

ارایه مدلی برای پیش‌بینی منحنی رشد ترک تحت تاثیر همزمان خزش و خوردگی

مهران زرکش*

استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان، برازجان، ایران

چکیده

در این مقاله وضعیت رشد ترک در قطعاتی که در تماس با سیال داغ هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. دمای بالای سیال سبب بروز پدیده خزش می‌شود، به علاوه تأثیر خوردگی سیال، نیز به عنوان یک عامل در رشد ترک در نظر گرفته شده است. عوامل مؤثر به دو گروه پیش‌برنده و مقاوم تقسیم می‌شوند. برای محاسبه نیروهای پیش‌برنده از مدل مکانیک موروثی استفاده کرده و با یافتن تابع خزش، مقدار این نیرو در دو حالت نهفتگی ترک و رشد آن به دست آمده است. نیروی مقاومت نیز به کمک انباشت آسیب‌های ریز در جبهه ترک که به وسیله رابتنف بیان شده است، قابل محاسبه است. تأثیر محیط خوردنده، به واسطه معادله نفوذ و تغییرات غلظت استاندارد سیال، وارد محاسبات شده‌اند. برای حل معادلات حاصل، برنامه‌ای در محیط Matlab نوشته شد. در ادامه، تأثیر طول اولیه ترک، تنش اعمالی و خوردگی سیال بر منحنی رشد مورد بررسی قرار گرفت. رفتار این منحنی‌ها با منحنی‌های تجربی موجود همخوانی دارد. **واژه‌های کلیدی:** مکانیک موروثی، تابع خزش، طول بحرانی ترک، رشد ترک، محیط خوردنده.

Model to Predict the Crack Growth Curves under the Influence of Creep and Corrosive Environment Simultaneously

M. Zarkesh

Department of Mechanical Engineering, Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Dashtestan, Iran

Abstract

In this paper the crack growth process of the parts subjected to hot fluids has been studied. The fluid high temperature activates the creep process. In addition the effect of the fluid corrosion as an important factor in the crack growth has been considered. The effective factors are divided into two groups of developing factors and resisting factors. For calculation of the developing forces, the inherited mechanical model has been used and after deriving the creep function, the amount of these forces has been determined in two stages of crack concealment and crack growth. The resisting force has been calculated using Rabotnov method of accumulated small fractures in the crack region. The effect of corrosive environment has been considered in the calculations using penetration function and the fluid standard density variations. For solving the resulted equations, programming in the MATLAB software has been used. Then the effects of the crack initial length, the applied stress and the fluid corrosiveness have been investigated on the crack growth curve.

Keywords: Crack growth, Creep function, Hereditary mechanic, corrosive environment, critical length of crack.

میان δ (ضخامت لایه پوسیده) و زمان t از یک ارتباط خطی استفاده کرد. چنانچه زمان بیشتر شود این رابطه به رابطه سهمی تبدیل می-

شود. گوتمن رابطه توان‌دار میان $\delta(\sigma)$ و σ ارائه کرد. پاولین [۲] تأثیرات متقابل نفوذ و واکنش‌های شیمیایی درونی را مورد بررسی قرار داد و از عملگر لاپلاس برای حل آن استفاده کرد. کولاگین [۳] در بررسی خزش در فولادهای کربنی در دمای ۹۰۰-۲۰۰ درجه سلسیوس و در تماس با هیدروژن پدیده نفوذ هیدروژن در فولاد و واکنش آن با کربن موجود در آنرا در نظر گرفت. در نتیجه این امر گاز متان آزاد شده و فولاد نیز کربن خود را از دست می‌دهد. نکته مشترک در همه مدل‌های یاد شده، حجم زیاد و پیچیدگی راه حل است. اغلب آنها دارای معادلات دیفرانسیل نفوذ و شرایط مرزی متغیر هستند. اطلاعات تجربی در زمینه تأثیر همزمان خزش و خوردگی بر فلزات اندک است زیرا انجام این آزمایش‌ها بسیار دشوار، هزینه‌بر و مستلزم صرف زمان

۱- مقدمه

بخش زیادی از تجهیزات که در صنایع گوناگون نیروگاهی و پالایشگاهی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، دربرگیرنده سیال داغ هستند. در اثر دمای بالای این سیال بروز پدیده خزش گریز ناپذیر است. از سوی دیگر، سیال می‌تواند دارای خاصیت خوردگی باشد. روشن است که در طی فرآیند ساخت و نصب قطعات، پیدایش ترک‌های ریز در سطح آنها محتمل است. این ترک‌ها به مرور زمان و تحت تأثیر عوامل یاد شده شروع به رشد می‌نمایند و در نهایت سبب بروز شکست می‌گردند. با توجه به ویژگی‌های سیال داغ (فشار و دمای بالا) این شکست می‌تواند سبب آسیب‌های جانی و نیز آلودگی محیط زیست گردد.

نخستین تحقیقات در این زمینه به قرن بیستم میلادی برمی‌گردد که توسط اکیموف و گوتمن انجام گرفت [۱]. اکیموف برای ایجاد ارتباط

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: zarkesh1385@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۰

زیادی است.

تاکنون تحقیقاتی نیز در زمینه بررسی رشد ترک و محاسبه منحنی رشد آن تحت تأثیر جداگانه هر یک از دو عامل یاد شده صورت پذیرفته است [۴-۶]. همچنین مطالعاتی درباره نقش ناحیه آسیب دیده در نوک ترک بر رشد آن انجام گرفته است [۷]. هدف از پژوهش پیش رو یافتن مدلی است که تحت تأثیر همزمان هر دو عامل خوردگی و خزش، منحنی رشد ترک را پیش‌بینی کرده و مقدار دوران نهفتگی و طول بحرانی ترک را بیابد.

