

# تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن و شبیه‌سازی المان محدود اتصال الکتروفیوژنی معیوب در شبکه لوله‌کشی گاز طبیعی

زهره خدیری نیازمند

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،  
zohreh.niyazmand@gmail.com

ابوالفضل توتونچی

استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،  
ab.tutunchi51@tabrizu.ac.ir

مهدی اسکندرزاده اصل\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،  
m.eskandarzade@gmail.com

بهزاد عباسزاده

دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران،  
abbaszadeh7676@gmail.com

## چکیده

این تحقیق با هدف بررسی منشأ نشتی‌های گاه‌به‌گاه در شبکه لوله‌کشی گاز طبیعی انجام شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده از روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن (FMEA) سه عیب عدم تراش صحیح، وجود چربی و وجود رطوبت در محل جوش در مرحله نصب و اجرا دارای بالاترین میزان خطر است. علاوه بر آن، تحلیل مکانیک شکست برای عیب‌های دارای بالاترین میزان خطر در نرم‌افزار ABAQUS به روش XFEM و به‌صورت سه‌بعدی انجام پذیرفت. شبیه‌سازی‌ها برای بارگذاری طول ثابت ترک (برابر ۴ میلی‌متر) صورت گرفت. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های المان محدود، ترک با طول اولیه ۴ میلی‌متر در فشار داخلی بالاتر از ۱/۴ مگاپاسکال شروع به رشد می‌کند. با توجه به فشار بهره‌برداری شبکه گاز شهری (حدود ۰/۴ مگاپاسکال)، بر اساس نتایج این مطالعه شناسایی عیب‌های بالاتر از ۴ میلی‌متر قبل از بهره‌برداری ضروری می‌باشد. داده‌های حاصل از این پژوهش می‌تواند جهت استفاده مهندسی شرکت ملی گاز ایران مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: پلی‌اتیلن، اتصال الکتروفیوژن، ضرایب شدت تنش، تنش فون مایسز، المان محدود توسعه‌یافته، FMEA.

## Failure Mode and Effects Analysis and Finite Element Simulation of Defective Electro-Fusion Joint in Natural Gas Piping Network

Z. Kh. Niyazmand

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

A. Tutunchi

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

M. Eskandarzade

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

B. Abbaszadeh

Department of Mechanical Engineering, University of Shahid Rajaee, Tehran, Iran

## Abstract

The aim of this study was to investigate the source of leaks in the natural gas pipeline network. According to the results obtained from the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), the three defects including lack of proper scraping, the presence of oil and existing of moisture at the welding zone in the installation and execution phase had the highest risk. These defect types studied further using experimental methods. The fracture mechanics analysis for the defects with the highest risk in Abaqus software was performed by XFEM method in three dimensions. According to the results, cracks with initial length of 4mm will grow at pressures higher than 1.4 MPa. To obtain results equivalent stress intensity factor has been used. The results imply the application of suitable nondestructive methods for determination of cracks with lengths higher than 4mm. The results of this research can be employed by inspection engineering of natural gas companies.

**Keywords:** Polyethylene, Electro-Fusion Joint, Stress Intensity Factor, Von Mises Stress, Extended Finite Element, FMEA.

## ۱- مقدمه

استفاده کرد. روش‌های متعددی برای اتصال لوله‌های پلی‌اتیلن وجود دارد که روش الکتروفیوژن به دلیل ایمنی و سرعت بالا و تمیزی اتصال، در حال حاضر مرسوم‌ترین روش جوشکاری شبکه پلی‌اتیلنی گاز است. علی‌رغم تمام مزایایی که برای این روش وجود دارد، نشتی‌هایی در خطوط لوله در ناحیه اتصالات رخ می‌دهد که می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیری شود. عوامل متعددی در کیفیت جوش تأثیر دارند به همین منظور تحقیقات گسترده‌ای بر روی اتصالات الکتروفیوژنی، از نصب و اجرا تا تعمیرات و بازرسی انجام شده است.

اگر روش‌های آماده‌سازی قبل از جوشکاری به‌درستی رعایت نشوند، خرابی‌های زودرس اتصالات الکتروفیوژن رخ خواهد داد. در تحقیقات مرتبط با شکست‌ها، مشخص شده است که بیشتر خرابی‌ها، به

صنعت انتقال نفت و گاز یکی از صنایع مهم به‌شمار می‌رود و در این میان، خطوط انتقال، اهمیت ویژه‌ای دارد. در ایران از سال ۱۹۹۹ شروع به استفاده از لوله‌های پلی‌اتیلنی در شبکه لوله‌کشی گاز شهری شد [۱]. مزایای زیاد این جنس از لوله‌ها شامل قیمت پائین، سبکی، عدم سمی بودن و مقاومت به خوردگی خوب و دارا بودن عمر کاری بالا، عدم اثرگذاری لوله بر کیفیت سیال داخل آن، روش اتصال ساده و سریع، قابلیت حلقه شدن، تولید با مترای زیاد و نیاز به اتصالات کمتر جهت نصب، موجب گسترش روزافزون استفاده از این لوله‌ها در صنایع گاز شده است [۲]. از طرفی طول لوله‌های پلی‌اتیلن محدود است و برای استفاده از آن‌ها در مسافت‌های طولانی باید از روش‌های اتصال‌دهی

\* نویسنده مکاتبه‌کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.eskandarzade@uma.ac.ir

دلیل آغاز ترک در ناحیه جوشکاری و شکست ترد اتفاق می‌افتد. استحکام اتصال جوش به عواملی نظیر دما، زمان گرم و سرد شدن، آلودگی، هم‌راستایی و هم‌محوری لوله‌ها و غیره بستگی دارد [۳]. عملکرد یک اتصال الکتروفیوژنی، زمانی که اجزا قبل از فرآیند جوشکاری در معرض آلودگی قرار بگیرند، کاهش می‌یابد. هنگام اتصال اگر رابط آلوده شود، خرابی اتصال در زمان نسبتاً کوتاهی رخ خواهد داد [۴]. بدین منظور تراشیدن سطوح جوشکاری قبل از اتصال، یک عمل ضروری است و می‌تواند تأثیر مثبتی بر روی اتصالاتی که قبل از فرآیند جوش، آلوده شده‌اند داشته باشد [۵].

