

## محاسبه منحنی رشد ترک در پوسته های استوانه ای تحت تأثیر بار ثابت مکانیکی و محیط خورنده به کمک توابع آسیب

مهران زرکش<sup>۱</sup>

دانشجوی دکترا

بسیاری از لوله ها و مخازن در صنایع، تحت تأثیر همزمان فشار درونی و محیط خورنده قرار دارند. می دانیم که هر یک از دو عامل یاد شده نقشی در رشد ترکهای موجود در این پوسته ها ایفا می کنند. در این مقاله، نخست به بررسی تأثیر این عوامل بر دوران نهفتگی ترک می پردازیم. برای اینکار از مفاهیم نرخ آزاد سازی انرژی و مقاومت ماده در برابر رشد ترک استفاده می کنیم. پس از پایان دوران نهفتگی، مرحله رشد ترک آغاز می شود. در این قسمت به کمک توابع تجربی آسیب، معادلات حاکم بر رشد ترک را یافته و سپس منحنی رشد ترک و منحنی سرعت رشد آنرا می یابیم. بدیهی است که این رشد تا رسیدن ترک به طول بحرانی دارای اهمیت است. در ادامه به بررسی عواملی که بر این نمودارها تأثیر گذارند مانند: طول اولیه ترک، فشار درونی مخزن و غلظت محیط خورنده خواهیم پرداخت. برای سهولت کار، یک برنامه کامپیوتری در محیط MATLAB تهیه شده است.

گومر حسن اویچ<sup>۲</sup>

دانشیار

واژه های راهنما: تابع آسیب، رشد ترک، طول عمر، دوران نهفتگی

### ۱- مقدمه

لوله ها و مخازن به گروه عناصر صنعتی پر جرم و تحت تنش تعلق دارند که شکست آنها سبب آسیبهایی جانی، اتلاف مواد اولیه و آلودگی محیط زیست می شود. این موضوع به سبب فشار زیاد موجود در آنها و نیز نوع سیال درون آنهاست. از کاربردهای اصلی آنها می توان به نیروگاهها، پالایشگاهها و صنایع پتروشیمی اشاره کرد. در محاسبات رایج مربوط به استحکام لوله ها و مخازن چنانچه بیشترین تنش موجود با احتساب ضریب اطمینان، از حد مجاز فراتر نرود امکان استفاده از لوله و مخزن وجود دارد. هنگام طراحی، از استانداردهایی بهره می گیریم که شامل فرمولهای محاسباتی، تنشهای مجاز و ضرایب اطمینان جهت افزایش ضخامت دیواره لوله یا مخزن با در نظرگیری فرآیند ساخت و نیز فرسودگی آنها هنگام کار است، ولی درون فلز و به ویژه در محل جوشکاری شده، وجود ترکهای بسیار ریز ناپذیر است. این ترکها باعث تمرکز موضعی تنش می شوند [۱].

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، دانشجوی دکترای مکانیک، دانشگاه فنی مسکو، روسیه zarkesh1385@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشگاه فنی مسکو، روسیه

در زمان اتحاد شوروی تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام شد و به مرور تکمیل گردید. از سال ۱۹۵۰ تاکنون روشهای طراحی ۶ باربازبینی شده اند. کاجانف [۲] و رابتنف [۳] اولین بار، برای مدلسازی فرآیند انباشتگی آسیبهای ریز در جبهه ترک از یک مدل اسکالر استفاده نمودند. گامهای اساسی در این زمینه توسط آلتین برداشته شد [۴]. بر اساس تحقیقات وی رشد ترک نتیجه انباشته شدن آسیبهایی در مقیاس میکرو در نوک ترک است و هنگامیکه این انباشتگی به حد معلومی می رسد ترک رشد می کند.

پژوهشگران دیگری مانند کراچسینویچ از تانسورهای مرتبه دوم و چهارم استفاده کردند [۵]. مزیت تابع آسیب اسکالر در سادگی آن و نیز امکان انجام آزمایشهای ماکروسکوپی جهت ارزیابی پارامترهای مدل است. از معایب این روش می توان به ناکارآمد بودن آن در شکست ترد اشاره کرد.

عامل اولیه ای که باعث شکست لوله ها می شود، یک نقص ساختاریست که هنگام ساخت، نصب یا تعمیر در آن به وجود آمده و طی فرآیند بهره برداری رشد کرده و به صورت یک ترک سطحی یا عمقی، خود را نشان می دهد. جسم ترکدار که تحت بارگذاری قرار گرفته در یکی از سه وضعیت زیر است:

الف) چنانچه مجموع عوامل پیشبرنده ترک  $G$ ، از مقاومت جسم در برابر رشد ترک  $\Gamma$  کمتر باشد ( $G < \Gamma$ ) ترک رشد نمی کند. از این وضعیت به عنوان دوران نهفتگی نام می بریم.

ب) اگر  $G = \Gamma$  شود، دوره سکون ترک پایان یافته و رشد آن آغاز می شود. در این مرحله اگر  $\frac{\partial \Gamma}{\partial a} < \frac{\partial G}{\partial a}$  باشد رشد پایدار است و اگر  $\frac{\partial G}{\partial a} > \frac{\partial \Gamma}{\partial a}$  شود رشد ناپایدار است.

