

## بررسی علل شکست لوله های برگشت گازوئیل در توربین های گازی

رقیه محمدزاده\*

استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

### چکیده

در تحقیق حاضر علل شکست اتصالات جوش لوله های برگشت گازوئیل از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی در توربین های گازی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور آزمون های ریزساختاری و شکست نگاری بر روی لوله ها انجام شد و محل جوانه زنی ترک و نوع شکست مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مکانیزم شکست لوله ها خستگی بوده و به علت تمرکز تنش شدید در ناحیه همپوشانی ابتدا و انتهای جوشکاری، جوانه زنی زودرس ترک در لوله ها رخ داده و عمر خستگی لوله ها کاهش یافته است. به منظور افزایش عمر خستگی لوله ها لازم است که ارتعاشات وارد به لوله ها مهار شده و ترک های جوانه زنی در حین سرویس دهی لوله ها به وسیله بازرسی های غیر مخرب جوش، تشخیص داده و اقدامات لازم برای حذف این ترک ها انجام شود. **واژه های کلیدی:** فولاد زنگ نزن آستنیتی، جوانه زنی ترک، شکست، خستگی.

### Failure analysis of fuel oil return line in gas turbines

R. Mohammadzadeh

Department of Materials Engineering, Engineering Faculty, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

### Abstract

In this study the failure analysis of austenitic stainless steel welded joints of fuel oil pipes have been investigated. Microstructure characterizations and fractography were performed on pipes and the crack initiation and fracture mechanism were studied. The results show that the fracture mechanism of pipes was fatigue and due to the early initiation and higher stress concentration in the overlap weld zone the fatigue life has been decreased. In order to increase fatigue life of pipes it is suggested to determine the initial crack created during service by NDT methods. It was recommended to provide additional support brackets in the affected pipe length to prevent the fuel oil return line from vibrating extremely.

**Keywords:** austenitic stainless steel, crack initiation, fracture, fatigue.

### ۱- مقدمه

استوانه در زردار بدست آید. چنانچه درز اتصال به صورت طولی باشد روش های جوشکاری مورد استفاده شامل جوشکاری مقاومت الکتریکی یا القای الکتریکی، جوشکاری لیزر، جوشکاری زیر پودری و جوشکاری قوسی با فلز پرکننده و محافظت گاز خواهد بود. اما در صورتی که لوله دارای درز ماریپیچی باشد روش جوشکاری بکار رفته جوشکاری زیر پودری خواهد بود [۴].

استفاده از جوشکاری در لوله ها فقط محدود به ساخت لوله ها نمی باشد. بلکه برای اتصال لوله ها در هنگام لوله گذاری نیز از جوشکاری استفاده می شود. اتصال لوله ها در خطوط انتقال نفت و گاز، اتصالات غیر هم جنس لوله ها در نیروگاه ها مثال های بارزی برای استفاده از جوشکاری در اتصالات لوله ها می باشد. در لوله های خطوط انتقال نفت و گاز، روش های اصلی اتصالات جوش، جوشکاری قوسی با الکتروود روش دار و جوشکاری قوسی با فلز و گاز محافظ می باشند. البته روش های جوشکاری دیگری نیز وجود دارند که هنوز موفقیت تجاری کسب نکرده اند [۵].

انجام فرایند جوشکاری جهت اتصال قطعات مختلف به همدیگر تحت هر شرایط کنترلی دارای یک سری عیوب و ناخالصی هایی خواهد بود که در اکثر روش های جوشکاری غیر قابل کنترل می باشد [۶]. از طرفی فرآیندهای جوشکاری به دلیل اعمال حرارت و سپس خنک شدن، باعث ایجاد تنش های پسماند در اتصالات خواهد شد. این تنش ها در برخی نقاط فشاری و در برخی قسمت ها کششی می باشند. اندازه این تنش ها در برخی نقاط به بالاتر از مقدار تنش تسلیم ماده می رسد

از توربین های گازی در نیروگاهها برای تولید برق، موتورهای جلوبرنده در هواپیماها، کشتیها و حتی خودروها و در صنایع نفت و گاز برای به حرکت درآوردن پمپها و کمپرسورها در خطوط انتقال فرآورده ها و غیره استفاده می شود. امروزه استفاده از نفت و گاز به عنوان ارزانه ترین و در دسترس ترین منبع انرژی مورد توجه جهانی است. با وجود تلاش همه برای کاهش مصرف سوخت های فسیلی هنوز هم ۳۴٪ نیاز انرژی توسط نفت، ۲۴٪ توسط زغال و ۲۱٪ توسط گاز تأمین می شود [۱]. پیش بینی می شود این نیاز به سوخت های فسیلی بخصوص نیاز به گاز تا سال ۲۰۳۰ همچنان افزایش یابد. بدون وجود خطوط لوله انتقال امکان تأمین نیاز به نفت و گاز وجود نخواهد داشت. خطوط لوله ۴۰ برابر سریع تر از حمل و نقل ریلی و ۱۰۰ برابر سریع تر از حمل و نقل جاده ای عمل انتقال را انجام می دهند [۲]. در میان انواع فولادها، فولادهای زنگ نزن آستنیتی به دلیل داشتن مقاومت به خوردگی بالا و خواص مکانیکی مناسب، موارد استفاده وسیعی در لوله های خطوط انتقال نفت و گاز و نیروگاه ها دارد [۳]. به طور کلی دو روش برای ساخت لوله های نفت و گازوئیل وجود دارد. اولین روش به صورت نورد عرضی و تولید لوله بدون درز می باشد. در این روش روی فولاد، کار گرم انجام شده و محصول نهایی که یک استوانه بدون درز جوشکاری می باشد، بدست می آید. روش دوم روش جوشکاری است که در آن ماده اولیه بصورت نورد شده می باشد. با باز کردن رول و خم کردن آن، جوشکاری به صورت ماریپیچی یا طولی انجام می گیرد تا یک

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r.mohammadzadeh@azaruniv.ac.ir