برای بررسی رشد ترک، معیار انباشت آسیب که توسط رابتنف (تابع ϕ) ارایه شد، بکار رفته است. بر این اساس، رشد ترک، نتیجه انباشت آسیب‌های بسیار ریز در جبهه ترک است. جهت بیان میزان انباشت، یک معیار اسکالر وجود دارد. این معیار همواره میان صفر و یک در نوسان می‌باشد. هنگامی که به صفر نزدیک می‌شود، رشد ترک متوقف گشته ($\phi = 0$)، و هنگامی که به سمت یک می‌رود ($\phi = 1$)، ترک آماده رشد می‌شود [۸ و ۹]. همچنین روش‌های دیگری نیز برای بیان رشد ترک ارایه شده است، مانند استفاده از تانسورهای مرتبه دوم و چهارم [۱۰]. اما سادگی روش رابتنف و همچنین امکان آزمایش جهت یافتن پارامترهای آن سبب گشته که این شیوه اهمیت خود را حفظ کند.

جهت تحلیل مسأله، جسم ترکدار و بارهای اعمالی بر آن را به صورت یک سیستم در نظر گرفته و نیروهای موجود در این سیستم به دو گروه تقسیم بندی می‌شوند: نیروهای پیش‌برنده ترک ($G(t)$) که عبارتند از برآیند نیروهایی که سبب رشد ترک می‌شوند و نیروهای مقاومت یا بازدارنده ($\Gamma(t)$) که در برابر رشد ترک مقاومت می‌نمایند. بر اساس وضعیت این دو گروه نیرو نسبت به یکدیگر، سه حالت برای رشد ترک قابل پیش‌بینی است:

الف) چنانچه، نیروهای پیش‌برنده قدرت رشد دادن ترک را نداشته باشند $G(t) < \Gamma(t)$ ترک در حالت سکون است. در طی این دوره، تحت تأثیر بارگذاری، چگالی آسیب‌های ریز در جبهه ترک در حال افزایش می‌باشد (دوران نهفتگی).

ب) اگر $G(t) = \Gamma(t)$ ، رشد ترک آغاز می‌گردد. در این وضعیت چنانچه $\frac{\partial G}{\partial a} < \frac{\partial \Gamma}{\partial a}$ (طول ترک) رشد پایدار و در صورت $\frac{\partial G}{\partial a} > \frac{\partial \Gamma}{\partial a}$ رشد، ناپایدار است.

پ) در حالت $G(t) > \Gamma(t)$ سیستم از وضعیت تعادل خارج می‌گردد.

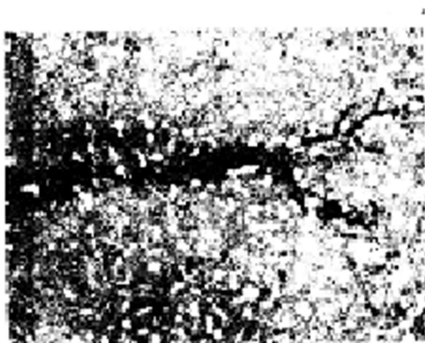
منظور از طول عمر، دوران نهفتگی بعلاوه مدت زمانی است که ترک به طول بحرانی می‌رسد. هر چند رسیدن ترک به طول بحرانی به معنای شکست قطعه نیست و میان این دو پدیده تفاوت زمانی وجود دارد ولی برای رعایت ایمنی بیشتر بهتر است پیش از رسیدن ترک به طول بحرانی، تدابیر لازم جهت تعمیر اتخاذ گردد. هرچه طول ترک بیشتر شود سرعت رشد آن نیز افزایش خواهد یافت یعنی ایمنی قطعه به سرعت از بین می‌رود.

مطابق نظریه بالتین، می‌توان ترک را به صورت یک درز باریک با شعاع انحنای بسیار ریزی در نوک آن در نظر گرفت. این شعاع با توجه

به نیروهای موجود تغییر می‌کند (هنگام رشد مقدار شعاع کم شده و ترک تیز می‌شود) [۱۱].

۲- شرح مسأله

مطابق شکل، یک ترک با طول اولیه a در سطح جسمی وجود دارد. این جسم با سیال داغی با فشار P و دمای T در تماس است. برای بیان خاصیت خوردگی سیال از غلظت آن C_∞ استفاده شده است. به دلیل وجود فشار، ترک تحت تنش محیطی σ_∞ قرار می‌گیرد بنابراین ترک در مد بازشدگی می‌باشد. ترک در راستای عمود بر تنش اعمالی رشد می‌کند. مطابق شکل ۱ هنگام رشد، احتمال انشعاب ترک پیش می‌آید. یکی انشعاب اصلی شده و دومی یا کور می‌شود و یا در ادامه به انشعاب اصلی ملحق می‌گردد. انشعاب بستگی به ساختار فلز، نوع سیال، دمای سیال، میزان بار و نوع اعمال آن دارد [۱۲].



شکل ۱- نمونه‌ای از ترک در حال رشد [۱۲]

نمودار جسم آزاد مربوطه در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل به فاصله اندکی از نوک ترک \mathcal{L}_s تمرکز تنش وجود دارد و پس از آن تنش رفته رفته کاهش می‌یابد تا به σ_∞ برسد. در این طول، تحت تأثیر تنش، چگالی آسیب‌های ریز در حال افزایش است. توزیع تنش نیز از رابطه نییر به دست می‌آید [۴ و ۶].

در نوک این ترک شعاع انحنای $\rho(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$\rho(t) = \rho_i + \rho_s \psi_s + \rho_c \psi_c \quad (1)$$

ψ_s, ψ_c به ترتیب، میزان انباشت آسیب‌های ریز در نوک ترک ($x = a$) تحت تأثیر تنش محیطی σ_∞ و محیط خوردنده C_∞ می‌باشد. چنانچه بیان شد، مقدار این دو کمیت اسکالر میان صفر و یک قرار دارد. ρ_i, ρ_c, ρ_s کمیت‌های ابعادی مربوط به ترک هستند.

