



Endurance Limit Determination of Weld Metal of API X65 Gas Pipeline Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Tavid M¹,
Hashemi S.H.^{1*}

How to cite this article

Tavid M, Hashemi S H. Endurance Limit Determination of Weld Metal of API X65 Gas Pipeline Steel. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(01):33-44.

¹ Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

Fax: 97174-34765

Shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: July 06, 2022

Accepted: August 23, 2022

ePublished: January 25, 2023

ABSTRACT

Fatigue failure is the most common type of failure in structures under oscillatory loading. Fatigue damage in steel gas pipelines is very important due to internal pressure fluctuation. A large part of pipelines in oil and gas industry of Iran are made of thermomechanical steel of grade API X65, made by spiral submerged arc welding. In this study, the stress-life curve and fatigue limit of the spiral weld seam of this steel are determined by fatigue tests. For this purpose, 20 test specimens (12 specimens used in the limited fatigue life zone and 8 specimens used to estimate fatigue strength) according to standard. All test samples were cut from an actual spirally welded pipe with 1219mm outside diameter and 14.3 mm wall thickness and were tested on a completely reverse rotating-bending fatigue machine. Statistical analysis of the results was performed by considering the normal logarithmic distribution. Mean curve, confidence interval, and characteristic curve of the results were obtained in the finite fatigue life range and fatigue resistance range using Basquin fatigue model and staircase method, respectively. The mean endurance limit of the seam weld of the tested steel was 258.5 MPa which is located in the conventional range of 0.4 to 0.6 of the ultimate tensile strength of this steel.

Keywords S-N Curve, Endurance Limit, Spiral Seam Weld, API X65 Steel, Gas Transportation Pipeline

CITATION LINKS

1- Fatigue damage evolution and lifetime prediction of welded joints with the... 2- Development of Residual Stress during Manufacturing of Spiral Welded Pipes. 3- Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM. 4- Fatigue crack growth behavior in weld-repaired high-strength low-alloy steel. 5- Fatigue crack growth rates of API X70 pipeline steel in a pressurized hydrogen gas environment. 6- Fatigue life assessment of damaged pipelines under cyclic internal pressure: Pipelines with... 7- Fatigue life prediction for an API 5L X42 natural gas pipeline. 8- Probabilistic fatigue initiation assessment diagram pipe steel X52: influence of hydrogen. 9- Investigation of Seam Weld and Steel Base Metal Fracture Energy of API X65 Pipe Using... 10- High cycle fatigue behaviors of API X65 pipeline steel welded joints in... 11- Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. 12- Experimental evaluation of fracture toughness in spiral seam weld of thermo-mechanical steel. 13- Specification for line pipe, API Specification 5L, 45th Edition. 14- Dissanayake R. Developing a full range S-N curve and estimating cumulative fatigue damage of steel elements. 15- Probabilistic S-N fields based on statistical distributions applied to metallic and composite materials... 16- Determination of Minimum Number of Specimens in S-N Testing. 17- Metallic materials , Fatigue testing , Statistical planning and... 18- Analysis of Selected Mathematical Models of High-Cycle S-N Characteristics. 19- Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and... 20- Fatigue Failure Resulting from Variable Loading. 21- Peterson's Stress Concentration Factors. 22- Determining the Endurance Limit of AISI 4340 Steels in Terms of Different Statistical Approaches. 23- Fatigue behaviour of corrosion pits in X65 steel pipelines. 24- Fatigue analysis of multipass welded joints considering residual stresses. 25- Residual Stress Assessment in API X65 Pipeline Welds by Non-Destructive Instrumented Indentation. 26- Residual stress evaluation in API 5L X65 girth welded pipes joined by friction welding and gas tungsten arc welding. 27- Acoustic Emission Study of Corrosion Fatigue and Fatigue for API 5L X70 Gas Pipeline Steel. 28- Fatigue properties of X80 pipeline steels with ferrite/bainite dual-phase microstructure. 29- Prediction of Fatigue Crack Near-threshold Censored Regressions with Run-out Data.

تعیین حد دوام فلز جوش در لوله فولادی انتقال گاز با گرید ایکس شصت و پنج

محمد تاوید^۱، سیدحجت هاشمی^{۲*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۲ گروه پژوهشی مطالعات لوله و صنایع وابسته دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

شکست خستگی رایج‌ترین نوع شکست در سازه‌های تحت بارگذاری نوسانی است. آسیب خستگی در لوله‌های فولادی انتقال گاز به دلیل نوسانی بودن فشار داخلی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. بخش وسیعی از خط لوله‌های به کار رفته در صنعت نفت و گاز ایران از جنس فولاد ترمومکانیکال با گرید API X65 بوده و اتصال لبه‌های آن به وسیله جوشکاری زیر پودری انجام می‌شود. در این تحقیق، منحنی تنش-عمر و حد دوام درز جوش ماریپیچ این فولاد با انجام آزمایش اندازه‌گیری شده است. به این منظور، تعداد ۲۰ نمونه آزمایشگاهی (۱۲ نمونه جهت به دست آوردن منحنی در ناحیه عمر خستگی محدود و ۸ نمونه جهت برآورد استحکام خستگی) طبق استاندارد از درز جوش ماریپیچ لوله در مقیاس صنعتی با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر تهیه شد و تحت آزمایش خستگی خمشی-چرخشی کاملاً معکوس شونده قرار گرفت. تحلیل آماری نتایج با در نظر گرفتن توزیع نرمال لگاریتمی، انجام شد. منحنی میانگین، بازه اطمینان و منحنی مشخصه نتایج آزمایشگاهی در ناحیه‌های عمر خستگی محدود و استحکام خستگی به ترتیب با استفاده از مدل خستگی باسکوئین و روش پلکانی به دست آمد. مقدار حد دوام میانگین درز جوش فولاد آزمایش شده برابر ۲۵۸/۵ مگاپاسکال به دست آمد که در محدوده مرسوم ۰/۴ تا ۰/۶ استحکام نهایی این فولاد قرار دارد.

کلیدواژه‌ها: منحنی تنش-عمر، حد دوام، درز جوش ماریپیچ، فولاد API X65، لوله فولادی انتقال گاز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

* نویسنده مسئول: Shhashemi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

شکست خستگی شایع‌ترین نوع شکست در مواد و سازه‌های مهندسی در معرض بارگذاری دینامیکی بوده و می‌تواند در اجزاء فولادی و همچنین در جوش‌ها ایجاد شود. بنابراین، ارزیابی خستگی و بررسی تغییرات مقاومت خستگی یک سازه به دلایل مختلفی همچون استفاده از یک طراحی جدید و یا بهینه کردن آن و راستی آزمایی احتمال بقا به منظور جلوگیری از شکست خستگی احتمالی از اهمیت بالایی برخوردار است.

در صنعت نفت و گاز، خط لوله‌های فولادی ایمن‌ترین و به صرفه‌ترین روش انتقال مایعات و سیالات در حجم بالا است. دسته‌ای از فولادهای پرکاربرد در این صنعت، فولادهای ترمومکانیکال در گریدهای مختلف مانند X60، X70 و X80 است. مقاومت و چقرمگی قابل توجه و قابلیت جوشکاری خوب این نوع فولاد، شرایط تحمل فشار بالاتر همراه با کاهش ضخامت لوله را فراهم می‌کند. در صنعت نفت و گاز ایران نیز از این نوع فولاد با گرید خاص API X65 به طور گسترده استفاده می‌شود. در فرآیند

اتصال این لوله‌ها به یکدیگر به وسیله جوشکاری، در اثر غلظت شدید گرمایش و سرماییش متعاقب آن، تنش‌های پسماند در ناحیه‌های گداخت و متأثر از حرارت ایجاد شده که یکپارچگی لوله را تحت تأثیر قرار می‌دهد^[۱]. تنش‌های پسماند می‌تواند به صورت کششی و یا فشاری باشد و اندازه آن گاهی به استحکام تسلیم ماده نزدیک می‌شود^[۲]. مقدار تنش‌های پسماند ایجاد شده زیاد بوده و گاهی به استحکام تسلیم ماده نزدیک می‌شود. وجود تنش‌های پسماند کششی در سازه‌ها اتصالات جوش، می‌تواند به طور قابل توجهی بر رفتار خستگی در حین بارگذاری نوسانی خارجی تأثیرگذار باشد. این تنش‌ها در بارگذاری چرخه‌ای باعث افزایش بیشینه تنش و تنش متوسط شده و در نتیجه کاهش طول عمر خستگی می‌شود^[۳]. به همین دلیل، بررسی آسیب خستگی فلز پایه و فلز جوش این لوله‌های فولادی تحت شرایط نوسانی فشار داخلی از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده و آگاهی کامل از خواص مکانیکی و ریزساختار آن می‌تواند از قطع جریان در اثر تعمیرات غیرضروری یا نشت منجر به آسیب محیطی و ضرر مالی جلوگیری نماید.

