



## پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات جوشی حین بهره‌برداری وصله‌ای با استفاده از معیارهای خستگی چندمحوره

سجادبرزگر محمدی<sup>۱</sup>، محمد حق پناهی<sup>\*</sup>، مصطفی زین‌الدینی<sup>۲</sup>

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

### کلمات کلیدی:

جوشکاری حین بهره‌برداری  
عمر خستگی  
اتصال وصله‌ای جوشی  
اجزاء محدود

**خلاصه:** پژوهش حاضر به بررسی تجربی و عددی عمر خستگی اتصالات جوشی وصله‌ای فولادی حین بهره‌برداری پرداخته است. مجموعاً سه نوع پانل با دستورالعمل جوشکاری مشابه اما خنک‌کاری متفاوت ساخته شد و سپس نمونه‌های بریده شده از پانل اصلی تحت آزمون‌های تجربی خستگی قرار گرفت. به منظور پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌ها، از یک رویکرد نوین مبتنی بر سختی‌سنجی پیوسته در مقطع جوشکاری استفاده شد. بدین منظور در گام نخست، از تصاویر ماکروگرافی و میکروسختی پیوسته مقاطع جوشکاری شده جهت تعیین خواص مکانیکی و پارامترهای خستگی مناطق مختلف جوش و منطقه متأثر از حرارت استفاده شد. سپس مقادیر تنش و کرنش حاصل از تحلیل المان محدود با نرم‌افزار آباکوس، با بکارگیری سابروتین UARM و کدنویسی مدل‌های خستگی چندمحوری، جهت تخمین عمر قطعات مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعدی، نتایج حاصل از تخمین عمر عددی با معیارهای خستگی، با نتایج تجربی آزمون‌های خستگی مقایسه شد و خطای معیارهای مورد استفاده گزارش شد. نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد که نمونه‌های خنک شده با آب سرعت ۰/۵ متر در ثانیه افزایش عمر و نمونه‌های خنک شده با آب سرعت ۱/۵ متر در ثانیه کاهش عمر در مقایسه با نمونه‌های خنک شده در هوا دارند. به منظور پیش‌بینی عمر خستگی، به ترتیب از معیارهای بروان-میلرمارو و گلینکا استفاده شد و نتایج نشان داد که این دو معیار به ترتیب با حداکثر خطای میانگین ۲۰/۱۶ و ۳۴/۶۸ درصد قابلیت پیش‌بینی عمر خستگی را دارند.

### ۱- مقدمه

است. به طور معمول برای احیای اتصالات جوشی معیوب و طولانی کردن عمر مفید سازه‌ها از روش جوشکاری تعمیری استفاده می‌شود [۶]. در سازه‌ها و مخازن تحت فشار اغلب با استفاده از یک قطعه (که وصله نامیده می‌شود)، ناحیه معیوب تجهیز پوشش داده می‌شود و با استفاده از جوشکاری، وصله و قطعه اصلی تجهیز به هم متصل می‌شود. عموماً به این نوع اتصال تعمیری، اتصال پیچ-پلیت<sup>۱</sup> گفته می‌شود و به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مانند نفت، گاز، پلنت‌های فرایندی و نیروگاهی جهت بازیابی استحکام اعضای سازه‌ای به کار گرفته می‌شود [۷]. باید توجه داشت که این امکان وجود دارد که ناحیه تقویت شده (ناحیه جوش تعمیری) نیز خود می‌تواند نقطه شروع یک عیب یا یک ترک جدید باشد. بر اساس مشاهدات و مطالعات صورت پذیرفته، به طور معمول عیوب و ترک‌های جوشکاری از ناحیه پنجه جوش<sup>۳</sup> ایجاد می‌شود و در نهایت منجر به تخریب و از بین رفتن کارایی

در میان روش‌های موجود جهت اتصال فلزات، جوشکاری همچنان محبوب‌ترین و پرکاربردترین روش محسوب می‌شود. جوشکاری به دلیل سهولت در اجرا، استحکام مناسب اتصال، در دسترس بودن، هزینه کم و قابلیت استفاده برای مواد هم‌جنس و غیر هم‌جنس به صورت گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱ و ۲]. اتصالات جوشکاری شده معمولاً به دلیل نوع فرایند جوشکاری، هندسه جوش، تنش‌های پسماند، تمرکز تنش و تغییرات ریزساختاری مستعد شکل‌گیری عیوب (حین اجرا و پس از اجرا) می‌شود [۳ و ۴]. این عیوب می‌تواند به شکل قابل توجهی بر استحکام استاتیکی و خستگی آنها اثرگذار باشد [۵]. به طور معمول در صورت تشخیص عیب در یک اتصال جوشکاری، عیب مرتفع می‌گردد یا اتصال تعویض می‌شود تا از پیامدهای منفی بعدی جلوگیری شود. اما هنگامی که سازه‌های جوش داده شده دارای ابعاد بزرگ باشد، از رده خارج کردن و برچیدن آن‌ها در اثر عیوب جوشکاری یک فرایند بسیار پرهزینه

- 1 Patch
- 2 Patch-plate
- 3 Weld toe

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mhaghpanahi@iust.ac.ir



تکنیک محاسباتی پیشرفته مانند شبیه سازی ترمومکانیکال، مدل کریستال پلاستیسیته و روش المان محدود توسعه یافته یک روش جدید پیش بینی عمر خستگی برای طیف وسیعی از سازه های جوش داده شده توسعه دادند. روش آنها متشکل از مراحل: (I) محاسبه خواص مواد، (II) تجزیه و تحلیل میدان دما، ریزساختار و تنش پسماند، (III) تجزیه و تحلیل توزیع تنش تحت بارگذاری چرخه ای، (IV) تحلیل شروع ترک خستگی و (V) تجزیه و تحلیل انتشار ترک خستگی بود. بر اساس نتایج گزارش شده، مدل پیشنهادی به خوبی قابلیت تخمین عمر خستگی اتصال جوشکاری قطعات با هندسه لبه به لبه را داشت. سان و همکاران<sup>۶</sup> [۲۰] به بررسی تجربی و تخمین عمر خستگی اتصالات جوشکاری پرداختند. برای تخمین عمر و مدلسازی، یک مدل مرکب شامل عناصر نماینده حجم بر اساس مورفولوژی متالوگرافی، پروفیل میکروسختی و خواص مکانیکی محلی مناطق مختلف جوش ساخته شد و تحت تحلیل اجزا محدود واقع شد. سپس با استفاده از خروجی تحلیل تنش و برآورد خواص خستگی مناطق مختلف جوش، تخمین عمر خستگی صورت پذیرفت. نتایج پژوهش نشان داد که روش شبیه سازی با در نظر گرفتن تفاوت الگوهای سختی و ریزساختار برای اتصال جوشکاری می تواند تنش، کرنش موضعی و تخمین عمر خستگی را به طور مناسب ارزیابی کند. گوپال و همکاران<sup>۷</sup> [۲۱] یک مدل برای تخمین عمر خستگی اتصال جوشکاری با استفاده از تحلیل اجزاء محدود معرفی کردند. مدل ارائه شده، مستقل از مدل سازی میکروجرئومتری مناطق مختلف ناحیه جوش و جزئیات نواحی مختلف جوش شامل جهت گیری و شعاع پنجه جوش بود. آن ها تخمین عمر خستگی را به واسطه تحلیل عددی اتصال جوش و برآورد تنش ماکزیمم در پنجه جوش، تنش در راستای ضخامت و تنش در صفحه بحرانی در مقطع ناحیه پنجه انجام دادند. حسنی فرد و همکاران [۱۷ و ۲۲] با استفاده از ترکیب تحلیل اجزا محدود و مدل های خستگی چند محوره به تخمین عمر قطعات جوشکاری شده پرداختند. آن ها با استفاده از پروفیل های میکروسختی بدست آمده از آزمون های تجربی، خواص مکانیکی و پارامترهای خستگی مناطق مختلف جوش را برآورد و محاسبه نمودند. سپس با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل تنش و کرنش قطعات جوشکاری شده صورت پذیرفت و در مرحله پایانی، با استفاده از خروجی تحلیل تنش و مقادیر بحرانی تنش و کرنش و بکارگیری مدل های خستگی، تخمین عمر را انجام دادند و نتایج پژوهش آنها نشان داد که روش پیشنهادی با دقت مناسبی عمر خستگی اتصالات جوشی را پیش بینی می نماید.

سازه جوشکاری شده می شود [۸]. معمولاً عمر خستگی اتصالات جوشکاری شده با روش جوشکاری تعمیری در مقایسه با قطعه پایه به دلایل مختلفی کاهش می یابد که مهم ترین آن ها تمرکز تنش<sup>۱</sup> در پنجه یا ریشه جوش<sup>۲</sup> می باشد [۹ و ۱۰]. یکی از چالش های مهم موجود در صنایع مختلف بررسی و مطالعه استحکام و عمر سازه ها و اتصالات تحت بارگذاری های چرخه ای می باشد [۱۱ و ۱۲]. برآورد عمر خستگی اتصالات جوشکاری با استفاده از آزمون های تجربی اغلب روشی پرهزینه و دارای محدودیت می باشد. استفاده از مدل های تحلیلی جهت پیش بینی عمر خستگی سازه ها و اتصالات منجر به کاهش قابل توجه هزینه ها می شود و امکان بررسی همه جانبه تری از جمله بهینه سازی قطعه را فراهم می آورد. یکی از روش های نسبتاً نوین در این زمینه استفاده از ترکیب روش شبیه سازی عددی و مدل های تحلیلی خستگی می باشد [۱۳ و ۱۴]. در این روش، نخست تحلیل عددی (تنش- کرنش) نمونه با روش اجزاء محدود صورت می پذیرد. سپس نتایج حاصل از تحلیل عددی به عنوان ورودی به مدل تحلیلی خستگی وارد می شود. در گام بعدی، تخمین عمر قطعه انجام می پذیرد. در صورت پیاده سازی صحیح، این روش قادر خواهد بود با دقت مناسبی عمر خستگی را پیش بینی نماید [۱۵ و ۱۶]. باید توجه داشت که در یک نمونه جوشکاری شده نواحی مختلفی با خواص مکانیکی متفاوت ایجاد می شود. از این رو، در روند تخمین عمر این قطعات می بایست ناحیه جوشکاری شده به صورت گسسته و متشکل از نواحی مختلف با خواص مکانیکی و خستگی متفاوت مدلسازی و تحلیل شود تا امکان استحصال نتایج و تخمین های دقیق تری فراهم شود [۱۷].

تاکنون پژوهش های محدودی در زمینه تخمین عمر با استفاده از رویکرد عنوان شده برای قطعات جوشکاری شده انجام شده است. اسماعیلی و همکاران [۱۸] به بررسی تجربی تأثیر آرایش نقطه جوش ها بر رفتار خستگی اتصالات جوشی و تخمین عمر تحلیلی با استفاده از معیارهای خستگی چندمحوره پرداختند. تحلیل تنش با کد اجزای محدود غیرخطی انجام شد و توزیع تنش و کرنش در نزدیکی ریشه قطعات بدست آمد. سپس با استفاده از شش معیار خستگی چند محوری مختلف، پیش بینی عمر خستگی اتصالات جوشکاری صورت پذیرفت. بر اساس نتایج گزارش شده مشخص شد که معیارهای اسمیت-واتسون-تاپر<sup>۳</sup> و کراسلند<sup>۴</sup> بالاترین دقت را در تخمین عمر خستگی اتصالات دارد. شیرایوا و همکاران<sup>۵</sup> [۱۹] با ادغام چندین

- 1 Stress concentration
- 2 Weld root
- 3 Smith Watson Topper (SWT)
- 4 Crossland
- 5 Shiraiwa et al.

6 Sun et al.

7 Goyal et al.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی ورق‌ها و الکترودهای نمونه‌های آزمون مطابق با استاندارد ۴۱۵ ASRME [۳۰]

Table 1. Chemical composition of plates and electrodes of test samples according ASTM E415 [30].

درصد وزنی عناصر	کربن	مس	نیکل	کروم	سلسیوم	فسفر	گوگرد	منگنز	آهن
ورق اصلی	۰/۱۸	۰/۰۱۹	۰/۰۲۳	۰/۰۱۶	۰/۲۴	۰/۰۱۶	۰/۰۰۷	۱/۳	باقیمانده
ورق وصله	۰/۱۸	۰/۰۱۹	۰/۰۲۳	۰/۰۱۷	۰/۳۹	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۳	۱/۳۸	باقیمانده
فلز جوش	۰/۰۵۴	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۳۷	۰/۰۱۱۲	۰/۰۰۶	۱/۴	باقیمانده

و همچنین روشی برای پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات وصله‌ای ارائه نشده است [۷ و ۲۸ و ۲۹]. از این رو نیاز به بررسی و پژوهش‌های بیشتر در این زمینه احساس می‌شود تا بتوان با استفاده از روش‌های کاربردی اما دقیق، پیش‌بینی عمر خستگی این اتصالات را انجام و بهینه‌سازی کرد.

در پژوهش حاضر به منظور ارائه یک روش کاربردی و دقیق، ابتدا تأثیر خنک شدن در عمر خستگی اتصالات جوشی وصله‌ای بررسی و سپس پیش‌بینی عمر خستگی این اتصالات انجام شده است. جهت برآورد و تعیین خواص مکانیکی و پارامترهای خستگی مناطق مختلف جوش از تصاویر ماکروگرافی نواحی جوش و توزیع میکروسختی در کل سطح مقطع نمونه‌ها به صورت پیوسته استفاده شده است تا برآورد خواص با دقت بالاتری صورت پذیرد. تحلیل تنش در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است و در گام بعدی با استفاده از خروجی تحلیل تنش- کرنش و بکارگیری دو مدل خستگی چندمحوری متفاوت، تخمین عمر صورت پذیرفته است. در پایان نتایج حاصل از تخمین عمر مدل‌های عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است و خطاها گزارش شده است.

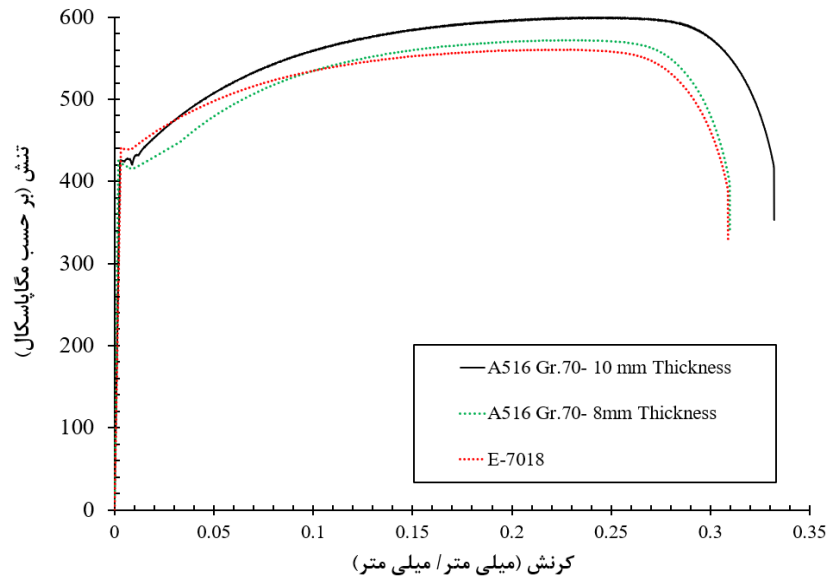
## ۲- رویه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد و ابعاد نمونه‌ها

همانطور که اشاره شد در این پژوهش به بررسی تجربی و تخمین عمر خستگی اتصالات وصله‌ای حین بهره‌برداری در شرایط خنک‌کاری متفاوت پرداخته شده است. در این بخش روند کار تجربی ارائه شده است. از ورق‌های فولادی نرمالیزه، A516 GR.70 که ساختار آن متشکل از فاز فریت و پرلیت می‌باشد به ضخامت ۸ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب به عنوان ماده‌ی ورق اصلی و وصله استفاده شد. درصد ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ماده پایه در جدول شماره ۱ و ۲ ارائه شده است.

