



## بررسی اثرات تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر روی رشد ترک طولی لوله با روش المان محدود

نویسنده: سید علیرضا اولادرسول

دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه صنعت نفت

**چکیده:** یک لوله با ابعاد هندسی کوچک طراحی شده و مبنای طراحی لوله، اندازه ضخامت جدار لوله تعریف شده است. نوع لوله طراحی شده، مشابه لوله انتقال صنایع نفت و گاز و پتروشیمی می باشد. با توجه به فرآیند تولید و ساخت لوله ها، عیوب ریز ساختار درون دیواره ضخامت لوله معمولاً وجود دارند و عوامل بروز ایجاد ترک عیوب ریز ساختار هستند، که در هنگام بارگذاری یا با عبور جریان هیدرودینامیک ناشی از پمپاژ با فرکانس تحریک خاص و مقادیر متفاوت فشار، از دورن لوله باعث تاثیر روی تنش ها و تغییرشکل ها و نرخ رشد ترک و در نهایت باعث شکست در لوله می شود. در این مقاله تغییرات زمانی فشار جریان تراکم ناپذیر روی رشد ترک طولی لوله با تحلیل های مختلف و با هدف پیش بینی رشد ترک بررسی می شود. طبق تحلیل ها نوع مود ترک بازشوندگی با شکل هندسی بیضی است. در پیش فرض تحلیل ها تغییرات دما قابل اغماض و دمای لوله همواره ثابت می باشد. با توجه به سختی جنس آلیاژ لوله و اندازه ضخامت و عیوب ریز ساختار و عیوب سطحی و میزان انرژی شکست در واحد حجم آلیاژ و شرایط بارگذاری، نرخ رشد ترک طولی می تواند کم یا زیاد باشد. علاوه بر نرخ رشد ترک، طول ترک، طول بحرانی ترک، زمان رسیدن ترک ها، مقاومت باقی مانده در دیواره لوله اهمیت زیادی دارند. شرط لازم رشد ترک افزایش شدت تنش تا حد شدت تنش بحرانی است. براساس تحلیل های نرم افزاری با Abaqus جابجایی ترک با نرخ زیادی صورت می گیرد و در نواحی دارای ترک بزرگتر به علت سطوح کوچک جدا شده در دیواره لوله دارای مقادیر تنش های بیشتر و مطابق قانون هوک تغییرشکل های زیادی می باشد، حداکثر تنش و حداکثر تغییرشکل روی سطح بیرونی و نزدیک ترک های بزرگ اتفاق افتاده است. لرزش ها یا ارتعاشات ناشی از پمپ ها باعث ایجاد تغییرات بزرگتر تنش ها و تغییرشکل ها و جابجایی ها در مدت زمان کوتاه و در نتیجه باعث افزایش نرخ رشد ترک طولی لوله می شوند. نتایج نشان می دهند که تغییرات زیاد تنش ها روی المان های دیواره لوله باعث گسترش رشد ترک در امتداد طول لوله می شود.

**کلید واژه ها:** ضخامت لوله، تغییرشکل، تنش، فشار جریان، رشد ترک



## مقدمه

مطابق استاندارد ASME B36.19 لوله ای با ابعاد هندسی قطر خارجی  $OD=8.625 \text{ (inch)}=219.1 \text{ (mm)}$  و قطر داخلی  $ID=7.981 \text{ (inch)}=202.717 \text{ (mm)}$  و طول  $L=236.2205 \text{ (inch)}=6 \text{ (m)}=6000 \text{ (mm)}$  و ضخامت لوله  $t=0.322 \text{ (inch)}=8.18 \text{ (mm)}$  طراحی شده است. به دلیل رابطه عکس تنش برشی (تنش ناشی از فشار جریان) با ضخامت، ماکزیمم ضخامت برای طراحی در نظر گرفته می شود، بنابراین مبنای طراحی لوله، اندازه ضخامت جدار لوله می باشد، که با توجه به رابطه تنش برشی در دیواره لوله تعیین می شود. طراحی ضخامت مقطع براساس فاصله از محور خنثی لوله تعریف شده است. طول لوله مبنای طراحی نمی باشد، طول لوله می تواند کوچک یا بزرگ یا بی نهایت در نظر گرفته شود. با توجه شکل هندسی لوله، در ابتدا ضخامت جدار لوله یکنواخت و بدون تغییر می باشد. فرض شده دمای دیواره لوله با گذشت زمان در طول لوله تغییر نخواهد کرد. با توجه به تحقیقات بررسی اثرات تغییرات فشار جریان روی رشد ترک طولی دیواره لوله در محدوده فشارهای زیاد تعریف شده است و فقط در محدوده کلاس های فشار استاندارد API 6D نیست. هنگام عبور جریان سیال متلاطم و تراکم ناپذیر از درون لوله، تغییرات فشار جریان روی سطح هر المان مکعبی در دیواره لوله باعث ایجاد تنش ها و تغییر شکل هایی در محدوده الاستیک خطی می شود، به علت وجود عیوب ریز ساختار در ابعاد میکرومتر، سبب شروع جوانه زنی ترک یا ترک های بسیار کوچک در یک بخش یا بخش هایی از محیط پیوسته دیواره لوله می شوند و مقاومت فشاری المان های دیواره لوله در مقابل تنش های موجود به علت فضای خالی بسیار کوچک بین برخی لایه ها، فضای خالی در برابر تنش کششی باعث تضعیف مقاومت کششی دیواره لوله می شود، فضاهای خالی عامل تغییر شکل های غیریکنواخت در دیواره لوله می باشند و با افزایش تغییرات فشار جریان، مقادیر تنش های عمودی به تنش تسلیم عمودی آلیاژ فولاد نزدیک شده و شدت تنش در مکان میکرو ترک افزایش می یابد و با افزایش نرخ تغییر شکل های لایه های ضخامت جدار لوله در محدوده الاستیک خطی و غیرخطی میکرو ترک ها با مود بازشوندگی رشد می کنند، اما همچنان شکل کلی لوله یکنواخت است. در واقع نرخ رشد ترک نرخ تغییر شکل پلاستیک ناشی از رشد ترک می باشد. با توجه به تحقیقات با افزایش زیاد شدت تنش در مکان میکرو ترک، در مراحل اولیه بارگذاری ها به علت سختی مواد آلیاژ فولاد نرخ رشد ترک با مود بازشوندگی به تدریج افزایش می یابد. در مراحل اولیه رشد ترک به صورت دو بعدی است. طبق مدل وستگارد جابجایی گره های المان های مکعبی در راستای عمودی و افقی در شرایط اولیه با افزایش زاویه دهانه نوک ترک، سبب افزایش رشد میکرو ترک ها در مدت زمان کوتاه می شوند. طبق مدل اروین در رابطه میدان تنش ها، طول ترک و شعاع دهانه ترک در شرایط اولیه به تدریج افزایش یافته و در مراحل بعدی با افزایش تغییر شکل پلاستیک نوک ترک، به علت کار سختی مواد آلیاژی فولاد مقاومت فشاری و مقاومت کششی افزایش یافته و نرخ رشد ترک در طول لوله افزایش بسیار کمی دارد به همین دلیل طول ترک متناظر با رشد ترک، افزایش کمی دارد. با افزایش شدت تنش و افزایش نرخ رشد ترک ناشی از نرخ تغییر شکل پلاستیک، دهانه ترک گسترش یافته و ترک های بیضوی در دیواره لوله ایجاد می شود. طبق تحقیقات و تحلیل رشد ترک با نرم افزار Abaqus تا مادامی که شدت تنش به مقدار شدت تنش بحرانی نرسیده، مقاومت فشاری لوله ناگهانی کاهش نمی یابد، اما هنگامی که رشد ترک ناشی از نرخ تغییر شکل پلاستیک، به طور ناگهانی افزایش یابد، شدت تنش بحرانی است و در زمان بسیار کوتاه باعث شکست ناگهانی لوله می شود. نتایج تحقیقات و تحلیل ها نشان داد که مقادیر نرخ رشد ترک باید همواره کمتر از نرخ بحرانی رشد ترک  $(ER)_C = 62 \text{ (1/s)}$  و مقادیر شدت تنش باید کمتر از شدت تنش بحرانی  $3776.075 \text{ (Mpa)}\sqrt{\text{(mm)}}$  باشند. طبق تحقیقات و شرایط بارگذاری لوله و میزان انرژی کرنش  $E_R$  رها شده برای رشد ترک، طول بحرانی ترک  $a_C \leq 485 \text{ (mm)}$  بیشتر از 8 درصد طول لوله است. انرژی کرنش  $U$  می باشد. ارتعاشات پمپ ها روی تنش ها و تغییر شکل ها تاثیر قابل توجهی دارد و افزایش تنش ها و تغییر شکل ها متغیر با زمان هستند و ارتعاشات لوله در مدت کوتاهی با اصطکاک و میرایی از بین می روند. در نوک ترک ها با توجه به سطح بسیار کوچک مقادیر تنش ها بی نهایت هستند. برای جلوگیری از رشد ترک، تعیین زاویه رشد ترک اهمیت زیادی دارد، زاویه اولیه رشد ترک براساس تغییر شکل پلاستیک ایجاد می شود. بنابراین تعیین محدوده تغییر شکل ها در طراحی بسیار اهمیت دارد.