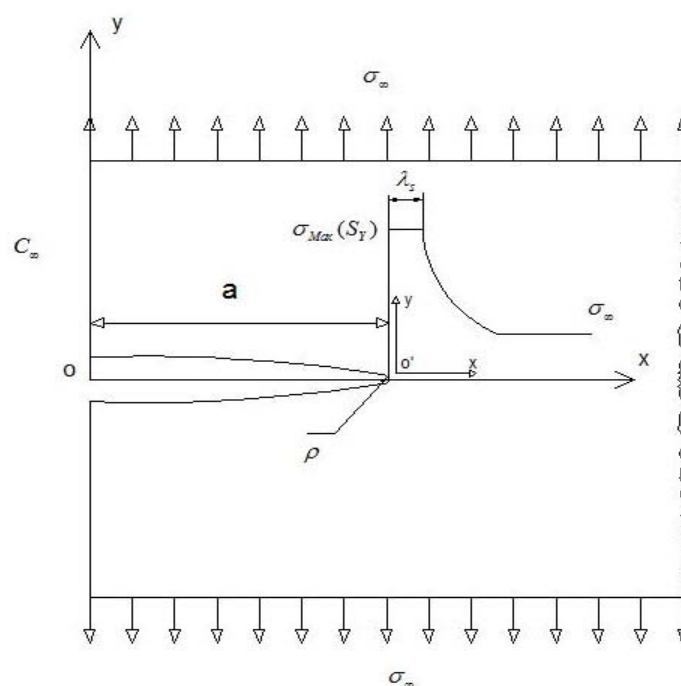
پ) اگر  $G > \Gamma$  باشد آنگاه جسم ترکدار از حالت تعادل خارج می شود و ترک با سرعت زیاد رشد می کند. در هنگام کاربرد تابع آسیب فرض می کنیم که تغییر خواص ماده تنها در فاصله اندکی از نوک ترک رخ می دهد و در سایر قسمتهای آن تغییری وجود ندارد. در مقایسه با مکانیک شکست خطی، ترکی که در این مقاله رشد آنرا مورد بررسی قرار می دهیم یک درز باریک است که در نوک آن شعاع انحنای کوچکی در حد میکرو قابل تعریف است. در پیرامون نوک ترک و در امتداد کوچکی از آن به مرور زمان آسیبها انباشته می شوند که این امر بر مقاومت جسم تأثیر می گذارد. از آنجا که دو عامل مکانیکی (بار بیرونی) و شیمیایی (تماس با محیط خورنده) همزمان به ترک اعمال می شوند، شعاع انحنای نوک ترک تابعی از این دو عامل است.

## ۲- دوران نهفتگی

هدف ما بررسی رشد ترک در پوسته است، بنابراین فرض بر این است که یک ترک عمقی وجود دارد. منظور از دوران نهفتگی، مدت زمانی است که لازم است بارگذاری مکانیکی و محیط خورنده بر ترک اثر کنند تا رشد آن آغاز گردد. بدیهی است که طی این مدت طول ترک ثابت است ولی این امر سبب ثابت بودن دیگر مشخصات، مانند شعاع انحنای نوک ترک نمی شود [۶].

مطابق شکل (۱) قسمتی از دیواره لوله که یک ترک عمقی در آن موجود است را در نظر می گیریم، ترک به اندازه اولیه  $a$  بوده و شعاع انحناء در نوک آن  $\rho$  می باشد. لوله تحت فشار درونی  $P$  قرار دارد بنابراین ترک تحت تنش یکنواخت محیطی  $\sigma_\infty$  قرار گرفته. مسأله در حالت کرنش مسطح است. از سوی دیگر سیالی که

درون لوله است نیز بر فرآیند رشد ترک تأثیر می گذارد. این سیال دارای غلظت  $C_\infty$  است. از اثرات دمایی چشم پوشی می کنیم.



**شکل ۱-** نمایی از یک ترک که در عمق پوسته رشد کرده و تحت تأثیر تنش محیطی و محیط خورنده قرار دارد.

مطابق رابطه نیبر ضریب تمرکز تنش در نوک ترک با طول آن و شعاع انحنای نوک ترک مرتبط است:

$$k = 1 + 2.24 \sqrt{a/\rho} \quad , \quad \sigma(x) = k \left( 1 + 4(x-a)/\rho \right)^{-5} \sigma_\infty \quad (1)$$

برای محاسبه طول ناحیه پلاستیک در نوک ترک از رابطه داگدال بهره می گیریم [۷]:

$$\lambda_s = a \left( \sec(\pi \sigma_\infty / 2S_T) - 1 \right) \quad (2)$$

پس از این طول  $(x > \lambda_s, y = 0)$  رفته رفته میزان تنش در امتداد ترک کاهش یافته تا سر انجام با تنش محیطی برابر گردد. می توان از روابط دیگری که در مکانیک شکست وجود دارند نیز استفاده کرد ولی تغییر زیادی در نتایج به وجود نخواهد آمد [۶][۸].

مطابق نظریه گریفیت که بعدها به وسیله ایروین تکامل یافت در هنگام رشد ترک، نرخ آزاد سازی انرژی  $G$  باید با مقاومت ماده در برابر رشد ترک  $\Gamma$  برابر باشد. در دوران نهفتگی  $G < \Gamma$  است و ترک رشد نمی کند. نرخ آزاد سازی انرژی دارای مقدار ثابتی است که آنرا با عبارت زیر بیان می کنیم:

$$G = K_I^2 (1 - \nu^2) / E \quad , \quad K_I = f \left( \frac{a}{h} \right) \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

در عمل  $v$  و  $E$  نیز با زمان تغییر می‌کنند اما چون این تغییرات اندک است از آن چشم‌پوشی می‌کنیم [۹و۶].

تجربه بهره‌برداری از تجهیزات بیانگر این نکته است که فرآیند شکست در آنها تابعی از زمان است. در بسیاری از موارد این شکست نتیجه رشد پایدار و طولانی ترک می‌باشد. دلیل این رشد، انباشت آهسته آسیبه‌های ریز در جبهه ترک و کاهش مقاومت ماده است [۷]. برای بیان مقاومت ماده در برابر رشد ترک از تابع آسیب استفاده می‌کنیم. معیار  $\phi_s$  مشخص‌کننده آسیب حاصل از بارگذاری مکانیکی و معیار  $\phi_c$  را جهت بیان آسیب حاصل از خوردگی در جبهه ترک بکار می‌بریم. این دو معیار در واقع تابعی از دیگر متغیرهای مسأله هستند.

