

شبیه سازی شکست نرم در آزمایش کشش فولاد API X65 با استفاده از مدل آسیب اصلاح شده گرسون

حسین فراهت

استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران

چکیده

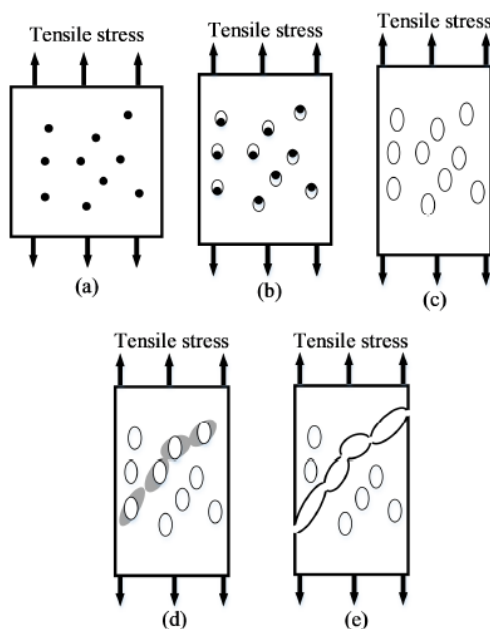
فولاد میکروآلیاژی گرید API X65 به عنوان فولاد عمده در تولید لوله های انتقال گاز با درز جوش مارپیچ به کار برده می شود. شکست نرم این فولاد در نتیجه جوانه زنی، رشد و به هم پیوستن حفره ها هنگام تغییر شکل پلاستیک ماده صورت می گیرد. در تحقیق حاضر، از داده های تجربی آزمون کشش روی نمونه های استخراج شده از فلز پایه و از بدنه لوله فولادی API X65 استفاده شد. شکست نرم در این نوع فولاد، با استفاده از مدل آسیب GTN مورد تحلیل عددی قرار گرفت. شبیه سازی در محیط نرم افزار المان محدود آباکوس انجام شد و نمونه تست کشش بارگذاری شد. پارامترها و ضرایب مدل آسیب GTN برای فولاد API X65 تعیین و کالیبره گردید. نتایج نشان داد که مدل GTN قادر است شکست نمونه را با دقت مناسب و مطابق مشاهدات آزمایشگاهی پیش بینی نماید. در نمودار نیرو - جابجایی حاصله از شبیه سازی، مقادیر نیروی حداکثر و تغییر طول در لحظه شکست به ترتیب برابر با ۱۶/۸ kN و ۶ mm به دست آمد که در مقایسه با نتایج تجربی، ۰/۵۹ درصد و ۲/۲۸ درصد خطا را نشان می دهد.

واژگان کلیدی: شکست نرم، فولاد API X65، مدل آسیب GTN، آزمون کشش

۱- مقدمه

فولاد گرید API X65 از خانواده فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا^۱ است که حاوی کربن و مقادیر ترکیب میکروآلیاژی (کمتر از ۰/۱ درصد وزنی) مثل تیتانیوم، وانادیوم، نیوبیوم و مولیبدن می‌باشد و مطابق استاندارد API-5L به عنوان فولاد عمده در تولید لوله‌های انتقال گاز طبیعی به کار برده می‌شود (آبدیده و همکاران، ۱۳۹۳). فرآیند نورد کنترل شده ترمومکانیکی همراه با خنک‌کاری سریع در ساخت این فولادها استفاده می‌شود. این لوله‌ها با درز جوش مستقیم و مارپیچ با قطر خارجی ۵۰۸ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر و با ضخامت جداره ۶ تا ۲۰ میلی‌متر در طول‌های ۸ تا ۱۸ متر تولید می‌شود.

