



Experimental Investigation of Fatigue Behavior and Assessment of Stress-Life Curve of API X65 Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Tavid M.¹,
Hashemi S. H.^{1*}

How to cite this article

Tavid M, Hashemi S H, Experimental Investigation of Fatigue Behavior and Assessment of Stress-Life Curve of API X65 Steel. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(05):317-327.

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

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
Shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: April 21, 2024
Accepted: August 18, 2024
ePublished: August 28, 2024

ABSTRACT

Thermomechanical steels are widely used in oil and gas pipelines due to their high toughness and high resistance against crack growth. A large part of the steel pipelines used in the oil and gas industry in Iran is made of API X65 steel. The fluctuations of internal gas pressure in steel pipes can cause fatigue failure and lead to gas leakage and explosion. So, the control of damage initiation and structural integrity of gas pipelines is of great importance. In this study, the S-N curve and the fatigue strength of the base metal of the API X65 steel were estimated by performing fatigue tests. For this purpose, 24 and 25 test specimens along the seam weld in the coil transverse direction, and perpendicular to the seam weld along the coil rolling direction were prepared according to ISO 1143 standard, respectively. All test samples were cut from an spirally welded pipe with 1219mm outside diameter and 14.3mm 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. The mean curve, characteristic curve, and confidence interval of the results were obtained both in the finite fatigue life range and in the fatigue resistance. The mean endurance limit of the base metal perpendicular to and parallel to the seam seam were 305 and 291 MPa, respectively which were in the range of 0.4 to 0.6 of material tensile strength and above the seam weld endurance limit (258 MPa).

Keywords Endurance Limit, S-N Curve, Fatigue Fracture, Gas Pipeline, API X65 Steel.

CITATION LINKS

1- Microstructural aspects of intergranular and transgranular crack propagation in an API X65 steel pipeline related to fatigue failure. 2- Fracture properties and fatigue life assessment of API X70 pipeline steel under the effect of an environment containing hydrogen. 3- Fatigue of X65 steel in the sour corrosive environment—A novel experimentation and analysis method for predicting fatigue crack initiation life from corrosion pits. 4- Endurance limit determination of weld metal of API X65 gas pipeline steel. 5- Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. 6- Experimental and numerical determination of fracture toughness in gas pipeline steel of grade API X65. 7- Specification for Line Pipe, API Specification 5L, 45th Edition. 8- Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel. 9- Experimental evaluation of fracture toughness in spiral weld of thermomechanical steel pipe. 10- Metallic Materials—Rotating Bar Bending Fatigue Testing. 11- Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface texture: Profile method- Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. 12- Probabilistic SN fields based on statistical distributions applied to metallic and composite materials: State of the art. 13- Determination of minimum number of specimens in SN testing. 14- Metallic materials — Fatigue testing — Statistical Planning and Analysis of Data. 15- Analysis of selected mathematical models of high-cycle SN characteristics. 16- Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data. 17- Fatigue behavior of as-built L-PBF A357.0 parts. 18- Peterson's stress concentration factors. 19- Shigley's mechanical engineering design. 20- Fatigue behaviour of corrosion pits in X65 steel pipelines. 21- Fatigue life prediction for an API 5L X42 natural gas pipeline. 22- Static, dynamic and fatigue characteristics of the pipeline API 5L X52 steel after sandblasting. 23- Acoustic emission study of corrosion fatigue and fatigue for API 5L X70 gas pipeline steel. 24- Fatigue properties of X80 pipeline steels with ferrite/bainite dual-phase microstructure.

بررسی تجربی رفتار خستگی و تخمین نمودار تنش- عمر فولاد ایکس شصت و پنج

محمد تاوید^۱، سیدحجت هاشمی^{۱*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند، بیرجند

چکیده

فولادهای ترمومکانیکال به دلیل چقرمگی و مقاومت بالا در برابر رشد ترک، به طور گسترده در خطوط انتقال نفت و گاز استفاده می‌شوند. بخش وسیعی از خطوط لوله فولادی به کار رفته در صنعت نفت و گاز جمهوری اسلامی ایران از جنس فولاد API X65 است. نوسان فشار داخلی گاز در لوله‌های فولادی می‌تواند باعث شکست خستگی و انفجار شود. به همین دلیل، بررسی آسیب و یکپارچگی سازه‌ای این لوله‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق منحنی تنش- عمر و استحکام خستگی فلز پایه لوله فولادی API X65، با انجام آزمایش خستگی تخمین زده شده است. به این منظور، تعداد ۲۴ و ۲۵ نمونه آزمایشگاهی به ترتیب در راستای درز جوش (جهت طولی یا غلتک‌کاری) و عمود بر درز جوش (جهت عرضی کلاف اولیه) طبق استاندارد، از لوله در مقیاس صنعتی با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر تهیه شد. نمونه‌های تهیه شده تحت آزمایش خستگی خمشی- چرخشی کاملاً معکوس شونده قرار گرفت و با در نظر گرفتن توزیع نرمال لگاریتمی، تحلیل آماری نتایج انجام شد. منحنی میانگین، منحنی مشخصه و بازه اطمینان نتایج آزمایش در ناحیه‌های عمر خستگی محدود و استحکام خستگی براساس استانداردهای ISO 12107 و ASTM-E739 به دست آمد. مقدار میانگین حد دوام فلز پایه در راستای درز جوش و عمود بر درز جوش به ترتیب برابر ۲۹۱ و ۳۰۵ مگاپاسکال به دست آمد. این مقادیر به خوبی در محدوده پیش‌بینی ۰/۴ تا ۰/۶ استحکام نهایی فولاد آزمایش شده و بالاتر از حد دوام فلز جوش (۲۵۸ مگاپاسکال) این لوله قرار دارد.