اتصالات وصله‌ای حین بهره‌برداری به دلیل اثر خنک کاری سیال عبوری، ریزساختار، خواص مکانیکی و خستگی متفاوتی در مناطق مختلف جوش و مناطق متأثر از حرارت دارند اما در ظاهر هندسه مشابهی دارند. اگرچه تحقیقات گسترده‌ای در سال‌های اخیر انجام شده است ولی روش‌های ارائه شده، برای قطعات همگن استفاده شده است و اثر ریزساختار جوش و مناطق متأثر از حرارت را در نظر نمی‌گیرند لذا قابلیت پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات جوشی حین بهره‌برداری را نخواهند داشت و پیش‌بینی عمر یکسانی برای قطعات با خنک‌کاری متفاوت ارائه خواهد نمود [۳ و ۲۳ و ۲۴]. علاوه بر این، اغلب این روش‌ها برای مقاصد مهندسی غیرکاربردی بوده و نیازمند تست‌های آزمایشگاهی پیچیده و شبیه‌سازی‌های مختلف هستند [۲۴]. بنابراین توجه به خواص مکانیکی و خستگی نواحی مختلف قطعات جوشی و ابعاد این نواحی و کاربردی بودن روش‌های ارائه شده در اتصالات جوشی در پیش‌بینی عمر خستگی ضروری خواهد بود [۲۵].

همانگونه که اشاره شد تحقیقات اندکی در زمینه تخمین عمر قطعات جوشکاری شده با استفاده از رویکرد ترکیبی روش اجزا محدود و مدل‌های خستگی انجام شده است. همچنین به دلیل پیچیدگی نمونه‌های جوشکاری شده حین بهره‌برداری که شامل نواحی مختلفی مانند پاس‌های مختلف جوش، نقاط متأثر از حرارت و تفاوت ساختار و هندسه این قسمت‌ها با فلز پایه، عملاً استاندارد به آیین‌نامه و استانداردهای مهندسی جواب‌های غیردقیقی خواهد داشت که باعث افزایش قابل توجهی در ضریب اطمینان سازه‌ها و اتصالات جوشی می‌شود. از سوی دیگر در زمینه جوشکاری وصله‌ای حین بهره‌برداری لوله‌ها و مخازن تحت فشار آیین‌نامه‌ای تدوین نشده است و تنها مرجع قابل استفاده در صنعت نفت و گاز، دستورالعمل تجربی API-RP ۲۲۰۱ [۲۶] و ASME PCC-۲ [۲۷] می‌باشد که اطلاعاتی برای طراحی خستگی ارائه نموده است. همچنین تحقیقات اندک قبلی در حوزه جوشکاری وصله‌ای اثر خنک شدن را بررسی نموده‌اند



شکل ۱. نمودار تنش- کرنش مهندسی ورق اصلی، وصله و فلز رسوب شده الکتروود

Fig. 1. Engineering stress-strain curve of base plate, patch plate and electrode deposited metal.

جدول ۲. خواص کششی ورق اصلی، ورق وصله و فلز جوش در مقایسه با خواص A516 GR.70 و E7018

Table 2. Tensile properties of ASTM A516 Gr.70, base plate, patch plate and weld metal.

خواص مکانیکی در آزمون کشش	E7018	A516 GR.70	فلز جوش		ورق وصله		ورق اصلی	
			میانگین	انحراف از معیار	میانگین	انحراف از معیار	میانگین	انحراف از معیار
تنش کششی پیشینه (مگاپاسکال)	> 482	485-620	549	9/2	586	10/6	563	10/2
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	399	حداقل 260	463	12/1	412	5/6	427	6/2
درصد از یاد طول (طول گیج 50 میلی متری)	22	21	31	1/2	33	0/9	30	1/1

ابعاد نمونه‌های استاندارد برای آزمایش ضربه شاری با ناچ V شکل،  $10 \times 7/5 \times 55$  میلی متر و  $10 \times 10 \times 55$  میلی متر به ترتیب برای ورق ۸ و ۱۰ میلی متری در نظر گرفته شد و اندازه ناچ V شکل طبق استاندارد ASTM E23 [32]، به میزان ۲ میلی متر در نظر گرفته شد. با توجه به اهمیت چقرمگی فولاد در مخازن تحت فشار و سازه‌های مهندسی [33 و 34]، سه مرتبه آزمایش ضربه طبق ASTM A516 [35] و ASTM A20 [36] در دمای منفی ۵۲ فارنهایت انجام شد. همچنین استانداردهای EN 10163 [37] و ASTM E415 [30] به ترتیب

برای ارزیابی خواص مکانیکی ورق‌ها و الکتروود مصرفی، آزمون‌های کشش و ضربه روی نمونه‌ها به منظور برآورد خواص مکانیکی صورت پذیرفت. نمونه‌های آزمایش کشش و ضربه مطابق با استانداردهای ASTM A370 [31] و ASTM E23 [32] ساخته شد. آزمون کشش با نرخ بارگذاری ۱ میلی متر بر ثانیه و با سه بار تکرار انجام شد. شکل ۱، نمودار تنش-کرنش به دست آمده از آزمون کشش برای یک نمونه از ورق اصلی، ورق وصله و فلز رسوب شده الکتروود را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی حاصل از آزمون‌های کشش با سه تکرار، در جداول ۲ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمون ضربه برای ورق اصلی و ورق وصله

Table 3. Impact tests results for main and patch plate.

حد اقل انرژی جذب شده (ژول) مطابق با ASTM A۲۰	انحراف از معیار	میانگین	انرژی جذب شده در هر آزمون (ژول)			ورق مورد استفاده
			سوم	دوم	اول	
۱۵	۷/۷۷	۵۷/۶	۶۰	۴۹	۶۴	ورق اصلی
۲۰	۱/۵۳	۵۸/۳	۵۸	۵۷	۶۰	ورق وصله

استفاده از الکترودهای E ۷۰۱۸ قطر ۲/۵ میلی متر انجام شد. با توجه به توصیه سازنده، تمام الکترودها به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد، سپس قبل از استفاده در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در جعبه حرارتی قابل حمل نگهداری شد.

در این تحقیق سه رویه خنک‌کاری در نظر گرفته شده است که در حالت اولیه پنل اصلی در تبادل با هوای اطراف خنک شد. در حالت دوم و سوم از آب خنک کننده استفاده شد که شماتیک آن در شکل ۲ ارائه شده است. آب خروجی از پمپ سانتریفیوژ بصورت پیوسته با دمای ۲۵ درجه سلیسوس (به ترتیب با سرعت ۰/۵ و ۱/۵ متر بر ثانیه برای قطعه شماره ۲ و ۳) از قسمت پایین وارد محفظه خنک‌کن شد و از قسمت بالا خارج شد تا سطح زیرین پنل (سطح زیر پلیت اصلی) خنک شود. اندازه‌گیری و کنترل سرعت با استفاده از اندازه‌گیری دبی جریان انجام شد. این نوع خنک‌کاری مشابه حرکت سیال در درون لوله یا تجهیز تحت فشار است و به منظور ایجاد شرایط جوشکاری حین بهره‌برداری در مجتمع‌های فرآیندی می‌باشد [۳۹ و ۴۰]. عدد ذکر شده در نام اختصاری نمونه‌ها، رویه خنک‌کاری را نشان می‌دهد که شامل خنک‌کاری در دمای اتاق (برای نمونه‌های ORG-۱)، خنک‌کاری با جریان آب با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه (در مورد نمونه‌های ORG-۲) و خنک‌کاری با جریان آب با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه (نمونه‌های ORG-۳) می‌باشد.

۲-۳- آزمون‌های مکانیکی و متالوگرافی

پس از ساخت پانل‌ها، بازرسی جوش جهت تشخیص و شناسایی عیوب انجام گرفت. بدین منظور ابتدا پانل‌های ساخته شده، با استفاده از روش چشمی و مایعات نافذ<sup>۲</sup> بازرسی شد و سپس جهت بررسی عیوب زیر سطحی

برای ارزیابی شرایط سطح ورق‌ها و داده‌های آنالیز حرارتی قطعات مورد استفاده قرار گرفت. در گام نهایی هم آزمایش اولتراسونیک برای اطمینان از عدم وجود عیوب، تورق و تأیید کیفیت ورق انجام شد. پیرو آزمون‌های انجام شده، ورق‌ها عاری از هر گونه عیب بود. خواص مکانیکی حاصل از آزمون‌های ضربه در جداول ۳ نمایش داده شده است.

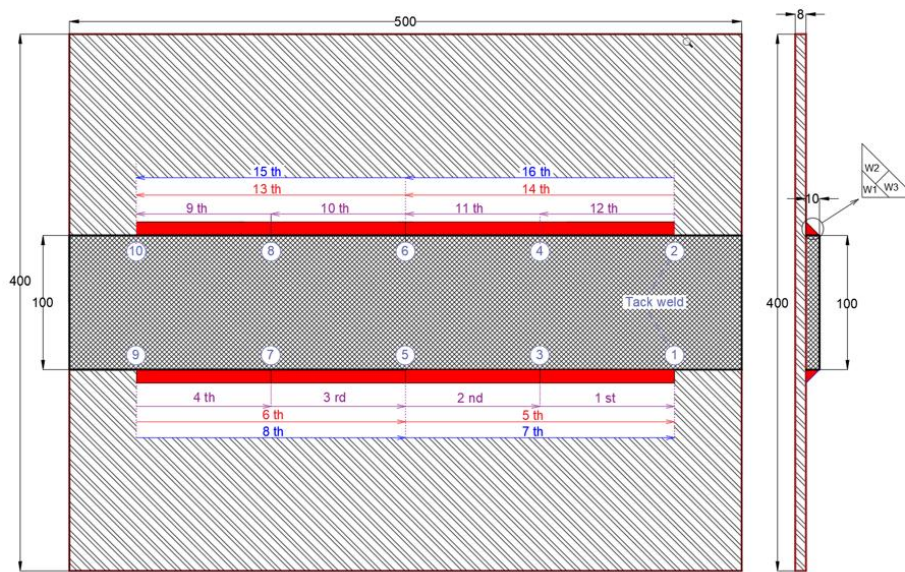
۲-۲- رویه جوشکاری

مطابق با شکل ۲، اندازه‌ی پانل‌های جوش ۴۰۰ × ۵۰۰ میلی‌متر و از جوش فیلت برای اتصال استفاده شد. جزئیات پیکربندی پانل‌های جوشکاری بصورت شماتیک و ترتیب اجرای پاس‌های جوش در شکل ۲ نمایش داده شده است. ترتیب اجرای پاس‌های جوش، بعد اسمی پاس‌ها و جوش گوشه‌ی نهایی در هر سه پانل یکسان بود ولی خنک‌کاری جوشکاری سه پانل تحت شرایط متفاوتی انجام شد. عملیات جوشکاری در هر سه پانل در سه پاس با فرآیند جوشکاری به روش دستی با الکتروود پوشش‌دار<sup>۱</sup> انجام شد که ترتیب گام‌های اجرا شده از شماره ۱ تا ۱۶ در تصویر ۲ نشان داده شده است. پاس جوش دوم و سوم زمانی انجام شد که دمای بین پاسی، به حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. در فرآیند جوشکاری از الکتروود AWS EY۰۱۸ با قطر ۲/۵ میلی‌متر برای پاس اول، و قطر ۳/۲ میلی‌متری برای پاس دوم و سوم (مطابق با توصیه‌های API-RP ۲۲۰۱ متناسب با ضخامت ورق‌های اصلی و وصله) استفاده شد [۳۸]. برای ساخت پانل‌های اصلی، وصله‌ها دقیقاً در مرکز ورق اصلی قرار داده شد. فاصله بین وصله و ورق اصلی با کمک گیره‌های مکانیکی و پیچ‌های دستی قبل از جوشکاری اصلی به حدود صفر میلی‌متر کاهش داده شد. در مرحله بعد، برای جلوگیری از حرکت وصله‌ها قبل از جوشکاری در نقاط ۱ تا ۱۰ (مطابق شکل ۲ الف) از خال جوش‌های استاندارد ۱۰ میلی‌متری استفاده شد. خال جوش‌ها با

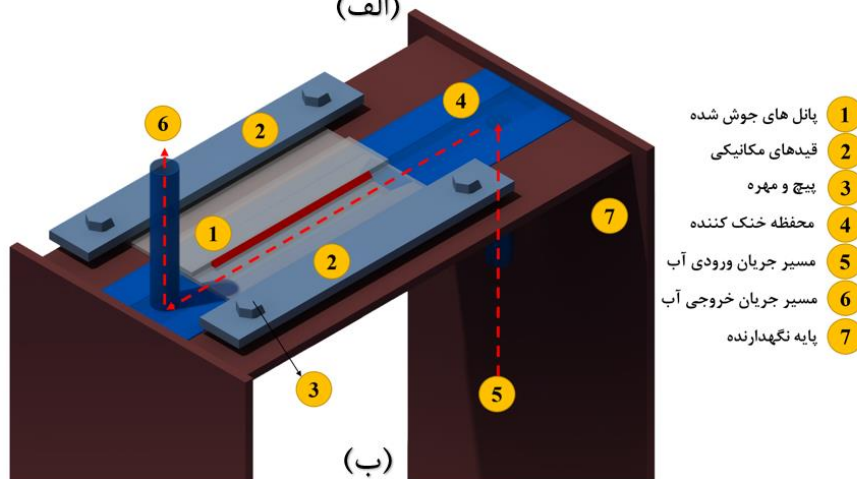
2 Penetration test

1 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)





(الف)



(ب)

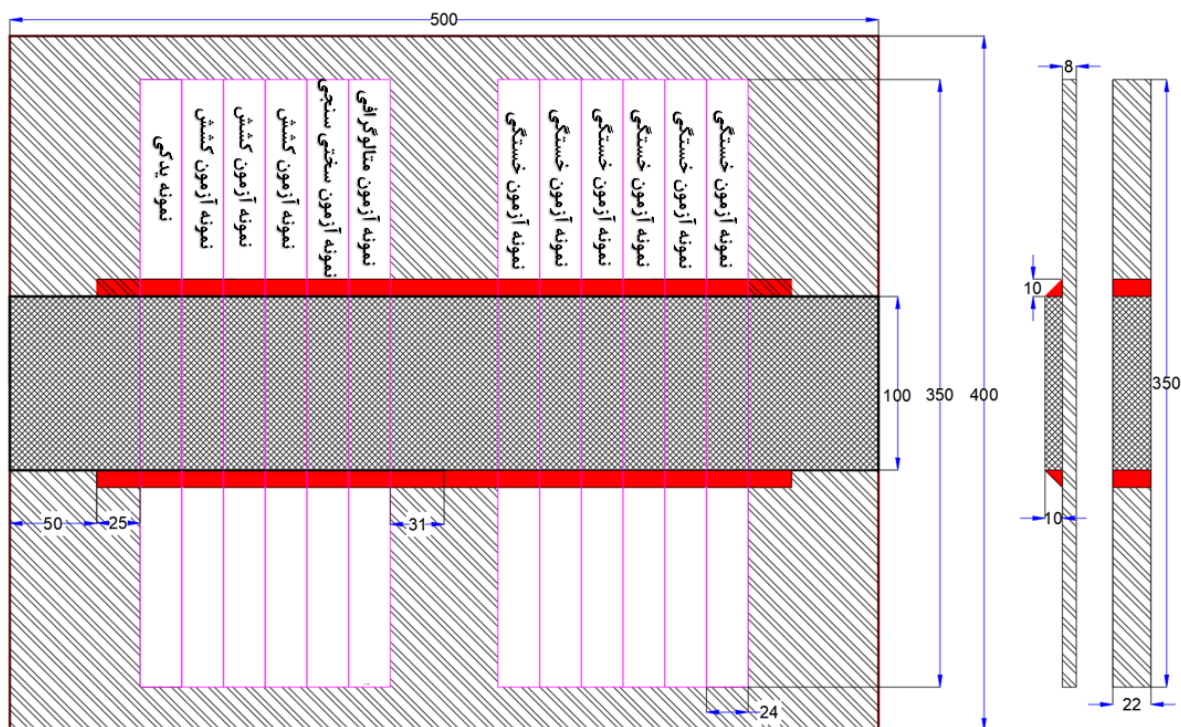
شکل ۲. (الف) ترتیب و توالی جوشکاری در پانل مونتاژ شده و (ب) شماتیک تست ریگ جوشکاری حین بهره‌برداری

Fig. 2. (a) Welding sequence of fabricated panels and (b) schematic of in-service welding test rig

جدول ۴. دستورالعمل جوشکاری پنل‌های ORG

Table 4. Welding procedure specification for the ORG panels.