دمای محیط در فرآیند اتصال، تأثیر عمده‌ای بر کیفیت جوش دارد [۶]. اتصالاتی که در دماهای پایین جوش خورده‌اند، به علت فشار کم حین اتصال و ایجاد تنش‌های پسماند بالا، استحکام کمتری دارند [۷]. تحقیقات نشان دادند که می‌توان با استفاده از پیشگرم کردن قطعات قبل از جوشکاری [۸] و همچنین استفاده از دستگاه‌های جوش جدید و تغییر برخی از پارامترهای استاندارد، حتی در دماهای پایین‌تر از حد تعیین‌شده استاندارد، جوش با کیفیتی داشته باشیم [۶].

یکی از دلایل شکست در لوله‌های پلی‌اتیلنی، انتشار ترک و عیوب اولیه موجود در آن است. وجود ترک‌ها در شکل‌ها و اندازه‌های گوناگون باعث ایجاد رفتارهای متفاوتی در سیستم خواهد شد. برخی از آن‌ها ممکن است انتشار یابند و باعث شکست ناگهانی شوند [۹]. ژانگ و همکاران با استفاده از روش انطباق عکس‌های رقمی<sup>۱</sup> و ترکیبی از مشاهدات تجربی و روش المان محدود، زاویه رشد ترک را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. رادرمیچر و همکاران با استفاده از مدل‌سازی المان محدود، رفتار خطوط لوله را تحت تأثیر تنش‌هایی که در معرض آن قرار دارند مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حداکثر تنش فون مایسز در سطح داخلی لوله ظاهر می‌شود [۱۱].

از دیگر تحقیقاتی که در رابطه با اتصال الکتروفیوژن صورت گرفته می‌توان به روش‌های بازرسی اتصال مانند آزمون نشتی با استفاده از روش خلاء [۱۲]، استفاده از بازرسی غیر مخرب آرایه فراصوت جهت تعیین یکپارچگی اتصال [۱۳]، بررسی نوع (شکل) وصله‌ها در اتصال جهت ترمیم و تعمیر و تأثیر آن بر روی توزیع تنش [۱۴]، ارزیابی عمر خستگی اتصالات با استفاده از روش‌های معمول مورد استفاده در پیش‌بینی عمر خستگی [۱۵]، تأثیر تغییر شکل ناشی از فرونشست زمین بر روی اتصالات [۱۶] ارزیابی خطر سیستم‌های لوله‌کشی پلی‌اتیلنی زیر زمینی [۱۷] اشاره کرد.

تنوع و کثرت تحقیقات صورت گرفته به‌خصوص در سال‌های اخیر، نشان از اهمیت خطوط لوله پلی‌اتیلنی در انتقال فرآورده‌های هیدروکربنی دارد. بررسی موضوع علل نشتی‌های گاه‌به‌گاه در حین بهره‌برداری از شبکه لوله‌کشی گاز شهری قبلاً مورد توجه محققین نبوده است. در این پژوهش ضمن بررسی علل نشتی به روش FMEA، تجزیه و تحلیل المان محدود با هدف شناسایی اندازه بحرانی عیوب جهت رشد ترک در حین بهره‌برداری مورد توجه قرار گرفته است. عیوب محتمل در مراحل مختلف اجرا و بهره‌برداری در تحقیقات قبلی دسته‌بندی نشده بود. در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های شرکت

ملی گاز ایران، عیوب محتمل در مراحل مختلف به روش FMEA شناسایی شده، دسته‌بندی گردیده و به ترتیب میزان خطر طبقه‌بندی شدند. همچنین در این تحقیق به روش المان محدود توسعه یافته طول ترک بحرانی که باعث مرود شدن اتصال پلی‌اتیلنی در شرایط عملیاتی گاز شهری ایران می‌شود، محاسبه و پیشنهاد گردید.

## ۲- روش تحقیق

این تحقیق در ادامه‌ی پژوهش‌های صورت گرفته توسط نویسندگان در شرکت گاز استان آذربایجان غربی، با هدف یافتن علت بروز نشتی‌ها در اتصالات الکتروفیوژن و ارائه روش‌های جلوگیری از آن انجام شده است. برای پیدا کردن دلایل عیوب از داده‌های شرکت ملی گاز و تجربیات افراد خبره استفاده شده است. در این راستا در گام اول با استفاده از روش تجزیه و تحلیل خطا و اثرات آن، عیوب محتمل در مراحل حمل و بارگیری، نصب و اجرا و در نهایت بهره‌برداری خطوط لوله پلی‌اتیلن گاز، شناسایی شده و خطر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از روش FMEA، در ادامه، مطالعه مکانیزم رخداد مهم‌ترین عیوب در محل اتصال به‌صورت تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

### ۲-۱- روش FMEA

روش تجزیه و تحلیل خطا و اثرات آن روشی سیستماتیک برای شناسایی و جلوگیری از مکانیزم‌های تخریب در مواد و فرایندها قبل از وقوع رخدادهاست. هدف از اجرای FMEA پیشگیری از رخداد عیوب، افزایش ایمنی و کاهش اثرات زیست است. فرآیند FMEA هم در مرحله طراحی و هم در مرحله بهره‌برداری سازه می‌تواند مفید باشد [۱۸]. مراحل روش FMEA به‌صورت خلاصه مطابق شکل ۱ است.