در رابطه (۴):

$$\sigma(x, t) : \text{میزان تنش در نقطه داده شده } x > a$$

σ_{th} : مقدار مقاومت فلز در برابر تجمع آسیب‌های ریز ناشی از بار مکانیکی (MPa).

$$\sigma_d : \text{حد مرزی این مقاومت (GPa)}$$

در رابطه (۵):

$C_t(x, t)$: غلظت محیط خورنده در نقطه داده شده در جبهه ترک $x > a$.

C_{th} : مقدار مقاومت فلز در برابر انباشت آسیب‌های ریز در جبهه ترک به دلیل تأثیر سیال خورنده.

$$C_d : \text{حد مرزی این مقاومت است.}$$

نیروی مقاومت در برابر رشد ترک به خواص مکانیکی فلز بستگی دارد. اگر کار لازم جهت شکست جسم سالم γ_0 باشد، در جسم ترک‌دار این کار کاهش می‌یابد. میزان این کاهش مرتبط است با انباشت آسیب‌های ریز در جبهه ترک. هر چه این انباشت بیشتر باشد، کار لازم برای شکست جسم کمتر است. برای بیان این ارتباط، رابطه زیر موجود است [۷]:

$$\Gamma(t) = \gamma_0(1 - (\psi_s + \psi_c)^\alpha) \quad \alpha \geq 1 \quad (۶)$$

$$\gamma_0 = k_{Ic}^2 / E_0$$

$$E_0 : \text{مدول آنی یانگ (MPa)}$$

$$k_{Ic} : \text{ضریب شدت تنش بحرانی (MPa}\sqrt{m}\text{)}$$

آسیب‌های ریز در تمام حجم جسم پراکنده‌اند. در نوک ترک به دلیل تمرکز تنش، چگالی آنها افزایش می‌یابد. در اصل علاوه بر نیروی مقاومت، نیروی پیشبرنده ترک نیز به آسیب‌های ریز وابسته است. اما چون این نیرو دلالت بر کل حجم جسم دارد از این وابستگی چشم‌پوشی می‌شود [۱۳]. برای محاسبه نیروی پیشبرنده نیروی وابسته‌ای را ارائه داد [۱۴]. استفاده از این رابطه به دلیل دشواری محاسبه پارامتر طولی موجود در آن گسترش نیافت. شاپری [۱۵] و بالتین [۵] نیز روابطی را به کمک نظریه مکانیک موروثی بدست آوردند که در طیف وسیعی پاسخهای یکسانی دارند.

$$G(t) = k(t) \int_0^t D(t-\tau) d(k(\tau)) \quad (۷)$$

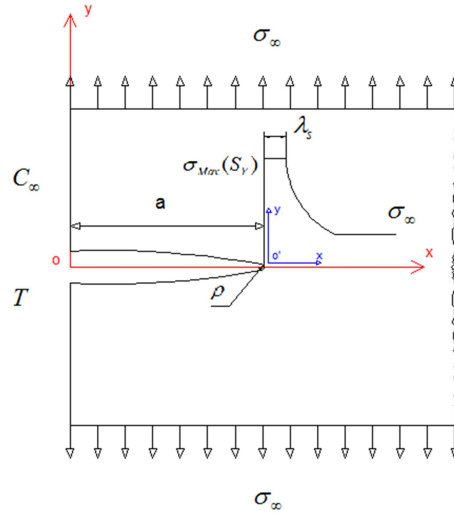
در این رابطه:

$$D(t) : \text{تابع خزش}$$

$$k(t) : \text{ضریب شدت تنش است.}$$

مطالعه تغییر شکل جسم دارای ترک از روش مکانیک موروثی به کمک اصولی که ولتر بنا نهاد انجام می‌شود. بدین منظور باید ضرایب ماده را با عملگرهای وابسته به زمان جایگزین نمود. شکل عمومی ارتباط میان تنش و کرنش در مکانیک موروثی عبارت است از:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d(\tau) \right] \quad (۸)$$



شکل ۲- نمودار جسم آزاد [۴]

۳- نیروی مقاومت و نیروی پیش‌برنده

یکی از شاخه‌های مکانیک شکست مربوط به مدلسازی انباشت آسیب‌های ریز در اجسام صلب، تحت تأثیر بار ثابت یا متناوب است. در همین زمینه، مکانیک اجسام صلب ترک‌دار در دو حالت تعادل یا رشد ترک قابل بررسی می‌باشد. انباشت آسیب‌های ریز و رشد ترک ارتباط تنگاتنگی با هم دارند، زیرا که [۷]:

- تراکم این آسیب‌ها باعث پیدایش ترک‌های کوچک در نقاطی که تمرکز تنش داریم و یا نقاطی که جزو مناطق ضعیف جسم هستند می‌شود.

- رشد ترک‌های کوچک و تشکیل ترک بزرگتر نیز نتیجه انباشت این آسیب‌ها در جبهه ترک کوچک است.

- نرخ این انباشت، تأثیر مستقیمی بر سرعت رشد ترک دارد. برای بیان تابع آسیب ناشی از بارگذاری مکانیکی و محیط خورنده روابط زیر ارائه شده‌اند [۲]:

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} = \frac{1}{t_s} f_s(\sigma_\infty, a, x, \rho) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial t} = \frac{1}{t_c} f_c(C_\infty, a, x, \rho) \quad (۳)$$

t_s, t_c : ثابت‌های زمانی و f_s, f_c نیز توابع تجربی می‌باشد.

