مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9، ص‌ص 407-416

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تعیین ضرایب معادلات اساسی خزشی لایه‌های جوش لب به لب لوله فولادی 1.25Cr0.5Mo

فرید وکیلی‌تهامی[1*]، اکبر رسولیان[2]، آرش محمدعلیزاده‌فرد[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق‌پستی 5166614766، f_vakili@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 تیر 1394

پذیرش: 03 مرداد 1394

ارائه در سایت: 31 مرداد 1394

کلید واژگان:

آلیاژ فولاد پایه کروم- مولیبدن

رفتار خزشی

بررسی تجربی

ضرایب معادلات اساسی

منطقه تحت تأثیر حرارت

چکیده

بررسی رفتار خزشی اتصالات جوشی لوله‌های فولادی تحت فشار حامل سیال داغ، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، رفتار خزشی اتصال جوش لب‌به‌لب لوله‌ی فولادی 1.25Cr0.5Mo مورد بررسی قرار گرفته است. محل جوش به سه ناحیه‌ی ماده‌ی اصلی (BM)، منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) و ناحیه جوش (WM) تقسیم و سپس معادلات اساسی خزشی هر ناحیه به‌دست آمده است. ضرایب معادلات اساسی برای هر ناحیه با استفاده از نتایج آزمایش‌های خزش تک‌محوره و به‌کمک روش کمینه مربعات تعیین و نتایج با آن‌چه در مراجع مختلف برای آلیاژهای دیگر ارائه شده است، مقایسه شده‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تست خزش تک‌محوره در تنش‌های 30، 35، 40 و 50 مگاپاسکال و دماهای 670، 700، 725، 750 و 800 درجه سانتیگراد انجام شده است. نمونه‌های آزمایشی به‌صورت مستقیم از فلزهای پایه و جوش به‌روش ماشین‌کاری تهیه شده‌اند. از آن‌جا که تهیه نمونه با ابعاد موردنیاز از HAZ ممکن نیست، روشی برای تعیین ضرایب معادلات اساسی این منطقه پیشنهاد شده است. صحت روش پیشنهادی با مقایسه ضرایب معادلات اساسی محاسبه‌شده به‌کمک این روش و مقادیر به‌دست‌آمده براساس نتایج تجربی برای فلز جوش تأیید شده است. مشاهدات میکروگرافی و سختی‌سنجی نشان می‌دهند که ساختار لایه‌ها باهم تفاوت داشته و این امر در ضرایب معادلات اساسی و نرخ کرنش خزشی پایدار تأثیر به‌سزایی دارد. نتایج نشان می‌دهند که در محدوده تنش‌های موردنظر، نرخ کرنش خزشی پایدار فلز جوش از نرخ کرنش فلز پایه و نیز منطقه HAZ بیشتر بوده و نرخ کرنش منطقه‌ی HAZ در تنش‌های پایین از فلز پایه بیشتر است.

Obtaining the creep constitutive parameters for the layers of butt-welded 1.25Cr0.5Mo pipe

Farid Vakili-Tahami[1*], Akbar Rasoulian[1], Arash Mohammad Alizadeh Fard[1]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* P.O.B. 5166614766 Tabriz, Iran, f_vakili@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 July 2015

Accepted 25 July 2015

Available Online 22 August 2015

Keywords:

Cr- Mo Steel Alloy

Creep Behavior

Experimental Investigation

Constitutive Parameters

Heat Affected Zone

ABSTRACT

Creep behavior of butt-welded joints in pressurized steel pipes operating at high temperature is one of the major concerns in industry. The creep behavior of 1.25Cr0.5Mo weldment has been investigated in this paper. Three different layers: Base Metal (BM), Heat Affected Zone (HAZ) and Weld Metal (WM) have been considered and the creep behavior of each layer has been modeled using constitutive equations. Constitutive parameters have been determined using the results of uniaxial constant load creep tests. A numerical approach based on least square method has been used to calculate optimum values of the constitutive parameters. The results have been compared with those provided in the literature for different alloys and good agreement has been observed. Creep tests have been carried out at 30, 35, 40 and 50 MPa and temperature levels of 670, 700, 725, 750 and 800 °C. Specimens have been machined out from Base and Weld Metal. Since machining specimens with appropriate size from HAZ is impossible, a method is proposed to obtain constitutive parameters for this layer. This method is validated by comparing the constitutive parameters that have been calculated for WM with those obtained using creep tests. Micrographical and microhardness tests show that there are significant differences in the microstructure of the layers. Consequently, the creep behavior of layers is different. The results show that steady state creep strain rate for WM is higher than the rates for BM and HAZ; also, at low stress levels, creep strain rate of HAZ is larger than BM.

1- مقدمه

اغلب سازه‌ها در صنعت با روش‌های گوناگونی به یکدیگر متصل می‌شوند. روش‌های متفاوت اتصال فلزات به یکدیگر برحسب نوع فرایند و یا بنیان علمی آن‌ها به دسته‌های مختلفی چون روش‌های مکانیکی (پیچ، پرچ، خار و ...)، متالوژیکی (جوش‌کاری، لحیم‌کاری و ...) و شیمیایی (چسب‌های معدنی وآلی) طبقه‌بندی می‌شوند [1].

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

F. Vakili-Tahami, A. Rasoulian, A. Mohammad Alizadeh Fard, Obtaining the creep constitutive parameters for the layers of butt-welded 1.25Cr0.5Mo pipe, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 407-416, 2015 (In Persian)

جوش‌کاری جزء یکی از اتصالات متالوژیکی و دائم بوده که در صنایع مختلف و با توجه به کاربرد و کارکرد آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدیهی است در لوله‌ها که برای انتقال گازها و مایعات به‌کار می‌روند، استفاده از جوش‌کاری برای اتصالات آن‌ها اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد. نوع جوش‌کاری برحسب شرایط مختلف از جمله نوع فلزات متصل‌شونده و اندازه‌های آن‌ها متفاوت است.

بیشتر قطعات مکانیکی در دمای بالا و تحت نیروهای ثابت یا متغیر عمل می‌کنند. مهم‌ترین نمونه‌ها برای چنین قطعاتی، لوله‌های موجود در بویلرهای نیروگاهی و صنایع پتروشیمی، مخازن تحت فشار و نیز پره‌های توربین‌های بخار و یا گاز است. هم‌اکنون نیز تمایل شدیدی نسبت به افزایش راندمان حرارتی سیکل‌های ترمودینامیکی با استفاده از افزایش دماهای کاری سیستم وجود دارد تا با مقدار انرژی حرارتی یا سوخت مصرفی کم، بیشینه توان ممکن تولید شود. با توجه به ادبیات فن، افزایش درجه حرارت تا حد $0/3T_m$ که در آن T_m درجه حرارت ذوب ماده است، مسئله خزش[1] مطرح می‌شود [2]. به‌ویژه در شرایطی که مدت زمان اعمال بار بر قطعات طولانی باشد، امکان افزایش کرنش با افزایش دما و گذشت زمان حتی تحت یک بار ثابت نیز وجود دارد؛ این نوع کرنش زمانمند در دماهای بالا، خزش نامیده می‌شود. در این شرایط، حتی علی‌رغم ثابت‌بودن نیروهای مکانیکی وارده بر جسم، مقدار کرنش خزشی با زمان افزایش یافته و در نهایت سبب گسیختگی قطعه می‌شود. طراحی قطعات در بارگذاری خزشی براساس مبنای عمر گسیختگی (عمر خزشی) و یا براساس کرنش خزشی محدود صورت می‌گیرد؛ برای نمونه مخازن تحت فشار و یا لوله‌های حاوی بخار گرم در فشارهای بالا که در نیروگاه‌ها به‌خصوص نیروگاه‌های هسته‌ای قابل استفاده و از گروه اول و پره‌های توربین‌های گازی و بخار از نوع دوم است. از آن‌جایی‌که در اغلب مواد مهندسی، مقدار کرنش به‌طور نمایی وابسته به درجه حرارت است، اهمیت بررسی تغییرات دما و آثار آن در توزیع کرنش و تنش نسبت به زمان کاملاً آشکار می‌شود [2].

لو و پیتن [3] در سال 1998 میلادی بیان داشتند که حالت تنش در تست خزشی نمونه‌های جوش‌شده که برای پیش‌بینی عملکرد جوش به‌کار می‌رود، اساساً با آن‌چه در شرایط جوش‌های در هنگام سرویس اتفاق می‌افتد، متفاوت است. ایشان برای تأیید این امر نمونه‌های تست خزشی جوش‌شده را همراه با برخی موقعیت‌های عملی اتصال جوشی در معرض سرویس، توسط روش المان محدود مدل‌سازی کرده و نتایج را مورد بررسی قرار دادند. مبنای این بررسی را نیز تنش اصلی نخست قرار دادند، زیرا به گفته ایشان در فولادهایی که شکست با نرمیت پایین[2] اتفاق می‌افتد، تنش اصلی نخست به‌عنوان تنش کنترلی به‌کار می‌رود.

در سال 2000 میلادی، لاها و همکاران [4] خواص خزشی فلز پایه 2.25Cr 1Mo، فلز جوش و اتصال جوشی آن را در دماهای 773، 823 و 873 کلوین و تنش‌های 80 تا 300 مگاپاسکال مورد بررسی قرار دادند. اتصال جوشی، نرخ خزشی بسیار بالا و همچنین عمر گسیختگی پایینی نسبت به بررسی‌های جداگانه فلز پایه و فلز جوش نشان داد. آنان تست‌های خزشی با شبیه‌سازی انواع ساختارهای منطقه تحت تأثیر حرارت[3] (HAZ) انجام دادند که شامل نواحی بینیت درشت‌دانه، بینیت ریزدانه و ساختار بحرانی درونی در دمای 873 کلوین بود. ناحیه بینیت درشت‌دانه منطقه HAZ استحکام خزشی بالا و ناحیه بحرانی درونی دارای استحکام خزشی پایینی نسبت به فلز پایه و فلز جوش را گزارش کردند، درحالی‌که ناحیه بینیت ریزدانه منطقه HAZ دارای استحکام خزشی مشابه فلز پایه و فلز جوش بود. ایشان برای تخمین خواص اتصال جوش از خواص اجزای تشکیل‌دهنده اتصال، یک مدل ترکیبی اصلاح‌شده با یک پارامتر متقابل را با موفقیت به‌کار بردند. خواص تخمین‌زده‌شده نیز شامل نرخ خزشی پایدار، عمر گسیختگی و نرمیت گسیختگی[4] بود.

در سال 2004 میلادی، فونتس و آلکانتارا [5] از فولاد در معرض سرویس 1.25Cr0.5Mo (استفاده‌شده در دمای 480 درجه سانتی‌گراد برای بالاتر از 20 سال) برای مطالعه استفاده کردند. کار ایشان شامل بررسی رفتار خزشی نواحی متأثر از عملیات حرارتی پس از جوش‌کاری[5] (PWHT) اعمال‌شده در هنگام تعمیر جوش این فولاد بود. ایشان بیان کردند که استحکام خزشی ماده تحت تأثیر PWHT کاهش می‌یابد و گسیختگی خزشی نسبت به ماده‌ای که در معرض سرویس بوده و تحت تأثیر فرایند تعمیر جوش قرار نگرفته است، تقریباً 30درصد زودتر اتفاق می‌افتد.

