام عمق (عمق ۲/۲۲ میلی متر) برای مدل ۶۱٪، مقدار ضرایب شدت تنش به بیشترین مقدار خود می رسد و با افزایش عمق ترک مقادیر ضرایب شدت تنش به مرور زیاد خواهد شد. در نمودار ۶ ضرایب شدت تنش مود اول با افزایش عمق ترک در ترک به طول ۳ میلی متر قابل مشاهده است. چنان که مشاهده می شود با افزایش فشار داخلی ضرایب شدت تنش مود اول افزایش می یابد. نکته ای دیگر این که هرچه عمق ترک بیشتر شود تأثیر فشار داخلی در افزایش فاصله ی بین ضرایب شدت تنش کمینه و بیشینه بیشتر می شود. نمودار ۷ نشانگر ضرایب شدت تنش مربوط به ترک با طول ۴ میلی متر است.

نکته ی مهم دیگری که از این نمودارها برداشت می شود این است که تا قبل از رسیدن عمق ترک به عمق نهایی و سوراخ شدن لوله، ضرایب شدت تنش با افزایش طول ترک بالا می روند، ولی در ترک تمام عمق نتیجه برعکس خواهد شد. در نمودار ۸ ضرایب شدت تنش مود اول در ترک به طول ۵ میلی متر قابل مشاهده است.

چنان که مشاهده می شود با شروع و گسترش ترک تمام عمق، تدریجاً ضرایب شدت تنش مود اول کاهش می یابد. در واقع با توجه به مفهوم مود اول ترک که بازشدگی دهانه ی ترک است می توان به علت این امر پی برد. با توجه به این که

بیشترین انرژی صرف بازشدن ترک می شود، در مراحل بعدی رشد ترک انرژی کمتری لازم است یا این که ضرایب تنش به نیروی کمتری برای ادامه ی رشد نیاز دارد. در نمودار ۹ مشاهده می شود که در ترک به طول ۲ و ۶ میلی متر نیز با کاهش ضرایب شدت تنش در ترک تمام عمق مواجه هستیم.

نکته ی قابل توجه دیگر این که در ترک های سطحی امکان اتفاق افتادن دو مود دوم و سوم کم است. به عبارت دیگر در ترک های مختلف با طول های اولیه ی متفاوت، بالا رفتن مقدار ضرایب مود دوم و سوم ضرایب شکست که مربوط به برش داخل

شکل ۴. میدان تنش ترک به طول ۶ و عمق ۰/۵ میلی متر.

شکل ۵. میدان تنش ترک به طول ۶ و عمق ۲/۲۲ میلی متر.

جدول ۵. جدول مشخصات خستگی خط لوله.

C	m	K_{IC}
2×10^{-6}	۰/۸۴	۸۹

لوله پی برد. در قانون پاریس برای ثابت های ماده، m و c از آزمون های آزمایشگاهی استفاده می شود که این ثابت ها به هندسه، جنس و مشخصات ماده ای آزمودنی بستگی دارند. برای خط لوله مورد آزمایش این تحقیق، مشخصات لازم برای استفاده از قانون پاریس برگرفته از نتایج تجربی [۲۱] و مطابق جدول ۵ است.

K_{IC} نشانگر چقرمگی شکست است که مقدار آن در این تحقیق برابر با $K_{IC} = 89 \text{ MPa}\sqrt{m}$ است. اگر چقرمگی شکست یک ماده کم باشد ترد می شکند و چنانچه مقدار آن بالا برود احتمال شکست نرم افزایش پیدا می کند. تا زمانی که مقدار ضریب شدت تنش کم تر از مقدار بحرانی آن یعنی K_{IC} باشد رشد ترک اتفاق نمی افتد و زمانی که مقدار آن مساوی یا بزرگ تر از مقدار بحرانی باشد رشد ترک و در نهایت شکست اتفاق خواهد افتاد. شکل کابی معادله ی پاریس به صورت رابطه ی ۳ است:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta k)^m \quad (3)$$

که در آن c و m ضرایب مربوط به خواص ماده اند، ΔK تفاوت بیشترین و کم ترین ضریب شدت تنش، a طول ترک اولیه و N تعداد سیکل بار است. برای محاسبه ی