پدیده شکست نرم در مواد شکل‌پذیر، در نتیجه جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌های میکروسکوپی که در ناخالصی‌ها و ذرات فاز دوم شکل می‌گیرند، به وجود می‌آید. فلزات نرم در نتیجه یک بارگذاری معین، سرانجام به یک نقطه ناپایداری می‌رسند. در این وضعیت، جوانه‌زنی حفره‌های ریز شروع می‌گردد و با ادامه بارگذاری، رشد حفره‌ها تا شکل‌گیری یک جریان ماکروسکوپی ادامه می‌یابد و سرانجام به شکست نرم منجر می‌شود. پیش‌بینی دقیق شکست نرم در فلزات، همواره یک موضوع اصلی و قابل توجه برای پژوهشگران است. تحقیقات متعددی در این زمینه صورت گرفته است که نتیجه آن‌ها ارائه مدل‌های مختلفی از قبیل گرسون^۲ و مارسینیاک-کوزینسکی^۳ می‌باشد. تجمع عوامل آسیب و نقص، باعث به وجود آمدن ترک یا حفره می‌شود. تورگارد و نیدلمن رشد ترک را بر پایه معیار گرسون مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها شکست را به صورت نتیجه طبیعی فرآیند تغییر شکل، همراه با جوانه زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها که منجر به تشکیل ریز ترک‌ها می‌گردد، مدل‌سازی نمودند. در "شکل ۱" طرح‌واره مراحل تشکیل ترک و پارگی در معیار آسیب گرسون - تورگارد و نیدلمن (مدل GTN)^۴ نشان داده شده است. (Gurson, 1977), (Tvergaard, 1982), (Tvergaard and Needleman, 1984), (Banabic and Kami, 2018).



شکل ۱- طرح‌واره رشد حفره و پارگی در یک ورق فلزی نرم (a) ذرات ناخالصی و فاز ثانویه، (b) جوانه‌زنی حفره‌ها، (c) رشد حفره‌ها، (d) ایجاد گلوپی بین حفره‌ها و (e) به هم پیوستن حفره‌ها و پارگی

¹ High Strength Low Alloy (HSLA)

² Gurson

³ Marciniak - Kuczyński

⁴ Gurson - Tvergaard - Needleman



محققان با استفاده از مدل GTN، رشد ترک را در لوله فولادی 22NiMoCr37 تحت خمش چهار نقطه‌ای مطالعه نمودند. آنها تلاش کردند که با مقایسه بین مقادیر آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در سطوح مختلف نمونه، پارامترهای مدل GTN را تنظیم کنند. نتایج آنها نشان داد که مدل GTN به خوبی قادر به پیش‌بینی شکست نرم در لوله می‌باشد (Acharyya and Dhar, 2008). همچنین محققان با انجام شبیه‌سازی المان محدود از طریق زیرروال^۱ VUMAT در نرم‌افزار تجاری آباکوس، دریافتند که پیش‌بینی نرم‌شوندگی ماده توسط مدل آسیب GTN سریع‌تر از مدل‌های فون میسر و هیل^۲ است (Chen and Dong, 2009). در تحقیق دیگری، پژوهشگران از مدل روزلیر^۳ برای ارزیابی رفتار شکست نرم فلز جوش و فلز پایه Al6061 که با لیزر جوش کاری شده بود، استفاده کردند. آنها آزمون کشش را برای نمونه‌های صاف و شیاردار که از فلز پایه، منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت استخراج شده بود، انجام دادند و با کالیبره کردن پارامترهای مدل روزلیر، رشد ترک نرم در نمونه‌ها را شبیه‌سازی کردند (Tu et al, 2016).

در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی شکست نرم در نمونه آزمایشگاهی تحت کشش انجام شد. ماده مورد مطالعه، فولاد میکروآلیاژی با گرید API X65 می‌باشد که به عنوان فولاد عمده در تولید لوله‌های انتقال گاز با درز جوش ماریپیچ به کار برده می‌شود. یک مدل المان محدود در نرم‌افزار آباکوس ایجاد شد و شبیه‌سازی مشابه شرایط آزمایش انجام شد. به منظور پیش‌بینی لحظه وقوع پارگی از مدل آسیب GTN استفاده شد. رفتار مکانیکی ماده، حالت شکست و پیش‌بینی آسیب در نمونه تحت کشش، توزیع تنش و کرنش در نمونه، کسر حجمی حفره‌ها قبل از شروع شکست و نمودار نیرو - جابجایی گزارش شد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل شد و با نتایج آزمایشگاهی موجود، مقایسه و صحت‌سنجی گردید. با توجه به اینکه عملکرد مدل GTN در پیش‌بینی شکست نمونه، تحت تأثیر شناسایی دقیق و تعیین مقدار صحیح پارامترهای آن می‌باشد، در این تحقیق سعی شده تا با انجام تحلیل اجزاء محدود و با هدف تنظیم کردن پارامترها و ضرایب مدل GTN برای فولاد API X65، به اهمیت این موضوع پرداخته شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل آسیب GTN