یکی از بهترین کارها در زمینه بررسی رفتار خزشی جوش‌ها، توسط واتانابه و همکاران [6] در سال 2005 میلادی انجام گرفته است. در این تحقیق ویژگی‌های گسیختگی خزشی و تغییرات ساختاری، توسط انجام تست‌های بلندمدت نمونه‌های اتصال جوشی فولاد P91 آزمایش شده است. ایشان رابطه بین تغییرات ساختاری و تشکیل و گسترش آسیب خزشی نمونه اتصال جوشی در طول خزش را نیز مورد مطالعه قرار داده‌اند. از جمله‌ی نتایج تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- استحکام گسیختگی خزشی نمونه‌های اتصال جوشی نسبت به نمونه‌های فلز پایه در تمام شرایط پایین‌تر است.
- محل گسیختگی از فلز جوش در شرایط تنش بالا به منطقه HAZ در شرایط تنش پایین (زمان طولانی‌تر) منتقل می‌شود.

فوجی‌بایاشی [7] در سال 2006 میلادی، برای توضیح و روشن‌ساختن دلیل و فاکتورهای شتاب ترک تیپ چهار[6]، رفتار خزشی مقطع جوش و ریزساختار ناحیه بحرانی دورنی منطقه HAZ را با به‌کار بردن فولاد 1.25Cr0.5Mo در معرض سرویس (که به مدت 23 سال در دمای500 درجه سانتی‌گراد در یک پالایشگاه کار کرده بود) مورد آزمایش قرار داد. ایشان از قطعات جوش‌شده شیاردار مارپیچی برای تست استفاده کرده و نشان دادند که زمان آغاز خرابی تیپ چهار برای این قطعات به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد که این امر در نتیجه تراکم آسیب متمرکز در ریشه شیار V شکل است و معلوم شد که حالت تنش چندمحوره نقش کلیدی در خرابی تیپ چهار دارد.

مث و لژیال [8] در سال 2013 میلادی، به مدل‌سازی رفتار خزشی و مکانیزم آسیب یک اتصال جوشی از جنس فولاد اصلاح‌شده 9Cr1Mo در بازه دمایی 450-650 درجه سانتی‌گراد پرداخته‌اند. ایشان برای مدل‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود CAST3M استفاده کرده‌اند. مقادیر پارامترهای مختلف فازهای سه‌گانه فلز پایه، فلز جوش و منطقه HAZ نیز با توجه به مقادیر موجود در ادبیات فن انتخاب و استفاده شده‌اند. هرچند مدل ارائه‌شده دارای محدودیت‌هایی از نظر بازه دمایی و پیش‌بینی موقعیت واماندگی بود، اما تطابق خوبی میان نتایج مدل‌سازی و داده‌های تجربی موجود در بازه دمایی تعیین‌شده وجود داشت. نتایج، نشان‌دهنده تغییر مکانیزم واماندگی از

1- Creep
2- Low Ductility
3- Heat Affected Zone
4- Rupture Ductility
5- Post Weld Heat Treatment
6- Type IV

گسیختگی نرم ویسکوپلاستیک به آسیب حفره خزشی از نوع نابه‌جایی در منطقه HAZ، در دماهای بالا و تنش‌های پایین بود. برای دماهای پایین و تنش‌های بالا نیز، براساس هم داده‌های تجربی و هم نتایج مدل‌سازی، واماندگی در فلز جوش رخ می‌داد.

ژانگ و همکاران [9] در سال 2015 میلادی، به‌بررسی ریزساختار اتصالات جوشی ساخته‌شده از فولاد مارتنزیتی 10درصد کروم مقاوم در برابر حرارت و نیز رفتار ترک تیپ چهار در طول گسیختگی خزشی در دمای650 درجه سانتی‌گراد و فشار 130-250 مگاپاسکال پرداخته‌اند. نتایج حاکی از این است که ترک تیپ چهار در ناحیه HAZ دانه‌ریز اتفاق می‌افتد و حفره‌های ناشی از خزش، اغلب در نقاط واقع بر فصل مشترک مرزدانه‌های آستنیتی پیشین ایجاد می‌شوند.

بارال و همکاران [10] در سال 2015 میلادی، به بررسی تجربی رفتار خزشی فولادی P91 در حضور اتصال جوشی پرداخته‌اند. ایشان در این پژوهش از نمونه‌های ساخته‌شده از دو ناحیه مختلف صفحات جوش‌شده از جنس فولاد P91 استاندارد با تنشی حدود 50-190 مگاپاسکال و دمای 600-650 درجه سانتی‌گراد استفاده کرده‌اند. بررسی نتایج آزمایش تجربی، نشان داده است که نمونه‌های دارای منطقه جوش در مقایسه با نمونه‌های شامل فلز پایه استحکام گسیختگی کمتری دارند. نتایج پژوهش همچنین نشان داده‌اند که تأثیر جوش‌کاری بر کاهش نرمیت گسیختگی بسیار قابل ملاحظه‌تر از تأثیر آن بر کاهش استحکام گسیختگی است و مقدار تغییر مکان موضعی در نمونه‌های گسیخته‌شده دارای منطقه جوش بر خلاف نمونه‌های بدون جوش چندان قابل ملاحظه نیست.

به‌دلیل اهمیت رفتار مکانیکی اتصالات جوشی، این اتصالات علاوه‌بر رفتار خزشی از نظر رفتار مکانیکی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای نمونه نخودچی و همکاران [11] در سال 2014 میلادی، به بررسی عددی و تجربی توزیع دما و تنش پسماند در فرایند جوش‌کاری سه‌مرحله‌ای دو ورق از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 321 با ضخامت غیریکسان پرداخته‌اند و یا کریمی‌منش و همکاران [12] که در سال 2015 میلادی، به بررسی تأثیر حرارت ورودی قوس و سرعت جوش‌کاری بر مقاومت ضربه دما پایین فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 L پرداخته‌اند.

جمع‌بندی منابع موجود در ادبیات فن در خصوص رفتار خزشی اتصالات جوشی نشان می‌دهد که برای مدل‌سازی عددی این اتصالات، نیاز به تعیین ضرایب معادلات اساسی لایه‌های متالوژیکی اطراف محل جوش وجود دارد؛ علی‌رغم این‌که آلیاژ 1.25Cr0.5Mo در صنایع پتروشیمی و تولید نیرو کاربرد فراوانی دارد، تعیین ضرایب معادلات اساسی لایه‌های جوش آن از نظر رفتار خزشی مورد بررسی قرار نگرفته، هرچند از سایر دیدگاه‌ها این آلیاژ مورد توجه محققین مختلف بوده است [5,7].

در این پژوهش رفتار خزشی اتصال جوش لب به‌لب لوله فولادی آلیاژ 1.25Cr0.5Mo مورد بررسی قرار گرفته است. از نظر متالوژی مؤثر در رفتار خزشی، محل جوش به سه ناحیه فلز پایه[1] (BM یا PM)، منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) و فلز جوش[2] (WM) تقسیم و رفتار خزشی هر ناحیه براساس معادلات اساسی به‌دست‌آمده، مدل شده است. ضرایب معادلات اساسی نورتن[3] برای نواحی مختلف جوش، اعم از ماده اصلی، ماده جوش با استفاده از نتایج آزمایش‌های خزش تک‌محوره و به‌کمک روش کمینه مربعات تعیین شده و نتایج با آن‌چه در مراجع مختلف برای آلیاژهای دیگر ارائه شده مقایسه شده است. آزمایش‌های خزش با استفاده از دستگاه تست خزش تک‌محوره در تنش‌های 30، 35، 40 و 50 مگاپاسکال و دماهای 670، 700، 725، 750 و 800 درجه سانتی‌گراد با نیروی ثابت انجام شده است. نمونه‌های آزمایشی به‌صورت مستقیم از ماده پایه و فلز جوش به‌روش ماشین‌کاری تهیه شده است. از آن‌جا که تهیه نمونه آزمایشی با ابعاد موردنیاز از لایه HAZ ممکن است. روشی برای تعیین ضرایب معادلات اساسی این لایه پیشنهاد شده است. صحت روش پیشنهادی با مقایسه مقادیر محاسبه‌شده ضرایب معادلات اساسی به‌کمک این روش و مقادیر به‌دست‌آمده براساس نتایج تجربی برای فلز جوش تأیید شده است.

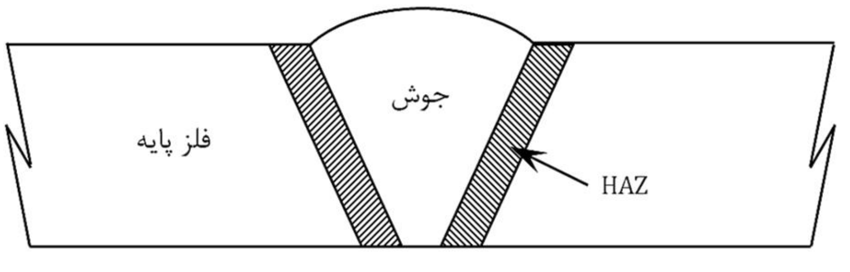
2- فرایند جوش‌کاری

در طول فرایند جوش‌کاری، فلز مذاب دارای دمای بسیار بالایی است و جوش به‌عنوان یک ناحیه فولاد ریخته در نظر گرفته می‌شود. به این که نواحی نزدیک مذاب جوش نسبتاً سرد است، یک گرادیان دمایی شدید از جوش به‌طرف فلز پایه ایجاد شده و در مجاورت آن ساختارهای کریستالی متفاوتی به‌وجود می‌آید و به‌دلیل تغییر نرخ سردشدن، تغییرات عمده‌ای در ساختار آن رخ می‌دهد.

در جوش‌کاری فولادها به‌دلیل بالابودن دمای فلز مذاب، در طرفین منطقه جوش‌کاری دما به بالای دمای تبلور مجدد[4] رسیده و موجب تغییر ساختار آن منطقه می‌شود. همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود قطعه جوش‌شده دارای سه منطقه مختلف فلز جوش (WM)، منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM یا PM) بوده که خواص آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. منطقه بین فلز جوش و فلز پایه به منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) معروف بوده و با توجه به نوع فلزات متصل‌شونده، نوع فرایند جوش‌کاری و همچنین شرایط حاکم می‌تواند از لحاظ اندازه و دانه‌بندی تغییر کند. به‌دلیل تغییر ساختار کریستالی در منطقه HAZ، برخی خواص مکانیکی از جمله مقاومت در برابر خستگی و خزش آن منطقه، هم با فلز جوش و هم با فلز پایه متفاوت خواهد بود [13].