ψ_s, ψ_c مقدار f_s, f_c به ازای $x = a$ (نوک ترک) هستند.

دو تابع f_s, f_c نیز عبارتند از:

$$f_s = \left(\frac{\sigma(x, t) - \sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^{m_s} \quad m_s > 0 \quad (۴)$$

$$f_c = \left(\frac{C_t(x, t) - C_{th}}{C_d} \right)^{m_c} \quad m_c > 0 \quad (۵)$$

در این عبارت:

$\sigma(t)$: تابع تنش.

$K(t-\tau)$: هسته خزش است.

هسته خزش باید علاوه بر میراثوندگی، در $t=0$ نیز پیوسته

باشد [۱۸]. تابع بکار رفته در این مقاله عبارت است از [۱۶]:

$$K(t-\tau) = A(t-\tau)^{-\alpha} e^{-B(t-\tau)} \quad (۹)$$

A, B, α ضرایبی هستند مربوط به خاصیت فلز که به کمک

نمودار تجربی کرنش-خزشی-زمان قابل محاسبه‌اند.

به کمک دو رابطه (۸) و (۹) (با فرض ثابت بودن تابع تنش

$\sigma(t) = \sigma_0$):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \left[1 - \frac{A}{B^{1-\alpha}} \int_0^t (B(t-\tau))^{-\alpha} e^{-B(t-\tau)} d(B\tau) \right] \quad (۱۰)$$

با مقایسه این رابطه با فرمول تابع گامای ناکامل رابطه (۱۰)

به صورت دیگری بازنویسی می‌شود:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \left[1 - \frac{A}{B^\alpha} \gamma(\alpha, Bt) \right] \quad (۱۱)$$

حد عبارت (۱۱) برابر است با:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_\infty} \quad (۱۲)$$

E_∞ : مدول بلند مدت یانگ (MPa).

$$E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E_0}{1 - \frac{A}{B^\alpha} \gamma(\alpha, Bt)} = \frac{E_0}{1 - \frac{A}{B^\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad (۱۳)$$

$t \rightarrow \infty$

$\Gamma(\alpha)$: تابع گاما.

در نتیجه:

$$A = \frac{B^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \frac{E_\infty - E_0}{E_\infty} \quad (۱۴)$$

θ_r : ثابت زمانی (h).

با جایگذاری مقدار یافته شده برای ضریب A در معادله (۱۰) رابطه

جدیدی برای محاسبه کرنش خزشی بدست می‌آید:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \left[1 + \frac{E_0 - E_\infty}{E_\infty} \frac{\gamma(\alpha, t/\theta_r)}{\Gamma(\alpha)} \right] \quad (۱۵)$$

در این تابع، چهار ضریب $E_0, E_\infty, \alpha, \theta_r$ به چشم می‌خورند

که جهت یافتن آنها به منحنی کرنش خزشی-زمان نیاز است.

بدین ترتیب تابع خزش قابل محاسبه است:

$$D(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{E_0 - E_\infty}{E_\infty} \frac{\gamma(\alpha, t/\theta_r)}{\Gamma(\alpha)} \quad (۱۶)$$

۴- بررسی تأثیر غلظت محیط خورنده بر رشد ترک

علاوه بر بار مکانیکی که بر رشد ترک تأثیر گذار است، خوردندگی

سیال نیز نقشی بر این رشد دارد. برای توصیف فرآیند آسیب دیدن و

در نهایت شکست نیاز به حل معادله پخش (نفوذ سیال به جبهه ترک) می‌باشد.

غلظت سیال با C_∞ نشان داده می‌شود. فرض می‌کنیم که C_t

غلظت سیال در نوک ترک ($x=a$) باشد. برای ترک‌های کوچک

می‌توان از تغییرات غلظت سیال درون ترک چشم پوشی کرد

$C_t = C_\infty$ ولی برای ترک‌های بزرگتر واضح است که $C_t < C_\infty$.

معادله زیر برای این منظور در دسترس است [۱۸]:

$$\frac{dC_t}{dt} = \frac{C_a - C_t}{\lambda_c} \frac{da}{dt} + \frac{C_a - C_t}{t_a} \quad (۱۷)$$

در این معادله:

$\frac{da}{dt}$: سرعت رشد ترک.

λ_c : پارامتر طولی است و بیانگر طولی در جبهه ترک است که

تحت تأثیر سیال، آسیب‌های ریز در آنجا در حال انباشته شدن هستند.

آزمایشها نشان داده‌اند که این طول در حدود $10^{-10} M$

است [۱۸ و ۱۶] و همچنین:

$$C_a = \frac{C_\infty}{1 + a/a_\infty} \quad (۱۸)$$

a_∞ : پارامتر طولی.

غلظت سیال خورنده مقدار عددی کوچکی است برای این که در

محاسبات با ارقام کوچک سر و کاری نباشد، این مقدار با یک مقدار

استاندارد قیاس می‌شود. بدین منظور برای حل معادلات یاد شده، به

جای C_t ، نسبت C_t/C_∞ (غلظت استاندارد) بکار می‌رود. در نتیجه

تغییرات غلظت سیال با رشد ترک همواره در محدوده [۰،۱] باقی می‌ماند.

۵- دوران نهفتگی

در شروع فرآیند بارگذاری، ترک رشد نمی‌کند، زیرا نیروهای

پیش‌برنده از نیروهای مقاومت کمترند ($G(t) < \Gamma(t)$). به مرور

زمان به دلیل تراکم آسیب‌های ریز در جبهه ترک مقدار مقاومت ماده

(مطابق رابطه (۶)) کاهش می‌یابد. زمانی که تساوی $G(t) = \Gamma(t)$

برقرار شود، دوران نهفتگی (t_h) به پایان رسیده و رشد ترک آغاز می‌گردد.