## ۲- روش تحقیق

## ۲-۱- نمونه های مورد آزمایش

توربین گازی یک موتور درون سوز از نوع ماشین های دوار است که بر اساس انرژی گازهای ناشی از احتراق کار می کند. هر توربین گاز شامل یک کمپرسور برای فشرده کردن هوا، یک محفظه احتراق برای مخلوط کردن هوا با سوخت و محترق کردن آن و یک توربین برای تبدیل انرژی درونی گازهای داغ و فشرده به انرژی مکانیکی است. بخشی از انرژی مکانیکی تولید شده در توربین، صرف چرخاندن کمپرسور خود توربین شده و باقی انرژی، بسته به کاربرد توربین گاز، ممکن است مولد الکتریکی را بچرخاند (توربوژنراتور)، به هوا سرعت دهد (توربوجت و توربو فن) یا مستقیماً (یا بعد از تغییر سرعت چرخش توسط جعبه دنده) به همان صورت مصرف شود (توربوشت، توربوپراپ و توربو فن). نمایی از برنر توربین گازی با سوخت گازوئیل در شکل ۱ نشان داده شده است. برنر توربین گازی یک برنر دوگانه سوز با سوخت گازوئیل و یا گاز است. گازوئیل از نقطه شماره ۳ به برنر وارد می شود. مقداری از گازوئیل در محفظه احتراق<sup>۱</sup> توربین گازی مصرف شده و بقیه سوخت گازوئیل از سمت شماره ۱ به خارج از برنر منتقل شده و نهایتاً ذخیره گازوئیل برگشت داده می شود. زمانیکه توربین گازی در بار پایه بهره برداری می شود، فشار گازوئیل ورودی به هر برنر ۶۰ بار بوده این گازوئیل در قسمت سوریل چمبر<sup>۲</sup> وارد می شود. البته فرض بر این است که توربین گازی در شرایط ایزو شرایط یعنی دمای محیط ۱۵ درجه سلسیوس و فشارها ۱۰۱۳ میلی بار و رطوبت نسبی هوا ۶۰ درصد در حال بهره برداری می باشد. گازوئیل ورودی به دلیل عبور از شیارهای مماسی، تولید گردابه<sup>۳</sup> می نماید. این گردابه جریان گردابی با فرکانس ۴ کیلوهرتز ایجاد کرده و باعث می شود گازوئیل به صورت یک مخروط توخالی ابر مانند به داخل محفظه احتراق پاشیده شود. از طرفی بقیه گازوئیل که پاشش نمی شود از طریق خط برگشت، به مخزن ذخیره گازوئیل برگشت داده می شود. با نصب شیر کنترل<sup>۴</sup> در خط برگشت، پاشش گازوئیل به محفظه احتراق را کنترل می نماییم. در صورتی که شیر کنترل به سمت بسته شدن برود، مقاومت مسیر برگشت گازوئیل در برابر حرکت گازوئیل بیشتر شده و در این حالت افزایش پاشش گازوئیل را در محفظه احتراق به همراه دارد. در مسیر برگشت برنر، قطعه ای به نام گردابه شکن وجود دارد تا جریان گردابی گازوئیل با فرکانس ۴ کیلوهرتز را خنثی نماید و در لوله های گازوئیل مسیر برگشت، گردابه ای وجود نداشته باشد [۱۵].

تصویر نمونه دریافت شده از لوله مسیر برگشت گازوئیل که در ناحیه اتصال جوش لوله به قسمت ترک خورده در شکل ۲ نشان داده شده است. این نمونه از فاصله حدود یک الی دو سانتیمتری محل تشکیل ترک، از بالا و پایین ناحیه اتصال در لوله و یونیون بریده شده است. جنس لوله های برگشت گازوئیل از فولاد زنگ نزن آستنیتی 316Ti

که باعث تسهیل در شکست سازه می شود. تنشهای پسماند کششی و تنشهای کششی نوسانی اعمالی در حین کار سازه باعث رشد سریع ترکهای ایجاد شده در طی جوشکاری و یا باعث جوانه زنی ترکهای خستگی جدید خواهد شد [۷]. با توجه به گزارشات در زمینه نشتی و شکست در خطوط انتقال نفت و گاز، تخریب سازه ها و لوله ها در بسیاری از موارد ناشی از خستگی می باشد که شکست این سازه ها تلفات جبران ناپذیری را به همراه خواهد داشت [۸]. در همین راستا تحقیقات زیادی بر روی علت شکست قطعات توربین های گازی انجام گرفته است. مازور و همکارانش [۹] علت شکست یک پره توربین نیروگاه هفتاد مگاواتی از جنس اینکونل 738LC را مورد مطالعه قرار دادند و براساس مشاهدات ریزساختاری و مکانیکی دلیل شکست این پره ها را رشد ترک با مکانیزم خزش و خستگی در اثر رسوب کاربیدها در مرزنده ها بیان داشتند. گالاردو و همکارانش [۱۰] دلیل شکست پره های توربین از جنس سوپر آلیاژ CMSX-4 را پس از ۱۰۵۰۰ ساعت کاری، سایش پوشش پره و خوردگی داغ بیان کرده اند. کوبیباک و همکارانش [۱۱] دلیل شکست پره های توربین گازی ۱۵۰ مگاوات را پس از ۱۰۸۰۰ ساعت کاری به جوانه زنی ترک در ریشه پره و رشد آن در اثر خستگی کم چرخه ارتباط دادند. کرمانپور و همکارانش [۱۲] مکانیزم شکست پره توربین گازی از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V را به روش های عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد که به دلیل مقاومت به سایش کم ریشه پره، خستگی پرچرخه توام با فرسایش عامل شکست در این پره ها بوده است. پورسعیدی و همکاران [۱۳] با استفاده از آنالیز شیمیایی در مناطق نزدیک ترک در پره های شکسته شده ردیف اول توربین های گازی، به حضور عناصر Cl, Na, F, S در نواحی شکست پی بردند. و مطالعات شکست نگاری [۱۳] روی نواحی شکست نشان داد که تشکیل حفره در اثر خوردگی به عنوان محل جوانه زنی و رشد اولیه ترک در این پره ها عمل نموده و منجر به رشد ترک با خستگی پرچرخه و در نهایت شکست در این پره ها می شود. همچنانکه که از نتایج تحقیقات پیشین [۹-۱۳] مشخص است شکست در اثر خوردگی، خستگی و خزش از مهم ترین عوامل شکست در اکثر قطعات توربین های گازی بخصوص پره های توربین می باشد. لذا پیش بینی محل احتمالی جوانه زنی ترک در سازه ها و کاهش تمرکز تنش در این نواحی از مهمترین راهکارها برای افزایش عمر خستگی قطعات و سازه ها در حین سرویس می باشد. در پژوهش حاضر به بررسی علت شکست اتصالات جوش لوله های برگشت گازوئیل در توربین ها پرداخته می شود. این لوله های برگشت گازوئیل پس از کارکرد کوتاه مدت در محل اتصال لوله به یونیون دچار ترک خوردگی و شکست شده است. بر اساس تحقیقات انجام گرفته توسط نویسنده مقاله حاضر، گزارشات کمی در زمینه بررسی شکست لوله های برگشت گاز یا گازوئیل در توربین های گازی وجود دارد. تنها مطالعه در این زمینه تا به حال، توسط فیشر و همکارانش [۱۴] صورت گرفته است که شکست لوله های برگشت گازوئیل در توربین های گازی را مورد بررسی قرار دادند و دلیل فیزیکی یا متالورژیکی شکست لوله های برگشت را به خستگی پر چرخه ارتباط دادند. هدف از انجام این کار تحقیقاتی بررسی علت ترک خوردگی لوله های برگشت گازوئیل در توربین های گازی و ارائه راهکارهایی جهت برطرف نمودن این مشکل می باشد.