2-1- جوش‌کاری لوله‌ها

در این پژوهش جوش‌کاری قوسی گاز- تنگستن[5] (GTAW) که از دسته جوش‌کاری‌های ذوبی[6] به‌شمار می‌آید، مورد بررسی قرار گرفته است. جوش‌کاری GTAW فرایندی است که فلزات را توسط حرارت‌دادن آن‌ها ذوب کرده و به‌هم متصل می‌کند، که این امر به‌وسیله برقراری قوس بین الکترود تنگستن غیرمصرفی و فلزات درگیر، اتفاق می‌افتد. گیره نگهدارنده الکترود تنگستن، از یک سو به سیلندر گاز محافظ و از سوی دیگر به یک انتهای منبع توان متصل شده است. الکترود تنگستن معمولاً به یک تیوب مسی خنک‌شده با آب به‌نام تیوب تماسی[7] متصل است. تیوب تماسی نیز به کابل جوش‌کاری



شکل 1 شکل شماتیک نواحی مختلف قطعه جوش‌شده

1- Base Metal or Parent Metal
2- Weld Metal
3- Norton
4- Recrystallization
5- Gas Tungsten Arc Welding
6- Fusion Weldings
7- Contact tube

متصل شده که این امر هم منجر به ورود جریان جوش‌کاری از منبع توان به الکترود شده و هم سبب خنک شدن الکترود و جلوگیری از حرارت بیش از حد آن می‌شود. قطعه‌کار نیز به انتهای دیگر منبع توان توسط کابل متصل است. گاز محافظ از بدنه‌ی گیره وارد شده و توسط نازلی به‌سمت حوضچه جوش هدایت می‌شود تا آن‌را از هوای اطراف محافظت کند. محافظت از هوای اطراف در GTAW خیلی بهتر از روش‌هایی مانند جوش‌کاری قوسی فلز پوشش‌دار (SMAW) است، زیرا یک گاز خنثی مانند آرگون یا هلیم معمولاً به‌عنوان گاز محافظ به‌کاررفته و به‌طور مستقیم به‌سمت حوضچه جوش هدایت می‌شود.

لوله‌های مورد بررسی از جنس 1.25Cr0.5Mo (ASTM A213 Gr.T11) با قطر خارجی 51 میلی‌متر و ضخامت 4/5 میلی‌متر است که در ساخت تیوب‌های قسمت سوپرهیتر بویلر نیروگاه‌های بخار از جمله در بسیاری از واحدهای تولید نیروی مجتمع‌های پتروشیمی ایران از آن استفاده شده است. این فولاد جزو فولادهای کروم- مولیبدن مقاوم به خزش محسوب می‌شود و کاربرد بسیاری در سیستم‌های حرارتی- مکانیکی دارند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد 1.25Cr0.5Mo به‌ترتیب در جدول‌های 1 و 2 ارائه شده است.

لوله‌های موردنظر بر پایه دستورالعمل جوش‌کاری (WPS)[1] برای جوش‌کاری آماده‌سازی شده‌اند (شکل 2). پیش ازآغاز جوش‌کاری، قطعات تا دمای درحدود 200 درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده و جوش‌کاری GTAW با فلز پرکننده ER80S-B2 انجام می‌شود. این پرکننده، فولاد آلیاژی 1.25Cr0.5Mo با رویه مسی است که براساس استاندارد AWS[2] تولید می‌شود [14].

تعداد پاس‌های جوش برابر سه پاس بوده (شکل 3) و عملیات حرارتی پس از جوش‌کاری (PWHT) در دمای 660 درجه سانتی‌گراد برای یک ساعت انجام می‌شود. شکل 4 نیز سطح مقطع اتصال جوش را نشان می‌دهد. باقی اطلاعات فنی مربوط به فرایند جوش‌کاری در جدول 3 نیز خلاصه شده است.

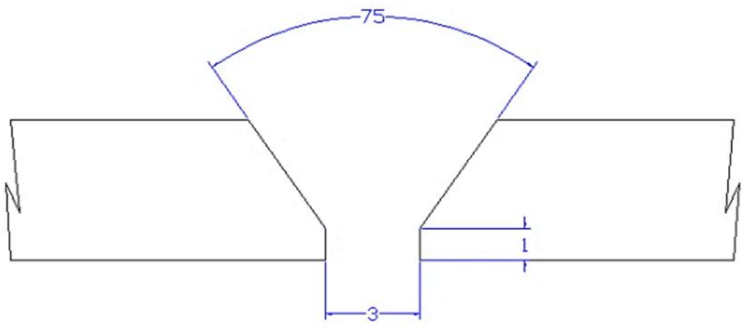
جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ 1.25Cr0.5Mo [15]

جزء ساختاری	درصد
کربن (C)	0/05 - 0/15
منگنز (Mn)	0/3 - 0/6
فسفر (P)	0/025 (حد بالا)
گوگرد (S)	0/025 (حد بالا)
سیلیسیم (Si)	0/5 - 1/0
کروم (Cr)	1 - 1/5
مولیبدن (Mo)	0/44 - 0/65

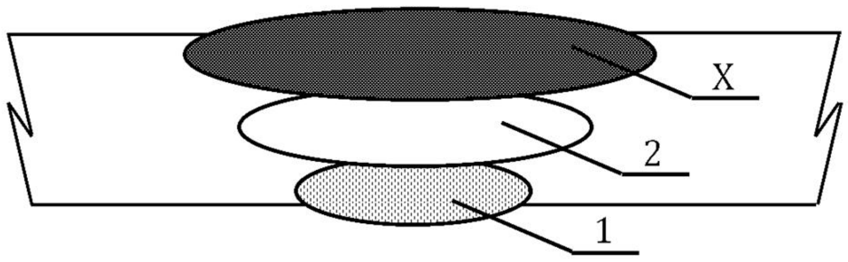
جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژ 1.25Cr0.5Mo در دماهای مختلف [16]

سطح کاهش‌یافته (%)	افزایش طول (%)	استحکام کششی (MPa)	حد تسلیم (MPa)	دما (°C)
76	33	524/02	355/782	21
75	30	475/76	248	93/33
74	29	468/86	241/33	204/44
73	22	530/92	248/22	315/55
71	26	565/39	220/64	426/66
76	32	441/39	206/85	537/78
77	35	393/02	213/75	565/56

1- Welding procedure specification
2- American Welding Society



شکل 2 نحوه آماده‌سازی لبه‌های لوله‌ها برای جوش‌کاری



شکل 3 تعداد پاس‌های جوش برای جوش‌کاری لوله‌ها

شکل 4 سطح مقطع اتصال جوش

جدول 3 مشخصات فنی جوشکاری لوله‌ها

مشخصه جوش‌کاری	نوع یا مقدار
فرایند جوش‌کاری	جوش‌کاری قوسی گاز- تنگستن (GTAW)
شکل اتصال	V شکل
گروه ماده پرکننده	ER80S-B2
پیش‌گرمایش	250-150 درجه سانتی‌گراد
عملیات حرارتی پس از جوش‌کاری	660 (±20) درجه سانتی‌گراد
گاز محافظ	آرگون 99/99 %
پلاریته	DC (-)
محدوده شدت جریان	85 تا 115 آمپر
محدوده ولتاژ	13 تا 18 ولت

جهت بررسی ساختار متفاوت لایه‌های جوش، نقشه متالوگرافی از محل آن پس از عملیات حرارتی PWHT تهیه شده که نمونه‌ای از این نقشه‌ها در شکل 5 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فلز پایه، درشت دانه‌تر و فلز جوش، دارای دانه‌بندی ریزتری است. این اختلاف دانه‌بندی هرچند در رفتار الاستیک لایه‌های ماده تأثیر چندانی ندارد، ولی در رفتار خزشی قابل توجه بوده و از این‌رو لازم است برای هر ناحیه روابط اساسی متفاوتی تعیین شود.

3- اندازه‌گیری ضخامت منطقه HAZ

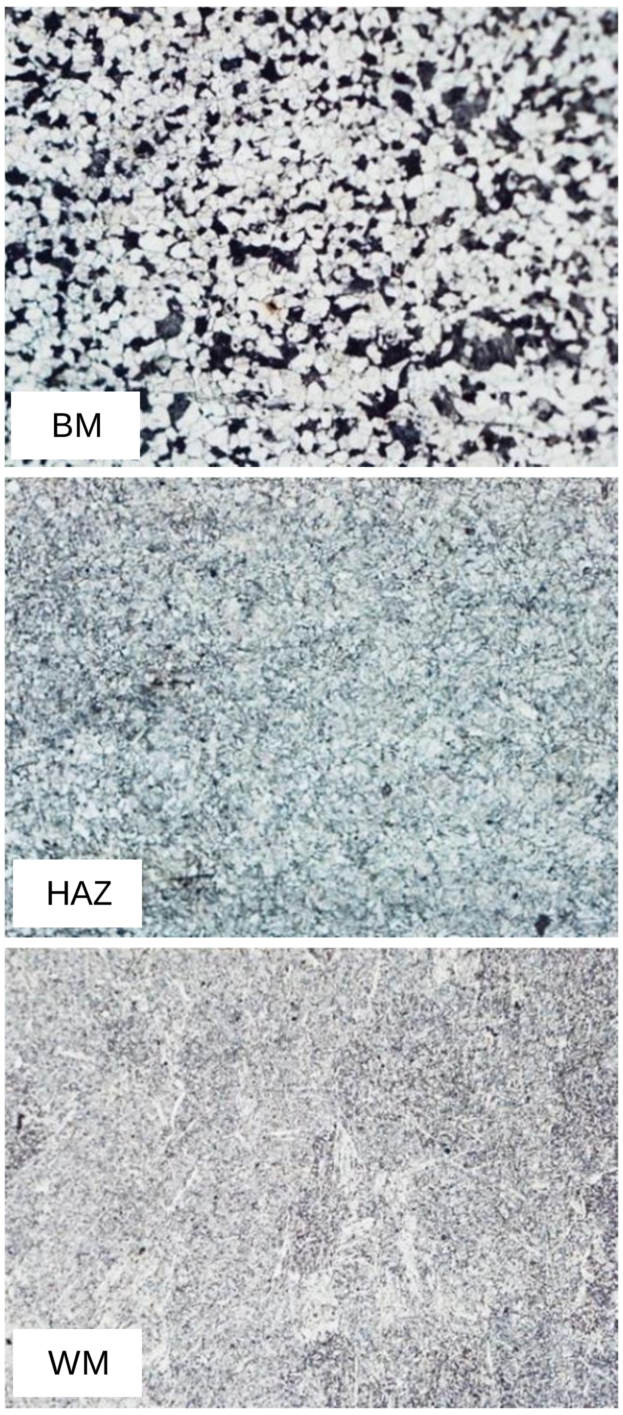
برای به‌دست‌آوردن ضخامت منطقه HAZ جهت مدل‌سازی لایه‌های مختلف جوش و تحلیل خزشی، ابتدا از سطح‌مقطع آماده‌شده جوش که توسط عملیات سمباده‌زنی و پلیش‌کاری و سپس اچ‌کردن به مدت دو دقیقه در محلول نیتال (اسید نیتریک رقیق) انجام گرفته، عکس‌های ماکروگرافی توسط دوربین‌های دیجیتالی با بزرگ‌نمایی 10-15 برابر تهیه شده است (شکل 4). گرچه محدوده این منطقه تا اندازه‌ای مشخص شده، ولی برای اطمینان بیشتر و تطابق با ادبیات فن سطح مقطع نمونه از محور جوش به‌سمت فلز پایه میکروسختی‌سنجی شده است. برای این امر از دستگاه میکروسختی‌سنج با نوک سختی‌سنجی نوپ[3] و بار تست p25 در فاصله‌های 0/3 میلی‌متر استفاده