در سال ۱۹۷۷ گرسون یک معیار تسلیم جدید ارائه نمود که در آن، رفتار پلاستیک ماده به خرابی ناشی از جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها مرتبط است. تورگارد و نیدلمن با افزودن پارامترهای q_1 ، q_2 و q_3 به معیار گرسون، اثرات به هم پیوستن حفره‌ها بر تغییر شکل پلاستیک ماده را در نظر گرفتند (Gurson, 1977)، (Tvergaard, 1982)، (Tvergaard and Needleman, 1984). این مدل اصلاح شده که تحت عنوان مدل آسیب GTN شناخته می‌شود، بر مبنای اصول مکانیک محیط‌های پیوسته استوار است و تابع پتانسیلی به فرم زیر دارد:

$$\Phi = \left(\frac{\bar{\sigma}}{Y}\right)^2 + 2 q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{3p}{2Y}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه $\bar{\sigma}$ تنش مؤثر فون میسر، Y تنش تسلیم معادل ماده بدون حفره، p تنش هیدروستاتیک است. همچنین f^* کسر حجمی مؤثر حفره‌ها می‌باشد و به صورت تابع زیر تعریف می‌شود:

$$f^* = f + (1 - \kappa)(f_c - f) h[f_c - f] \quad (2)$$

که در آن، f کسر حجمی لحظه‌ای حفره‌ها است. پارامتر ثابت κ نرخ به هم پیوستن حفره‌ها بعد از رسیدن به مقدار بحرانی f_c را تعیین می‌کند و برابر است با:

¹ Gurson - Tvergaard - Needleman

² Gurson - Tvergaard - Needleman

³ Hill

$$\kappa = \frac{f_F^* - f_c}{f_F - f_c} \quad (3)$$

که در آن :

$$f_F^* = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3} \quad (4)$$

f_F مقدار کسر حجمی نهایی حفره‌ها (هنگام شکست ماده) است. تابع پله‌ای $h[f_c - f]$ در رابطه (۲)، به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$h[f_c - f] = \begin{cases} 1 & f > f_c \\ 0 & f < f_c \end{cases} \quad (5)$$

مطابق رابطه (۶)، نرخ افزایش کسر حجمی حفره‌ها به صورت مجموع نرخ رشد حفره‌ها (\dot{f}_g) و نرخ جوانه‌زنی حفره‌های جدید (\dot{f}_n) بیان می‌شود. جوانه‌زنی حفره‌ها در محل ذرات فاز دوم و ناخالصی‌ها اتفاق می‌افتد.

$$\dot{f} = \dot{f}_g + \dot{f}_n \quad (6)$$

$$\dot{f}_g = (1 - f) \dot{\epsilon}_{kk}^p \quad (7)$$

$$\dot{f}_n = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon^p - \bar{\epsilon}_N}{S_N} \right)^2 \right] \dot{\epsilon}^p \quad (8)$$

که در آن، $\dot{\epsilon}_{kk}^p$ مؤلفه هیدروستاتیک کرنش پلاستیک می‌باشد. پارامترهای f_N ، S_N و $\bar{\epsilon}_N$ با فرآیند جوانه‌زنی حفره‌ها ارتباط دارند. f_N کسر حجمی حفره‌های مستعد جوانه‌زنی می‌باشد. در رابطه (۸) محدوده کرنش پلاستیک در جوانه‌زنی حفره‌های جدید، از یک توزیع نرمال با مقدار میانگین $\bar{\epsilon}_N$ و انحراف معیار S_N تبعیت می‌کند. پارامترها و ضرایب مدل آسیب اصلاح شده گرسون (GTN) که در فوق معرفی شد، جزء خاصیت ماده بوده و به هندسه مدل و شرایط بارگذاری بستگی ندارد.