کلیدواژه‌ها: حد دوام، منحنی تنش- عمر، شکست خستگی، لوله انتقال گاز، فولاد API X65

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

* نویسنده مسئول: Shhashemi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

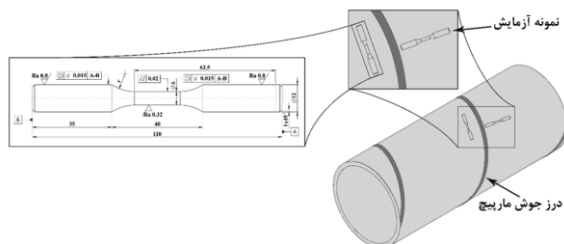
طراحی به منظور جلوگیری از خستگی اهمیت بالایی دارد و محاسبات طراحان مهندسی باید خطر شکست را کاهش داده و امنیت تجهیزات را تضمین کند. دسته‌ای از فولادهای کم آلیاژ پراستحکام پرکاربرد در ساخت لوله‌های انتقال گاز، فولادهای ترمومکانیکال بوده که چقرمگی شکست بالا و قابلیت جوشکاری خوب از ویژگی‌های اصلی آن است و گرید خاص API X65 در صنعت نفت و گاز ایران استفاده می‌شود. شکست خستگی پرچرخه تحت شرایط نوسانی فشار داخلی، یکی از شایع‌ترین نوع شکست در لوله‌های نفت و گاز می‌باشد و بررسی آسیب و یکپارچگی آن‌ها بسیار مهم است. به همین دلیل، با ارزیابی عمر خستگی لوله‌های فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌توان از نشت جریان منجر به

انفجار و ضرر اقتصادی جلوگیری کرد. در سال‌های گذشته برخی از محققان به بررسی خواص مکانیکی، از جمله خستگی، فولادهای ترمومکانیکال پرداخته‌اند. جنبه‌های ریزساختاری رشد ترک خستگی درون دانه‌ای و بین دانه‌ای در لوله فولادی API X65، توسط مهتدی-بناب و همکاران در سال ۲۰۱۸ بررسی شد که مد غالب رشد ترک خستگی بین دانه‌ای بوده و شکست در ناحیه با غلظت بالای آخال اتفاق افتاده است^[1]. نرخ رشد ترک خستگی بر روی فلز پایه و فلز جوش لوله فولادی API X70 تحت فشار ۱۰ مگاپاسکال گاز طبیعی با یک درصد مخلوط هیدروژن توسط نگوین (Nguyen) و همکاران در سال ۲۰۲۱ بررسی شد که استحکام خستگی در معرض هیدروژن به دلیل کاهش خواص چقرمگی شکست و تسریع نرخ رشد ترک خستگی، بسیار کمتر از هوای محیط به دست آمد^[2]. دستورالعمل آزمایش خستگی محیطی بر روی فولاد API X65 جهت انجام آزمایش‌های خستگی- خوردگی در محیط خوردگی ترش تحت بارگذاری محوری توسط فرهاد و همکاران در سال ۲۰۲۱ ارائه شد و منحنی تنش- عمر محیط ترش با مقاومت خستگی کمتری نسبت به شرایط محیط به دست آمد^[3]. در سال ۲۰۲۲ منحنی میانگین و مشخصه تنش- عمر در ناحیه‌های عمر خستگی و استحکام خستگی درز جوش ماریپچ لوله فولادی API X65 با انجام آزمایش خستگی خمشی- چرخشی معکوس شونده توسط تاوید و هاشمی به دست آمده و حد دوام میانگین و کمینه به ترتیب برابر ۲۵۸/۵ و ۱۸۱ مگاپاسکال گزارش شد^[4].

در این مطالعه، حد دوام فلز پایه لوله فولادی API X65 در راستای درز جوش (جهت طولی یا غلتک‌کاری) و عمود بر درز جوش (جهت عرضی کلاف اولیه) با استخراج ۴۹ نمونه مطابق استاندارد ISO 1143 و انجام آزمایش خستگی خمشی- چرخشی معکوس شونده بررسی شده است. به دلیل وجود پراکندگی در نتایج آزمایش خستگی، تحلیل آماری بر روی آن‌ها با استفاده از مدل خستگی باسکوئین (Basquin) و

جدول ۱) ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فلز پایه لوله فولادی API X65 و مقادیر بیشینه استاندارد API 5L [5-7].

ترکیب شیمیایی فلز پایه											
عنصر	آهن	کربن	منگنز	فسفر	سولفور	تیتانیوم	سیلیسیوم	نیوبیوم	کروم	مولیبدن	وانادیم
درصد وزنی	پایه	۰/۰۷۲	۱/۴۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵	۰/۲۰۱	۰/۰۴۷	۰/۱۷۴	۰/۲۴	۰/۰۵
بیشینه API 5L X65	---	۰/۱۲	۱/۶	۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	---	۰/۴۵	---	---	---	---
خواص مکانیکی فلز پایه											
استحکام تسلیم	نتایج آزمایشگاهی			کمینه استاندارد API 5L X65				بیشینه استاندارد API 5L X65			
	۵۰۵				۴۵۰				۵۳۵		
	۶۱۱				۶۰۰				۷۶۰		
استحکام نهایی											



شکل ۱) هندسه لوله، جهت‌گیری و ابعاد نمونه‌های آزمایش خستگی خمشی- چرخشی طبق استاندارد ISO 1143 (اندازه‌ها به میلی‌متر).



شکل ۲) دستگاه آزمایش خستگی خمشی- چرخشی معکوس شونده برای آزمایش نمونه یکسرگردار [4].

$$S = k \cdot \frac{32a}{\pi d^2} \cdot F \quad (1)$$

تغییر قطر نمونه باعث ایجاد تمرکز تنش و شکست نهایی در صفحه‌ای یکسان شده و نتایج آزمایش خستگی نمونه‌ها را قابل مقایسه خواهد نمود. با چرخش نمونه و ثبت تعداد چرخه، آزمایش شروع شده و تا شکست کامل نمونه و یا عبور از تعداد چرخه مشخص ادامه می‌یابد. رایج‌ترین نوع تحلیل جهت توصیف رفتار خستگی براساس تعریف منحنی تنش- عمر بوده که تابعی از پارامترهای تشکیل دهنده رابطه بین دو متغیر اصلی سطح تنش (متغیر مستقل)، S ، و تعداد چرخه (متغیر وابسته)، N ، است [12]. این منحنی، به دلیل تعیین تجربی آن، به شدت متأثر از شرایط آزمایش، دامنه تنش، احتمال و پراکندگی داده بوده و دارای دو بخش عمر خستگی محدود و حد دوام (حد خستگی) است.

سختی و بیشترین مقدار انرژی ضربه شاری فلز پایه به ترتیب برابر ۲۲۱ ویکرز و ۲۷۹ ژول بوده که با استاندارد API 5L مطابقت دارد [8,9]. همچنین، چقرمگی شکست این فولاد برابر $308 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ بوده که بالا بودن آن به دلیل ساختار دانه ریز (۳ الی ۷ میکرومتر) تشکیل شده از فریت سوزنی است [6].

