



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنجم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱ تا ۹  
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 1-9



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)  
(AJSR - ME)

## تعیین تجربی و عددی چقرمگی شکست فولاد لوله‌های انتقال گاز با گروه API X65

سید حجت هاشمی<sup>۱\*</sup>، مسعود کیمیابخش<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، گروه پژوهشی مطالعات لوله و صنایع وابسته، دانشگاه بیرجند

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند

(دریافت ۱۳۹۰/۶/۲۲، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۱)

### چکیده

اندازه‌گیری چقرمگی شکست KIC بعنوان معیار شروع ترک (در نوع اول تنش در حالت کرنش صفحه‌ای) برای رسم منحنی‌های ارزیابی آسیب (FAD) برای فولادهای پر استحکام خطوط انتقال گاز اهمیت ویژه‌ای دارد. در تحقیق حاضر از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی شش نمونه آزمایشگاهی استاندارد برای محاسبه چقرمگی شکست فولادی API X65 (با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱۴/۳ میلی‌متر) استفاده شده است. از نتایج حاصله، مقدار چقرمگی شکست برابر  $308 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  بدست آمد. سپس حل المان محدود نمونه خمش سه نقطه‌ای با استفاده از تئوری اصلاح شده شکست گرسون انجام شد. از طرح المان محدود، میزان گشودگی دهانه ترک در حالت بحرانی ( $\delta$ ) محاسبه شد. از این طرح با استفاده از روابط مکانیک شکست ارتجاعی خطی مقدار چقرمگی شکست  $297 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  متناظر با مقدار  $\delta$  بدست آمد. مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان‌دهنده برابری مناسب مقادیر بدست آمده از روش‌های مرسوم تعیین چقرمگی شکست در دمای محیط است.

### کلمات کلیدی

چقرمگی شکست، لوله انتقال گاز، رشد ترک نرم، مدل گرسون، آزمون خمش سه نقطه‌ای، API X65

\* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email:shhashemi@birjand.ac.ir

## ۱- مقدمه

میزان کافی باشد تا سریعاً ترک را در کم‌ترین تعداد از بخش‌های خطوط لوله متوقف نماید. این مساله امنیت خطوط لوله گاز را تضمین خواهد نمود. بنابراین بدست آوردن عامل چقرمگی شکست در این دسته از لوله‌های فولادی اهمیت ویژه‌ای برای طراحی خطوط لوله انتقال گاز دارد.

در این تحقیق با توجه به محدودیت (نازک بودن جداره لوله) در استخراج نمونه‌ای با ابعاد مناسب برای تعیین تجربی چقرمگی شکست  $K_{IC}$  (در نوع اول تنش در حالت کرنش صفحه‌ای) به روش مستقیم، برای تعیین این عامل از روش تعیین مقدار چقرمگی شکست نرم ( $J_{IC}$ ) استفاده شده است. در واقع برای محاسبه مستقیم  $K_{IC}$  نیاز به نمونه آزمایشگاهی با ضخامت حدود ۴۰ سانتی‌متر است که در لوله‌های جدار نازک امکان‌پذیر نیست. بنابراین از  $J_{IC}$  به عنوان تخمینی از چقرمگی شکست نرم در آستانه شروع ترک استفاده شد [۵]. لندس و بگلی [۶ و ۷] از نخستین کسانی بودند که با استفاده از تعریف نرخ رهایی انرژی موفق به اندازه‌گیری  $J$  شدند. آنها نمونه‌های متعدد آزمایشگاهی را با ابعاد هندسی و مواد یکسان ولی ترک‌هایی با طول‌های متفاوت ساختند. هر یک از نمونه‌ها را تحت بار قرار داده و نمودار نیرو بر حسب تغییر مکان آنها را بدست آوردند. مساحت زیر منحنی هریک برابر  $U$ ، یعنی انرژی جذب شده توسط هر نمونه است. سپس تغییرات جابجایی در مقابل طول ترک در حالت تغییر مکان ثابت را رسم نمودند [۱]. یکی دیگر از راه‌های محاسبه چقرمگی شکست استفاده از روابط نیمه تجربی با استفاده از اطلاعات آزمون ضربه شارپی است. برای محاسبه چقرمگی شکست در حالت کرنش صفحه‌ای بر روی فولاد لوله انتقال گاز با گروه API X65 در کشور کره جنوبی توسط Jong و همکارانش [۸] انجام شد. آنها این آزمون را در دماهای مختلف (از ۴۰- تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) با درصد پیش کرنش‌های مختلف (از ۰٪ تا ۱۰٪) انجام دادند. مقدار  $K_{IC}$  بدست آمده در دمای محیط بدون پیش کرنش در تحقیق اشاره شده برابر با  $308 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  بوده است (با استفاده از نتایج آزمون ضربه شارپی).

## ۲- معرفی فولاد و روش آزمایش

نمونه مورد آزمایش از نوع خمش سه نقطه‌ای با مشخصات هندسی مطابق شکل (۱) با عرض، ضخامت و طول ۱۰، ۱۰ و ۶۰ میلی‌متر از جنس فولاد API X65 است.