در طی سال‌های اخیر دانشمندان به بررسی خواص این فولادها، به ویژه آسیب خستگی، پرداخته‌اند. ژانگ (Zhang) و همکارانش در سال ۲۰۱۱ رفتار رشد ترک خستگی و تأثیرات شرایط مختلف تعمیر جوش بر مشخصات خستگی فولاد کم آلیاژ با مقاومت بالا را بررسی کرده و بیشتر بودن مقاومت خستگی با لایه محافظ نسبت به نبودن لایه محافظ را نشان داده است^[۴]. درکسلر (Drexler) و همکاران در سال ۲۰۱۳ نتایج آزمایش‌های نرخ رشد ترک خستگی و شکست نگاری سطوح شکست خستگی در دو نوع فولاد API X70 را ارائه داده است^[۵]. در تحقیق انجام شده توسط پینهیرو (Pinheiro) و همکاران در سال ۲۰۱۴، عمر خستگی خطوط لوله فولادی فرو رفته در اثر ضربه و تحت فشار داخلی چرخه‌ای ارزیابی شده و منحنی‌های تنش-عمر با توجه به معیارهای مختلف به دست آمده است^[۶]. در سال ۲۰۱۵ هونگ (Hong) و همکاران منحنی‌های تنش-عمر خط لوله گاز فولاد API X42 را با انجام آزمایش خستگی بر روی نمونه‌های صفحه‌ای با ضخامت متفاوت بر طبق استاندارد ASTM به دست آوردند^[۷]. جالوف (Jallouf) و همکاران در سال ۲۰۱۷ نمودار شروع خستگی احتمالی فولاد لوله API X52 را با استفاده از قانون توانی، در محیط و در شرایط هیدروژن، ارزیابی کرده‌اند^[۸]. در سال ۲۰۲۰ هاشمی و همکاران با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی فلز پایه و درز جوش ماریپیچ خط لوله فولاد API X65 نمودار نیرو-جابجایی را به دست آورده و بالاتر بودن انرژی شکست درز جوش ماریپیچ نسبت به فلز پایه را نشان دادند^[۹]. رفتارهای خستگی اتصالات جوشکاری فولاد API X65 در هوا و محلول اشباع سولفید هیدروژن توسط گائو (Gao) و همکاران در سال ۲۰۲۱ بررسی شده و نتایج کاهش عمر

API X65 با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر استخراج شده است. اتصال لبه‌های هر لوله پس از غلتکاری و شکل‌دهی ورق‌های فولادی، با استفاده از روش جوشکاری زیرپودری به صورت مارپیچ از داخل و خارج لوله انجام می‌شود^[11]. شکل ۱ نمایی از سطح مقطع جوش خط لوله را نشان می‌دهد. همچنین، ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی درز جوش مارپیچ به ترتیب توسط هاشمی در مرجع^[11] و فرهی در مرجع^[12] به دست آمده است. این نتایج به همراه مقادیر مشخص شده به وسیله استاندارد API 5L در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. همانطور که در جدول‌ها مشاهده می‌شود، مقادیر عناصر شیمیایی کمتر از بیشینه مقادیر استاندارد بوده و خواص کششی ماده شرایط استاندارد را برآورده کرده است.

میزان سختی و انرژی ضربه شاری میانگین فلز جوش به ترتیب برابر ۲۱۸ ویکرز و ۱۶۳ ژول است. ریزساختار درز جوش از نوع درشت دانه (با اندازه ۲ الی ۴ میکرومتر) بوده و به طور عمده از فریت سوزنی (acicular ferrite) و فازهای مرزدهای شامل فریت ویدمنشتاین و پری-یوتکتوئید (proeutectoid and Widmanstatten ferrite) تشکیل شده است^[11]. همچنین چقرمگی شکست درز جوش برابر ۲۶۵ MPa√m است^[12].

خستگی اتصالات جوشکاری فولاد در محیط حاوی سولفید هیدروژن در مقایسه با هوا نشان داده شده است^[10]. یکی از خواص مهم فولاد API X65 که تا به حال کمتر به آن پرداخته شده، منحنی تنش-عمر و حد دوام فولاد پایه، ناحیه متأثر از حرارت و درز جوش مارپیچ است. با توجه به عدم انجام تحقیق مشابه بر روی درز جوش فولاد API X65 و به دلیل کاربرد گسترده آن در خطوط پر فشار انتقال گاز طبیعی ایران، نتایج به دست آمده از اهمیت صنعتی قابل توجهی برخوردار خواهد بود. در این تحقیق، تعداد ۲۰ نمونه از درز جوش مارپیچ براساس استاندارد ISO 1143 تهیه شده و تحت آزمایش خستگی بار-کنترلی خمشی-چرخشی قرار گرفته است. به دلیل پراکندگی در نتایج آزمایش خستگی، ارزیابی آماری داده‌ها و استفاده از مدل خستگی مناسب ضرورت دارد. با انجام تحلیل آماری، منحنی تنش-عمر و حد دوام قابل قبول درز جوش مارپیچ خط لوله API X65 به دست آمده است. منحنی تنش-عمر با استفاده از مدل خستگی باسکوئین (Basquin) و براساس استانداردهای ISO 12107 و ASTM E-739 و حد دوام آن به وسیله روش پلکانی و برطبق استاندارد ISO 12107 تخمین زده شده است.

۲- خواص ماده مورد آزمایش

در این تحقیق جهت انجام آزمایش خستگی، نمونه‌های آزمایشگاهی از خط لوله انتقال گاز از جنس فولاد ترمومکانیکال

جدول ۱) ترکیب شیمیایی درز جوش مارپیچ لوله فولادی API X65 و مقادیر مشخص شده در استاندارد API 5L^[13,11]

عنصر	آهن	کربن	منگنز	فسفر	سولفور	تیتانیوم	سیلیسیوم	نیوبیوم	کروم	مولیبدن	مس	آلومینیوم
درصد وزنی	پایه	۰/۰۷۳	۱/۳۷	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۲۴۶	۰/۰۲۸	۰/۱۲۸	۰/۰۱۷	۰/۰۳۱	۰/۰۱۴
بیشینه API 5L X65	---	۰/۱۲	۱/۶	۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	---	۰/۴۵	---	---	---	---	---
استاندارد سیم EA2	---	۰/۰۵ - ۰/۱۷	-۱/۳۵ ۰/۹۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	---	۰/۲	---	---	۰/۴۵ - ۰/۶۵	۰/۳۵	---

منحنی تنش-عمر فلز جوش، برشکاری و اترجت به گونه‌ای انجام شده است که درز جوش در ناحیه‌های طول اتصال (gauge length) و تمرکز تنش قرار گرفته و نمونه تحت آزمایش خستگی از ناحیه جوش شکسته شود (شکل ۱پ). با توجه به نوع آزمایش خستگی خمشی-چرخشی و به منظور قابل استناد بودن نتایج آن، این قطعات مطابق با اندازه‌های مورد نظر در استاندارد ISO 1143، مخصوص نمونه‌های خستگی خمشی-چرخشی یک سر گیردار، تحت ماشین‌کاری قرار گرفته است. کیفیت سطح نمونه‌ها به طور گسترده بر نتایج آزمایش تأثیرگذار بوده و به طور معمول به وسیله زبری میانگین تعیین می‌گردد. زبری سطح، برآمدگی و فرو رفتگی‌های سطح نمونه‌ها می‌تواند به عنوان محل تمرکز تنش محسوب شده و باعث جوانه‌زنی سریع‌تر ترک در حین فرآیند خستگی شود. به همین دلیل، نمونه‌ها جهت داشتن بهترین کیفیت سطح و تolerانس مورد نظر در نقشه، سنگ‌زنی شده و زبری سطح میانگین نمونه‌ها با استفاده از آزمایشگاه معتبر

جدول ۲) خواص مکانیکی درز جوش مارپیچ لوله فولادی API X65 و مقادیر مشخص شده در استاندارد API 5L^[12,13]

فلز جوش (نتایج آزمایشگاهی)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)
۵۴۸	۶۲۴	
۴۵۰	۵۳۵	
۶۰۰	۷۶۰	

۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از فرآیند جوشکاری، قسمتی از خط لوله شامل درز جوش با استفاده از هوا برش در فاصله‌ای مناسب از ناحیه آزمایش برش داده شده تا از آثار حرارتی بر روی خواص نمونه‌ها جلوگیری شود. به منظور ماشین‌کاری و عدم به وجود آمدن اثر حرارتی در نمونه‌ها، تعداد ۲۰ عدد قطعه خام از قسمت جدا شده به وسیله و اترجت (waterjet) بریده شده است. جهت به دست آوردن