۴-۱- ناحیه عمر خستگی محدود

آزمایش در سطوح مختلف تنش انجام شده و تعداد دور تا شکست و یا عدم شکست آن‌ها ثبت می‌گردد. به طور معمول، بیشترین و کمترین سطح تنش (S_m و S_n) به ترتیب از تنشی نزدیک به استحکام نهایی ماده و نزدیک به حد دوام تخمینی انتخاب شده و بازه بین سطوح تنش، D ، با توجه به تعداد سطوح مورد نظر بر طبق معادله (۲) به دست می‌آید [13].

$$D = \frac{S_m - S_n}{J} \quad (2)$$

J ، تعداد سطوح تنش مورد نیاز است. سطوح دیگر تنش، S_r ، نیز با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود که r شماره مربوط به سطح تنش مورد نظر است [13]:

$$S_r = S_m - (r - 1)D \quad (3)$$

سطح اطمینان، براساس استاندارد ISO 12107، در تعیین تعداد نمونه در هر سطح تنش تأثیرگذار بوده و جهت طراحی و قابلیت اعتماد بیشتر از ۹۵ درصد توصیه نمی‌گردد. پارامتر احتمال شکست، P ، نیز جهت تعیین منحنی میانگین تنش-عمر (خط مرکزی) ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود [14]. با محاسبه درصد تکرار، PR ، در رابطه (۴) و بازه درصد تعیین شده، تعداد سطوح تنش و تکرار آزمایش در هر سطح مشخص می‌شود که n ، تعداد کل نمونه و J ، تعداد سطوح تنش است [15].

$$\%PR = 1 - 100(1 - \frac{J}{n}) \quad (4)$$

بازه درصد تکرار به منظور طراحی و قابلیت اعتماد به ترتیب از ۵۰ الی ۷۵ و ۷۵ الی ۸۸ درصد است [16].

۴-۲- ناحیه استحکام خستگی

برای تعیین حد دوام ماده مورد آزمایش، از روش پلکانی توصیف شده در استاندارد ISO 12107 استفاده می‌شود. اگر در ۳ سطح تنش در ناحیه عمر خستگی محدود شکست اتفاق نیفتد، تخمین اولیه میانگین مقاومت خستگی، S_w ، به عنوان اولین سطح تنش آزمایش پلکانی می‌تواند از معادله (۵) بدست آید [13].

$$S_w = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 S_i \quad (5)$$

در غیر این صورت، سطح نزدیک به استحکام خستگی میانگین تخمینی (نصف استحکام نهایی) انتخاب می‌شود. در صورت شکست و یا عدم شکست نمونه قبل از تعداد چرخه مشخص، سطح تنش در نمونه بعدی به اندازه گام تنش به ترتیب کاهش و یا افزایش می‌یابد [17]. به طور معمول، گام تنش ثابت بوده و نزدیک به انحراف استاندارد ناحیه عمر خستگی محدود در نظر گرفته می‌شود [13]. سپس استحکام خستگی می‌تواند با استفاده از تحلیل آماری تخمین زده شود.

۴-۳- تحلیل آماری

منحنی میانگین تنش-عمر در ناحیه عمر خستگی محدود مطابق استاندارد در مقیاس نیمه لگاریتمی (محور x لگاریتم عمر خستگی و محور y سطوح تنش) رسم شده و با استفاده از معادلات آماری تحلیل می‌شوند. همچنین، استحکام خستگی نیز تخمین زده می‌شود.

۵- نتایج

در مجموع تعداد ۴۹ عدد نمونه فلز پایه از فولاد API X65 تهیه شده و تحت آزمایش خستگی قرار گرفته است. منحنی میانگین تنش-عمر، حد دوام و منحنی مشخصه نتایج دو راستای درز جوش و عمود بر آن در ناحیه‌های عمر خستگی محدود و استحکام خستگی با استفاده از تحلیل آماری تخمین زده شده است. در ادامه نتایج در هر دو راستا توصیف شده است.

۵-۱- ناحیه عمر خستگی محدود

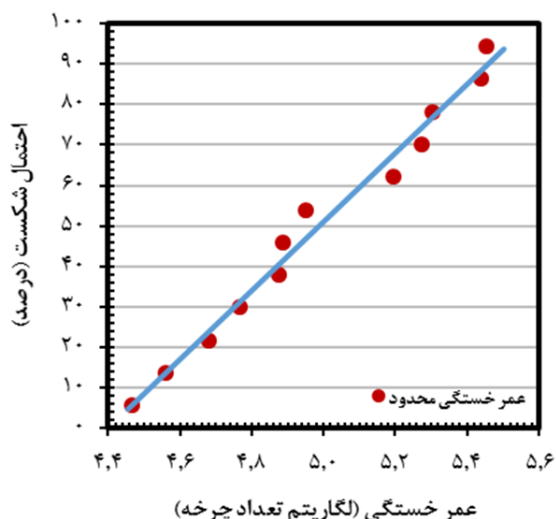
در این ناحیه عمر خستگی به عنوان متغیر تصادفی بررسی و از توزیع نرمال لگاریتمی جهت تخمین منحنی میانگین، منحنی مشخصه و بازه اطمینان تنش-عمر استفاده می‌شود. رابطه تنش-عمر با استفاده از مدل خطی باسکوئین تعریف می‌شود:

$$\log N = A + B \log S \quad (6)$$

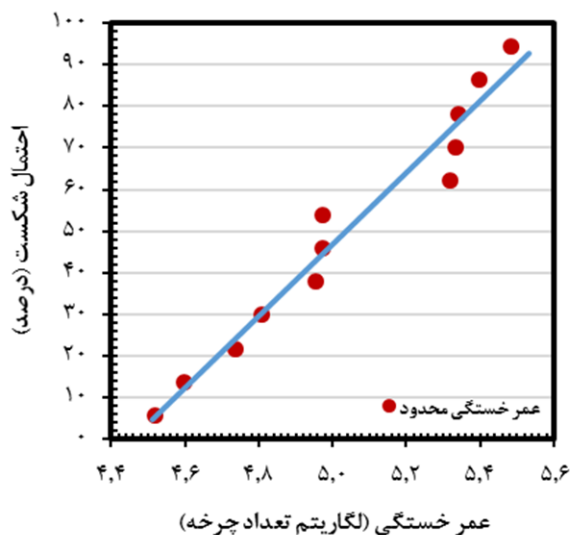
به منظور قرار گرفتن در هر دو بازه طراحی و قابلیت اعتماد، در هر دو راستا، آزمایش بر روی ۱۲ نمونه در ۳ سطح تنش با تکرار ۴ آزمایش در هر سطح انجام شده است. بالاترین و پایین‌ترین سطح تنش به ترتیب ۵۵۰ و ۳۶۷ مگاپاسکال با بازه تنش ۹۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. میزان تمرکز تنش مطابق مرجع [18] و ابعاد نمونه، برابر ۱/۱ به دست آمده است. خطای گشتاور خمشی اعمالی ماشین آزمایش برابر ۰/۷ درصد (کمتر از مقدار بیشینه ۱/۳ درصد در استاندارد ISO 1143) بوده و تعداد چرخه $10^6 \times 1/5$ به عنوان عمر بی‌نهایت تعیین شده است. جدول ۲ مقادیر مربوط به شماره نمونه، سطح تنش، نتایج تعداد چرخه تا شکست در ناحیه عمر خستگی محدود مربوط به هر دو راستا را نشان می‌دهد که تغییرات عمر در هر دو راستا از $10^4 \times 3$ تا <

جدول ۲) نتایج آزمایش خستگی ناحیه عمر خستگی محدود فلز پایه لوله فولادی API X65 در دو راستای درز جوش و عمود بر آن.

