علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال دوم، شماره ۱، بهار و تابستان ۹۵، صفحه ۴۸-۳۲

بهینه سازی متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با هدف دستیابی به استحکام شکست بیشینه

مهدی صفری*[۱]، حسین مستعان[۲]، آرش بختیاری[۱]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانشکده مهندسی، گروه مواد و متالورژی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۳ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۲۲)

چکیده

در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق فولادی IF به ضخامت ۰/۷ میلیمتر به صورت لب روی هم مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور خواص مکانیکی اتصالات و همچنین تغییرات ریزساختاری آنها مطالعه می شوند. نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی ابزار، استحکام شکست اتصالات جوشکاری شده افزایش می یابد. نتایج مربوط به مطالعات بافت شناسی نیز نشان می دهند که با انجام عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی فولاد IF، تغییری در مؤلفه های بافت ایجاد نمی شود. عدم تغییر در مؤلفه های بافت را می توان به انرژی نقض در چیده شدن زیاد فولاد IF و در نتیجه وقوع تبلور مجدد دینامیکی شدید در حین انجام فرایند نسبت داد. نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت دورانی ابزار از ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، نیروی نهایی شکست اتصالات حاصل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی افزایش می یابد. همچنین از نتایج استنباط می شود که با افزایش سرعت پیشروی ابزار از ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه، نیروی نهایی شکست اتصالات کاهش می یابد. در نهایت، از نتایج این مقاله ثابت می شود که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولادی IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر، بیشترین نیروی شکست اتصالات جوش در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۵ میلیمتر بر دقیقه بدست می آید.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فولاد IF، مطالعات بافت، ریزساختار، بهینه سازی.

Optimization of variables of friction stir welding process with the aim of achieving the maximum fracture strength

M. Safari[1], H. Mostaan[2], A. Bakhtiari[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

2- Faculty of Engineering, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Arak University, Arak,Iran.

(Received 3 March 2016 ; Accepted 10 April 2016)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی m.safari@arakut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

Abstract
In this research, lap joint frictionstir welding of IF sheets with thickness of 0.7 mm is investigated. For this purpose, mechanical properties of joints and also microstructural evolutions are studied. It was found that increase in tool rotational speed and decrease in travel speed results in increase in fracture stress of welded joints. Texture study indicates that no changes can be observed in texture components after friction stir welding. This phenomenon in texture components can be related to high stacking fault energy of IF steel and consequently severe dynamic recrystallization during welding. The results show with increase in the tool rotational speed between 900-1400 Rev/min, ultimate force of fracture of friction stir welded joints is increased. Also, it is concluded from results that with increase in tool travel speed between 50-160 mm/min, ultimate force of fracture of welded joints is decreased. Finally it is proved from results of this paper that in the frictionstir welding of IF sheets with thickness of 0.7 mm, maximum force of fracture of welded joints is achieved in rotational speed of 1400 Rev/min and travel speed of 105 mm/min.

Keywords: Friction stir welding, IF steel, texture study, Microstructure, optimization.

۱- مقدمه

در دو دهه گذشته، در بحث روش های نوین جوشکاری توجه خاصی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که نوعی فرآیند جوشکاری حالت جامد می باشد در سال ۱۹۹۱ توسط موسسه جوشکاری انگلستان ابداع شد. این فرآیند جوشکاری با استفاده از یک ابزار مصرف نشدنی از جنس سخت تر از فلز مورد جوشکاری، که دارای حرکت همزمان دورانی و خطی است انجام می شود و در مقایسه با فرآیندهای جوشکاری حالت مذاب دارای مزایایی از جمله اعوجاج و تنش پسماند کمتر می باشد. علاوه بر این، با توجه به این که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی عمل ذوب فلزات اتفاق نمی افتد، دمای این فرآیند نسبت به جوشکاری حالت مذاب کمتر بوده که در نتیجه باعث کاهش شیب حرارتی در ناحیه ذوب شده و خواص مکانیکی و کیفیت جوش را بهبود می بخشد [۱و۲].

با توجه به مطالعات زیادی که در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مورد آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است، استفاده از این فرآیند برای آلیاژهای با استحکام بالاتر از آلومینیوم و به خصوص فولادها، به دلیل استحکام و سختی بالا و نیاز به ابزاری با گرما سختی زیاد و همچنین هزینه بالای ساخت ابزار با محدودیت همراه است. البته در سال های اخیر به دلیل مزایای این روش جوشکاری، محققین مطالعاتی را برای بررسی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی انواع فولادها انجام داده اند که در ادامه به چند مورد از آن اشاره می شود. رینولدز و همکارانش در سال ۲۰۰۳ توانستند با استفاده از ابزاری از جنس کاربید تنگستن، ورق های از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و فولاد کربنی۳۶ DH به ضخامت ۶/۴ میلیمتر را به صورت موفقیت آمیزی به این روش جوش دهند و مشاهده نمودند که خواص مکانیکی جوش بهبود یافته است [۳و۴]. آلپتکین و همکارانش در سال ۲۰۰۶ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای اتصال ورق های فولادی زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ به ضخامت ۳ میلیمتر به کار بردند و مشاهده نمودند که بهترین جوش در سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۶۳ میلیمتر بر دقیقه و زاویه ابزار ۱ درجه و با استفاده از ابزاری از جنس کاربید تنگستن حاصل می شود [۵]. یوجی و همکارانش در سال ۲۰۰۶ تاثیر میزان کربن در فولادهای کربنی و انجام استحاله فازی را در حین

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار جوش حاصل بررسی نمودند و برای اولین بار جوش بدون عیبی بدست آورند، که هیچ استحاله فازی در آن اتفاق نیفتاده بود [۶]. مران و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به بررسی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ به ضخامت ۳ میلیمتر پرداختند و توانستند با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۴۰ تا ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه و با استفاده از ابزاری با جنس کاربید تنگستن این فولاد را بدون عیب جوش دهند [۷]. همچنین آن ها در سال ۲۰۰۸ به بررسی تاثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر روی ورق فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ جوش داده شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداختند [۸]. ساتیا و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به مطالعه بر روی اتصال دو نوع فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و فولاد فریتی ۴۳۰ AISIبه روش اصطکاکی اغتشاشی پرداختند و مشاهده کردند که اتصالات انجام شده به روش اصطکاکی اغتشاشی از خواص مکانیکی بهتری نسبت به جوش های حالت مذاب برخوردار است [۹]. سعید و همکارانش در سال ۲۰۰۸، جوشکاری ورق فولادی دو فازی ۲۲۰۵ SAFبه ضخامت ۲ میلیمتر را تحت پارامترهای مختلف جوشکاری، با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام دادند و نتیجه گرفتند که افزایش سرعت جوشکاری منجر به کاهش اندازه دانه های α و Υ در ناحیه اغتشاش شده و این امر موجب افزایش سختی و استحکام کششی در این ناحیه می شود [۱۰]. لاکاشمینارایان و بالاسوبرامانیان در سال ۲۰۱۰، به بررسی خواص میکروسکوپی، سختی، استحکام کششی و مقاومت به ضربه اتصالات ورق فولاد زنگ نزن فریتی M409 به ضخامت ۴ میلیمتر، که به روش اصطکاکی اغتشاشی جوش داده شده بود پرداختند. آن ها مشاهده کردند که دانه های فریتی فاز اصلی، طی خنک کاری سریع ناحیه جوش به دانه هایی با ساختاری دوگانه فریتی و مارتنزیتی تبدیل شدند و نمونه های جوش داده شده از استحکام کششی بهتری نسبت به فلز اصلی برخوردار می باشند [۱۱]. لی و همکارانش در سال ۲۰۱۵، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای ورق های فولادی زنگ نزن آستنیتی بدون نیکل، با نیتروژن زیاد و با ضخامت ۲/۴ میلیمتر، به طور موفقیت آمیزی انجام دادند و توانستند با سرعت دورانی ۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه، جوش با کیفیت بالا و خواص مطلوب ایجاد کنند [۱۲].

در تحقیقات انجام شده پیشین که به تعدادی از آنها اشاره شد، محققین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای ورق های با ضخامت بیشتر از ۱/۵ میلیمتر و بیشتر به صورت لب به لب مورد بررسی قرار دادند. این در حالیست که در بسیاری از صنایع از جمله خودروسازی، ورقهایی با ضخامت های کمتر از یک میلیمتر مورد استفاده قرار می گیرند و لازم است که این ورقهای نازک به یکدیگر جوش داده شوند. در این تحقیق از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال لب روی هم ورق هایی از جنس فولاد عاری از عناصر بین نشین با ضخامت کمتر از یک میلیمتر و با استفاده از هندسه خاص ابزار(ابزار بدون پین)، استفاده می شود.