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} = \frac{1}{t_s} f_s(\sigma_\infty, c_\infty, a, \rho, \phi_s, \phi_c, x) \quad (۴)$$

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial t} = \frac{1}{t_c} f_c(\sigma_\infty, c_\infty, a, \rho, \phi_s, \phi_c, x) \quad (۵)$$

مقدار این دو معیار در نوک ترک ( $x=a$ ) را با نمادهای  $\psi_s, \psi_c$  نشان می‌دهیم. این دو معیار در محدوده [۰ و ۱] تغییر می‌کنند. حد بالایی نشانگر آسیب کامل و حد پایینی نشانگر عدم وجود آسیب در نوک ترک است [۱۰و۶].

همانگونه که گفته شد، مقاومت جسم در برابر رشد ترک تابعی از این دو معیار است. برای بیان آن از رابطه تجربی زیر استفاده می‌کنیم [۸و۶]:

$$\Gamma = \gamma_0(1 - (\psi_s + \psi_c)) \quad (۶)$$

$$\gamma_0 = k_c^2(1 - v^2) / E \quad (۷)$$

در شروع بارگذاری  $\psi_c = \psi_s = 0$  با شروع بارگذاری این دو معیار رشد کرده و سبب کاهش مقاومت ماده در برابر رشد ترک می‌شود. تا زمانی که  $G < \Gamma$  دوران نهفتگی ادامه می‌یابد. پایان دوران نهفتگی از معادله  $G = \Gamma$  قابل محاسبه است. می‌دانیم که فرآیند انباشت آسیبه‌های ریز در جبهه ترک تحت تأثیر تنش مکانیکی و محیط خوردنده تابعی است از میزان آن تنش و همچنین غلظت محیط خوردنده. بالتین روابط تجربی زیر را برای بیان این ارتباط پیشنهاد داده است [۶]:

$$f_s = \left( \frac{\sigma - \sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^{m_s} \quad (۸)$$

$$f_c = \left( \frac{c - c_{th}}{c_d} \right)^{m_c} \quad (۹)$$

در تابع  $f_s$ ،  $\sigma$  میزان تنش در نوک ترک،  $\sigma_{th}$  مقاومت ماده در برابر انباشت شدن آسیب،  $\sigma_d$  مقدار مرزی این مقاومت است. برای تابع  $f_c$  نیز به روش مشابه، ضرایب تعریف می‌شوند. نکته قابل ملاحظه در مورد این دو تابع این است که همواره  $\sigma \geq \sigma_{th}$  و  $c \geq c_{th}$  چنانچه خلاف این شرط به وجود آمد  $f_s = 0$  یا  $f_c = 0$ .

شعاع انحناء در نوک ترک مقدار متغیری است. ترک را کند می‌نامیم چنانچه رشد آن از سرعت کمی برخوردار باشد (در این حالت شعاع در حال افزایش است). برعکس در هنگام تیز بودن، ترک سرعت رشد زیادی دارد (شعاع انحناء رو به کاهش می‌باشد). در ضمن این شعاع تابعی از مقدار آسیب در نوک ترک به صورت زیر است [۶]:

$$\rho = \rho_i + \rho_s \psi_s + \rho_c \psi_c \quad (10)$$

این رابطه به خوبی حالات کند بودن ترک و نیز تیز شدن آن هنگام افزایش سرعت رشد را نشان می‌دهد. برای محاسبه طول دوره نهفتگی که طی آن طول ترک ثابت است ( $x = a$ ) از شرط تعادل میان مقاومت در برابر رشد ترک و نرخ آزاد سازی انرژی استفاده می‌کنیم ( $G = \Gamma(t)$ ) به کمک این شرط و معادلات ۳ و ۶ و ۷ داریم:

$$K_I^2(1 - \nu^2)/E = \gamma_0(1 - (\psi_s + \psi_c)) \Rightarrow \psi_s + \psi_c = 1 - \frac{K_I^2}{K_c^2} \quad (11)$$

در این حالت، با توجه به معیار آسیب در نوک ترک ( $x = a = cte$ ) معادلات ۴ و ۵ به صورت زیر ساده میشوند:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = \frac{f_s}{t_s} \quad (12)$$

$$\frac{d\psi_c}{dt} = \frac{f_c}{t_c} \quad (13)$$

اکنون معادلات ۸ و ۹ را در روابط ۱۲ و ۱۳ جایگزین می‌نماییم. با توجه به اینکه در شروع فرآیند غالباً ترک طول کوچک و ثابتی دارد، می‌توانیم از تغییرات غلظت عامل خورنده در جبهه ترک در طی مدت دوره نهفتگی چشم پوشی کنیم ( $c = c_\infty$ ). این دو معادله اصلاح شده به همراه معادلات ۱۰ و ۱۱ یک دستگاه معادلات دیفرانسیل را تشکیل می‌دهند. برای حل این دستگاه، راه حل تحلیلی وجود ندارد و باید آنرا به روش عددی حل کنیم. با حل آن، مدت زمان دوره نهفتگی و نیز تغییرات شعاع انحناء در نوک ترک همچنین تغییرات توابع آسیب به دست خواهند آمد.

### ۳- مرحله رشد ترک

پس از پایان دوره نهفتگی مرحله رشد ترک آغاز می‌شود. چنانچه می‌دانیم رشد ترک نتیجه انباشتگی آسیبه‌های بسیار کوچکی در پیرامون نوک ترک (جبهه ترک) می‌باشد. در لحظه  $t = t_h$  این انباشتگی به حد مرزی رسیده و ترک مقدار کمی گسترش می‌یابد. مقدار گسترش بسیار کوچک بوده و به اندازه ناحیه آسیب دیده در جبهه ترک است، آنگاه ترک متوقف شده تا انباشتگی آسیب دوباره به حد مرزی برسد. بدین ترتیب جبهه ترک به رشد خود ادامه می‌دهد. در این تعریف از اتلاف انرژی مانند انتشار امواج و غیره چشم پوشی نمودیم [۱۱].