از آنجا که $t_h \ll \theta_r$ (این موضوع در ادامه اثبات خواهد شد)

معادله (۱۶) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$D(t) = \frac{1}{E_0} \quad (۱۹)$$

در نتیجه نیروی پیش‌برنده عبارت خواهد بود از:

$$G(t) = \frac{k_1^2}{E_0} \quad (۲۰)$$

برای محاسبه نیروی مقاومت به توزیع تنش در نوک ترک نیاز

است. مطابق رابطه نیبر [۵]:

$$\sigma(x, t) = (1 + 2.24 \sqrt{a/\rho(t)}) \sigma_\infty (1 + \frac{4(x-a)}{\rho(t)})^{-0.5} \quad (۲۱)$$

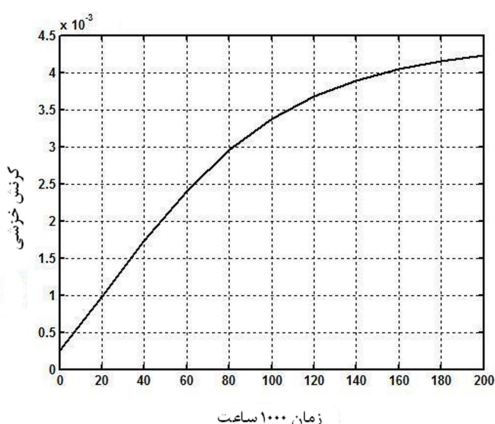
با حل دستگاه معادلات بدست آمده ((۱)، (۱۷)، (۲۹)) منحنی رشد ترک قابل محاسبه است.

۷- حل معادلات و بررسی نتایج

برای تحلیل مساله برنامه‌ای در محیط Matlab تهیه شد. این برنامه با دریافت مشخصات فلز $(E, S_y, \nu, k_c, \dots)$ ، طول اولیه ترک و سایر ضرایب که به آنها اشاره کردیم ابتدا مساله را در مرحله دوران نهفتگی $(\phi \leq 1)$ تحلیل می‌کند. برنامه مرحله رشد را تا رسیدن به طول بحرانی و برقراری شرط $k = k_c$ ادامه می‌دهد. نتایج در شکل‌های ۴ تا ۱۰ و ۱۲ دیده می‌شوند.

در گام نخست نیاز به تعیین ضرایب نیروی پیش‌برنده در $(E_0, E_{\infty}, \alpha, \theta_r)$ از روی نمودار تجربی کرنش خزشی-زمان می‌باشد. برای این منظور نمودار تجربی مربوط به فولاد $12X1M\Phi$ بکار رفت [۱۸]. به کمک این نمودار، برنامه ضرایب را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$E_0 = 220GPa, E_{\infty} = 8.84GPa, \alpha = .99, \theta_r = 98000h$$



شکل ۳- نمودار تجربی کرنش خزشی-زمان مربوط به فولاد

$12X1M\Phi$

با توجه به معادلات بخش ۵ با فرض $a = 1mm$ و غلظت استاندارد 0.4% و $\sigma_{\infty} = 46MPa$ دوره نهفتگی ترک (t_h) حدود یک ماه بدست آمد.

در مرحله بعد، رشد ترک تا رسیدن به طول بحرانی (a_c) مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ نشانگر رشد ترک یاد شده بر حسب زمان است. ملاحظه می‌شود که در سال‌های اولیه، این رشد از شیب کمی برخوردار است، اما به مرور زمان مقدار آن افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در سال‌های آخر، ترک از کل سال‌های پیشین بیشتر رشد می‌کند. با توجه به نمودار، طول بحرانی ترک $a_c \approx 7mm$ می‌باشد.

در شکل ۵ سرعت رشد ترک نسبت به ضریب شدت تنش در مختصات لگاریتمی دیده می‌شود. در همخوانی با نمودار قبلی با افزایش طول ترک، سرعت رشد آن نیز بیشتر می‌شود.

به کمک این رابطه و روابط (۲) و (۴) تابع آسیب در اثر بار مکانیکی در نوک ترک $(x = a)$ قابل محاسبه است:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = \frac{1}{t_s} \left(\frac{(1 + 2.24\sqrt{a/\rho(t)})\sigma_{\infty} - \sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^{m_s} \quad (22)$$

از آنجا که در شروع رشد ترک، طول آن کوچک است، فرض می‌شود $C_{\infty} = C_t$ بنابراین تابع آسیب در نوک ترک تحت تأثیر سیال خورنده به کمک روابط (۳) و (۵) بدست می‌آید:

$$\frac{d\psi_c}{dt} = \frac{1}{t_c} \left(\frac{C_{\infty} - C_{th}}{C_d} \right) \quad (23)$$

به کمک این دو معادله و معادلات (۱) و (۶) یک دستگاه معادلات دیفرانسیل غیر خطی جهت محاسبه طول دوره نهفتگی، بدست می‌آید.

۶- رشد ترک

پس از اینکه میزان آسیب در جبهه ترک به دلیل تأثیر بار مکانیکی و محیط خورنده به حد معینی رسید، مقاومت ماده در برابر رشد ترک کاهش یافته و ترک شروع به رشد می‌کند [۱۷].