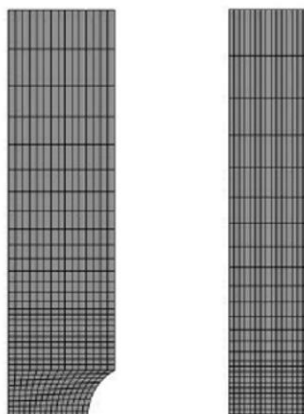
۲-۲- تحلیل المان محدود

روش‌های حل عددی و از جمله روش اجزاء محدود، به عنوان ابزاری کارآمد برای حل مسائل در حوزه مهندسی به شمار می‌آید. در تحقیق حاضر به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus، شبیه‌سازی شکست در آزمایش کشش فولاد API X65 با استفاده از مدل آسیب GTN انجام شد. مدل GTN در نرم‌افزار آباکوس تحت عنوان معیار پلاستیسیته مواد متخلخل ارائه شده است که باید پارامترهای آن برای ماده مورد مطالعه، در نرم‌افزار تعریف شود. این پارامترها شامل ۹ پارامتر f_c ، f_0 ، q_3 ، q_2 ، q_1 ، f_F ، f_N ، S_N و $\bar{\epsilon}_N$ می‌باشد و نیاز است مقادیر آنها با توجه به نتایج آزمایشگاهی برای ماده مورد نظر تعیین شود. به این منظور، از داده‌های تجربی آزمون کشش انجام شده روی نمونه‌های مستخرج از فلز پایه و از بدنه لوله فولادی API X65 استفاده شد که جزئیات مربوط به ماده مورد مطالعه، هندسه نمونه‌های آزمون و نتایج به‌دست آمده، در مرجع (Farahat, 2024) گزارش شده است.

شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار آباکوس و مشابه شرایط آزمایش انجام شد. با توجه به تقارن محوری نمونه آزمون کشش، هندسه آن در محیط نرم‌افزار ایجاد شد. با توجه به این که قسمت ابتدایی و انتهایی نمونه که در فک‌های دستگاه تست کشش قرار می‌گیرند در شبیه‌سازی تأثیری ندارند، تنها قسمت سنجه نمونه در نظر گرفته می‌شود. در این تحلیل، المان‌ها از نوع CAX4R با اندازه 0.2 میلی‌متر انتخاب شد. این المان‌ها دارای چهار گره بوده و نحوه انتگرال‌گیری به صورت کاهشی می‌باشد. به منظور تعیین اندازه مناسب المان‌ها، مدل مورد بررسی با المان‌هایی با اندازه‌های مختلف مش زده شد. برای هر کدام، نتایج به‌دست آمده از مدل عددی با نتایج تجربی مقایسه گردید و درصد اختلاف نتایج محاسبه شد. "شکل ۲" مدل مش‌بندی شده



را نشان می‌دهد. نمونه در لبه پایینی و سمت چپ مقید شد و به ترتیب مانع از حرکت آن در راستای عمودی و افقی گردید. همچنین با اعمال سرعت به لبه بالایی، نمونه تحت کشش قرار گرفت.



شکل ۲- مدل مش‌بندی شده

مقادیر چگالی، مدول یانگ و ضریب پواسون ماده به ترتیب 7800 kg/m^3 ، 210 GPa و 0.3 در نظر گرفته شد. برای محاسبه تنش و کرنش حقیقی، از روابط زیر استفاده شد و داده‌های تنش - کرنش حقیقی وارد نرم‌افزار شد (اطلاعات مربوط به محدوده رفتار پلاستیک ماده تعریف شد).