شکل ۱- مراحل روش FMEA

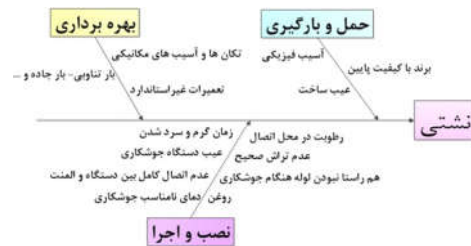
شکل ۲ نمودار علل ریشه‌ای بروز نشتی، حاصل تجربیات کارشناسان شرکت گاز را در مراحل عملیاتی مختلف نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳ نمودار علل ریشه‌ای برای تجزیه و تحلیل دلایل نشتی در مرحله عملیاتی نصب و اجرا را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Digital Image Correlation

تعیین میزان حساسیت این ناحیه از اتصال به نوع و مقدار بارگذاری، شبیه‌سازی گردید. در این تحقیق بررسی و تحلیل شکست اتصال الکتروفیوژن معیوب از طریق شبیه‌سازی رشد ترک با استفاده از روش XFEM صورت پذیرد.

در شبیه‌سازی المان محدود، طول ترک ثابت (۴ میلی‌متر) و مقدار بارگذاری‌ها متغیر در نظر گرفته شد. تا مقدار فشار بحرانی که می‌تواند موجب رشد ترک گردد مشخص گردد. با توجه به تقارن مدل در جهت‌های Z و Y و X برای کاهش تعداد المان‌ها و در نتیجه کاهش حجم محاسبات از  $\frac{1}{4}$  مدل برای شبیه‌سازی رشد ترک استفاده شده است.

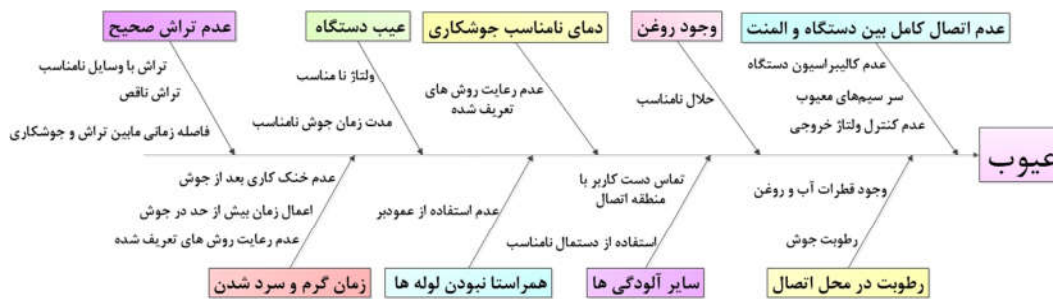
Error! Reference source not found.  
Error! Reference source not found.



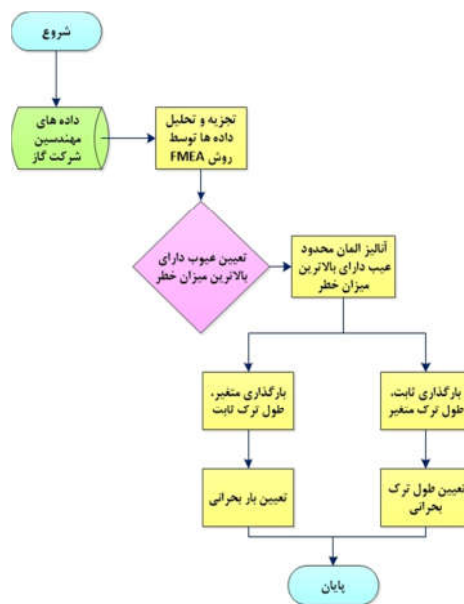
شکل ۲- نمودار استخوان ماهی مراحل عملیاتی جوشکاری الکتروفیوژن

### ۲-۲- روش المان محدود

در گام دوم، با در نظر گرفتن نتایج روش FMEA عیب تراش ناکافی که می‌تواند موجب عدم اتصال قسمتی از جوش و در نتیجه شکست اتصال گردد، توسط روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. بدین نحو که با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، بارهای احتمالی وارد بر اتصالات در طول نصب و بهره‌برداری خطوط لوله، به‌منظور

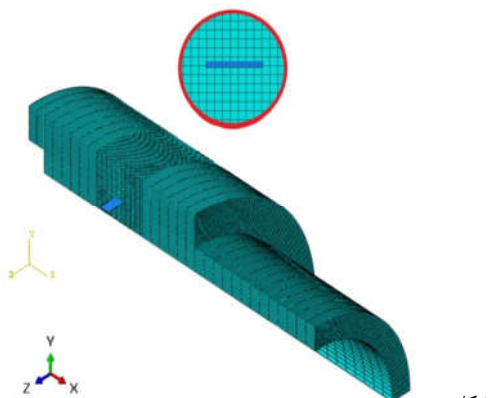
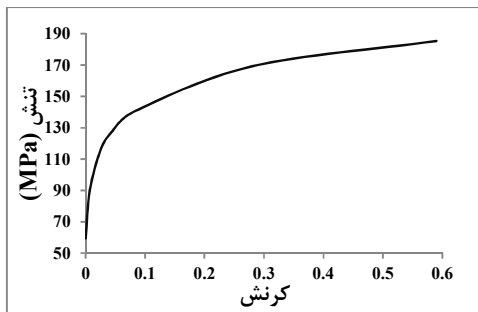