شماره پاس جوشکاری	فرآیند جوشکاری	الکتروود مصرفی	نوع جریان جوشکاری	قطر الکتروود (میلی متر)	حالت جوشکاری	شدت جریان (آمپر)	اختلاف پتانسیل جوشکاری (ولت)	سرعت جوشکاری (میلی متر در ثانیه)
پاس اول	SMAW	E۷۰۱۸	DCEP	۲/۵	2F	۹۴±۳	۲۲/۵±۲	۲/۱
پاس دوم	SMAW	E۷۰۱۸	DCEP	۳/۲	2F	۱۲۱±۴	۲۲/۵±۲	۲/۱
پاس سوم	SMAW	E۷۰۱۸	DCEP	۳/۲	2F	۹۹±۳	۲۲/۵±۲	۲/۲



شکل ۳. نمای شماتیک پانل‌های جوشکاری و هندسه نمونه‌های برش خورده پس از سنگ زنی دقیق

Fig. 3. Schematic view of welded panel and geometry of the test specimens after precision machining

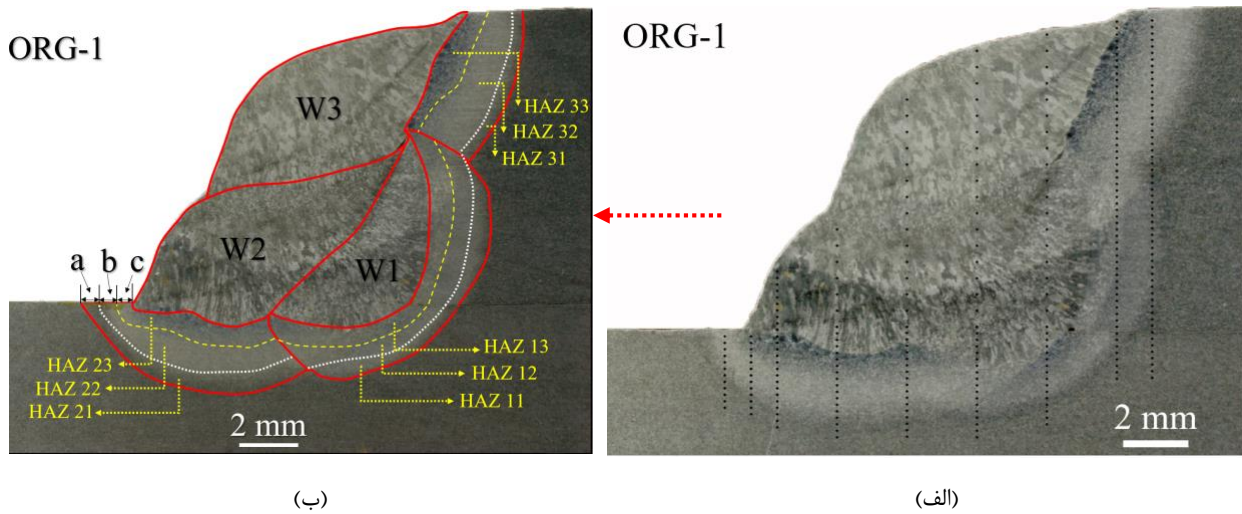
به منظور مشخص کردن محدوده بارگذاری خستگی انجام شد. حداکثر تنش اسمی در بارگذاری چرخه‌ای در آزمون‌های خستگی متفاوت بوده و ۹۵٪ تا ۶۰٪ تنش تسلیم نمونه جوشی اولیه (۳۹۰ مگاپاسکال) از گروه ۱-ORG انتخاب شد تا بارگذاری نمونه‌ها در محدوده الاستیک قرار بگیرد. نمونه‌های آزمون خستگی از هر طرف به میزان ۷۵ میلی‌متر داخل گیره‌های سروجک هیدرولیک قرار گرفتند.

به منظور انجام آزمون سختی، سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذ ساینده سیلیسیم کاربید (SiC) از گریت ۱۲۰ تا ۲۵۰۰ پولیش شد و در نهایت با پودر آلومینا ۱ میکرونی در سوسپانسیون آب پرداخت شد تا سطح قطعه کاملاً صاف و هموار شود. پس از پرداخت، نمونه به مدت ۳ تا ۵ ثانیه در محلول نیتال ۲ درصد (اتانول + اسید نیتریک) [۴۱] و سپس با اتانول شستشو شد. پس از انجام متالوگرافی، سختی سنجی با روش میکرو ویکرز مطابق با ISO-۶۵۰۷ [۴۲] با بار ۱/۹۶ نیوتن و زمان ماند ۱۵ ثانیه انجام شد. از داده‌های میکروسختی بدست آمده در بخش تجربی جهت تخمین خواص مکانیکی و خستگی مناطق مختلف جوش نمونه‌های جوشکاری شده در بخش عددی استفاده شده است. برای افزایش دقت نتایج از یک

داخلی از روش اولتراسونیک<sup>۱</sup> استفاده شد. بر اساس نتایج بازرسی، همه پانل‌های ساخته شده عاری از هر گونه عیب بودند. از هر پانل تعداد ۱۲ نمونه آزمون با عرض ۲۴ میلی‌متر و طول ۳۵۰ میلی‌متر با استفاده از برش واترجت استخراج شد. در شکل ۳، موقعیت برش قطعات آزمون کشش، خستگی، میکروسختی و متالوگرافی از پانل اصلی نشان داده شده است. برای انجام آزمون کشش و خستگی، لبه‌های قطعات بصورت دقیق سنگ زنی شد تا کاملاً صاف و یکنواخت و یک اندازه شوند. عرض قطعات بعد از سنگ‌زنی دقیق به ۲۲ میلی‌متر کاهش یافت.

آزمایش‌های خستگی محوری با دستگاه سرو هیدرولیک<sup>۲</sup> Zwick/Roell Amsler HB۲۵۰ با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن، بصورت نیرو-کنترل انجام شد. شکل موج سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز به عنوان شکل موج بارگذاری انتخاب شد. به منظور اجتناب از کماتش نمونه‌ها و نزدیکی بارگذاری به حالت واقعی مساله، نسبت تنش  $R=+0/1$  در نظر گرفته شد. قبل از آزمون خستگی سه نمونه از قطعات تحت تست کشش قرار گرفتند که تنش تسلیم میانگین آنها ۳۹۰ مگاپاسکال گزارش شد. این تست

- 1 Ultrasonic
- 2 Servo Hydraulic



شکل ۴. (الف) شماتیک مسیر و موقعیت ایندنت های سختی سنج در نمونه ORG-۱ و (ب) مرزهای مناطق متأثر از حرارت و جوش برای قطعه ORG-۱

Fig. 4. (a): Schematic of the hardness indents path and locations for ORG-1 (b): The boundary of HAZs and weld zones for ORG-1

۳) در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس مدل سازی شد. با توجه به اینکه پس از پیاده سازی جوشکاری مناطق مختلفی شامل ناحیه جوش، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه در نمونه جوش ایجاد می شود، باید این تفکیک مناطق در نرم افزار اجزاء محدود نیز مدل سازی شود. بدین منظور از تصاویر ماکرو اتچ<sup>۴</sup> مناطق جوش (مطابق با شکل ۴) و الگوهای میکروسختی مناطق مختلف جوشکاری استفاده شد و بر اساس الگو و مقادیر میکروسختی بدست آمده از ناحیه جوشکاری، این منطقه به بخش های کوچک تری تحت عنوان ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت (مختص به هر پاس) تفکیک شد. لازم به ذکر است بر اساس مقادیر میانگین میکروسختی در نواحی مختلف، هر کدام از نواحی جوش پاس های مختلف در یک ناحیه و هر کدام از مناطق HAZ مرتبط با آن پاس جوشکاری در سه ناحیه مجزا تفکیک شد. سپس با استفاده از تفکیک های صورت گرفته ریز ساختاری، هندسه سه بعدی مدل در نرم افزار آباکوس مدل سازی و پارتیشن بندی شد که شماتیک آن در شکل ۵ ارائه شده است. پس از مدلسازی هندسی نمونه های عددی، جهت افزایش دقت تحلیل، آنالیز حساسیت به مش نیز صورت پذیرفت و مش بندی به گونه ای انجام گرفت تا ناحیه جوشکاری و نواحی متأثر از حرارت دارای مشی با چگالی بالاتر نسبت با سایر مناطق نمونه آزمون (با ابعاد ۲۵×۲۵×۱ میلی متر) باشد. در نهایت هر کدام از سه نمونه جوشکاری شده با تعداد المان هایی در

رویکرد جدید در پروسه سختی سنجی نمونه ها بهره گرفته شد. بدین منظور، سختی سنجی نمونه ها در مسیرهایی در راستای ضخامت وصله و پلیت اصلی در ناحیه جوشکاری انجام پذیرفت. فاصله نقاط سختی سنجی در ناحیه جوش<sup>۱</sup> برابر با ۵۰۰ میکرون و در نواحی تحت تأثیر حرارت<sup>۲</sup> برابر با ۲۰۰ میکرون لحاظ شد. در شکل ۴ الف، به عنوان نمونه، الگوی سختی سنجی پیاده سازی شده در نمونه ORG-۱ نمایش داده شده است. همچنین به منظور مشخص نمودن مرزهای نواحی مختلف در قطعات (مطابق با شکل ۴ ب) از میکروسکوپ نوری و نتایج سختی استفاده شد.

### ۳- بانی شبیه سازی و تخمین عمر

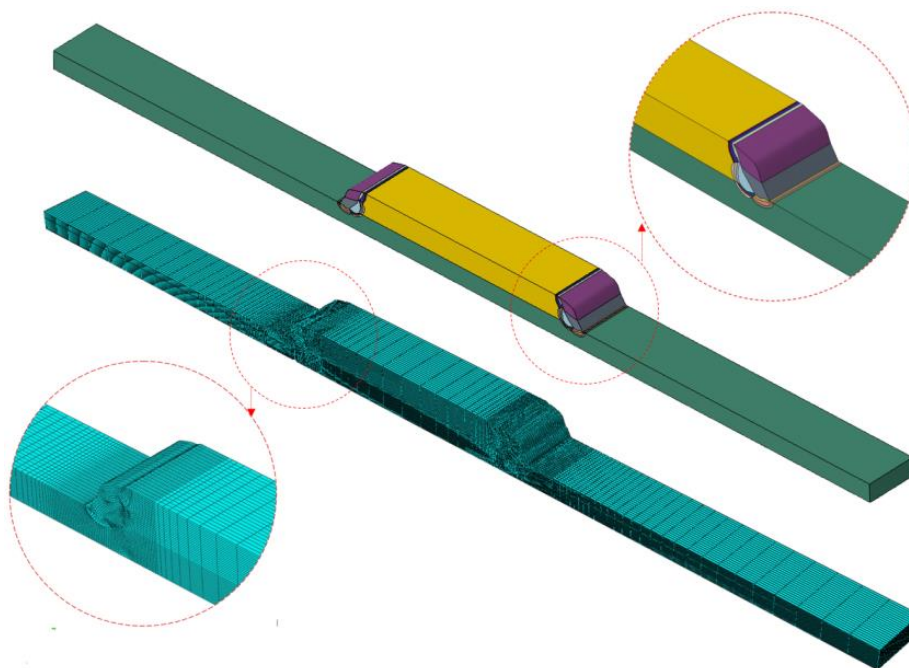
#### ۳-۱- شبیه سازی عددی-تحلیل تنش

در پژوهش حاضر علاوه بر آزمون های تجربی، از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس<sup>۳</sup> [۴۳] برای شبیه سازی عددی و تحلیل تنش به منظور پیش بینی عمر خستگی استفاده شده است. با کد نویسی به زبان فرترن، نتایج خروجی از تحلیل المان محدود، توسط یک سابروتین UVARM به مدل های خستگی منتقل و تخمین عمر خستگی انجام شده است. بدین منظور نمونه هایی مطابق با ابعاد نمونه های تجربی آزمون خستگی (شکل

- |   |                    |
|---|--------------------|
| 1 | Weld zone          |
| 2 | Heat Affected Zone |
| 3 | Abaqus 2017        |

4 Macro etch





شکل ۵. شماتیک مدل هندسی، مش و نحوه پارتیشن بندی یکی از نمونه‌های مورد بررسی (نمونه ۱- ORG)

Fig. 5. Schematic of geometrical model, mesh, and partitioning method of one of the investigated samples (ORG-1 sample)

خواص ماده پایه می‌باشد. همچنین  $H_i$  بیانگر سختی میانگین منطقه جوشکاری مورد نظر و  $H_B$  برابر با سختی ماده پایه می‌باشد. همچنین جهت تعریف خواص خستگی هر ناحیه جوشکاری که شامل پارامترهای  $\sigma'_f$  و  $\epsilon'_f$  که به ترتیب استحکام خستگی و داکتیلیته خستگی و دو ثابت  $b$  و  $c$  که به ترتیب توان استحکام خستگی و توان داکتیلیته خستگی می‌باشد، از روابط پیشنهاد شده توسط ژائو و همکاران [۴۴] و داوولینگ [۴۵] استفاده شد که در معادلات (۲) تا (۵) روابط آن ارائه شده است.

$$\sigma'_f = 3.98(H_i) + 285 \quad (2)$$

$$b = -0.09 \quad (3)$$

$$\epsilon'_f = 1.5 \times 10^{(-6)} (H_i)^{2.35}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$c = -0.54 \quad (5)$$

محدوده‌ی بین ۶۰۰۰۰-۵۰۰۰۰ المان از خانواده C3D8R مش بندی شد. رفتار مناطق مختلف، به صورت الاستیک-پلاستیک با سخت‌شوندگی سینماتیکی با معیار وان میسر در نظر گرفته شده است تا تحلیل‌ها هر چه بیش‌تر به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر باشد. همانطور که اشاره شد، به منظور برآورد خواص نواحی مختلف نمونه‌ها، از میکروسختی میانگین هر ناحیه بهره گرفته شد. مقادیر میکروسختی میانگین بدست آمده برای مناطق مختلف نمونه‌های جوشکاری در جدول ۵ ارائه شده است

جهت برآورد خواص ماده در مرحله نخست، خواص مکانیکی شامل تنش تسلیم و تنش‌نهایی هر یک از نواحی جوشکاری بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد. بدین منظور، مطابق با روند پیشنهاد شده در پیشینه پژوهش [۱۷ و ۲۲] بر اساس رابطه (۱) و استفاده از خواص مکانیکی پایه نمونه جوشکاری ارائه شده در جدول ۲، تنش تسلیم و تنش‌نهایی معادل برای هر منطقه به صورت جداگانه محاسبه شد.

$$P_i = P_B \frac{H_i}{H_B}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

که در این رابطه  $P_i$  بیانگر خواص مکانیکی عنوان شده نمونه و  $P_B$

جدول ۵. مقادیر میکروسختی مناطق مختلف جوشکاری نمونه‌های مورد بررسی

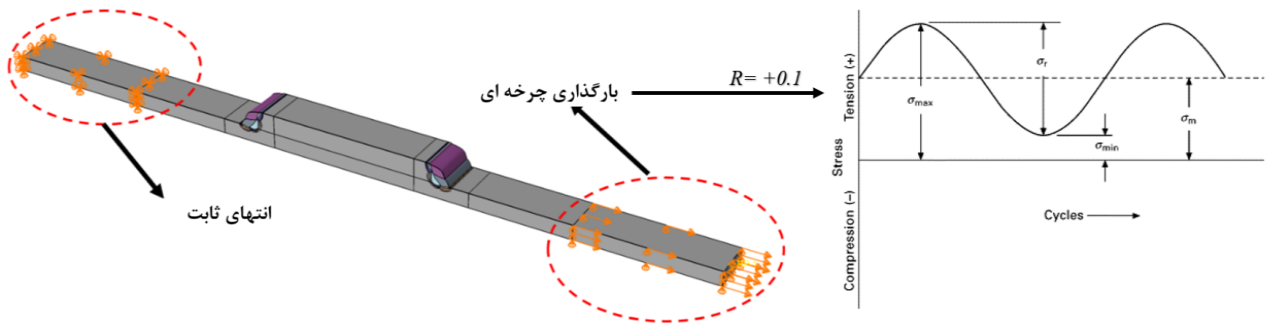
Table 5. Average micro hardness values of different welded areas of the studied samples.