## مبنای طراحی و خصوصیات لوله

### مبنای طراحی لوله

محور خنثی لوله یعنی مکانی که تنش ها و کرنش ها صفر می باشند، برای بررسی تنش برشی موضعی، مینیمم یا ماکزیمم فاصله شعاعی  $r$  یک نقطه خاص از محور خنثی در لوله را در نظر گرفته شده است و از تنش برشی نسبت به فاصله  $r$  از محور خنثی مشتق گیری می نماییم. تعیین فاصله  $r$  هر گره از محور خنثی و تعیین ضخامت  $t$  براساس مشتق گیری تنش برشی نسبت به فاصله از محور خنثی مبنای طراحی لوله می باشد.

### خواص هندسی و جرم و خواص مکانیکی جنس آلیاژ لوله

لوله مورد بررسی با ابعاد معین با مرکز هندسی حجم لوله با مختصات دستگاه دکارتی ( $X=0, Y=0, Z=L/2$ ) یا مختصات استوانه ای ( $r=0, \theta=0, z=L/2$ ) تعیین شده است. جنس آلیاژ مهندسی لوله آلیاژ فولاد ضد زنگ است، که به علت مقاومت کششی و فشاری زیاد انتخاب شده است و نیز مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش بالایی دارد. آلیاژ فولاد لوله با مدول الاستیسیته 190 (Gpa) و نسبت پواسن 0.26 و چگالی  $7800 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$  و تنش تسلیم کششی 205 (Mpa) می باشد. جرم لوله 254.011 (Kgr) می باشد. مرکز هندسی جرم بر مرکز هندسی حجم لوله منطبق است. با توجه به خواص مکانیکی جنس آلیاژ فولاد لوله و نیز شکل هندسی متقارن قابلیت انعطاف پذیری خوبی دارد و به همین دلیل تحت تاثیر فشار جریان تراکم ناپذیر پمپاژ به طور تقریبی تغییر شکل های متقارن ایجاد خواهد شد.

### تعیین فشار جریان سیال تراکم ناپذیر و بارگذاری یک المان مکعبی لوله

براساس معیار اولیه جریان ذرات سیال از یک مقطع خاص عبور می نمایند و مطالعه فشار جریان ذرات سیال روی هر یک از مقطع ها می باشد و مجموعه مقاطع حجم کنترل مورد مطالعه بیانگر لوله است. براساس دینامیک ذرات سیال، حرکت ذرات با زمان تغییر می کند، پس جریان سیال در حالت ناپایا در نظر گرفته شده است. رابطه فشار جریان داخل لوله بر حسب مختصات دستگاه استوانه ای بیان می شود. پارامتر  $r$  شعاع داخلی لوله و پارامتر  $T$  زمان است. جریان سیال همیشه آرام نیست و درهم است بنابراین جریان ناپایدار است. فشار جریان تابع ضمنی از زمان می باشد، اما در حالت پایا می توان تغییرات فشار جریان با زمان را ثابت در نظر گرفت. زاویه  $\theta$  تابعی از پارامتر زمان می باشد، پارامتر  $\omega$  سرعت زاویه ای چرخش المانی از مجموع ذرات است. تابع متناوب  $S(\theta) = S(\omega T) = B_1 \sin(\omega T) + B_2 \cos(\omega T) \cong B_1 \sin(\omega T)$  که می تواند با توجه به حرکت ارتعاشی پیچشی شافت دینام پمپ، در این مبحث با توجه به حرکت تعریف شده شافت، به صورت تابع متناوب سینوسی بیان شود. پارامتر  $B_0$  ثابت تابع کلی متناوب فشار جریان ذرات سیال و پارامتر ثابت  $B_1$  با شرایط اولیه تعیین می شوند، بنابراین تابع متناوب فشار جریان در حالت کلی به صورت  $p \cong B_0 B_1 \sin(\omega T) = p_0 \sin(\omega T)$  بدست می آید، که در آن ضریب ثابت  $p_0$  دامنه تابع کلی متناوب فشار جریان می باشد. هنگامی که فشار جریان ماکزیمم می شود، عبارت  $\sin(\omega T) = 1$  و فشار جریان برابر دامنه فشار  $p_{\max} = p_0$  خواهد شد. برای تعیین موقعیت المانی از مجموع ذرات سیال درون حجم کنترل (لوله) نسبت به موقعیت اولیه، گرادیان فشار جریان در دستگاه مختصات استوانه ای به کار برده می شود. روابط (1) و (2) با مطالعه کتاب مکانیک سیالات فاکس و وایت نوشته شده اند.

$$p = p(r, \theta, z) = \sum p_k(r, \theta, z) \quad \text{و} \quad p = p(r, \theta, z, T) = \sum p_k(r, \theta, z, T) \quad (1) \quad \text{توابع فشار جریان در حالت ناپایا و حالت پایا}$$



$$\nabla P = \frac{\partial p}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (2)$$

گرادیان فشار جریان

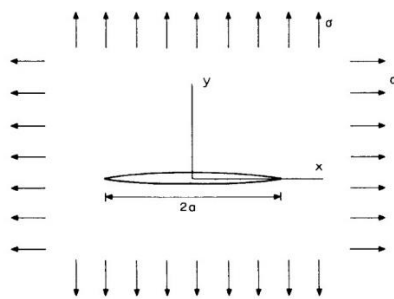
## تعیین عوامل ایجاد و رشد ترک

### عیوب ریز ساختار

وقتی لوله تولید شد، بخش هایی از دیواره لوله در مقیاس میکرومتر خالی و در مقیاس اتمی فاصله اتم ها زیاد است، به همین دلیل عیوب ریز ساختار عامل ایجاد ترک های بسیار کوچک می باشند. این عیوب با افزایش تنش ها و تغییر شکل ها به تدریج یا ناگهانی باعث ایجاد ترک ها و رشد ترک ها می شوند. که می تواند نرخ رشد ترک را کاهش یا افزایش دهد.