نفت و گاز با هم بیش از ۶۸٪ انرژی دنیا را فراهم می‌نمایند [۳]. این انرژی به‌وسیله خطوط لوله فولادی و شبکه‌های پرفشار در مسافت‌های طولانی از مکان‌های تولید به مصرف‌کنندگان رسانده می‌شود. در قرن گذشته روند توسعه صنعت گاز به سمت استفاده از سامانه‌های انتقال پرفشار با کارایی بیشتر برای ظرفیت‌های بالاتر انتقال گازهای غنی‌تر بوده است. لازمه این کار استفاده از خطوط لوله‌های فولادی با قطر خارجی بزرگتر و دیواره نازکتر برای حداقل نمودن هزینه وزن در هر متر از خطوط لوله است. اینگونه سازه‌ها برای تحمل فشار داخلی بین ۱۵ MPa - ۱۰ معادل ۷۵ تا ۸۰ درصد حداقل تنش اسمی تسلیم فولاد طراحی می‌شوند [۴]. در چنین فشار بالای کاری، ایمنی و بی‌نقص بودن سازه و مقاوت آن در برابر رشد ترک نرم از اهمیت ویژه‌ای از نظر مهندسیین طراح خطوط لوله انتقال گاز برخوردار است. اگر چه وجود ترک در لوله‌های انتقال گاز بسیار نادر است ولی اینگونه ترک‌ها ممکن است بر اثر خوردگی (نازک شدن جداره لوله)، معایب ناشی از جوشکاری، خستگی (ناشی از تغییرات فشار داخلی لوله) و یا برخورد جسم خارجی (ابزار حفاری) در سازه ایجاد شوند.

برای افزایش مقاوت فولاد در برابر رشد ترک، فرایند کنترل شده حرارتی به همراه ترکیب میکرو آلیاژی برای ساخت فولادهای پراستحکام لوله‌های انتقال انرژی استفاده می‌شود. دلیل وجود ناخالصی در ماتریس فولاد، آخال‌هایی به صورت حفره (عیب) در ماده بوجود می‌آید که باعث کاهش استحکام آن در مقایسه با حالت بدون عیب می‌شود. این آخال‌ها منشأ اصلی شکست در مواد نرم هستند. شکست نرم یکی از علل اصلی گسیختگی در مواد و سازه‌های مهندسی است. نحوه رشد ترک در مواد نرم در بارگذاری کششی (حالت اول شکست) شامل سه مرحله ایجاد، رشد و ادغام حفره‌های میکروسکوپی ناشی از ذرات ناخالصی مانند سولفید منگنز و کاربید آهن است. در مقابل، رشد ترک بصورت ترد بر اثر ضخامت زیاد سازه، دمای پایین و یا نرخ بارگذاری زیاد بصورت ترک میان دانه‌ای یا مرز دانه‌ای اتفاق می‌افتد.

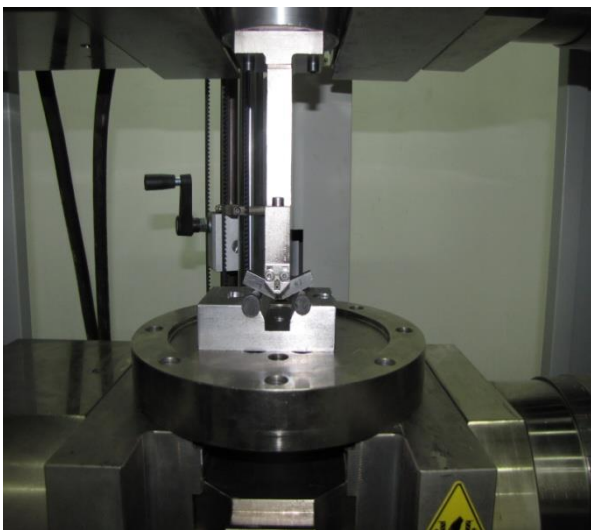
برای تعیین مقاوت ماده در برابر رشد ترک از معیار چقرمگی شکست استفاده می‌شود. چقرمگی شکست نشان دهنده استعداد سازه به شکست ترد است. از آنجائیکه وجود هر نوع ترک در لوله‌های پرفشار انتقال گاز بالقوه خطرناک بوده و می‌تواند باعث انفجار و تلفات جانی و مالی فراوان شود، طراحی در برابر رشد ترک در این سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. در بدترین موارد وقتی ترک موجود شروع به رشد نموده و ناپایداری رشد ترک باعث انفجار لوله شود، مقاوت گسیختگی لوله باید به

Tensile strength (MPa)	۶۱۱	۵۳۵ الی ۷۶۰
Yield to UTS	۰/۸۳	Max = ۰/۹۳
Elongation%	۲۰	Min = ۱۷/۲
K	۸۵۰	-
N	۰/۰۹۸	-

جدول (۲): ترکیب شیمیایی لوله فولادی API X65 و مقایسه آن با مقادیر پیشنهاد شده در استاندارد API [۹].