در این رابطه F ، نیروی اعمالی، a ، طول بازوی گشتاور، d ، قطر کوچک نمونه و k ، ضریب تمرکز تنش است. با شروع آزمایش و چرخش نمونه، تعداد چرخه به وسیله دورسنج دستگاه ثبت می‌شود. آزمایش تا شکست کامل نمونه و یا عبور از تعداد چرخه تعیین شده ادامه خواهد یافت. لازم به ذکر است که به منظور قابل مقایسه بودن نتایج آزمایش خستگی، شکست باید در ناحیه طول اتصال و محل شروع شعاع رکورد نمونه (ناحیه فلز جوش) اتفاق بیفتد؛ زیرا تنش بیشینه در این ناحیه به وجود می‌آید. اگر نمونه در مکانی غیر از این ناحیه (به عنوان مثال داخل گیره) دچار شکست شود، نتیجه آزمایش جهت بررسی رفتار خستگی غیر قابل ارائه خواهد بود. نحوه بارگذاری، قرارگیری نمونه در دستگاه، محل تکیه‌گاه، ناحیه‌های طول اتصال و تمرکز تنش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) دستگاه آزمایش خستگی تیر چرخان مور ساخته شده توسط محققان مقاله حاضر، محل نصب نمونه و نحوه بارگذاری با استفاده از کشش فنر

رایج‌ترین نوع تحلیل جهت توصیف رفتار خستگی براساس روش تنش- عمر است که با آزمایش خستگی نمونه‌های کافی به دست می‌آید^[14]. این منحنی به عنوان تابعی از پارامترهایی معرفی می‌شود که رابطه بین دو متغیر اصلی سطح تنش، S ، و تعداد چرخه، N ، را تشکیل می‌دهد. متغیرهای سطح تنش و تعداد چرخه به ترتیب به عنوان متغیرهای مستقل و وابسته شناخته شده و با استفاده از تبدیل لگاریتمی به خوبی قابل توصیف است^[15]. از آنجایی که این منحنی به صورت تجربی تعیین شده، به شدت متأثر از پراکندگی داده، احتمال، سطح اطمینان، دامنه تنش و شرایط آزمایش بوده و دارای دو بخش عمر خستگی محدود و استحکام خستگی (حد دوام) است. نحوه به دست آوردن نمودار در هر بخش با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

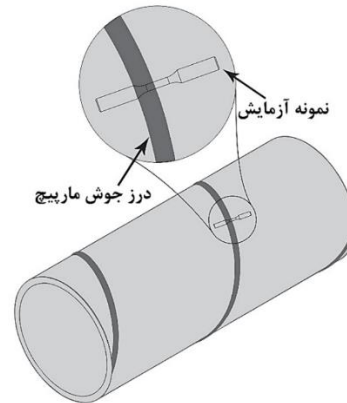
۴-۱- ناحیه عمر خستگی محدود

در این ناحیه، نمونه‌ها به طور تصادفی انتخاب شده، در سطوح مختلف تنش مورد آزمایش قرار گرفته و تعداد دور تا شکست و یا عدم شکست آن‌ها ثبت می‌شود. به طور کلی منحنی تنش- عمر در ناحیه عمر خستگی محدود به تعداد چرخه‌های تنش از ۱۰۴ تا ۱۰۶ چرخه مربوط می‌شود^[16]. پراکندگی ذاتی در آزمایش

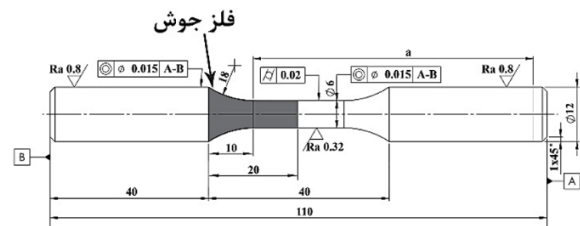
اندازه‌گیری شده است. این مقدار برابر ۰/۲۷۵ میکرومتر به دست آمده است. هندسه و ابعاد نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱) شماتیک لوله فولادی، (الف) هندسه جوش، (ب) نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها از درز جوش، (پ) هندسه و ابعاد نمونه آزمایش خستگی خمشی- چرخشی مطابق استاندارد ISO 1143 (اندازه‌ها به میلی‌متر).

۴- نحوه انجام آزمایش و تحلیل نتایج

در این تحقیق از دستگاه آزمایش خستگی خمشی- چرخشی تیر یکسرگیردار چرخان مور استفاده شده است. این دستگاه، که در شکل ۲ نشان داده شده است، توسط نویسندگان تحقیق ساخته شده و مجهز به لودسل (loadcell) و نرم افزار رایانه‌ای جهت ثبت دقیق میزان بار اعمالی، تعداد چرخه، درصد خطای گشتاور و نمودار تغییرات تنش در حین آزمایش است. یکی از دو انتهای نمونه در داخل گیره و انتهای دیگر در داخل یاتاقان تنظیم شده و به انتهای داخل یاتاقان نیروی عمودی وارد می‌گردد. بار اعمالی با توجه به بازوی خمشی، تولید یک ممان خمشی در نمونه می‌کند. با توجه به ثابت بودن ممان و چرخش نمونه، یک تنش خمشی کاملاً معکوس شونده با نسبت تنش ۱- در نمونه ایجاد خواهد شد. رابطه (۱) بیانگر تنش به وجود آمده در نمونه است.

$$S = k \cdot \frac{32a}{\pi d^3} \cdot F \quad (1)$$

می‌آید^[16]. در غیر این صورت، اولین نمونه آزمایش در سطحی نزدیک به استحکام خستگی میانگین تخمینی (نصف استحکام نهایی ماده مورد آزمایش) در نظر گرفته می‌شود^[20]. با توجه به شکست و یا عدم شکست نمونه، سطح تنش برای نمونه بعدی به اندازه گام تنش به ترتیب کاهش و یا افزایش خواهد یافت. بنابراین، سطح تنش هر آزمایش متوالی براساس خروجی آزمایش قبلی آن است. به طور معمول، گام تنش ثابت و نزدیک به انحراف استاندارد در ناحیه عمر خستگی محدود در نظر گرفته می‌شود. سپس استحکام خستگی می‌تواند با استفاده از معادلات آماری به دست آید.

۴-۳- تحلیل آماری

نتایج آزمایش خستگی در صفحه مختصات نیمه لگاریتمی (جهت نمایش بهتر منحنی تنش-عمر) که محور x عمر خستگی در مقیاس لگاریتمی و محور y سطوح تنش مربوطه می‌باشد، مشخص می‌گردند. با توجه به پراکندگی موجود در نتایج آزمایش خستگی، داده‌های حاصل شده مورد تحلیل آماری قرار می‌گیرد. هدف از تحلیل داده‌های آزمایش خستگی، تخمین منحنی تنش-عمر در ناحیه عمر خستگی محدود و تعیین استحکام خستگی داده‌های آزمایش است. تحلیل آماری هرکدام از این ناحیه‌ها با استفاده از روابط استانداردهای ISO 12107 و ASTM E-739 انجام می‌شود. با توجه به اهداف آزمایش، هرکدام از این ناحیه‌ها به صورت جداگانه بررسی آماری شده است.

۵- نتایج

نمونه‌های تهیه شده از فلز جوش خط لوله فولاد API X65 تحت آزمایش خستگی خمشی-چرخشی قرار گرفته و با استفاده از تحلیل آماری داده‌های به دست آمده از آزمایش، منحنی میانگین تنش-عمر و استحکام خستگی و منحنی مشخصه آن تخمین زده شده است. در ادامه نتایج دو بخش عمر خستگی محدود و استحکام خستگی به طور کامل شرح داده شده است.

۵-۱- ناحیه عمر خستگی محدود

تعداد ۲۰ نمونه از درز جوش مارپیچ فولاد API X65 تهیه شده و آزمایش خستگی کاملاً معکوس شونده بر روی دو دسته نمونه جداگانه برای عمر خستگی محدود و استحکام خستگی در فرکانس ۵۰ هرتز و در دمای محیط انجام شده است. ۱۲ نمونه در ناحیه عمر خستگی محدود، به منظور قرار گرفتن در هر دو بازه طراحی و قابلیت اعتماد (درصد تکرار ۷۵ درصد) در ۳ سطح تنش با تکرار ۴ نمونه در هر سطح، آزمایش شده است. بالاترین و پایین‌ترین سطح تنش به ترتیب ۵۶۱ مگاپاسکال (۹۰ درصد استحکام نهایی) و ۳۷۴ مگاپاسکال (۶۰ درصد استحکام نهایی) با فاصله بین سطوح ۹۳/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. همچنین، میزان تمرکز تنش با توجه به شعاع رکورد و اندازه قطره‌های بزرگ و کوچک نمونه بر طبق مرجع [۲۱] برابر ۱/۱ است.