سطح تنش	۵۵۰ مگاپاسکال				۴۵۸ مگاپاسکال				۳۶۷ مگاپاسکال			
لگاریتم سطح تنش	۸/۷۴				۸/۶۶				۸/۵۶			
شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
راستای درز جوش												
شماره نمونه	۱	۲۰	۲۵	۱۷	۱۸	۵	۲۳	۲	۱۴	۴	۳	۱۶
خطای گشتاور نسبی	۰/۴۶۶	۰/۹۷۲	۰/۶۲۲	۰/۲۱	۰/۶۱۷	۰/۹۶۳	۰/۴۸۸	۰/۳۳۳	۰/۹۷۴	۰/۱۳۹	۰/۵۷۹	۰/۰۴۸
تعداد چرخه	$۳/۶ \times ۱۰^۴$	$۲/۹ \times ۱۰^۴$	$۷/۷ \times ۱۰^۴$	$۷/۴ \times ۱۰^۴$	$۴/۸ \times ۱۰^۴$	$۱/۵ \times ۱۰^۵$	$۵/۸ \times ۱۰^۴$	$۸/۹ \times ۱۰^۴$	$۲/۸ \times ۱۰^۵$	$۱/۸ \times ۱۰^۵$	$۲/۷ \times ۱۰^۵$	۲×۱۰^۵
لگاریتم تعداد چرخه	۴/۵۶	۴/۴۶	۴/۸۹	۴/۸۷	۴/۶۸	۵/۱۹	۴/۷۷	۴/۹۵	۵/۴۵	۵/۲۷	۵/۴۴	۵/۳
میانگین لگاریتم عمر خستگی	۴/۶۱۹				۴/۹۷۷				۵/۳۶۷			
انحراف استاندارد عمر خستگی	۰/۰۷۷				۰/۰۸۶				۰/۰۵۴			
راستای عمود بر درز جوش												
شماره نمونه	۱	۶	۱۸	۲۰	۴	۹	۱۵	۲۴	۷	۱۶	۱۹	۲۱
خطای گشتاور نسبی	۰/۱۴۹	۰/۱۵۲	۰/۱۵۵	۰/۱۸۶	۰/۱۸۳	۰/۳۵۹	۰/۱۴۹	۰/۱۳۷	۰/۴۵۵	۰/۵۲۶	۰/۴۹۸	۰/۴۴۷
تعداد چرخه	$۳/۹ \times ۱۰^۴$	$۵/۶ \times ۱۰^۴$	$۶/۴ \times ۱۰^۴$	$۳/۳ \times ۱۰^۴$	$۲/۱ \times ۱۰^۵$	$۹/۴ \times ۱۰^۴$	۹×۱۰^۴	$۹/۴ \times ۱۰^۴$	$۲/۱ \times ۱۰^۵$	۳×۱۰^۵	$۲/۴ \times ۱۰^۵$	۲×۱۰^۵
لگاریتم تعداد چرخه	۴/۶	۴/۷۵	۴/۸۱	۴/۵۲	۵/۳۳	۴/۹۷۴	۴/۹۵	۴/۹۷۵	۵/۳۳	۵/		



(الف)



(ب)

شکل ۴) نمودار احتمال شکست مرتبه‌ای بر حسب لگاریتم عمر خستگی فلز پایه لوله فولادی API X65 در ناحیه عمر خستگی محدود؛ (الف) راستای درز جوش؛ (ب) عمود بر درز جوش.

$$\hat{x} = 38.26 - 3.844y \pm 0.48\sqrt{0.0622 + 12(y - 8.66)^2} \quad (9)$$

$$\hat{x} = 39.97 - 4.036y \pm 0.35\sqrt{0.0622 + 12(y - 8.66)^2} \quad (10)$$

با مقایسه نمودارهای شکل ۵ تفاوت بازه‌های پراکندگی به خوبی نمایان است. در هر دو راستا یکی از نتایج در سطح تنش ۴۵۸ مگاپاسکال خارج از بازه پراکندگی قرار گرفته است. فاصله بیشتر نتایج از یکدیگر در سطوح تنش ۵۵۰ و ۴۵۸ مگاپاسکال در راستای درز جوش از عوامل تأثیرگذار بر افزایش انحراف استاندارد و در نتیجه بزرگتر شدن بازه پراکندگی است (شکل ۵ الف).

احتمال مرتبه‌ای شکست نتایج محاسبه و نمودار آن بر حسب لگاریتم عمر خستگی در شکل ۴ ترسیم شده است. داده‌های بالاترین سطح تنش در هر دو راستا دارای کمترین بازه عمر خستگی و فاصله از خط برازش نسبت به سایر سطوح تنش بوده و انحراف استاندارد آن‌ها نیز بسیار به یکدیگر نزدیک است. بیشترین فاصله از خط مربوط به نتایج سطح تنش ۴۵۸ مگاپاسکال در هر دو راستا بوده که به دلیل بزرگ بودن بازه نتایج به وجود آمده است. انحراف استاندارد در راستای عمود بر درز جوش نسبت به راستای درز جوش بیشتر است (شکل ۴ ب). در راستای درز جوش نمونه‌های شماره ۲۳ و ۲ و عمود بر آن نمونه‌های شماره ۱۵ و ۲۴ دارای بیشترین فاصله هستند. فاصله‌ی ایجاد شده نسبت به خط برازش عبوری منحنی‌های هر دو راستا، با توجه به انحراف استاندارد سطوح، ناچیز بوده و توزیع نتایج آزمایش نزدیک به خطی است. در نتیجه عمر خستگی از توزیع نرمال لگاریتمی پیروی کرده و معادلات آن بر روی داده‌های آزمایش قابل استفاده است.