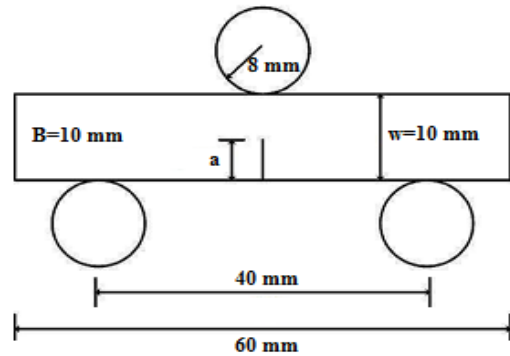
عناصر	درصد وزنی	استاندارد
C	۰/۰۷۲	۰/۲۲۰
P	۰/۰۰۸	۰/۰۲۵
Mn	۱/۴۵۰	۱/۴۵۰
S	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵
Si	۰/۲۰۱	۰/۰۶۰
Cr	۰/۳۲۰	۰/۴۳۰

نمایی از نمونه‌های آزمون خمش سه نقطه‌ای در شکل (۲)



شکل (۳): تصویر دستگاه آزمایش خمش سه نقطه‌ای و قید و بند بارگذاری طراحی شده.

در این مقاله با انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های نشان داده شده در شکل (۲) مطابق استاندارد BS 7448 [۱۰] مقدار چقرمگی شکست نرم استخراج می‌شود. دستگاه مورد استفاده در آزمایشگاه، دستگاه ۶۰۰ کیلو نیوتنی زویپک ساخت کشور آلمان است. برای بدست آوردن JIC در ابتدا باید منحنی J-R استخراج و



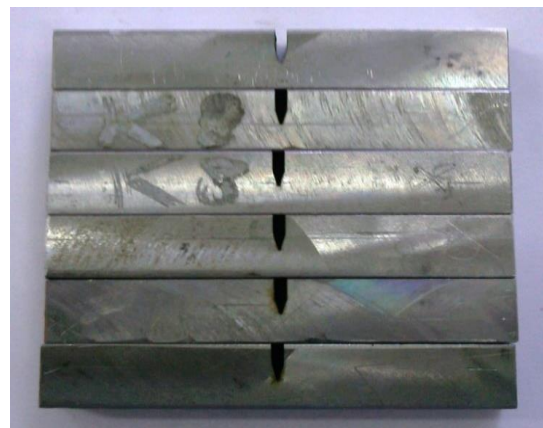
شکل

(۱): ابعاد نمونه خمش سه نقطه‌ای استفاده شده در تحقیق حاضر. ترکیب شیمیایی فولاد مورد آزمایش مطابق جدول (۱) و خواص مکانیکی آن مطابق جدول (۲) می‌باشد.

جدول (۱): خواص مکانیکی لوله فولادی API X65 اندازه‌گیری شده در جهت محیطی و مقایسه آن با مقادیر حداقل و حداکثر پیشنهاد شده در استاندارد API [۲].

خواص مکانیکی	مقدار	استاندارد
Young's modulus (GPa)	۲۱۰	-
Yield strength (MPa)	۵۰۵	۴۵۰ الی ۶۰۰

آورده شده است. شکل (۳) نیز نمایی از دستگاه آزمایش خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۲): تصویر نمونه‌های استاندارد آزمون خمش سه نقطه‌ای قبل از شکست.

ضریب شدت تنش طبق رابطه (۴) و بخش الاستیک انتگرال J از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$p = 2.3 \text{ kN}, f\left(\frac{a}{W}\right) = 3.4 \Rightarrow K = 40.4 \text{ MPa}\sqrt{m} \quad (4)$$

بنابراین بخش الاستیک برابر است با:

$$J_e = \frac{40.04^2 \times (1 - 0.3^2)}{210} = 7.08 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (5)$$

برای محاسبه بخش پلاستیک انتگرال J (رابطه (۶)) لازم است قسمت پلاستیک از مساحت زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی بدست آید:

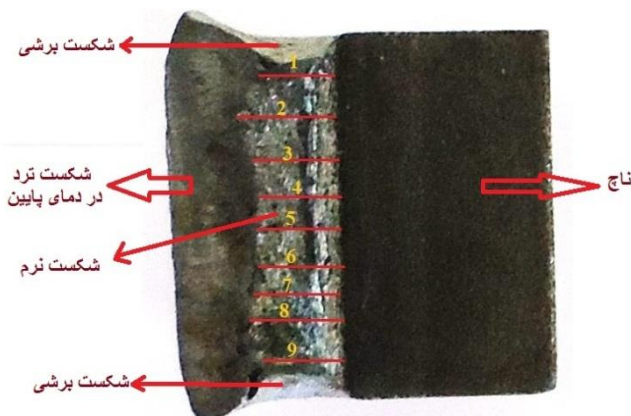
$$J_p = \left( \frac{\eta \times A_p}{B \times (W - a_0)} \right), \eta = 2 \quad (6)$$

در رابطه (۶)  $A_p$ ، قسمت پلاستیک از مساحت زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی است. برای محاسبه این مساحت از روش دوزنقه‌ای در نرم‌افزار اکسل استفاده شده است. همچنین ضخامت نمونه،  $W$  عرض نمونه و  $a_0$  طول ترک اولیه است. بخش پلاستیک انتگرال J از رابطه (۷) و مقدار کل انتگرال J از رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$A_p = 37.1 \text{ kN} \cdot \text{mm} \Rightarrow J_p = 1735.07 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (7)$$

$$J = J_e + J_p = 1735.07 + 7.07 = 1742.15 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (8)$$

در روش چند نمونه‌ای بر اساس استاندارد [۱۰] میزان اندازه‌گیری رشد ترک به صورت چشمی انجام می‌شود. به این صورت که بعد از انجام آزمایش، نمونه داخل نیتروژن مایع به مدت پانزده دقیقه قرار می‌گیرد. سپس نمونه در حالت ترد شکسته می‌شود تا مرز شکست ترد و نرم مشخص شود. سپس عکس برداری از سطح شکست و محاسبه میزان رشد ترک انجام می‌شود. در شکل (۵) نمایی از سطح شکست نشان داده شده است.