خستگی، به ویژه در سطوح تنش پایین‌تر، به این معنی است که تعداد مناسب سطوح تنش و تعداد تکرار آزمایش در هر سطح از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. کمترین تعداد نمونه مورد نیاز در منحنی تنش-عمر به نوع برنامه آزمایش و در دسترس بودن ماده بستگی دارد. براساس استاندارد ISO 12107 پارامتر سطح اطمینان بر روی تعیین تعداد نمونه در هر سطح تأثیرگذار بوده و به منظور اهداف قابلیت اعتماد و طراحی، بیش از ۹۵ درصد توصیه نمی‌شود^[17]. همچنین، پارامتر تأثیرگذار دیگری به عنوان احتمال شکست، P، وجود دارد که جهت تعیین منحنی میانگین تنش-عمر، ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. منحنی میانگین تنش-عمر (خط مرکزی) به معنی این است که ۵۰ درصد نمونه‌های شکسته بالای این منحنی و ۵۰ درصد زیر آن قرار دارد. با توجه به سطح اطمینان و احتمال شکست مورد نظر تعداد نمونه‌های آزمایش در هر سطح تنش مشخص می‌گردد. این استاندارد تعداد حداقل ۸ نمونه جهت انجام آزمایش خستگی (۲ نمونه در ۴ سطح تنش) با گام تنش برابر را پیشنهاد می‌دهد^[17]. همچنین، بر طبق استاندارد ASTM E-739 حداقل تعداد کلی نمونه آزمایش خستگی با هدف طراحی و قابلیت اعتماد، ۱۲ تا ۲۴ عدد پیشنهاد شده است. تعداد سطوح تنش و تکرار آزمایش در هر سطح نیز با استفاده از درصد تکرار، PR، در رابطه (۲) و با توجه به بازه درصد تعیین شده، مشخص می‌شود^[18].

$$\%PR = 1 - 100(1 - \frac{J}{n}) \quad (2)$$

در این رابطه n، تعداد کل نمونه و J، تعداد سطوح تنش است. بازه درصد تکرار به منظور طراحی و قابلیت اعتماد به ترتیب ۵۰ الی ۷۵ و ۷۵ الی ۸۸ درصد تعیین شده است^[19].

۴-۲- ناحیه استحکام خستگی

در بعضی مواد همچون فولادها با کاهش سطح تنش، خاصیتی از ماده به عنوان حد دوام مطرح می‌شود. حد دوام میزان تنش است که در سطح تنش پایین‌تر از آن ترکی در ماده ایجاد نشده و سازه دچار شکست نمی‌شود. در این سطح تنش، سازه به اصطلاح دارای عمر بینهایت خواهد بود^[20]. برای تعیین استحکام خستگی یا حد دوام ماده مورد آزمایش، از روش پلکانی استفاده می‌شود. این روش یک تخمین از حد دوام با در نظر گرفتن طبیعت آماری آن فراهم کرده و مهمترین مزیت آن تمرکز خودکار بر روی میانگین به شکلی قابل قبول است که به عنوان روش بالا و پایین نیز شناخته می‌شود^[17]. در این روش، تخمین کلی استحکام خستگی میانگین و انحراف استاندارد مرتبط باید از قبل مشخص شده باشد. اگر در ۳ سطح تنش در ناحیه عمر خستگی محدود نمونه‌ای دچار شکست نشود، اولین سطح تنش یا تخمین اولیه میانگین مقاومت خستگی به منظور شروع آزمایش پلکانی با استفاده از میانگین این سطوح تنش به دست

نمونه‌های آزمایش و با استفاده از تحلیل احتمال شکست مرتبه‌ای نمودار احتمال شکست برحسب عمر خستگی در مقیاس نیمه لگاریتمی به همراه گرفتن رگرسیون خطی از داده‌ها در شکل ۴ ترسیم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، نتایج حاصل شده تطبیق خیلی خوبی با رگرسیون خطی داشته و اغلب داده‌ها بر روی منحنی عبوری قرار گرفته است.

تنها ۳ مورد از داده‌های عمر خستگی در فاصله کمی از رگرسیون خطی قرار گرفته که نشان دهنده پراکندگی در نتایج آزمایش است. به همین دلیل، در هر سطح تنش با استفاده از معیار انحراف استاندارد میزان پراکندگی داده‌ها و فاصله از میانگین بررسی شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، این اعداد نشان دهنده میزان پراکندگی نسبت به میانگین در هر سطح تنش به صورت جداگانه است که سطح تنش ۴۶۸ مگاپاسکال کمترین پراکندگی با توجه به مقدار انحراف استاندارد را دارا است. همچنین بیشترین انحراف استاندارد مربوط به سطح ۳۷۴ مگاپاسکال بوده که بیانگر این واقعیت است که با کاهش سطح تنش میزان پراکندگی و فاصله از میانگین افزایش می‌یابد. با توجه به انحراف استاندارد محاسبه شده، فاصله ۳ داده عمر خستگی در شکل ۴ خطای ناچیزی محسوب شده و شرط خطی

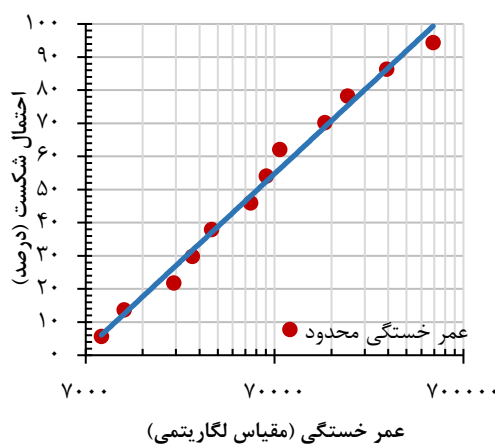
نیروی اعمالی به انتهای نمونه با توجه به تنش تعیین شده و مقدار تمرکز تنش محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است، بیشینه خطای قابل قبول گشتاور خمشی اعمالی به نمونه براساس استاندارد ISO 1143، ۱/۳ درصد است. مقدار محاسبه شده این خطا در ماشین آزمایش ۰/۵ درصد بوده و در محدوده قابل قبول قرار گرفته است. محدودیت طول عمر بینهایت در همه آزمایش‌ها در تعداد چرخه $10^6 \times 1/5$ تنظیم شده است. جدول ۳ مقادیر مربوط به شماره نمونه، سطح تنش، لگاریتم سطح تنش، نتایج تعداد چرخه تا شکست و لگاریتم آن در ناحیه عمر خستگی محدود را نشان می‌دهد.

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، در همه نمونه‌ها شکست اتفاق افتاده است. شکل ۳ نمایی از نمونه‌های شکسته شده در هر سه سطح تنش را نشان می‌دهد که شکست در همه نمونه‌ها در ناحیه طول اتصال (ناحیه ذوب فلز جوش) اتفاق افتاده است.

یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین توزیع‌های احتمال آماری استفاده شده برای مواد فلزی در زمینه تحلیل نتایج عمر خستگی جهت تخمین منحنی میانگین، بازه اطمینان و منحنی مشخصه تنش-عمر توزیع نرمال لگاریتمی است [15]. جهت بررسی برقراری توزیع نرمال، پس از مرتب‌سازی صعودی نتایج عمر خستگی

جدول ۳) نتایج آزمایش خستگی فلز جوش در ناحیه عمر خستگی محدود در ۳ سطح تنش با تکرار ۴ نمونه در هر سطح

سطح تنش (پاسکال)	۵۶۱×۱۰ ^۶	۴۶۸×۱۰ ^۶	۳۷۴×۱۰ ^۶
لگاریتم سطح تنش	۸/۷۵	۸/۶۷	۸/۵۷
شماره آزمایش	۱، ۲، ۳	۴، ۵، ۶	۷، ۸، ۹
شماره نمونه	۵، ۹، ۱۶	۱۰، ۱۹، ۳	۱۲، ۱۳، ۱۵
عمر خستگی (تعداد چرخه)	$2/5 \times 10^6$ ، 2×10^6 ، $1/1 \times 10^6$	$5/2 \times 10^6$ ، $7/4 \times 10^6$ ، $6/3 \times 10^6$	$4/1 \times 10^6$ ، $1/2 \times 10^6$ ، $2/4 \times 10^6$
لگاریتم عمر خستگی	۴/۴۱، ۴/۳۱، ۴/۰۵	۴/۷۲، ۴/۸۷، ۴/۸	۵/۲۳، ۵/۶۸، ۵/۱۱
میانگین لگاریتم عمر خستگی	۴/۱۷۴	۴/۷۲۵	۵/۳۶۶
انحراف استاندارد عمر خستگی	۰/۱۲۹	۰/۰۹	۰/۱۴۵