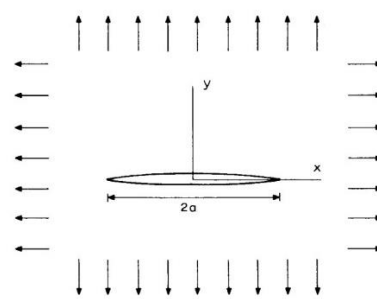
### شکل هندسی ترک

بارگذاری خستگی یا فشار جریان هیدرودینامیک روی سطح داخلی لوله، عامل حرکت نابجایی ها و حرکت لغزشی لایه ها بر روی یکدیگر می باشد. حرکت لغزشی لایه ها، باعث ایجاد فرورفتگی و برآمدگی و نیز جدایش مرزدهانه ها می شود. شروع جوانه زنی ترک ها ناشی از تنش های صفحه ای و شکل هندسی ترک ها به صورت دو بعدی است، بر روی سطح یک المان کوچک مکعبی شکل مربوط به لوله، دارای عیوب ریز ساختار ترک ها به شکل بیضی هستند. تنش های دو بعدی دارای مقادیر متفاوت یا مقادیر مساوی در سطوح جانبی المان کوچک مکعبی شکل اعمال می شوند. شکل شماره (2) مربوط به شکل هندسی میکرو ترک بیضی می باشد. شکل شماره (1) و شکل شماره (2) مربوط به منبع [16] می باشند.



شکل شماره (2) شکل میکرو ترک بیضی حالت دوم تنش ها دارای

مقادیر مساوی



شکل شماره (1) شکل میکرو ترک بیضی حالت اول تنش ها دارای

مقادیر متفاوت

## تعیین تنش ها و تنش های اصلی و مولفه های جابجایی نوک ترک مد بازشوندگی براساس مدل وستگارد

در این بخش مد اول نوک ترک براساس مدل وستگارد بررسی شده است. مطابق مدل وستگارد تنش های نوک ترک و مولفه های جابجایی و تنش های اصلی در دستگاه مختصات قطبی مشخص شده است، نوع ترک بازشونده و طول ترک روی جدار لوله  $2a$  می باشد، رشد ترک در اثر تمرکز تنش در نوک ترک به فاصله  $a$  از مرکز ترک است. اگر یک دستگاه مختصات دکارتی مختلط در نوک ترک تعریف نماییم، فاصله از نوک ترک روی محور موهومی  $Z$  نسبت به مبدا مختصات دکارتی مختلط،  $\xi$  مشخص خواهد شد. عبارت  $\text{Im}(Z)$  بخش موهومی عدد مختلط  $Z$  می باشد. برای ترک کوچک مقدار  $\xi$  در حالت حدی به سمت صفر میل می کند. برای تعیین میدان تنش ترک



غیر خطی باید از قاعده جمع آثار خطی استفاده نمود. ضریب ثابت  $k$  مربوط به ضریب میدان تنش  $\sigma_x = (k-1)\sigma$  و  $\sigma_y = \sigma$  می باشد. مقدار تنش  $\sigma = p$  برابر فشار جریان هیدروستاتیک است. عبارت  $K_I$  شدت تنش و ضریب  $\theta$  نسبت پواسان می باشد. روابط (3) و (4) و (5) و (6) و (7) و (8) مربوط به منبع [24] می باشند. طبق مدل وستگارد رابطه بین تصویر مقادیر جابجایی های قطبی و تصویر مقادیر جابجایی های دکارتی به صورت  $u_r = u$  و  $u_\theta = -v$  می باشند. در حالتی که به جای تنش صفحه ای، شرایط کرنش صفحه ای باشد، رابطه تنش عمود بر صفحه ورق با دیگر تنش های عمودی  $\sigma_z = \theta(\sigma_x + \sigma_y)$  و رابطه دیگر تنش عمودی  $\sigma_z = \frac{2\nu K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$  بیان می شود. در رابطه تنش عمودی پارامتر  $\theta$  نسبت پواسان است. رابطه (14) مربوط به مولفه جابجایی عمودی ماکزیمم در مرکز ترک می باشد. رابطه جابجایی عمودی با نیرو  $v = CF$  و در رابطه نیرو و جابجایی ضریب  $C$  نرمی و معکوس ضریب فتر است. رابطه جابجایی با نیرو و روابط (9) و (10) و (11) و (12) و (13) مربوط به منبع های [16] و [24] می باشند. در رابطه (14) پارامتر  $k'$  یک ثابت است و بر حسب ابعاد بیضوی ترک، یعنی قطر بزرگ بیضی  $a$  و قطر کوچک بیضی  $b$  در رابطه زیر مشخص می شود. رابطه (14) مربوط به منبع [24] می باشد.

$$\xi = Z - a \quad (3) \quad \text{فاصله از نوک ترک}$$

$$u = \frac{(1+\theta)K_I}{E} \left( \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) (k - \cos(\theta)) \quad (4) \quad \text{مولفه جابجایی افقی}$$

$$v = \frac{(1+\theta)K_I}{E} \left( \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) (k - \cos(\theta)) \quad (5) \quad \text{مولفه جابجایی عمودی}$$

$$\xi = \xi(r, \theta) = re^{i\theta} \quad (6) \quad \text{فاصله از نوک ترک}$$

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (7) \quad \text{ضریب شدت تنش}$$

$$K_I = \lim_{\xi \rightarrow 0} \sqrt{2\pi\xi} (\text{Im}(Z)) \quad (8) \quad \text{ضریب شدت تنش}$$

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \quad (9) \quad \text{تنش عمودی}$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \quad (10) \quad \text{تنش عمودی}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (11) \quad \text{تنش برشی}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (12) \quad \text{تنش عمودی اصلی}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (13) \quad \text{تنش عمودی اصلی}$$

$$v_{\max} = \frac{k'+1}{4\mu} \sigma a \quad (14) \quad \text{جابجایی عمودی ماکزیمم}$$

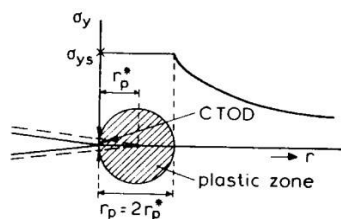
$$k' = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad \text{پارامتر ثابت مربوط به قطرهای ترک بیضوی}$$

ترک بیضوی سه بعدی

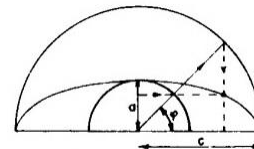
بعد از شروع جوانه زنی ترک و رشد میکرو ترک دو بعدی، با رشد ترک یا رشد ترک های مجاور هم یک ترک سه بعدی ایجاد می شود و شکل هندسی ترک بیضوی و ادامه رشد ترک بیضوی می باشد. نتیجه تحلیل اروین برای ضریب شدت تنش ترک بیضوی به صورت رابطه زیر بیان می شود. پارامتر  $r_p^*$  فاصله ناحیه پلاستیک از دهانه ترک می باشد. تنش عمودی تسلیم  $\sigma_{ys}$  از رابطه فون مایزس تعیین می شود. پارامتر  $V$  در رابطه انرژی کرنش  $U$  حجم است. شکل شماره (3) و (4) و (5) و روابط (15) تا (22) و روابط (26) تا (30) ناحیه ترک مربوط به منبع [16] و روابط (23) و (24) و (25) مربوط به منبع [11] می باشند. در رابطه انرژی کرنش رها شده  $E_R$  پارامتر  $B$  طول و در رابطه انرژی سطح پارامتر  $\gamma$  انرژی واحد سطح می باشد. در این مقاله با بررسی انرژی واحد سطح  $0.006356 \text{ (J/(mm}^2\text{))} = 0.006356$   $\gamma = (MJ/(m)^2) = 6356 \text{ (J/(m}^2\text{))}$  تعریف شده است. طبق تحلیل گریفیث شرط رسیدن طول ترک به طول ترک بحرانی با رابطه زیر بیان می شود. شکل زیر مربوط به لوله تحلیل تنش ها به همراه ترک ایجاد شده را نشان می دهد.