برای محاسبه نیروی پیش‌برنده، روابط (۷) و (۱۶) بکار می‌روند، با این تفاوت که تابع گامای موجود در آن دیگر قابل چشم‌پوشی نیست. به منظور یافتن نیروی مقاومت بهتر است مبدأ دستگاه مختصات به نوک ترک (نقطه O' شکل (۲)) منتقل شود. در دستگاه جدید:

$$x_1 = x - a(t) \quad (24)$$

در دستگاه جدید، روابط (۴) و (۵) به صورت زیر در می‌آیند:

$$\frac{f_s}{t_s} = - \frac{\partial \phi_s}{\partial x_1} \frac{\partial a}{\partial t} \quad (25)$$

$$\frac{f_c}{t_c} = - \frac{\partial \phi_c}{\partial x_1} \frac{\partial a}{\partial t} \quad (26)$$

در نتیجه:

$$\psi_s(t) = \psi_{rs}(t) + \frac{\lambda_s}{t_s} \left(\frac{da}{at} \right)^{-1} f_s \quad (27)$$

$$\psi_c(t) = \psi_{rc}(t) + \frac{\lambda_c}{t_c} \left(\frac{da}{at} \right)^{-1} f_c \quad (28)$$

در این دو رابطه:

$$\psi_{rs}(t), \psi_{rc}(t): \text{مقدار تابع آسیب در انتهای منطقه آسیب}$$

دیده جبهه ترک است.

هنگام رشد ترک، تغییرات غلظت سیال نیز باید در نظر گرفته

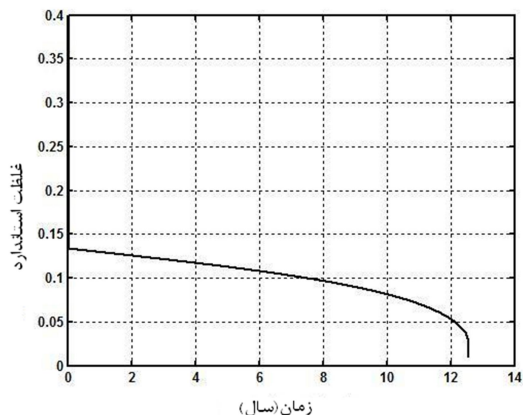
شود. این موضوع در محاسبه f_c تأثیرگذار است.

برای محاسبه رشد از معادلات (۷) و (۱۶) و (۲۹) و (۳۰) رابطه زیر

بدست می‌آید:

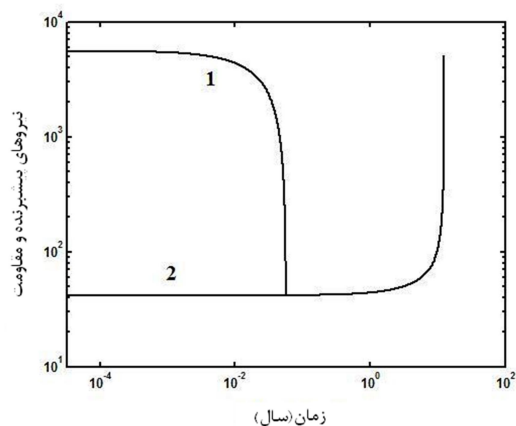
$$\frac{da}{dt} = \frac{\left[\frac{\lambda_s}{t_s} \left(\frac{\sigma(x,t) - \sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^{m_s} + \frac{\lambda_c}{t_c} \left(\frac{C_t - C_{th}}{C_d} \right)^{m_c} \right]}{\left(1 - \frac{G(t)}{\gamma_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (29)$$

تغییرات غلظت استاندارد شده نسبت به زمان در شکل ۷ دیده می‌شود. با رشد ترک و افزایش طول آن مقدار غلظت در نوک ترک کم می‌شود. زیرا ارتباط میان سیال درون ترک با سیال جاری در دهانه ترک دشوارتر می‌گردد.



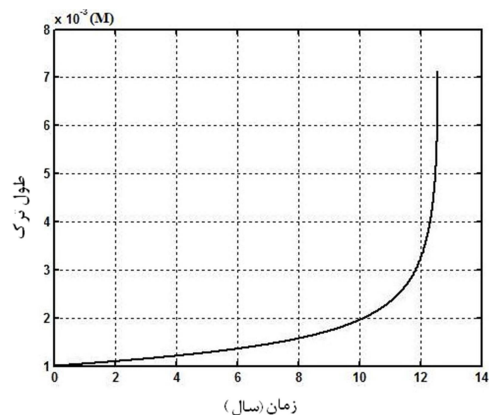
شکل ۷- تغییرات غلظت محیط خورنده در جبهه ترک

بخش سمت چپ نمودار ۸ مربوط به دوره نهفتگی است یعنی $0 < t < t_h$ که در آن ترک رشدی ندارد. چنانچه ملاحظه می‌شود در این مرحله نیروی مقاومت در حال کاهش است که دلیل این موضوع در نمودارهای قبلی شرح داده شد. آغاز رشد ترک در لحظه $t = t_h$ است که در آن $G(t) = \Gamma(t)$ خواهد بود. لازم به ذکر است که صحت رفتار نمودارهای مربوط به تابع آسیب، نیروهای پیشبرنده و مقاومت، شعاع انحنای نوک ترک و غلظت استاندارد قبلا در مرجع [۴] ارایه شده است.

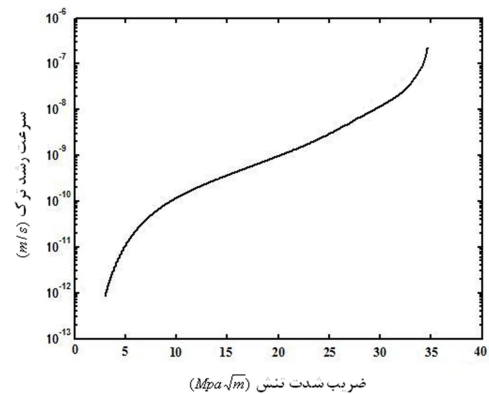


شکل ۸- نمودار تغییرات نیروهای مقاومت (۱) و پیشبرنده (۲) نسبت به زمان در مختصات لگاریتمی