شکل ۳- نمودار استخوان ماهی مرحله عملیاتی نصب و اجرا



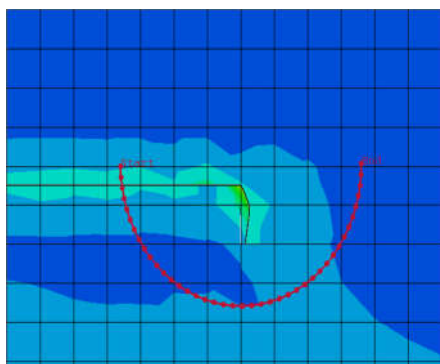
شکل ۴- روند گردش کار انجام تحقیق

بررسی، پلی اتیلن چگالی بالا<sup>۳</sup> است که معمولاً در سیستم‌های لوله‌کشی گاز طبیعی استفاده می‌شود؛ و خواص آن مطابق جدول ۱ و شکل ۷ است.



شکل

شکل ۵- بارگذاری فشار داخلی (چپ) - بارگذاری فشار بیرونی (راست)



شکل ۸- مسیر نیم‌دایره به شعاع ۲ میلی‌متر

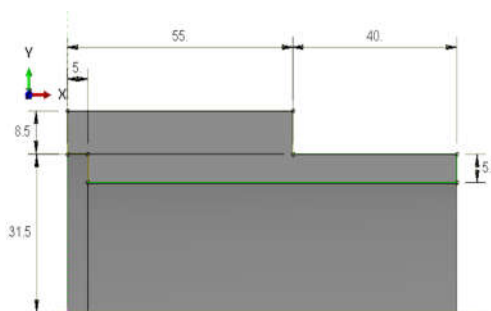
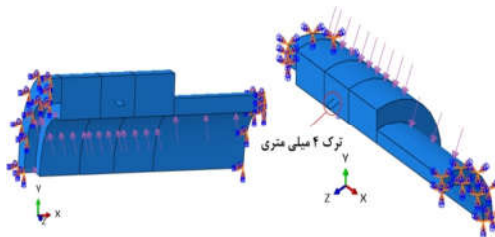
جدول ۱- ویژگی‌های ماده پلی‌اتیلن [۱۹]

چگالی ( $\text{Tonne/mm}^3$ )	مدول یانگ ( $\text{N/mm}^2$ )	ضریب پواسون
$9,5 \times 10^{-1}$	۱۵۵۰	۰,۴۶

شکل ۴ روند گردش کار اجرای پروژه را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۵ نحوه بارگذاری و مکان ترک ۴ میلی‌متری را به همراه شرایط مرزی مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، ترک در ناحیه جوش میانی واقع شده و دو نوع بارگذاری شامل فشار داخلی ناشی از فشار سیال سرویس و فشار بیرونی ناشی از بارهای وارد از طرف جاده و وزن خاک در فرآیند شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

در بخش اول مطالعه المان محدود، حساسیت نتایج آنالیز به اندازه شبکه بندی<sup>۱</sup>، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از تعیین اندازه شبکه مناسب، آنالیز رشد ترک به روش XFEM برای دو نوع بارگذاری فشار داخلی و بیرونی با اندازه شبکه بندی تعیین شده انجام شده است. همچنین تغییرات تنش متناسب با طول ترک مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، مقادیر ضرایب شدت تنش برای دو نوع بارگذاری فشار داخلی و بیرونی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به دست آمده است.

المان مورد استفاده در روش XFEM، المان C3D8R بوده و در نواحی اطراف ترک، از شبکه با اندازه‌های ۰,۵۵ میلی‌متر استفاده شده است (Error! Reference source not found.) ابعاد لوله و اتصال مورد استفاده در شبیه‌سازی مطابق شکل ۶ است. لازم به توضیح است المان نوع C3D8R، یک المان ۸ گره‌ای جامد سه‌بعدی با نقاط انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی<sup>۲</sup> است. این المان‌ها در مقابل اعوجاج تحمل زیادی داشته و برای مدل‌سازی ترک المان‌های مناسبی هستند.

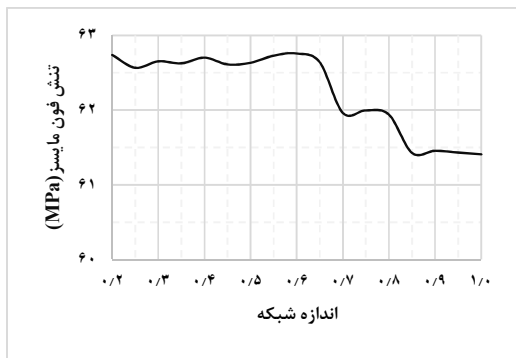


شکل ۶- ابعاد لوله و اتصال مورد استفاده در شبیه‌سازی

مقادیر تنش فون مایسز گزارش شده در نمودارها، حاصل میانگین‌گیری از تنش در ۴۰ نقطه در مسیری نیم‌دایره‌ای به شعاع ۲ میلی‌متر (۶) در نزدیکی نوک ترک است. جنس لوله و اتصال مورد