<sup>1</sup> Combustion Chamber

<sup>2</sup> Base load

<sup>3</sup> Swirl Chamber

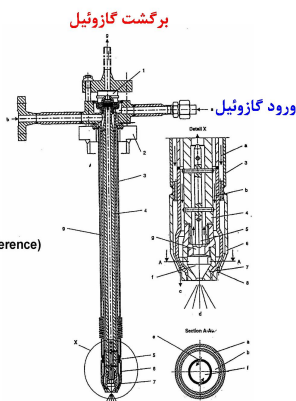
<sup>4</sup> Vortex

<sup>5</sup> Control Valve

<sup>6</sup> Vortex Breaker

FUEL OIL BURNER

1. Check valve
2. Burner support
3. Housing
4. Return pipe
5. Needle
6. Cap
7. Nozzle
8. Exit bores (16 around circumference)
9. Supply pipe
  - a. Water inlet
  - b. Fuel oil supply
  - c. Water outlet
  - d. Fuel Oil outlet
  - e. Tangential slot
  - f. Swirl chamber
  - g. Fuel Oil return



شکل ۱- نمایی از برنر توربین گازی با سوخت گازوئیل [۱۵]



شکل ۲- نمونه دریافت شده از لوله ترک خورده

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار میکروسکوپی فلز پایه، منطقه HAZ و فلز جوش

تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فلز پایه، منطقه متأثر از گرما و فلز جوش در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد ساختار فلز پایه (شکل ۳ الف))، شامل زمینه روشن آستنیت به همراه دوقلوئی‌ها در برخی دانه‌ها می‌باشد. در ریز ساختار منطقه متأثر از گرمای فلز پایه (شکل ۳ ب))، درشت شدن دانه‌ها به همراه برخی دوقلوئی‌های مکانیکی و حرارتی در دانه‌ها به وضوح دیده می‌شود. همچنانکه که در شکل ۳ ج) مشاهده می‌شود ساختار میکروسکوپی فلز جوش، متشکل از زمینه روشن آستنیت به همراه فاز تیره رنگ فریت دلتا، می‌باشد. این ساختار دو فازی ناشی از استحاله ناتمام فریت دلتا به آستنیت در طی انجماد فلز جوش است.

۳-۲- سختی سنجی

تغییرات ریزسختی مناطق مختلف جوش بر حسب ویکرز و فاصله از مرکز جوش در شکل ۴ نشان داده شده است. بطوریکه میکروسختی‌های حاصل پراکندگی‌های زیادی را نشان می‌دهد. اما میانگین سختی برای فلز جوش ۲۰۰ ویکرز، منطقه متأثر از گرمای فلز پایه، ۱۸۰ ویکرز و فلز پایه، ۲۱۰ ویکرز می‌باشد. نتایج حاصل از ریز سختی‌سنجی نشان می‌دهد که به دلیل درشت شدن دانه‌ها در منطقه متأثر از گرما، این منطقه سختی ویکرز کمتری نسبت به فلز پایه دارد و

(DIN 1.4571) می‌باشد که به روش قوس تنگستن با گاز محافظ<sup>۷</sup> با فیلر از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L جوشکاری شده است. این لوله‌ها تحت تنش‌های نوسانی در اثر ارتعاشات شدید می‌باشند. به منظور بررسی علت این ترک خوردگی‌ها و شکست در اتصالات جوش این لوله‌ها از آزمون‌های مختلفی شامل آزمون متالوگرافی، شکست‌نگاری میکروسکوپی و ماکروسکوپی، ریز سختی سنجی استفاده شد.

۲-۲- بررسی‌های ریزساختاری

جهت بررسی‌های ریزساختاری، ابتدا نمونه‌های مورد آزمایش مانند گرم شدند و سپس سنباده زنی و پولیش مکانیکی بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای این کار به ترتیب از سنباده‌های شماره ۱۰۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و همچنین از پودر آلومینای ۱ میکرون استفاده گردید. فرآیند حکاکی نمونه‌ها به کمک محلول  $H_2O+HCl+HNO_3$  به مدت ۱۵ ثانیه انجام شد. پس از حکاکی نمونه‌ها، ریزساختار نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS در بزرگنمایی‌های مختلف انجام پذیرفت.

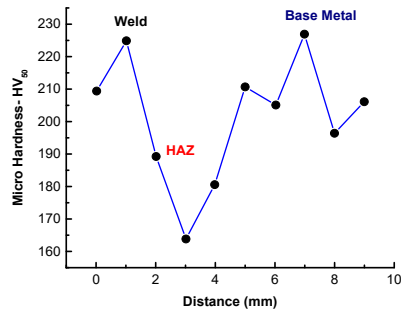
۳-۲- ریز سختی سنجی

آزمایشات ریزسختی‌سنجی بر روی نمونه‌های تهیه شده از لوله‌های اتصال جوش انجام شد. سختی سنجی از مرکز و نواحی اطراف جوش در مقیاس میکرو و به روش ویکرز تحت بار ۵۰ گرم و زمان نگهداری ۱۰ ثانیه انجام شد. در این مرحله از هر منطقه سه بار آزمایش به عمل آمد و مقدار میانگین محاسبه گردید.