نمودار ۹. کمینه ضرایب شدت تنش مود دوم. مقدار کمینه ضرایب شدت تنش مود دوم در ترک به طول ۲ mm (مربع) و مقدار کمینه ضرایب شدت تنش مود دوم در ترک به طول ۶ mm (مثلث)

نمودار ۱۱. کمینه ضرایب شدت تنش مود سوم. مقدار کمینه ضرایب شدت تنش مود سوم در ترک به طول ۲ mm (مربع) و مقدار کمینه ضرایب شدت تنش مود سوم در ترک به طول ۶ mm (مثلث)

و خارج از صفحه یا مود لغزشی و پارگی است، اتفاق نخواهد افتاد و مقادیر ضرایب تنش مربوط به K_I و K_{II} بسیار ناچیز است و تنها در حالتی که عمق ترک کامل و به اندازه ی ضخامت لوله می شود شاهد افزایش این ضرایب شدت تنش خواهیم بود. علت آن است که عملاً مودهای لغزشی و پارگی بعد از مود اول یا مود بازشدگی اتفاق می افتد و قبل از آن محدودیت مقدار مودهای دوم و سوم بسیار ناچیز خواهد بود. برای مقایسه ی بهتر در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ مقدار کمینه ضرایب شدت تنش مودهای دوم و سوم در دو طول ۲ و ۶ میلی متر قابل مشاهده است، مقدار منفی در ضرایب شدت تنش به معنای وجود ترک در میدان تنش فشاری است.

در نمودار ۱۱ مود سوم ضریب شدت تنش قابل مشاهده است. در این حالت نیز مانند مود دوم شکست (نمودار ۱۰)، در حالت ترک تمام عمق مقدار ضریب شکست مود سوم با افزایش مواجه خواهد شد.

در شکل های ۴ و ۵ توزیع میدان های تنش برای حالت های بررسی شده قابل مشاهده است.

با توجه به شکل های ۴ و ۵ مشاهده می شود که میدان تنش اطراف ترک با افزایش عمق ترک و بدون تغییر فشار داخلی، افزایش پیدا می کند و این مقدار بر رشد ترک خستگی به عنوان کمینه تنش در فشار ۳/۵ مگاپاسکال تأثیر مستقیم دارد.

۲.۵. طول نهایی ترک و عمر خط لوله

با داشتن ضریب شدت تنش و استفاده از معادله ی پاریس می توان به عمر خط

جدول ۶. جهت رشد ترک.

مدل	نوک ترک (درجه)	انتهای ترک (درجه)
ترک طولی - مدل ۶۱٪	۴۰	۰
ترک عرضی - مدل ۶۱٪	۷۶	۴۵

شکل ۶. مسیر رشد ترک طولی با بارگذاری خستگی کم چرخه.

شکل ۷. کانتور تنش در رشد ترک با ضریب بزرگ‌نمایی صفر.

طور که مشاهده می‌شود با این که امکان به وجود آمدن ترک در راستای عرضی یا عمودی در قسمت‌های خورده شده کم است ولی در صورت بوجود آمدن این نوع ترک، جهت زاویه به سمت افق و ترک طولی میل خواهد کرد و رشد ترک در نهایت در جهت طولی اتفاق خواهد افتاد.

در ترک طولی با توجه به این که در بارگذاری خستگی با تغییرات فشار در ناحیه ۵/۵ مگاپاسکال، میزان تغییرات ضریب شدت تنش به مقدار بحرانی رشد ترک می‌رسد انتظار رشد ترک را داریم. در شکل ۶ به کمک تابع مسیر رشد ترک^{۱۴} با ضریب بزرگ‌نمایی صفر قابل مشاهده است.

در شکل‌های ۷ و ۸ کانتور تنش بعد از رشد ترک با دو ضریب بزرگ‌نمایی صفر و ۱ قابل مشاهده است.

چنان که ملاحظه می‌شود طبق توضیحات داده شده، نوک ترک دارای بیشترین مقدار تنش و قسمت‌های ترک خورده که در آن شکست اتفاق افتاده، دارای کمترین تنش است.

نمودار ۱۲. عمر خط لوله برحسب اندازه ترک.