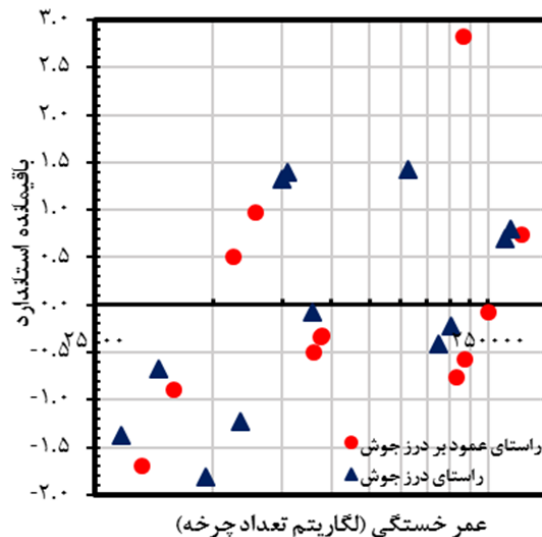
میانگین لگاریتم تنش در هر دو راستا برابر ۸/۶۵۵ و میانگین عمر خستگی در راستای درز جوش و عمود بر آن به ترتیب برابر ۵/۰۳۸ و ۴/۹۷ است. رابطه نهایی لگاریتم عمر خستگی بر حسب لگاریتم سطح تنش در هر دو راستا به همین ترتیب به صورت معادلات (۷) و (۸) تعریف شده است:

$$x = 38.26 - 3.844y \quad (7)$$

$$x = 39.97 - 4.036y \quad (8)$$

نمودار میانگین تنش-عمر در مقیاس نیمه لگاریتمی در ناحیه عمر خستگی محدود در شکل ۵ رسم شده است. انحراف استاندارد عمر خستگی در راستای درز جوش و عمود بر آن به ترتیب برابر ۰/۱۸۶ و ۰/۱۳۵ تخمین زده شده که بیشتر بودن این مقدار در راستای درز جوش بیانگر پراکندگی بیشتر نتایج است. همچنین، انحراف استاندارد استحکام خستگی در دو راستای درز جوش و عمود بر آن نیز نسبت مستقیم با انحراف استاندارد عمر خستگی داشته و به ترتیب برابر ۰/۰۳۳ و ۰/۰۴۸ است.

با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵ درصد و درجه آزادی ۱۰ و براساس استاندارد ASTM E-739 برای هر دو راستا ضریب توزیع استودنت تی (student T)، برابر ۲/۲۲۸۱ تعریف شده و بازه پراکندگی ثابت‌های A و B برای راستای درز جوش به ترتیب ۳۸/۱۴±۲۵۸/۴ و ۳/۸۴۴±۱/۶۶۴ به دست آمده است. در راستای عمود بر درز جوش نیز بازه پراکندگی این ثابت‌ها به ترتیب ۳۹/۱۰±۹۷/۳۹ و ۴/۰۳۶±۱/۲۱ تخمین زده شده است. همچنین، بازه پراکندگی منحنی تنش-عمر مربوط به راستای درز جوش و عمود بر آن به ترتیب با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) تعیین شده که درجات آزادی ۱۷=۱ و ۱۷=۱۰ و ضریب توزیع برابر ۴/۱۰۲۸ است.

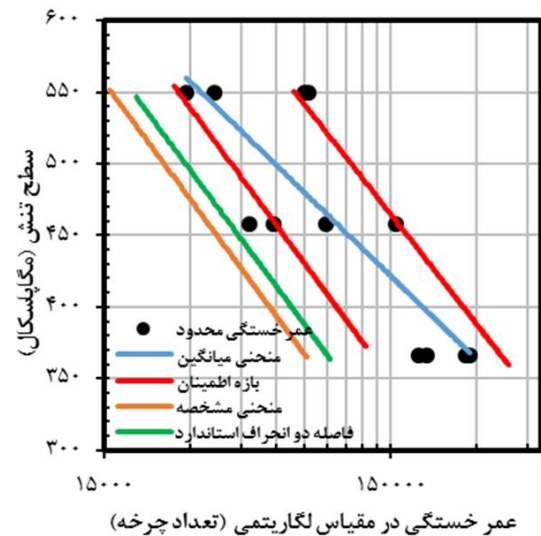


شکل ۶) نمودار باقیمانده استاندارد نتایج آزمایش خستگی بر حسب عمر خستگی فلز پایه لوله فولادی API X65 در ناحیه عمر محدود خستگی در دو راستای درز جوش و عمود بر آن.

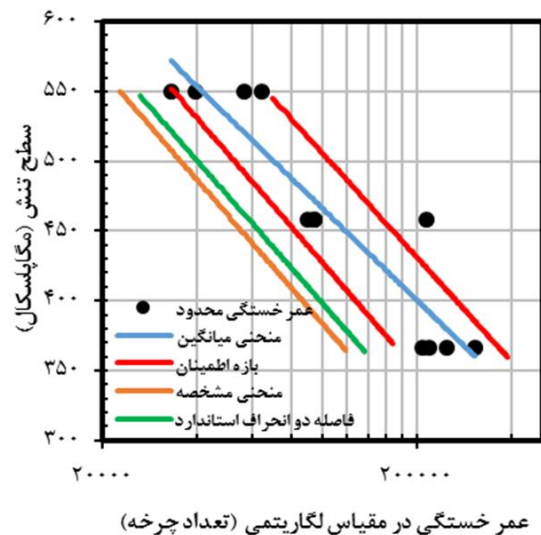
این منحنی‌ها در شرایط طراحی و قابلیت اعتماد قرار گرفته و منحنی مشخصه در نمودار ۵ الف فاصله بیشتری از کران پایین بازه پراکندگی نسبت به نمودار ۵ ب داشته و شرایط محافظه‌کارانه‌تری را رعایت می‌کند.

صحت‌سنجی خطی بودن مدل استفاده شده نیز ضروری بوده و مطابق استاندارد ASTM E-739 و درجات آزادی $\nu=9$ و $\nu=1$ ، مقدار ضریب F برای نتایج هر دو راستا برابر $5/1174$ تخمین زده شده است. نتایج محاسبات در راستای درز جوش و عمود بر آن به ترتیب برابر $0/73$ و $0/65$ به دست آمده که کمتر از ضریب F بوده و استفاده از مدل خطی باسکوئین در نتایج آزمایش قابل پذیرش است.