شکل (۵): سطح شکست نمونه با جابجایی ۹/۴ میلی‌متر برای اندازه‌گیری رشد ترک فیزیکی.

سپس از روی این منحنی مقدار چقرمگی شکست نرم محاسبه شود. طبق استاندارد [۱۰] برای استخراج این منحنی دو روش تک نمونه‌ای و چند نمونه‌ای وجود دارد. در تحقیق حاضر از روش چند نمونه‌ای با طول ترک اولیه ۵/۷۳ میلی‌متر ( $a_0 = 5.73$  و  $a_0/W = 0.573$ ) استفاده شده است.

### ۳- آزمون چند نمونه‌ای خمش سه نقطه‌ای

در آزمون چند نمونه‌ای طبق استاندارد [۱۰] حداقل شش نمونه آزمایشگاهی لازم است. این نمونه‌ها باید دارای ابعاد هندسی و طول ترک اولیه یکسان باشند ولی تحت بارگذاری تا جابجایی‌های متفاوت قرار گیرند. طبق استاندارد، مقدار انتگرال J (رابطه (۱)) از دو بخش الاستیک و پلاستیک تشکیل شده است [۱۰]:

$$J = J_e + J_p \quad (1)$$

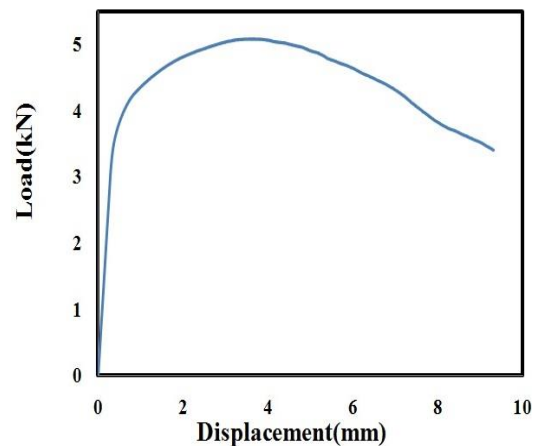
بخش الاستیک طبق رابطه (۲) بدست می‌آید [۱۰]:

$$J_e = K^2 \times \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\nu$  ضریب پواسون،  $E$  مدول یانگ و  $K$  ضریب شدت تنش است که از رابطه (۳) بدست می‌آید [۱۰]:

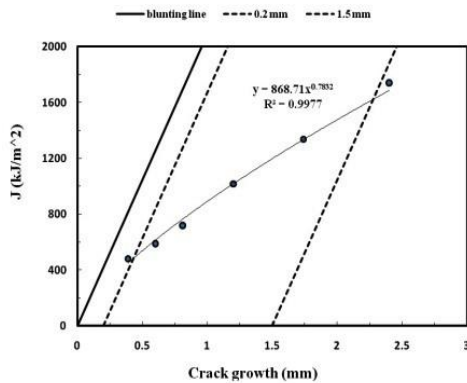
$$K = \left( \frac{P}{(B^2 \times W)^{0.5}} \right) \times f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $P$  نیروی نهایی در نمودار حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای است. مقدار  $f(a/W)$  با توجه به نسبت  $a_0/W = 0.573$  برای تمام نمونه‌ها از جداول مربوطه در استاندارد [۱۰] بدست می‌آید. شکل (۴) نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای با اعمال جابجایی ۹/۴ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای با جابجایی ۹/۴ میلی‌متر.

با توجه به جدول (۴) منحنی J-R برای فولاد مورد آزمایش طبق شکل (۶) بدست می‌آید.



شکل (۶): نمودار J- $\Delta a$  برای نمونه‌های آزمون خمش سه نقطه‌ای.

معادله منحنی توانی برازش شده روی منحنی JR- $\Delta a$  عبارتست از:

$$J = 869 (da)^{0.782} \quad (9)$$

طبق استاندارد [۱۰] برای استخراج  $J_{IC}$  باید منحنی توانی را با خطی موازی خط کند شونده  $J=3/75\sigma_Y\Delta a$  با انحراف ۰/۲ میلی‌متر قطع داد. از این تقاطع  $J=418 \text{ kJ/m}^2$  بدست می‌آید. سپس با استفاده از رابطه (۱۰) مقدار چقرمگی شکست قابل محاسبه است [۱۱]:

$$J_{IC} = K_{IC}^2 \times \left( \frac{1-V^2}{E} \right) \quad (10)$$

از رابطه (۱۰) مقدار چقرمگی شکست برای فولاد مورد آزمایش برابر  $K_{IC}=308 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  بدست می‌آید.