$$\frac{dE_R}{da} \geq \frac{dE_S}{da}$$

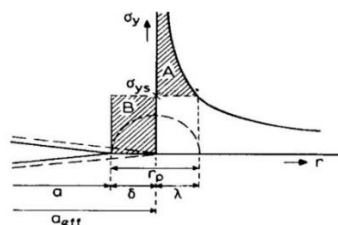
شرط طول ترک بحرانی



شکل شماره (4) تصحیح ناحیه پلاستیک مدل اروین



شکل شماره (3) شکل هندسی ترک بیضوی



شکل شماره (5) تخمین دوم اندازه ناحیه پلاستیک

$$K_I = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\varphi} \left( \sin^2 \varphi + \left( \frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \varphi \right)^{\frac{1}{4}} \quad (15) \quad \text{ضریب شدت تنش}$$

$$\varphi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[ 1 - \left( \frac{c^2 - a^2}{c^2} \right) \sin^2 \varphi \right]^{\frac{1}{2}} d\varphi \quad \text{و} \quad \varphi = \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \left( \frac{a^2}{c^2} \right) \quad \text{انتگرال نوع بیضی دوم}$$

$$\text{COD} = 2v = \left( \frac{4\sigma}{E} \right) \sqrt{a^2 - x^2} \quad (16) \quad \text{جابجایی دهانه ترک}$$

$$\text{COD} = \left( \frac{4\sigma}{E} \right) \sqrt{(a + r_p^*)^2 - x^2} \quad (17) \quad \text{جابجایی دهانه ترک}$$

$$\text{COTD} = \left( \frac{4\sigma}{E} \right) \sqrt{(a + r_p^*)^2 - a^2} \approx \left( \frac{4\sigma}{E} \right) \sqrt{2ar_p^*} \quad (18) \quad \text{جابجایی دهانه نوک ترک}$$



$$p \cdot c \cdot f = \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ys}} \right) \quad (19) \quad \text{ضریب قید پلاستیک}$$

$$G = (1 - \vartheta^2) \left( \frac{K_I^2}{E} \right) \quad \text{و} \quad G = \left( \frac{K_I^2}{E} \right) \quad (20) \quad \text{معیار انرژی}$$

$$G_{IC} = \left( \frac{\pi a \sigma^2}{E} \right) \quad (21) \quad \text{معیار گریفیث}$$

$$U = V \cdot \int \epsilon d\sigma = V \cdot \frac{\sigma^2}{2E} \quad (22) \quad \text{رابطه انرژی کرنش}$$

$$E_R = \frac{\pi a^2 B \sigma^2}{E} \quad (23) \quad \text{رابطه انرژی کرنش رها شده}$$

$$E_S = 4aB\gamma \quad (24) \quad \text{رابطه انرژی سطح}$$

$$a_c \leq \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2} \quad (25) \quad \text{رابطه طول ترک بحرانی}$$

$$r_p^* = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_{ys}} = \frac{\sigma^2 a}{2\sigma_{ys}^2} \quad (26) \quad \text{اندازه ناحیه پلاستیک}$$

$$\lambda = \frac{\sigma^2(a+\delta)}{2\sigma_{ys}^2} \approx r_p^* \quad (27) \quad \text{فاصله}$$

$$\delta = r_p^* \quad (28) \quad \text{فاصله}$$

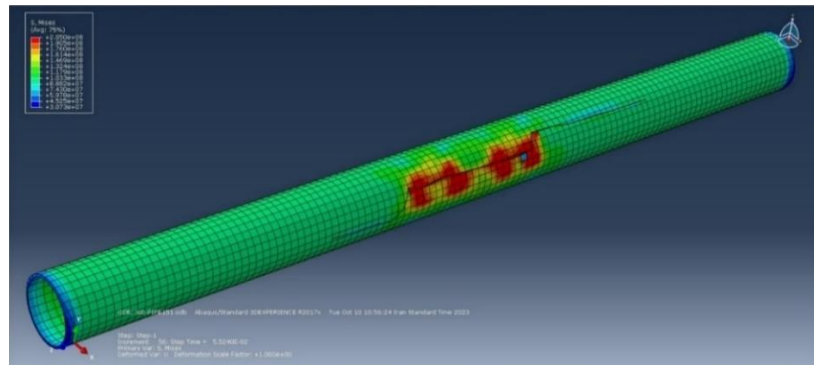
$$r_p = \lambda + \delta = 2r_p^* \quad (29) \quad \text{فاصله}$$

$$(\delta + r_p^*)\sigma_{ys} = \sigma\sqrt{2ar_p^*} \quad (30) \quad \text{طول بخش پلاستیک ترک}$$

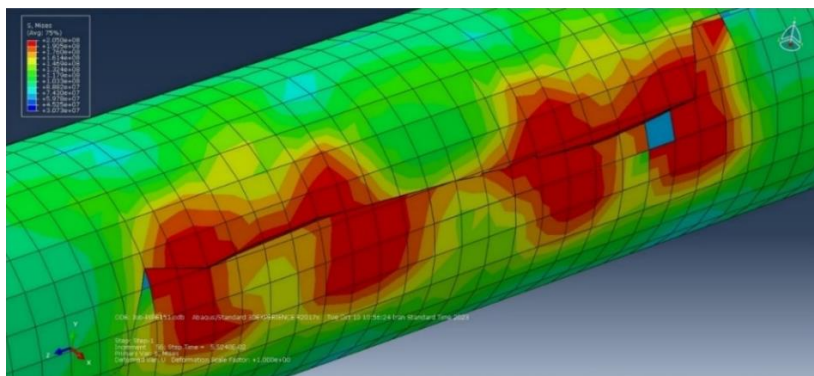
### بررسی رشد میکرو ترک طولی لوله در شرایط اولیه

هنگامی که جریان تراکم ناپذیر با فشار  $p=800 \text{ (psi)}=5515805.6 \text{ (pa)}$  وارد لوله می شود، بعد از شروع جوانه زنی ترک، میکرو ترک های اولیه به تدریج رشد می کنند و بعد از مدت زمانی به طور ناگهانی و با نرخ زیاد ترک رشد می کنند و طول ترک پیوسته به طور ناگهانی افزایش می یابد. ممکن است نرخ رشد ترک به نرخ بحرانی رشد ترک برسد و منجر به شکست ناگهانی در طول لوله شود. در شرایط فشار جریان معین، طبق مدل وستگارد در یک صفحه فاصله عمودی از نوک ترک  $Z=1.8 \text{ (}\mu\text{m)}=0.0018 \text{ (mm)}$  و نصف طول ترک در راستای افقی یا فاصله افقی یک انتهای دهانه ترک تا مرکز ترک  $a=1.0 \text{ (}\mu\text{m)}=0.0010 \text{ (mm)}$  و فاصله  $\xi = Z - 0.8 \text{ (}\mu\text{m)}=0.0008 \text{ (mm)}$  و  $K_I = (5.5158056)\sqrt{\pi(0.0010)} \text{ (Mpa)}\sqrt{\text{(mm)}}$  و ضریب شدت تنش  $r=0.6 \text{ (}\mu\text{m)}=0.0006 \text{ (mm)}$  و فاصله شعاعی دهانه ترک  $a = \sigma\sqrt{\pi a} = 1.5 \text{ (deg)}$  و ضریب  $k=1.1$  در شرایط اولیه تعریف شده اند. فرض شده که نرخ رشد ترک در حالت اولیه  $(ER) = 0.001 \text{ (1/s)}$  و با توجه به میزان بسیار کم انرژی شکست و میزان زیاد سختی و مقاومت کششی و مقاومت فشاری آلیاژ فولاد لوله تعریف شده است، در شرایط اولیه مقاومت ها و سختی آلیاژ لوله در مقیاس ریزساختار دارای مقادیر زیادی هستند. فرض می شود که در مدت زمان  $\Delta t = 1 \text{ (s)}$  همه پارامترها به جز زاویه  $\theta$  ثابت هستند، بنابراین با ایجاد نمودار شماره (4) تغییرات جابجایی  $u$  نسبت به تغییر زاویه  $\theta$  و نمودار شماره (5) تغییرات جابجایی  $v$  را نسبت به تغییر زاویه  $\theta$  بررسی می شوند. توجه شود که همه پارامترها متغیر و