نتایج قرار گرفته بر روی کران‌ها و یا خارج از بازه پراکندگی می‌تواند باعث انحراف منحنی میانگین شود. به همین دلیل، باید تحلیل قابلیت اعتماد به وسیله محاسبه باقیمانده استاندارد هر کدام از داده‌ها انجام شود (شکل ۶). مقادیر هر سطح تنش در هر دو جهت به صورت مورب قرار گرفته و قدر مطلق باقیمانده استاندارد در هر دو راستا کمتر از ۳ است. در نتیجه، شرایط قابلیت اعتماد برقرار بوده و منحنی‌های میانگین دارای انحراف نیستند. بازه تغییرات باقیمانده استاندارد در راستای درز جوش و عمود بر آن به ترتیب از حدود ۲- تا ۳ و ۲- تا $1/5$ است. به همین ترتیب نمونه‌های شماره ۱۸ و ۴ دارای بیشترین باقیمانده استاندارد با قدر مطلق نزدیک به ۳ و ۲ هستند. با وجود قرار گرفتن نتایج عمر خستگی این نمونه‌ها در شکل ۵ الف و ب در خارج از بازه پراکندگی، به دلیل رعایت شرایط قابلیت اعتماد، این نتایج در معادلات توزیع نرمال و مدل خطی قابل استفاده هستند.



(الف)



(ب)

شکل ۵) منحنی میانگین تنش- عمر، منحنی مشخصه و بازه اطمینان فلز پایه لوله فولادی API X65 در ناحیه عمر محدود؛ (الف) راستای درز جوش؛ (ب) عمود بر درز جوش.

در منحنی‌های خستگی احتمال شکست بالاتر، قابلیت اعتماد پایین‌تری را به دنبال دارد. از دیدگاه مهندسی فاصله ۲ تا ۳ انحراف استاندارد از منحنی میانگین مربوط به حاشیه محافظه‌کارانه تنش- عمر است [12]. مقدار $2/275$ برای ضریب حد تیرانس یک طرفه، k ، در استاندارد ISO 12107 با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد، درجه آزادی ۱۰ و احتمال شکست ۱۰ درصد در هر دو راستا به دست آمده و منحنی مشخصه در ناحیه عمر خستگی محدود راستای درز جوش و عمود بر آن به ترتیب از معادلات (۱۱) و (۱۲) تخمین زده شده است.

$$\hat{x} = 38.26 - 3.844y - 0.49\sqrt{0.0464 + 12(y - 8.66)^2} \quad (11)$$

$$\hat{x} = 39.97 - 4.036y - 0.36\sqrt{0.0464 + 12(y - 8.66)^2} \quad (12)$$

جدول ۳) نتایج آزمایش خستگی فلز پایه لوله فولادی API X65 در راستای درز جوش به روش پلکانی در سه سطح تنش در ناحیه استحکام خستگی.

سطح تنش (پاسکال)	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۲۵×۱۰ ^۶	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۲۵×۱۰ ^۶	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۲۵×۱۰ ^۶	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۲۵×۱۰ ^۶	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۲۵×۱۰ ^۶	۲۷۵×۱۰ ^۶
لگاریتم سطح تنش	۸/۴۴	۸/۵۱	۸/۴۴	۸/۵۱	۸/۴۴	۸/۵۱	۸/۳۵	۸/۴۴	۸/۵۱	۸/۴۴	۸/۵۱
شماره آزمایش (به ترتیب روش پلکانی)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
شماره نمونه	۹	۱۵	۲۴	۲۱	۱۹	۱۱	۲۲	۱۳	۷	۱۲	۶
عمر خستگی (تعداد چرخه)	۱/۵×۱۰ ^۶	۲/۲×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶	۶/۵×۱۰ ^۵	۹/۶×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶	۳/۷×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶	۱/۵×۱۰ ^۶	۲/۲×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶
لگاریتم عمر خستگی	۶/۱۸	۵/۳۴	۶/۱۸	۵/۸۱	۵/۹۸	۶/۱۸	۵/۵۷	۶/۱۸	۶/۱۸	۵/۳۴	۶/۱۸
شکست/عدم شکست نمونه	○	×	○	×	×	○	×	○	×	×	○

جدول ۴) نتایج آزمایش خستگی فلز پایه لوله فولادی API X65 در راستای عمود بر درز جوش به روش پلکانی در سه سطح تنش در ناحیه استحکام خستگی.

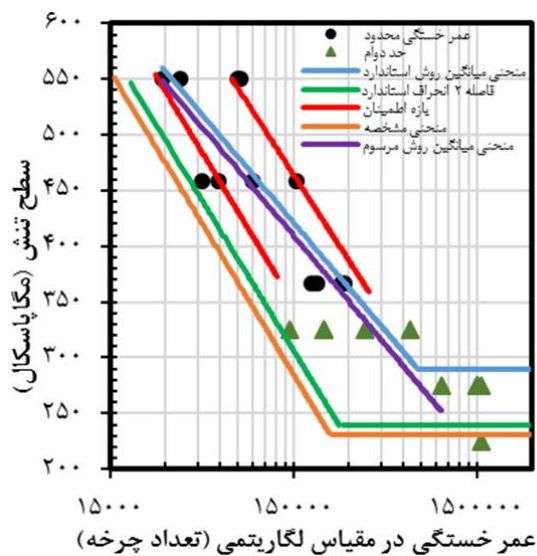
سطح تنش (پاسکال)	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۰۵×۱۰ ^۶	۳۳۵×۱۰ ^۶	۳۰۵×۱۰ ^۶	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۰۵×۱۰ ^۶	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۰۵×۱۰ ^۶	۲۷۵×۱۰ ^۶	۳۰۵×۱۰ ^۶	۳۳۵×۱۰ ^۶
لگاریتم سطح تنش	۸/۴۴	۸/۴۸	۸/۵۳	۸/۴۸	۸/۴۴	۸/۴۸	۸/۴۴	۸/۴۸	۸/۴۴	۸/۴۸	۸/۵۳
شماره آزمایش (به ترتیب روش پلکانی)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
شماره نمونه	۱۲	۱۷	۲۳	۱۰	۵	۱۳	۲۵	۱۱	۱۴	۳	۲۲
عمر خستگی (تعداد چرخه)	۱/۵×۱۰ ^۶	۱/۵×۱۰ ^۶	۵/۱×۱۰ ^۵	۴/۵×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶	۹/۸×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶	۶/۵×۱۰ ^۵	۱/۵×۱۰ ^۶	۱/۵×۱۰ ^۶	۸/۲×۱۰ ^۵
لگاریتم عمر خستگی	۶/۱۸	۶/۱۸	۶/۷۱	۵/۶۵	۶/۱۸	۵/۹۹	۶/۱۸	۶/۸۱	۶/۱۸	۶/۱۸	۵/۹۱
شکست/عدم شکست نمونه	○	○	×	×	○	×	○	×	○	×	○

