



تحلیل دوبعدی ترک در لوله‌های انتقال نفت و گاز مدفون شده در خاک

مجیدرضا آیت‌الهی^۱، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
هادی خرمی‌شاد^۲، کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۱ تلفن: ۰۲۱-۷۳۹۱۲۹۲۲، دورنگار: ۷۷۲۴۰۴۸۸، پست الکترونیکی: m.ayat@iust.ac.ir

^۲ تلفن: ۰۲۱-۷۳۹۱۲۹۴۳، دورنگار: ۷۷۲۴۰۴۸۸، پست الکترونیکی: h.khorami@yahoo.com

چکیده

در این مقاله یک لوله مدفون شده در خاک به صورت دوبعدی به همراه ترک محوری داخلی یا خارجی مدل‌سازی شده، و با در نظر گرفتن شرایط کرنش صفحه‌ای از دیدگاه مکانیک شکست، مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی اثر خاک از مدل برنز و ریچارد استفاده شده که بر اساس مقالات چاپ شده از دقت خوبی برخوردار است. با توجه به بارگذاری لوله، ترک تحت بارگذاری مرکب خواهد بود. تحلیل‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Ansys صورت گرفته است. در تحلیل‌های انجام گرفته تاثیر ارتفاع خاک، ابعاد لوله و ترک، زاویه و محل قرارگیری ترک در لوله بر روی ضریب شدت تنش الاستیک که یکی از مهمترین پارامترها در مکانیک شکست است در قالب نمودارهایی، بررسی شده است. در این تحقیق به منظور حصول قابلیت کاربرد جامع نتایج، از تحلیل ابعادی برای بی‌بعدسازی کلیه پارامترها بهره گرفته شده است. همچنین سعی شده است در تحلیل‌ها بازه وسیعی از تغییرات پارامترهای هندسی مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه: لوله‌های مدفون شده، مکانیک شکست مرکب، ضریب شدت تنش، روش اجزای محدود

۱- مقدمه

لوله‌های مدفون شده در خاک به دلیل مصون ماندن از صدمات احتمالی، کاربرد وسیعی در صنعت نفت و گاز دارند. از طرفی عوامل گوناگونی نظیر خوردگی و نیز اعمال بارهای مختلف از جمله وزن خاک بالای لوله که در بعضی موارد ارتفاع آن به دهها متر نیز می‌رسد، می‌تواند منجر به نشت نفت و گاز و در ادامه ترکیدگی آن و صرف هزینه‌های سنگین گردد. این امر مهندسان را بر آن می‌دارد تا در صورت گزارش وجود ترک توسط کارشناسان تست غیرمخرب به تحلیل مکانیک شکست آن ترک‌ها پرداخته و دستور ادامه روند انتقال و یا توقف آن و ترمیم قسمت معیوب را صادر کنند.

تا کنون در زمینه تحلیل ترک‌های طولی در لوله‌ها و مخازن استوانه‌ای تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است. اولین تلاش‌ها به تحقیقات آندروود^۱ [۱] در سال ۱۹۷۲ و کبایاشی^۲ [۲] در سال ۱۹۷۴ برمی‌گردد که به بررسی تخمینی ترک‌های محوری در مخازن فلزی تحت فشار داخلی پرداختند. آنها در تحقیقات خود اثر ضخامت را در نظر نگرفتند. در سال ۱۹۷۶ برسوم^۳ [۳] توانست با معرفی المان‌های منفرد، که با تغییراتی در المان‌های ایزوپارامتریک بوجود می‌آیند، پیشرفت ارزشمندی را در مدلسازی اجزای محدود مسائل ترک حاصل نماید. در سال ۱۹۷۷، آتلوری و کاتیرسان^۴ [۴] و در سال ۱۹۷۹، مک‌گوان و ریموند^۵ [۵] توانستند تنها برای پارامترهای هندسی خاصی از ترک، ضریب شدت تنش را برای یک ترک داخلی سطحی در دیواره قسمت استوانه‌ای مخزن تحت فشار با استفاده از روش اجزای محدود بدست آورند. در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۲، نیومن و راجو^۶ [۷] توانستند ضریب شدت تنش مد اول را برای بازه وسیعی از پارامترهای هندسی ترک‌های نیمه بیضوی داخلی و خارجی ارائه دهند. در سال ۱۹۹۸، لین و اسمیت^۷ [۸] به بررسی رشد ترک‌های محوری در مخازن تحت فشار پرداختند و اثبات کردند که ترک‌ها با هر شکل دلخواه پس از رشد بصورت بیضی درآمده و به همان صورت بیضوی رشد می‌کنند. و در سال ۲۰۰۳، کیم^۸ [۹] به بررسی و تحلیل غیرخطی ترک‌های محوری داخلی در استوانه‌ها پرداخت. مروری بر مطالعات فوق نشان می‌دهد که هیچکدام از محققان قبلی رفتار ترک در لوله‌ای مدفون شده در خاک را بررسی نکرده‌اند. در این مقاله به بررسی دوبعدی ترک در لوله‌های مدفون شده پرداخته می‌شود.