برای یافتن معادله رشد ترک بهتر است از تغییر مبدأ دستگاه مختصات استفاده کنیم. بدین جهت مطابق شکل (۱) مبدأ  $o$  را به نوک ترک  $o'$  منتقل می‌نماییم بدیهی است در دستگاه جدید:

$$x_1 = x - a(t) \quad (14)$$

بنابراین معیارهای آسیب نیز در دستگاه جدید تغییر خواهند کرد. مانند گذشته مقدار این معیارها در نوک ترک ( $x_1 = 0$ ) را با  $\psi_s, \psi_c$  نمایش می‌دهیم. طرف چپ معادلات ۴ و ۵ به صورت زیر دوباره نویسی می‌شوند:

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} + \frac{\partial \phi_s}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial t} \approx - \frac{\partial \phi_s}{\partial x_1} \frac{\partial a}{\partial t} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial t} + \frac{\partial \phi_c}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial t} \approx - \frac{\partial \phi_c}{\partial x_1} \frac{\partial a}{\partial t} \quad (16)$$

در نتیجه:

$$- \frac{\partial \phi_s}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{f_s}{t_s} \quad (17)$$

$$- \frac{\partial \phi_c}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{f_c}{t_c} \quad (18)$$

با انتگرال گیری از این دو رابطه نسبت به  $x_1$  داریم:

$$\psi_s(t) = \psi_{rs}(t) + \frac{\lambda_s}{t_s} \left( \frac{da}{dt} \right)^{-1} f_s \quad (19)$$

$$\psi_c(t) = \psi_{rc}(t) + \frac{\lambda_c}{t_c} \left( \frac{da}{dt} \right)^{-1} f_c \quad (20)$$

$\psi_{rs}, \psi_{rc}$  مقدار توابع آسیب در انتهای ناحیه آسیب دیده در جبهه ترک هستند.

روابط ۱۹ و ۲۰ را در ۱۱ قرار داده و نسبت به  $\frac{da}{dt}$  ساده می‌کنیم:

$$\frac{da}{dt} = \left[ \frac{\lambda_s f_s}{t_s} + \frac{\lambda_c f_c}{t_c} \right] \left/ \left[ \left( 1 - \frac{K_1^2}{K_c^2} \right) - (\psi_{rs}(t) + \psi_{rc}(t)) \right] \right. \quad (21)$$

رابطه بالا بیانگر سرعت رشد ترک بر اثر تشکیل آسیبهای ناشی از خوردگی و بار مکانیکی در نوک آن است. باید به این نکته دقت کرد که پارامترهای بکار رفته در رابطه ۲۱ مستقل از یکدیگر نیستند. برای نمونه  $\lambda_s$  مطابق رابطه داگدال تابعی از طول ترک است به همین صورت  $k_1, \lambda_c, f_s, f_c$  نیز مستقل از طول ترک نمی‌باشند. بنابر این برای یافتن سرعت رشد ترک نیاز به آگاهی از سایر پارامترها و ارتباط میان آنها داریم. پارامترهای  $k_1, f_s$  قبلاً در روابط ۳ و ۸ تعریف شده‌اند.

از آنجا که  $\lambda_s \gg \lambda_c$  عملاً می‌توان آنرا ثابت فرض نمود. آزمایشها نشان می‌دهند که  $10^{-6} m < \lambda_c < 10^{-4} m$  است و تأثیر آنچنانی بر محاسبات ندارد [۹]. تابع  $f_c$  دارای اهمیت ویژه‌ای است زیرا بیان‌کننده نفوذ سیال خورنده بر جبهه ترک است. تابعی که در این مقاله از آن بهره می‌گیریم در عبارت ۹ ارایه شده است. تفاوتی که در این حالت با دوران نهفتگی وجود دارد این است که  $c(t) \neq c_\infty$  و باید تغییرات زمانی  $c(t)$  را در مسأله اعمال کرد. برای یافتن آن معادله زیر را بکار می‌بریم [۹ و ۱۲]:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{c_a - c(t)}{\lambda_a} \cdot \frac{da}{dt} + \frac{c_a - c(t)}{t_a} \quad (22)$$

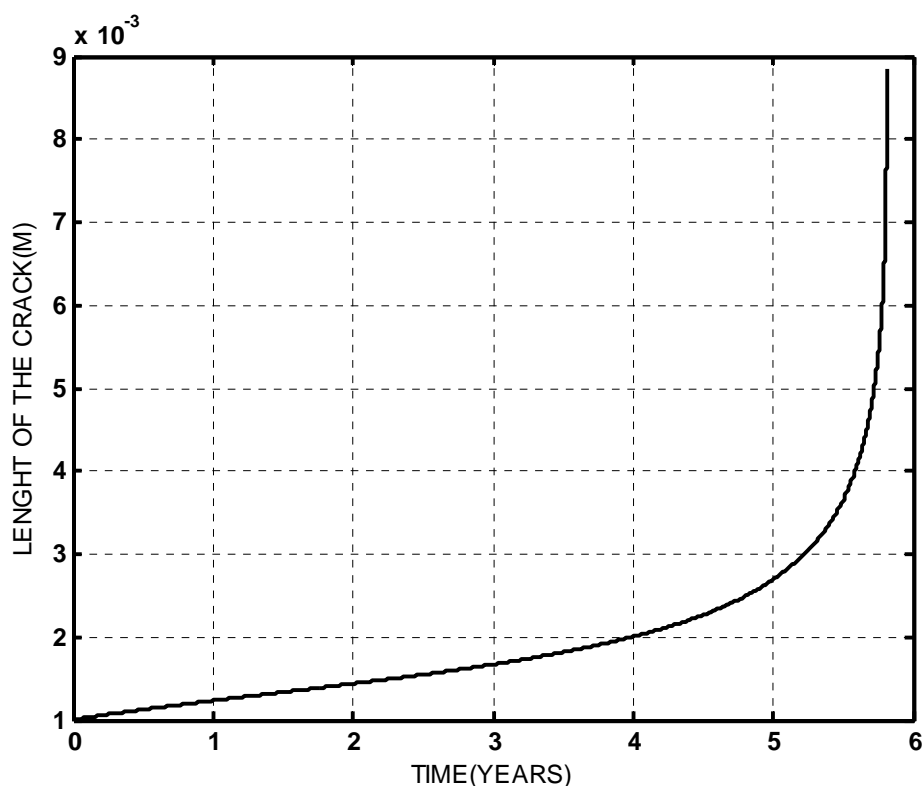
است. ضرایب  $t_a, \lambda_a$  هستند که مقادیرشان در جداول موجود است. برای  $c_a$  رابطه زیر در دسترس است:

$$c_a = \frac{c_\infty}{1 + \frac{a}{a_\infty}} \quad (23)$$

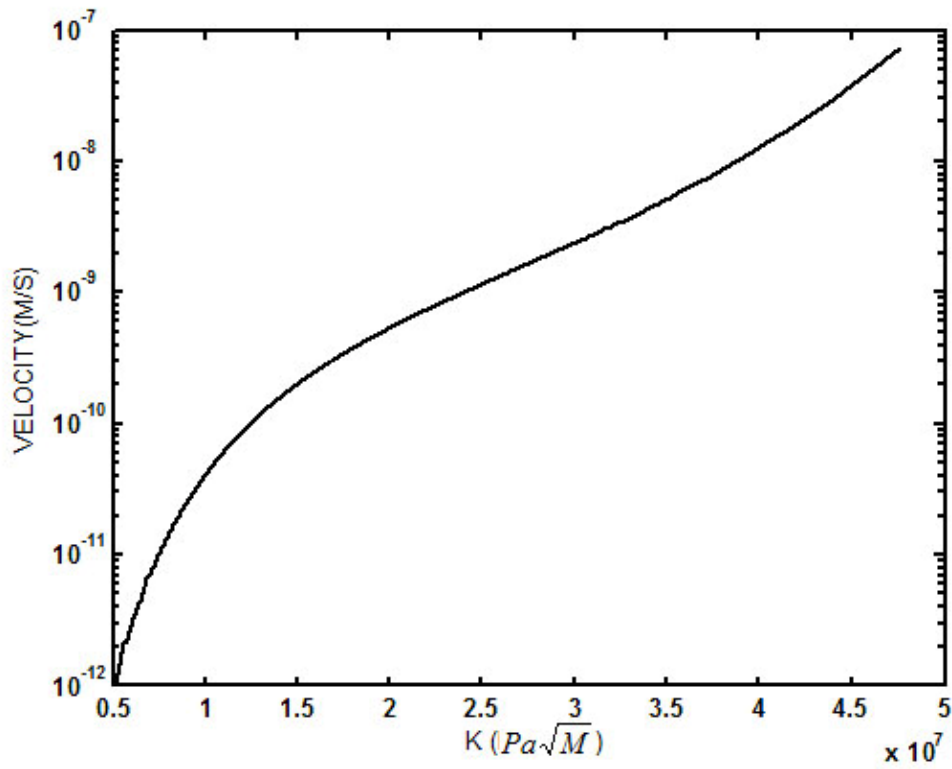
جهت حل معادلات مربوط به تأثیر غلظت سیال خورنده با توجه به اینکه مقدار غلظت ذاتاً عدد کوچکی است، اعداد مربوط به آن را به مقدار معلومی تقسیم می‌نماییم تا غلظت استاندارد بدست آید (در معادلات ۲۲ و ۹). در این مقاله همه آنها را به  $c_\infty$  تقسیم کرده ایم به این ترتیب همواره  $0 < c(t) < 1$ .

مانند حالت گذشته با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل به دست آمده، اندازه ترک در هر لحظه، سرعت رشد ترک، تابع آسیب حاصل از بارگذاری و خوردگی و تغییرات غلظت در جبهه ترک بر حسب زمان به دست می‌آیند. از آنجا که حل تحلیلی برای دستگاه یاد شده وجود ندارد در محیط *MATLAB* برنامه‌ای برای حل عددی آن نوشته شد. این برنامه با دریافت مشخصات ماده ( $E, S_y, \nu, k_c, \dots$ ) طول اولیه ترک و سایر ضرایبی که تاکنون به آنها اشاره کردیم، ابتدا مسأله را در مرحله دوران نهفتگی تحلیل می‌کند و در ادامه با استفاده از نتایج این مرحله، شروع به تحلیل مسأله در حالت رشد ترک می‌کند. برنامه مرحله رشد ترک را تا رسیدن به طول بحرانی ادامه می‌دهد. برای یافتن طول بحرانی از خواص مکانیک شکست جسم ( $k_c$ ) استفاده کرده ایم و برنامه طول بحرانی را از رابطه  $k_c = k_{Max}$  محاسبه می‌کند. پس از برقراری این رابطه، برنامه متوقف می‌شود.