شکل ۳) نمایی از نمونه‌های آزمایش شده در سطوح مختلف تنش فلز جوش (شکل ۴) نمودار احتمال شکست مرتبه‌ای بر حسب عمر خستگی فلز جوش لوله فولادی API X65 در ناحیه عمر محدود خستگی

استاندارد جهت طراحی و شرایط قابل اعتماد سطح اطمینان ۹۵ درصد را پیشنهاد می‌دهد؛ به این معنی که ۹۵ درصد نتایج در بازه اطمینان (بازه پراکندگی) قرار می‌گیرد. با توجه به این سطح اطمینان و درجه آزادی ۱۰، ضریب توزیع استودنت تی (student t, T)، برابر ۲/۲۲۸۱ است. در نتیجه بازه اطمینان ثابت‌های A و B به ترتیب $۶۳/۳۷ \pm ۱۵/۷۵$ و $۶/۷۶۵ \pm ۱/۸۲$ به دست آمده است. به عبارت دیگر جهت قرار گرفتن ۹۵ درصد نتایج در بازه اطمینان ثابت‌های تخمینی A و B به ترتیب از مقادیر ۴۷/۶۲ تا ۷۹/۱۲ و ۸/۸۵۸ تا ۴/۹۴۵ قابل تغییر است. همچنین، با سطح اطمینان بیان شده و درجات آزادی ۷۱=۲ و ۷۲=۱۰، ثابت Fp برابر ۴/۱۰۲۸ بوده و بازه اطمینان منحنی تنش- عمر در ناحیه عمر خستگی محدود به صورت معادله (۴) تعیین شده است. لازم به ذکر است که تمامی بازه‌های اطمینان تعریف شده برای ثابت‌های معادله و منحنی تنش- عمر به صورت ضربی از انحراف استاندارد تعریف شده‌اند که نشان دهنده این است که کاهش انحراف استاندارد و پراکندگی باعث کوچکتر شدن بازه اطمینان می‌شود.

$$\hat{x} = 63.37 - 6.765y \pm 0.52\sqrt{0.0622 + 12(y - 8.66)^2} \quad (۴)$$

منحنی‌های خستگی در هر احتمال شکست می‌تواند به وسیله انحراف استاندارد تعیین گردد. واضح است که داشتن احتمال شکست پایین‌تر قابلیت اعتماد بالاتری از داده‌ها را به دنبال دارد. از دیدگاه مهندسی حاشیه ایمنی و محافظه‌کارانه در همه ناحیه‌های تنش- عمر با فاصله ۲ تا ۳ انحراف استاندارد از منحنی میانگین (احتمال شکست ۵۰ درصد) پایه‌گذاری می‌شود^[۱۵]. در سطح اطمینان مورد نظر، احتمال شکست ۱۰ درصد و درجه آزادی ۱۰، ضریب حد تلورانس یک طرفه، $k(۱۰, ۰/۹۵, ۱۰)$ برابر ۲/۲۷۵ بوده و در نتیجه معادله (۵) نشان دهنده تخمین حد پایین منحنی تنش- عمر، یا به عبارت دیگر منحنی مشخصه طراحی خستگی در این ناحیه است. این منحنی به خوبی در بازه دو تا سه انحراف استاندارد پایین‌تر از منحنی میانگین قرار گرفته و در شرایط طراحی و قابلیت اعتماد استفاده می‌شود. هر دو معادله بازه اطمینان و منحنی مشخصه در شکل ۵ رسم شده است.

$$\hat{x} = 63.37 - 6.765y - 0.54\sqrt{0.046 + 12(y - 8.66)^2} \quad (۵)$$

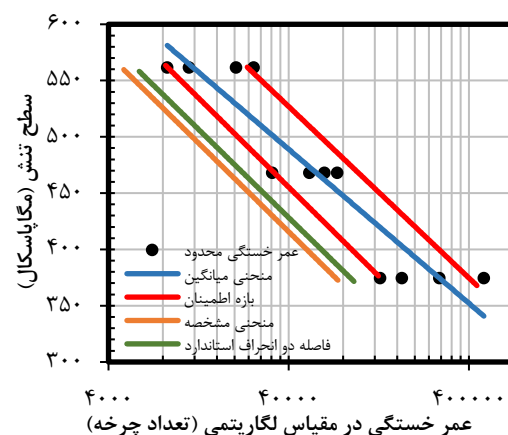
در این تحقیق از مدل خطی باسکوئین در سه سطح جهت انجام تنش آزمایش خستگی و تخمین منحنی میانگین استفاده شده است. در شرایطی که تعداد سطح تنش و نمونه‌های آزمایش در هر سطح به ترتیب بزرگتر یا مساوی ۳ و بیشتر از ۱ باشد، مدل خطی استفاده شده باید براساس استاندارد مورد راستی آزمایی قرار گیرد. با در نظر گرفتن درجات آزادی ۷۱=۱ و ۷۲=۹، مقدار ضریب F برابر ۵/۱۱۷۴ است. با انجام محاسبات مقدار ۰/۱۰۳ جهت راستی آزمایی به دست آمده که از مقدار ضریب F کمتر

بودن نمودار احتمال برقرار است. در نتیجه عمر خستگی از توزیع نرمال لگاریتمی پیروی کرده و معادلات این توزیع بر روی داده‌های آزمایش قابل اعمال است.

تحلیل روابط تنش- عمر در این ناحیه با استفاده از مدل خطی باسکوئین انجام می‌شود که ثابت‌های A و B به ترتیب عرض از مبدأ و شیب منحنی تنش- عمر است.

$$\log N = A + B \log S \quad (۳)$$

جهت استفاده از تحلیل برازش خطی نتایج آزمایش خستگی و به منظور تخمین منحنی میانگین تنش- عمر در ناحیه عمر خستگی محدود (احتمال شکست ۵۰ درصد)، میانگین لگاریتم تنش و لگاریتم عمر خستگی به ترتیب برابر ۸/۶۶۴ و ۴/۷۵۵ به دست آمده و ثابت‌های تخمینی $\hat{A}$ و $\hat{B}$ به ترتیب ۶۳/۳۷ و ۶/۷۶۵ تعیین شده‌اند. با استفاده از پارامترهای به دست آمده رابطه نهایی لگاریتم عمر خستگی محدود بر حسب لگاریتم سطح تنش به صورت $y = 765/6 - 37/63x$ تعریف شده و انحراف استاندارد عمر خستگی و استحکام خستگی به ترتیب برابر ۰/۲۰۳ و ۰/۰۳ به دست آمده است. مقدار انحراف استاندارد عمر خستگی به دست آمده نسبت به انحراف استاندارد در هر سطح تنش مقدار بیشتری را به خود اختصاص داده که بیانگر بیشتر بودن که میزان پراکندگی داده‌ها و فاصله از منحنی میانگین نسبت به هر سطح تنش به صورت جداگانه است. دلیل این تفاوت، اختلاف انحراف استاندارد سطوح تنش نسبت به یکدیگر است. نمودار نقاط تنش بر حسب عمر خستگی و منحنی میانگین در مقیاس نیمه لگاریتمی در شکل ۵ نشان داده شده است



شکل ۵) منحنی تنش- عمر میانگین، بازه اطمینان و منحنی مشخصه فلز جوش لوله فولادی API X65 در ناحیه عمر خستگی محدود

بیشترین بازه عمر خستگی در پایین‌ترین سطح تنش (۳۷۴ مگاپاسکال) مشاهده شده است که با توجه به جدول ۳ نشان دهنده بیشترین پراکندگی است.