اندازه میکرو سختی (ویکرز)						منطقه اندازه گیری سختی
ORG-1		ORG-2		ORG-3		
انحراف از معیار	میانگین	انحراف از معیار	میانگین	انحراف از معیار	میانگین	
۵/۲	۱۷۸/۱	۶/۲	۱۷۸/۳	۵/۵	۱۷۸/۴	فلز پایه
۱۰/۵	۱۹۷/۴	۱۲/۳	۲۲۴/۴	۱۰/۲	۲۳۲/۲	W1
۱۰/۶	۲۱۵/۳	۱۲/۹	۲۷۰/۲	۱۳/۵	۲۸۵/۲	W2
۹/۵	۲۱۸/۷	۱۰/۵	۲۴۸/۱	۱۲/۴	۲۵۱/۹	W3
۷/۱	۲۰۸/۹	۸/۷	۲۳۵/۲	۸/۵	۲۶۹/۷	HAZ 11
۸/۷	۲۲۹/۸	۱۵/۹	۳۶۰/۸	۱۴/۵	۳۲۴/۸	HAZ 12
۱۲/۳	۲۶۶/۹	۱۸/۵	۳۹۵/۹	۲۰/۱	۴۶۲/۷	HAZ 13
۱۰/۲	۲۱۵/۲	۱۰/۳	۲۵۳/۸	۸/۹	۲۵۹/۲	HAZ 21
۱۲/۳	۲۴۸/۸	۱۴/۷	۳۶۴/۲	۱۲/۶	۳۸۲/۴	HAZ 22
۱۰/۲	۲۸۴/۷	۱۵/۴	۳۷۸/۷	۱۷/۱	۴۲۴/۸	HAZ 23
۸/۲	۲۱۰/۴	۱۲/۸	۲۳۷/۹	۱۰/۱	۲۶۸/۷	HAZ 31
۹/۵	۲۳۴/۹	۱۴/۹	۳۶۲/۹	۱۶/۳	۳۲۰/۱	HAZ 32
۱۰/۷	۲۶۹/۲	۱۷/۲	۳۸۰/۱	۲۰/۱	۴۵۱/۳	HAZ 33

استفاده شد. به نظر می‌رسد به دلیل استفاده از سخت‌شوندگی سینماتیکی، حلقه‌های تنش-کرنش غیر ارتجاعی سریعتر به وضعیت پایدار رسیده باشند. در مطالعه حاضر مکانیک آسیب در محیط‌های پیوسته و کاهش چرخه به چرخه مشخصات مکانیکی مدل نشده است. با توجه به اینکه بارگذاری خستگی بصورت تنش-کنترل می‌باشد فقط در یک سطح تنش (۳۷۰/۵) مگاپاسکال) کرنش پلاستیک بوجود می‌آید و برای بقیه سطوح مقدار بار چرخه‌ای اعمالی، هیچ ناحیه‌ای از قطعه دچار تغییر شکل پلاستیک نمی‌شود. لازم به توضیح است که پنجه جوش (محل تمرکز تنش) به دلیل سختی بالاتر (مطابق با جدول ۵) و مطابق با رابطه (۱)، خواص مکانیکی (تنش تسلیم، تنش کششی) بهبود یافته‌تری را دارد.

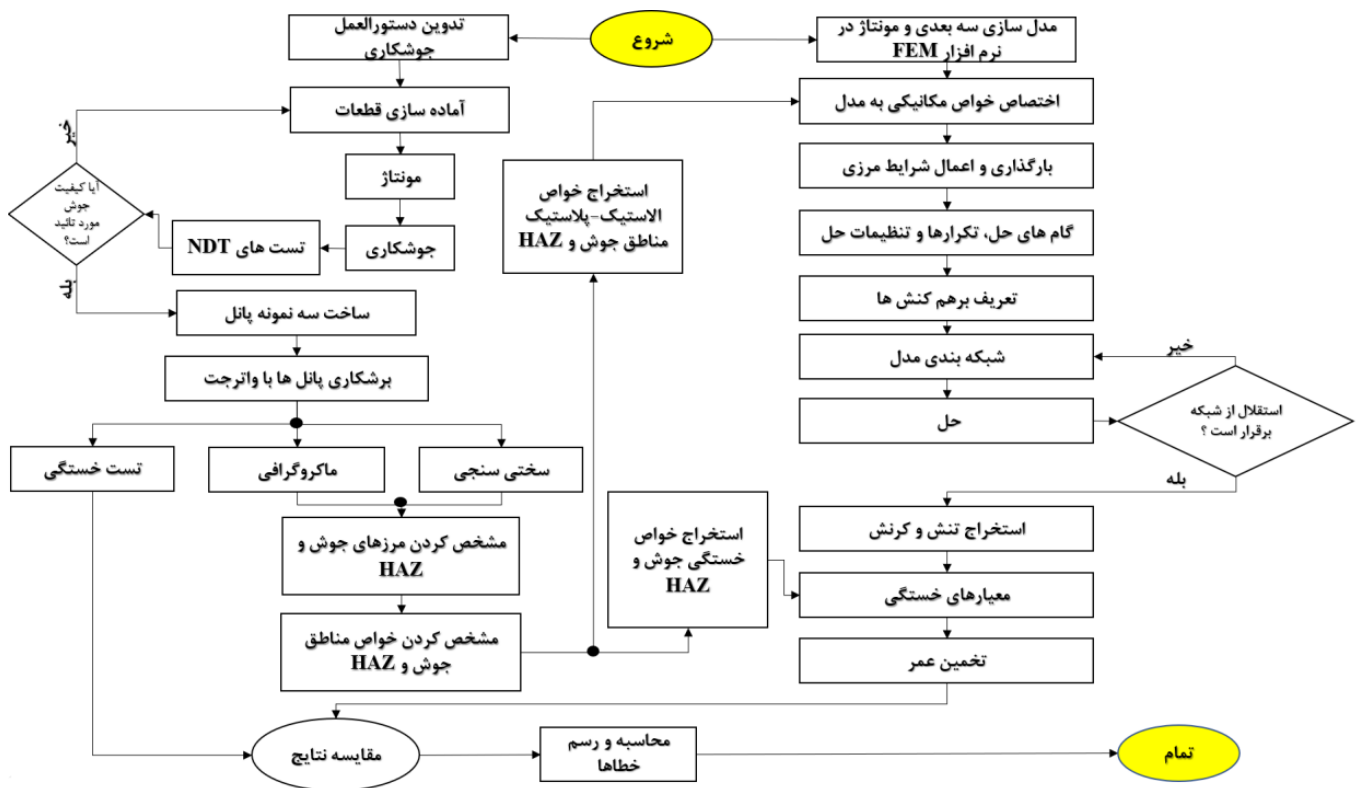
شرایط مرزی اعمالی نمونه‌ها مطابق با آزمون تجربی در نظر گرفته شد یعنی هر طرف نمونه به اندازه ۷۵ میلی‌متر مقید شد. یک سمت نمونه به صورت کامل در همه درجات آزادی بسته شد و به طرف مقابل نیرویی در راستای طول نمونه جوشکاری شده معادل با حداکثر تنش بارگذاری در آزمون تجربی خستگی اعمال شد. در شکل ۵ شماتیک شرایط مرزی اعمالی به یکی از نمونه‌ها نمایش داده شده است.

با استفاده از روابط (۱) تا (۵) و خواص مکانیکی ارائه شده مواد پایه (جدول ۲) و مقادیر سختی میانگین مناطق مختلف (جدول ۵)، خواص کششی و خستگی مورد نیاز برای مرحله تحلیل تنش و تخمین عمر خستگی برای هر سه پانل مورد بررسی محاسبه و به نرم افزار اجزاء محدود معرفی شد. با استفاده از این روش، بدون انجام شبیه‌سازی عددی مرحله جوشکاری، خواص مواد مطابق با تغییرات موجود در نمونه‌های جوشکاری به مدل‌های مورد بررسی اعمال شد. جهت افزایش دقت حل، به علت وجود تماس بین وصله و ورق اصلی و هندسه غیریکنواخت از تحلیل المان محدود با هندسه غیر خطی و برورسانی ماتریس سختی استفاده شده است تا اثرات تماس بین ورق و وصله اصلی اعمال شود [۴۶]. جهت پیاده‌سازی مرحله تحلیل تنش از یک گام حل استاتیکی استفاده شد تا نتایج تحلیل تنش پایدار شود. لازم به ذکر است که در هر گروه از نمونه‌ها (ORG-۱، ORG-۲، ORG-۳ و ORG-۴)، یک مدل تا ۱۰۰ سیکل اجرا شده است و از آنجایی که از سیکل ۱۰ به بعد تغییرات محسوسی در میدان تنش و کرنش مشاهده نشد به منظور صرفه جویی در زمان محاسبات در مدل‌های دیگر به عنوان فرض مسئله، از نتایج میدان تنش و کرنش سیکل ۱۰ ام برای تخمین عمر خستگی



شکل ۶. شماتیک بارگذاری و شرایط مرزی اعمالی

Fig. 6. Schematic of loading and applied boundary conditions



شکل ۷. فلوچارت تخمین عمر قطعات جوشی وصله ای

Fig. 7. Flowchart of life estimation of patch welded parts

در شکل ۷، برای پیش بینی عمر خستگی نمونه‌ها از دو معیار مختلف، یعنی معیارهای براون-میلر<sup>۱</sup> اصلاح شده با اعمال تنش متوسط مارو و گلینکا<sup>۲</sup> استفاده شده است. در ادامه، این معیارها بطور خلاصه توضیح داده شده است.

- 1 Brown-Miller
- 2 Glinka

۳-۲- تخمین عمر همانطور که اشاره شد مرحله تحلیل تنش-کرنش در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شد. در گام بعدی تخمین عمر خستگی به واسطه کدنویسی به زبان فرترن در قالب سابروتین UVARM با استفاده از مدل‌های خستگی صورت پذیرفته است. در این تحقیق مطابق با فلوچارت ارائه شده

### ۳-۲-۱ معیار براون-میلر با کاربرد تنش متوسط مارو

معیار براون-میلر با اعمال اثر تنش متوسط مارو، یک رابطه تخمین خستگی چند محوره بر پایه صفحه بحرانی است که رابطه آن در معادله (۶) الی (۸) ارائه شده است. بران و میلر نشان دادند که دو پارامتر کرنش برای توضیح فرایند خستگی لازم است. آن‌ها نشان دادند که علاوه بر  $\Delta\gamma_{\max}$  (بازه کرنش برشی روی صفحه کرنش برشی بیشینه)،  $\Delta\varepsilon_n$  (بازه کرنش عمودی روی همان صفحه) نیز در عمر خستگی مؤثر است. با کاربرد روش تنش متوسط مارو، یعنی کم کردن تنش متوسط از ضریب مقاومت خستگی، اثرات تنش متوسط نیز منظور می‌گردد [۴۷]. توجه شود که  $\sigma_m$ ، تنش متوسط محوری می‌باشد. در این رابطه S، ضریب اثر کرنش عمودی می‌باشد که در این تحقیق با توجه به ماده مورد استفاده، مقدار  $S = 0.5$  مناسب‌ترین جواب را ارائه می‌نماید. قبلاً نیز همین مقدار برای ضریب اثر کرنش محوری در برخی مراجع [۴۷ و ۴۸] به عنوان مقدار بهینه انتخاب شده است. مقدار بیشینه سمت چپ معادله پس از پیدا کردن صفحه بحرانی محاسبه شده است.

$$\frac{\Delta\gamma}{2} \cdot \frac{\Delta\tau}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} \cdot \frac{\Delta\sigma_n}{2} = \frac{\sigma'_f}{2E} (2N_f)^{2b} + \frac{E\varepsilon'_f}{2} (2N_f)^{b+c} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}\right)_{\theta_1} - \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}\right)_{\theta_2} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}\right)_{\theta_1} - \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}\right)_{\theta_2} \quad (11)$$

$$\Delta\tau = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}\right)_{\theta_1} - \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}\right)_{\theta_2} \quad (12)$$

$$\Delta\sigma_n = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}\right)_{\theta_1} - \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}\right)_{\theta_2} \quad (13)$$