همچنین با استفاده از روش طراحی آزمایشات، متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بهینه سازی شده و یک مدل ریاضی نیز جهت پیش بینی استحکام اتصالات جوشکاری شده ارائه می شود. بررسی های ریزساختاری و مکانیکی اتصالات نیز به منظور مطالعه عمیق تر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولاد IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر انجام می شوند .

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی کاربید تنگستن مورد استفاده برای ابزار

چگالی g/cm^3	سختی ویکرز HV30	استحکام شکست عرضی(TRS) N/mm	ترکیب شیمیایی (wt%) Co	TaC	WC	میانگین اندازه دانه	کد استاندارد
۱۴/۹	۱۶۰۰	۱۹۰۰	۶/۰	۱/۰	۹۳/۰	۲/۰	K۲۰

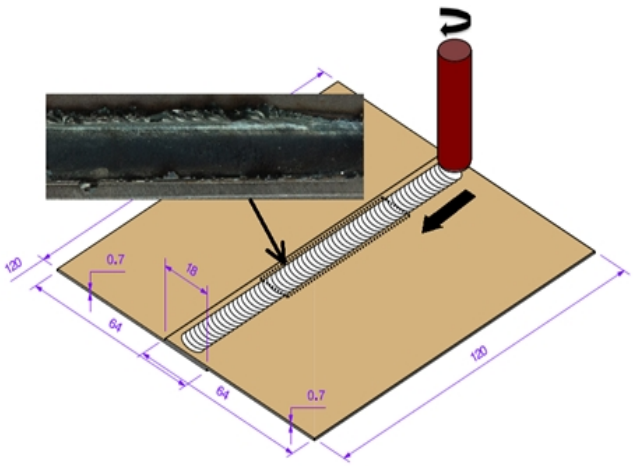
جدول ۲- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد IF

خواص مکانیکی			ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)						
درصد ازدیاد طول	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	Fe	Nb	Al	S	N	Ti	C
۴۷	۱۸۶	۳۰۳	Rem	۰/۰۰۲۹	۰/۰۴۶۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۴۲۴	۰/۰۰۲

۲- روش تحقیق و کار تجربی

در پژوهش حاضر، هدف بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولادی IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر به صورت لب روی هم می باشد. در شکل ۱ شماتیک نحوه قرارگیری ورق ها بر روی هم به همراه ابعاد نمونه های اولیه و همچنین نمونه ای از فلز جوش در آزمایشات تجربی نشان داده شده است. با توجه به افزایش دانش و انجام آزمایش های مختلف، ابزارهای مختلفی با جنس های خاص از جمله کاربید تنگستن، نیترید بور مکعبی[1] و ... که گرما سختی بالایی دارند، به منظور استفاده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها مورد استفاده قرار گرفته است. هندسه ابزار از بخش های مهم و تاثیرگذار در این فرآیند می باشد و به خصوص در ریزساختار جوش بسیار موثر است [۱۳]. در این تحقیق از ابزاری با جنس کاربید تنگستن استفاده شده که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده در این تحقیق با ابزار بدون پینی به قطر ۱۰ میلیمتر انجام می شود.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد ورق‌های مورد استفاده جهت جوشکاری در این تحقیــق، از جنس فولاد IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر می‌باشند که در جدول ۲ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آنها آورده شده است. فولاد عاری از عناصر بین نشین، جز فولادهایی می‌باشد که کربن و نیتروژن بسیار کمی دارند و همچنین میزان انعطاف پذیری آن‌ها بالاست. این نوع فولاد در دهه‌های اخیر به صورت ورق های نازک در صنعت خودروسازی، کاربرد گسترده‌ای یافته است.



شکل ۱- تصویر شماتیک اتصال ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به صورت لب روی هم

با توجه به انجام جوشکاری به صورت لب روی هم، فیکسچری با گیره های تسمه ای و یکپارچه برای گیرش بهتر مطابق شکل ۲ مورد استفاده قرار می گیرد.

1-CBN

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل ۲-فیکسچر مورد استفاده در آزمایشات تجربی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولادی با ضخامت ۰/۷ میلیمتر

در این تحقیق، به منظور انجام آزمایش های جوشکاری جهت بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند بر خواص مکانیکی و متالورژیکی فلز جوش در اتصال لب روی هم، از روش طراحی آزمایش باکس- بنکن استفاده شده و از روش رویه پاسخ نیز جهت بهینه سازی متغیرهای فرایند بهره گرفته شده است. روش باکس – بنکن در شرایطی که محدوده کاری برای هر پارامتر یکسان باشد مورد استفاده قرار می گیرد و در مقایسه با روش طراحی مرکب مرکزی نیاز به تعداد آزمایش کمتری داشته و در عین حال دقت بسیار خوبی نیز در بهینه سازی دارد. به همین دلیل از سوی بسیاری از محققین مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق، آزمایش دارای ۳ متغیر اصلی، سرعت دورانی ابزار (ω) ، سرعت پیشروی ابزار (V) و زاویه ابزار (ϕ) می باشد. همچنین به منظور استفاده از روش رویه پاسخ برای انجام طراحی آزمایش، سه سطح از هر متغیر در محدوده مجاز در نظر گرفته می شود. محدوده سرعت دورانی ابزار، حداقل ۹۰۰ و حداکثر ۱۴۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. دلیل این موضوع اینست که در سرعت دورانی کمتر از ۹۰۰ دور بر دقیقه امکان ایجاد اتصال مطلوب فراهم نیست و حداکثر سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه نیز با توجه به محدودیت های فنی دستگاه فرز مورد استفاده در نظر گرفته می شود. محدوده سرعت پیشروی ابزار بین ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته می شود. دلیل این موضوع اینست که در سرعت پیشروی کمتر از ۵۰ میلیمتر بر دقیقه با توجه به حداکثر سرعت دورانی مورد استفاده، دمای ابزار به شدت افزایش یافته و امکان شکست یا دفرمه شدن آن وجود دارد و در سرعت پیشروی بالاتر از ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه نیز با توجه به حداقل سرعت دورانی مورد استفاده، امکان اغتشاش مناسب برای ایجاد جوش مطلوب فراهم نیست.

محدوده زاویه ابزار بین ۰/۵ تا ۱/۵ درجه نیز با توجه به محدودیت های فنی در نظر گرفته شده است. با توجه به محدوده های مجاز، برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته شد که این سه سطح برای سرعت دورانی ابزار عبارتند از سرعت های ۹۰۰، ۱۱۵۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و برای سرعت پیشروی ابزار عبارتند از ۵۰، ۱۰۵ و ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه و برای زاویه ابزار نیز ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درجه در نظر گرفته می شود .

۲-۱- تعیین ماتریس طراحی آزمایش، اجرا و ثبت داده های آزمایش

همان طور که قبلاً بیان شد، به منظور استفاده از روش رویه پاسخ برای انجام طراحی آزمایش، سه سطح از هر متغیر در نظر گرفته شده و از روش طراحی آزمایش باکس- بنکن با سه فاکتور و سه سطح استفاده شد. به منظور پیش بینی رابطه میان متغیرهای جوشکاری و تنش شکست هر یک از اتصالات ایجاد شده توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، از یک مدل ریاضی توسعه یافته بر پایه رگرسیون بهره گرفته شده است و خواهیم داشت:

$$N_{f,FSW} = f(\omega, V, \varphi) \quad (1)$$

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

که در این رابطه، N بیانگر نیروی شکست اتصالات حاصل از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ω سرعت دورانی ابزار، V سرعت پیشروی ابزار و Φ زاویه ابزار می باشد. بر این اساس، معادله رگرسیون مرتبه دوم استفاده شده برای پیش بینی مقادیر نیروی شکست اتصالات برابرخواهد بود با:

$$N_{f,FSW} = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}\sum_{j=2}^{k} b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

ماتریس طراحی آزمایش که دربردارنده مقادیر کدگذاری شده متغیرها و مقادیر نیروی شکست اتصالات، $N_{f,FSW}$ ، مربوط به هر شرایط جوشکاری می باشد، در جدول ۳ نشان داده شده است. به منظور بررسی خواص ریزساختاری از آزمایش استاندارد متالوگرافی برای نمونه های جوش داده شده استفاده می شود. بدین منظور ابتدا نمونه ها از سطح مقطع جوشکاری شده با دستگاه وایرکات جدا شدند و قبل از انجام عمل تصویر برداری، مقطع نمونه ها توسط سنباده و پولیش آماده سازی شد و برای سهولت در انجام این کار نمونه ها با استفاده از رزین اپوکسی، مانت گرم شدند و پس از آماده سازی نمونه های مانت شده عملیات اچ نمودن مطابق استاندارد ASTM E407-07 و با استفاده از محلول نایتال ۲۰ درصد (۲۰ میلی لیتر اسید نیتریک۸۰+ میلی لیتر اتیل الکل) انجام شد. پس از چند بار آغشته کردن نمونه به محلول ذکر شده و شستشو و ارزیابی آن با میکروسکوپ نوری، در مجموع نمونه ها به مدت ۸ ثانیه در این محلول قرار داده شده و در نهایت با میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA II LMU/Tescan تصاویر میکروسکوپی ضبط شدند.