برخی در بازه های زمانی خاص تغییر می نمایند. فرض می شود که در مدت زمان  $\Delta t = 1$  (s) همه پارامترها به جز طول ترک  $a$  ثابت هستند، نمودار شماره (6) تغییرات جابجایی  $u$  نسبت به تغییر طول ترک  $a$  و نمودار شماره (7) تغییرات جابجایی  $v$  نسبت به تغییر طول ترک  $a$  را نشان می دهند.



شکل شماره (6) تحلیل تنش فون مایزس در لوله



شکل شماره (7) تحلیل رشد ترک لوله

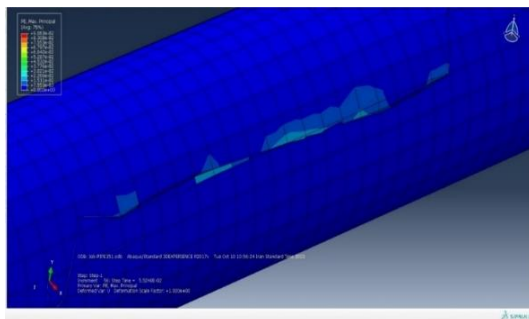
## اثرات ارتعاشات ماشین آلات دوار روی لوله

دامنه ارتعاش لوله می تواند دامنه ارتعاش تجهیزات دوار باشد. حداکثر دامنه ارتعاش زمانی اتفاق می افتد که فرکانس تابع فشار (CD) برابر فرکانس طبیعی درجه آزادی منفرد (con) باشد، که در این حالت تشدید وجود دارد. دامنه این ارتعاش تشدید وابسته به میرایی جزء این تقویت، را می توان با ضریب بزرگنمایی دینامیکی (DMF) اندازه گیری نمود، ضریب بزرگنمایی دینامیکی به صورت نسبت حداکثر دامنه دینامیکی ( $X_{jmax}$ ) به دامنه حرکت استاتیکی ( $P_0/k$ ) تعریف می شود. میرایی در یک سیستم لوله کشی از ترکیب میرایی مواد پلاستیسیته و میرایی ساختاری (اصطکاک و ....) حاصل می شود. بنابراین میرایی سیستم تابعی از دامنه ارتعاش است. هر چه ارتعاش بزرگتر باشد، میرایی آلیاژ لوله بیشتر می شود. ارتعاشات با دامنه کوچک الاستیک هستند و اصطکاک کمی دارند. در این موارد، میرایی

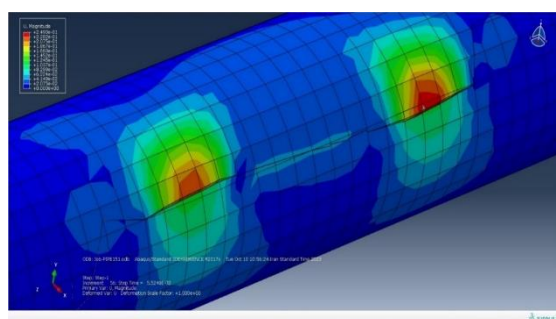


بسیار کوچک در حد 0.5 درصد خواهد بود. ارتعاشات بزرگ که شامل تغییر شکل پلاستیک و لغزش لوله‌ها بر روی تکیه‌گاه‌ها می‌شوند، می‌توانند میرایی بزرگی در حدود 20 درصد یا بیشتر داشته باشند. ارتعاش ناشی از جریان تراکم‌ناپذیر با یک اختلال جریان مداوم شروع

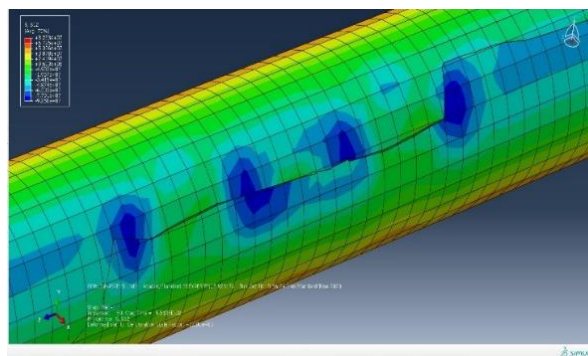
می‌شود که یک پالس فشار دوره ای  $P(t)$  ایجاد می‌کند. در تغییر جهت (زانویی، سه راهی، خم) یا تغییر در مقطع جریان (دریچه، روزنه، کاهنده) این پالس فشار  $P(t)$  باعث ایجاد نیروهای ضربانی  $F(t)=A.P(t)$  روی لوله می‌شود و باید ارتعاشات ناشی از جریان تراکم‌ناپذیر در لوله کشی و خطوط لوله بررسی شود. جریان ورودی به پمپ باید تا حد امکان از راه مقطع لوله یکنواخت باشد تا از جریان نامتعادل در محفظه پمپ جلوگیری شود، به همین دلیل در لوله‌های ورودی افقی باید از منابع جریان غیریکنواخت اجتناب شود. در ورودی پمپ طول لوله افقی 5D تا 10D کافی می‌باشد، تا جریان یکنواخت از آخرین خم یا زانو قبل از ورود به پمپ برقرار شود. با داشتن لوله ورودی عمودی، زانوها باید شعاع بیشتری داشته باشند. هنگامی که جریان پایین دست یک روزنه یا دریچه غیریکنواخت است، باید طول کافی لوله مستقیم با کاهش مقطع 5D تا 10D برای برقراری مجدد جریان یکنواخت وجود داشته باشد. مطالب براساس منبع [12] می‌باشند. طبق تحقیقات نوع سیستم ارتعاشی لوله با پمپ یا پمپ‌ها، ارتعاشات پیچشی سیستم یک درجه آزادی است، با توجه به اینکه گشتاور پیچشی برگشت پذیر یا الاستیک لوله با حاصل ضرب مقاومت پیچشی در جابجایی زاویه ای  $M = K_t \cdot \theta$  برابر است و از آنجایی که گشتاور پیچشی الاستیک با دامنه حرکت دورانی  $M \propto \theta$  متناسب و تنش برشی با گشتاور پیچشی  $\tau \propto M$  متناسب می‌باشد. و مطابق قانون هوک تنش با کرنش رابطه خطی دارد، تغییرات حرکت دورانی یا تغییر زاویه باعث تغییرات تنش‌ها و کرنش‌ها می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش ارتعاشات تنش‌ها و تغییر شکل‌ها، رشد ترک کاهش می‌یابد و هنگامی که شدت تنش بحرانی است، ارتعاشات لوله منجر به شکست ناگهانی لوله می‌شود.