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- نتایج تجربی

در این پژوهش به بررسی نمونه‌های جوشکاری شده اتصال وصله‌ای با سه الگوی خنک‌کاری متفاوت در دمای اتاق برای نمونه‌های با شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲، ۶۳، ۶۴، ۶۵، ۶۶، ۶۷، ۶۸، ۶۹، ۷۰، ۷۱، ۷۲، ۷۳، ۷۴، ۷۵، ۷۶، ۷۷، ۷۸، ۷۹، ۸۰، ۸۱، ۸۲، ۸۳، ۸۴، ۸۵، ۸۶، ۸۷، ۸۸، ۸۹، ۹۰، ۹۱، ۹۲، ۹۳، ۹۴، ۹۵، ۹۶، ۹۷، ۹۸، ۹۹، ۱۰۰، ۱۰۱، ۱۰۲، ۱۰۳، ۱۰۴، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۰۷، ۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۰، ۱۱۱، ۱۱۲، ۱۱۳، ۱۱۴، ۱۱۵، ۱۱۶، ۱۱۷، ۱۱۸، ۱۱۹، ۱۲۰، ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۴، ۱۲۵، ۱۲۶، ۱۲۷، ۱۲۸، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱، ۱۳۲، ۱۳۳، ۱۳۴، ۱۳۵، ۱۳۶، ۱۳۷، ۱۳۸، ۱۳۹، ۱۴۰، ۱۴۱، ۱۴۲، ۱۴۳، ۱۴۴، ۱۴۵، ۱۴۶، ۱۴۷، ۱۴۸، ۱۴۹، ۱۵۰، ۱۵۱، ۱۵۲، ۱۵۳، ۱۵۴، ۱۵۵، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۵۹، ۱۶۰، ۱۶۱، ۱۶۲، ۱۶۳، ۱۶۴، ۱۶۵، ۱۶۶، ۱۶۷، ۱۶۸، ۱۶۹، ۱۷۰، ۱۷۱، ۱۷۲، ۱۷۳، ۱۷۴، ۱۷۵، ۱۷۶، ۱۷۷، ۱۷۸، ۱۷۹، ۱۸۰، ۱۸۱، ۱۸۲، ۱۸۳، ۱۸۴، ۱۸۵، ۱۸۶، ۱۸۷، ۱۸۸، ۱۸۹، ۱۹۰، ۱۹۱، ۱۹۲، ۱۹۳، ۱۹۴، ۱۹۵، ۱۹۶، ۱۹۷، ۱۹۸، ۱۹۹، ۲۰۰، ۲۰۱، ۲۰۲، ۲۰۳، ۲۰۴، ۲۰۵، ۲۰۶، ۲۰۷، ۲۰۸، ۲۰۹، ۲۱۰، ۲۱۱، ۲۱۲، ۲۱۳، ۲۱۴، ۲۱۵، ۲۱۶، ۲۱۷، ۲۱۸، ۲۱۹، ۲۲۰، ۲۲۱، ۲۲۲، ۲۲۳، ۲۲۴، ۲۲۵، ۲۲۶، ۲۲۷، ۲۲۸، ۲۲۹، ۲۳۰، ۲۳۱، ۲۳۲، ۲۳۳، ۲۳۴، ۲۳۵، ۲۳۶، ۲۳۷، ۲۳۸، ۲۳۹، ۲۴۰، ۲۴۱، ۲۴۲، ۲۴۳، ۲۴۴، ۲۴۵، ۲۴۶، ۲۴۷، ۲۴۸، ۲۴۹، ۲۵۰، ۲۵۱، ۲۵۲، ۲۵۳، ۲۵۴، ۲۵۵، ۲۵۶، ۲۵۷، ۲۵۸، ۲۵۹، ۲۶۰، ۲۶۱، ۲۶۲، ۲۶۳، ۲۶۴، ۲۶۵، ۲۶۶، ۲۶۷، ۲۶۸، ۲۶۹، ۲۷۰، ۲۷۱، ۲۷۲، ۲۷۳، ۲۷۴، ۲۷۵، ۲۷۶، ۲۷۷، ۲۷۸، ۲۷۹، ۲۸۰، ۲۸۱، ۲۸۲، ۲۸۳، ۲۸۴، ۲۸۵، ۲۸۶، ۲۸۷، ۲۸۸، ۲۸۹، ۲۹۰، ۲۹۱، ۲۹۲، ۲۹۳، ۲۹۴، ۲۹۵، ۲۹۶، ۲۹۷، ۲۹۸، ۲۹۹، ۳۰۰، ۳۰۱، ۳۰۲، ۳۰۳، ۳۰۴، ۳۰۵، ۳۰۶، ۳۰۷، ۳۰۸، ۳۰۹، ۳۱۰، ۳۱۱، ۳۱۲، ۳۱۳، ۳۱۴، ۳۱۵، ۳۱۶، ۳۱۷، ۳۱۸، ۳۱۹، ۳۲۰، ۳۲۱، ۳۲۲، ۳۲۳، ۳۲۴، ۳۲۵، ۳۲۶، ۳۲۷، ۳۲۸، ۳۲۹، ۳۳۰، ۳۳۱، ۳۳۲، ۳۳۳، ۳۳۴، ۳۳۵، ۳۳۶، ۳۳۷، ۳۳۸، ۳۳۹، ۳۴۰، ۳۴۱، ۳۴۲، ۳۴۳، ۳۴۴، ۳۴۵، ۳۴۶، ۳۴۷، ۳۴۸، ۳۴۹، ۳۵۰، ۳۵۱، ۳۵۲، ۳۵۳، ۳۵۴، ۳۵۵، ۳۵۶، ۳۵۷، ۳۵۸، ۳۵۹، ۳۶۰، ۳۶۱، ۳۶۲، ۳۶۳، ۳۶۴، ۳۶۵، ۳۶۶، ۳۶۷، ۳۶۸، ۳۶۹، ۳۷۰، ۳۷۱، ۳۷۲، ۳۷۳، ۳۷۴، ۳۷۵، ۳۷۶، ۳۷۷، ۳۷۸، ۳۷۹، ۳۸۰، ۳۸۱، ۳۸۲، ۳۸۳، ۳۸۴، ۳۸۵، ۳۸۶، ۳۸۷، ۳۸۸، ۳۸۹، ۳۹۰، ۳۹۱، ۳۹۲، ۳۹۳، ۳۹۴، ۳۹۵، ۳۹۶، ۳۹۷، ۳۹۸، ۳۹۹، ۴۰۰، ۴۰۱، ۴۰۲، ۴۰۳، ۴۰۴، ۴۰۵، ۴۰۶، ۴۰۷، ۴۰۸، ۴۰۹، ۴۱۰، ۴۱۱، ۴۱۲، ۴۱۳، ۴۱۴، ۴۱۵، ۴۱۶، ۴۱۷، ۴۱۸، ۴۱۹، ۴۲۰، ۴۲۱، ۴۲۲، ۴۲۳، ۴۲۴، ۴۲۵، ۴۲۶، ۴۲۷، ۴۲۸، ۴۲۹، ۴۳۰، ۴۳۱، ۴۳۲، ۴۳۳، ۴۳۴، ۴۳۵، ۴۳۶، ۴۳۷، ۴۳۸، ۴۳۹، ۴۴۰، ۴۴۱، ۴۴۲، ۴۴۳، ۴۴۴، ۴۴۵، ۴۴۶، ۴۴۷، ۴۴۸، ۴۴۹، ۴۵۰، ۴۵۱، ۴۵۲، ۴۵۳، ۴۵۴، ۴۵۵، ۴۵۶، ۴۵۷، ۴۵۸، ۴۵۹، ۴۶۰، ۴۶۱، ۴۶۲، ۴۶۳، ۴۶۴، ۴۶۵، ۴۶۶، ۴۶۷، ۴۶۸، ۴۶۹، ۴۷۰، ۴۷۱، ۴۷۲، ۴۷۳، ۴۷۴، ۴۷۵، ۴۷۶، ۴۷۷، ۴۷۸، ۴۷۹، ۴۸۰، ۴۸۱، ۴۸۲، ۴۸۳، ۴۸۴، ۴۸۵، ۴۸۶، ۴۸۷، ۴۸۸، ۴۸۹، ۴۹۰، ۴۹۱، ۴۹۲، ۴۹۳، ۴۹۴، ۴۹۵، ۴۹۶، ۴۹۷، ۴۹۸، ۴۹۹، ۵۰۰، ۵۰۱، ۵۰۲، ۵۰۳، ۵۰۴، ۵۰۵، ۵۰۶، ۵۰۷، ۵۰۸، ۵۰۹، ۵۱۰، ۵۱۱، ۵۱۲، ۵۱۳، ۵۱۴، ۵۱۵، ۵۱۶، ۵۱۷، ۵۱۸، ۵۱۹، ۵۲۰، ۵۲۱، ۵۲۲، ۵۲۳، ۵۲۴، ۵۲۵، ۵۲۶، ۵۲۷، ۵۲۸، ۵۲۹، ۵۳۰، ۵۳۱، ۵۳۲، ۵۳۳، ۵۳۴، ۵۳۵، ۵۳۶، ۵۳۷، ۵۳۸، ۵۳۹، ۵۴۰، ۵۴۱، ۵۴۲، ۵۴۳، ۵۴۴، ۵۴۵، ۵۴۶، ۵۴۷، ۵۴۸، ۵۴۹، ۵۵۰، ۵۵۱، ۵۵۲، ۵۵۳، ۵۵۴، ۵۵۵، ۵۵۶، ۵۵۷، ۵۵۸، ۵۵۹، ۵۶۰، ۵۶۱، ۵۶۲، ۵۶۳، ۵۶۴، ۵۶۵، ۵۶۶، ۵۶۷، ۵۶۸، ۵۶۹، ۵۷۰، ۵۷۱، ۵۷۲، ۵۷۳، ۵۷۴، ۵۷۵، ۵۷۶، ۵۷۷، ۵۷۸، ۵۷۹، ۵۸۰، ۵۸۱، ۵۸۲، ۵۸۳، ۵۸۴، ۵۸۵، ۵۸۶، ۵۸۷، ۵۸۸، ۵۸۹، ۵۹۰، ۵۹۱، ۵۹۲، ۵۹۳، ۵۹۴، ۵۹۵، ۵۹۶، ۵۹۷، ۵۹۸، ۵۹۹، ۶۰۰، ۶۰۱، ۶۰۲، ۶۰۳، ۶۰۴، ۶۰۵، ۶۰۶، ۶۰۷، ۶۰۸، ۶۰۹، ۶۱۰، ۶۱۱، ۶۱۲، ۶۱۳، ۶۱۴، ۶۱۵، ۶۱۶، ۶۱۷، ۶۱۸، ۶۱۹، ۶۲۰، ۶۲۱، ۶۲۲، ۶۲۳، ۶۲۴، ۶۲۵، ۶۲۶، ۶۲۷، ۶۲۸، ۶۲۹، ۶۳۰، ۶۳۱، ۶۳۲، ۶۳۳، ۶۳۴، ۶۳۵، ۶۳۶، ۶۳۷، ۶۳۸، ۶۳۹، ۶۴۰، ۶۴۱، ۶۴۲، ۶۴۳، ۶۴۴، ۶۴۵، ۶۴۶، ۶۴۷، ۶۴۸، ۶۴۹، ۶۵۰، ۶۵۱، ۶۵۲، ۶۵۳، ۶۵۴، ۶۵۵، ۶۵۶، ۶۵۷، ۶۵۸، ۶۵۹، ۶۶۰، ۶۶۱، ۶۶۲، ۶۶۳، ۶۶۴، ۶۶۵، ۶۶۶، ۶۶۷، ۶۶۸، ۶۶۹، ۶۷۰، ۶۷۱، ۶۷۲، ۶۷۳، ۶۷۴، ۶۷۵، ۶۷۶، ۶۷۷، ۶۷۸، ۶۷۹، ۶۸۰، ۶۸۱، ۶۸۲، ۶۸۳، ۶۸۴، ۶۸۵، ۶۸۶، ۶۸۷، ۶۸۸، ۶۸۹، ۶۹۰، ۶۹۱، ۶۹۲، ۶۹۳، ۶۹۴، ۶۹۵، ۶۹۶، ۶۹۷، ۶۹۸، ۶۹۹، ۷۰۰، ۷۰۱، ۷۰۲، ۷۰۳، ۷۰۴، ۷۰۵، ۷۰۶، ۷۰۷، ۷۰۸، ۷۰۹، ۷۱۰، ۷۱۱، ۷۱۲، ۷۱۳، ۷۱۴، ۷۱۵، ۷۱۶، ۷۱۷، ۷۱۸، ۷۱۹، ۷۲۰، ۷۲۱، ۷۲۲، ۷۲۳، ۷۲۴، ۷۲۵، ۷۲۶، ۷۲۷، ۷۲۸، ۷۲۹، ۷۳۰، ۷۳۱، ۷۳۲، ۷۳۳، ۷۳۴، ۷۳۵، ۷۳۶، ۷۳۷، ۷۳۸، ۷۳۹، ۷۴۰، ۷۴۱، ۷۴۲، ۷۴۳، ۷۴۴، ۷۴۵، ۷۴۶، ۷۴۷، ۷۴۸، ۷۴۹، ۷۵۰، ۷۵۱، ۷۵۲، ۷۵۳، ۷۵۴، ۷۵۵، ۷۵۶، ۷۵۷، ۷۵۸، ۷۵۹، ۷۶۰، ۷۶۱، ۷۶۲، ۷۶۳، ۷۶۴، ۷۶۵، ۷۶۶، ۷۶۷، ۷۶۸، ۷۶۹، ۷۷۰، ۷۷۱، ۷۷۲، ۷۷۳، ۷۷۴، ۷۷۵، ۷۷۶، ۷۷۷، ۷۷۸، ۷۷۹، ۷۸۰، ۷۸۱، ۷۸۲، ۷۸۳، ۷۸۴، ۷۸۵، ۷۸۶، ۷۸۷، ۷۸۸، ۷۸۹، ۷۹۰، ۷۹۱، ۷۹۲، ۷۹۳، ۷۹۴، ۷۹۵، ۷۹۶، ۷۹۷، ۷۹۸، ۷۹۹، ۸۰۰، ۸۰۱، ۸۰۲، ۸۰۳، ۸۰۴، ۸۰۵، ۸۰۶، ۸۰۷، ۸۰۸، ۸۰۹، ۸۱۰، ۸۱۱، ۸۱۲، ۸۱۳، ۸۱۴، ۸۱۵، ۸۱۶، ۸۱۷، ۸۱۸، ۸۱۹، ۸۲۰، ۸۲۱، ۸۲۲، ۸۲۳، ۸۲۴، ۸۲۵، ۸۲۶، ۸۲۷، ۸۲۸، ۸۲۹، ۸۳۰، ۸۳۱، ۸۳۲، ۸۳۳، ۸۳۴، ۸۳۵، ۸۳۶، ۸۳۷، ۸۳۸، ۸۳۹، ۸۴۰، ۸۴۱، ۸۴۲، ۸۴۳، ۸۴۴، ۸۴۵، ۸۴۶، ۸۴۷، ۸۴۸، ۸۴۹، ۸۵۰، ۸۵۱، ۸۵۲، ۸۵۳، ۸۵۴، ۸۵۵، ۸۵۶، ۸۵۷، ۸۵۸، ۸۵۹، ۸۶۰، ۸۶۱، ۸۶۲، ۸۶۳، ۸۶۴، ۸۶۵، ۸۶۶، ۸۶۷، ۸۶۸، ۸۶۹، ۸۷۰، ۸۷۱، ۸۷۲، ۸۷۳، ۸۷۴، ۸۷۵، ۸۷۶، ۸۷۷، ۸۷۸، ۸۷۹، ۸۸۰، ۸۸۱، ۸۸۲، ۸۸۳، ۸۸۴، ۸۸۵، ۸۸۶، ۸۸۷، ۸۸۸، ۸۸۹، ۸۹۰، ۸۹۱، ۸۹۲، ۸۹۳، ۸۹۴، ۸۹۵، ۸۹۶، ۸۹۷، ۸۹۸، ۸۹۹، ۹۰۰، ۹۰۱، ۹۰۲، ۹۰۳، ۹۰۴، ۹۰۵، ۹۰۶، ۹۰۷، ۹۰۸، ۹۰۹، ۹۱۰، ۹۱۱، ۹۱۲، ۹۱۳، ۹۱۴، ۹۱۵، ۹۱۶، ۹۱۷، ۹۱۸، ۹۱۹، ۹۲۰، ۹۲۱، ۹۲۲، ۹۲۳، ۹۲۴، ۹۲۵، ۹۲۶، ۹۲۷، ۹۲۸، ۹۲۹، ۹۳۰، ۹۳۱، ۹۳۲، ۹۳۳، ۹۳۴، ۹۳۵، ۹۳۶، ۹۳۷، ۹۳۸، ۹۳۹، ۹۴۰، ۹۴۱، ۹۴۲، ۹۴۳، ۹۴۴، ۹۴۵، ۹۴۶، ۹۴۷، ۹۴۸، ۹۴۹، ۹۵۰، ۹۵۱، ۹۵۲، ۹۵۳، ۹۵۴، ۹۵۵، ۹۵۶، ۹۵۷، ۹۵۸، ۹۵۹، ۹۶۰، ۹۶۱، ۹۶۲، ۹۶۳، ۹۶۴، ۹۶۵، ۹۶۶، ۹۶۷، ۹۶۸، ۹۶۹، ۹۷۰، ۹۷۱، ۹۷۲، ۹۷۳، ۹۷۴، ۹۷۵، ۹۷۶، ۹۷۷، ۹۷۸، ۹۷۹، ۹۸۰، ۹۸۱، ۹۸۲، ۹۸۳، ۹۸۴، ۹۸۵، ۹۸۶، ۹۸۷، ۹۸۸، ۹۸۹، ۹۹۰، ۹۹۱، ۹۹۲، ۹۹۳، ۹۹۴، ۹۹۵، ۹۹۶، ۹۹۷، ۹۹۸، ۹۹۹، ۱۰۰۰.

$$S\Delta\varepsilon_n = A \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + B\varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

$$A = 1.3 + 0.7S \quad (7)$$

$$B = 1.5 + 0.5S \quad (8)$$

### ۳-۲-۲ معیار گلینکا

معیار گلینکا با استفاده از مجموع چگالی انرژی الاستیک و پلاستیک در صفحه بحرانی، پارامتر خستگی دیگری را در نظر گرفته و رابطه (۹) را ارائه کرده است [۴۹]. در این رابطه  $\Delta\gamma$ ،  $\Delta\varepsilon_n$ ،  $\Delta\tau$  و  $\Delta\sigma_n$  و به ترتیب مقادیر بازه کرنش برشی، بازه تنش برشی، بازه کرنش عمودی و بازه تنش عمودی بر روی صفحه بحرانی می‌باشد که از روابط (۱۰) الی (۱۳) محاسبه می‌شوند [۱۶ و ۱۸]. در این روابط  $\theta_1$  و  $\theta_2$  به ترتیب نشان دهنده حالت بارگذاری و باربرداری می‌باشد. این مقادیر با استفاده از تنش‌ها و کرنش‌های اصلی بدست آمده از تحلیل المان محدود محاسبه می‌شود [۱۶ و ۱۸]. فلوجارت ارائه شده در شکل ۷ روند تخمین عمر خستگی قطعات را بصورت کامل نشان داده است.