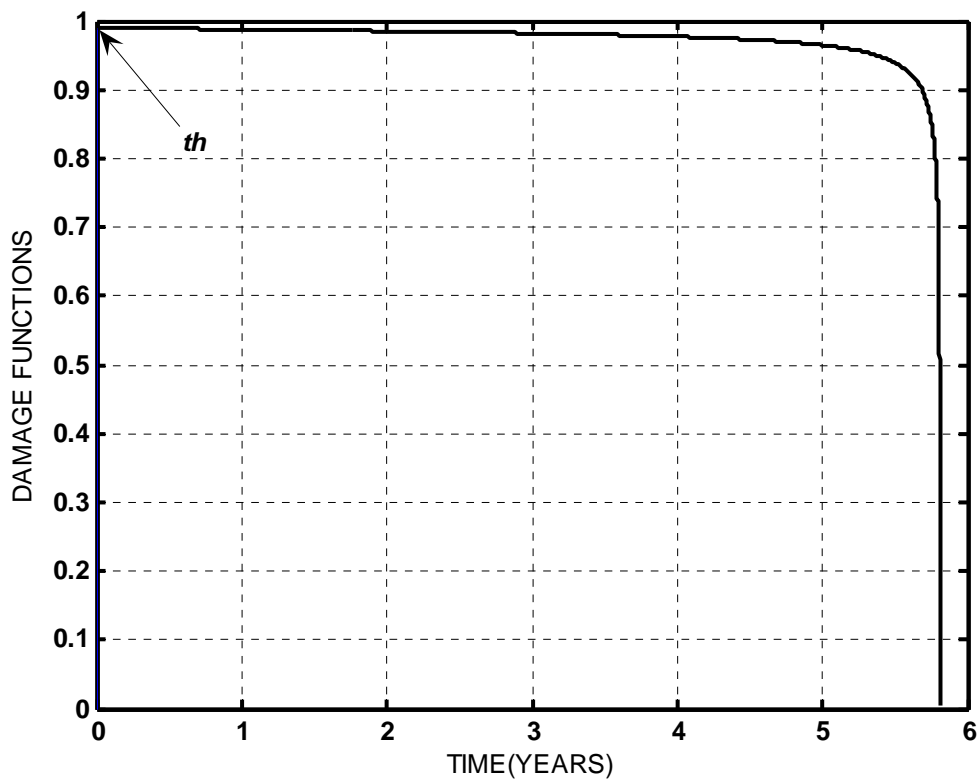
نمونه‌ای از نتایج در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) آورده شده است.