شکل شماره (9) تحلیل تغییر شکل پلاستیک در لوله



شکل شماره (8) تحلیل بزرگنمایی جابجایی رشد ترک لوله



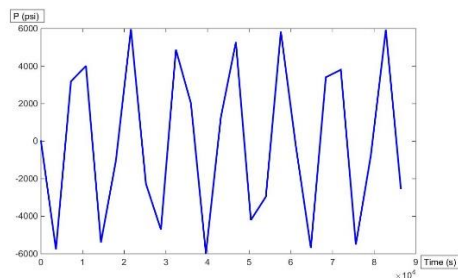


شکل شماره (10) تحلیل تنش برشی در لوله

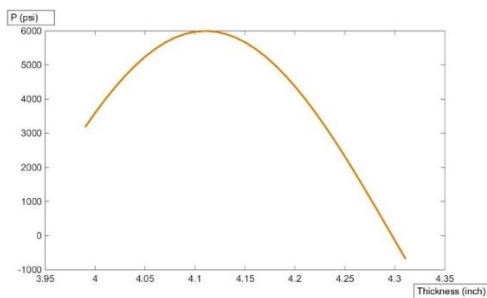
## بررسی تغییرات فشار جریان و اثرات تغییرات فشار جریان

### بررسی تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر روی ضخامت و روی رشد ترک طولی لوله

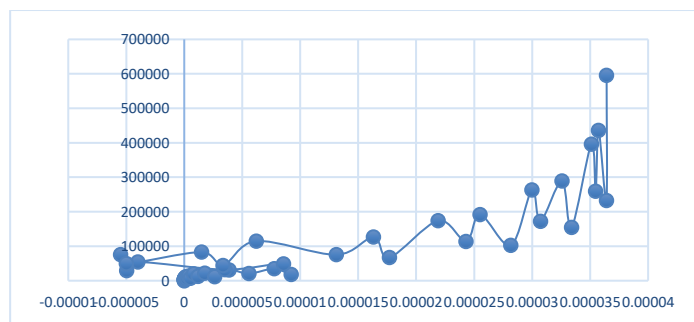
نمودار (1) تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر در مدت زمان 24 (hours) را نشان می دهد و نمودار (2) تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر نسبت به ضخامت لوله ابتدا صعودی و سپس نزولی می شود، مقادیر فشار با افزایش ضخامت کاهش می یابند. نمودار (3) تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر نسبت به رشد ترک طولی لوله است که با کاهش و افزایش مقادیر فشار جریان، رشد ترک به تدریج انجام می شود.



نمودار (1) تغییرات فشار جریان خروجی پمپ و ورودی لوله (psi) نسبت به زمان (s) 86400



نمودار (2) تغییرات فشار جریان درون لوله (psi) نسبت به ضخامت (inch)



نمودار (3) تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر درون لوله (psi) در محدوده ترک ایجاد شده و نسبت به رشد ترک طولی (inch)

## بررسی اثرات تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر در لوله

طبق تحلیل با نرم افزار Abaqus نمودار شماره (12) تغییرات تنش فون مایزس با رشد ترک در اثر کاهش سطوح جدا شده، تنش ها ابتدا به تدریج با شیب کم افزایش و سپس به علت کاهش مقاومت کششی ضخامت لوله، نمودار با شیب زیاد صعود می نماید. نمودار شماره (13) تغییرات تنش اصلی حداکثر با رشد ترک در اثر تغییرات فشار جریان و با توجه به خواص مکانیکی آلیاژ فولاد و مقاومت های کششی و فشاری، به صورت صعودی و نزولی می باشد. نمودار شماره (14) تغییرات تنش اصلی حداقل نسبت به رشد ترک به علت تغییرات فشار جریان تغییرات تدریجی و پلکانی دارد و به همین دلیل مقادیر تنش ها کاهش یافته و مقادیر تنش های منفی می باشند، تغییرات پلکانی نمودار شماره (14) به علت اثرات فشار جریان، افزایش کار سختی و نیز تغییر شکل های انقباضی در راستاهای دیگر می باشد، بنابراین با تغییرات جهت گیری المان ها و کاهش و افزایش فشار جریان، تغییرات تنش اصلی حداقل به تدریج صعودی می شود. نمودار شماره (15) مربوط به تغییرات تنش های محوری در راستای مورهای مختصات و تغییرات تنش برشی در ضخامت لوله می باشند، مقادیر تنش های محوری منفی و تغییرات نمودارها صعودی و نزولی می باشند. تنش محوری در راستای طول لوله به علت تغییر شکل های پلاستیک و رشد ترک در جهت منفی به تدریج صعودی است.

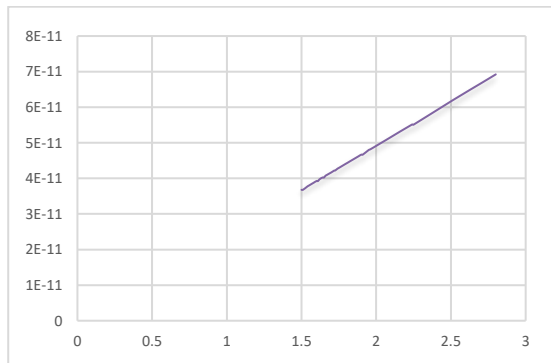
## بررسی و تعیین پارامترهای اثرات تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر روی رشد ترک طولی لوله

مطابق تحقیقات تنش  $\sigma$  ناشی از فشار جریان تراکم ناپذیر برابر  $\sigma = p_0 \sin(\omega T) = (40.334) \text{ (Mpa)}$  است، بنابراین با در نظر گرفتن فشار جریان کمتر از  $p_{\max} = p_0$  فشار ماکزیمم، شدت تنش  $K_I$  ناشی از تنش  $\sigma$  تعریف می شود و با توجه به مقدار  $K_{IC}$  به تدریج با مقدار شدت تنش بحرانی  $K_{IC}$  برابر می شود. پارامتر ثابت فشار جریان ماکزیمم  $p_{\max} = p_0$  به طور موضعی با تغییر فشار جریان پمپاژ، تغییر می کند. مطابق فرمول انتگرال  $\varphi \cong 1.17825 \text{ (rad)}$  و فرمول (15) مقدار شدت تنش  $K_I \cong 1051 \text{ (Mpa)}\sqrt{(\text{mm})}$  است و شدت تنش بحرانی برابر  $K_{IC} = 3776.075 \text{ (Mpa)}\sqrt{(\text{mm})}$  بدست آمده است، بدین معنا که دیگر نواحی بدون ترک، در اثر تغییر شکل پلاستیک و به تدریج با رشد ترک با مود بازشوندگی دچار شکست می شوند و در صورت بروز ترک با مود بازشوندگی، در اثر شدت تنش بحرانی  $K_{IC}$  نرخ رشد ترک خیلی زیاد شده  $62 \text{ (1/s)}$  و نیز انرژی شکست زیاد و منجر به شکست ناگهانی لوله با طول زیاد می شود. طبق تحلیل بدست آمده با نرم افزار Abaqus و مطابق شکل شماره (8) فاصله دو انتهای یکی از ترک های بیضوی  $2a \cong 600 \text{ (mm)}$  و ماکزیمم جابجایی عمودی در یک جهت تقریباً برابر  $v_{\max} \cong 16 \text{ (mm)}$  و طبق تحقیقات اندازه ناحیه پلاستیک  $r_p^* \cong 6 \text{ (mm)}$  و با توجه به فرمول طول بخش پلاستیک ترک  $\delta = 5.8 \text{ (mm)}$  و فاصله افقی دهانه  $\lambda \cong 6.2 \text{ (mm)}$  و فاصله در راستای محور موهومی  $x \cong 36.25i \text{ (mm)}$  و جابجایی بدون اندازه ناحیه پلاستیک،  $\text{COD} \cong 0.3894 \text{ (mm)}$  و در حالت دیگر جابجایی دهانه با اندازه ناحیه پلاستیک  $\text{COD} \cong 0.4 \text{ (mm)}$  و جابجایی دهانه نوک ترک با اندازه ناحیه پلاستیک  $\text{COTD} \cong 0.05 \text{ (mm)}$  و مقدار تنش ماکزیمم در ناحیه پلاستیک بوجود آمده در اطراف ترک بیضوی لوله برابر  $\sigma_{\max} = 1816 \text{ (Mpa)}$  است، براساس تحقیقات و طبق فرمول ضریب قید پلاستیک  $p \cdot c \cdot f = \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ys}}\right) = 8.86$  و طول ترک بحرانی  $a_c \cong \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2} = 485 \text{ (mm)}$  و  $G = \left(\frac{K_I^2}{E}\right) = 5664.6$  مقدار (20) طبق فرمول (20) می باشد.