تعداد سیکل نهایی N_f با استفاده از رابطه‌ی پاریس، داریم:

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{c(\Delta K)^m} \quad (4)$$

که در آن، a_f طول نهایی ترک و a_i طول ابتدایی ترک است. با توجه به این که ضریب شدت تنش محاسبه شده در فشار ۳/۵ مگاپاسکال دارای مقدار $68/7 \text{ MPa}\sqrt{m}$ و در فشار ۵/۵ مگاپاسکال دارای بیشترین مقدار خود یعنی $106 \text{ MPa}\sqrt{m}$ است، می‌توان نتیجه گرفت که در فشار ۳/۵ مگاپاسکال با توجه به کوچک‌تر بودن مقدار ضریب شدت تنش از مقدار بحرانی $89 \text{ MPa}\sqrt{m}$ که برابر با است هیچ‌گونه رشد ترکی وجود نخواهد داشت ولی با افزایش دامنه‌ی فشار به ۵/۵ مگاپاسکال که مقدار آن از مقدار بحرانی بزرگ‌تر است رشد ترک شروع خواهد شد. برای محاسبه‌ی طول نهایی ترک با طول اولیه‌ی ۱ میلی‌متر، با قرار دادن مقادیر در رابطه‌ی پاریس طول نهایی ترک مقدار ۶/۵۲ میلی‌متر به دست خواهد آمد؛ با داشتن طول اولیه و طول نهایی ترک با استفاده از رابطه‌ی پاریس عمر خط لوله ۵۷۴۳۹ سیکل خواهد بود.

رابطه‌ی پاریس رابطه‌ی نظری برای به دست آوردن عمر خط لوله است. در نرم‌افزار برای تخمین عمر خط لوله با بررسی ضریب شدت تنش می‌توان به عمر خط لوله پی برد. برای این کار با بررسی ضریب شدت تنش در هر بازه زمانی می‌توان از وضعیت ترک باخبر شد و با رسیدن مقدار ضریب شدت تنش به مقدار بحرانی آن و رشد ناگهانی ترک، در واقع لحظه‌ی اتمام عمر خط لوله است و با محاسبه‌ی تعداد سیکل‌های انجام شده تا رسیدن ضریب شدت تنش به مقدار بحرانی و رشد ترک می‌توان به عمر خط لوله پی برد. در نمودار ۱۲ عمر خط لوله با توجه به گسترش و ابعاد ترک در دو روش تحلیلی و اجزای محدود توسعه یافته قابل مشاهده است.

مشاهده می‌شود با افزایش طول ترک، طول عمر خط لوله کاهش می‌یابد.

۳.۵. جهت رشد ترک CPD

با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس می‌توان جهت رشد ترک در جبهه ترک را به دست آورد که این خروجی برای مهندسان این امکان را به وجود می‌آورد که با اصلاح مدل در جهت رشد ترک با کاهش ضریب شدت تنش و افزایش مقاومت، برای بهبود طراحی مهندسی اقدامات لازم را به عمل آورند. نتایج زاویه‌ی رشد ترک برای دو مدل ترک تمام عمق طولی و عرضی در جدول ۶ آمده است. همان

شکل ۸. وضعیت تنش در رشد ترک با ضریب بزرگ‌نمایی یک.

۶. نتیجه‌گیری

برای بررسی بهتر رشد ترک خستگی با در نظر گرفتن اثرات خوردگی، بیشتر مدل‌های خوردگی و فشار شکست در خطوط لوله بررسی شد و با توجه به آن به مطالعه‌ی رشد ترک خستگی پرداختیم.