$$\epsilon_t = \ln (1 + \epsilon) \quad (9)$$

$$\sigma_t = \sigma (1 + \epsilon) \quad (10)$$

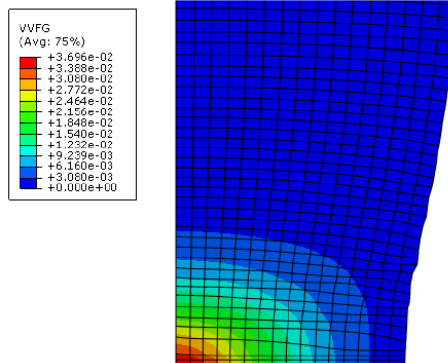
برای تعریف رفتار ماده در ناحیه شکست و تغییر رفتار پلاستیک آن بعد از حد تسلیم، از مدل آسیب GTN استفاده شد. به منظور پیدا کردن مقادیر پارامترها در مدل GTN و کالیبره کردن آن، از داده‌های تجربی آزمون کشش استفاده شد. پارامترها و ضرایب مدل GTN باید به گونه‌ای تعیین شوند که منحنی نیرو - جابجایی به دست آمده از شبیه‌سازی، بیشترین انطباق را بر نتایج آزمایشگاهی برای تمام نمونه‌ها داشته باشد. در جدول ۱، مقادیر این پارامترها برای فولاد API X65 ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترها و ضرایب تنظیم شده مدل آسیب اصلاح شده گرسون (GTN) برای فولاد API X65

پارامتر	q_1	q_2	q_3	f_0	f_c	f_F	f_N	S_N	$\bar{\epsilon}_N$
مقدار	۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۰۰۰۷۷	۰/۰۱	۰/۳	۰/۰۰۸	۰/۱	۰/۳

۳- نتایج و بحث

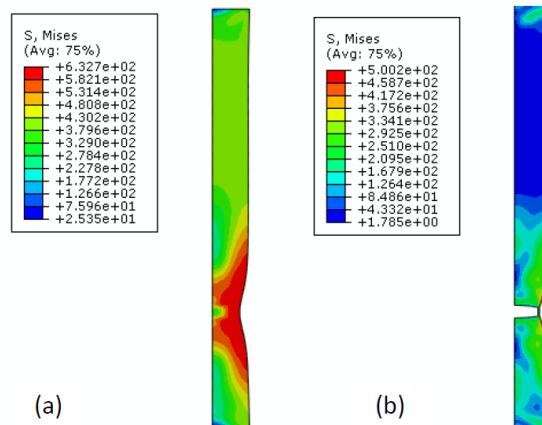
"شکل ۳" کسر حجمی حفره‌ها منجر به خرابی در لحظه قبل از شکست را نشان می‌دهد. گلویی شدن نمونه تحت کشش قابل مشاهده است که در واقع، کارایی مدل آسیب GTN را بیان می‌کند. کسر حجمی حفره‌ها در ناحیه قرمز رنگ، به مقدار بحرانی رسیده و المان‌ها تخریب شده‌اند و دیگر نمونه قادر به تحمل بار اعمالی نخواهد بود. انتهای پایینی نمونه در "شکل ۳"، قسمتی است که شرط مرزی تقارن در آنجا اعمال شده است.