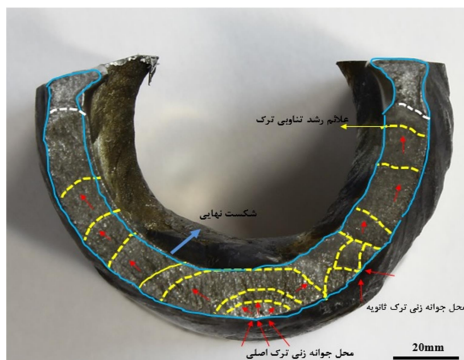
۴-۲- شکست نگاری

پس از بازرسی چشمی و مشاهدات اولیه سطح شکست، تصویرهای لازم برای شکست‌نگاری لوله‌های شکسته شده به کمک دوربین دیجیتال با دقت بالا و قابلیت تصویر برداری ماکرو تهیه شد. با بررسی این تصاویر اطلاعات مفیدی در مورد محل جوانه‌زنی ترک، نرم یا ترد بودن شکست و تغییر شکل ظاهری بدست آمد. به منظور بررسی میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌ها، ابتدا سطح نمونه‌ها به وسیله الکل و استون به روش آلتراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه تمیز شدند و سپس سطوح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Cam Scan MV2300 مورد بررسی‌های شکست نگاری در مقیاس میکروسکوپی قرار گرفتند. بررسی‌ها بر روی سطوح شکست انجام شد و تصاویر مربوط به محل جوانه زنی و ناحیه شکست نهایی بدست آمد. همچنین آنالیز شیمیایی فازهای تشکیل شده روی سطح شکست توسط EDAX از چهار ناحیه سطح شکست به صورت انتخابی تعیین گردید.

<sup>7</sup> GTAW



شکل ۴- تغییرات سختی در ناحیه جوش، منطقه متأثر از گرما و فلز پایه در مقطع طولی لوله



شکل ۵- تصویر ماکروسکوپی سطح شکست که محل جوانه زنی ترک و همچنین مراحل و مسیر رشد ترک در آن مشخص شده است

این نیم بیضی‌ها موقعیت یا اثر جبهه ترک را در مراحل مختلفی از رشد ترک نشان می‌دهند. نحوه گسترش نواحی نیم بیضی و مسیر ماکروسکوپی رشد ترک از مراحل اولیه تا انتهای رشد ترک با پیکان در شکل ۵ مشخص شده است. مرکز انحنا نیم بیضی‌ها در شکل ۵ به سمت محل عمومی جوانه زنی ترک در سطح خارجی لوله اشاره دارد. ناحیه عمومی جوانه زنی و تشکیل ترک در مجاورت ناحیه همپوشانی ابتدا و انتهای جوشکاری قرار دارد. این منطقه دارای شکل هندسی نامناسب، غیریکنواخت و همراه با پستی و بلندی می‌باشد، که می‌تواند منجر به جوانه‌زنی ترکهای خستگی شود. علاوه بر این با توجه به اینکه جوانه زنی ترک در مرز اتصال جوشی اتفاق افتاده و ناحیه همپوشانی در حین جوشکاری دو مرتبه گرما دیده (آغاز و پایان جوشکاری)، احتمال وجود تنش‌های پسماند جوشکاری و تغییرات ریزساختاری شدیدتر در این منطقه وجود داشته که می‌تواند در تشکیل ترک اولیه نقش مهمی ایفا نموده باشد.

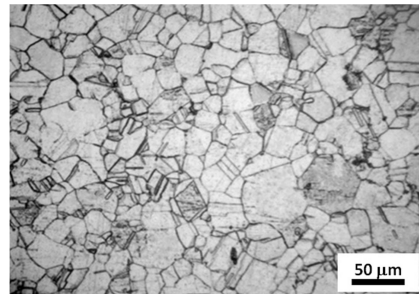
محل جوانه‌زنی ترک در گرده جوش و غیریکنواختی جوش در این منطقه در شکل ۶ نشان داده شده است. پس از جوانه زنی، رشد ترک با سرعت بیشتری در جهت قطر بزرگ نیم بیضی صورت گرفته که به مرور سبب کشیدگی بیشتر نیم بیضی‌ها در امتداد قطر بزرگ آنها گردیده است. با گسترش ناحیه نیم بیضی شکل در ضخامت لوله، ترک به سطح داخلی لوله نزدیک شده و در نهایت به آن رسیده است که در این موقعیت، نوع ترک از ترک سطحی نیم بیضی شکل به ترک

به دلیل سختی کمتر، منطقه پلاستیک بیشتری به هنگام رشد ترک در این منطقه ایجاد می‌شود.

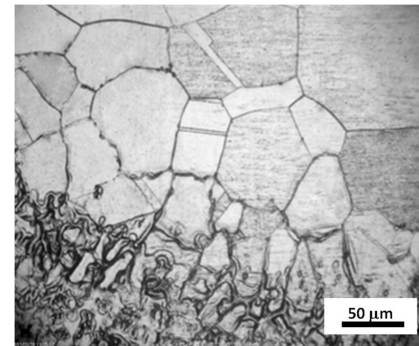
### ۳-۳-۳- شکست نگاری

#### ۳-۳-۱- شکست نگاری ماکروسکوپی

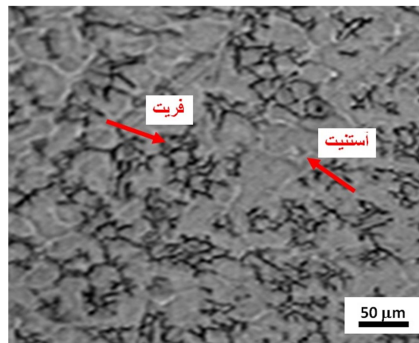
تصاویر دوربین دیجیتال از سطح شکست در شکل ۵ نشان داده شده است. در بررسی‌های اولیه ماکروسکوپی شکل ظاهری نمونه‌ی شکست، هیچگونه آثاری از اعوجاج یا تغییر شکل ظاهری محسوس در لوله‌ها دیده نمی‌شود. لذا می‌توان استنباط کرد که میزان جذب انرژی در فرآیند شکست لوله‌ها ناچیز بوده و در نتیجه شکست لوله‌ها از طریق فعال شدن نوعی مکانیزم شکست ترد رخ داده است. در شکل ۵ نواحی و علائم مهم موجود بر روی سطح شکست توسط خطوط خط چین تفکیک گردیده است. در این تصویر در نیمه پایینی سطح شکست لوله، تعدادی نواحی نیم بیضی شکل قابل تشخیص است.