<sup>3</sup> High Density Polyethylene (HDPE)

<sup>1</sup> Mesh  
<sup>2</sup> Hourglassing

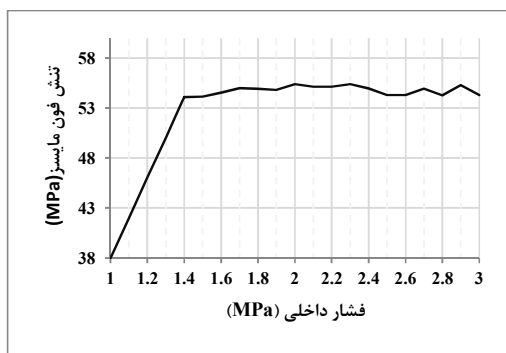


شکل ۱۰- نمودار تغییرات تنش فون مایسز نسبت به اندازه شبکه

**نتایج شبیه‌سازی رشد ترک با استفاده از روش XFEM**  
در این بخش مقادیر بارگذاری متغیر فرض گردیده و طول ترک مقدار ثابت ۴ میلی‌متر قرار داده شده است.

### نتایج شبیه‌سازی فشار داخلی

بارگذاری فشار داخلی به صورت گام‌به‌گام از فشار ۱ تا ۳ مگاپاسکال با گام‌های ۰.۲ مگاپاسکال صورت گرفت. نتایج نشان دادند که از فشار ۱/۴ مگاپاسکال، ترک ۴ میلی‌متری اولیه، شروع به رشد نموده است. نمودار مقادیر بارگذاری فشار داخلی - تنش فون مایسز در شکل آورده شده است. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود؛

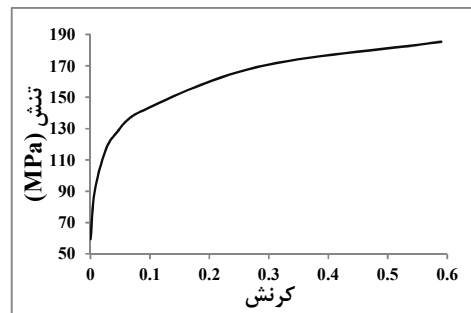


شکل ۱۱- نمودار فشار داخلی سیال - تنش فون مایسز

نمودار از فشار ۱ تا ۱/۴ به صورت صعودی رشد داشته و پس از آن ترک در مقدار فشار داخلی ۱/۴ مگاپاسکال شروع به رشد کرده و مقدار تنش تقریباً ثابت مانده است.

### نتایج شبیه‌سازی فشار بیرونی

نتایج حاصل از بارگذاری فشار بیرونی از مقدار ۰.۵ مگاپاسکال تا ۴ مگاپاسکال در شکل ۱۲ نشان داده شده است. رشد ترک در این نوع از بارگذاری، از فشار ۲/۰۵۵ مگاپاسکال شروع گردید.



شکل ۹- نمودار تنش - کرنش پلی‌اتیلن

## ۳- نتایج

### ۳-۱- نتایج بخش FMEA

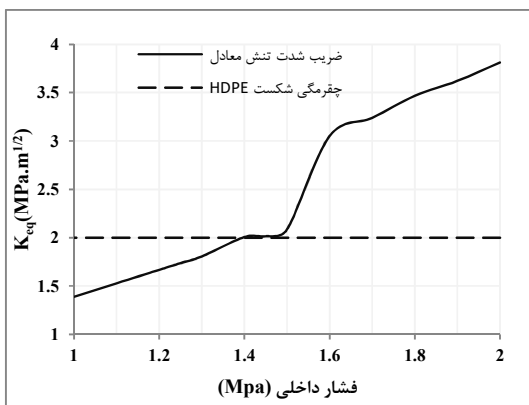
مراحل مذکور برای فرآیند FMEA برای شناسایی منابع محتمل بروز عیب در اتصالات الکتروفیوژنی توسط تیم مجربی از مهندسی شرکت گاز استان آذربایجان غربی انجام شد. نتیجه این فرآیند برای اتصالات الکتروفیوژنی در جدول پیوست ا آورده شده است؛ این جدول لیست خرابی‌های شناسایی شده توسط گروه FMEA، به همراه دلایل بروز و میزان خطر آن‌ها و اقدامات اصلاحی لازم جهت پیشگیری از وقوع را نشان می‌دهد. جهت تعیین سطح خطر عیوب، از جدول پیوست به عنوان تابعی از مقدار احتمال و شدت پیامد استفاده شده است. با توجه به اطلاعات حاصل از نتایج FMEA، سه عیب عدم تراش صحیح، وجود چربی و حضور رطوبت در محل جوش در مرحله عملیاتی نصب و اجرا، دارای بالاترین میزان خطر بوده است؛ بنابراین احتمالاً این نوع مشکلات مسئول نشستی‌های گاه‌به‌گاه در طی دوره بهره‌برداری از شبکه‌های پلی‌اتیلنی بوده‌اند.

در کاربردهای مهندسی، طبیعت عیب اولیه دارای اهمیت نبوده و عیوب اساساً به صورت ترک فرض می‌شود و سپس شرایط شکل‌گیری، رشد و توقف آن مطالعه می‌گردد [۲۰]. هر کدام از سه عیب عدم تراش صحیح و وجود چربی و رطوبت در محل جوش که جزو موارد دارای بالاترین خطر بوده، می‌تواند موجب عدم اتصال صحیح کوپلر و لوله به یکدیگر شود. در بخش آلمان محدود این تحقیق این عیب اولیه به صورت یک ترک ۴ میلی‌متری فرض می‌شود.