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه های جوش داده شده، از آزمایش کشش تک محوری با سرعت ۱ میلیمتر بر دقیقه استفاده شد. همچنین برای انجام آزمایش میکروسختی از دستگاه KOOPA استفاده شد که برای انجام این آزمایش، نمونه هایی از سطح مقطع جوش ها با دستگاه وایرکات جدا شدند و بعد از انجام مانت گرم به منظور تسهیل در انجام فرآیند، سنباده و پولیش شدند و مورد آزمایش میکروسختی با اعمـــال نیروی ۲۰۰ گرم و مدت زمـــان نشست ۱۰ ثانیه قرار گرفتند.

جدول ۳- لیست آزمایش های انجام شده به همراه مقادیر نیروی شکست اتصالات

شماره آزمایش	متغیرها			نیروی شکست اتصالات
	Φ (Degree)	V (mm/min)	ω (Rev/min)	
۱	۱	۵۰	۹۰۰	۷۴۰۰
۲	۱	۵۰	۱۴۰۰	۷۴۱۳
۳	۱	۱۶۰	۹۰۰	۶۵۰۰
۴	۱	۱۶۰	۱۴۰۰	۷۴۹۳
۵	۰/۵	۱۰۵	۹۰۰	۷۱۵۲
۶	۰/۵	۱۰۵	۱۴۰۰	۷۵۴۰
۷	۱/۵	۱۰۵	۹۰۰	۷۲۷۵
۸	۱/۵	۱۰۵	۱۴۰۰	۷۳۸۵
۹	۰/۵	۵۰	۱۱۵۰	۷۱۷۳
۱۰	۰/۵	۱۶۰	۱۱۵۰	۷۱۲۵
۱۱	۱/۵	۵۰	۱۱۵۰	۷۲۹۸
۱۲	۱/۵	۱۶۰	۱۱۵۰	۶۷۶۵
۱۳	۱	۱۰۵	۱۱۵۰	۷۲۳۵
۱۴	۱	۱۰۵	۱۱۵۰	۷۲۳۷
۱۵	۱	۱۰۵	۱۱۵۰	۷۲۳۰

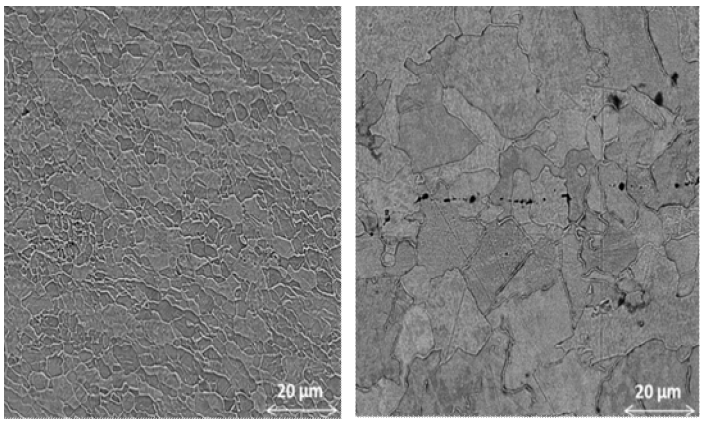
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریز ساختار

در شکل ۳ تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به فلز پایه و فلز جوش (مرکز ناحیه اغتشاش یافته) نشان داده شده است. لازم به ذکر است فلز پایه مورد مطالعه در شرایط نورد سرد و سپس آنیل شده قرار دارد. ملاحظه می شود که فلز پایه از دانه های نسبتاً درشت با اندازه ای در حدود ۳۰ میکرومتر تشکیل شده است. اما در فلز جوش دانه ها تا حد زیادی ریز شده و اندازه آنها تا حدود ۴ میکرومتر کاهش پیدا کرده است. عمل اغتشاش و یا هم زدن ناشی از ابزار در حین انجام فرایند منجر به در هم شکسته شدن دانه ها شده و لذا ریز شدن دانه ها را در پی دارد. به عبارت دیگر، گرمای ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین ابزار و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

ورق ها و سیلان پلاستیک شدید ناشی از چرخش ابزار سبب می شود تا در حین انجام فرآیند، تبلور مجدد دینامیکی رخ داده که منجر به تشکیل دانه های نسبتاً ریز می شود مگر آنکه گرمای ایجاد شده آنقدر شدید باشد که رشد دانه ها را در این مرحله در پی داشته باشد.

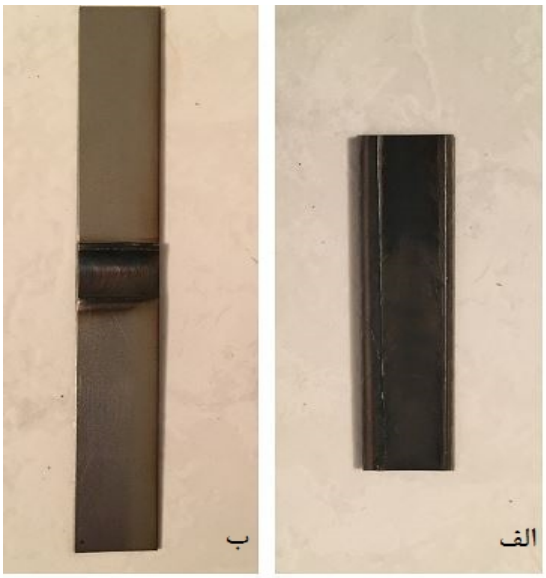


شکل ۳- تصاویر ریزساختاری حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به (الف) فلز پایه و (ب) مرکز ناحیه اتصال (فلز جوش)

محاسبات انجام شده توسط سایر محققان نشان داده است که در حین انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی تغییر شکل پلاستیکی شدید (کرنش بین ۴۰ تا ۶۰) با آهنگ کرنشی در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بر ثانیه در منطقه اتصال ایجاد می شود [۱۴]. اما برخی دیگر از محققان بر این باورند که علت ریزدانه شدن منطقه اتصال در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ناشی از بازیابی دینامیکی است و تبلور مجدد دینامیکی نمی باشد [۱۵]. در این پژوهش که آلیاژ مورد مطالعه از جنس فولاد IF با ساختار مکعبی مرکزپر می باشد، مقدار انرژی نقص در چیده شدن زیاد بوده و لذا بازیابی قبل از وقوع تبلور مجدد به مقدار زیادی رخ می دهد. از این رو به نظر می رسد که در رابطه با فولادIF ، مکانیزم حاکم ریزدانه شدن در منطقه اغتشاش یافته، وقوع بازیابی دینامیکی در حین انجام فرآیند باشد .

۳-۲- استحکام کششی

برای بررسی استحکام جوش های ایجاد شده، نمونه ها در راستای خط جوش و در راستای عمود بر خط جوش مطابق شکل ۴ از اتصالات جوشکاری شده جدا شدند و مورد آزمایش کشش تک محوری قرار گرفتند و نتایج حاصل از شکست نمونه¬های جدا شده در راستای جوش به صورت ماکزیمم نیرو در جدول ۳ ثبت شدند. همچنین در شکل ۵ تصویر یکی از اتصالات شکسته شده که در راستای خط جوش بوده است و بیشترین استحکام را دارد به همراه نمودار نیرو- جابجایی آن مشاهده می شود. تمامی تست های انجام شده برای نمونه های در راستای عمود بر خط جوش، از فلز پایه دچار شکست شدند که در شکل ۶ محل شکست یکی از نمونه ها به همراه نمودار نیرو- جابجایی آن قابل مشاهده است. با توجه به اینکه تمامی نمونه های در راستای عمود بر خط جوش از فلز پایه دچار شکست می شوند، نمودار نیرو- جابجایی همه آنها تقریباً مشابه نمودار شکل ۶ می باشد.