(الف)



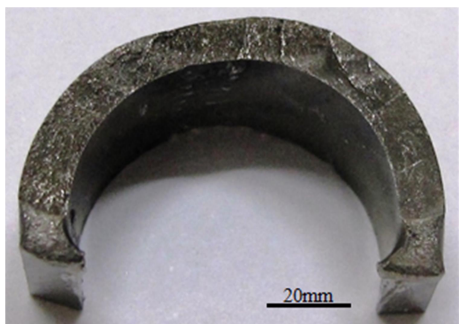
(ب)



(ج)

شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار (الف) فلز، (ب) منطقه متأثر از گرما و (ج) فلز جوش





شکل ۸- نیمه بالایی سطح شکست

### ۳-۲- شکست نگاری میکروسکوپی

شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه را در بزرگنمایی کم نشان می‌دهد که آثار تناوبی مشاهده شده در تصاویر دیجیتال و استریو (نیم بیضی‌ها)، البته در مقیاسی ظریفتر، در آنها نیز مشخص می‌باشد. در تصویر سطح شکست در بزرگنمایی‌های بالاتر (شکل ۱۰)، دسته‌ای از خطوط موازی میکروسکوپی قابل رویت است. این خطوط مواج که در جهت عمود بر مسیر میکروسکوپی رشد ترک بوجود آمده‌اند نشان از پیشروی تدریجی و تناوبی ترک در مقیاس میکروسکوپی دارند. همچنین در برخی نواحی از سطح شکست نهایی، صفحات تورق مشهود است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این صفحات، مسیر رشد ترک را نشان می‌دهد که ظاهر دانه‌ای و براق داشته و دلالت بر این دارد که شکست نهایی لوله‌ها ترد بوده است. نتایج حاصل از آنالیز یک ناحیه از سطح شکست توسط EDAX<sup>۸</sup> در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنانکه که از شکل ۱۲ دیده می‌شود، تنها عناصر موجود در طیف آنالیز شیمیایی پیکهای مربوط به آهن، کروم، نیکل و مولیبدن می‌باشد. با توجه به ارتفاع قابل توجه پیک آهن می‌توان نتیجه گرفت که هیچ گونه فیلم اکسیدی روی سطح تشکیل نشده است. این موضوع نشان دهنده این مطلب است که در حین رشد ترک پدیده خوردگی وجود نداشته است. بنابراین مطابق نتایج آنالیز شیمیایی انجام گرفته روی سطح و همچنین به دلیل نبود شکست بین دانه‌ای در سطح شکست (که از نشانه‌های بارز خوردگی تحت تنش است) می‌توان نتیجه گرفت که لوله‌های مورد مطالعه توسط مکانیزم خوردگی تحت تنش<sup>۹</sup> تخریب نگردیده‌اند.

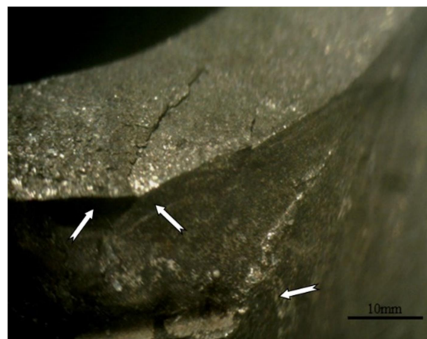
### ۳-۴- تخمین عمر خستگی و تنش های وارده بر لوله‌ها

مقایسه مساحت منطقه خستگی و ناحیه شکست نهایی مطابق شکل ۵ نشان می‌دهد که سطح شکست نهایی در مقایسه با ناحیه خستگی وسعت کمی دارد. بنابراین می‌توان گفت که دامنه تنش‌های اعمالی کم بوده و مکانیزم شکست از نوع خستگی پرچرخه<sup>۱۰</sup> می‌باشد. تا به حال تحقیقات مختلفی جهت پیدا کردن ارتباط بین فاصله خطوط مواج و عمر خستگی انجام شده است. یکی از مهمترین این معادلات، رابطه تجربی ارائه شده توسط بیئتس و همکاران [۱۶] می‌باشد:

سرتاسری تبدیل شده است. در این هنگام محفظه داخل لوله به خارج آن مرتبط شده و نشت گاز از داخل لوله آغاز گردیده است. پس از تبدیل ترک به ترک سرتاسری و آغاز نشتی، پیشروی آن کماکان ادامه یافته تا جایی که ترک، نیمی از محیط لوله را در بر گرفته است.

در جوش‌های لب به لب و در قطعات ضخیم، پاس ریشه احتیاج به تمهیدات خاصی دارد. جوش در هنگام سرد شدن، تمایل به انقباض دارد که قیود موجود در ورق از این انقباض جلوگیری می‌کند و در نتیجه تنش‌های کشش در جوش به وجود می‌آید. اگر جوش ریشه به صورت مقعر اجرا گردد، امکان ترک خوردگی در آن بیشتر خواهد بود. افزایش ضخامت گلوی پاس اول، احتمال ایجاد ترک را در آن کاهش می‌دهد. اگر پاس‌های بعدی جوش به طور قابل توجهی عریض و یا مقعر باشد، احتمال ایجاد ترک در امتداد آنها نیز وجود دارد. در طراحی برای سازه‌هایی که تحت بارهای دینامیکی هستند در نظر گرفتن موضوعات فوق الذکر برای استحکام خستگی اهمیت دارد [۹].