در قسمت نخست ارزیابی و بررسی توسط مدل‌های اجزای محدود و استاندارد برای تخمین بیشینه فشار طراحی مشخص شد که استاندارد تخمین استحکام خطوط لوله‌ی خورده شده ۱۵ در مراحل صفر و ۱ که به ترتیب برآوردی از نمودار و روش B31G است، دارای خروجی‌های محافظه کارانه است به طوری که روش B31G، در مدل ۲۲ درصد با پایین‌ترین میزان خوردگی و مدل ۶۱ درصد با بالاترین میزان خوردگی به ترتیب ۵۴ درصد و ۸ درصد نسبت به روش اجزای محدود دارای حاشیه‌ی امن بیشتر است. مرحله‌ی یک، یا روش B31G تغییر یافته دقت بالاتری را ارائه می‌دهد ولی هنوز محافظه کارانه است به طوری که روش B31G تغییر یافته، در دو مدل ۲۲٪ و ۶۱٪ به ترتیب ۴۷٪ و ۱۸٪ درصد نسبت به روش اجزای محدود حاشیه‌ی امن بیشتری دارد. پیش‌بینی فشار شکست در رده‌های بالاتر، مانند روش سطح مؤثر نسبت به مراحل صفر و ۱ نتایج دقیق‌تری دارد و دارای درصد خطای کم‌تری در مقایسه با روش آزمایشگاهی و روش اجزای محدود است به طوری که روش سطح مؤثر، در دو مدل ۲۲٪ و ۶۱٪ به ترتیب دارای ۱۹۹٪- و ۸۸٪ خطا نسبت به روش اجزای محدود است. همچنین روش اجزای محدود، در مدل ۲۲٪، ۴۵٪ و ۶۱٪ به ترتیب دارای خطای ۹۳٪-، ۱۸٪ و ۸۳٪ نسبت به روش آزمایشگاهی است که تطابق بسیار خوبی بین روش اجزای محدود و روش آزمایشگاهی است.

با توجه به بررسی این پژوهش مشخص شد که روش سطح مؤثر از نظر عددی جدیدترین و بهترین پیش‌بینی فشار شکست را می‌نماید و با توجه به پیشرفت دستگاه‌های اندازه‌گیری و بازرسی در خطوط لوله که با دقت بالایی سطوح و میزان خوردگی را مشخص می‌کنند پیشنهاد می‌شود بهره‌بردارهای خطوط لوله از این روش برای تخمین فشار شکست و قابلیت اطمینان خط لوله استفاده کنند.

با افزایش فشار داخلی و نیز افزایش عمق خوردگی ضریب تمرکز تنش به طور محسوسی بالاتر می‌رود و رشد و پیشروی ترک‌ها و در نهایت انفجار را ممکن می‌سازد، به طوری که در نمونه‌ی مدل ۶۱٪، تنها با افزایش فشار داخلی از ۳٫۵ مگاپاسکال به ۵٫۵ مگاپاسکال ضریب تمرکز تنش مود اول ۶۳٪ افزایش می‌یابد.

ترک‌های طولی در راستای لوله از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند و خطر رشد ترک در آنها بسیار زیاد است؛ مقدار ضریب شدت تنش مود در نقطه‌ی میانی ترک بیشینه است و به تدریج تا انتهای ترک مقدار آن کاهش می‌یابد؛ برای مثال در مدل ۶۱٪، با فشار داخلی ۵٫۵ مگاپاسکال ضریب تمرکز تنش مود اول ترک محوری ۶۳٪ نسبت به ترک عمودی افزایش می‌یابد.

با افزایش عمق ترک، ضرایب شدت تنش نیز افزایش می‌یابد، بنابراین آسیب‌ها و ترک‌های سطحی خطوط لوله نیز می‌توانند با افزایش ضریب شدت تنش در ایجاد بستر لازم برای رشد ترک تأثیرگذار باشند.

در ترک تمام‌عمق با شروع و گسترش ترک به مرور ضرایب شدت تنش مود اول رو به کاهش می‌گذارد، در حالی که قبل از رسیدن ترک به عمق نهایی و سوراخ شدن لوله ضرایب شدت تنش افزایش می‌یابد.

در بارگذاری خستگی اختلاف تغییرات فشار به هر میزان بیشتر باشد، متناظر با آن تنش و ضریب تمرکز تنش ترک افزایش بیشتری می‌یابد و نرخ رشد ترک نیز بیشتر می‌شود.

فهرست علائم

K : ضریب شدت تنش $(MPa\sqrt{m})$ ؛

σ : تنش (MPa)؛

Y : ضریب شکل Y ؛

a : نصف طول ترک (mm)؛

E : مدول الاستیسیته (MPa)؛

c : ضریب مشخصات خستگی ماده؛

m : ضریب مشخصات خستگی ماده؛

N : تعداد سیکل بارگذاری؛

a_f : طول نهایی ترک (mm)؛

a_i : طول ابتدایی ترک (mm)؛

π : عدد پی.