با این مدل می‌توان اثرات تغییر طول اولیه ترک، تنش اعمالی و غلظت محیط خورنده بر منحنی رشد را بررسی نمود. برای نمونه، تأثیر طول اولیه بر رشد ترک در نظر گرفته شد. این موضوع در شکل ۹ به نمایش در آمده است. با فرض ثابت بودن غلظت محیط خورنده و تنش

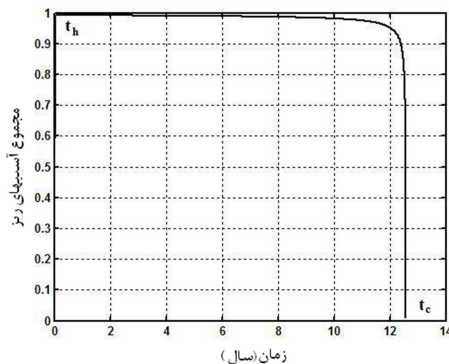


شکل ۴- نمودار رشد ترک بر حسب زمان

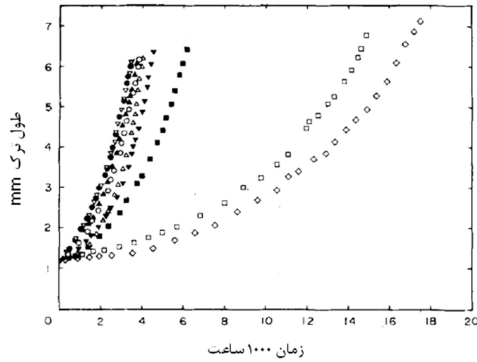


شکل ۵- نمودار سرعت رشد ترک

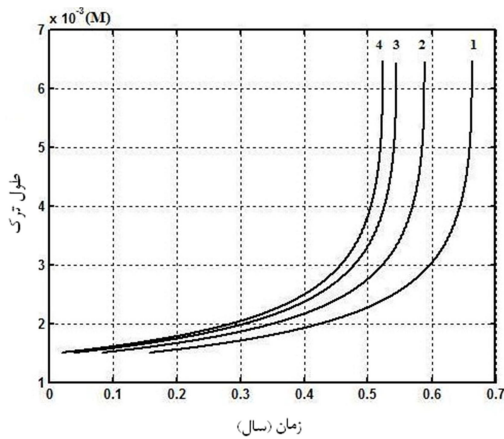
شکل ۶ شامل دو بخش است: بخش نخست محدوده $[0, t_h)$ مربوط به دوره نهفتگی و انباشت آسیب در جبهه ترک تا مقدار مرزی است. در این محدوده چنانچه قبلا اشاره شد $G(t) < \Gamma(t)$ به علاوه مقدار مقاومت در حال کاهش است (بدلیل افزایش آسیب). در لحظه $t = t_h$ بخش دوم نمودار آغاز می‌شود، در این لحظه $G(t) = \Gamma(t)$ شده و ترک شروع به رشد می‌کند. در این مرحله مقدار آسیب کاهش یافته و سرعت رشد بیشتر می‌شود. در لحظه $t = t_c$ ، طول ترک به حد بحرانی رسیده و مقدار آسیب برابر با صفر خواهد شد. این بدان معناست که ترک، دیگر برای رشد نیاز به انباشت آسیب ندارد بنابراین با سرعت زیادی رشد خواهد کرد. برنامه در این لحظه متوقف می‌شود.



شکل ۶- نمودار تغییرات انباشت آسیب در جبهه ترک بر حسب زمان



شکل ۱۱- نمودار تجربی رشد ترک در تنش‌های مختلف مرجع [۱۹]



شکل ۱۲- نمودار رشد ترک برای غلظت‌های استاندارد

$C_d / C_\infty = 0.2; 0.3; 0.4; 0.5$ (منحنی‌های ۱ تا ۴)

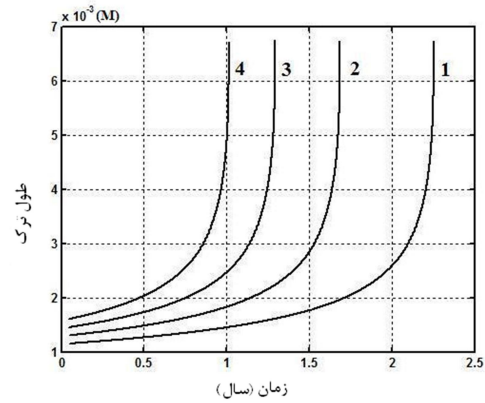
۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از توابع آسیب و نظریه مکانیک موروثی، مدلی جهت تخمین منحنی رشد ترک در حضور محیط خوردنده و دمایی بالا به دست آمد. به کمک مدل حاصله امکان تخمین عمر باقیمانده قطعات در این نوع بارگذاری مهیا می‌شود. به علاوه می‌توان میزان بیشینه فشار را تا زمان تعمیر یا تعویض قطعه به دست آورد. همچنین برنامه‌ریزی دقیقی جهت تعمیرات میسر می‌شود. از دیگر ویژگی‌های مدل ارائه شده امکان جداسازی نقش خوردگی و خزش در کاهش طول عمر است، بنابراین با شناخت اثرات هر عامل امکان انتخاب آلیاژ مناسبی که در شرایط کاری عمر بیشتری داشته باشد فراهم می‌شود. از میان سه عامل تنش اعمالی، طول ترک و خوردندگی سیال، تنش اعمالی نقش موثرتری در افزایش سرعت رشد ترک و کوتاهتر شدن دوره نهفتگی ترک در قطعه دارد.

۹- مراجع

[1] Gutman E. M., *Mechanochemistry of metals and corrosion protection*. Metallurgy, Moscow, 1981.