شکل ۳- کسر حجمی حفره‌ها در لحظه قبل از شکست

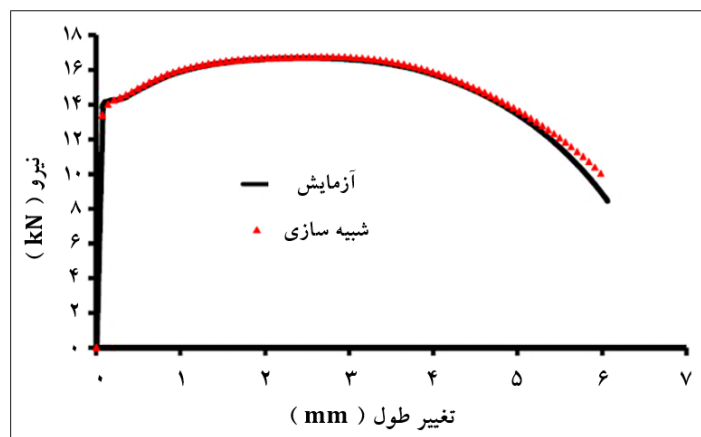
با افزایش کرنش‌ها، جوانه‌زنی و رشد حفرات با سرعت بیش‌تری انجام می‌شود که باعث افزایش کسر حجمی حفرات خواهد شد. زیرا با افزایش کرنش‌ها، مکان‌های مناسب جوانه‌زنی کاهش یافته و رشد حفرات بیش‌تر می‌شود. با رسیدن کرنش‌ها به یک مقدار حدی، به علت به اتمام رسیدن مکان‌های مناسب جوانه‌زنی، نرخ جوانه‌زنی حفرات ثابت شده و جوانه‌زنی حفرات جدید نخواهیم داشت (فقط رشد حفرات اتفاق می‌افتد).

در "شکل ۴" توزیع تنش میسر در نمونه تحت کشش، قبل از شروع شکست و همچنین بعد از شکست و حذف المان‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که تنش‌های معادل در موضع شکست به حداکثر مقدار خود رسیده‌اند. شکست ماده در ناحیه گلوپی شدن به وضوح قابل مشاهده است و حالت شکست نمونه با مشاهدات آزمایش مطابقت دارد. فرآیند به هم پیوستن حفره‌ها و شکل‌گیری ترک به صورت موضعی عمل می‌کند و شبیه‌سازی دقیق شکست نرم در ماده، بر اساس مدل آسیب GTN امکان‌پذیر است. ملاحظه می‌شود که بعد از وقوع شکست، نیروهای اعمالی به نمونه کاهش یافته و مقاومت ماده در برابر نیروهای وارده حذف می‌شود؛ بنابراین مقادیر تنش‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۴- توزیع تنش میسر در نمونه تحت کشش: (a) قبل از شروع شکست، (b) بعد از شکست

"شکل ۵" نمودار نیرو - جابجایی حاصله از شبیه‌سازی عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی به‌دست آمده از آزمون کشش انجام شده بر روی نمونه فولادی API X65 را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش، تطابق خوبی را نشان می‌دهد. مقدار نیروی حداکثر که توسط شبیه‌سازی پیش‌بینی شده است برابر با ۱۶/۸ kN می‌باشد که در مقایسه با نتایج آزمایش (۱۶/۷ kN)، به میزان ۰/۵۹ درصد خطا دارد. همچنین مقدار تغییر طول در لحظه شکست، برابر با ۶ mm از شبیه‌سازی و ۶/۱۴ mm از آزمایش به‌دست آمده که ۲/۲۸ درصد خطا را نشان می‌دهد.



شکل ۵ - نمودار نیرو - جابجایی به دست آمده از آزمون کشش و شبیه سازی

بعد از گلولی شدن نمونه تحت کشش، در مرکز نمونه تنش های سه بعدی ایجاد می شود و حالت کرنش صفحه ای حاکم است. در این ناحیه رشد و ادغام حفره ها سریع و رشد ترک به صورت تخت می باشد. با نزدیک شدن به سطح نمونه از مقدار تنش ها کاسته شده و تنش ها دو بعدی می شود (حالت تنش صفحه ای). در این حالت ترک به صورت مورب (برشی) رشد می کند. با توجه به اینکه در مدل GTN مد برشی شکست در نظر گرفته نمی شود، نمودار خروجی مدل (و نتایج شبیه سازی) در مقایسه با نتایج آزمون کشش دارای کمی خطا می باشد.