شکل ۲- منحنی رشد ترک بر حسب زمان



شکل ۳- منحنی لگاریتمی سرعت رشد ترک بر حسب ضریب شدت تنش

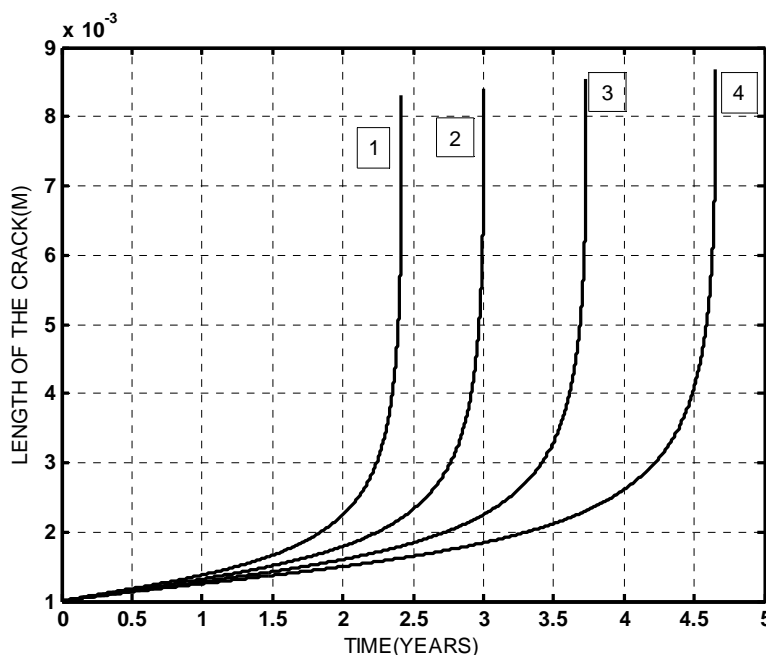


شکل ۴- منحنی تغییرات تابع آسیب در جبهه ترک بر حسب زمان



#### ۴- عوامل مؤثر بر منحنی رشد ترک

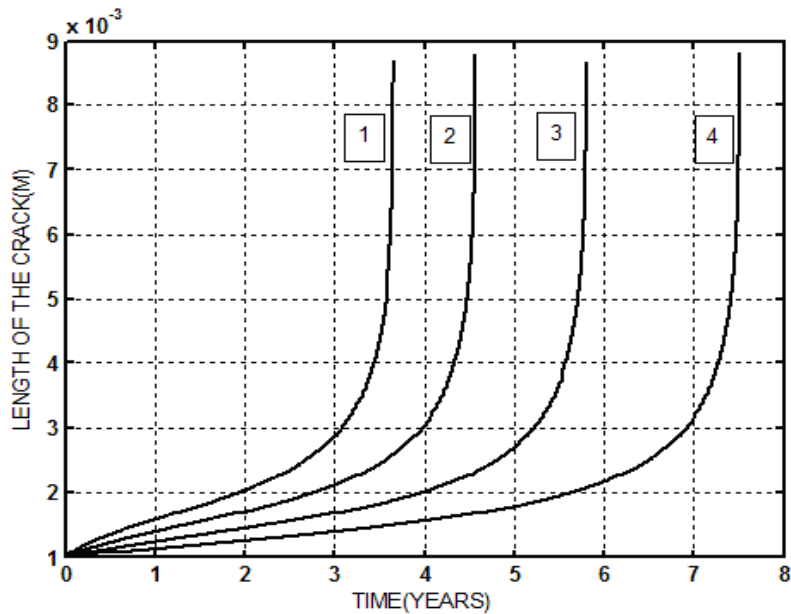
سه عامل اصلی که می توانند بر منحنی رشد ترک تأثیر بگذارند عبارتند از: فشار درونی (تنش محیطی)، غلظت محیط خورنده و طول اولیه ترک. برای نمونه لوله ای از جنس فولاد 08X18H10T که دارای  $S_y = 258 \text{Mpa}$ ,  $k_{Ic} = 52 \text{Mpa.M}^{-5/2}$  و قطر  $40 \text{cm}$ ، ضخامت دیواره  $h = 15 \text{mm}$  است را در نظر گرفتیم. فرض می کنیم در این لوله ترکی با مشخصات:  $\rho_i = 10 \mu\text{m}$ ,  $a = 1 \text{mm}$ ,  $\rho_s = \rho_c = 70 \mu\text{m}$  وجود دارد. در شکل (۵) تأثیر فشار درونی بر منحنی رشد ترک نشان داده شده است. با کاهش فشار درونی  $P_1 = 7 \text{Mpa}$ ,  $P_2 = 6.75 \text{Mpa}$ ,  $P_3 = 6.5 \text{Mpa}$ ,  $P_4 = 6.25 \text{Mpa}$ ، مطابق نتایج برنامه، دوره نهفتگی افزایش می یابد. این افزایش عبارت است از:  $t_{h1} = 152.3 \cdot 10^3 \text{S}$ ,  $t_{h2} = 153.3 \cdot 10^3 \text{S}$ ,  $t_{h3} = 154.1 \cdot 10^3 \text{S}$ ,  $t_{h4} = 154.9 \cdot 10^3 \text{S}$  یعنی ترک دیرتر شروع به رشد می کند. در ادامه به دلیل کندی انباشتگی آسیب حاصل از بارگذاری مکانیکی در جبهه ترک، طول بحرانی ترک نیز بیشتر شده و ترک در زمان بیشتری به طول بحرانی می رسد. سایر عوامل مانند: غلظت استاندارد شده محیط خورنده و طول اولیه ترک ثابت فرض شده اند.



شکل ۵- تأثیر تغییرات فشار درونی بر منحنی رشد ترک

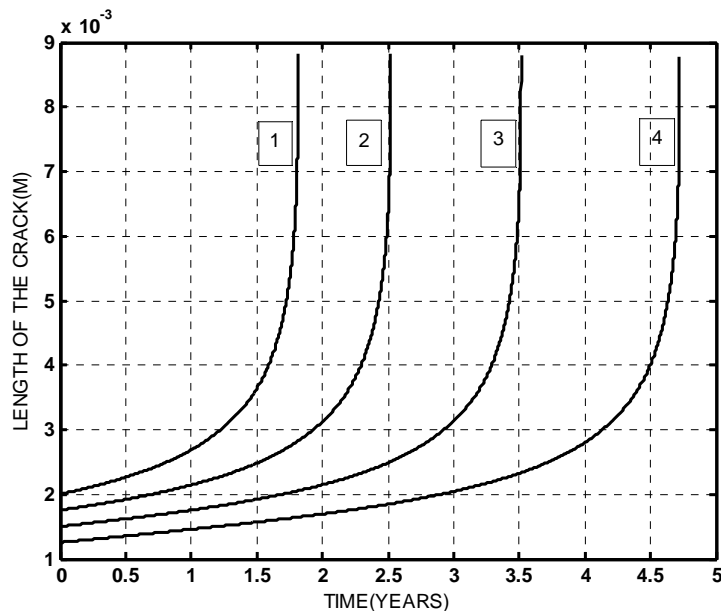
1-  $P=7 \text{MPa}$  2-  $P=6.75 \text{MPa}$  3-  $P=6.5 \text{MPa}$  4-  $P=6.25 \text{MPa}$

در شکل (۶) تأثیر غلظت محیط خورنده بر منحنی رشد ترک ارایه شده است. با کاهش غلظت استاندارد شده در فشار ثابت نقش تابع آسیب حاصل از خوردگی در معادله ۲۱ کمتر شده و دوره نهفتگی ترک افزایش می یابد:  $t_{h1} = 41.1 \cdot 10^3 \text{S}$ ,  $t_{h2} = 75.7 \cdot 10^3 \text{S}$ ,  $t_{h3} = 155.6 \cdot 10^3 \text{S}$  در نهایت زمان رسیدن به طول بحرانی نیز بیشتر می شود ولی تغییری در طول بحرانی ترک دیده نمی شود.



شکل ۶- تأثیر تغییرات غلظت استاندارد شده محیط خورنده بر منحنی رشد ترک  
غلظت استاندارد: 1-0.7 2-0.6 3-0.5 4-0.4

چنانچه از قبل قابل پیش بینی بود کاهش طول اولیه ترک:  $a_3 = 1.5\text{mm}$  ،  $a_2 = 1.75\text{mm}$  ،  $a_1 = 2\text{mm}$  ،  
 $a_4 = 1.25\text{mm}$  نیز سبب بیشتر شدن دوره نهفتگی می شود:  $t_{h2} = 148.3 \cdot 10^3 S$  ،  $t_{h1} = 145.3 \cdot 10^3 S$  و در غلظت ثابت بدون تأثیر بر طول بحرانی، زمان رسیدن به آن را بیشتر می کند. در شکل (۷) این موضوع به نمایش در آمده است.