3- Knoop

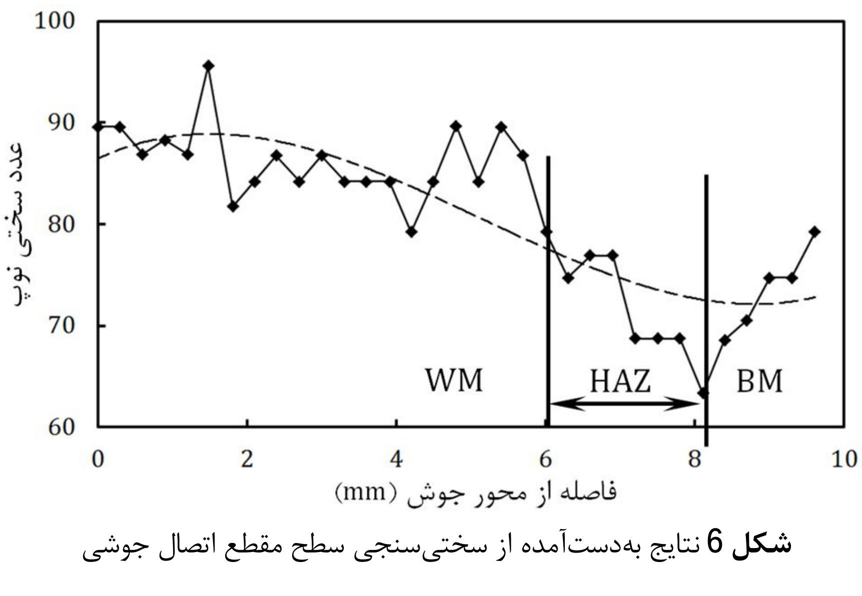
شده و نتایج کار در نمودار شکل 6 آمده است. گرچه پراکندگی‌هایی در نتایج وجود دارد، ولی روند کلی مطابق انتظار است و همان‌طور که مشخص است سختی فلز جوش بیشتر بوده و رفته‌رفته به‌سمت منطقه HAZ این سختی کاهش می‌یابد تا جایی‌که در منطقه HAZ و به‌ویژه در انتهای آن به مقدار کمتری رسیده و دوباره با افزایش اندکی، وارد منطقه فلز پایه می‌شود. نتایج حاکی از آن است که ضخامت کل لایه منطقه HAZ برابر با دو میلی‌متر است.

4-آزمایش تجربی خزش تک‌محوره برای فلز پایه و فلز جوش

برای انجام آزمایش‌های خزشی از دستگاه تست خزش SATEC، واقع در پژوهشکده مهندسی وزارت جهاد کشاورزی استفاده شد. این دستگاه ساخت



شکل 5 نقشه متالوگرافی از نمونه تهیه‌شده پس از عملیات حرارتی PWHT

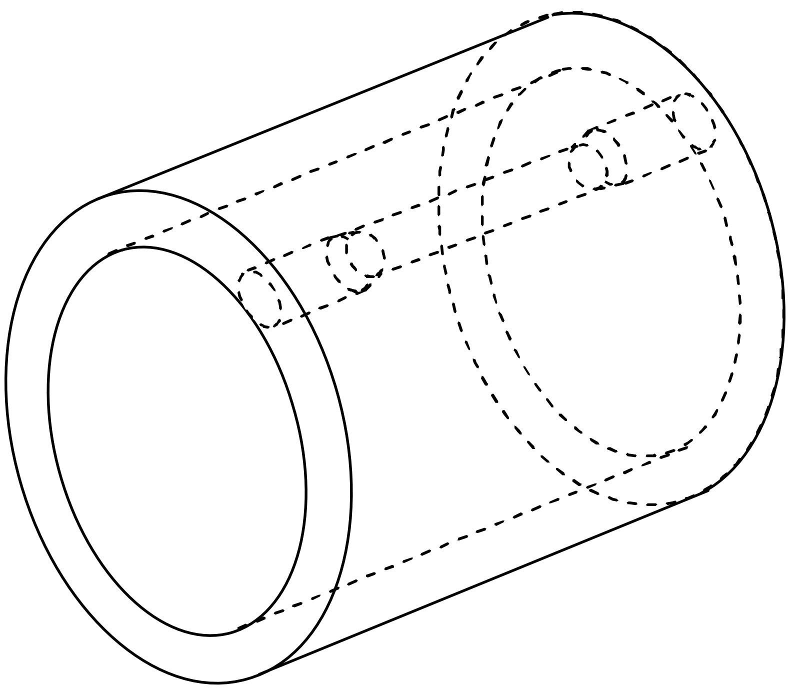


شکل 6 نتایج به‌دست‌آمده از سختی‌سنجی سطح مقطع اتصال جوشی

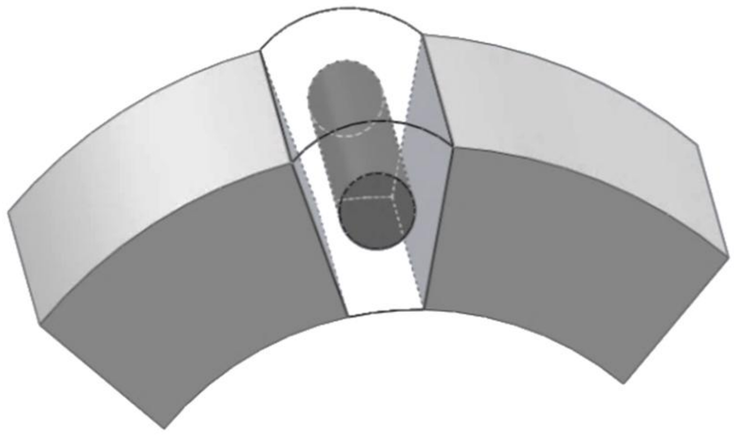
کشور آمریکا بوده و مجهز به اکستنسومتر[1] برای اندازه‌گیری تغییرات طول، حتی برای قطعات بسیار کوچک نیز است، همچنین قابلیت رسم نمودار تغییرات کرنش نسبت به زمان و درج دما را نیز داراست. ظرفیت بار دستگاه 50 کیلوگرم و ظرفیت دمای آن 1200 درجه سانتی‌گراد است.

نمونه‌های خزشی تهیه‌شده از فلز پایه و فلز جوش، مطابق با استاندارد ASTM E8M [17] بوده و به‌دلیل ضخامت کم دیواره لوله، نمونه‌های تهیه‌شده قطر کمی دارند، به‌طوری‌که قطر آن برابر با 2/5 میلی‌متر و طول سنجه آن‌ها برابر با 12/5 میلی‌متر (مطابق با ابعاد نمونه 5 ارائه‌شده در استاندارد ASTM E8M) است. شکل 7 نحوه به‌دست‌آوردن نمونه‌های فلز پایه از لوله مطابق استاندارد ASTM را نشان می‌دهد. برای به‌دست‌آوردن نمونه‌های فلز جوش نیز باید پس از انجام یک جوش نسبتاً ضخیم، نمونه را از مقطع عرضی جوش تهیه نمود (شکل 8). شکل 9 نیز تصویری از یک نمونه واقعی تهیه‌شده برای انجام آزمایش را نشان می‌دهد. برای انجام تست‌های خزشی نیز از استاندارد ASTM E139 [18] استفاده شده است.

به‌دلیل بالابودن هزینه‌های آزمایش و احتساب هزینه‌ها برحسب ساعت، برای تسریع در وقوع گسیختگی در نمونه‌های خزشی تهیه‌شده از فلز پایه و فلز جوش، باید آزمایش خزشی به‌صورت تسریع شده و در تنش‌ها و دماهایی بالاتر از تنش‌ها و دماهای کاری انجام گیرد. به این منظور از داده‌ها و آزمایش‌های جمع‌آوری‌شده ASTM [18] نیز استفاده شده است. چون تنش‌های اعمالی در شرایط کاری در حد الاستیک هستند، داده‌ها به‌گونه‌ایی انتخاب شده‌اند که تنش‌ها از این محدوده تجاوز نکنند.

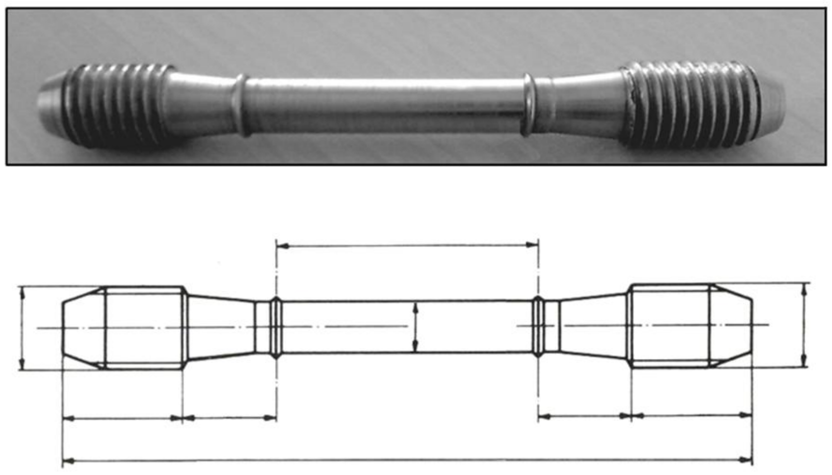


شکل 7 نحوه‌ی تهیه‌ی نمونه‌های فلز پایه از لوله در استاندارد ASTM E8M [17]



شکل 8 نحوه تهیه نمونه‌های فلز جوش در استاندارد ASTM E8M [17]

1- Extensometer



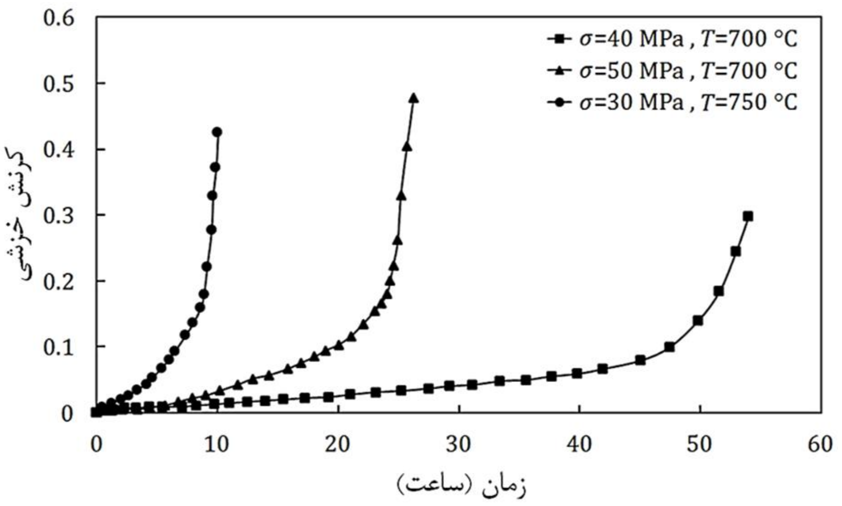
شکل 9 نمونه تست خزش به‌دست‌آمده نهایی

آزمایش‌های تک‌محوره گسیختگی خزشی در تنش‌های 30، 35، 40 و 50 مگاپاسکال و دماهای 670، 700، 725، 750 و 800 درجه سانتی‌گراد با نیروی ثابت انجام شده است. در طول انجام این آزمایش‌ها تغییرات کرنش در برابر زمان برای محاسبه پارامترهای معادلات اساسی اندازه‌گیری و ثبت شده است.