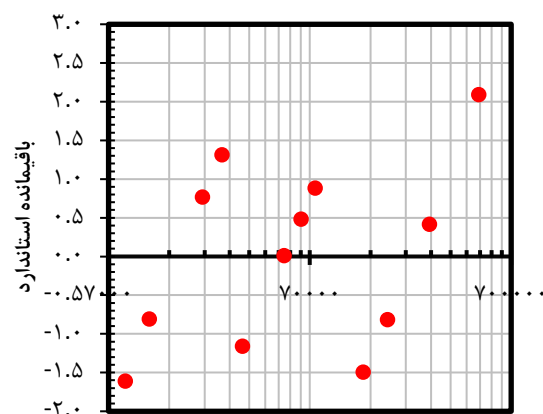
منحنی میانگین در احتمال شکست ۵۰ درصد رسم شده است. با توجه به پراکندگی در نتایج آزمایش خستگی، بازه اطمینانی براساس سطح اطمینان تعریف می‌شود. به طور معمول،

از شکل‌های ۵ و ۶ استنباط می‌شود که رابطه خطای استاندارد و باقیمانده استاندارد به صورت مستقیم است؛ بدین معنا که هرچه فاصله داده تا منحنی میانگین بیشتر باشد مقدار قدر مطلق باقیمانده استاندارد نیز بیشتر خواهد بود. بیشترین مقادیر باقیمانده استاندارد مربوط به نمونه شماره ۴ به مقدار ۲/۰۹ در پایین‌ترین سطح تنش (۳۷۴ مگاپاسکال) است. با وجود قرار گرفتن این داده در خارج از بازه اطمینان (شکل ۵)، به دلیل کمتر از مقدار حدی بودن باقیمانده استاندارد (شکل ۶)، به عنوان داده قابل قبول در مدل برازش قابل استفاده می‌باشد.

۵-۲- ناحیه استحکام خستگی

در این ناحیه جهت به دست آوردن حد دوام، ۸ نمونه تحت آزمایش پلکانی قرار گرفته است. به این دلیل که در ناحیه عمر خستگی محدود در همه نمونه‌ها شکست اتفاق افتاده، سطح تنش اولیه آزمایش پلکانی به وسیله تقریب اولیه و با توجه به بازه بین سطوح تنش در ناحیه عمر خستگی محدود (۹۳/۵ مگاپاسکال) تعیین شده است. این تقریب در مقدار ۲۸۱ مگاپاسکال (۰/۴۵ استحکام نهایی) تعیین شده که نزدیک به تخمین اولیه (۵۰ درصد استحکام نهایی) در فلزات با استحکام نهایی کمتر از ۱۴۰۰ مگاپاسکال است [20]. میزان افزایش یا کاهش سطح تنش در این آزمایش نیز ۳۰ مگاپاسکال، نزدیک به انحراف استاندارد استحکام خستگی در ناحیه عمر خستگی محدود، در نظر گرفته شده است. با فرض معلوم بودن انحراف استاندارد، نتایج حاصل شده از آزمایش خستگی به وسیله روش پلکانی اصلاح شده شامل سطوح تنش، شماره نمونه، تعداد چرخه و لگاریتم عمر خستگی در جدول ۴ نشان داده شده است. این نتایج به ترتیب انجام آزمایش شماره‌گذاری شده و شکست و یا عدم شکست نمونه‌ها نیز نشان داده شده است. علامت «O» بیانگر عدم شکست و علامت «x» نشان دهنده شکست نمونه است. با توجه به اطلاعات جدول ۴، مقدار تنش‌های حد دوام برابر ۲۵۸/۵ مگاپاسکال محاسبه شده است. همچنین، حد کمینه استحکام خستگی فلز جوش با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵ درصد، احتمال شکست ۱۰ درصد، درجه آزادی ۷ و مقدار ۲/۵۸۲ مربوط به ضریب $k(10,0/95,6)$ برابر با ۱۸۱ مگاپاسکال به دست آمده است.

بوده و مدل خطی استفاده شده به منظور برازش داده‌های آزمایش قابل قبول است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، تعدادی از داده‌های به دست آمده از آزمایش بر روی مرز بازه اطمینان قرار گرفته است. به همین دلیل، تحلیل قابلیت اعتماد و بررسی عدم اریب بودن منحنی میانگین و جلوگیری از انحراف آن ضروری است. به طور کلی، قابلیت اعتماد برای احتمال داده‌های بدون شکست در شرایط عمر واقعی در نظر گرفته می‌شود. رابطه بین عمر خستگی و قابلیت اعتماد منفی بوده و افزایش عمر خستگی در حین عملکرد باعث کاهش قابلیت اعتماد اجزاء و افزایش احتمال شکست خستگی می‌شود [22]. به همین منظور، ابتدا خطای استاندارد، میانگین مربعات خطا و قدرت نفوذ داده‌های آزمایش و سپس باقیمانده استاندارد هر داده به دست آمده و بر حسب عمر خستگی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: نمودار باقیمانده استاندارد نتایج آزمایش خستگی فلز جوش لوله فولادی API X65 بر حسب عمر خستگی محدود

در این شکل مقدار میانگین بر روی مقدار صفر قرار گرفته و مقادیر باقیمانده‌های استاندارد هر داده از حدود ۲- تا ۲/۵ متغیر است. عمرهای خستگی کمتر و بیشتر از منحنی میانگین به ترتیب در ناحیه‌های منفی و مثبت نمودار قرار گرفته است. داده‌های هر سطح تنش در این شکل با توجه به عمر خستگی در راستای خط شیب‌دار پشت سر هم قرار گرفته است. قدر مطلق باقیمانده استاندارد هر داده آزمایش کمتر از ۳ بوده و این داده‌ها به عنوان مقادیر خارج از محدوده محسوب نمی‌شوند.

جدول ۴: نتایج آزمایش خستگی فلز جوش لوله فولادی API X65 به روش پلکانی در پنج سطح تنش در ناحیه استحکام خستگی

سطح تنش (پاسکال)	۲۸۱×۱۰ ^۶	۳۱۱×۱۰ ^۶	۲۸۱×۱۰ ^۶	۳۱۱×۱۰ ^۶	۲۸۱×۱۰ ^۶	۳۱۱×۱۰ ^۶	۲۸۱×۱۰ ^۶	۱۹۱×۱۰ ^۶
لگاریتم سطح تنش	۸/۴۵	۸/۴۹	۸/۴۵	۸/۴۹	۸/۴۵	۸/۴۹	۸/۴۵	۸/۲۸
شماره آزمایش (به ترتیب روش پلکانی)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
شماره نمونه	۷	۱	۱۱	۲	۱۷	۱۸	۶	۱۴
عمر خستگی (تعداد چرخه)	۱/۵×۱۰ ^۶	۵/۳×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶	۲/۶×۱۰ ^۵	۶/۸×۱۰ ^۵	۴/۹×۱۰ ^۵	۵/۷×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶
لگاریتم عمر خستگی	۶/۱۸	۵/۷۲	۶/۱۸	۵/۴۳	۵/۸۳	۵/۷	۵/۷۶	۶/۱۸
شکست/ عدم شکست نمونه	O	X	O	X	X	X	X	O

سازه‌های جوش بسیار پیچیده است؛ زیرا پدیده‌های فیزیکی مانند گرما، الکتریسیته یا کار مکانیکی در آن شرکت می‌کند [24]. تنش پسماند فلز جوش این فولاد در مرجع [25] برابر ۲۰۰ مگاپاسکال به صورت کششی به دست آمده که بیانگر تأثیر منفی آن بر استحکام خستگی فلز جوش است. همچنین، ریزساختار جوش نقش کلیدی در رشد ترک خستگی دارد. ناحیه گداخت در طی فرآیند جوشکاری ذوب شده و دوباره منجمد می‌شود. وجود فریت سوزنی و فازهای مرزانه‌ای در ریزساختار باعث استحکام کششی و سختی بالای فلز جوش شده و فاز مرزانه‌ای ناحیه ذوب امکان رشد ترک را فراهم می‌کند [11]. لازم به ذکر است که ترک در فازهای سخت‌تر فولاد راحت‌تر رشد می‌کند [26]. ناهمگنی ریزساختار در مناطق مختلف اتصال جوش می‌تواند به تغییر خواص مکانیکی و توزیع کرنش متفاوت تحت تنش چرخه‌ای منجر شود [10]. به علاوه، تخلخل‌ها به دلیل ایجاد تمرکز تنش یکی از مکان‌های بالقوه برای هسته‌سازی و شروع ترک خستگی هستند. کنترل ویژگی تخلخل در طی فرآیند جوشکاری دشوار بوده و تمایز اثر آن از سایر عوامل در آزمایش چالش برانگیز است. منافذ داخلی اتصال جوش به حبس گازهای محافظ، هیدروژن و بخارهای فرآیند نسبت داده می‌شود. با وجود تخلخل، سطح مقطع مؤثر جوش کاهش یافته که باعث افزایش سطح تنش میانگین در این ناحیه می‌شود [1]. با توجه به تفاوت در ریزساختار فلز جوش نسبت به فلز پایه و تأثیر عوامل گفته شده، کمتر بودن مقدار حد دوام حاصل شده قابل قبول است. با بهبود ریزساختار، کنترل تخلخل در فلز جوش و کاهش تنش پسماند کششی و یا ایجاد تنش پسماند فشاری در طول ساخت و تعمیرات عمر مفید، می‌توان استحکام خستگی اتصال جوش را افزایش داد.