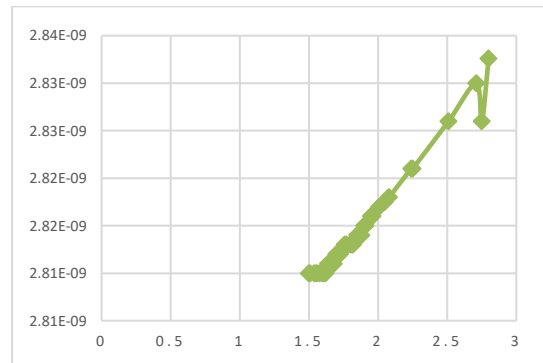
تحلیل نتایج نشان می دهند که تغییرات جابجایی افقی  $u$  با افزایش مقادیر زاویه افزایش کمی دارد و رشد ترک در راستای افقی کم می باشد. تغییرات جابجایی عمودی  $v$  با افزایش مقادیر زاویه افزایش کمی دارد و رشد ترک در راستای عمودی کم می باشد. بنابراین در شرایط اولیه و طی مدت زمان یک ثانیه  $\Delta t = 1 \text{ (s)}$  تغییرات جابجایی ها با مقادیر بسیار کم تدریجی می باشند. تغییرات جابجایی افقی  $u$



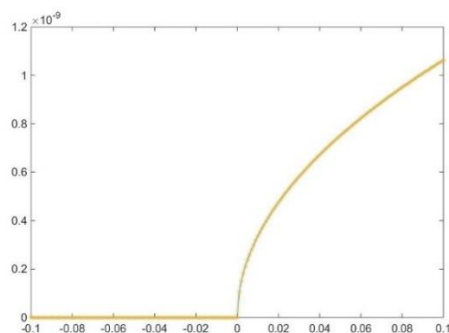
نسبت به تغییر طول ترک  $a$  افزایشی است. نمودار شماره (8) تغییرات جابجایی یک گره در راستای طول لوله به علت رشد ترک تغییرات صعودی و به علت مقاومت آلیاژ فولاد لوله تغییرات نزولی و سپس به علت افزایش شدت تنش، به صورت صعودی است. نمودارهای شماره (9) و شماره (10) به طور مشابه جابجایی گره ها روی ضخامت لوله و در راستای مخالف محورهای مختصات و از سطح خارجی لوله به سمت مرکز لوله با افزایش شدت تنش به صورت صعودی است. نمودار شماره (11) تغییرات انرژی کرنش  $U$  در اثر افزایش مجذور تنش ناشی از تغییرات فشار جریان صعودی می باشد.



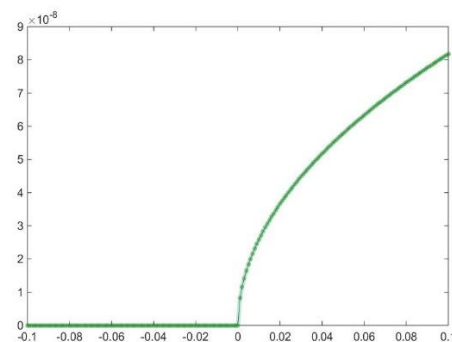
نمودار (5) تغییرات جابجایی افقی  $v$  (mm) نسبت به زاویه  $\theta$  (deg)



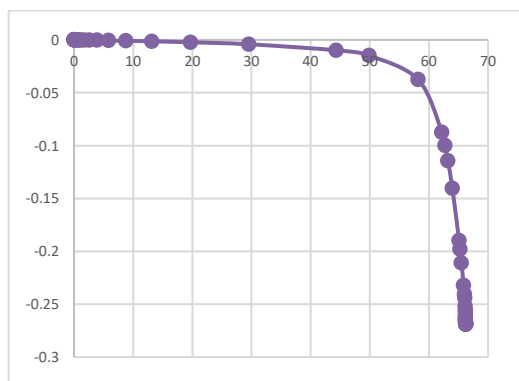
نمودار (4) تغییرات جابجایی افقی  $u$  (mm) نسبت به زاویه  $\theta$  (deg)



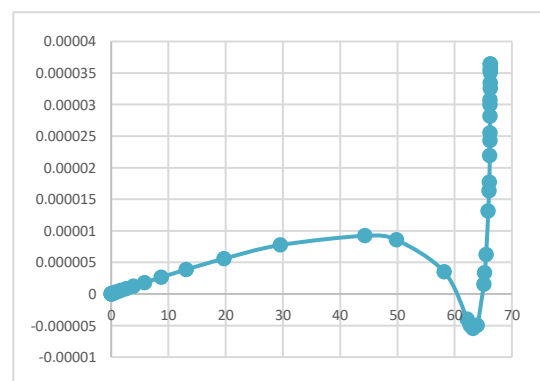
نمودار (7) تغییرات جابجایی افقی  $v$  (mm) نسبت به طول ترک  $a$  (mm)



نمودار (6) تغییرات جابجایی افقی  $u$  (mm) نسبت به طول ترک  $a$  (mm)



نمودار (9) تغییرات جابجایی یک گره در راستای محور  $x$  (mm)

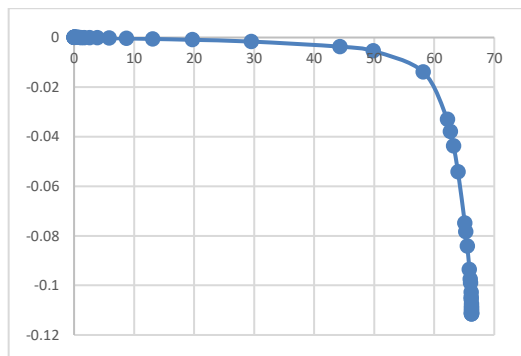
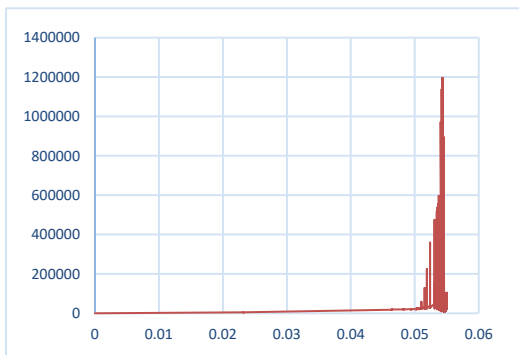


نمودار (8) تغییرات جابجایی یک گره در راستای محور  $z$  (mm)



در جهت عمود بر مسیر رشد ترک لوله نسبت به زمان (s)

در جهت مسیر رشد ترک لوله نسبت به زمان (s)