### ۳-۲- نتایج بخش آلمان محدود

#### نتایج آنالیز حساسیت شبکه بندی

شکل ۸ تغییرات تنش فون مایسز را به ازای اندازه‌های مختلف شبکه در شعاع ۲ میلی‌متری نوک ترک نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده است، برای شبکه‌های با اندازه ۰.۵۵ میلی‌متر و کوچک‌تر، مقدار تنش تغییرات کم و قابل قبولی داشته است. با توجه به نتایج حاصل از نمودار فوق و در نظر گرفتن تعداد آلمان‌ها و زمان حل مسئله، اندازه شبکه ۰.۵۵ برای تحلیل‌های این تحقیق انتخاب شده است.



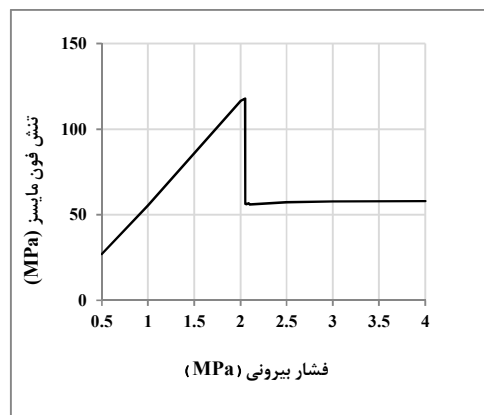
شکل ۱۴- نمودار فشار داخلی - ضریب شدت تنش معادل

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی رشد ترک و نتایج حاصل از نمودارهای ضرایب شدت تنش نشان می‌دهند که رشد ترک در فشار داخلی در مقدار ۱/۴ مگاپاسکال شروع شده و پس از بارگذاری ۱/۵ مگاپاسکال رشد ترک اولیه با سرعت بیشتری ادامه می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی منشأ نشتی‌های گاه به گاه در شبکه لوله‌کشی گاز طبیعی استان آذربایجان غربی صورت گرفت. در ابتدا با استفاده از روش FMEA عیوب دارای بالاترین میزان خطر در مراحل عملیاتی حمل و بارگیری، نصب و اجرا و بهره‌برداری مشخص گردیدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده از روش FMEA سه عیب عدم تراش صحیح، وجود چربی و رطوبت در محل جوش در مرحله عملیاتی نصب و اجرا دارای بالاترین میزان خطر بوده است. وجود هر یک از این عیوب می‌تواند موجب عدم چسبندگی در قسمتی از جوش الکتروفیوژنی شود بنابراین در ادامه تحقیق، عدم چسبندگی در جوش الکتروفیوژن به‌عنوان ترکی به‌اندازه ۴ میلی‌متر (اندازه ترک قابل اندازه‌گیری با دستگاه‌های آزمون‌های غیر مخرب موجود) در ناحیه جوش میانی اتصال برای آنالیز در نظر گرفته شد. تحلیل مکانیک شکست اتصال در نرم‌افزار ABAQUS در این تحقیق به روش XFEM و به‌صورت سه‌بعدی انجام شده است.

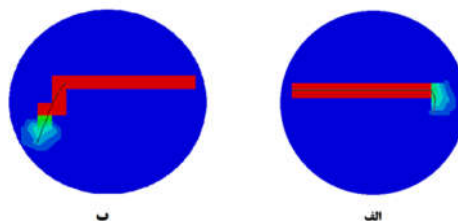
در این مطالعه شرایط بارگذاری در حین بهره‌برداری بر روی اتصالات جوشی الکتروفیوژنی، به‌صورت دو مد بارگذاری فشار داخلی و فشار بیرونی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها برای بارگذاری طول ثابت ترک (برابر ۴ میلی‌متر) انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو نوع بارگذاری مذکور، بر روی اتصال معیوب با طول ترک ۴ میلی‌متری در ناحیه جوش میانی نشان دادند که در بازه‌ی فشار داخلی بین ۱ تا ۳ مگا پاسکال، رشد ترک از فشار ۱/۴ مگاپاسکال آغاز شده است. با توجه به اینکه فشار سیال داخلی معمولاً ۴ بار است، وجود این ترک بسیار خطرناک بوده و ممکن است در شرایط ناپایدار فشار داخلی گاز داخل لوله، ترک شروع به رشد نماید. همچنین نتایج حاصل از نمودارهای ضرایب شدت تنش معادل نشان دادند که از فشار ۱/۴ مگاپاسکال ترک ۴ میلی‌متری شروع به رشد کرده و با افزایش فشار به بیش از ۱/۵ مگاپاسکال رشد ترک سریع‌تر خواهد بود.



شکل ۱۲- نمودار بارگذاری فشار بیرونی - تنش فون مایسز

#### مقایسه جهت‌های رشد ترک در دو مدل بارگذاری

شکل ۱۱ جهت‌های رشد ترک در دو نوع بارگذاری را در این تحقیق نشان می‌دهد. شکل (الف) مسیر رشد ترک در بارگذاری نوع فشار داخلی، شکل (ب) بارگذاری نوع فشار بیرونی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- جهت‌های رشد ترک در بارگذاری (الف) فشار داخلی (ب) فشار بیرونی