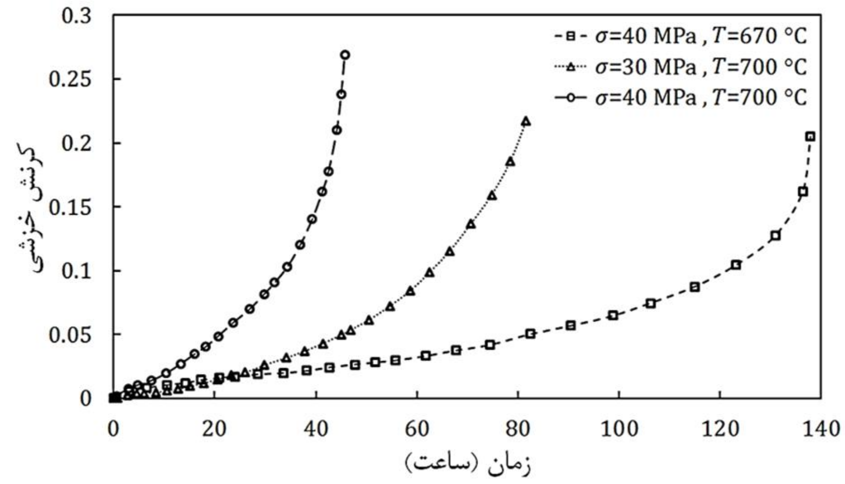
آزمایش‌های خزشی با استفاده از دستگاه تست خزش SATEC تحت بار 3000 کیلوگرمی براساس استاندارد ASTM E139 [18] انجام شده است. بارگذاری بازوی اهرم با نسبت 16 به 1 و با دقت نیم‌درصد تنظیم شده است. بیشینه دمای کوره دستگاه تست خزش نیز 1200 درجه سانتی‌گراد با دقت نیم‌درصد تنظیم می‌شود.

شکل‌های 10 و 11 به‌ترتیب تغییرات کرنش خزشی در برابر زمان را برای برخی از آزمایش‌های خزشی صورت‌گرفته برای فلز پایه و جوش نشان می‌دهند. نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌ها نیز در جدول 4 ارائه شده است.

شکل‌های 12 و 13 به‌ترتیب نمودار تغییرات عمر گسیختگی با تنش و وارون دما (1/T) را برای فلز پایه و فلز جوش نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش تنش یا دما، عمر گسیختگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. اغلب روندهای تغییرات عمر گسیختگی خزشی با تنش و وارون دما، در هر سطح دمایی تصدیق‌کننده این واقعیت است.



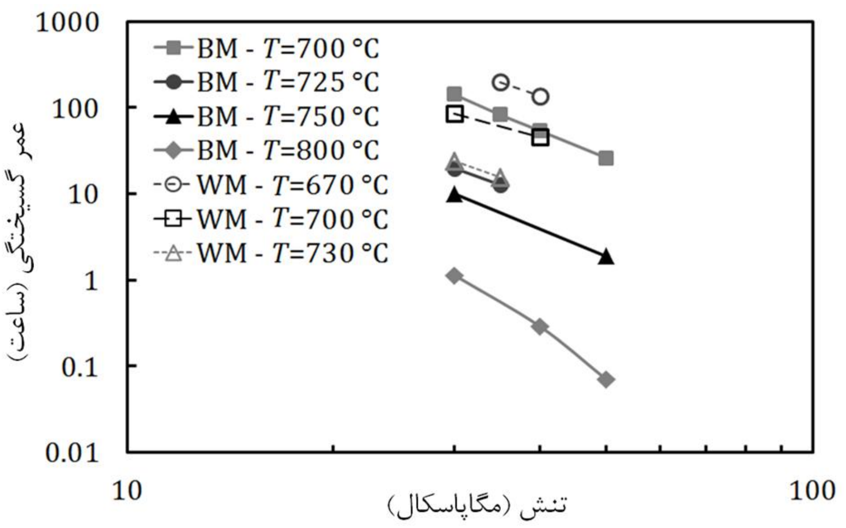
شکل 10 نمودار تغییرات کرنش خزشی در برابر زمان برای فلز پایه 1.25Cr0.5Mo



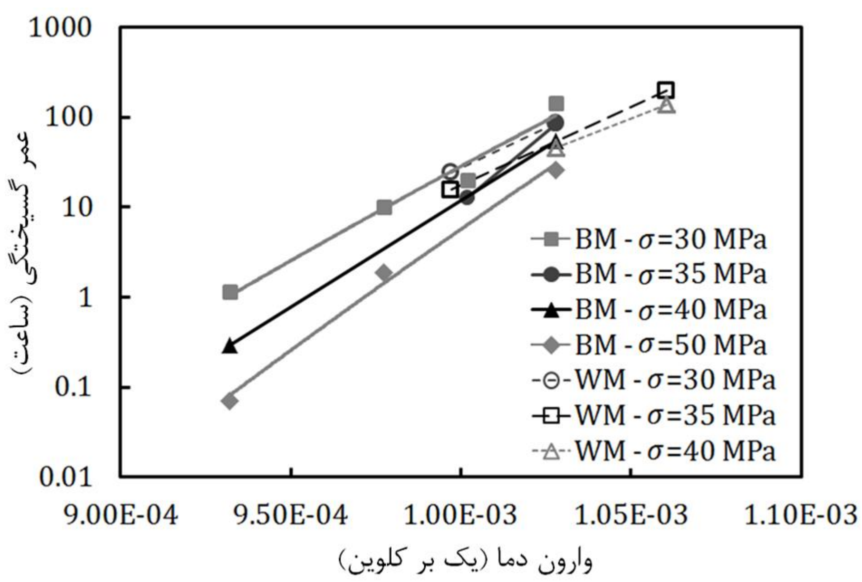
شکل 11 نمودار تغییرات کرنش خزشی در برابر زمان برای فلز جوش

جدول 4 نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های خزشی برای فلز پایه و جوش

ماده	دما (°C)	تنش (MPa)	عمر گسیختگی (hr)	افزایش طول ناشی از خزش (%)	نرخ کرنش خزشی پایدار (1/hr)
BM	700	30	142/83	-	$1/169 \times 10^{-3}$
BM	700	35	83/12	36/16	$2/068 \times 10^{-3}$
BM	700	40	54/01	29/8	$3/391 \times 10^{-3}$
BM	700	50	26/23	47/8	$7/715 \times 10^{-3}$
BM	725	30	19/88	59/6	$4/279 \times 10^{-3}$
BM	725	35	12/78	64/2	$7/452 \times 10^{-3}$
BM	750	30	10/05	42/6	$1/468 \times 10^{-2}$
BM	750	50	1/88	95/2	$9/661 \times 10^{-2}$
BM	800	30	1/14	38/8	$1/448 \times 10^{-1}$
BM	800	40	0/29	89/4	$4/208 \times 10^{-1}$
BM	800	50	0/07	91/2	$9/568 \times 10^{-1}$
WM	670	35	197/72	19/7	$3/89 \times 10^{-4}$
WM	670	40	137/88	20/5	$5/75 \times 10^{-4}$
WM	700	30	81/63	21/7	$9/49 \times 10^{-4}$
WM	700	40	45/54	26/9	$2/21 \times 10^{-3}$
WM	730	30	24/12	21/9	$3/37 \times 10^{-3}$
WM	730	35	15/64	29/8	$5/32 \times 10^{-3}$



شکل 12 نمودار تغییرات عمر گسیختگی با تنش به‌دست‌آمده از نتایج تجربی



شکل 13 نمودار تغییرات عمر گسیختگی با وارون دمای به‌دست‌آمده از نتایج تجربی

شکل 14 نشان‌دهنده تغییرات نرخ کرنش خزشی پایدار[1] با وارون دما برای سطوح تنش مختلف است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش دما یا تنش، نرخ کرنش خزشی پایدار به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. بهترین منحنی‌های برازش‌شده در مقیاس لگاریتمی نیز در این شکل نشان داده شده است.

شکل‌های 15 و 16 تغییرات عمر گسیختگی با نرخ کرنش خزشی پایدار را در مقیاس لگاریتمی به‌ترتیب برای فلز پایه و جوش نشان می‌دهند. در واقع این شکل‌ها، شاخصی برای پارامتر مانکمن- گرانت[2] $(P_{M-G}=\dot{\varepsilon}_s^c t_r)$ است که می‌تواند برای هر ماده مقداری ثابت درنظر گرفته شود [19،20]. بر مبنای برازش صورت‌گرفته بر داده‌های تجربی در شکل‌های 15 و 16، روابط (1،2) به‌دست می‌آید.

$$t_r^{\mathrm{BM}}=0.107\dot{\varepsilon}_s^{-1.062} \qquad (1)$$

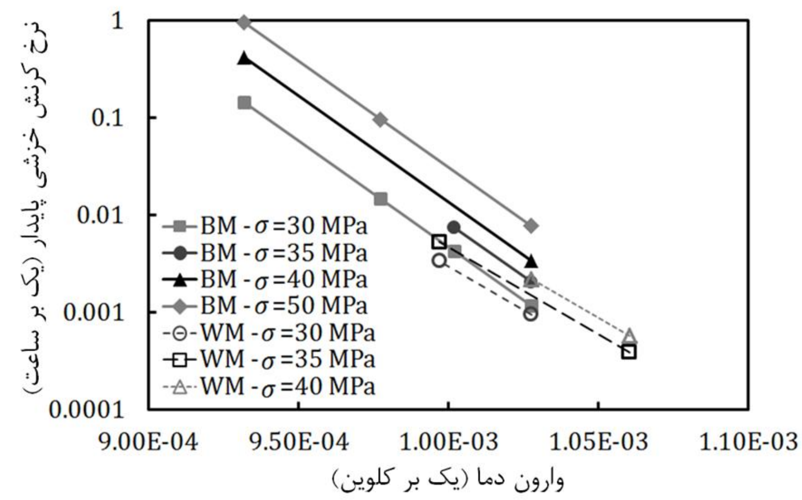
$$t_r^{\mathrm{WM}}=0.1092\dot{\varepsilon}_s^{-0.959} \qquad (2)$$

در روابط بالا، t_r عمر گسیختگی برحسب ساعت و $\dot{\varepsilon}_s$ نرخ کرنش خزشی پایدار برحسب وارون ساعت است.