۲- مدلسازی دوبعدی لوله ترک‌دار

ترک در داخل لوله و یا مخزن استوانه‌ای می‌تواند بصورت محوری، محیطی و یا زاویه‌دار مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. اما براساس شرایط بارگذاری و مرزی حاکم بر مسئله، معمولاً یکی از حالت‌های فوق بحرانی هستند. به عنوان نمونه در بررسی اثر خمش در لوله‌های ترک‌دار، ترک‌های محیطی شرایط بحرانی‌تری را دارا می‌باشند. این در حالیست که در بررسی اثر خاک روی لوله‌های مدفون شده، ترک‌های طولی بحرانی‌تر بوده که در ادامه بررسی رفتار اینگونه ترک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

¹ Underwood

² Kobayashi

³ Barsoum

⁴ Alturi and Kathiresan

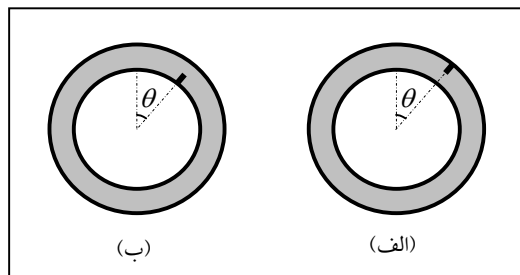
⁵ McGowan and Reymund

⁶ Newman and Raju

⁷ Lin and smith

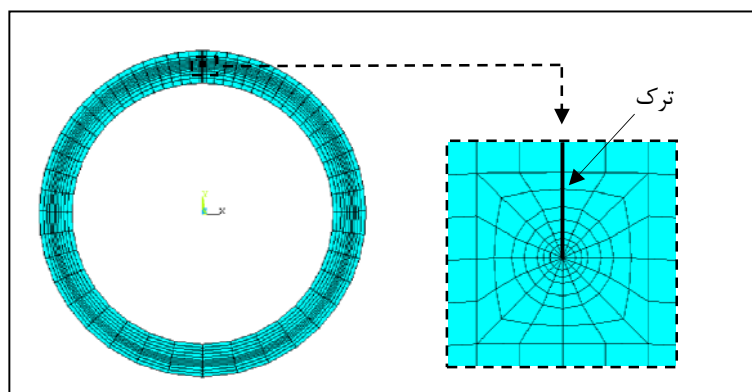
⁸ Kim

ترک در دو حالت خارجی و داخلی در دیواره یک استوانه مدلسازی می‌گردد (توجه به شکل ۱). مدلسازی و تمام مراحل تحلیل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود انسیس، بصورت پارامتریک و با بهره‌گیری از قابلیت برنامه‌نویسی APDL^۹ و مایکرو این نرم‌افزار نوشته شده است.



شکل ۱: شمایی از ترک‌های محوری، الف) خارجی، ب) داخلی.