#### ۴- طراحی اجزا محدود نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای با

##### طرح گرسون

طراحی اجزا محدود مساله با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس ۶/۴ انجام شده است [۱۲]. شکل (۷) مدل هندسی ایجاد شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری مقدار رشد ترک در سطح شکست از نرم‌افزار پلوکومپ استفاده شد. اندازه‌گیری رشد ترک نیز (در منطقه شکست نرم) در نه نقطه به فاصله‌های مساوی در امتداد جبهه ترک (طبق استاندارد) و محاسبه میانگین آنها به عنوان رشد ترک فیزیکی  $\Delta a_p$  انجام می‌شود. در جدول (۳) اندازه رشد ترک در این نه نقطه آورده شده است. بنابراین یکی از نقطه‌های منحنی J-R،  $J=1742/15$  و  $\Delta a=2/40$  است

جدول (۳): مقادیر رشد ترک محاسبه شده به کمک نرم‌افزار در

نمونه‌ای با جابجایی اعمالی ۹/۴ میلی‌متر.

موقعیت نقطه روی سطح شکست	رشد ترک به میلی‌متر
۱	۲/۴۷
۲	۲/۴۲
۳	۲/۴۳
۴	۲/۴۰
۵	۲/۴۳
۶	۲/۳۵
۷	۲/۳۹
۸	۲/۳۷
۹	۲/۳۰
میانگین	۲/۴۰

در آزمون چند نمونه‌ای یا باید طول پیش ترک نمونه‌ها یکسان و مقدار جابجایی اعمال شده به نمونه‌ها مختلف باشد و یا طول پیش ترک نمونه‌ها متفاوت و مقدار جابجایی اعمال شده یکی باشد. در این تحقیق از روش اول استفاده می‌شود. برای استخراج منحنی J-R پنج آزمایش دیگر انجام می‌شود (جمعا شش آزمایش) که مشخصات بارگذاری و نتایج آن در جدول (۴) آورده شده است. تحلیل این پنج نمونه دقیقاً مشابه نمونه معرفی شده است.

جدول (۴): مقادیر محاسبه شده J بر حسب رشد ترک فیزیکی در شش نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای.

Specimen No.	$\Delta a$ (mm)	J (kJ/m <sup>2</sup> )
۱	۲/۴۰	۱۷۴۲
۲	۱/۷۴	۱۳۳۶
۳	۱/۲۰	۱۰۱۸
۴	۰/۸۱	۷۲۰
۵	۰/۶۰	۵۸۹
۶	۰/۳۹	۴۸۰

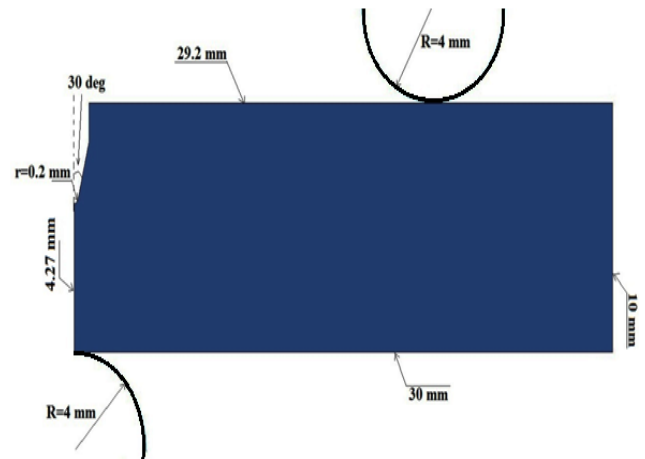
برای استفاده از طرح گرسون باید ابتدا عوامل این طرح با استفاده از نتایج آزمون کشش بدست آید و سپس عوامل بدست آمده به نرم افزار وارد شود. جدول (۵) عوامل گرسون بدست آمده از نتایج آزمون کشش برای فولاد API X65 را نشان می دهد [۲].

جدول (۵): عوامل گرسون فولاد API X65 [۲].

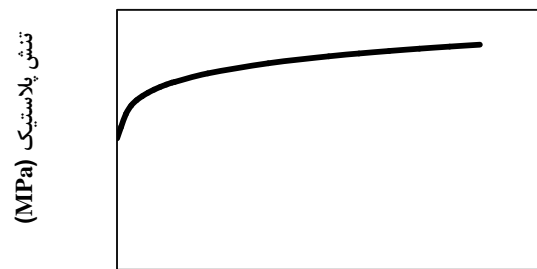
پارامتر	مقدار
$q_1$	۱/۵
$q_2$	۱
$\epsilon_N$	۰/۳
$s_N$	۰/۱
$f_N$	۰/۰۰۳
$f_0$	$7/07 \times 10^{-5}$
$f_c$	۰/۰۱۹
$f_f$	۰/۳۹

همان طور که در جدول ۵ دیده می شود این مدل دارای ۸ عامل ( $q_1, q_2, \epsilon_N, s_N, f_N, f_0, f_c, f_f$ ) است که باید برای فولاد مورد نظر کالیبره شوند. این عوامل به ترتیب نشان دهنده کرنش متوسط بهم پیوستن حفره ها، انحراف استاندارد توزیع حفره ها، کسر حجمی مربوط به ذرات برای بهم پیوستن حفره ها، کسر حجمی اولیه حفره ها، مقدار بحرانی (نسبت حجم حفره در لحظه شروع ادغام حفره ها)، نسبت حجم حفره در پایان شکست و عوامل تعدیل کننده در تابع تسلیم هستند. این طرح به طور معمول طرح گرسون - تیورگارد - نیدل من یا به اختصار مدل GTN نامیده می شود. مدل GTN در نرم افزارهای المان محدود (مانند آباکوس) گنجانده شده است تا استفاده مستقیم از آن امکان پذیر باشد [۱۲].