شکل ۴- نمونه های مورد استفاده در آزمایش کشش تک محور. الف) در راستای جوش ب) عمود بر راستای جوش

۳-۳- سختی

نمودار تغییرات سختی در طول خط میانی مقطع جوش ایجاد شده برای یکی از نمونه ها، در شکل ۷ به صورت پروفیل

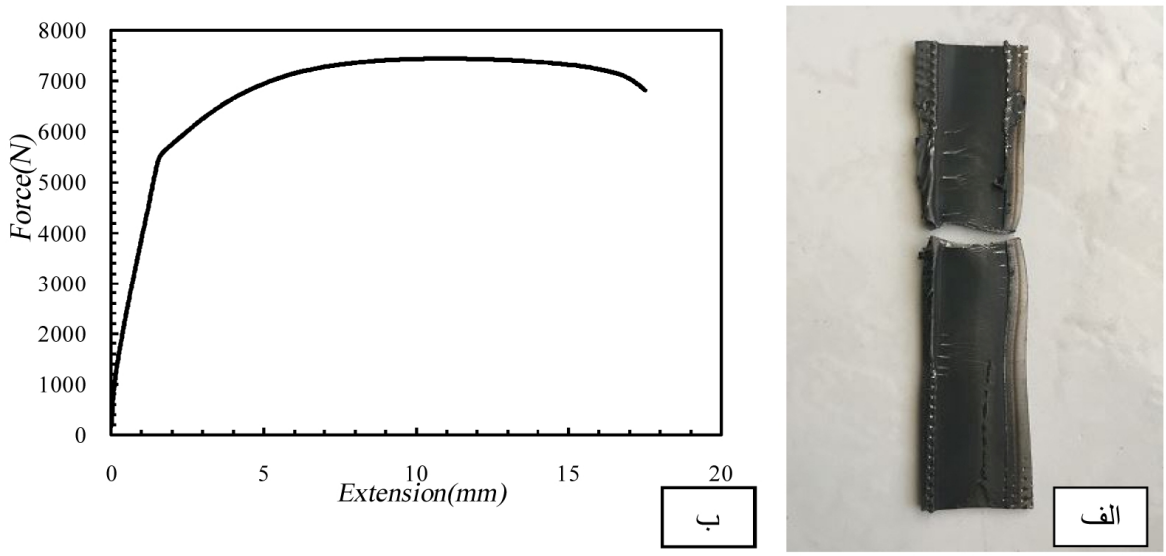
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

سختی ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود سختی در منطقه اغتشاش افزایش چشمگیری داشته است و این به دلیل ریزتر شدن دانه ها، در این منطقه می باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل۳ نیز ریزساختار این منطقه را نشان می دهد که دارای اندازه دانه کوچکتری نسبت به فلز پایه می باشد و مشخصاً کوچکتر شدن اندازه دانه ها در این ناحیه موجب افزایش سختی می شود.

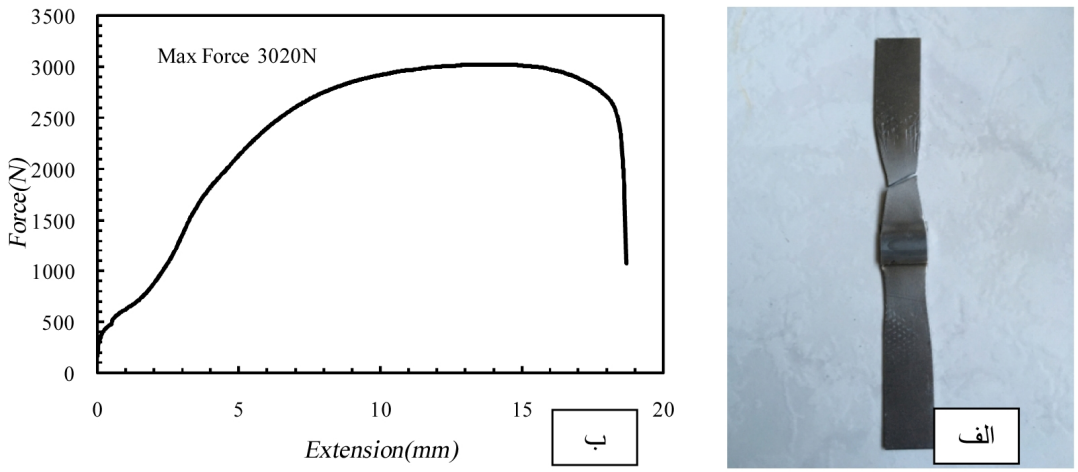
۳-۴-مطالعات بافت شناسی

یکی از ویژگی های ماده که بسیاری از خواص ماده از جمله خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار می دهد، بافت موجود در آن می باشد. تعیین بافت ایجاد شده در ورق پس از جوشکاری از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که بسیاری از تغییرات خواص به وجود آمده در حین جوشکاری را می توان با تحولات مؤلفه های بافت مرتبط دانست و بوسیله این تحولات، سازوکار های حاکم بر تغییر برخی از خواص مشخص می شوند. در این بخش تغییرات به وجود آمده در مؤلفه های بافت، در اثر انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در شکل ۸ توابع توزیع جهت به همراه تصاویر قطبی از فلز پایه و یک نمونه جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است. با دقت در این تصاویر، به ویژه مقاطع $\boldsymbol{\varphi_2 = 0^\circ, 45^\circ}$ از توابع توزیع جهت مشخص می شود که در اثر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی فولاد IF تغییری در مؤلفه های بافت ایجاد نمی شود.

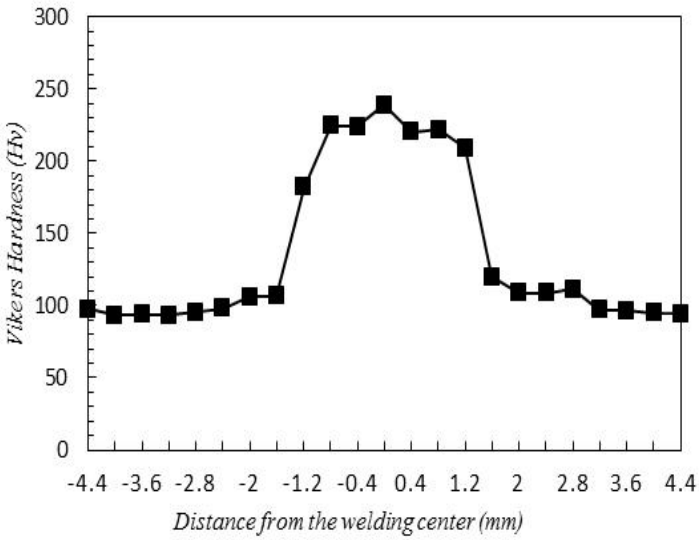


شکل ۵- الف) تصویر شکست نمونه جدا شده در راستای جوش ب) نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌ای با بیشترین استحکام



شکل ۶- الف) تصویر شکست نمونه جدا شده در راستای عمود بر خط جوش ب) نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌های جدا شده در راستای عمود بر خط جوش.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل ۷- پروفیل سختی یکی از نمونه های جوشکاری شده

تنها تغییری که مشاهده می شود آن است که شدت بافت و یا همان جهت گیری دانه ها اندکی کاهش پیدا کرده است. با توجه به تغییر شکل شدیدی که درحین فرآیند در فلز پایه به وجود می آید، انتظار می رود که تغییرات شدیدی در مؤلفه های بافت پدید آید و مؤلفه های بافت تبلور مجدد (فلز پایه در حالت آنیل شده بوده است)، جای خود را به مؤلفه های بافت تغییر شکل بدهند. اما در مورد فولاد IF چنین اتفاقی رخ نداده است. با مراجعه به منابع [۱۶]، مشخص می شود که فولاد IF دارای نقص در چیده شدن بالایی می باشد. این بدان معناست که فواصل نابجایی های شاکلی با یکدیگر کم بوده و لذا لغزش تقاطعی نابجایی ها به راحتی صورت می گیرد. لغزش در مواد با انرژی نقص در چیده شدن بالا از طریق لغزش نابجایی ها انجام می شود. از آنجا که نقص چیدمان اتم ها در این حالت اندک است، نابجایی های پیچی می توانند به صورت تقاطعی لغزش کنند. دیلامور [۱۶] نشان داده است که در این حالت، در اثر تنش های کم نیز لغزش تقاطعی صورت می گیرد. همین موضوع سبب می شود تا مواد با انرژی نقص در چیده شدن بالا دارای انعطاف پذیری بسیار زیادی باشند، همان گونه که در فولاد IF نیز این رفتار مشاهده می شود. این بدان علت است که در این مواد برای وقوع لغزش تقاطعی و در نتیجه تحمل کرنش های بسیار زیاد تنها به سه سیستم لغزشی نیاز است. بنابراین، کریستال ها در مواد با انرژی نقص در چیده شدن زیاد برای تغییر شکل نیازی نیست تا جهت گیری خود را تغییر دهند. لذا، جهت گیری دانه ها قبل و بعد از تغییر شکل تفاوتی ندارد. بنابر آنچه که گفته شد، می توان علت عدم تغییر در مؤلفه های بافت فولاد IF در اثر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را امری طبیعی دانست.