شکل ۸. تصاویر ماکروگرافی سطح مقطع جوشکاری در نمونه‌های مختلف (ORG-1، ORG-2 و ORG-3)

Fig. 8. Macrography images of the welding section in different samples (ORG-1, ORG-2 and ORG-3)

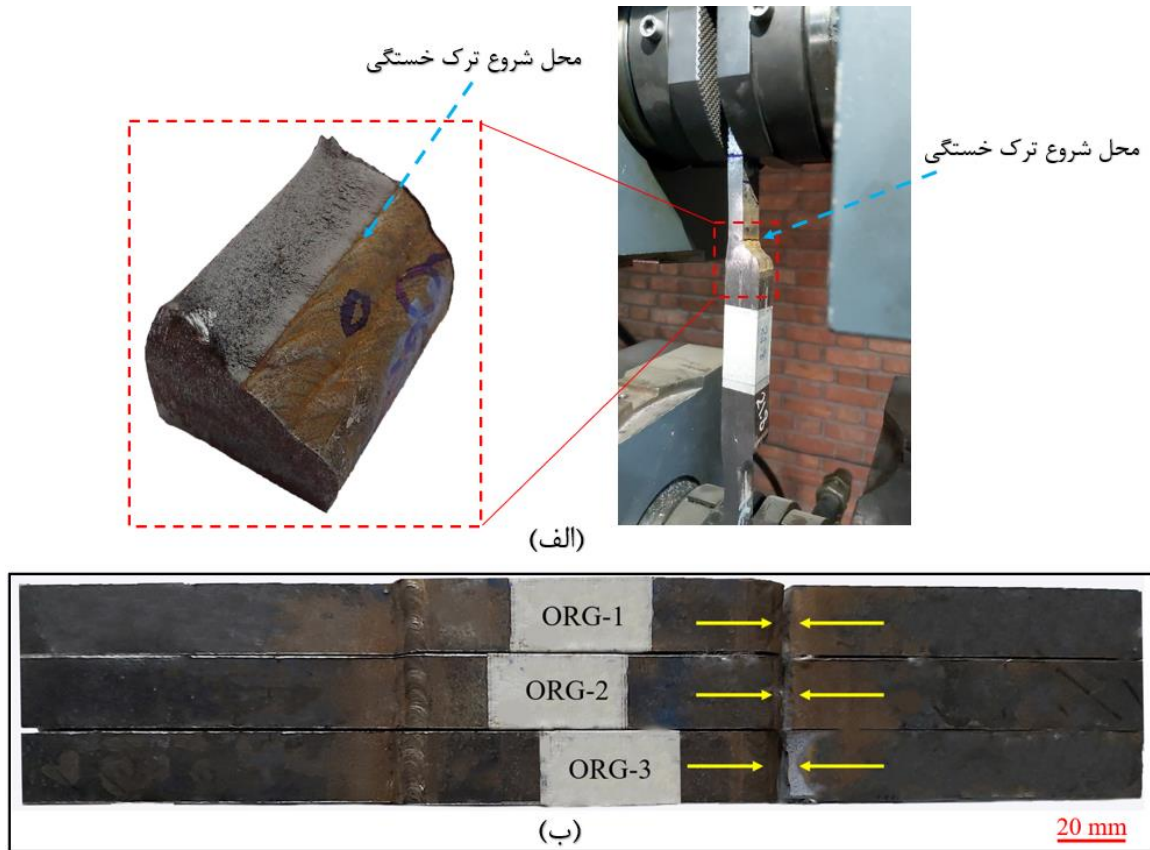
مقایسه آن با برخی مراجع [۵۲] و همچنین مشاهدات آزمایشگاهی می‌توان اعداد سختی این منطقه را به ساختار مارتنزیتی این ناحیه ارتباط داد. با توجه به روند موجود در سختی میانگین مناطق جوشکاری شده نمونه‌های مختلف، مشخص شد که افزایش نرخ خنک‌کاری با استفاده از آب (در سرعت‌های متفاوت) موجب افزایش سختی در مناطق مختلف می‌شود.

به منظور بررسی تجربی عمر خستگی قطعات، آزمون‌های خستگی در شش سطح مختلف (با بیشینه تنش‌های متفاوت) روی سه دسته نمونه جوشکاری شده انجام پذیرفت. در شکل ۹، الگوی شکست سه نمونه جوشکاری شده شامل ORG-۱، ORG-۲ و ORG-۳ در سطح تنش ۳۷۰/۵ مگاپاسکال نمایش داده شده است. مطابق با شکل ۹، در تمامی قطعات به دلیل تمرکز تنش و ساختار هندسی، ترک خستگی از منطقه جوش پنجه شروع شده و به سمت HAZ و فلز پایه حرکت می‌نماید. در شکل ۱۰ نمودار تنش-عمر نمونه‌های مختلف نمایش داده شده است.

مطابق با نتایج عمر خستگی ارائه شده در شکل ۱۰، الگوی خنک‌کاری بر میزان عمر خستگی قطعات اثرگذار بوده است. این موضوع در توافق با نتایج حاصل از سختی‌سنجی و الگوی شکست نمایش داده شده در شکل ۹ نیز می‌باشد. نتایج دیاگرام تنش-عمر نشان می‌دهد نوع خنک‌کاری بکار رفته تأثیر دو سویه‌ای بر عمر نمونه‌های جوشکاری شده داشته است. خنک‌کاری با آب با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه موجب افزایش قابل توجه عمر خستگی و خنک‌کاری با آب با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه موجب کاهش نسبی عمر خستگی در مقایسه با نمونه‌های خنک‌کاری شده در هوا شده است. برخی از تحقیقات گذشته [۵۰] نشان داده است که سرعت خنک شدن تأثیر دو سویه‌ای در سختی منطقه HAZ و جوش متریبال دارد و در مواردی با افزایش نرخ خنک‌کاری سختی کاهش می‌یابد، اما در این تحقیق قطعات خنک شده با آب سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه در مقایسه با

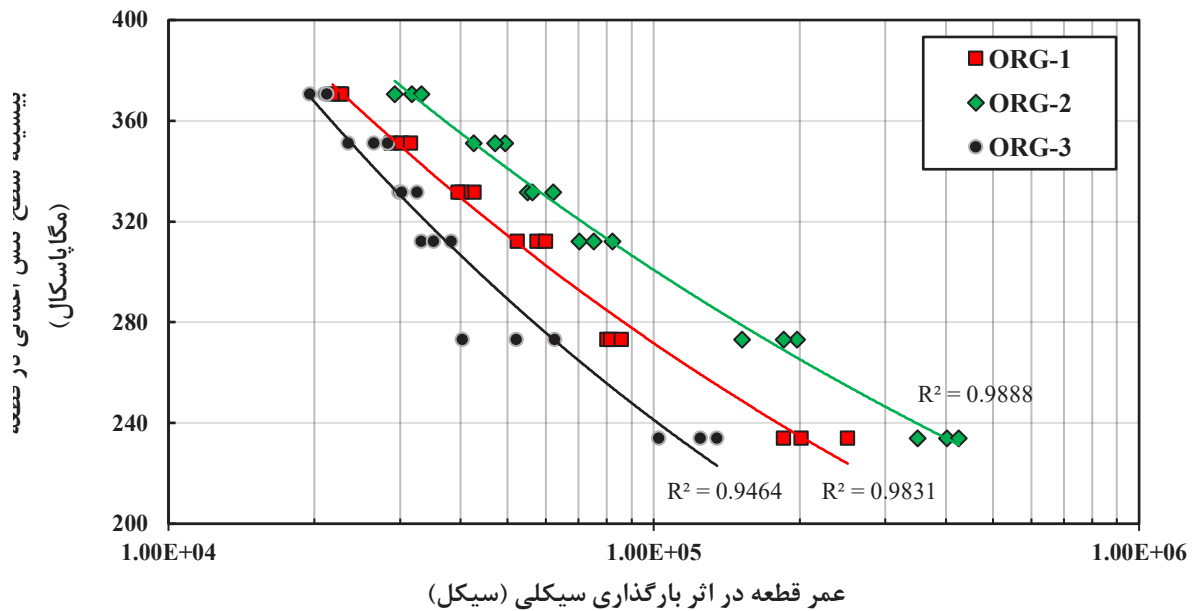
تحقیقات مشابه قبلی نشان داده است که اغلب بالاترین مقادیر سختی مربوط به HAZ دانه درشت (در مجاورت منطقه جوش) و کمترین میزان آن مربوطه به فلز پایه مربوط می‌شود [۵۰ و ۵۱]. همچنین HAZ به مراتب چقرمگی بالاتری نسبت به فلز پایه و منطقه جوش دارد [۴۱ و ۵۰]. در این تحقیق، مطابق جدول ۵، سختی مناطق مختلف همه نمونه‌های جوشکاری شده از سختی فلز پایه بزرگ‌تر بوده است که این مسأله به دلیل تغییرات ریزساختاری و گرادبان حرارتی نواحی جوشکاری در اثر تحمل چرخه‌های حرارتی ناشی از فرایند جوش می‌باشد و در مطابقت با تحقیقات قبلی [۵۲] است. غیر از ریزساختار، بزرگی و علامت تنش‌های پسماند هم بر مقدار سختی تأثیرگذار است [۲۴]. زین‌الدینی و همکاران نشان دادند در صورتیکه عرض برش نمونه آزمون از سه برابر ضخامت فلز پایه بیشتر باشد عمده تنش‌های پسماند آزاد می‌شود [۶]. به همین دلیل در این تحقیق، عرض تسمه‌های برش خورده (برای تولید نمونه‌ها) از سه برابر ضخامت کمتر بود و در عملیات برش و سنگ‌زنی دقیق بخش عمده‌ای از تنش‌های پسماند خصوصاً تنش‌های نرمال بر سطح قبلاً آزاد شده‌اند. همچنین به منظور جلوگیری از ایجاد تنش‌های حرارتی ناشی از سنگ‌زنی دقیق از خنک‌کن مایع در حین سنگ‌زنی استفاده شده است و در هر مرحله فقط ۰/۰۵ میلی‌متر از طرفین قطعه سنگ‌زنی شده است. به این دلیل در این نمونه‌ها، تنش‌های پسماند احتمالاً تأثیر قابل توجهی بر مقادیر سختی نداشته است. بنابراین تغییرات سختی گزارش شده در این بخش عمدتاً ناظر به تغییرات ریزساختاری در مواد می‌باشد نه تنش‌های پسماند بوجود آمده در حین ساخت نمونه.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۵، سختی ناحیه HAZ پنجه جوش در مقایسه با نقاط دیگر بالا رفته است که دلیل آن مکش حرارتی شدید و خنک شدن سریع این مناطق می‌باشد. با توجه به اعداد اندازه‌گیری برای سختی و



شکل ۹. (الف): موقعیت شروع ترک خستگی و سطح خرابی در نمونه در تنش ۳۷۰/۵ مگاپاسکال (ب): موقعیت شکست نمونه‌های مختلف در آزمون خستگی در تنش ۳۷۰/۵ مگاپاسکال

Fig. 9. (a): Fatigue crack initiation location and failure surface in ORG-1 sample at 370.5 (MPa) (b): Failure position of different samples in fatigue test at 370.5 (MPa)



شکل ۱۰. منحنی تنش-عمر سه نوع نمونه جوشکاری شده در نسبت تنش ۰/۱

Fig. 10. S-N curve for three different types of welded joints at R=+0.1

جدول ۶. ارزیابی هندسی سه نوع قطعه جوشکاری شده

Table 6. Geometric evaluation of three types of welded parts.

نام نمونه	زاویه پنجه (درجه)	شعاع پنجه (میلی‌متر)	X	D = a+b+c	a		b		c	
					اندازه (میلی‌متر)	سختی (ویکرز)	اندازه (میلی‌متر)	سختی (ویکرز)	اندازه (میلی‌متر)	سختی (ویکرز)
ORG-۱	۱۱۸	۱/۷	۴۳۲/۸۹	۱/۷۱	۰/۵۱۳	۲۱۵/۳	۰/۵۱۳	۲۴۷/۶	۰/۶۸۴	۲۸۵/۷
ORG-۲	۱۲۴	۲/۰۸	۴۷۵/۴۲	۱/۴۱	۰/۴۲۳	۲۵۴/۶	۰/۴۲۳	۳۶۴/۰	۰/۵۶۴	۳۷۹/۰
ORG-۳	۱۱۶	۱/۰۶	۳۴۴/۱۹	۰/۹۵	۰/۲۸۵	۲۵۹/۰	۰/۲۸۵	۳۸۲/۰	۰/۳۸۰	۴۲۵/۰

در عمر خستگی در مقایسه با نمونه ORG-۳ داشته است.

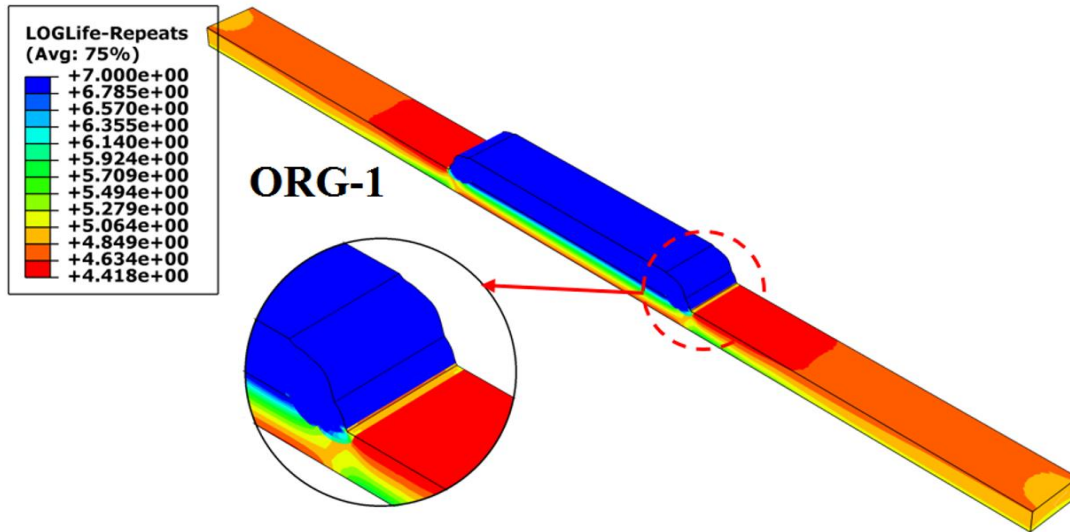
به طور معمول و بر اساس یافته‌های حاصل از آزمون‌های سختی‌سنجی، با افزایش شدید میزان خنک‌کاری (در حالت استفاده از آب با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه) میزان سختی نواحی HAZ مجاور منطقه فلز پایه به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد که این افزایش سختی متعاقباً افزایش استحکام این نواحی را به دنبال خواهد داشت. با افزایش استحکام این نواحی در مقایسه با استحکام فلز پایه، در اثر غیرهمگن بودن مواد در ناحیه فصل مشترک، تمرکز تنش روی می‌دهد که این تمرکز تنش منجر به تسهیل تشکیل ترک خستگی و کاهش عمر نهایی نمونه‌ها می‌شود [۲۲].