خطوط نیم بیضی قابل تشخیص در شکل ۵ معرف موقعیت جبهه ترک در زمانهای مختلفی از رشد تناوبی ترک از مراحل اولیه پس از جوانه زنی تا تبدیل ترک به ترک سرتاسری و آغاز نشتی می‌باشند. اشاعه تناوبی ترک در ادامه رشد ترک سرتاسری نیز همراه با تشکیل خطوط تناوبی و موازی یا خطوط ساحلی بوده که در تصاویر دوربین دیجیتال و میکروسکوپ استریو به خوبی قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۷). تصویر دوربین دیجیتال از نیمه پایین سطح شکست نمونه در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنانکه در شکل ۸ مشاهده می‌شود در نیمه شکسته شده پایین نمونه نیز علائم نیم بیضی‌ها و خطوط ساحلی مشابه نیمه شکسته بالا با کمی دقت قابل رویت می‌باشد.



شکل ۶- شکل غیریکنواخت کرده جوش در مجاورت محل عمومی جوانه زنی ترک

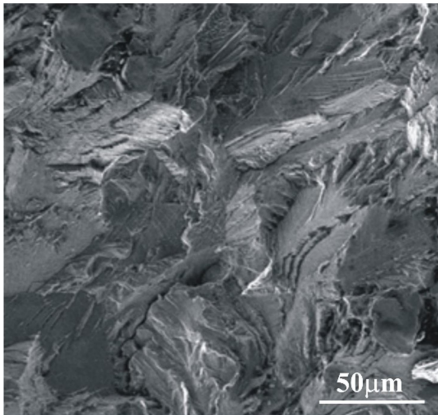


شکل ۷- علائم رشد تناوبی ترک بر روی سطح شکست

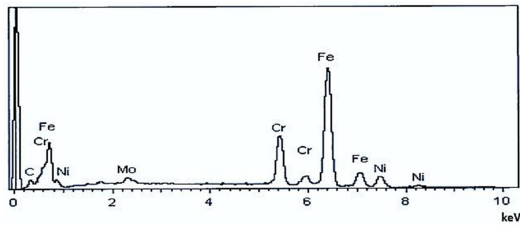
<sup>۸</sup> Energy Dispersive Analysis X-Ray

<sup>۹</sup> stress corrosion cracking

<sup>۱۰</sup> High Cycle Fatigue (HCF)



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از صفحات تورق ایجاد شده در سطح شکست نهایی



شکل ۱۲- نتایج آنالیز شیمیایی سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به EDAX

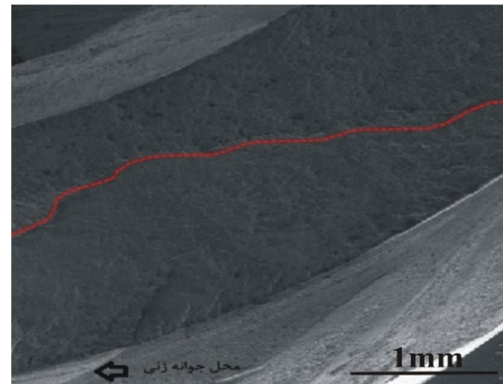
در رابطه (۲)، تعداد خطوط بوده و می تواند مقادیر  $k = 1, 2, 3, \dots$  را داشته باشد،  $S_p$ ، فاصله متوسط خطوط موج روی خط  $P$  ام،  $L_p$ ، طول خط  $P$  ام،  $n_p$ ، تعداد خطوط موج موجود روی خط  $P$  ام،  $\phi_p$ ، زاویه بین خط  $P$  ام و جهت رشد ترک ماکروسکوپی می باشد. در شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از ناحیه شکست خستگی و خطوط ترسیم شده روی این تصویر جهت تعیین فاصله متوسط خطوط موج نشان داده شده است. داده های حاصل از محاسبات انجام گرفته روی نواحی انتخابی شامل خطوط موج در شکل ۱۳ با جزئیات کامل در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس محاسبات انجام گرفته مطابق جدول ۱، فاصله متوسط خطوط موج برای نمونه های مورد نظر در این کار تحقیقاتی در حدود  $0.4$  میکرومتر می باشد.

$$\Delta K = E \sqrt{\frac{S}{6}} \quad (1)$$

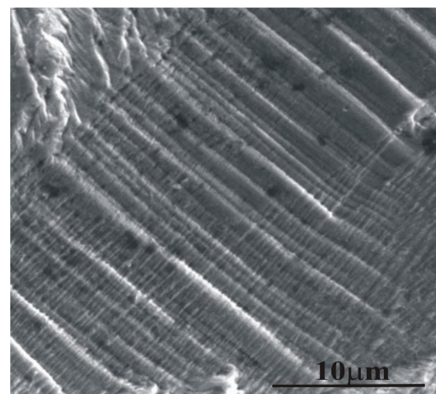
در رابطه (۱)،  $\Delta K$ ؛ دامنه تغییرات فاکتور شدت تنش،  $E$ ؛ مدول الاستیک و  $S$ ؛ فاصله متوسط خطوط موج می باشد. با توجه به اینکه مدول الاستیک فولادهای زنگ نزن آستنیتی نوع AISI 316L تقریباً برابر  $200$  گیگاپاسکل می باشد [۴]، با اندازه گیری فاصله متوسط خطوط موج می توان تغییرات فاکتور شدت تنش را با استفاده از رابطه (۱) تخمین زد. برای اندازه گیری فاصله خطوط موج در این مطالعه از روش ارائه شده توسط ندبال و همکاران [۱۷] مطابق فرمول زیر استفاده شد:

$$S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{p_i} \cos(\phi_{p_i}), \quad S_p = \frac{L_p}{n_p} \quad (2)$$

در این روش، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از خطوط موج تهیه می شود و روی تصویر خطوط راستی با طول دلخواه کشیده می شود. تعداد خطوط موجی که این خط راست را قطع می نماید می شمارند و طول خط را بر تعداد خطوط امواج تقسیم کرده و فاصله متوسط خطوط امواج را مطابق رابطه (۲) به دست می آورند.