۳-۵- مورفولوژی سطح شکست

در شکل ۹ تصاویر شکست نگاری حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به ورق های IF جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است. با دقت در این تصاویر می توان دریافت که این سطوح از دو منطقه قابل تفکیک از هم تشکیل شده اند. ملاحظه می شود که در ناحیه بالایی و پایینی (ورق بالا و ورق پایین) اتصالات، دیمپل های زیادی وجود دارند، که این موضوع نشان از تغییر شکل پلاستیک قابل ملاحظه، قبل از شکست می باشد. قسمت مربوط به لبه اتصال ورق بالایی و پایینی نیز که آثار شکست ترد در آن مشهود است، دارای ظاهری تورقی بوده که نشان از ترد بودن این ناحیه دارد. عوامل متعددی وجود دارند که سازوکار شکست مواد را تحت تاثیر قرار می دهند. به عنوان مثال، می توان به حضور و یا عدم حضور آخال ها، ناخالصی ها و ذرات بین فلزی و یا به طورکلی وجود هر گونه ناهمگنی در ترکیب شیمیایی که سیستم های لغزش در ماده را تحت تاثیر قرار می دهند، اشاره نمود. برخی از عوامل نظیر تابش پرتوهای پرانرژی (بمباران نوترونی و یا الکترونی) نیز می‌توانند رفتار شکست مواد را به شدت دگرگون سازند. وجود

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

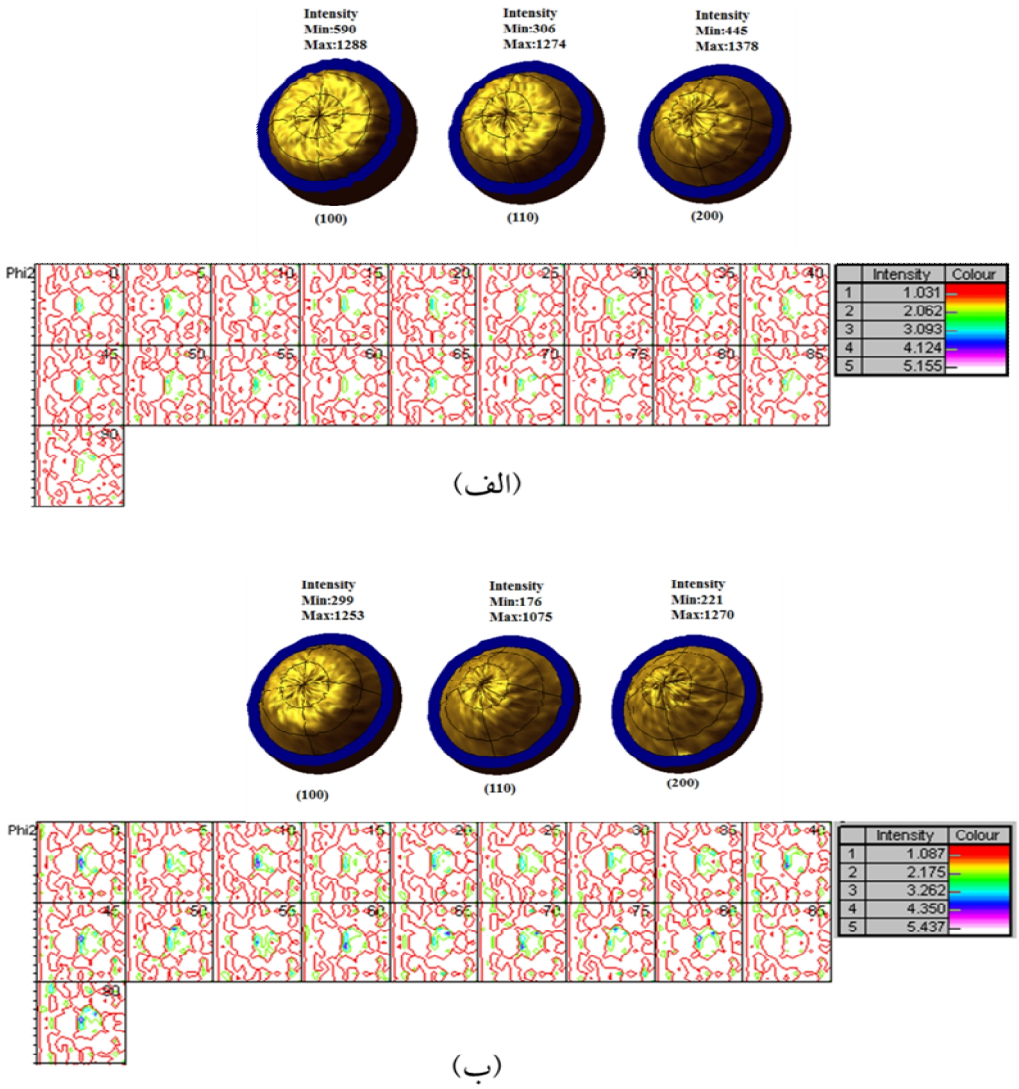
فاق در سطح ماده نیز، به علت ایجاد تنش های سه محوره ، سیلان پلاستیک ماده و در نهایت رفتار شکست ماده را تحت تاثیر قرار می دهد [۱۷].

با توجه به عاری بودن فولادهای مورد استفاده از آخال ها و ناخالصی ها، عدم حضور عناصری با میل تشکیل ترکیبات بین فلزی و همچنین عدم قرارگیری نمونه ها در معرض پرتوهای پرانرژی، می توان این گونه اظهار داشت که وجود ریزناپیوستگی های احتمالی در مرز اتصال دو ورق بالایی و پایینی (ناشی از عدم اختلاط کامل مواد) به عنوان فاق و یا ریزترک عمل نموده و سبب می شود در حین آزمون کشش تک محوره، در مراحل انتهایی آزمون، تنش های سه محوره ایجاد شوند و شرایط برای تغییر رفتار سیلان پلاستیک ماده و در نتیجه شکست ترد اتصال فراهم گردد.