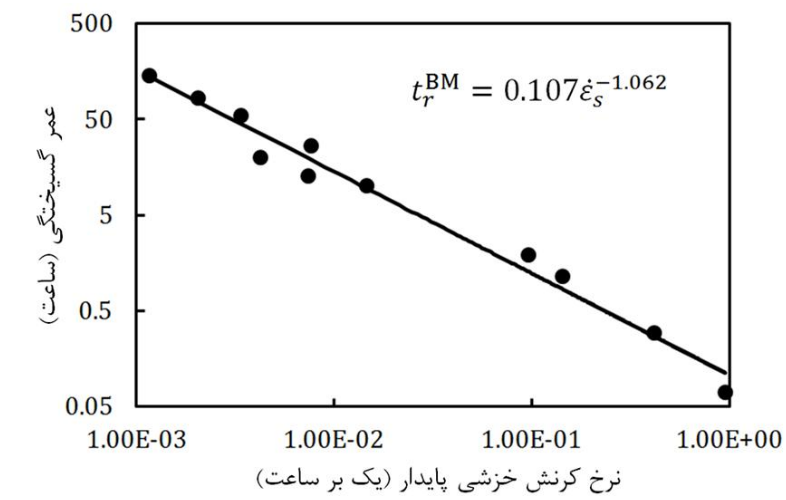
پارامتر مهم دیگری که معمولاً بر مبنای داده‌های تجربی، برای تخمین عمر گسیختگی در تنش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد پارامتر لارسون- میلر[3] است که به‌صورت رابطه (3) تعریف می‌شود [21،22].

$$P_{\mathrm{L-M}}=(T)(C+\log_{10}t_r)\times 10^{-3} \qquad (3)$$

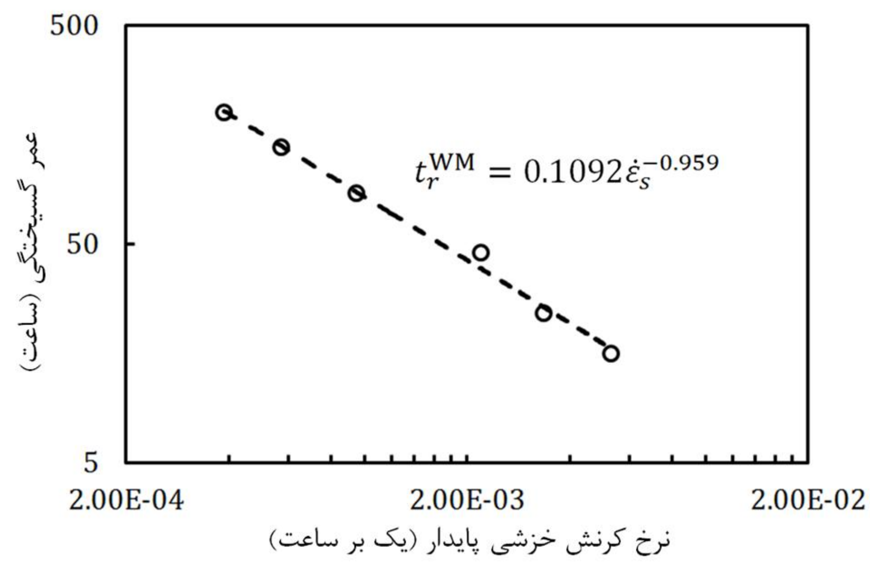
در رابطه لارسون- میلر، T دما برحسب کلوین است. ثابت C نیز پارامتری مربوط به ماده بوده و برای اغلب مواد مهندسی و فولادها برابر 20 فرض می‌شود. شکل 17 تغییرات پارامتر لارسون- میلر با تنش برای فلز پایه و جوش را نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های تجربی یادشده در جدول 4 رسم شده است.



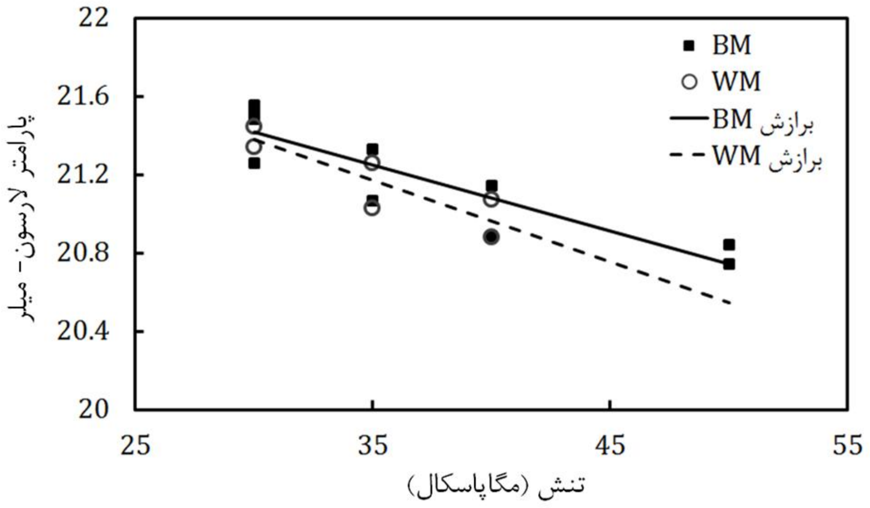
شکل 14 نمودار تغییرات نرخ کرنش خزشی با وارون دمای به‌دست‌آمده از نتایج تجربی



شکل 15 نمودار تغییرات عمر گسیختگی با نرخ کرنش خزشی پایدار به‌دست‌آمده از نتایج تجربی برای فلز پایه



شکل 16 نمودار تغییرات عمر گسیختگی با نرخ کرنش خزشی پایدار به‌دست‌آمده از نتایج تجربی برای فلز جوش



شکل 17 نمودار تغییرات پارامتر لارسون- میلر با تنش برای فلز پایه و جوش

5- تعیین ضرایب معادلات اساسی خزش

بسیاری از بررسی‌ها در مورد رفتار خزشی ماده یا قطعات مکانیکی به ارتباط بین پارامترهای مختلف آزمایش نرخ خزش پایدار، مربوط می‌شود. معادلات مختلفی برای بیان رابطه نرخ کرنش خزشی پایدار با تنش و دما یاد شده است. یکی از معادلات بسیار رایج در این زمینه رابطه‌ای بر پایه قانون توان تنش به‌شکل رابطه (4) است [23].

$$\dot{\varepsilon}_s^c=A_s\sigma^n\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \qquad (4)$$

در رابطه بالا، Q انرژی فعال‌سازی، R ثابت عمومی گازها و T دما برحسب کلوین است. پارامترهای A_s و n نیز وابسته به جنس و مستقل از تنش در نظر گرفته می‌شوند.

5-1-تعیین ضرایب معادلات اساسی برای فلز پایه و فلز جوش

با استفاده از داده‌های تجربی یادشده در جدول 4 می‌توان ضرایب A_s، Q و n را در معادله‌ی (4) تعیین کرد، ولی با توجه به متعدد بودن داده‌های تجربی باید مقادیر بهینه برای ضرایب این معادله تعیین شوند. برای بهینه‌سازی، روش‌های متعددی در مراجع مختلف ارائه شده است. روش مورد استفاده در این پژوهش، روش کمترین مربعات[4] است [24]. بدین منظور ابتدا معادله (4) خطی‌سازی شده و سپس برای کمینه‌سازی خطای حاصل، از مربع خطا نسبت به‌ضرایب یادشده مشتق‌گیری شده است در نهایت با حل دستگاه معادلات غیرخطی حاصل، ضرایب معادلات اساسی تعیین می‌شود. برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای A_s ، Q و n کد رایانه‌ایی در نرم‌افزار متلب[5] تدوین شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

1- Steady State Creep Strain Rate
2- Monkman–Grant
3- Larson-Miller
4- Least Squares Method
5- Matlab

با استفاده از داده‌های آزمایش‌های تجربی برای فلز پایه به‌عنوان اطلاعات ورودی کد رایانه‌ایی نوشته‌شده، مقادیر بهینه رابطه (5) برای A_s، Q و n مربوط به فلز پایه به‌دست می‌آیند.

$$A_s^{\mathrm{BM}} = 1.207569 \times 10^{14}\ (\mathrm{MPa^{-n}h^{-1}})$$
$$Q^{\mathrm{BM}} = 4.186665 \times 10^{5}\ \left(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}\right)$$
$$n^{\mathrm{BM}} = 3.6978 \tag{5}$$

در دمای ثابت، معادله (4) به‌صورت ساده به رابطه (6) تبدیل می‌شود.

$$\dot{\varepsilon}_s^c = B\sigma^n \tag{6}$$

با فرض دمای کاری 480 درجه سانتی‌گراد که دمای کاری در بیشتر نیروگاه‌های بخار است، ضرایب B و n در دمای یادشده به‌صورت رابطه (7) به‌دست می‌آید.

$$B^{\mathrm{BM}} = 1.092716 \times 10^{-15}\ (\mathrm{MPa^{-n}h^{-1}})$$
$$n^{\mathrm{BM}} = 3.6978 \tag{7}$$

با در نظر گرفتن داده‌های آزمایش‌های تجربی برای فلز جوش و با استفاده از کد رایانه‌ایی تدوین‌شده، مقادیر بهینه A_s، Q و n برای فلز جوش به‌صورت رابطه (8) خواهد بود.

$$A_s^{\mathrm{WM}} = 1.039106 \times 10^{11}\ (\mathrm{MPa^{-n}h^{-1}})$$
$$Q^{\mathrm{WM}} = 3.423576 \times 10^{5}\ \left(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}\right)$$
$$n^{\mathrm{WM}} = 2.9384 \tag{8}$$

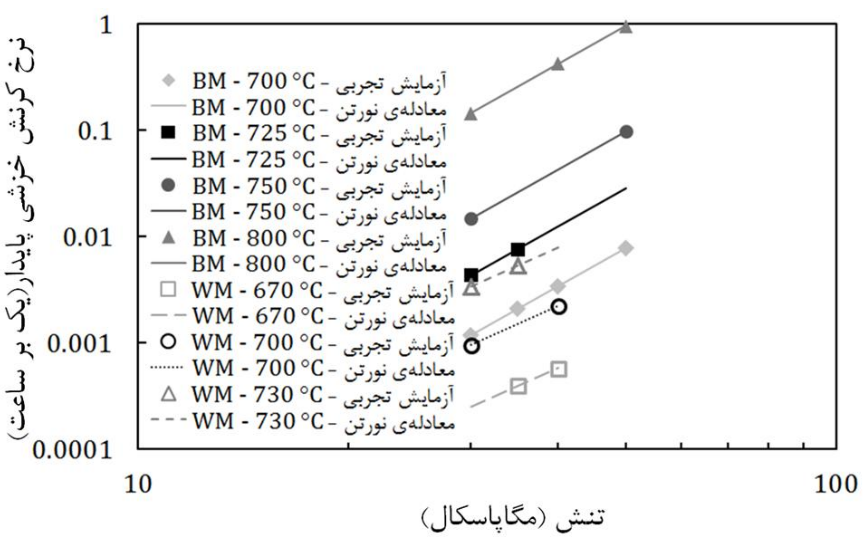
مقادیر بهینه‌ی B و n در دمای کاری 480 درجه سانتی‌گراد برای فلز جوش به‌صورت رابطه (9) به‌دست می‌آید.

$$B^{\mathrm{WM}} = 1.848826 \times 10^{-13}\ (\mathrm{MPa^{-n}h^{-1}})$$
$$n^{\mathrm{WM}} = 2.9384 \tag{9}$$

پس از به‌دست‌آوردن ضرایب و جای‌گذاری در معادله (4)، نمودار تغییرات نرخ کرنش خزشی پایدار با استفاده از ضرایب به‌دست‌آمده در دماهای مختلف برای مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی در شکل 18 برای فلز پایه و جوش ترسیم شده است. این نمودار آشکار می‌سازد که معادله نورتن با ضرایب به‌دست‌آمده تطبیق خوبی با داده‌های تجربی دارد.