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از علائم ماکروسکوپی رشد تناوبی ترک



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از خطوط تناوبی میکروسکوپی در سطح شکست (خطوط موج)

با در دست داشتن طول ترک اولیه و نهایی، می توان عمر خستگی را با انتگرال گیری از طرفین رابطه (۴) به دست آورد. طول ترک اولیه و نهایی با توجه به شکل ۵ تقریباً به ترتیب برابر ۰/۷ و ۱۱/۳ میلیمتر به دست می آید. بنابراین عمر خستگی لوله های فولادی مورد مطالعه به صورت زیر تخمین زده می شود:

$$\int_{a_1}^{a_2} da = \int_{N_1}^{N_2} (0.616 \mu\text{m} / \text{cycle}) dN \Rightarrow a_2 - a_1 = N_2 - N_1 \Rightarrow (11.3 \times 10^{-3} - 0.7 \times 10^{-3})\text{m} = (0.01 \times 10^{-6} \text{m} / \text{cycle})N$$

$$N = 1060000 \text{ cycle} \quad (5)$$

با در دست داشتن سرعت رشد ترک خستگی می توان دامنه فاکتور شدت تنش موثر  $(\Delta K_{eff})$  را با استفاده از معادله پاریس [۱۹] به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{da}{dN} = 1.34 \times 10^{-13} (\Delta K_{eff})^{3.45} \quad (6)$$

$$\Delta K_{eff} = 23.14 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

به منظور یافتن نسبت تنش (R) حاکم بر نمونه های مورد بررسی، از رابطه زیر استفاده شد [۱۷]:

$$\Delta K_{eff} = (0.618 + 0.65R + 0.139R^2) \times \Delta K \quad (7)$$

با جایگذاری مقادیر مربوط به دامنه فاکتور شدت تنش موثر  $(\Delta K_{eff})$  برابر ۲۳/۱۴ مگاپاسکال و دامنه فاکتور شدت تنش  $(\Delta K)$  برابر ۵۱/۶۳ مگاپاسکال در رابطه (۷) مقدار نسبت تنش تقریباً برابر ۰/۲۸ برآورد می شود. با محاسبه دامنه فاکتور شدت تنش، می توان دامنه شدت تنش اعمالی را برای ترکهای بیضی گون (شکل ۱۴ را ببینید) محاسبه نمود [۲۰].

$$\Delta K = \lambda_s \Delta \sigma \sqrt{\pi a / Q} f(\phi)$$

$$\lambda_s = \left[ 1.13 - 0.09 \left( \frac{a}{c} \right) \right] \times \left[ 1 + 0.1(1 - \sin(\phi))^2 \right] \quad (8)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65}; \quad f(\phi) = \left[ \sin^2(\phi) + \left( \frac{a}{c} \right)^2 \cos^2(\phi) \right]^{-1/4}$$

در رابطه (۸)، a و c به ترتیب عرض و طول ترک بیضی شکل می باشد. بر اساس اطلاعات موجود روی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل از سطح شکست در شکل ۵، در کار حاضر، ترک به صورت یک ترک نیم بیضی شکل با نسبت عرض به طول برابر ۰/۲ و زاویه آن با خط افق برابر ۹۰ درجه می باشد.

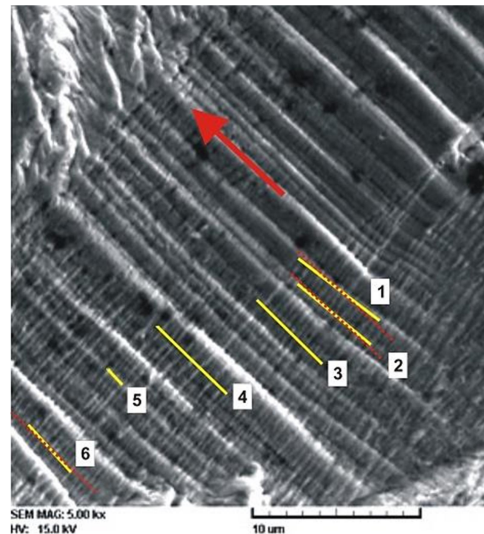
$$[1.13 - 0.09(0.2)] \times [1 + 0.1(1 - \sin(90)^\circ)^2] = 1.112$$

$$+ 1.464(0.2)^{1.65} = 1.1028$$

$$= [\sin^2(90) + (0.2)^2 \cos^2(90)]^{-1/4} = 1 \quad (9)$$

$$= \lambda_s \Delta \sigma \sqrt{\pi a / Q} f(\phi) \Rightarrow 51.63 = 1.112 \times \Delta \sigma \times \sqrt{\pi(4.7 \times 10^{-3})} / 1.1028 \times 1$$

$$: 129 \text{ MPa}$$



شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه شکست خستگی. پیکان قرمز رنگ در این تصویر بیانگر جهت رشد ترک ماکروسکوپی و خطوط زرد رنگ خطوط انتخابی جهت تعیین فاصله متوسط خطوط موج می باشد.

جدول ۱- پارامترهای اندازه گیری شده برای فواصل خطوط موج در موقعیت های مختلف مطابق شکل ۱۳

خط (P)	$L_p(\mu\text{m})$	$n_p$	$S_p(\mu\text{m})$	$\varphi$	$\text{Cos}(\varphi)$
۱	۶/۱	۱۴	۰/۴۳	۷	۰/۹۹۳
۲	۵/۶۶	۱۳	۰/۴۳	۵	۰/۹۹۶
۳	۵/۴۵	۱۳	۰/۴۲	۰	۱
۴	۵/۸۲	۱۳	۰/۴۵	۰	۱
۵	۱/۳	۴	۰/۳۳	۰	۱
۶	۳/۷۸	۱۰	۰/۳۸	۶	۰/۹۹۴
S(average)=۰/۴ $\mu\text{m}$					

بنابراین با فرض آنکه مقدار مدول الاستیک (E) برای فولاد زنگ نزن آستنیتی 316 برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال باشد می توان با استفاده از رابطه (۱)، مقدار  $\Delta K$  را به صورت زیر به دست آورد:

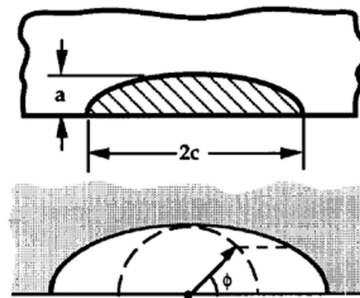
$$\Delta K = 200 * 1000 \text{ MPa} \sqrt{\frac{4 \times 10^{-7} \text{ m}}{6}} = 51.63 \text{ MPa} \quad (3)$$