#### نتایج محاسبه ضرایب شدت تنش

ضرایب شدت تنش، پارامتری مهم در مکانیک شکست است که تنش‌های الاستیک نزدیک نوک ترک را مشخص می‌کند. این ضرایب به هندسه قطعه، طول ترک، نوع بارگذاری و مقدار آن بستگی دارد. در این قسمت مقادیر ضرایب شدت تنش ( $K_I$ ،  $K_2$  و  $K_3$ ) توسط نرم‌افزار ABAQUS به‌دست آمده و با جاگذاری در رابطه (۱)، مقدار ضریب شدت تنش معادل [۲۱]، برای طول ترک اولیه ۴ میلی‌متر، جهت مقایسه با چقرمگی شکست پلی‌اتیلن محاسبه شده است.

$$K_{eq} = \sqrt{K_1^2 + 3K_2^2 + K_3^2} \quad (1)$$

با مقایسه مقدار چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) [۲۲] با مقادیر ضرایب شدت تنش معادل (شکل ۱۴) مشاهده می‌شود که از فشار ۱/۴ مگاپاسکال، ضریب شدت تنش معادل به مقدار  $K_{IC}$  رسیده و پس از آن با افزایش فشار داخلی از ۱/۵ مگاپاسکال روند صعودی خواهد داشت. نتایج در توافق با محاسبات مربوط به میدان تنش در اطراف ترک می‌باشد.

پیوست الف - جدول تعیین خطر

	Consequence of Failure				
	A	B	C	D	E
Probability of Failure	High	Medium High	Medium High	High	High
	Medium	Medium	Medium High	Medium High	High
	Low	Low	Medium	Medium High	High
	Low	Low	Medium	Medium	Medium High
	Low	Low	Medium	Medium	Medium High

پیوست ا: خرابی‌های شناسایی شده، علل بروز و اقدامات اصلاحی

ردیف	مراحل عملیاتی	شرح خرابی	علت بروز	احتمال عیب	پیامدهای خرابی (شدت)	خطر	اقدامات
۱	تعمیر و نگهداری	آسیب فیزیکی (ضربه خوردگی و دو پهن شدگی لوله و اتصالات)	حمل و نقل نامناسب	زیاد (۵)	نشستی در آزمون هوا (A)	(MH)	نظارت بیشتر بر حمل و نقل کالا
		برند با کیفیت پائین	عدم دقت در خرید کالا	کم (۱)	نشستی و انفجار در حین بهره‌برداری (D)	(M)	از برندهای معتبر و تأیید شده استفاده شود.
		عیب ساخت	کنترل کیفی نامناسب در حین ساخت	کم (۲)	نشستی در آزمون هوا (A)	(L)	هنگام استفاده از لحاظ ظاهری سالم بودن، بررسی گردد.
		رطوبت در محل اتصال (عدم چسبندگی و اتصال کامل)	رطوبت جوش - وجود قطرات آب و روغن	متوسط (۴)	نشستی در حین بهره‌برداری در نتیجه اتصال معیوب (C)	(MH)	محل اتصال و اتصالات کاملاً خشک و تمیز گردد.
۲	تعمیر و نگهداری	عدم تراش صحیح (ایجاد لایه اکسیدی، عدم امتزاج و نهایتاً شکست در جوش)	تراش با وسایل نامناسب	خیلی زیاد (۵)	جوش ناسالم منجر به نشستی حین بهره‌برداری (C)	(MH)	تراش با وسایل مناسب و طبق دستورالعمل صورت پذیرد.
			تراش ناقص				
			فاصله زمانی مابین تراش و جوشکاری				
	تعمیر و نگهداری	روغن	حلال نامناسب	متوسط (۴)	جوش ناسالم منجر به نشستی حین بهره‌برداری (C)	(MH)	حلال مناسب طبق دستورالعمل و با توجه به شرایط آب و هوایی استفاده شود.
		هم‌راستا نبودن لوله‌ها هنگام جوشکاری	عدم استفاده از عمودبر	کم (۳)	جوش ناسالم منجر به نشستی حین بهره‌برداری (C)	(M)	از گیره مناسب جهت هم‌راستایی و ثابت نگه‌داشتن استفاده شود.
		سایر آلودگی‌ها	استفاده از دستمال نامناسب	کم (۱)	جوش ناسالم منجر به نشستی حین بهره‌برداری (C)	(M)	از دستمال مناسب، فاقد پرز و آلودگی استفاده شود و از تماس دست کاربر با محل اتصال و اتصالات جلوگیری شود.
			تماس دست کاربر با منطقه اتصال				
		دمای نامناسب جوشکاری	عدم رعایت فرایندهای تعریف شده	کم (۱)	کیفیت جوش پائین و نشستی در آزمون هوا (A)	(L)	شرایط آب و هوایی در هنگام اتصال مورد توجه قرار گیرد.
زمان گرم و سرد شدن	عدم خنک کاری بعد از جوش	کم (۲)	کاهش استحکام جوش و نشستی در آزمون هوا (A)	(L)	طبق استاندارد شرکت تولیدکننده اتصالات عمل شود.		
	اعمال زمان بیش از حد در جوش						
عیب دستگاه جوشکاری	ولتاژ نامناسب	مدت زمان جوش نامناسب	کم (۱)	کیفیت جوش پائین و نشستی در آزمون هوا (A)	(L)	طبق استاندارد شرکت تولیدکننده اتصالات عمل شود	