پانویس‌ها

1. ASME B31G
2. XFEM

3. haz
4. ASME B31G
5. 3D solid
6. deformable
7. modified B31G

8. J integral
9. energy release rate
10. step
11. direct cyclic
12. hex
13. interaction
14. statusxfem
15. ASME B31G

منابع (References)

1. Raju, J. N. J. I.S. "Stress-intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical pressure vessels", *Engineering Fracture Mechanics*, **104**, pp. 293-298 (1979).
2. K. Kirkhope, Bell, R. and Kirkhope, J. "Stress intensity factors for single and multiple semi-elliptical surface cracks in pressurized thick-walled cylinders", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **47**(2), pp. 247-257 (1991).
3. Perl, M., Levy, C. and J, P. "Three-dimensional interaction effects in an internally multicroaked pressurized thick-walled cylinder- part I: radial crack arrays", *Journal of Pressure Vessel Technology*, **118**(3), pp. 357-363 (1996).
4. Paris, P. C. A. F. E. "A critical analysis of crack propagation laws", ASME (1963).
5. Michael Hudson, C. and Joseph, T.S. "Effect of stress ratio on fatigue-crack growth in 7075-T6 aluminum-alloy sheet", *Engineering Fracture Mechanics*, **1**(3), pp. 429-446 (1969).
6. Pungo, N., Ciavarella, M., Corneti, P. and et al. "A generalized Paris' law for fatigue crack growth", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **54**(7), pp. 1333-1349 (2006).
7. Cronin, D.S. and Pick, R.J. "Prediction of the failure pressure for complex corrosion defects", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **79**(4), pp. 279-287 (2002).
8. Kiefner, J.F. and Vieth, P.H. "New method corrects criterion for evaluating corroded pipe", *Oil and Gas Journal*, **88**(32), pp.56-59 (1990).
9. ASME B31G Standard. "Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines", ASME (2012).
10. Mondal, B. and Dhar, A. "Burst pressure assessment of corroded pipelines using fracture mechanics criterion", *Engineering Failure Analysis*, **104**, pp. 139-153 (2019).
11. Foletti, S., Corea, F., Rabbolini, S. and et al. "Short cracks growth in low cycle fatigue under multiaxial in-phase loading", *International Journal of Fatigue*, **107**, pp. 49-59 (2018).
12. Hong, S., Jae, M.K., Seok, C. and et al. "Fatigue life prediction for an API 5L X42 natural gas pipeline", *Engineering Failure Analysis*, **56**, pp. 396-402 (2015).
13. Shaari, M.S., Akramin, M.R., Ariffin, A.K. and et al. "Fatigue crack growth behaviour of semi-elliptical surface cracks for an API 5L X65 gas pipeline under tension", in *IOP Conference Series* (2018).
14. Zhang, Y., Xiao, Z.M. Fan, M. and et al. "Fatigue analysis on offshore pipelines with embedded cracks", *Ocean Engineering*, **117**, pp. 45-56 (2016).
15. Balac, M., Grbovic, A., Petrovic, A. and et al. "Fem analysis of pressure vessel with an investigation of crack growth on cylindrical surface", *Eksploracija i Niezawodnosc*, **20**, pp. 378-386 (2018).
16. Mansor, N.I.I., Abdullah, S. and Ariffin, A.K. "Effect of loading sequences on fatigue crack growth and crack", *Marine Structures*, **65**, pp. 181-196 (2019).
17. Giorgetti, V., Santos, E.A., Marcomini, J.B. and et al. "Stress corrosion cracking and fatigue crack growth of an API 5L X70 welded joint in an ethanol environment", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **169**, pp. 223-229 (2019).
18. API, API 5L: Specification for Line Pipe, "American Petroleum Institute, API Publishing Services", L Street, N. W, Washington, D.C, (2004).
19. Irwin, G. "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate", *Journal of Applied Mechanics*, **24**, pp. 361-364 (1957).
20. Griffith, A. "The phenomena of rupture and flow in solids", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **221**, pp. 163-198 (1921).
21. Aliakbar Hosseini, S. "Assessment of crack in corrosion defects in natural gas transmission pipelines", *Waterloo, Ontario, Canada*, University of Waterloo (2010).