پس از تعریف عوامل مورد نیاز به نرم افزار و استفاده از نوع حل دینامیک صریح، نیاز به مش بندی مدل است. برای مش بندی از المان CPE4R که یک المان جامد چهار گره ای است، استفاده شد. مدل سازی در حالت کرنش صفحه ای انجام شد. ابعاد مش در نزدیک ترک ۰/۲ میلی متر در نظر گرفته شد. این عدد به دلیل انتخاب طرح گرسون برای نوع حل و بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ میلی متر قابل تغییر است [۷ و ۸ و ۱۳]. طول مش به عنوان میانگین فاصله بین ذرات ناخالصی موجود در ماده مورد نظر در نظر گرفته می شود. شکل (۱۰) طرح مش بندی شده را نشان می دهد.

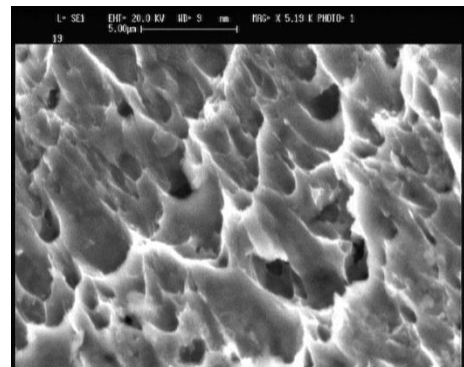


شکل (۷): شکل ۶: نمونه مدل شده با ترکی به طول ۵/۷۳ میلی متر. برای استفاده از نرم افزار آباکوس نیاز است که خواص ماده به نرم افزار معرفی شود. خواص مورد نیاز چگالی، مدول الاستیک، نسبت پواسون، خواص پلاستیک و عوامل گرسون است. شکل (۸) اطلاعات پلاستیک مربوط به لوله فولادی API X65 بدست آمده از آزمون کشش در جهت محیطی لوله برای معرفی به نرم افزار را نشان می دهد [۲].



کرنش پلاستیک (mm/mm)

شکل (۸): نمودار تنش - کرنش پلاستیک در جهت محیطی لوله فولادی API X65 ورودی به نرم افزار آباکوس [۲]. با توجه به اینکه نحوه شکست در این دسته از فولادها طبق شکل (۹) از نوع نرم (یا دیمپلی) است، از مدل خرابی گرسون برای شبیه سازی رشد ترک استفاده شد.



شکل (۹): تصویر SEM از سطح شکست نمونه خمش سه نقطه ای حاوی حفره های متعدد (نشان دهنده شکست نرم در دمای محیط).

مقدار CTOD در لحظه تخریب اولین المان در حدود  $0/38$  میلی‌متر بدست آمد. با به دست آمدن این عامل مقدار  $\text{kJ/m}^2$   $J_{IC}=383$  از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۱]:

$$J_{IC} = m \times \sigma_{ys} \times CTOD \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) مقدار  $m$  در حالت کرنش صفحه‌ای ۲ و در حالت تنش صفحه‌ای ۱ و  $\sigma_{ys}$  مقدار تنش تسلیم ماده است [۱۳]. سپس با استفاده از رابطه (۱۰) مقدار چقرمگی شکست  $K_{IC}=297 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  بدست آمد. در جدول (۶) مقایسه نتایج بدست آمده از روش تجربی و اجزا محدود نشان داده شده است.

جدول (۶): مقایسه نتایج المان محدود و آزمایش.

کمیت	آزمایش خمش سه نقطه‌ای	طرح اجزا محدود	خطا %
$J_{IC}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	۴۱۸	۳۸۳	۸/۴
$K_{IC}$ (MPa√m)	۳۰۸	۲۹۷	۳/۶
CTOD (mm)	۰/۴۱	۰/۳۸	۷/۳

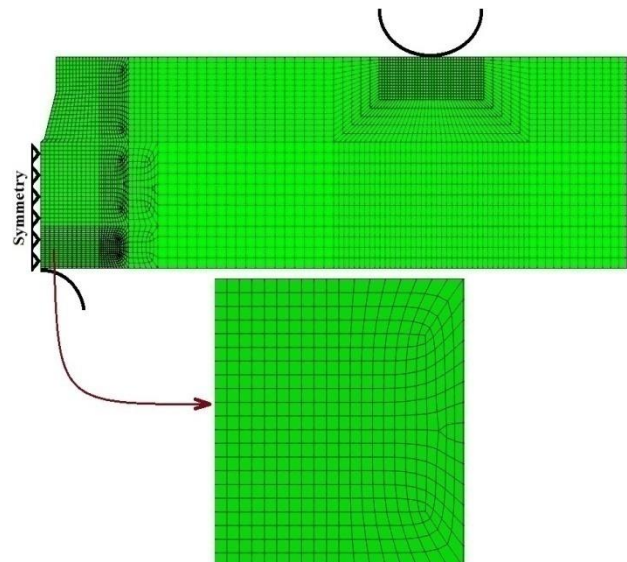
در جدول (۷) مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تعدادی از داده‌های موجود در مقالات منتشر شده انجام شده است. در جدول (۷)، مراجع [۱۴]، [۱۵] و [۱۶] در نوع ترکیب شیمیایی لوله و نحوه محاسبه CTOD با یکدیگر اختلاف دارند.