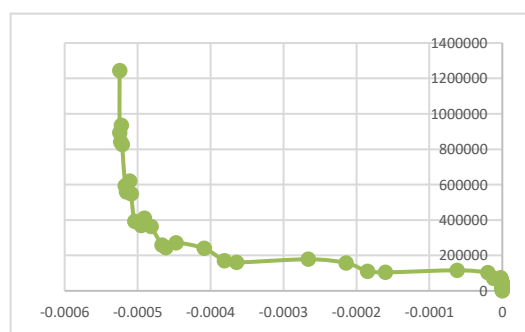
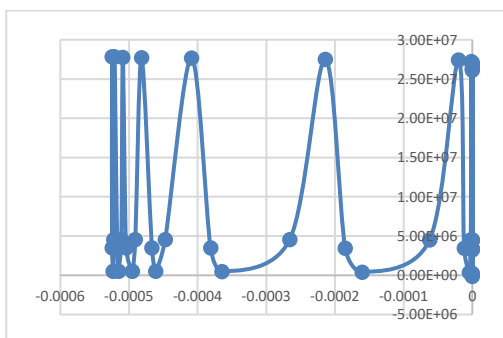


نمودار (11) تغییرات چگالی انرژی کرنش

نمودار (10) تغییرات جابجایی یک گره در راستای محور y (mm)

در جهت عمود بر مسیر رشد ترک لوله نسبت به زمان (s)

در جهت عمود بر مسیر رشد ترک لوله نسبت به زمان (s)

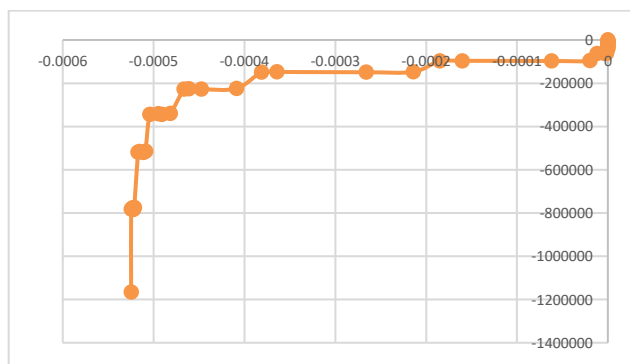


نمودار (13) تغییرات تنش حداکثر (pa) نسبت به

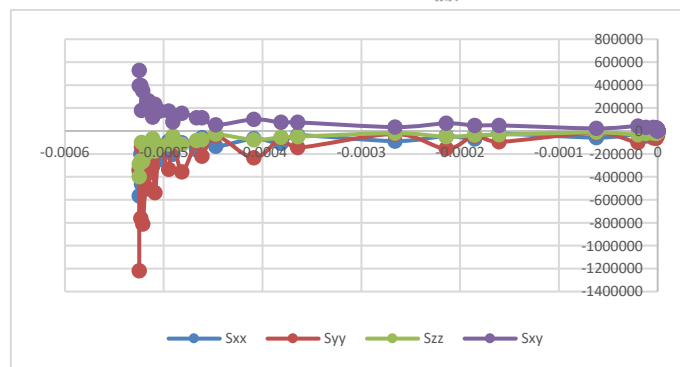
نمودار (12) تغییرات تنش فون مایزس (pa) نسبت به

رشد ترک طولی (mm)

رشد ترک طولی (mm)



نمودار (14) تغییرات تنش حداقل (pa) نسبت به رشد ترک طولی (mm)



نمودار (15) تغییرات تنش های محوری و یک تنش برشی (pa) نسبت به رشد ترک طولی (mm)

### نتایج بررسی اثرات تغییرات فشار جریان تراکم ناپذیر روی رشد ترک طولی لوله

- (1) به علت تغییرات فشار جریان یکنواخت در ورودی لوله، ضخامت لوله ثابت و بدون تغییر شکل پلاستیک است.
- (2) شروع جوانه زنی ترک با افزایش و کاهش فشار جریان تراکم ناپذیر به تدریج باعث ایجاد تغییر شکل های غیر یکنواخت و رشد ترک می شود.
- (3) با افزایش شدت تنش در محدوده الاستیک، تغییر شکل های پلاستیک در اطراف دهانه های ترک دو بعدی گسترش می یابد.
- (4) با افزایش نرخ رشد ترک و رسیدن به رشد بحرانی ترک، لوله دچار شکست ناگهانی می شود.
- (5) در صورتی که خاصیت مکانیکی انعطاف پذیری آلیاژ لوله متوسط باشد، تغییرات تنش ها به تدریج باعث رشد ترک لوله می شود.
- (6) معمولاً با آزمایش بازرسی التراسونیک یا آزمایش بازرسی رادیوگرافی، عیوب داخلی قابل کشف هستند.

### مراجع :

- [1] Smith Peter, Applications Copyright 2007 by Gulf Publish Company, The Fundamentals of Piping Design, Drafting and Design Methods for Process, ISBN-13: 978-1-933762-04-3.
- [2] Basavaraju, C., Kalavar, S.R., and Chern, C.Y., "Local Stresses in Piping at Integral Welded Attachments by Finite Element Method, 'PVP Vol. 235, ASME, 1992, pp. 27-37.
- [3] ASME Code for Pressure Piping, ASME B31.1, 1995.
- [4] Bijlaard, P.P., "Stresses from Local Loding in Cylindrical Pressure Vessels, 'ASME Transcations, Vol. 77, no. 6, August 1955.
- [5] Markl, A.R.C., "Fatigue Tests of Piping Components, Trans. ASME, 1952.
- [6] ASME B31.8, Gas Transmission and Distribution Piping Systems, 1995 edition.
- [7] ASME-B36.10M-2015-Welded-Seamless-Wrought-Steel-Pipe 2010 edition.
- [8] ASME B36.19M-2004, Stainless Steel Pipe, 1985 edition.
- [9] Donald R. Askeland, Materials science and engineering, 2009, Second Edition, ISBN-13: 978-0-495-24446-2.
- [10] William D. Callister, Materials science and engineering: an introduction, Department, ISBN-13: 9781119321590.



- [11] Prashant Kumar, Copyright 2009, Elements of Fracture Mechanics, Published by McGraw Hill Education (India) private Limited.
- [12] George A. Antaki, Piping and Pipeline Engineering Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair Copyright 2003 by Marcel Dekker, Inc. ISBN: 0-8247-0964-0.
- [13] Fatigue crack growth assessment using BS 7910:2013 - Background and recommende.
- [14] Modelling 3D interaction limits of inclined stress corrosion cracking in pressurised gas pipelines.
- [15] Influence of ovalisation on the plastic collapse of thick cylindrical tubes under uniform bending.
- [16] Broek, David, Elementary Engineering Fracture Mechanics, third edition, ISBN: 90-247-2580-1.
- [17] Dagmar E. Hauf , David M. Parks, Hyungyil Lee, A modified effective crack-length formulation in elastic-plastic fracture mechani, Received 14 December1993;accepted2 June 1994.
- [18] Mitsuhiro Okayasu, Experimental Study of Crack Closure Characteristics.
- [19] Norman E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, Fourth Edition.
- [20] Specification for Pipeline Valves, API 6D.
- [21] Robert L. Amaro, Elizabeth S. Drexler, Andrew J. Slifka, Fatigue crack growth modeling of pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen.
- [22] Zongchen Li, Xiaoli Jiang and Hans Hopman, Surface Crack Growth in Offshore Metallic Pipes under Cyclic Loads: A Literature Review.
- [23] W. Reschetnik, J.-P. Brüggemann, M.E. Aydinöz, O. Grydin, K.-P. Hoyer, G. Kullmer, H.A. Richard, Fatigue crack growth behavior and mechanical properties of additively processed EN AW-7075 aluminium alloy.
- [24] Gh. R. Rashed, S.H. Ghiasi, - Elementary Fracture Mechanics, ISBN: 970-964-975-294-5, year 2019.
- [25] P. Fassina, M.F. Brunella, L. Lazzari, G. Re, L. Vergani, A. Sciuccati, Effect of hydrogen and low temperature on fatigue crack growth of pipeline steels.