با استفاده از نتایج به دست آمده از هر دو ناحیه عمر خستگی محدود و استحکام خستگی، منحنی میانگین کلی تنش-عمر، بازه اطمینان ناحیه عمر خستگی محدود و منحنی مشخصه از ناحیه عمر خستگی محدود تا استحکام خستگی عمر بینهایت فلز جوش خط لوله فولادی API X65 در شکل ۷ رسم شده است.

۶- بحث و بررسی نتایج

در جدول ۵ نتایج استحکام خستگی مربوط به فولاد ترمومکانیکال خطوط انتقال با گریدهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. در اغلب تحقیقات انجام شده، حد دوام مربوط به فلز پایه به دست آمده است. همه فولادها و فلز جوش بررسی شده دارای استحکام نهایی کمتر از ۱۴۰۰ مگاپاسکال بوده و نسبت استحکام تسلیم به استحکام نهایی آن‌ها در حدود ۰/۸ است. نمونه‌های آزمایش خستگی در راستای طولی تهیه شده و آزمایش به صورت کششی- فشاری و با دستگاه سروهیدرولیک انجام شده است. در مرجع [10] آزمایش خستگی بر روی درز جوش محیطی جوش قوسی با گاز محافظ انجام شده و نمونه به گونه‌ای آماده‌سازی شده که راستای نمونه عمود بر درز جوش محیطی بوده و درز جوش در وسط نمونه واقع شده است. حد دوام به دست آمده در اغلب مراجع در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد استحکام نهایی است. در تحقیق حاضر آزمایش خستگی از نوع خمشی- چرخشی و به صورت تیر یک سر گیردار، بر روی درز جوش ماریچ از نوع زیرپودری انجام شده است. نمونه آزمایش عمود بر درز جوش تهیه شده و فلز جوش در ناحیه طول اتصال و تمرکز تنش قرار گرفته است. با توجه به تحقیقات گذشته، استحکام خستگی درز جوش ماریچ با توجه به نوع ماده و نحوه آزمایش تاکنون گزارش نشده است. مقدار حد دوام به دست آمده نسبت به فلز پایه که در مرجع [23] ارائه شده، کمتر است.

به طور معمول استحکام خستگی اتصال جوش کمتر از مقاومت فلز پایه است [24]. زیرا عوامل زیادی همچون تنش پسماند، اثرات تمرکز تنش، ریزساختار، هندسه ناهمگن جوش و وجود آخال‌ها باعث تغییر در خواص خستگی اتصال جوش می‌شود [10]. تنش پسماند کششی می‌تواند بر خواص مکانیکی جوش مانند استحکام خستگی، چقرمگی شکست، آسیب خزش تأثیر منفی گذاشته و با افزایش نرخ رشد ترک خستگی، عمر خستگی سازه را کاهش دهد. در حالی که تنش پسماند فشاری نرخ رشد ترک خستگی را کاهش می‌دهد [3]. تخمین الگوی تنش پسماند در

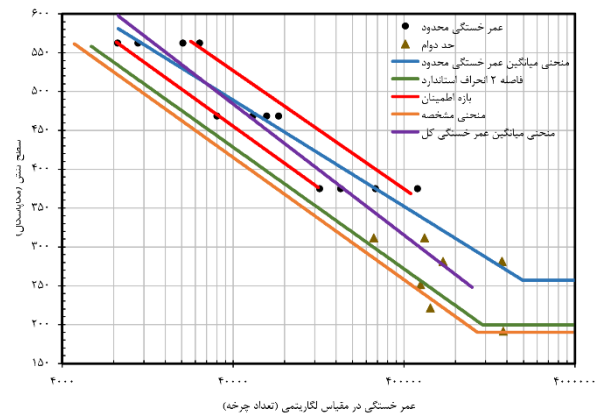
جدول ۵) مقایسه بین نوع آزمایش خستگی و حد دوام در فولادهای ترمومکانیکال با گریدهای مختلف و فلز جوش در مراجع مختلف

جنس فولاد	قطر خارجی (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	نسبت استحکام تسلیم به استحکام نهایی	جهت نمونه	حد دوام (مگاپاسکال)	نسبت حد دوام به استحکام نهایی	مرجع
API X42	۵۰۸	۱۷/۴۸	۳۹۵	۴۶۵	۰/۸۵	کششی- فشاری	۲۵۲	۰/۵۴	[۷]
API X65	۲۷۳	۲۹	۵۱۸	۶۱۴	۰/۸۴	کششی- فشاری	۳۰۰	۰/۴۹	[۲۳]
API X70	۹۱۴	۱۲	۵۶۷	۶۴۳	۰/۸۸	کششی- فشاری	۲۸۱	۰/۴۳	[۲۷]
API X80	۵۰۸	۲۶/۴	۵۵۵	۶۲۵	۰/۸۸	کششی- فشاری	۳۸۰	۰/۶	[۲۸]
درز جوش API X65	۲۷۳	۱۴/۳	۴۹۰	۵۸۰	۰/۸۴	کششی- فشاری	۱۶۰	۰/۲۷	[۱۰]
درز جوش API X65	۱۲۱۹	۱۴/۳	۵۴۸	۶۲۴	۰/۸۸	خمشی- چرخشی	۲۵۸/۵	۰/۴	تحقیق حاضر

کرد. در تحقیقات سایر دانشمندان، از جمله مراجع ذکر شده در جدول ۵، به طور معمول تعدادی آزمایش در سطوح مختلف تنش انجام شده و با عبور رگرسیون از داده‌ها، منحنی میانگین حد دوام و نقطه زانویی با توجه به تعداد چرخه مشخص (۱۰۶ الی ۱۰۷ چرخه) تخمین زده شده است. منحنی میانگین با استفاده از این روش نیز در شکل ۷ رسم شده است. اما در تحقیق حاضر با استناد به روش استاندارد، ناحیه‌های عمر خستگی محدود و استحکام خستگی به صورت جداگانه بررسی شده و منحنی‌های مربوطه به دست آمده است. سپس با تلاقی منحنی تنش-عمر در ناحیه عمر خستگی محدود و سطح تنش مربوط به حد دوام نقطه زانویی در تعداد چرخه $1/8 \times 10^6$ حاصل شده است. منحنی تنش-عمر در روش سایر مقالات نسبت به روش استاندارد دارای شیب تندتری است. اما در تخمین حد دوام، هر دو روش تطبیق خوبی با یکدیگر داشته و حد دوام میانگین تقریباً در یک سطح تنش تخمین زده شده است. همچنین، منحنی استاندارد در شرایط خستگی کم چرخه نسبت به روش سایر مقالات محافظه‌کارانه‌تر است. در ناحیه خستگی پرچرخه استفاده از روش مرسوم در سایر مقالات بیشتر توصیه می‌گردد.

۷- جمع بندی

در این تحقیق منحنی تنش-عمر و حد دوام درز جوش مارپیچ خط لوله فولاد ترمومکانیکال API X65 به دست آمده است. ابتدا ۲۰ نمونه از ورق فولادی از لوله در مقیاس صنعتی با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت $14/3$ میلی‌متر با برشکاری بر طبق استاندارد ISO 1143 تهیه شده و سپس ۱۲ نمونه در ناحیه عمر خستگی محدود و ۸ نمونه در ناحیه استحکام خستگی تحت آزمایش خستگی خمشی-چرخشی کاملاً معکوس شونده قرار گرفته است. نتایج حاصل شده در ناحیه عمر خستگی محدود براساس استانداردهای ISO 12107 و ASTM E-739 و نتایج ناحیه استحکام خستگی براساس استاندارد ISO 12107 تحلیل آماری شده‌اند. با انجام این تحلیل‌ها، منحنی کامل میانگین تنش-عمر به همراه منحنی مشخصه آن و بازه اطمینان در ناحیه عمر خستگی محدود، در سطح اطمینان ۹۵ درصد به دست آمده است. لازم به ذکر است، شرایط برقراری توزیع نرمال لگاریتمی و مدل خطی بر روی داده‌های آزمایش بررسی شده است. همچنین، تحلیل قابلیت اعتماد به منظور تعیین غیر اریب بودن برازش و ضرایب مدل بر روی نتایج انجام شده که داده‌ها به خوبی در محدوده تعیین شده قرار گرفته است. حد دوام میانگین این فولاد $258/5$ ($0/41$ استحکام نهایی) و حد کمینه آن ۱۸۱ مگاپاسکال به دست آمده که مطابقت نزدیکی با محدوده استحکام خستگی بیان شده برای فولادهای با استحکام نهایی کمتر از ۱۴۰۰ مگاپاسکال دارد. همچنین، حد دوام به دست آمده