جدول (۷): مقایسه مقادیر CTOD در چند تحقیق بر روی فولاد

مشابه.	
مرجع	CTOD (mm)
[۱۳]	۰/۳۳
[۱۴]	۰/۵۷
[۱۵]	۰/۵۴
[۱۶]	۰/۳۷
تحقیق حاضر	۰/۳۸

#### ۵- مقایسه نتایج، بحث و نتیجه گیری

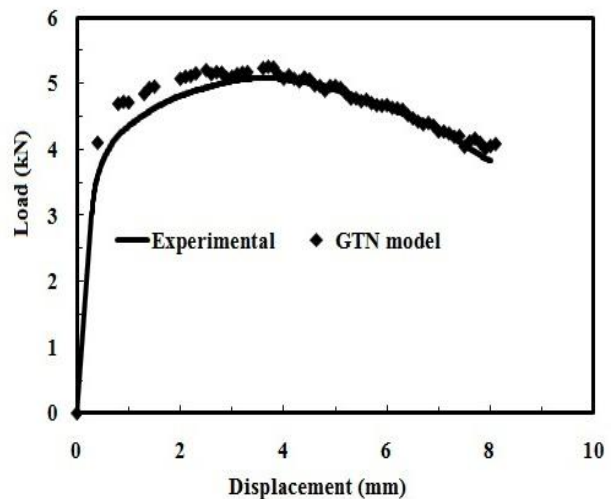
در تحقیق حاضر اندازه‌گیری تجربی چقرمگی شکست  $K_{IC}$  برای لوله فولادی API X65 انجام شد. از آنجائیکه دلیل نازک بودن جداره لوله، استخراج نمونه‌ای با ابعاد مناسب (ضخامت حدود ۴۰ سانتی‌متر برای برقراری شرایط کرنش صفحه‌ای و شکست ترد نمونه) مقدور نیست، از نمونه نازک برای محاسبه  $J_{IC}$  به عنوان تخمینی از چقرمگی شکست نرم در آستانه شروع ترک استفاده شد. هم‌چنین تحلیل اجزا محدود نمونه خمش سه نقطه‌ای در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از طرح شکست نرم گرسون انجام شد. از این مدل مقدار گشودگی دهانه ترک در حالت بحرانی ( $\delta$ ) محاسبه و سپس مقدار  $K_{IC}$  معادل با آن برای



شکل (۱۰): نمونه مش‌بندی شده با المان CPE4R

(بدلیل تقارن فقط ۱/۴ نمونه کشیده شده است).

با توجه به اینکه مدل گرسون فقط در حل دینامیکی صریح تعریف شده است، امکان استخراج  $J_{IC}$  و  $K_{IC}$  در این حل وجود ندارد (این عوامل در حل ضمنی آباکوس قابل محاسبه هستند). بدین منظور لازم است طرح المان محدود با استفاده از نمودار تجربی نیرو - تغییر مکان (حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای فولاد لوله API X65) کالیبره شود (شکل ۱۱).



شکل (۱۱): مقایسه نمودار نیرو-جابجایی از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی روی نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای با طول ترک  $5/73$  میلی‌متر.

شبیه‌سازی بر روی نمونه‌ای با طول ترک  $5/73$  و اعمال جابجایی ۸ میلی‌متر انجام شد. سپس مقدار گشودگی نوک ترک بحرانی در اولین المان تخریب شده محاسبه و بصورت غیر مستقیم با روابط موجود مقدار چقرمگی شکست محاسبه می‌شود.

بسیار مناسب است. بین نقطه تسلیم و نیروی حداکثر استحکام ماده به مقدار زیادتری توسط طرح تخمین زده می‌شود. در مجموع شکل (۱۱) نشان می‌دهد که طرح اصلاح شده گرسون قابلیت کالیبره شدن روی نمونه کشش تک محوری [۲] و سپس انتقال به نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای با هندسه و بارگذاری متفاوت برای پیش بینی رشد ترک را دارد.

داده‌های جدول (۶) نشان‌دهنده برابری قابل قبول نتایج بدست آمده از روش تجربی و حل اجزا محدود است. در این جدول خطای نسبی در محاسبه  $J_{IC}$  و  $K_{IC}$  (به روش تجربی و نرم‌افزاری) به ترتیب برابر با  $۸/۳$ ،  $۳/۶$  و  $۷/۳$  درصد است. علاوه بر این، مقدار بدست آمده برای  $K_{IC}$  به روش تجربی در تحقیق حاضر ( $K_{IC}=308 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) با نتایج مرجع [۸] برای فولاد مشابه برابری بسیار خوبی نشان می‌دهد. هم‌چنین مقادیر تجربی بدست آمده برای CTOD در تحقیق حاضر طبق جدول (۷) قابل مقایسه با مقادیر متناظر برای فولاد مشابه در مراجع [۱۷-۱۴] است.

#### ۶- تقدیر و تشکر

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن فولاد API X65 تشکر و قدردانی می‌شود. این تحقیق با استفاده از امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری دانشگاه بیرجند (در گروه پژوهشی مطالعات لوله و صنایع وابسته) انجام شده است.