در این تحقیق از المان‌های دوبعدی ۸ گره‌ای استفاده شده است. برای مدلسازی ابتدا خطوط سازنده مدل در نرم‌افزار ایجاد شده و سپس به ساختن صفحات از روی خطوط مذکور پرداخته می‌شود. نکته اصلی و مهمی که می‌بایست در مدلسازی یک ترک به آن توجه کرد، این است که ترک با عدم اتصال المان‌های دو لبه ترک بر هم ایجاد می‌گردد. در مدل ساخته شده به منظور حصول دقت قابل قبول، سعی شده است علاوه بر استفاده از المان‌های منفرد اطراف نوک ترک، چگالی تعداد المان‌ها نیز با نزدیک شدن به نوک ترک بیشتر شود (شکل ۲). که این مهم با ایجاد صفحاتی در اطراف نوک ترک حاصل می‌گردد. برای مدلسازی اثر خاک از مدل برنز و ریچارد [۱۰] استفاده شده است. تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند تنش‌های اعمالی در اثر وزن خاک را با دقت خوبی بر روی لوله مدلسازی کند [۱۱].



شکل ۲: شبکه‌بندی مدل دوبعدی لوله ترک‌دار.

^۹ APDL; Ansys Parametric Design Language

۳- محاسبه ضرائب شدت تنش

ضریب شدت تنش را می‌توان بر اساس توابع جابجایی U و V در یک سیستم مختصات کارترین محلی در نوک ترک (توجه به شکل ۳) با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه کرد،

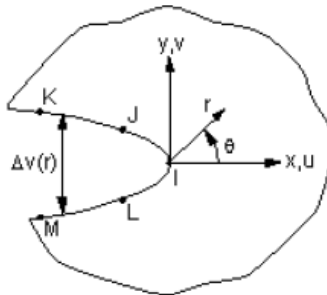
$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{2G}{(1+k)} \frac{\Delta V(r)}{\sqrt{r}} \quad (1)$$

$$K_{II} = \sqrt{2\pi} \frac{2G}{(1+k)} \frac{\Delta U(r)}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

در روابط ۲ و ۳ پارامتر k بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$k = \begin{cases} 3 - \nu / (1 - \nu) & \text{ کرنش صفحه‌ای} \\ 3 - 4\nu & \text{ تنش صفحه‌ای} \end{cases} \quad (3)$$

در روابط فوق r فاصله شعاعی در مختصات قطبی نوک ترک، G مدول برشی، ν ضریب پواسون و K_I و K_{II} ضرائب شدت تنش مد اول و دوم می‌باشند.



شکل ۳: مختصات کارترین محلی نوک ترک

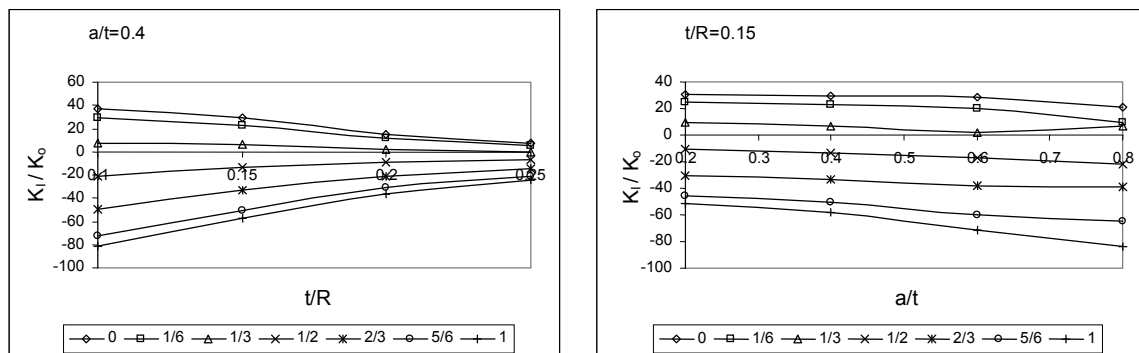
نرم‌افزار انسیس با استخراج توابع جابجایی نوک ترک، از تحلیل‌های اجزای محدودی خود و با استفاده از روابط ۱ و ۲ می‌تواند با دقت خوبی ضرائب شدت تنش را ارائه دهد. در این تحقیق به منظور صحه‌گذاری بر نتایج حاصله از نرم‌افزار، از نتایج مرجع [۱۲] که ضرائب شدت تنش را برای فشار یکنواخت داخلی لوله محاسبه کرده، استفاده شده است. نتایج بدست آمده دقت خوبی داشته، خطا بطور متوسط حدود ۴٪ بود. همانطور که ذکر شد، در این مقاله تمام پارامترها بصورت بدون بعد مورد استفاده قرار خواهند گرفت. پارامترهای بدون بعد عبارت خواهند بود از نسبت ضخامت به شعاع خارجی لوله t/R ، نسبت طول ترک به ضخامت لوله a/t و ضریب شدت تنش بدون بعد که بصورت رابطه (۴) تعریف می‌شود،