شکل ۷) منحنی تنش-عمر میانگین، بازه اطمینان و منحنی مشخصه درز جوش مارپیچ لوله فولادی ترمومکانیکال API X65

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، تحلیل خستگی مدل باسکوئین و توزیع نرمال لگاریتمی در همه ناحیه‌های خستگی، از کم چرخه تا پرچرخه، نتایج خوبی را ارائه داده است. در تنش بیشینه بزرگتر از ۵۶۱ مگاپاسکال، عمر خستگی تقریباً ۸۴۰۰ چرخه است. مقدار حد دوام به طور معمول در محدوده ۴۰ تا ۶۰ درصد استحکام نهایی قرار می‌گیرد [20]. حد دوام میانگین فلز جوش در شکل ۷ برابر $41/4$ درصد استحکام نهایی بوده و به خوبی در محدوده تعیین شده قرار گرفته است. با توجه به منحنی، در تنش‌های بالاتر از حد دوام رابطه میانگین بین تنش و عمر خستگی و منحنی مشخصه تنش-عمر به ترتیب با استفاده از معادله $y = 63/37 - 6/765x$ و رابطه ۵ برقرار است. در تنش‌های پایین‌تر از حد دوام نیز، سطح تنش میانگین و حد پایین به ترتیب برابر با $y = 258/5$ و $y = 181$ در نظر گرفته شده است. همانطور که از نتایج آزمایش در شکل مشخص است، با کاهش سطح تنش میزان پراکندگی در داده‌های عمر خستگی افزایش می‌یابد. دلیل وجود پراکندگی می‌تواند تأثیر عواملی همچون کیفیت سطح، انحرافات صاف بودن نمونه، اختلاف در شرایط بارگذاری باشد که با آماده‌سازی دقیق نمونه‌ها و استفاده از شرایط آزمایش یکسان قابل حذف هستند. با این وجود، پراکندگی در داده‌های خستگی به واسطه اختلاف در ریزساختار هر نمونه مشاهده شده که شرایط متفاوت جوانه‌زنی و رشد ترک در هر نمونه را فراهم می‌کند [29]. به دلیل پراکندگی بیشتر در سطوح پایین تنش، فاصله بین منحنی مشخصه و منحنی میانگین در ناحیه استحکام خستگی بیشتر شده و همانند ناحیه عمر خستگی محدود، مقدار حد پایین استحکام خستگی بین دو تا سه انحراف استاندارد کمتر از مقدار میانگین است.

در این نمودار منحنی میانگین با استفاده از داده‌های عمر خستگی محدود به دست آمده است. زیرا نتایج آزمایش در ناحیه استحکام خستگی، که به صورت مثلث نشان داده شده، جهت به دست آوردن حد دوام میانگین به کار گرفته شده و نمی‌توان از این نتایج در تعیین منحنی میانگین ناحیه عمر محدود استفاده

- 11- Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012;98:8-15.
- 12- Farrahi A, Hashemi SH. Experimental evaluation of fracture toughness in spiral seam weld of thermo-mechanical steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2012;2(4):25-35.[Persian]
- 13- Specification for line pipe, API Specification 5L, 45th Edition. USA: American Petroleum Institute. 2013;29-31.
- 14- Bandara CS, Siriwardane SC, Dissanayake UI, Dissanayake R. Developing a full range S-N curve and estimating cumulative fatigue damage of steel elements. *Computational Materials Science*. 2015;96:96-101.
- 15- Barbosa JF, Correia JA, Júnior RF, Zhu SP, Jesus AMD. Probabilistic S-N fields based on statistical distributions applied to metallic and composite materials: State of the art. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019;11(8):1-22.
- 16- Gope PC. Determination of Minimum Number of Specimens in S-N Testing. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2002;124(4):421-427.
- 17- Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data. Switzerland: International Organization for Standardization (ISO); 2003.
- 18- Strzelecki P, Sempruch J, Tomaszewski T. Analysis of Selected Mathematical Models of High-Cycle S-N Characteristics. *Technical Sciences*. 2017;20(3):227-240.
- 19- Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data. West Conshohocken, United States: ASTM International; 2015.
- 20- Budynas RG, Nisbett JK. Fatigue Failure Resulting from Variable Loading. In: Lange M, editor. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 9th Edition. New York, USA: McGraw-Hill. 2011;273-295.
- 21- Pilkey WD. *Peterson's Stress Concentration Factors*. 2nd Edition Canada: John Wiley & Sons, Inc. 1997;164.
- 22- Çalışkan S, Gürbüz R. Determining the Endurance Limit of AISI 4340 Steels in Terms of Different Statistical Approaches. *Frattura e Integrità Strutturale*. 2021;15(58):344-364.
- 23- Farhad F, Zhang X, Smyth-Boyle D. Fatigue behaviour of corrosion pits in X65 steel pipelines. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019;233(5):1771-1782.
- 24- Lopez-Jauregi A, Esnaola J, Ulacia I, Urrutibeascoa I, Madariaga A. Fatigue analysis of multipass welded joints considering residual stresses. *International Journal of Fatigue*. 2015;79:75-85.
- 25- Lee YH, Kwon D, Jang JI, Kim WS. Residual Stress Assessment in API X65 Pipeline Welds by Non-Destructive Instrumented Indentation. *Key Engineering Materials*. 2004;270-273:35-40.
- 26- De Moraes CAP, Chludzinski M, Nunes RM, Lemos GVB, Reguly A. Residual stress evaluation in API 5L X65 girth welded pipes joined by friction welding and

برای فلز جوش در مقایسه با حد دوام فلز پایه حاصل از سایر تحقیقات، به درستی مقدار کمتری را نشان می‌دهد

تشکر و قدردانی: از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قراردادن فولاد API X65 قدردانی و تشکر می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آنها است.

تعارض منافع: مقاله‌ی حاضر با هیچ شخص و یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

منابع مالی: منابع مالی توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- 1- Shen F, Zhao B, Li L, Chua CK, Zhou K. Fatigue damage evolution and lifetime prediction of welded joints with the consideration of residual stresses and porosity. *International Journal of Fatigue*. 2017;103:272-279.
- 2- Arif AFM, Al-Omari AS, Al-Nassar Y. Development of Residual Stress during Manufacturing of Spiral Welded Pipes. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012;27(7):738-745.
- 3- Barsoum Z, Barsoum I. Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM. *Engineering Failure Analysis*. 2009;16(1):449-467.
- 4- Zhang C, Vyver SVD, Hu X, Lu P. Fatigue crack growth behavior in weld-repaired high-strength low-alloy steel. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011;78(9):1862-1875.
- 5- Drexler ES, Slifka AJ, Amaro RL, Barbosa N, Lauria DS, Hayden LE, Stalheim DG. Fatigue crack growth rates of API X70 pipeline steel in a pressurized hydrogen gas environment. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2013;37(5):517-525.
- 6- Pinheiro B, Pasqualino I, Cunha S. Fatigue life assessment of damaged pipelines under cyclic internal pressure: Pipelines with longitudinal and transverse plain dents. *International Journal of Fatigue*. 2014;68:38-47.
- 7- Hong SW, Koo JM, Seok CS, Kim JW, Kim JH, Hong SK. Fatigue life prediction for an API 5L X42 natural gas pipeline. *Engineering Failure Analysis*. 2015;56:396-402.
- 8- Jallouf S, Capelle J, Pluvineau G. Probabilistic fatigue initiation assessment diagram pipe steel X52: influence of hydrogen. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2017;40(8):1260-1266.
- 9- Hashemi H, Hashemi SH. Investigation of Seam Weld and Steel Base Metal Fracture Energy of API X65 Pipe Using Three-Point Bending Experimental. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(9):2377-2388.[Persian]
- 10- Gao Z, Gong B, Xu Q, Wang D, Deng C, Yu Y. High cycle fatigue behaviors of API X65 pipeline steel welded joints in air and H₂S solution. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(17):10423-10437.

- gas tungsten arc welding. Journal of Materials Research and Technology. 2019;8(1):988-995.
- 27- Hanafi ZH, Jamaludin N, Abdullah S, Yusof MF, Zain MS. Acoustic Emission Study of Corrosion Fatigue and Fatigue for API 5L X70 Gas Pipeline Steel. Applied Mechanics and Materials. 2012;138-139:635-639.
- 28- Zhao ZP, Qiao GY, Tang L, Zhu HW, Liao B, Xiao FR. Fatigue properties of X80 pipeline steels with ferrite/bainite dual-phase microstructure. Materials Science & Engineering A. 2016;657:96-103.
- 29- Alansary YA. Prediction of Fatigue Crack Near-threshold Censored Regressions with Run-out Data: University of Akron; 2014;21-22.