[۵] Standard Test Method for  $J_{IC}$ , "A Measure of Fracture Toughness E813-89", Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 1991.

[۶] Begley, J. A. Landes, J. D. "The J-Integral as a Fracture Criterion", ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 24-29, 1972.

[۷] Landes, J. D. Begley, J. A. "The Effect of Specimen Geometry on  $J_{IC}$ ", ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 24-29, 1972.

[۸] Beak, J. H. Kim, Y. P. Kim, C. M. Kim, W. S. Seok, C. S. "Effect of Pre-Strain on the Mechanical Properties of API X65 Pipe", Material and Science A, 527, pp.

فولاد مورد آزمایش بدست آمد.

بررسی جداول (۱) و (۲) نشان می‌دهد که خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فولاد مورد آزمایش در محدوده مشخص شده استاندارد API قرار دارد. هم‌چنین اعداد گزارش شده در جدول (۳) نشان‌دهنده دقت محاسبه مقدار رشد ترک در سطح شکست نمونه توسط نرم‌افزار پلوکومپ (تا دو رقم اعشار دقت) است. این میزان دقت با اندازه‌گیری چشمی (توسط کولیس یا میکرومتر بصورت دستی) قابل دست‌یابی نیست.

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که ازای جابجایی ۸ میلی‌متری چکش (برای تمام نمونه‌ها)، مقدار رشد ترک در ۶ نمونه آزمایش شده حداقل  $۰/۳۹$  و حداکثر  $۲/۴$  میلی‌متر است. بدیهی است که ازای رشد ترک بیشتر ( $۲/۴$  میلی‌متر)، میزان انرژی صرف شده ( $۱۷۴۲$  کیلو ژول بر واحد سطح) نیز بیشتر خواهد بود. مجموع اطلاعات جدول (۴) و شکل (۶) نشان می‌دهد تعداد لازم زوج نقاط صحیح در محدوده مجاز استاندارد قرار دارد، بنابراین برازش منحنی توانی  $J$  بر حسب  $\Delta a$  برای داده‌های آزمایشگاهی به درستی انجام شده است.

در شکل (۱۱) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای و شبیه‌سازی رایانه‌ای در نمونه‌ای با رشد ترکی معادل  $۵/۷۳$  میلی‌متر نشان داده شده است. انتخاب این نمونه برای بررسی درستی حل رایانه‌ای به دلیل جابجایی بیشتر چکش نسبت به سایر نمونه‌های آزمایش شده بوده است. همان طور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود برابری نتایج در بخش الاستیک و بخش نرم شونده‌گی فولاد (پس از نیروی حداکثر)

#### ۷- مراجع

[۱] داغیانی، حمید رضا؛ شاکری، محمود، "مقدمه‌ای بر مکانیک شکست اجسام"، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ۱۳۷۹.

[۲] رضایی یکتا، مرتضی، "شبیه‌سازی کامپیوتری آزمایش کشش نمونه شیار دار فولادی API X65 با مدل گرسون"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند، ۱۳۸۹.

[۳] Hulka, K. "High Strength Large Diameter Pipe Plate from Standard Production to X80/X100", <http://www.us.cbmm.com.br/english/sources/techlib/info>.

[۴] Rothwell, A. B. "Fracture Propagation Control for Gas Pipelines: Past, Present and Future", Pipeline Technology, Vol. 1, pp. 386-397, 2000.



- Lee, J. S. Ju, J. B. Jang, J. I. Kim, W. S. Kwon, D. , "Weld crack Assessment in Api X65 Pipeline: Failure Assessment Diagram With variation in representative Mechanical Properties", Material Science and Engineering, pp. 122-130, 2004. [۱۴]
- Ju, J. B. Lee, J. S. Jang, J. I. , "Fracture toughness anisotropy in a API steel line-pipe", Materials Letters, 61, pp. 5178-5180, 2007. [۱۵]
- Oh, C. K. Kim, Y. J. Beak, Y. P. Kim, W. , "A phenomenological Model of Ductile Fracture for API X65 steel", International Journal of Mechanical Sciences, 49, pp. 1399-1412, 2007. [۱۶]
- Yang, Z. Z. Tian, W. Ma, Q. R. Li, Y. L. Li, J. K. Gao, J. Z. Zhang, H. B. "Mechanical Properties of Longitudinal, Submerged Arc Welded Steel Pipes Used for Gas Pipeline of Offshore Oil", Metallurgical SINICA, 21, pp. 85-93, 2008. [۱۷]
- 1473-1479, 2010.
- Hashemi, S. H. , "Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86, pp. 533-540, 2009. [۹]
- BS EN ISO 7448 , "Fracture Mechanics Toughness Tests", British Standard Institution, 1997. [۱۰]
- He, M. Li, F. , "Modified Transformation Formulae Between Fracture Toughness and CTOD of Ductile Metals Considering Pre-Deformation Effects", Engineering Fracture Mechanics, 77, pp. 2763-2771, 2010. [۱۱]
- Hibbit; Karlson; Sorensen , "ABAQUS Version 6.4 User's Manual", 2005. [۱۲]
- Hashemi, S. H. Rezaei, M. Soleimani, V. , "Local damage modeling of ductile fracture in API pipeline steels of grade X65 and X70", Proceeding of ISME2011, The University of Birjand, 2011. [۱۳]