$$K_{non,i} = \frac{K_i}{K_0}, \quad i = I, II, III, \quad (4)$$

$$K_0 = \sigma \sqrt{\pi a},$$

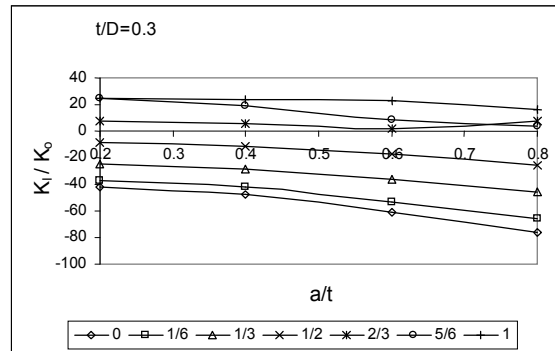
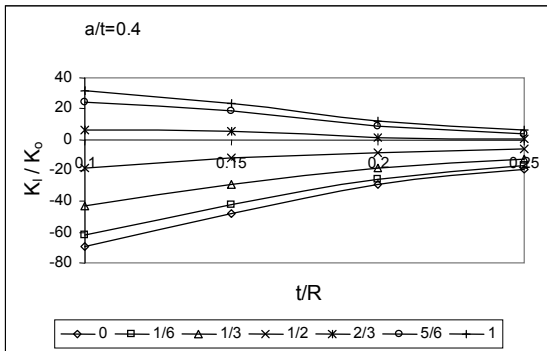
$$\sigma = \gamma h,$$

در رابطه (۴)، γ وزن مخصوص خاک موجود در بالای لوله و h ارتفاع خاک روی لوله است. با انجام تعداد بسیار زیادی از تحلیل‌های اجزای محدود در ترکی تحت زوایای مختلف θ ، ضرائب K_I و K_{II} استخراج گردید که نتایج آن در شکل‌های ۴ الی ۷ مشاهده می‌شود. همانطور که از شکل ۴ برمی‌آید، اگر ترک در دیواره داخلی لوله واقع شود، با نزدیک شدن به قطر عمودی ($\theta = 0^\circ$) لوله شرایط بحرانی‌تر شده و با رفتن به قطر افقی ($\theta = 90^\circ$) به منطقه امن نزدیک می‌شویم. لازم به ذکر است که مقادیر منفی ضریب شدت تنش بیانگر فشرده شدن دو لبه ترک و در نتیجه عدم گسترش ترک در اثر بار خالص خاک روی لوله می‌باشد. باید توجه کرد که چون لوله‌های مدفون شده علاوه بر نیروی خاک، تحت تاثیر بارگذاری‌های دیگری که مهمترین آنها فشار سیال داخل لوله است قرار می‌گیرند، لذا برای یافتن ضریب شدت تنش کلی می‌بایست سهم تمامی نیروها و بارگذاری‌های اعمالی بر لوله را بر ضریب شدت تنش، که در مراجع دیگر [۱۲] موجود است، در نظر گرفت.