مطابق با نتایج آزمون‌های خستگی، به ترتیب نمونه‌های خنک‌کاری شده با آب با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه، نمونه‌های خنک‌کاری شده در هوا و نمونه‌های خنک‌کاری شده با آب با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه دارای عمرهای خستگی بیشتری بوده است بصورت میانگین عمر خستگی اتصالات جوشی ORG-۲ نسبت به نمونه ORG-۱، ۶۱ درصد افزایش می‌یابد. در صورتی که در نمونه‌های ORG-۳ عمر خستگی نسبت به حالت پایه (ORG-۱) ۲۷ درصد کاهش مشاهده می‌شود. در صنعت نفت و گاز، دستورالعمل‌هایی مانند API RP-۲۲۰۱ [۲۶] به منظور کاستن احتمال فوران در جوشکاری چین بهره برداری حداقل میزانی از حرکت سیال در لوله‌ها و مخازن را توصیه می‌کند که در این تحقیق نشان داده شده است که مقدار سرعت حرکت سیال داخل لوله در عمر اتصال رفتار دوگانه‌ای را می‌تواند داشته باشد و با توجه به تنوع سیالات داخل لوله‌ها و مخازن تحت فشار، شرایط دمایی و فشاری سیالات و همچنین دستورالعمل‌های متفاوت جوشکاری، عمر خستگی این اتصالات نیاز به بررسی بیشتری دارد.

قطعات خنک شده با آب سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه در محل شروع ترک (HAZ<sub>۲۱</sub>, HAZ<sub>۲۲</sub>, HAZ<sub>۲۳</sub>) به طور میانگین حدود ۶ درصد سختی بیشتری دارد ولی به مراتب ضخامت HAZ در پنجه جوش به دلیل نرخ خنک‌کاری بالا کاهش داشته است.

$$X = \sum_c Hardness_i \times Thickness_i, i = a, b, c \quad (14)$$

در جدول ۶، ضخامت HAZ در پنجه جوش در نمونه‌ها مطابق با پارامترهای ارائه شده در شکل ۴ ارائه شده است. به منظور افزایش دقت داده‌ها، میانگین مقادیر برای سه نمونه مشابه اندازه‌گیری و گزارش شده است. همچنین مطابق با رابطه (۱۴) پارامتری بنام X تعریف شده است که مجموع حاصل ضرب سختی در ضخامت HAZ را نشان می‌دهد و ارتباط معناداری با عمر خستگی قطعات دارد. مشاهده می‌شود که مقدار پارامتر X در نمونه ORG-۲ بیشترین مقدار و در نمونه ORG-۳ کمترین مقدار را دارد. همچنین شعاع پنجه جوش رفتار دوگانه‌ای در سرعت خنک شدن نشان داده است. نمونه ORG-۲ در مقایسه با نمونه ORG-۱ شعاع پنجه جوش به مراتب بالاتری دارد. همچنین شعاع پنجه جوش در نمونه ORG-۳ حداقل مقدار را در مقایسه با سایر نمونه‌ها دارد. پارامتر مهم بعدی زاویه پنجه جوش است که نمونه ORG-۲ با ۱۲۴ درجه بالاترین و نمونه ORG-۳ با ۱۱۶ درجه کمترین مقدار را دارد. تحقیقات قبلی [۸ و ۵۳] نشان داده‌اند که افزایش شعاع و زاویه پنجه منجر به کاهش تمرکز تنش و افزایش عمر می‌شود. لذا به نظر می‌رسد افزایش نرخ خنک‌کاری با آب سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه اثر مطلوب در عمر خستگی و خنک‌کاری با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه اثر نامطلوب



شکل ۱۱. کانطور لگاریتم عمر (معیار براون-میلر با اعمال تنش متوسط مارو) در نمونه ORG-1 در تنش پیشینه اعمالی ۳۷۰/۵ مگاپاسکال و نسبت تنش ۰/۱

Fig. 11. The contour of the logarithm of life (Brown-Miller with Morow's correction) in the ORG-1 at 370.5 MPa and R=+0.1

به روش گلینکا نیز بین اسکاتربند ۲- و صفر می‌باشد که نشان می‌دهد نتایج محافظه‌کارانه بوده و خطای آن کمتر از ۲ برابر می‌باشد. معیار براون-میلر اصلاح شده با مارو، اگرچه برای این نمونه نزدیک‌ترین جواب را ارائه می‌نماید ولی در ۵۰ درصد نقاط، جواب محافظه‌کارانه بوده و در ۵۰ درصد نقاط عمر خستگی را نسبت به حالت تجربی، بیشتر محاسبه نموده است. در مورد نمونه ۲-ORG، معیار براون-میلر اصلاح شده با معیار مارو، نزدیک‌ترین پیش‌بینی را ارائه می‌نماید. محدوده تخمین‌های این روش برای همه نقاط بین اسکاتربند ۲- و صفر است. همچنین محدوده پاسخ‌های معیار گلینکا بین اسکاتربند ۳- و ۲- بوده و پاسخ محافظه‌کارانه می‌باشد. در خصوص نمونه ۳-ORG، محدوده تخمین‌های معیار براون-میلر اصلاح شده با معیار مارو بین اسکاتربند ۲- و ۲+ می‌باشد. ۲۵ درصد از نقاط در محدوده اسکاتربند ۲- و صفر و ۷۵ درصد دیگر در محدوده ۰ تا ۲+ قرار گرفته‌اند. این در حالی است که ۸۴ درصد پیش‌بینی‌ها با معیار گلینکا در محدوده اسکاتربند ۲- و صفر و ۱۶ درصد پاسخ‌ها در محدوده اسکاتربند صفر تا ۲+ قرار دارد. در بررسی تمامی نمونه‌ها، مشخص شد که معیار گلینکا در ۹۴ درصد نقاط مقادیر عمر را کمتر از مقدار تجربی پیش‌بینی می‌کند و می‌توان مطرح نمود که این معیار نتایج محافظه‌گرایانه‌ای ارائه می‌دهد. در سوی دیگر معیار براون-میلر اصلاح شده با معیار مارو، در ۷۲ درصد مواقع پیش‌بینی محافظه‌کارانه و در ۲۸ درصد مواقع عمر را بیشتر از حالت تجربی پیش‌بینی می‌نماید.

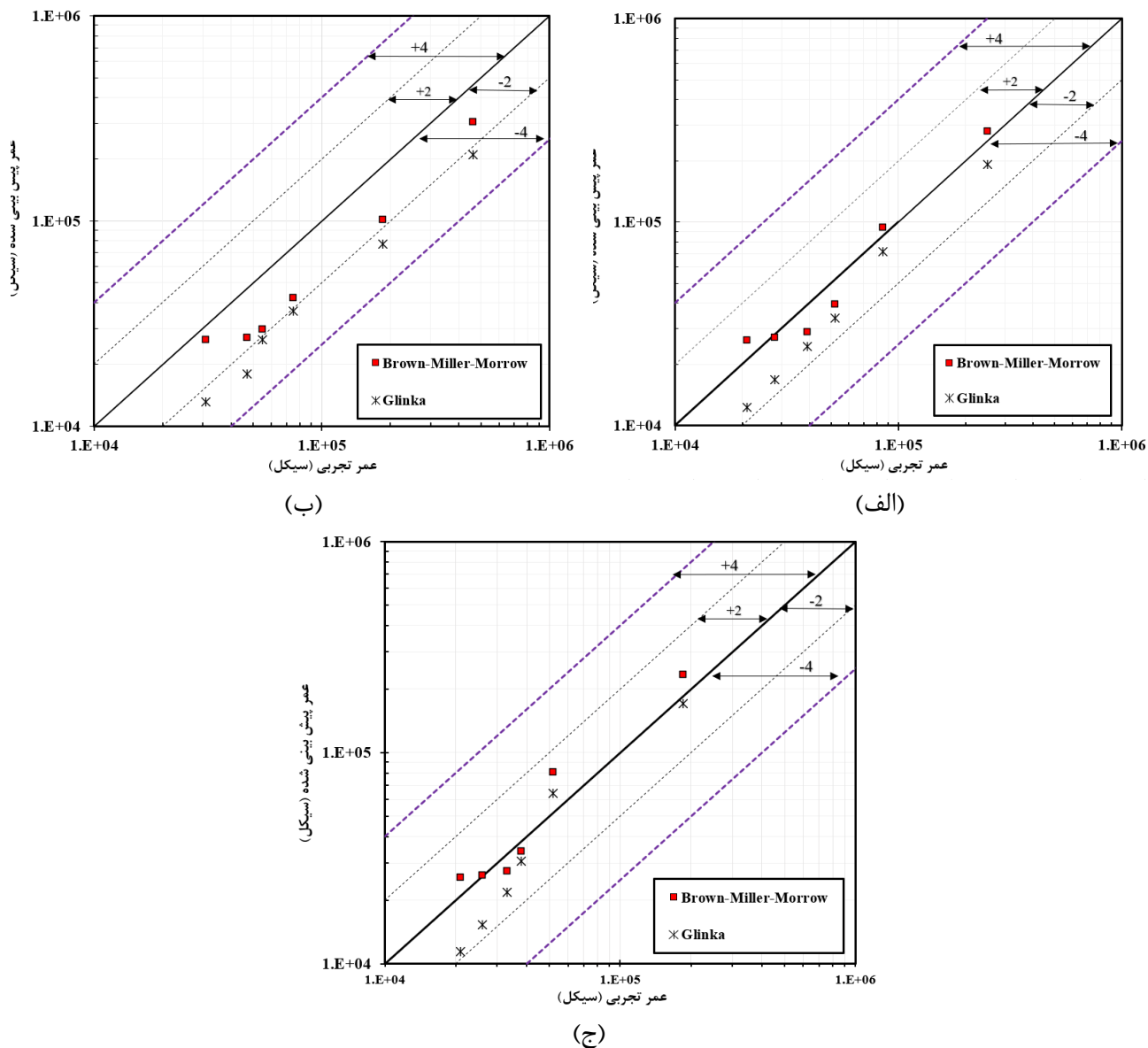
#### ۴-۲ نتایج تخمین عمر

در این پژوهش، برای پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌ها از دو معیار خستگی چندمحوری متفاوت، شامل معیارهای براون-میلر با اعمال تنش متوسط مارو و گلینکا استفاده شده است. مطابق با روند ارائه شده در بخش ۳ و فلوچارت شکل ۷، با استفاده از تغییرات پروفیل سختی در مقطع جوش نمونه‌های مختلف، خواص مکانیکی و خستگی مواد برآورد و به مدل‌های عددی اختصاص داده شده است. مجموعاً بر اساس تعداد مدل‌های تخمین عمر، دسته‌بندی قطعات و تعداد سطوح تنش مورد استفاده، ۳۶ مدل خستگی جهت تخمین عمر پیاده‌سازی و تحلیل شده است. به عنوان نمونه در شکل ۱۱، لگاریتم عمر خستگی نمونه ۱-ORG در سطح تنش ۳۷۰/۵ مگاپاسکال نمایش داده شده است.

در شکل ۱۲، به ترتیب مقایسه نتایج تخمین عمر با نتایج تجربی خستگی، برای سه نمونه جوشکاری شده مختلف با دو معیار خستگی متفاوت نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل‌ها، خطوط فاکتور عمر ۲ و فاکتور عمر ۴ (خطوط خط‌چین) نیز رسم شده است تا میزان دقت عمر تخمینی و محدوده قرارگیری نتایج هر معیار مشخص شود.

بر اساس نتایج تخمین عمر با دو معیار مختلف (مطابق با شکل ۱۲ الف)، برای نمونه ۱-ORG (خنک شده در هوا)، معیار براون-میلر اصلاح شده با معیار مارو، نزدیک‌ترین پیش‌بینی را انجام داده است. نتایج تخمین عمر





شکل ۱۲. مقایسه نتایج تخمین عمر با نتایج آزمایشگاهی برای سه نمونه مختلف (الف) نمونه ORG-1 (ب) نمونه ORG-2 و (ج) نمونه ORG-3  
**Fig. 12. Comparison among the estimated and experimental fatigue lives for three different specimens (a): ORG-1, (b): ORG-2 and (c): ORG-3**

برای هر معیار در نمونه‌های مختلف جوشکاری شده، به صورت مجزا، به ترتیب با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه شده است [۱۴ و ۱۶ و ۱۸].

$$E = \log \frac{N_{exp}}{N_{EST}} \quad (15)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i| \quad (16)$$

همچنین مشاهده می‌شود که اثر پارامتر خنک‌کاری بر عمرهای خستگی نیز در تحلیل عددی مشهود است و مشاهده می‌شود که به ترتیب نمونه‌های خنک‌کاری شده با آب با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه، خنک‌کاری شده با هوا و خنک‌کاری شده با آب با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه دارای بیشترین عمرهای خستگی بوده است.

جهت بررسی دقت پیش‌بینی معیارهای مورد بررسی نسبت به عمر خستگی نمونه‌های تجربی، شاخص خطا و مقادیر مطلق میانگین خطاها

جدول ۷. مقادیر مطلق میانگین خطای محاسبه شده برای معیارهای خستگی مورد استفاده (بر حسب درصد)

Table 7. The average absolute values of errors for selected criteria (in %).

نام نمونه	گلینکا	براون-میلر اصلاح شده
ORG-۱	۱۷/۸۴	۹/۹۹
ORG-۲	۳۴/۶۸	۲۰/۱۶
ORG-۳	۱۵/۷۷	۱۰/۸۰

موضوع مرتبط دانست که در شبیه‌سازی عددی این تحقیق، اثر برخی از پارامترها مانند تنش پسماند و عیوب در نظر گرفته نشده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تجربی و تخمین عمر خستگی اتصالات جوشکاری وصله‌ای حین بهره برداری فولادی تحت سه الگوی خنک‌کاری متفاوت پرداخته شد. آزمون‌های تجربی خستگی روی نمونه‌های جوشکاری شده صورت پذیرفت. جهت پیش‌بینی عددی عمر خستگی نمونه‌ها، از تحلیل تنش در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شد و با استفاده از خروجی تحلیل تنش و بکارگیری مدل‌های خستگی متفاوت، در قالب سابروتین UVARم تخمین عمر انجام شد. بدین منظور، از دو معیار خستگی چندمحوره براون-میلر اصلاح شده با معیار مارو و گلینکا استفاده شد. جهت تعیین و برآورد خواص مکانیکی و پارامترهای خستگی مناطق مختلف جوش از تصاویر ماکرو ناحیه جوش و توزیع میکروسختی در کل سطح مقطع جوش به صورت پیوسته استفاده شد و بعد از تحلیل تنش، تخمین عمر با استفاده از روابط معیارهای خستگی چندمحوره عنوان شده انجام شد و نتایج پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- مطابق با نتایج آزمون‌های تجربی خستگی، نرخ خنک‌کاری تأثیر دو سویه‌ای بر عمر خستگی نمونه‌ها داشته است. خنک‌کاری با آب با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه موجب افزایش قابل توجه عمر خستگی و خنک‌کاری با آب با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه موجب کاهش عمر خستگی در مقایسه با نمونه‌های خنک‌کاری شده در هوا شده است.