۴-بحث

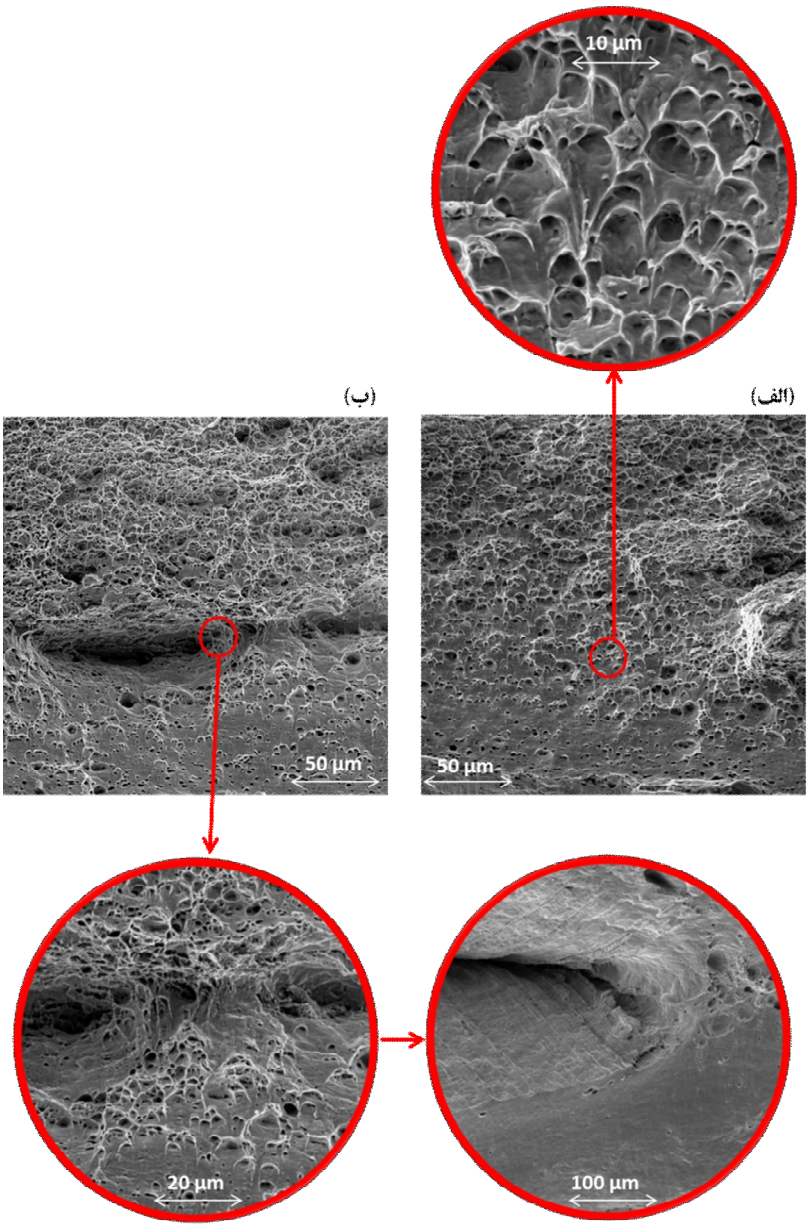
۴-۱- بهینه سازی متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با هدف دستیابی به استحکام شکست بیشینه

با توجه به پیچیدگی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، رسیدن به استحکام مناسب مقاطع جوش نیازمند مطالعه دقیق تر بر پایه مدل سازی ریاضی می باشد. پیچیدگی فرآیند بدین علت است که تغییرات اندک در متغیرهای متعدد فرآیند، سبب می شود تا هندسه اتصال، ریزساختار منطقه اتصال، میزان تنش پسماند و ... به شدت تحت تاثیر قرار گرفته



شکل ۸- توابع توزیع جهت و تصاویر قطبی مربوط به (الف) فلز پایه و (ب) فلز جوش (ناحیه اغتشاش).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل ۹- تصاویر شکست نگاری مربوط به یک نمونه جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، (الف): قسمت بالایی ناحیه جوش و (ب): مرکز ناحیه جوش.

و در نتیجه خواص مکانیکی اتصالات به وجود آمده دستخوش تغییرات زیاد و بعضاً نامطلوب شود. لذا ضروری است تا متغیرهای تاثیرگذار بر کیفیت اتصالات به گونه ای انتخاب و با یکدیگر ترکیب شوند تا افت استحکام شکست در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به حداقل ممکن کاهش پیدا کرده و شرایط جوشکاری بهینه تعیین شود. بدین منظور، در این بخش از روش رویه پاسخ جهت بهینه سازی متغیرهای فرایند بهره گرفته شده است.

۴-۲- متغیرهای تاثیرگذار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی اتصال ها

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

با توجه به ارتباط میان خواص مکانیکی اتصالات و ریزساختار، هر متغیری که میزان اغتشاش، شرایط دمایی (شیب دمایی، دمای بیشینه و توزیع دما)، سرعت سرد شدن و هندسه جوش را تحت تاثیر قرار دهد، می تواند کیفیت اتصالات از منظر خواص مکانیکی را دستخوش تغییرات گسترده سازد. بر اساس مطالعات صورت گرفته و انجام آزمایشات مختلف در آزمایشگاه، سه متغیر سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار، پروفیل حرارتی و کرنشی قطعه را تحت تأثیر قرار داده و به تبع آن ریزساختار، ابعاد منطقه جوش و هندسه مقطع جوش را تغییر می دهند. لذا، این متغیرها به عنوان عوامل اصلی کنترل کننده خواص مکانیکی اتصالات مطرح می باشند. پس از تعیین مهم رین متغیرهای تاثیرگذار بر خواص مکانیکی اتصالات با انجام آزمایش های مختلف و با توجه به خواص فیزیکی و حرارتی ورق های فولادIF ، مقادیر بیشینه و کمینه هر یک از متغیرها تعیین می شوند. در این بخش نیز با انجام آزمایش هایی و ثابت نگاه داشتن یک متغیر و تغییر دادن متغیرهای دیگر، محدوده متغیرهای تعیین شده که بتوان در آن محدوده ها اتصالاتی عاری از عیوب بدست آورد، تعیین می شود. بنابر آزمایشات انجام شده، محدوده مجاز تغییرات برای هر یک از متغیرهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه ابزار، با توجه به محدودیت های بیان شده در بخش قبلی، به ترتیب برابر با ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه و ۰/۵ تا ۱/۵ درجه می باشد.

۴-۳-توسعه مدل ریاضی

در توسعه یک مدل ریاضی که بیان گر ارتباط میان متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و نیروی شکست اتصالات هر یک از نمونه ها می باشد، حد بحرانی برای اهمیت و میزان تاثیرگذاری هر یک از ضرایب متغیرها با اعتبار بیش از ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. بدین معنا که اگر مقدار P-value در آنالیز واریانس برای یک متغیر کمتر از ۵ درصد باشد، آن متغیر به عنوان یک متغیر تاثیرگذار در نیروی شکست نهایی جوش محسوب می شود. نتایج آنالیز واریانس برای نیروی شکست اتصالات، در جدول ۴ آورده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس، پس از معین کردن ضرایب با اهمیت و حذف ضرایب بی اهمیت، می توان مدل ریاضی را برای پیش بینی ارتباط میان نیروی شکست جوش و متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه نمود. مدل ریاضی به دست آمده با توجه به آنالیز واریانس (به صورت کدگذاری شده) در زیر آورده شده است:

$$N_{f,FSW} = 7234 + 200.5\omega - 175.13V + 120\omega^2 - 152.63V^2 + 245\omega \times V - 121.25V \times \varphi$$

۴-۴- اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه شده

صحت مدل ریاضی ارائه شده در پیش بینی مقدار نیروی شکست اتصالات توسط آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به این آزمون در جدول ۵ آورده شده است. نتایج به دست آمده از محاسبات نشان می دهد که معادله رگرسیونی ارائه شده در معادله (۲) برای اجزای خطی، مرتبه دوم و تعاملات بین متغیرها معتبر می باشد. همچنین اعتبار مدل ریاضی ارائه شده با رسم نمودارهای باقیمانده برای خروجی نیروی شکست اتصالات نیز مورد بررسی قرار گرفت که این نمودارها در شکل ۱۰ نشان داده شده اند. به عبارتی می توان گفت که شرط تایید نتایج آنالیز واریانس این است که باقیمانده ها به صورت نرمال توزیع شوند، خطا مستقل بوده و واریانس ثابت باشد. نرمال بودن توزیع خطا توسط نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده که در شکل ۱۰ نشان داده شده است بررسی می شود. پراکندگی روند توزیع نقاط اطراف خط راست مورب، نشان دهنده نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده یا همان خطاهاست. به عبارت دیگر، نمودار احتمـــــال نرمال

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس برای خروجی نیروی شکست اتصالات نمونه های جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	۷۲۳۴/۰۰	۴۴/۲۰	۱۶۳/۶۷۷	۰/۰۰۰
ω	۲۰۰/۵۰	۲۷/۰۶	۴۰۸/۷	۰/۰۰۱
V	-۱۷۵/۱۳	۲۷/۰۶	-۶/۴۷۱	۰/۰۰۱
φ	-۴۵/۸۷	۲۷/۰۶	-۱/۶۹۵	۰/۱۵۱
ω*ω	۱۲۰/۱۲	۳۹/۸۴	۳/۰۱۵	۰/۰۳۰
V*V	-۱۵۲/۶۳	۳۹/۸۴	-۳/۸۳۱	۰/۰۱۲
φ*φ	۸/۸۷	۳۹/۸۴	۰/۲۲۳	۰/۸۳۳
ω*V	۲۴۵/۰۰	۳۸/۲۸	۶/۴۰۱	۰/۰۰۱
ω*φ	-۹۴/۵۰	۳۸/۲۸	-۲/۴۶۹	۰/۰۵۷
V*φ	۱۲۱/۲۵	۳۸/۲۸	-۳/۱۶۸	۰/۰۲۵

جدول ۵- نتایج آزمون آنالیز واریانس برای تعیین صحت و اعتبار مدل ریاضی ارائه شده.