۵-۲- ناحیه استحکام خستگی

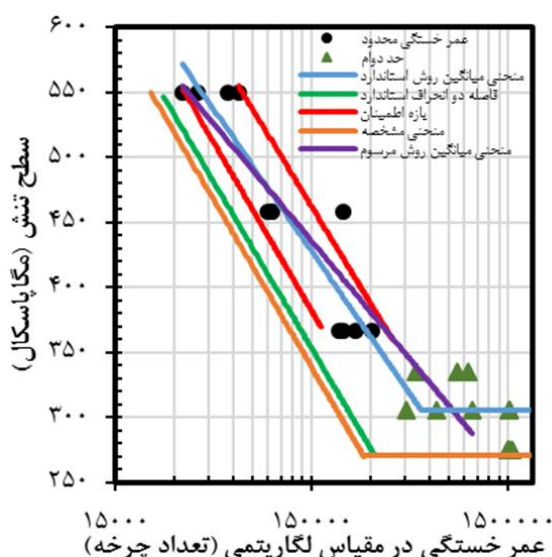
در این ناحیه، مقاومت خستگی به عنوان

جدول ۵) مقایسه نتایج انواع آزمایش خستگی و حد دوام فلز پایه و فلز جوش لوله‌های فولاد ترمومکانیکال با گریدهای مختلف.

جنس فولاد	قطر خارجی (میلی متر)	ضخامت (میلی متر)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	نوع آزمایش خستگی	جهت نمونه	حد دوام (مگاپاسکال)	مرجع
API X42	۵۰۸	۱۷/۴۸	۳۹۵	۴۶۵	کششی- فشاری	طولی	۲۵۲	[21]
API X52	۶۱۰	۱۱	۳۱۸	۴۵۰	خمشی سه نقطه‌ای	عرضی	۲۰۶/۵	[22]
API X65	۲۷۳	۲۹	۵۱۸	۶۱۴	کششی- فشاری	طولی	۳۰۰	[20]
API X70	۹۱۴	۱۲	۵۶۷	۶۴۳	کششی- فشاری	طولی	۲۸۱	[23]
API X80	۵۰۸	۲۶/۴	۵۵۵	۶۲۵	کششی- فشاری	طولی	۳۸۰	[24]
API X65	۱۲۱۹	۱۴/۳	۵۴۸	۶۲۴	خمشی- چرخشی	راستای درز جوش	۲۹۱	تحقیق حاضر
API X65	۱۲۱۹	۱۴/۳	۵۴۸	۶۲۴	خمشی- چرخشی	عمود بر درز جوش	۳۰۵	تحقیق حاضر
درز جوش API X65	۱۲۱۹	۱۴/۳	۵۴۸	۶۲۴	خمشی- چرخشی	مارپیچ	۲۵۸/۵	[4]



(الف)



(ب)

شکل ۷) منحنی میانگین تنش- عمر، منحنی مشخصه و بازه اطمینان فلز پایه لوله فولادی ترمومکانیکال API X65؛ (الف) راستای درز جوش؛ (ب) عمود بر درز جوش.

در شکل ۷ نمودارهای نهایی تنش- عمر فلز پایه فولاد API X65 در هر دو راستا نشان داده شده که منحنی میانگین در ناحیه عمر خستگی محدود از معادلات (۷) و (۸) پیروی کرده و در ناحیه استحکام خستگی حد دوام در نظر گرفته می‌شود. شیب منحنی در ناحیه عمر خستگی محدود در راستای درز جوش به مقدار 0.2 کمتر از عمود بر آن است. مطابق استاندارد ISO 12107 نقطه زانویی از محل تلاقی حد دوام با منحنی تنش- عمر در ناحیه عمر خستگی محدود به دست می‌آید که در راستای درز جوش و عمود بر آن به ترتیب در $5/5 \times 10^5$ و $7/5 \times 10^5$ چرخه تعیین شده است. در راستای عمود بر درز جوش به دلیل بیشتر بودن حد دوام و شیب منحنی نسبت به راستای درز جوش، نقطه زانویی در عمر خستگی کمتری حاصل شده است. همچنین، در ناحیه استحکام خستگی، انحراف استاندارد در راستای درز جوش نسبت به عمود بر آن بیشتر بوده (حدود 10 مگاپاسکال) و در نتیجه سطح تنش حد کمینه آن نیز (به منظور رعایت محافظه کارانه تر شرایط طراحی و قابلیت اعتماد) حدود 40 مگاپاسکال کمتر است.

در نمودار تنش- عمر در هر دو راستا با کاهش سطح تنش فاصله بین منحنی میانگین و منحنی مشخصه در حال افزایش است که بیانگر افزایش پراکندگی با کاهش سطح تنش است. با توجه به بیشتر بودن انحراف استاندارد در راستای درز جوش نسبت به عمود بر آن، نرخ افزایش ف

در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵ درصد به دست آمد. حد دوام میانگین و حد دوام کمینه در راستای درز جوش به ترتیب ۲۹۱ و ۲۳۱ مگاپاسکال و در راستای عمود بر آن به ترتیب ۳۰۵ و ۲۷۰ مگاپاسکال به دست آمد.

مقادیر میانگین در هر دو راستا همانند تحقیقات سایر دانشمندان، به خوبی در محدوده استحکام خستگی پیش‌بینی شده برای فولادهای با استحکام نهایی کمتر از ۱۴۰۰ مگاپاسکال قرار گرفته است^[۱۹]. همچنین، این مقادیر در مقایسه با حد دوام فلز جوش (۲۵۸ مگاپاسکال) همین لوله فولادی دارای سطح بالاتری بوده که به لحاظ منطقی مورد انتظار است.

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

تاییدیه 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 تامین شده است.