با توجه به اینکه  $\Delta K$  محاسبه شده در این مطالعه، کم دامنه نمی باشد می توان از ارتباط ساده بین فاصله خطوط موج و عمر خستگی استفاده کرد. از این رو سرعت رشد ترک در لوله های فولادی مورد بررسی طبق رابطه (۴) به صورت زیر تخمین زده می شود [۱۸]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{\text{magnification}} \times \frac{\text{dis tance on the fractograph}}{\text{striation count}} \times \frac{\text{unit dis tance on the fractograph}}{\text{unit dis tance on the fractograph}} \quad (4)$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{5000} \times \frac{6.0}{12} = 0.0001 \text{ mm} / \text{cycle} = 0.01 \mu\text{m} / \text{cycle}$$

- [6] Castro R., De Cadent J.J., *Welding metallurgy of stainless steel and heatresisting steels, 1975, third Edition, Cambridge University Press, Cambridge.*
- [7] Brook J.A., "Microstructural development and solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel welds", *International Materials Reviews, 1991, Vol. 36, No. 1, pp. 16-62.*
- [8] *ASM Handbook, failure analysis and prevention, 2002, Vol. 11, pp. 670-695.*
- [9] Mazur Z., Luna-Ramirez A., Juárez-Islas J.A., A.Campos-Amezcuca, Failure analysis of a gas turbine blade made of Inconel 738LC alloy. *Engineering failure analysis, 2005, Vol. 12, pp. 474-86.*
- [10] Gallardo J.M., Rodríguez J.A., E.J. Herrera, Failure of gas turbine blades. *Wear, 2002, vol. 252, pp.264-268.*
- [11] Kubiak J., Urquiza G., Rodríguez J.A., González G., Rosales I., Castillo G., Nebradt J., Failure analysis of the 150MW gas turbine blades, *Engineering Failure Analysis, 2009, Vol. 16, pp.1794-804.*
- [12] Kermanpur A., Amin H.S., Ziacy-Rad S., Nourbakhshnia N., Mosaddeghfar M., Failure analysis of Ti6Al4V gas turbine compressor blades, *Engineering Failure Analysis, 2008, Vol. 15, pp.1052-1064.*
- [13] Poursacidi E., Babaei A., Behrouzshad F., Arhani M.M., Failure analysis of an axial compressor first row rotating blades, *Engineering Failure Analysis, 2013, Vol. 28, pp. 25-33.*
- [14] B. Fischer, E. Cagliyan, A. Neidel, Metallurgical Failure Investigation of Minor Leakage in a Fuel Oil Return Line of a Combined Cycle Gas Turbine Engine, *Practical Metallography, 2014, Vol. 51, pp. 375-87.*
- [15] Ol'khovskii G.G., Trushechkin V.P., Malakhov S.V., Ageev A.V., Operating Conditions of the V94. 2 Gas-Turbine Unit of the Northwest Cogeneration Power Plant. *Power Technology and Engineering (formerly Hydrotechnical Construction). 2003, Vol. 37, No. 6, pp. 354-358.*
- [16] Batesand R.C., Clark W.G., "Fractography and Fracture Mechanics", *Transactions of the American Society for Metals, 1969, Vol. 62, pp. 380-389.*
- [17] Nedbal I., Siegl J., Kunz J., Lauschmann H., "Fractographic reconstitution of fatigue crack history - PartI, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 31, pp. 164-176, 2008.
- [18] Khan Z., Rauf A., Younas M., Prediction of fatigue crack propagation life in notched members under variable amplitude loading, *Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 6, pp. 365-373, 1997.*
- [19] Schilke P.W., *Advanced gas turbine materials and coatings, General Electric, New York, 2004.*
- [20] Anderson T.L.C., *Fracture mechanics: fundamentals and applications, CRC Press, 1995.*



شکل ۱۴- طرحواره‌ای از یک ترک بیضوی شکل برای محاسبه دامنه شدت تنش در خستگی [۲۰]

با توجه به محاسبات صورت گرفته مطابق رابطه (۹)، دامنه تنش‌های اعمال شده به ناحیه جوشکاری در لوله‌های مورد مطالعه در این کار تحقیقاتی در حدود ۱۲۹ مگاپاسکال تخمین زده می‌شود. از آنجایی که تعداد چرخه‌های خستگی برآورده شده، براساس رابطه (۵) بیشتر از  $10^5$  سیکل کاری می‌باشد، می‌توان بیان داشت که علت اصلی شکست نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه در اثر خستگی پر چرخه می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر علل شکست اتصالات جوش لوله‌های برگشت گازوئیل از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمون‌های ریزساختاری و شکست‌نگاری بر روی لوله‌ها انجام شد و محل جوانه‌زنی ترک و نوع شکست مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بررسی‌های شکست‌نگاری تشکیل دسته‌ای از خطوط موازی روی سطح شکست را نشان می‌دهد که دلالت بر رشد تناوبی ترک و در نتیجه شکست در اثر خستگی را دارد. بر اساس نتایج آنالیز شیمیایی انجام گرفته روی سطح شکست به نظر می‌رسد خوردگی تحت تنش عامل تخریب لوله‌های مورد مطالعه نبوده و لوله‌های مورد مطالعه در اثر خستگی پر چرخه شکسته شده‌اند. به منظور افزایش عمر خستگی لوله‌ها لازم است که تمرکز تنش‌های موجود در ناحیه جوش کاهش یافته و از همه مهمتر ارتعاشات وارد به لوله‌ها مهار گردد.

#### ۵- مراجع

- [1] Hopkins P., *Oil and gas pipelines: Yesterday and Today, Pipeline systems devision, 2007, American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.*
- [2] T.O. Miesner, W.L. Leffler, *Oil and gas pipeline in nanotechnical language, 2003, second Edition, Tulsa, USA.*
- [3] Smith J.J., Effect of composition on the transformation behavior of duplex 316 weld metal, *Journal of Material Science, 1991, Vol. 26, pp. 5025-5036.*
- [4] E. Bayraktar, D. Hügele, J.P. Janse, D. Kaplan, "Evaluation of pipeline laser girth weld properties by Charpy toughness and impact tensile tests", *Journal of Materials Science and Technology, 2004, vol. 147, no. 3, pp. 155-162.*
- [5] Faes K., Dhooge A., Baets P., Afchriht P., New friction welding process for pipeline welds, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, Vol. 13, pp. 982-992.*