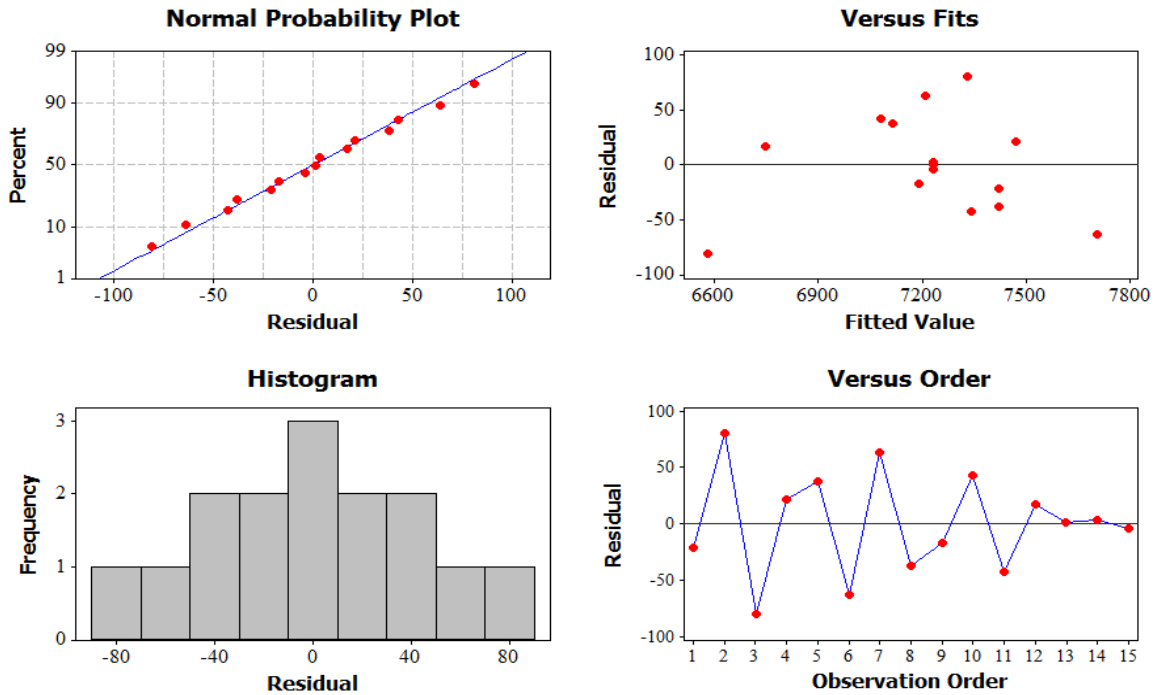
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	۹	۱۰۶۹۴۷۹	۱۰۶۹۴۷۹	۱۱۸۸۳۱	۲۰/۲۸	۰/۰۰۲
Linear	۳	۵۸۳۷۸۸	۵۸۳۷۸۸	۱۹۴۵۹۶	۳۳/۲۱	۰/۰۰۱
ω	۱	۳۲۱۶۰۲	۳۲۱۶۰۲	۳۲۱۶۰۲	۵۴/۸۸	۰/۰۰۱
V	۱	۲۴۵۳۵۰	۲۴۵۳۵۰	۲۴۵۳۵۰	۴۱/۸۷	۰/۰۰۱
φ	۱	۱۶۸۳۶	۱۶۸۳۶	۱۶۸۳۶	۲/۸۷	۰/۱۵۱
Square	۳	۱۵۱۰۶۴	۱۵۱۰۶۴	۵۰۳۵۵	۸/۵۹	۰/۰۲۰
ω*ω	۱	۶۳۴۷۵	۵۳۲۸۰	۵۳۲۸۰	۹/۰۹	۰/۰۳۰
V*V	۱	۸۷۲۹۸	۸۶۰۱۰	۸۶۰۱۰	۱۴/۶۸	۰/۰۱۲
φ*φ	۱	۲۹۱	۲۹۱	۲۹۱	۰/۰۵	۰/۸۳۳
Interaction	۳	۳۳۴۶۲۷	۳۳۴۶۲۷	۱۱۱۵۴۲	۱۹/۰۳	۰/۰۰۴
ω*V	۱	۲۴۰۱۰۰	۲۴۰۱۰۰	۲۴۰۱۰۰	۴۰/۹۷	۰/۰۰۱
ω*φ	۱	۳۵۷۲۱	۳۵۷۲۱	۳۵۷۲۱	۶/۱۰	۰/۰۵۷
V*φ	۱	۵۸۸۰۶	۵۸۸۰۶	۵۸۸۰۶	۱۰/۰۴	۰/۰۲۵
Residual Error	۵	۲۹۳۰۰	۲۹۳۰۰	۵۸۶۰		
Lack-of-Fit	۳	۲۹۲۷۴	۲۹۲۷۴	۹۷۵۸	۷۵۰/۶۲	۰/۰۰۱
Pure Error	۲	۲۶	۲۶	۱۳		
Total	۱۴	۱۰۹۸۷۸۰				

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

نشان داده شده برای نیروی شکست اتصالات بیان گر این موضوع است که باقیمانده ها با تقریب خوبی بر روی یک خط راست قرار می گیرند که دلالت بر توزیع نرمال خطاها دارد. دو فرض دیگر نیز توسط نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده در شکل ۱۰ بررسی می شوند. نبود ساختار مشخص در نقاط نمودار، ثابت بودن واریانس و مستقل بودن آن را نشان می دهد. ضریب تعیین، R^2، به منظور مشخص نمودن میزان نزدیکی داده های حاصل از آزمایش به داده های پیش بینی شده توسط رابطه (۳) تعیین شد. نتیجه به دست آمده حاکی از آن است که مقدار R^2 برابر با ۹۷/۳۳٪ می باشد. بنابراین می وان نتیجه گرفت که تطابق بسیار خوبی بین مقادیر به دست آمده از آزمایش و داده های پیش بینی شده توسط مدل ریاضی وجود دارد.

۵- تحلیل نتایج

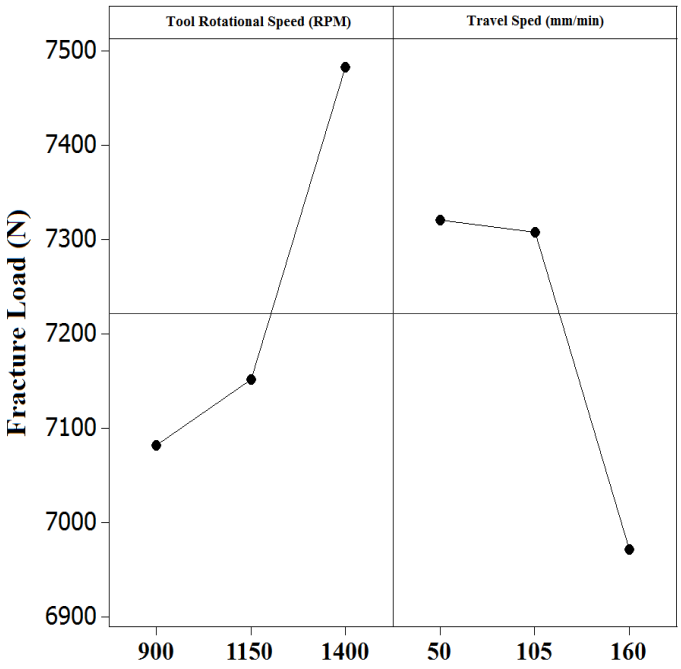
در پایان به تحلیل متغیرهای با اهمیت و تاثیرگذار بر خروجی آزمایش، یعنی نیروی شکست اتصالات ایجاد شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی پرداخته می شود. با دقت در مدل سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بیشترین تاثیر را بر مقادیر نیروی شکست جوش دارند. در واقع، تنها تاثیر این دو ریاضی ارائه شده می توان دریافت که در میان متغیرها، متغیر بر روی خروجی آزمایش با اهمیت می باشد و متغیر دیگر، یعنی زاویه ابزار به عنوان متغیر کم اهمیت و یا بی معنا تلقی شده و تغییر آن تاثیر قابل ملاحظه ای بر نیروی شکست اتصالات نمی گذارد. از طرفی، تاثیر سرعت دورانی بر نیروی شکست بیشتر از تاثیر سرعت پیشروی ابزار می باشد. تاثیر هر یک از این متغیرها به تنهایی بر روی نیروی شکست اتصالات در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد، با افزایش سرعت دورانی ابزار از ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، نیروی نهایی شکست اتصالات حاصل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی افزایش می یابد. از سوی دیگر، با افزایش سرعت پیشروی ابزار از ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه، نیروی شکست اتصالات با کاهش روبروست. روند افزایش یا کاهش نیروی شکست اتصالات را می بایستی در مقدار حرارت ورودی به اتصالات و میزان اغتشاش و در هم آمیخته شدن ورق های بالایی و پایینی در یکدیگر جستجو نمود.