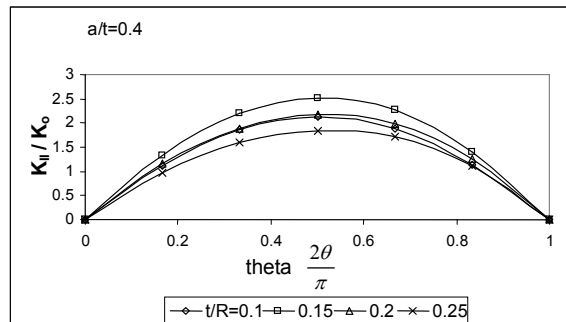
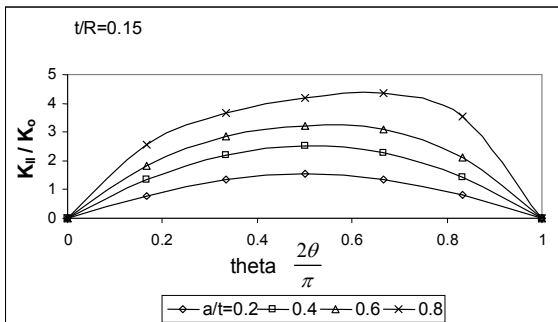
شکل ۴: ضریب شدت تنش مد اول برای ترک محوری داخلی دوبعدی در اثر اعمال فشار خاک، اعداد زیر شکل‌ها زاویه قرارگیری ترک در لوله بر حسب $2\theta/\pi$ می‌باشند.

البته بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۵، ترک‌های خارجی متفاوت با ترک‌های داخلی از خود نشان می‌دهند. ترک‌های خارجی بر خلاف گونه داخلی هر چه به قطر افقی نزدیک‌تر باشند بحرانی‌تر و هر چه به قطر عمودی نزدیک‌تر باشند امن‌تر خواهند بود.



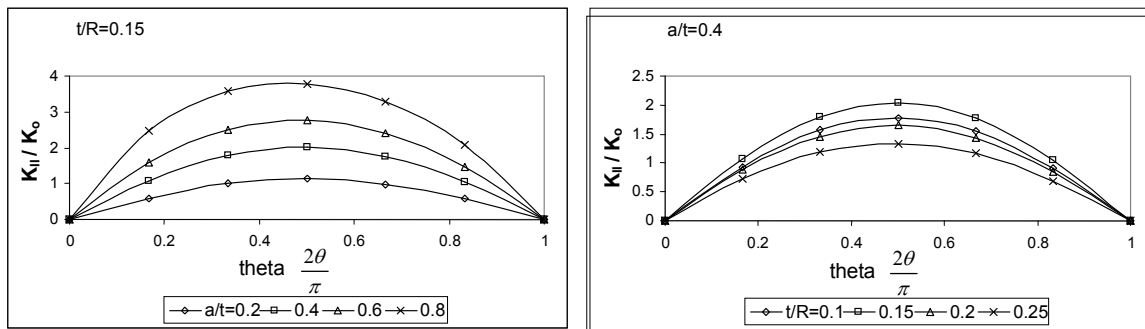
شکل ۵: ضریب شدت تنش مد اول برای ترک محوری خارجی دوبعدی در اثر اعمال فشار خاک، اعداد زیر شکل‌ها زاویه قرارگیری ترک در لوله بر حسب $2\theta/\pi$ می‌باشند.

بر اساس شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان دریافت که با افزایش نسبت ضخامت به شعاع لوله، میزان قدر مطلق ضریب شدت تنش کاهش می‌یابد که این امر در اثر کاهش مقدار قدر مطلق جابجایی نسبی لبه‌های ترک، $|\Delta V(r)|$ می‌باشد.



شکل ۶: ضریب شدت تنش مد دوم برای ترک محوری داخلی دوبعدی در اثر اعمال فشار خاک.