شکل ۷- تأثیر تغییر طول اولیه ترک بر منحنی رشد ترک  
طول اولیه ترک: 1-  $a=2\text{mm}$  2-  $a=1.75\text{mm}$  3-  $a=1.5\text{mm}$  4-  $a=1.25\text{mm}$

## ۵- بررسی نتایج

با تحلیل ارایه شده امکان پیش بینی چگونگی رشد ترک بر اساس تأثیر همزمان عوامل مکانیکی و شیمیایی وجود دارد و با توجه به آن، فشار بیشینه درون لوله و نیز طول مجاز ترک قابل تخمین است. از این مدل می توان برای افزایش ایمنی تجهیزات در حال کار و پیش بینی عمر آنها استفاده نمود. چنانچه از نمودارهای ۲ و ۳ پیداست با رشد ترک، سرعت رشد آن نیز افزایش می یابد و با گذر زمان امکان ناپایداری ترک و انتشار سریع آن بیشتر می شود. این موضوع اهمیت بازدیدهای دوره ای از مناطقی که امکان وجود ترک در آنها زیاد است مانند درزهای جوشکاری شده را بیان می کند. در نمودار آسیب که در شکل (۴) نشان داده شده است مجموع آسیب ناشی از بارگذاری مکانیکی و خوردگی دیده می شود. در این نمودار دو ناحیه به چشم می خورد، ناحیه اول که از زمان  $t=0$  تا  $t=t_h$  ادامه دارد (دوران نهفتگی) در این ناحیه آسیبها در جبهه ترک انباشته می شوند و همزمان مقاومت ماده در برابر رشد ترک کاهش می یابد در این حالت شعاع انحناء در نوک ترک در حال افزایش است. ناحیه دوم که از  $t \geq t_h$  شروع می شود بیانگر رشد ترک است. همزمان با افزایش طول ترک، میزان تابع آسیب کاهش یافته و سرعت رشد بیشتر می شود این موضوع از نمودارهای ۲ و ۳ نیز قابل درک است. این ناحیه تا رسیدن به ناپایداری ترک ادامه می یابد. در این موقعیت میزان آسیب در جبهه ترک صفر است و این بدان معنی است که گسترش ترک از این پس بدون انباشتگی آسیب در جبهه آن رخ خواهد داد.

## مراجع

- [1] Sapunov, V.T., "Strength of Damage Pipes", URSS, Moscow, (2005).
- [2] Kachanov, L.M., "Principles of Fracture Mechanics", NAUKA, Moscow, (1974).
- [3] Rabotnov, Yu.N., "Mechanics of Solid Materials", NAUKA, Moscow, (1984).
- [4] Balotin, V.V., "Lifetime Prediction of Machinery and Equipment", Mechanical Engineering, Moscow, (1988).
- [5] Krajcinovic, D., "Continuum Damage Mechanics: When and How", International Journal of Damage Mechanics, Vol. 4, pp. 217-229, (1995).
- [6] Balotin, V.V., "Mechanical Model of Crack Growth under Corrosion Conditions", Mechanical Engineering, No. 4, pp. 20-26, (1987).
- [7] Parton, V.Z., and Morozov, E.M., "Mechanics of Elastic-plastic Fracture", URSS, Moscow, (2007).
- [8] Kamarova, V.N., and Shipkov, A.A., "Study of Deformation of Plastic Area in Crack Zone Regarding Growth of Fatigue-failure Cracks", Vestnik MPEI, No.1, pp. 16-20, (2002).

- [9] Balotin, V.V., and Shipkov, A.A., "Fatigue Crack Model Regarding the Influence of Surrounding Area", Applied Mathematics and Mechanics, No. 62, pp. 313-322, (1998).
- [10] Balotin, V.V., "Theory of Fatigue-failure", Vestnik MPEI, No. 2, pp. 5-10, (1986).
- [11] Balotin, V.V., "Unified Models in Fracture Mechanics", Solid Mechanics, No. 3, pp. 127-137, (1984).
- [12] Balotin, V.V., and Kovekh, V.M., "Modeling of Fatigue-failure Crack Growth", Machine Manufacturing Problem and Machines Safety, No. 3, pp. 67-71, (1998).

### فهرست نمادهای انگلیسی

- $a$ : طول ترک  
 $G$ : نرخ آزادسازی انرژی  
 $S_y$ : تنش تسلیم جسم  
 $k_1$ : ضریب شدت تنش مد I  
 $h$ : ضخامت پوسته  
 $E$ : مدول الاستیسیته  
 $\nu$ : ضریب پواسون  
 $k_c$ : ضریب شدت تنش بحرانی  
 $c_\infty$ : غلظت محیط خورنده  
 $t_s, t_c, t_a$ : ضرایب زمانی  
 $a_\infty$ : ضریب طولی

### نمادهای یونانی

- $\Gamma$ : مقاومت جسم در برابر رشد ترک  
 $\sigma_\infty$ : تنش محیطی  
 $\rho_i$ : شعاع انحناء اولیه در نوک ترک  
 $\rho_s$ : شعاع انحناء در نوک ترک در اثر بارگذاری مکانیکی  
 $\rho_c$ : شعاع انحناء در نوک ترک در اثر خوردگی  
 $\lambda_a$ : ضریب طولی  
 $\phi_s$ : تابع آسیب در جبهه ترک در نتیجه بارگذاری مکانیکی  
 $\phi_c$ : تابع آسیب در جبهه ترک در نتیجه خوردگی  
 $\psi_s$ : مقدار تابع آسیب در نوک ترک در نتیجه بارگذاری مکانیکی  
 $\psi_c$ : مقدار تابع آسیب در نوک ترک در نتیجه خوردگی

**Abstract**

Many industrial pipes and vessels are simultaneously exerted to internal pressure and corrosive material and evidently, each of these two has its own effect on the growth of cracks on these shells. In this paper, first the effect of these parameters on the crack hiding period is studied by means of energy emission rate and crack growth resistance.

After that, the crack growth period would be studied. In this part, first the governing equations for crack growth will be determined and then the crack growth diagram and growth rate diagram would be prepared paying attention to the fact that studying the growth of crack before reaching its critical length is highly important.

Afterwards, the parameters which have influence on these diagrams such as initial crack length, internal vessel pressure and density of corrosive material would be studied.

In order to have a better understanding of the issue, a computer program is associated prepared with MATLAB.