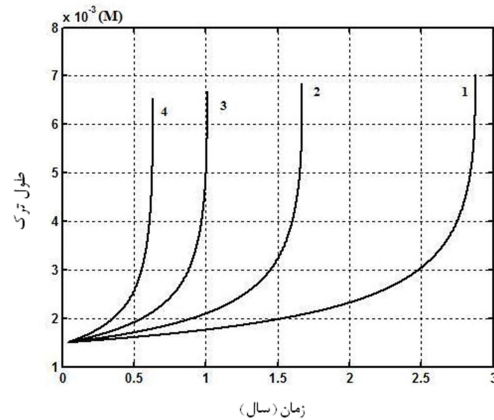
اعمالی، اثر افزایش طول اولیه ملاحظه می‌شود. با این افزایش، دوره نهفتگی روند نزولی به خود گرفته و عمر نیز کاهش می‌یابد. ولی تأثیر چندانی در طول نهایی ترک دیده نمی‌شود.



شکل ۹- منحنی‌های رشد ترک با طولهای متفاوت

$a = 1.15; 1.3; 1.45; 1.6mm$ (نمودارهای ۱، ۲، ۳، ۴)

با افزایش تنش اعمالی، دوره نهفتگی ترک کاهش یافته و علاوه طول بحرانی آن نیز کمتر می‌شود. از شکل ۱۰ پیداست که افزایش تنش به مراتب مخربتر از افزایش طول اولیه ترک می‌باشد زیرا در این حالت، طول بحرانی ترک نیز کوچکتر می‌گردد.



شکل ۱۰- نمودار رشد ترک برای تنش‌های

$50; 53.75; 57.5; 61.25MPa$ (منحنی‌های ۱، ۲، ۳، ۴)

برای بررسی درستی رفتار مدل ارائه شده، شکل ۱۱ از مرجع [۱۹] آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همرفتاری منحنی‌های تجربی این شکل با شکل ۱۰ بیانگر درستی روش استفاده شده در این تحقیق است. تفاوت در مقادیر بین این دو شکل، به تفاوت در جنس، تنش اعمالی، دما و محیط خوردنده باز می‌گردد.

نمودار رشد ترک تحت تاثیر غلظت‌های گوناگون محیط خوردنده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. منحنی‌های ۱ تا ۴ برای افزایش غلظت استاندارد بدست آمده‌اند. چنانچه ملاحظه می‌شود با افزایش غلظت، دوره نهفتگی کاهش یافته و به علاوه مدت زمان رسیدن به طول بحرانی نیز کمتر می‌شود در حالیکه طول بحرانی ثابت است

- [2] Pavlina V. S., The diffusion saturation of alloys in the conditions of complexation. *Physical-Chemical Mechanics of materials*, No. 6, pp. 29-34. 1984.
- [3] Kulagin D. A., Lokoshchenko A. M., Modeling the effect of aggressive environment on creep of metals under complex stress state. *Mechanics of solid bodies*, No. 1, pp. 188-199. 2004.
- [۴] زرکش م، حسن اویچ گ، محاسبه منحنی رشد ترک در پوسته‌های استوانه‌ای تحت تاثیر بار ثابت مکانیکی و محیط خوردنده به کمک تابع آسیب. نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، ش ۴۶، ص ۵۲-۴۰، ۱۳۹۱.
- [5] Bolotin V. V., Minakov B. V., Crack growth and fracture in creep. *Solid mechanics*, No. 3, pp. 147-156. 1992.
- [6] Bolotin V. V., Babkin A. A., and Belousov I.L., Probabilistic model of early fatigue crack growth. *Probab. Eng. Mech.*, No. 3, pp. 227-232. 1998.
- [۷] فکور م، مهری ن، شبیه سازی رفتار ناحیه آسیب نوک ترک مواد اورتروپیک با استفاده از مدل ویسکوالاستیک. نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر مهندسی مکانیک، د. ۴۸، ش. ۴، ص ۴۱۰-۴۰۱، ۱۳۹۵.
- [8] Rabotnov Yu. N., *Creep problems in structural members*. URSS, Moscow, 1966.
- [9] Rabotnov Yu. N., *Elements of hereditary solid mechanics*. URSS, Moscow, 1977.
- [10] Krajcinovic D., Continuum Damage Mechanics: When and How. *International Journal of Damage Mechanics*, pp. 217-229. 1995.
- [11] Bolotin V. V., *Prediction of machine and structures resources*. Mechanical engineering, Moscow, 1984.
- [12] Bagayavlenski V. L., *Corrosion of steels at the NPP*. Energoatom, Moscow, 1984.
- [13] Parton V. Z., Morozov E. M., *Mechanics of Elastic-Plastic Fracture: Fundamentals of Fracture Mechanics*. URSS, Moscow, 2007.
- [14] Wnuk M. P., Subcritical growth of fracture. *International Journal of Fracture Mechanic*, No. 1, pp. 7-20. 1971.
- [15] Shapery R. A., Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. *International Journal of Fracture Mechanic*, No. 1, pp. 195-233. 1984.
- [۱۶] زرکش م، تخمین نقش خوردگی و خزش در رشد ترک و کاهش عمر قطعه، چهاردهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی اراک، ایران، ۱۳۹۶.
- [17] Rudoy E. M., Kazarinov N. A., Numerical simulation of the equilibrium of an elastic two-layer structure with a crack. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. No.1, pp.78-91. 2017.
- [18] Murzakanov G. K., *Methods for assessing structural stability of pipelines*, MPEI, Moscow, 2009.
- [19] Yadrov Victor Ivanovich. , *Influence of Plastic Deformation in the Top of Crack on Speed of its Growth in Steel 20 With Two Axial Loading*, PhD. Thesis, Omsk State Technical University, Russia, 2015.