- مطابق با مقادیر خطای میانگین معیارهای مختلف، صرف نظر از نوع نمونه‌های جوشکاری شده نزدیک‌ترین نتایج به عمرهای تجربی به ترتیب به واسطه معیارهای براون-میلر اصلاح شده با معیار مارو و گلینکا حاصل

مطابق با مقادیر مطلق میانگین خطای محاسبه شده در جدول ۷، دو معیار خستگی مورد استفاده با دقت مناسبی عمر قطعات را پیش‌بینی می‌نماید. در بین معیارها، براون-میلر اصلاح شده با معیار مارو دقت مناسب‌تری را در مقایسه با معیار گلینکا دارد. روش ارائه شده در این تحقیق با میانگین خطای کمتر از ۳۴/۶۸ قابلیت پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات عنوان شده را دارد که در معیار براون-میلر اصلاح شده با معیار مارو، این خطا کمتر از ۲۰/۱۶ درصد می‌باشد. اگرچه خطای معیار براون-میلر-مارو کمتر از معیار گلینکا می‌باشد ولی از نظر طراحی، معیار گلینکا بهتر از معیار براون-میلر-مارو می‌باشد، به دلیل اینکه نتایج پیش‌بینی محافظه کارانه‌تر است. خطای پیش‌بینی با معیار گلینکا در این تحقیق ۱۵/۷۷ الی ۳۴/۶۸ درصد می‌باشد که خطای آن نزدیک به پژوهش‌های مشابه [۱۸، ۱۶] می‌باشد. به عنوان مثال، در پژوهش اسماعیلی و همکاران [۱۸] میزان خطا با معیار گلینکا ۳۴ الی ۳۸ درصد و در تحقیق دیگر [۱۶]، در حدود ۳۴ الی ۷۲ درصد گزارش شده است. البته در پژوهش‌های اشاره شده [۱۶ و ۱۸]، در اغلب موارد معیار گلینکا عمر خستگی را بیشتر از عمر واقعی پیش‌بینی می‌نماید ولی در این تحقیق، نتایج پیش‌بینی عمر خستگی در ۹۴ درصد نقاط محافظه کارانه‌تر است. در تحقیقات مشابه [۱۳ و ۱۶ و ۱۸]، خطای اغلب معیارهای پیش‌بینی عمر خستگی چندمحوره کمتر از ۱۰۰ درصد گزارش شده است که با توجه به خواص ماده، شکل هندسی، نوع اتصال و شرایط ساخت و سایر عوامل مؤثر میزان خطا تغییر می‌نماید. لازم به ذکر است که معیارهای خستگی چند محوری عموماً مبتنی بر مرحله شروع ترک خستگی هستند و شامل مرحله رشد ترک خستگی نمی‌شوند [۱۶ و ۱۸ و ۴۷]. به عبارت دیگر، معیارهای چندمحوری تنها از تنش و کرنش در ناحیه بحرانی استفاده می‌کنند و رشد ترک خستگی را در نظر نمی‌گیرند. علاوه بر این، تفاوت بین نتایج تجربی و عمر خستگی به‌دست‌آمده از معیارهای چند محوری را می‌توان به این

residual stress and fatigue life assessment of T-shape welded joints, Eng. Fail. Anal., 141 (2022) 106685.

شده است.

- [4] E. Maleki, G.H. Farrahi, K. Reza Kashyzadeh, O. Unal, M. Gugaliano, S. Bagherifard, Effects of conventional and severe shot peening on residual stress and fatigue strength of steel AISI 1060 and residual stress relaxation due to fatigue loading: experimental and numerical simulation, Met. Mater. Int., 27(8) (2021) 2575-2591.
- [5] S. Arnavaz, M. Zeinoddini, M. Ezzati, A. Zandi, M. Yadegari, Uniaxial strain ratcheting of steel butt-welded joints after multiple-repair welding, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng, 44(2) (2022) 1-17.
- [6] M. Zeinoddini, S. Arnavaz, A. Zandi, Y.A. Vaghasloo, Repair welding influence on offshore pipelines residual stress fields: An experimental study, J. Constr. Steel Res., 86 (2013) 31-41.
- [7] H. Mikihiro, I. Yoshito, Fatigue characteristics of patch plate joints by fillet welding assisted with bonding, Weld. Int., 32(4) (2018) 243-253.
- [8] E. Åstrand, T. Stenberg, B. Jonsson, Z. Barsoum, Welding procedures for fatigue life improvement of the weld toe, WELD WORLD., 60(3) (2016) 573-580.
- [9] H.-K. Jun, J.-W. Seo, I.-S. Jeon, S.-H. Lee, Y.-S. Chang, Fracture and fatigue crack growth analyses on a weld-repaired railway rail, Eng. Fail. Anal., 59 (2016) 478-492.
- [10] S.-H. Lee, S.H. Kim, Y.-S. Chang, H.K. Jun, Fatigue life assessment of railway rail subjected to welding residual and contact stresses, J. Mech. Sci. Technol., 28(11) (2014) 4483-4491.
- [11] H. Hatami, M. Shariati, Numerical and experimental investigation of SS304L cylindrical shell with cutout under uniaxial cyclic loading, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 43(2) (2019) 139-153.
- [12] M. Shariati, H. Hatami, Experimental study of SS304L cylindrical shell with/without cutout under cyclic axial loading, Theor. Appl. Fract. Mech., 58(1) (2012) 35-43.
- [13] F. Esmacili, S. Barzegar, H. Jafarzadeh, Evaluation of

-اگرچه بر اساس نتایج حاصل از مشاهدات تجربی، کمترین ضخامت ناحیه HAZ، به ترتیب در نمونه‌های خنک‌شده با آب با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه، با آب با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه و با هوا شکل گرفته است ولی HAZ حاصل شده در نمونه‌های خنک شده در آب به مراتب سختی بالاتری نسبت به HAZ قطعات خنک شده در هوا دارد اما حاصل ضرب اندازه HAZ در سختی ناحیه HAZ برای قطعه ۲ - ORG نسبت به ۱ - ORG مقدار بیشتری داشته و همچنین این پارامتر برای قطعات ۳ - ORG مقدار کمتری نسبت به ۱ - ORG دارد. به نظر می‌رسد حاصل ضرب اندازه HAZ در سختی آن می‌تواند به عنوان یک پارامتر معنی‌دار کاهش و یا افزایش عمر خستگی را پیش‌بینی نماید.

-بر اساس نتایج تخمین عمر دو معیار مختلف مشخص شد که معیار گلینکا در ۹۴ درصد نمونه‌های مورد بررسی مقادیر عمر را کمتر از مقدار تجربی پیش‌بینی می‌کند و می‌توان عنوان نمود که این معیار نتایج محافظه‌گرایانه‌ای ارائه می‌دهد. در سوی دیگر معیار براون میلر اصلاح شده با معیار مارو در ۲۸ درصد نمونه‌های مورد بررسی، عمرهایی به مراتب بزرگ‌تر از عمر تجربی ارائه می‌دهد.

-از بین معیارهای مورد استفاده به ترتیب معیار براون-میلر-مارو و گلینکا با حداکثر خطای میانگین ۲۰/۱۶ و ۳۴/۶۸ عمر خستگی اتصالات جوشی وصله‌ای حین بهره‌برداری را پیش‌بینی می‌کند.

## ۶- فهرست علائم

## منابع

- [1] A. Ghiasvand, S. Hassanifard, S. Saadi, A. Varvani-Farahani, Tensile properties and microstructural features of friction stir welded Al 6061 joints fabricated by various dual-pin tool shapes, Sci. Technol. Weld. Join., 26(6) (2021) 493-502.
- [2] P. Bahemmat, M. Haghpanahi, M.K. Besharati Givi, K. Reshad Seighalani, Study on dissimilar friction stir butt welding of AA7075-O and AA2024-T4 considering the manufacturing limitation, J. Adv. Manuf. Technol., 59(9) (2012) 939-953.
- [3] F. Samadi, J. Mourya, G. Wheatley, M.N. Khan, R.M. Nejad, R. Branco, W. Macek, An investigation on

- during Friction Stir Spot Welding, *J. Mater. Eng. Perform.*, 31(3) (2022) 1781-1790.
- [23] G. Zhou, J. Kuang, W. Song, G. Qian, F. Berto, Fatigue failure transition evaluation of load carrying cruciform welded joints by effective notch energy model, *Eng. Fail. Anal.*, 138 (2022) 106328.
- [24] H. Xin, J.A. Correia, M. Veljkovic, F. Berto, L. Manuel, Residual stress effects on fatigue life prediction using hardness measurements for butt-welded joints made of high strength steels, *Int. J. Fatigue.*, 147 (2021) 106175.
- [25] S. Baek, G.Y. Go, J.-W. Park, J. Song, H.-c. Lee, S.-J. Lee, S. Lee, C. Chen, M.-S. Kim, D. Kim, Microstructural and interface geometrical influence on the mechanical fatigue property of aluminum/high-strength steel lap joints using resistance element welding for lightweight vehicles: experimental and computational investigation, *J. Mater. Res. Technol.*, 17 (2022) 658-678.
- [26] A.P. Institute, Safe Hot Tapping Practices in the Petroleum and Petrochemical Industries, American Petroleum Institute, 2003.
- [27] A.S.o.M. Engineers, Repair of Pressure Equipment and Piping-PCC2, in, American Society of Mechanical Engineers, 2022.
- [28] M.P. Aung, H. Katsuda, M. Hirohata, Fatigue-performance improvement of patch-plate welding via PWHT with induction heating, *J. Constr. Steel Res.*, 160 (2019) 280-288.
- [29] X. Liu, M. Hirohata, Compressive Behavior of Steel Members Reinforced by Patch Plate with Welding and Bonding, *Open J. Civ. Eng.*, 8(04) (2018) 341.
- [30] A. Standard, E415-14: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry, ASTM International, (2014).
- [31] A.S.f. Testing, Materials, ASTM A370: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, in, ASTM West Conshohocken, 2014.
- [32] E. Astm, 23-12c, Standard Test Methods for Notched fatigue life reduction factors at bolt hole in double lap bolted joints using volumetric method, *Journal of Solid Mechanics*, 9(1) (2017) 1-11.
- [14] E. Goldarag, S. Barzegar Mohammadi, A. Babaei, A. Afkar, Prediction of Fatigue Life in Notched Specimens Using Multiaxial Fatigue Criteria, *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, 7(1) (2014) 1-13.
- [15] X. Hong, G. Xiao, W. Haoyu, L. Xing, W. Sixing, Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE, *Adv. Mech. Eng.*, 10(3) (2018) 1687814018767249.
- [16] F. Esmacili, M. Zehsaz, T. Chakherlou, S. Barzegar, Fatigue life estimation of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints using several multiaxial fatigue criteria, *Mater. Des.*, 67 (2015) 583-595.
- [17] S. Hassanifard, H. Alipour, A. Ghiasvand, A. Varvani-Farahani, Fatigue response of friction stir welded joints of Al 6061 in the absence and presence of inserted copper foils in the butt weld, *J. Manuf. Process*, 64 (2021) 1-9.
- [18] F. Esmacili, A. Rahmani, S. Barzegar, A. Afkar, Prediction of fatigue life for multi-spot welded joints with different arrangements using different multiaxial fatigue criteria, *Mater. Des.*, 72 (2015) 21-30.
- [19] T. Shiraiwa, F. Briffod, M. Enoki, Development of integrated framework for fatigue life prediction in welded structures, *Eng. Fract. Mech.*, 198 (2018) 158-170.
- [20] G. Sun, Y. Chen, S. Chen, D. Shang, Fatigue modeling and life prediction for friction stir welded joint based on microstructure and mechanical characterization, *Int. J. Fatigue.*, 98 (2017) 131-141.
- [21] R. Goyal, M. El-Zein, G. Glinka, A robust stress analysis method for fatigue life prediction of welded structures, *WELD WORLD.*, 60(2) (2016) 299-314.
- [22] S. Hassanifard, A. Ghiasvand, A. Varvani-Farahani, Fatigue Response of Aluminum 7075-T6 Joints through Inclusion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles to the Weld Nugget Zone



- [43] ABAQUS User's Manual, DS SIMULIA, Hibbit, Karlsson and Sorensen; 2017.
- [44] E. Zhao, Q. Zhou, W. Qu, W. Wang, Fatigue Properties Estimation and Life Prediction for Steels under Axial, Torsional, and In-Phase Loading, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, (2020) 8186159.
- [45] N. Dowling, C. Calhoun, A. Arcari, Mean stress effects in stress-life fatigue and the Walker equation, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct*, 32(3) (2009) 163-179.
- [46] R. De Borst, M.A. Crisfield, J.J. Remmers, C.V. Verhoosel, *Nonlinear finite element analysis of solids and structures*, John Wiley & Sons, 2012.
- [47] D. Socie, G.B. Marquis, *Multiaxial fatigue*, Society of Automotive Engineers Warrendale, PA, 2000.
- [48] F.s.U. Manual, FE-SAFE user manual, EF-SAFE, (2017).
- [49] G. Glinka, G. Shen, A. Plumtree, A multiaxial fatigue strain energy density parameter related to the critical fracture plane, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct*, 18(1) (1995) 37-46.
- [50] A.M. Hall, The effect of welding speed on the properties of ASME SA516 Grade 70 steel, *Citeseer*, 2010.
- [51] V. Murti, P. Srinivas, G. Banadeki, K. Raju, Effect of heat input on the metallurgical properties of HSLA steel in multi-pass MIG welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 37(1-4) (1993) 723-729.
- [52] A. Midawi, E. Santos, A. Gerlich, R. Pistor, M. Haghshenas, Comparison of Hardness and Microstructures Produced Using GMAW and Hot-Wire TIG Mechanized Welding of High Strength Steels, in: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2014, pp. V014T011A019.
- [53] I. Hwang, D.-Y. Kim, G. Jeong, M. Kang, D. Kim, Y.-M. Kim, Effect of weld bead shape on the fatigue behavior of GMAW lap fillet joint in GA 590 MPa steel sheets, *Metals.*, 7(10) (2017) 399.
- Bar Impact Testing of Metallic Materials,” *Standards*, 1 (2013) 1-25.
- [33] A. Bashiri, M. Hosseini, H. Hatami, Experimental and Numerical investigation on CK45, St12, Al3105 with layers under drop test free loading, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 1) (2021) 58-85.
- [34] H. Hatami, A. Fathollahi, The theoretical and numerical comparison and investigation of the effect of inertia on the absorbent collapse behavior of single cell and two-cell reticular under impact loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(5) (2017) 51-60.
- [35] A. ASTM, 516/A 516M Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate and Lower-Temperature Service, in *American Society for Testing and Materials*, 2006.
- [36] ASTM, ASTM A20/A20 M, Standard Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels, in *American Society for Testing and Materials*, 2020.
- [37] E. Standard, 10163: 2005, BSI: London, UK, 2005.
- [38] API, Safe Hot Tapping Practices in the Petroleum & Petrochemical Industries, API RECOMMENDED PRACTICE-RP 2201, FIFTH EDITION.
- [39] E.S. Menon, *Liquid pipeline hydraulics*, CRC press, 2004.
- [40] P. Majnoun, M.R. Ghavi, F. Vakili-Tahami, M.R. Adibeig, A new thermo-mechanical approach to predict “burn-through” during the in-service welding, *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 194 (2021) 104558.
- [41] R. Bakhtiari, S. Zangeneh, Evaluation of hydrogen damage in a fire tube using microstructure/mechanical properties studies, *Eng. Fail. Anal.*, 90 (2018) 231-244.
- [42] B. Standard, *Metallic Materials, Vickers Hardness Test*, BS EN ISO 6507-1, British Standard: London, UK, (2018).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*S. Barzegar-Mohammadi, M. Haghpanahi, M. Zeinoddini, Fatigue Life Estimation of In-Service Welded Patch Using Multiaxial Fatigue Criteria, Amirkabir J. Mech Eng., 54(12) (2023) 2877-2898.*

**DOI:** [10.22060/mej.2022.21564.7472](https://doi.org/10.22060/mej.2022.21564.7472)