۴- نتیجه گیری

در کار حاضر، از داده های آزمون کشش روی نمونه های استخراج شده از فلز پایه و از بدنه لوله فولادی API X65 بهره گرفته شد. با بکارگیری مدل آسیب اصلاح شده گرسون (مدل GTN)، کشش نمونه فولادی در نرم افزار المان محدود Abaqus شبیه سازی شد. توزیع تنش در نمونه تحت کشش، قبل از شروع شکست و همچنین بعد از شکست بررسی شد. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایش تجربی نشان داد که مدل GTN قادر است شکست نرم در لوله فولادی API X65 را به خوبی و با دقت مناسب پیش بینی نماید. نمودار نیرو - جابجایی به دست آمده از شبیه سازی در مقایسه با نتایج حاصل از آزمایش کشش برای نمونه فولادی API X65، انطباق بسیار خوبی را نشان می دهد. پارامترها و ضرایب تنظیم شده در مدل آسیب GTN برای فولاد API X65 (شامل ۹ پارامتر $q_1, q_2, q_3, f_0, f_c, f_F, f_N, S_N, \bar{\epsilon}_N$) در محدوده قابل قبولی می باشد و شرایط انتقال مدل تنظیم شده روی نمونه آزمایشگاهی را به سازه واقعی فراهم می آورد. با افزایش بیش از حد کرنش ها در ماده، نرخ جوانه زنی حفره ها ثابت شده و جوانه زنی حفرات جدید نخواهد داشت و فقط رشد حفره ها اتفاق می افتد.

۵- مراجع

آبدیده، رضا، محمدزاده شعبه گر، ایمان، هیزم بر، محمد، آسیابان، امین، بومی سازی تولید ورق های عریض فولادی رده API-5L X65 در کشور، همایش سمپوزیوم فولاد (دوره هفدهم)، انجمن آهن و فولاد ایران، اسفند ۱۳۹۳

- API Specifications 5L (2008). Specification for Line Pipe. 44th edn. In: American petroleum institute.
- Gurson, A. L. (1977). Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I-Yield criteria and flow rules for porous ductile media. Journal of Engineering Materials and Technology. Vol. 99. No. 1. 2-15
- Tvergaard, V. (1982). On localization in ductile materials containing spherical voids. International Journal of Fracture. Vol. 18. No. 4. 237-252
- Tvergaard, V. Needleman, A. (1984). Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metallurgica. Vol. 32. No. 1. 157-169

- Banabic, D. Kami, A. (2018). Applications of the Gurson's model in sheet metal forming. 5th International Conference on New Forming Technology. Bremen, Germany
- Acharyya, S. Dhar, S. (2008). A complete GTN model for prediction of ductile failure of pipe. Journal of Materials Science. Vol. 43. No. 6. 1897-1909
- Chen, Z. Dong, X. (2009). The GTN damage model based on Hill'48 anisotropic yield criterion and its application in sheet metal forming. Computational Materials Science. Vol. 44. No. 3. 1013-1021
- Tu, H. Schmauder, S. Weber, U. (2016). Simulation of the fracture behavior of Al6061 laser welded joints with the Rousselier model. Computational Materials Science. Vol. 116. No. 1. 122-128
- Abaqus/6.14 Software. (2014). Abaqus analysis user's manual (6.14), porous metal plasticity.
- Farahat, H. (2024). Experimental study of tensile properties of API X65 microalloyed steel. 13th International Conference on Mechanical Engineering, Materials and Metallurgy. Tbilisi, Georgia. August 2024

Ductile fracture simulation in tensile test of API X65 steel using GTN damage model

Hossein Farahat ^{1 *}

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

Abstract

API X65 microalloyed steel is a main material used in the manufacturing of gas transmission pipelines with spiral seam weld. Ductile fracture of this steel occurs as a result of nucleation, growth, and coalescence of voids during plastic deformation. In this study, experimental data obtained from the tensile tests on the standard round bar specimens extracted from an API X65 pipe (base metal) were used. Ductile fracture of API X65 steel was numerically analyzed using GTN damage model. The simulation was carried out using Abaqus finite element software and the tensile test specimen was loaded. The GTN damage model parameters of API X65 steel were evaluated and calibrated. The results showed that the model can predict accurately the failure mode of the specimen similar to the experimental observations. Specific values including peak load and elongation were obtained as 16.8 kN and 6 mm respectively from load-displacement plot. This values were predicted by simulation, which show a relative error of 0.59% and 2.28% compared to the experimental results.

Keywords: Ductile Fracture, API X65 Steel, GTN Damage Model, Tensile Test