کالیبراسیون دستگاه به موقع صورت پذیرد.	(L)	کیفیت جوش پائین و نشئی در آزمون هوا (A)	کم (۱)	سر سیم‌های معیوب	عدم اتصال کامل بین دستگاه و المنت	۳	۳
				عدم کالیبراسیون دستگاه			
				عدم کنترل ولتاژ خروجی			
نصب حفاظ و علائم هشدار دهنده	(M)	نشئی در حین بهره‌برداری (C)	کم (۳)	عدم وجود حفاظ و علائم هشدار دهنده	تکان‌ها و آسیب‌های مکانیکی در اتصالات		
دقت بیشتر در جوشکاری اتصالات در معرض بار تناوبی	(MH)	نشئی و انفجار در حین بهره‌برداری (D)	متوسط (۴)	شرایط عملیاتی	بار تناوبی - بار جاده و ...		
رعایت استانداردها و فرآیندها	(MH)	نشئی و انفجار در حین بهره‌برداری (D)	کم (۳)	عدم رعایت فرآیندهای تعریف شده	تعمیرات غیراستاندارد		
MH=Medium High		H=High		M=medium	L=Low		

## ۵- مراجع

- [13] Thorpe N., Acebes M., Wylie D., Troughton M., Gilmour O., Roy O., Benoist G. and Dweik R., Ultrasonic phased array non-destructive testing and in-service inspection system for high integrity polyethylene pipe welds with automated analysis software. In *Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018)*, Gothenburg, Sweden, 2018.
- [14] Khademi-Zahed R., Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damaged polyethylene gas pipes. *Underground Space*, Vol. 4, No. 1, pp. 59-71, 2019.
- [۱۵] سبزی م، کلانتری پور ر، منشی ا، بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر تحولات متالورژیکی فلز جوش و مودهای شکست در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد ASTM A-128 مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره ۴، دوره ۴۹، صفحات ۷۷-۸۵، ۱۳۹۸.
- [16] Kalisz P., Impact of Mining Subsidence on Natural Gas Pipeline Failures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (IOP Publishing)*, Vol. 471, No. 4, p. 042024, 2019.
- [17] Tutunchi A., Eskandarzade M., Osouli-Bostanabad K. and Shahrivar R., Risk assessment of an urban natural gas polyethylene piping system. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Vol. 11, No. 2, p.06019005, 2020.
- [18] Mikulak R.J., McDermott R. and Beauregard M., *The basics of FMEA*. CRC Press, Boca Raton, 2017.
- [19] Draï A. and Aour B., Analysis of the temperature effect on the behavior of high density polyethylene during high pressure torsion process. In *CFM 2013- 21st French Congress of Mechanics*, Bordeaux, France, 2013.
- [۲۰] سیفی ر، شیرازی ع، و عباسی ف، مکانیک شکست کلاسیک. دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ۱۳۹۲.
- [21] Radaj D., Sonsino C.M. and Fricke W., *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Woodhead publishing, Abington, 2006.
- [22] Chan M.K.V. and Williams J.G., Plane strain fracture toughness testing of high density polyethylene. *Polymer Engineering & Science*, Vol. 21, No. 15, pp. 1019-1026, 1981.
- [1] Alavi M. and Rasooly M., Tool design and construction for leak testing of gas electrofusion polyethylene coupler by internal pressurization system. In *12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018)*, Gothenburg, Sweden, 2018.
- [2] O'Connor C., The nature of polyethylene pipe failure. *Modern Plastics Worldwide*, Vol. 88, No. 2, pp. 20-22, 2011.
- [3] Sarambale D. S., and Shinde D. K., Electro-Fusion Joint Failure Polyethylene Pipes Analysis and its Simulation using Finite Element Analysis. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Vol. 5, No. 12, pp 51-55, 2017.
- [4] Tayefi P., Beck S.B.M. and Tomlinson, R.A., The fatigue performance of electrofusion tapping tees subject to contamination. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 171, pp. 271-277, 2019.
- [5] Marshall G.P., Hepburn D.S. and Netherwood N., Improvements in Electrofusion Welding in the US Water Industry. *Proceedings of Plastics Pipes IX*, Edinburgh, Scotland, 1995.
- [6] Akkurt A. and Saraç E., 2015. The Research for Reliabilities of PE Natural Gas Transferring Lines Joining with Butt Fusion Welding in Different Temperatures. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, Vol. 21, No. 1, pp. 15-23, 2015.
- [7] Tikhonov R.S., Kondakov A.S., Starostin N.P. and Ammosova O.A., Calculation of the thermal and stress-strain states in electrofusion welding of polyethylene pipes in thermoelastic statement. In *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2053, No. 1, p. 040095, 2018.
- [8] Starostin N.P., Gerasimov A.I., Danzanova E.V. and Botvin G.V., Welding Polymer Pipes at Low Climatic Temperatures. In *Materials Science Forum*, Vol. 945, pp. 379-383, 2019.
- [۹] مامندی ا، قاسمی پور م، سید ع، تحلیل خمش ورق قطاعی حلقوی نازک بر روی بستر وینکلر غیرخطی تحت بارگذاری های یکنواخت و غیریکنواخت با استفاده از روش کانترویچ توسعه یافته. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره ۱، دوره ۵۰، صفحات ۲۱۳-۲۰۵، ۱۳۹۹
- [10] Zhang Y., Shi J. and Zheng J., Study of mode I-II mixed crack propagation in electrofusion joint of polyethylene pipe. In *Pressure Vessels and Piping Conference*, Prague, Czech Republic, 2018.
- [11] Radermacher L. and Mateescu T., Study of natural gas pipeline behaviour. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Iasi, Romania, 2019.
- [12] Abbasian F., Tarkesh esfahani R. and Mohseni E., Tool Design and Construction for leak Testing of Gas Electrofusion Polyethylene Coupler by Vacuum Method. *International Gas Union Research Conference*, Rio, Brazil, 2017.