5-2-تعیین ضرایب معادلات اساسی برای منطقه HAZ

برای تعیین ضرایب معادلات اساسی عموماً از آزمایش‌های تجربی استفاده می‌شود، به‌طوری‌که نمونه‌ی آزمایش را از درون فلز پایه یا فلز جوش به‌دست آورده و تست‌های خزش روی آن‌ها انجام می‌دهند. در شرایطی که اندازه

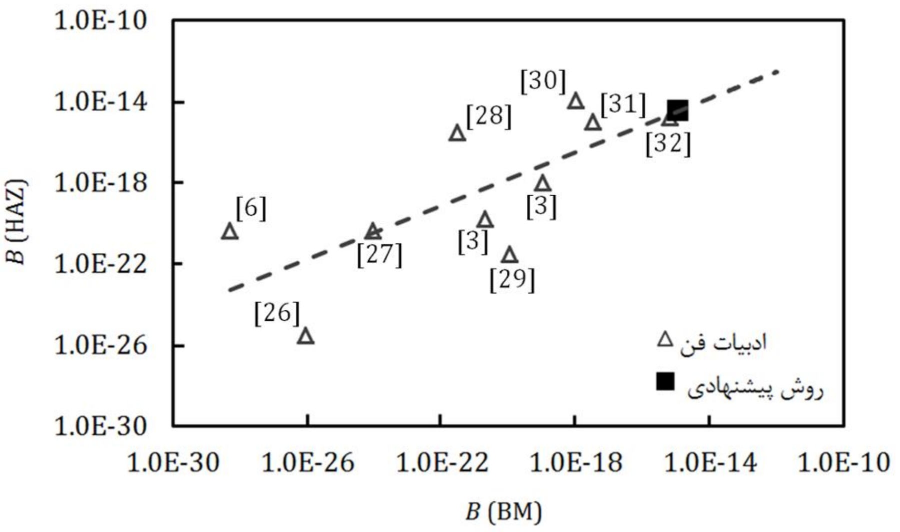


شکل 18 نمودار نرخ کرنش خزشی پایدار نسبت به تنش در دماهای ثابت مختلف همراه با داده‌های حاصل از آزمایش تجربی برای فلز پایه و جوش

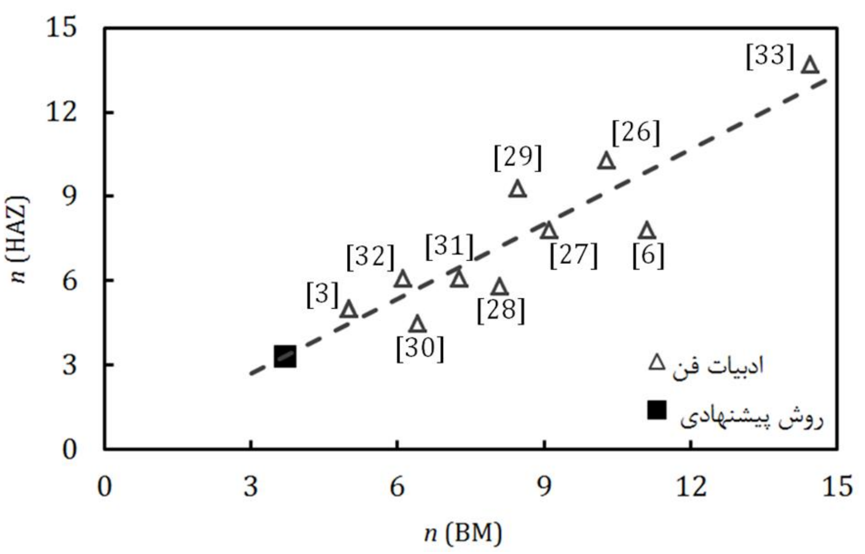
قطعه اتصال جوشی کوچک باشد، امکان تهیه نمونه از لایه HAZ وجود ندارد
قطعه اتصال جوشی کوچک باشد، امکان تهیه نمونه از لایه HAZ وجود ندارد
و در این صورت باید از نمونه‌های HAZ شبیه‌سازی‌شده[1] توسط سیکل‌های حرارتی در کوره‌های گلیبل[2] استفاده شود [6,25] که این امر مستلزم هزینه‌ی بالایی است. علاوه‌بر آن در بیشتر موارد نمونه شبیه‌سازی‌شده دقیقاً مشابه لایه واقعی نمی‌شود و یا اندازه آن به‌قدری کوچک است که امکان تهیه نمونه آزمایشی از آن فراهم نمی‌شود.

به‌دلایل یادشده، در این پژوهش روشی مبتنی‌بر داده‌های موجود در ادبیات فن ارائه شده است که به‌کمک آن ضرایب معادلات اساسی برای لایه HAZ پیش‌بینی می‌شود. با بررسی منابع موجود برای فولادهای کروم- مولیبدن می‌توان مشاهده کرد که بین ضرایب معادله نورتن سه منطقه فلز پایه، فلز جوش و HAZ رابطه منطقی وجود دارد. نتایج به‌دست‌آمده از انجام این روند در نمودارهای شکل‌های 19 و 20 خلاصه شده‌اند.

شکل 19 براساس نتایج ارائه‌شده برای آلیاژهای مختلف فولادی در ادبیات فن تهیه شده است. شماره مراجع مربوط به داده‌های ارائه‌شده در ادبیات فن در این شکل (همچنین در شکل‌های 20-22) مشخص شده‌اند. شکل 19 رابطه‌ای نمایی (رابطه خطی در مقیاس لگاریتمی) میان ضرایب B فلز پایه و منطقه HAZ را نشان می‌دهد که به روش کمینه مربعات تعیین شده و از آن در محاسبه ضریب B برای منطقه HAZ براساس مقدار مربوط به فلز پایه استفاده شده است. شکل 20 نیز براساس نتایج ارائه‌شده برای آلیاژهای مختلف فولادی در ادبیات فن، رابطه‌ای خطی میان ضرایب n برای آلیاژهای مختلف فلز پایه و منطقه HAZ را به‌دست می‌دهد. این رابطه نیز به روش کمینه مربعات حساب و در محاسبه ضریب n برای منطقه HAZ به‌کار برده شده است.



شکل 19 ضرایب B برای آلیاژهای مختلف فلز پایه و منطقه HAZ



شکل 20 ضرایب n برای آلیاژهای مختلف فلز پایه و منطقه HAZ

1- Simulated HAZ
2- Gleeble Furnace

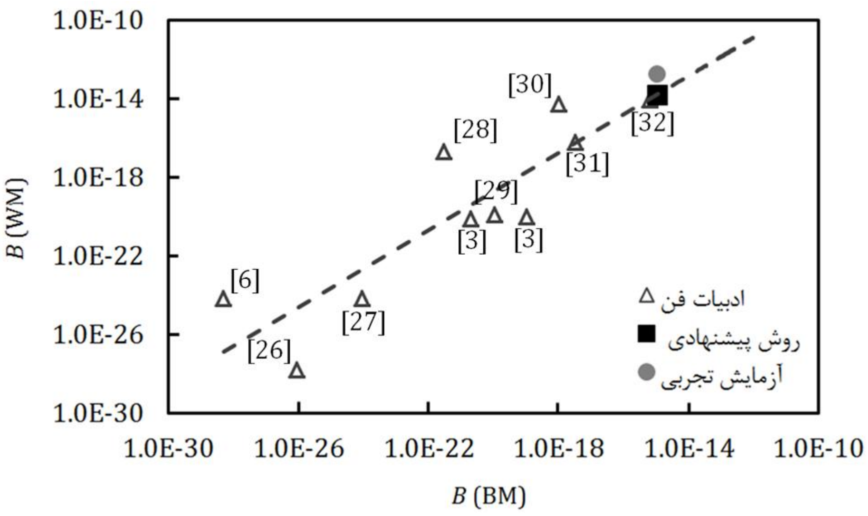
در نهایت براساس ضرایب B و n فلز پایه، ضرایب یادشده برای منطقه HAZ در دمای 480 درجه سانتی‌گراد به‌صورت رابطه (10) تعیین می‌شود.

$$B^{\mathrm{HAZ}} = 4.03204 \times 10^{-15}\ (\mathrm{MPa}^{-n}\mathrm{h}^{-1})$$
$$n^{\mathrm{HAZ}} = 3.3315 \qquad (10)$$

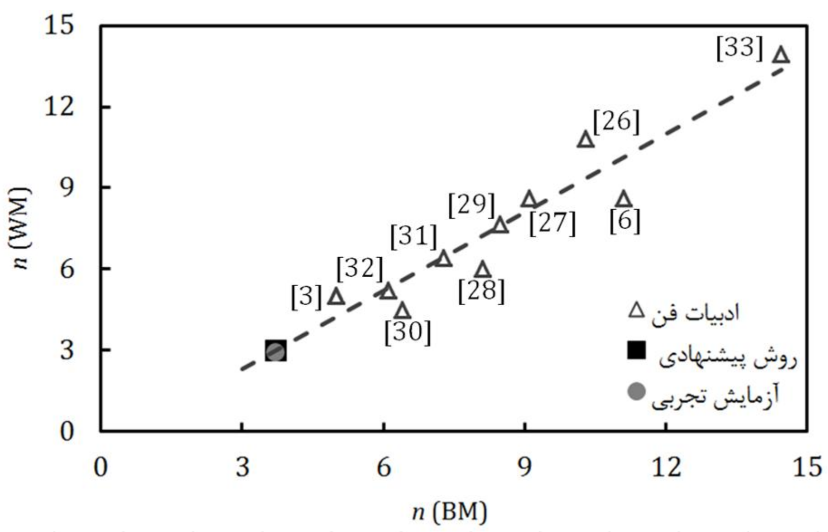
6- صحه‌گذاری روش پیشنهادی

همان‌طور که یاد شد، تعیین ضرایب معادلات اساسی برای لایه HAZ عملاً غیرممکن و یا با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه است؛ چرا که در بهترین حالت می‌توان فلز HAZ شبیه‌سازی‌شده به‌کمک عملیات حرارتی را تولید کرد که علی‌رغم خطای موجود، این روش نیز مستلزم هزینه بالایی است.