منابع

- 1- Mohtadi-Bonab MA, Eskandari M, Sanayei M, Das S. Microstructural aspects of intergranular and transgranular crack propagation in an API X65 steel pipeline related to fatigue failure. *Engineering Failure Analysis*. 2018 Dec 1;94:214-25.
- 2- Nguyen TT, Heo HM, Park J, Nahm SH, Beak UB. Fracture properties and fatigue life assessment of API X70 pipeline steel under the effect of an environment containing hydrogen. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021 Apr;35(4):1445-55.
- 3- Farhad F, Smyth-Boyle D, Zhang X. Fatigue of X65 steel in the sour corrosive environment—A novel experimentation and analysis method for predicting fatigue crack initiation life from corrosion pits. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2021 May;44(5):1195-208.
- 4- Tavid M, Hashemi S. Endurance limit determination of weld metal of API X65 gas pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2022 Dec 10;23(1):33-44. [In Persian]
- 5- Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012 Oct 1;98:8-15.
- 6- Hashemi SH, Kymyabakhsh M. Experimental and numerical determination of fracture toughness in gas pipeline steel of grade API X65. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2013 Dec 22;45(2):1-9. [In Persian]
- 7- Specification for Line Pipe, API Specification 5L, 45th Edition. USA: American Petroleum Institute; 2013.

منحنی تنش- عمر به دست آمده در این تحقیق براساس روش استاندارد است؛ در حالی که در سایر مقالات این منحنی با انجام تعدادی آزمایش در سطوح مختلف تنش و در نظر گرفتن حد دوام (نقطه زانویی) در تعداد چرخه 10^6 تا 10^7 ، با استناد به مرجع^[۱۹]، و گرفتن رگرسیون از همه نتایج سطوح تنش (با حذف نمونه‌های دارای عمر بینهایت) منحنی کلی تنش- عمر تخمین زده شده است. در تحقیق جاری نیز به روش مرسوم سایر مقالات منحنی کلی تنش- عمر در هر دو راستا به دست آمده است (شکل ۷). در راستای درز جوش شیب هر دو منحنی تقریباً یکسان بوده و در همه سطوح تنش منحنی روش مرسوم محافظه‌کارانه‌تر از منحنی میانگین روش استاندارد است (شکل ۷ الف). حد دوام نیز به روش مرسوم در سطح تنش ۲۵۰ مگاپاسکال حاصل شده است. در راستای عمود بر درز جوش شیب منحنی روش مرسوم کمتر از منحنی میانگین روش استاندارد بوده و سطح تنش ۲۸۰ مگاپاسکال به عنوان حد دوام تخمین زده شده است. در شرایط تنش ثابت و با مقایسه دو منحنی، در سطوح تنش نزدیک به استحکام نهایی و حد دوام به ترتیب روش مرسوم و منحنی میانگین روش استاندارد محافظه‌کارانه‌تر هستند (شکل ۷ ب). حد کمینه استحکام خستگی در روش استاندارد در هر دو راستا کمتر از روش مرسوم است. از آنجایی که در روش استاندارد منحنی مشخصه به عنوان شرایط طراحی و قابلیت اعتماد در نظر گرفته می‌شود، این منحنی در دو ناحیه عمر خستگی محدود و استحکام خستگی در هر دو راستا نسبت به روش مرسوم قابل قبول‌تر بوده و به خوبی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، در این تحقیق از روش مخصوص در ناحیه استحکام خستگی به منظور به دست آوردن حد دوام استفاده شده که در روش مرسوم جهت تعیین حد دوام شیوه خاصی تعریف نشده است.

۷- جمع بندی

در این تحقیق منحنی تنش- عمر و حد دوام فلز پایه لوله فولادی API X65 در دو راستای درز جوش و عمود بر آن با انجام آزمایش خستگی خمشی- چرخشی تیر یکسرگیردار به دست آمد. ابتدا ورق فولادی از لوله با مقیاس صنعتی با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر جدا شده، سپس ۲۴ و ۲۵ نمونه به ترتیب در راستای درز جوش و عمود بر آن براساس استاندارد ISO 1143 تهیه شد. در راستای درز جوش در هر کدام از ناحیه‌های عمر خستگی محدود و استحکام خستگی ۱۲ نمونه و در راستای عمود بر درز جوش در این دو ناحیه به ترتیب ۱۲ و ۱۳ نمونه آزمایش شد. نتایج حاصل از آزمایش در هر دو ناحیه مطابق استاندارد ISO 12107 و ASTM E-739 با تحلیل آماری بررسی شد. همچنین، برقراری شرایط توزیع نرمال، مدل خطی و تحلیل قابلیت اعتماد داده‌های آزمایش بررسی گردید و منحنی میانگین تنش- عمر، منحنی مشخصه و بازه پراکندگی در ناحیه عمر

- 8- Hashemi SH. Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011 Jan 25;528(3):1648-55.
- 9- Farrahi A. Experimental evaluation of fracture toughness in spiral weld of thermomechanical steel pipe. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2013 Sep 3;2(4):25-35. [In Persian]
- 10- Metallic Materials—Rotating Bar Bending Fatigue Testing. Switzerland: International Organization for Standardization (ISO); 2010.
- 11- Geometrical Product Specifications (GPS)- Surface texture: Profile method- Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. Switzerland: International Organization for Standardization (ISO); 1997.
- 12- Barbosa JF, Correia JA, Freire Júnior RC, Zhu SP, De Jesus AM. Probabilistic SN fields based on statistical distributions applied to metallic and composite materials: State of the art. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019 Aug;11(8):1687814019870395.
- 13- Gope PC. Determination of minimum number of specimens in SN testing. *J. Eng. Mater. Technol.*. 2002 Oct 1;124(4):421-7.
- 14- Metallic materials — Fatigue testing — Statistical Planning and Analysis of Data. Switzerland: International Organization for Standardization (ISO); 2003.
- 15- Strzelecki P, Sempruch J, Tomaszewski T. Analysis of selected mathematical models of high-cycle SN characteristics. *Technical Sciences*. 2017 Apr 13;20(3):227-40.
- 16- 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.
- 17- Bassoli E, Denti L, Comin A, Sola A, Tognoli E. Fatigue behavior of as-built L-PBF A357. 0 parts. *Metals*. 2018 Aug 11;8(8):634.
- 18- Pilkey WD, Pilkey DF, Bi Z. Peterson's stress concentration factors. John Wiley & Sons; 2020 Feb 11.
- 19- Budynas RG, Nisbett JK. Shigley's mechanical engineering design. New York: McGraw-Hill; 2011.
- 20- Farhad F, Zhang X, Smyth-Boyle D. Fatigue behaviour of corrosion pits in X65 steel pipelines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019 Mar;233(5):1771-82.
- 21- 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 Oct 1;56:396-402.
- 22- Alhussein A, Capelle J, Gilgert J, Tidu A, Hariri S, Azari Z. Static, dynamic and fatigue characteristics of the pipeline API 5L X52 steel after sandblasting. *Engineering Failure Analysis*. 2013 Jan 1;27:1-5.
- 23- 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 Jan 25;138:635-9.
- 24- 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 and Engineering: A*. 2016 Mar 7;657:96-103.