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که ترک چه داخلی و چه خارجی، تنها در حالتی که در راستای قطر افقی یا عمودی است تحت اثر خالص مد اول مکانیک شکست قرار می‌گیرد و در بقیه حالت‌ها مد دوم مکانیک شکست نیز وارد مساله می‌شود. در این موارد برای بررسی رشد ترک استفاده از معیارهای شکست مرکب اجتناب ناپذیر است. حداکثر مقدار K_{II} تقریباً در همه حالت‌های نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ در زاویه $\theta = 45^\circ$ اتفاق می‌افتد.



شکل ۷: ضریب شدت تنش مد دوم برای ترک محوری خارجی دوبعدی در اثر اعمال فشار خاک.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به اینکه نتایج موجود در شکل های ۴ الی ۷ بصورت بدون بعد ارائه شده است، لذا این منحنی ها می تواند توسط مهندسان جهت ارزیابی استحکام در دامنه وسیعی از لوله های ترکدار مدفون شده در خاک مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج حاصله از تحلیل اجزای محدود حاکی از آن است که ترک های داخلی با نزدیک شدن به قطر عمودی بحرانی تر می شوند (شکل ۴)، اما ترک های خارجی با رفتاری متفاوت هر چه به قطر افقی نزدیک می شوند وضعیت بحرانی تری به خود می گیرند (شکل ۵). با افزایش نسبت ضخامت به شعاع، میزان قدر مطلق جابجایی نسبی لبه های ترک و پیرو آن قدر مطلق ضریب شدت تنش کاهش می یابد (شکل ۴ و ۵). و نیز می توان مشاهده کرد که با فاصله گرفتن ترک از قطرهای اصلی، مد دوم مکانیک شکست نیز قوت می گیرد، و تقریباً در زاویه ۴۵ درجه به مقدار بیشینه خود نیل می کند (شکل های ۶ و ۷). بطور کلی مروری بر شکل های ۴ الی ۷، نشان می دهد که ترک های داخلی از ترک های خارجی وضعیت بحرانی تری را دارا هستند.

۵- مراجع

- 1- Underwood, J. H., "Stress intensity factor for internally pressurized thick walled cylinders," ASTM STP 513, 1972, 59-70.
- 2- Kobayashi, A. S., "A simple procedure for estimating Stress intensity factor in regions high stress gradients," Significance of defects in welded structures, University of Tokyo Press, 1974, 127-143.
- 3- Barsoum, Roshdy, "On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics," International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1976, 10:25-37.
- 4- Athluri, S. N., and Kathiersan, K., "Outer and inner surface flaws in thick walled pressure vessel," Transaction of the Fourth International Conference on Structural Material in Reactor Technology, San Francisco, California, 1977.
- 5- McGowan, J. J., and Raymund, M., "Stress intensity factor for internal longitudinal semi-elliptical surface flaws in a cylinder under arbitrary loading," ASTM STP 677, 1979, 365-380.
- 6- Newman, J. C., Jr., and Raju, I. S., "Stress intensity factor for internal surface cracks in cylindrical pressure vessels," Journal of Pressure Vessel Technology, 1980, 102:342-346.



- 7- Raju, I. S., and Newman, J. C., Jr., "Stress intensity factor for internal and external surface cracks in cylindrical vessels," *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1982, 104:293-298.
- 8- Lin, X. B., and Smith, R. A., "Fatigue growth prediction of internal surface cracks in pressure vessels," *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1998, 120:17-23.
- 9- Kim, Y. J., Kim, J. S., Park, Y. J., and Kim, Y. J., "Elastic Plastic fracture mechanics method for finite internal axial surface cracks in cylinders," *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, in press.
- 10- Daniel Massicotte, finite element calculations of stresses and deformations in buried flexible pipes, MSc. thesis, University of Ottawa, Canada, 2000.
- 11- M. E. Smith, A. Beck, R. Thiel, P. Metzler, designing for vertical pipe deflection under high loads, proceeding of North American Geosynthetics Society conference, USA, 2005.
- 12- A. R. Ragab, S. E. Bayoumi, *Engineering Solid Mechanics*, CRC Press, 1999.