به‌همین دلیل و برای برطرف کردن این مشکل روش تخمینی در قسمت 5-2 پیشنهاد شده است که بر این اساس ضرایب معادلات اساسی لایه HAZ تعیین شده‌اند. برای اطمینان از صحت این روش، از آن برای تعیین ضرایب معادلات اساسی خزشی برای فلز جوش نیز استفاده می‌شود و نتایج حاصل با نتایجی که مستقیم بر اساس داده‌های تجربی تعیین شده‌اند مقایسه می‌شود. در شکل‌های 21 و 22 رابطه ضرایب B و n محاسبه‌شده برای فلز جوش براساس داده‌های تجربی (علامت ● در شکل‌های یادشده) با خط برازش‌شده براساس مقادیر ارائه‌شده در ادبیات فن برای آلیاژهای فولادی و نیز مقادیر پیش‌بینی‌شده با روش پیشنهادی (علامت ■ در شکل‌های یادشده) مقایسه شده‌اند. با توجه به‌این‌که رفتار خزشی یک رفتار غیرخطی توأم با پراکندگی فیزیکی است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر ضرایب معادلات اساسی به‌دست‌آمده از هر سه روش تطابق خوبی با هم دارند؛ بنابراین می‌توان به‌این نتیجه رسید که روش پیشنهادی قادر به تعیین ضرایب لایه‌های مختلف جوش براساس ضرایب به‌دست‌آمده برای فلز پایه با دقت قابل‌پذیرشی است.



شکل 21 ضرایب B برای آلیاژهای مختلف فلز پایه و فلز جوش



شکل 22 ضرایب n برای آلیاژهای مختلف فلز پایه و فلز جوش

7- نتیجه‌گیری

ضرایب معادلات اساسی خزشی برای فلز پایه و فلز جوش در اتصال لب به‌لب لوله 1.25Cr0.5Mo براساس نتایج آزمایش تجربی تعیین شده‌اند، همچنین روشی برای تعیین ضرایب این معادلات برای لایه HAZ ارائه شده است. از آن‌جا که تهیه نمونه‌های آزمایشی از لایه HAZ دشوار و هزینه‌بر است، استفاده از این روش تخمینی می‌تواند مدل‌سازی رفتار خزشی اتصالات جوشی را تسهیل کند. دقت این روش، با تخمین ضرایب معادلات اساسی برای فلز جوش و مقایسه آن‌ها با مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی ارزیابی و مشاهده شد که این روش قادر به پیش‌بینی ضرایب با دقت بالایی است.

علاوه‌بر آن بررسی‌های متالوگرافی و میکروسختی‌سنجی نشان داده‌اند که ساختار لایه‌های جوش با هم متفاوت بوده؛ بنابراین انتظار می‌رود که رفتار خزشی آن‌ها نیز تفاوت داشته باشد. این امر با تعیین ضرایب معادلات اساسی برای هر لایه مورد تأیید قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهند که نرخ کرنش خزشی پایدار فلز جوش در محدوده تنش‌های موردنظر از نرخ کرنش خزشی فلز پایه و نیز منطقه HAZ بیشتر است. درحالی‌که نرخ کرنش منطقه HAZ تا 35 مگاپاسکال از فلز پایه بیشتر بوده و از آن به بعد روند عکس می‌شود. هرچند اختلاف نرخ کرنش خزشی فلز پایه و منطقه HAZ در مقایسه با اختلاف آن‌ها با فلز جوش بسیار کمتر است. برای نمونه در دمای 480 درجه سانتی‌گراد و تنش 30 مگاپاسکال، نرخ کرنش خزشی پایدار منطقه HAZ و فلز جوش به‌ترتیب 1/06 و 12/78 برابر فلز پایه است که با توجه به شکل معادلات اساسی، اختلاف بین نرخ‌های کرنش خزشی لایه‌های مختلف در تنش‌های پایین‌تر (تنش‌هایی که در عمل بیشتر قطعات مکانیکی تحمل می‌کنند) افزایش می‌یابد.

8- مراجع

[1] S. Kou, *Welding Metallurgy,* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
[2] R. W. Evans, B. Wilshire, *Introduction to creep*: Institute of Materials London, 1993.
[3] M. Law, W. Payten, Comparison of cross-weld creep testing and service welds, *International journal of pressure vessels and piping,* Vol. 75, No. 5, pp. 429-432, 1998.
[4] K. Laha, K. Chandravathi, K. B. S. Rao, S. Mannan, D. Sastry, Prediction of creep deformation and rupture behaviour of 2.25 Cr–1Mo weld joint, *International journal of pressure vessels and piping,* Vol. 77, No. 12, pp. 761-769, 2000.
[5] A. R. F. Fuentes, N. G. Alcântara, Analysis of the creep behavior and microstructure of PWHT steam piping exposed to service, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 371, No. 1, pp. 127-134, 2004.
[6] T. Watanabe, M. Tabuchi, M. Yamazaki, H. Hongo, T. Tanabe, Creep damage evaluation of 9Cr–1Mo–V–Nb steel welded joints showing Type IV fracture, *international journal of pressure vessels and piping,* Vol. 83, No. 1, pp. 63-71, 2006.
[7] S. Fujibayashi, Creep behaviour leading to Type IV cracking for service-exposed 1.25 Cr–0.5 Mo steel welds, *Engineering fracture mechanics,* Vol. 74, No. 6, pp. 932-946, 2007.
[8] T. Massé, Y. Lejeail, Creep mechanical behaviour of modified 9Cr1Mo steel weldments: Experimental analysis and modelling, *Nuclear Engineering and Design,* Vol. 254, pp. 97-110, 2013.
[9] Q. Zhang, J. Zhang, P. Zhao, Y. Huang, Y. Yang, Y. Zhao, Microstructure of 10% Cr martensitic heat-resistant steel welded joints and type IV cracking behavior during creep rupture at 650° C, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 638, pp. 30-37, 2015.
[10] J. Baral, J. Swaminathan, D. Chakrabarti, R. Ghosh, Creep behavior of P91B steel in the presence of a weld joint, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 631, pp. 220-229, 2015.
[11] S. Nakhodchi, S. Akbari Iraj, A. shokuhfar, H. Rezazadeh , Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having diffrent, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 9, pp. 81-89, 2014 (In Persian).
[12] M. Karimi Manesh, I. Sattari Far, H. Omidvar, Effects of Arc Heat Input and Welding Speed on the Cryogenic Impact Strength of Type 304L Austenitic Stainless Steel Weld Metal, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 15, No. 2, pp. 205-213, 2015 (In Persian).
[13] A. C. Davies, *The science and practice of welding*: CUP Archive, 1972.

[25] M. Tabuchi, T. Watanabe, K. Kubo, M. Matsui, J. Kinugawa, F. Abe, Creep crack growth behavior in the HAZ of weldments of W containing high Cr steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping,* Vol. 78, No. 11, pp. 779-784, 2001.

[26] T. H. Hyde, A. A. Becker, W. Sun, A. Yaghi, J. A. Williams, S. Concari, Determination of creep properties for P91 weldment materials at 625°C, in *5th International Conference on Mechanics and Materials in Design,* Porto, Portugal, 2006.

[27] G. Eggeler, A. Ramteke, M. Coleman, B. Chew, G. Peter, A. Burblies, J. Hald, C. Jefferey, J. Rantala, M. deWitte, R. Mohrmann, Analysis of creep in a welded 'P91'pressure vessel, *International journal of pressure vessels and piping,* Vol. 60, No. 3, pp. 237-257, 1994.

[28] V. Gaffard, A. F. Gourgues-Lorenzon, J. Besson, High temperature creep flow and damage properties of 9Cr1MoNbV steels: Base metal and weldment, *Nuclear Engineering and Design,* Vol. 235, No.24, pp. 2547-2562 , 2005.

[29] T. H. Hyde, W. Sun, A. A. Becker, J. A. Williams, Creep properties and failure assessment of new and fully repaired P91 pipe welds at 923 K, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications,* Vol. 218, No.3, pp. 211-222, 2004.

[30] M. Law, W. Payten, R. Small, Modelling the creep behaviour of a reheat header longitudinal weld, *International Journal of pressure vessels and piping,* Vol. 77, No.2, pp. 99-103, 2000.

[31] T. H. Hyde, W. Sun, A. A. Becker, J. A. Williams, Life prediction of repaired welds in a pressurised CrMoV pipe with incorporation of initial damage, *International journal of pressure vessels and piping,* Vol. 81, No.1, pp. 1-12, 2004.

[32] W. Payten, Large scale multi-zone creep finite element modelling of a main steam line branch intersection, *International journal of pressure vessels and piping,* Vol. 83, No.5, pp. 359-364, 2006.

[33] S. T. Tu, P. Segle, J. M. Gong, Creep damage and fracture of weldments at high temperature, *International journal of pressure vessels and piping,* Vol . 81 No.2, pp. 199-209, 2004.

[14] AWS B2.1-4-220:1999 (R2009), An American National Standard: *Standard Welding Procedure Specification (SWPS) for Gas Tungsten Arc Welding (Consumable Insert Root) of Chromium-Molybdenum Steel,* American Welding Society, Miami, USA, 2009.

[15] ASTM A213/A213M-09a (Revised Version), Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes, *Annual Book of ASTM Standards,* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2005.

[16] F. Vakili-Tahami, M. Sajjadpour, P. Attari, Experimental Study of the Creep Lifetime of the 1.25 Cr 0.5 Mo Steel Pipes, *Strain,* Vol. 47, No. 5, pp. 414-420, 2011.

[17] ASTM E8M-04, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (Metric), *Annual Book of ASTM Standards,* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2004.

[18] ASTM E139-06, Standard test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials, *Annual Book of ASTM Standards,* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2006.

[19] F. C. Monkman, N. J. Grant, An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests ,in *Proceeding of ASTM,* Vol. 56, pp. 593-620, 1956.

[20] K. Takasawa, H. Chinen, T. Ohkawa, E. Maeda, T. Hatano, Effects of Phosphorus on Creep Properties of Nickel-Iron Base Superalloy, *ISIJ International,* Vol. 55, No. 5, pp. 1100-1105, 2015.

[21] F. Larson, J. Miller, *A time-temperature relationship for rupture and creep stresses,* 1952.

[22] D. Šeruga, M. Nagode, A method for long-term creep–rupture strength prediction based on a small sample of experimental results, smoothed bootstrapping and time–temperature parameters, *Materials & Design,* Vol. 67, pp. 180-187, 2015.

[23] J. T. Boyle, J. Spence, *Stress analysis for creep*: Elsevier, 2013.

[24] J. Conway, Numerical Methods for Creep and Rupture Analysis, Gordon and Breach, *Science Publ.,* New York, pp. 155-177, 1967.