شکل ۱۰- نمودارهای احتمال نرمال مربوط به خروجی نیروی شکست اتصالات نمونه¬های جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

علت کم بودن مقدار نیروی شکست اتصالات جوشکاری شده با سرعت دورانی ۹۰۰ دور بر دقیقه آن است که نیروی محرکه کافی برای هم زدن و یا به عبارتی آمیخته شدن ورق ها در یکدیگر فراهم نبوده و لذا اتصالی نه چندان قوی، بین ورق بالایی و پایینی ایجاد می شود. اما در سرعت های دورانی بالاتر، به علت ایجاد حرارت بیشتر ناشی از چرخش سریع تر ابزار، ورق بالایی و پایینی به خوبی در یکدیگر آمیخته شده و لذا پیوند مستحکم تری بین ورق ها ایجاد می شود. از سوی دیگر، ملاحظه می شود که اتصال ایجاد شده در سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه بیشترین نیروی شکست را دارد. در این حالت، پیشروی آهسته ابزار سبب می شود تا حرارت به اندازه کافی ایجاد شده و سیلان ماده به راحتی رخ دهد. سهولت سیلان ماده در این حالت سبب می شود تا اتصال بین دو ورق به خوبی صورت گرفته و عیوب احتمالی از قبیل حفره های کرمی شکل و تونلی ایجاد نشوند. اما با افزایش سرعت پیشروی و به دنبال آن کاهش سیلان پلاستیک ماده، شرایط برای ایجاد اتصالی مطلوب و با استحکام وجود نخواهد داشت.



شکل ۱۱- تاثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر نیروی نهایی شکست.

۵-۱- آنالیز اثر تعاملی سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار

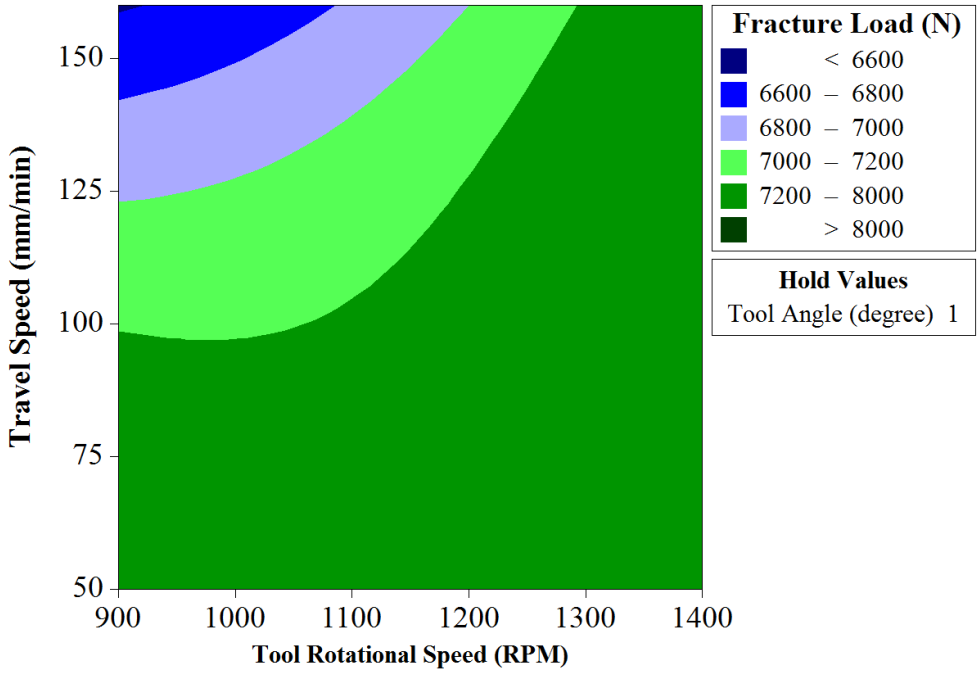
منحنی های هم ترازی نقش بسیار مهمی در مدل سازی به روش رویه پاسخ، بازی می کنند. با رسم منحنی های هم ترازی توسط نرم افزار Minitab می توان با مشخصه یابی شکل سطوح درباره استقلال و یا عدم استقلال متغیرها اظهارنظر نمود. اگر منحنی هم ترازی به دست آمده به صورت دایروی باشد، می توان گفت که اثر هر یک از متغیرها مستقل از هم است. اما اگر به صورت بیضوی باشد، احتمال تعامل بین متغیرها وجود دارد. در ادامه با استفاده از منحنی های هم ترازی به دست آمده از آنالیز، در رابطه با اثر تعاملی متغیرها بحث خواهد شد. همان گونه که ملاحظه می شود، روند افزایشی نیروی شکست اتصالات با افزایش سرعت دورانی ابزار و کاهش سرعت پیشروی ابزار در نمودار هم ترازی نشان داده شده در شکل ۱۲ کاملاً مشهود است.

با توجه به توضیحات بالا می توان این گونه نتیجه گرفت که بین این دو متغیر یعنی سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار تعامل وجود دارد. به عبارت دیگر، در سرعت های دورانی کمتر، روند کاهش نیروی شکست با افزایش سرعت پیشروی ابزار سریع تر می باشد. در مجموع می توان این گونه اظهار داشت که نامطلوب ترین ترکیب از متغیرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ترکیبی است که شامل سرعت پیشروی بالا و سرعت دورانی پایین باشد. این شرایط منجر به کاهش سیلان پلاستیک ورق ها و به تبع آن احتمال ایجاد حفره ها در منطقه اتصال شده که این موضوع کاهش نیروی شکست اتصالات ایجاد شده را در پی خواهد داشت.

۶-نتیجه گیری

در این تحقیق اتصال لب روی هم ورق های فولاد IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر با استفاده از ابزاری از جنس کاربید تنگستن و با هندسه ساده (بدون پین) به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به صورت موفقیت آمیزی انجام گرفت.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل ۱۲- تاثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر نیروی نهایی شکست.

آزمایش های لازم جهت بررسی تغییرات ریزساختار، استحکام اتصالات، سختی و بافت شناسی نمونه ها انجام شد و تاثیر سه پارامتر مهم فرآیند جوشکاری از جمله سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه ابزار بر روی نیروی شکست اتصالات با استفاده از روش طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- در میان متغیرها، سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بیشترین تاثیر را بر مقادیر نیروی شکست اتصالات در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولادی IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر دارند .

-نتایج نشان دادند که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تغییر زاویه ابزار تاثیر قابل ملاحظه ای بر نیروی شکست اتصالات نمی گذارد.

-از این پژوهش نتیجه گرفته شد که با افزایش سرعت دورانی ابـــزار از ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه نیروی نهـــایی شکست اتصالات حاصل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی افزایش می یابد.

-از نتایج ثابت شد که با افزایش سرعت پیشروی ابزار از ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه، نیروی شکست اتصالات کاهش می یابد.

- نتایج نشان دادند که بین متغیرهای سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار اثر تعاملی وجود دارد و در سرعت¬های دورانی کمتر، روند کاهش نیروی شکست با افزایش سرعت پیشروی ابزار سریع تر می شود .

-نتایج نشان دادند که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولادی IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر، بیشترین نیروی لازم برای شکست اتصالات جوش در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۵ میلیمتر بر دقیقه بدست آمد.

- نتایج حاصل از مطالعات بافت شناسی نشان دادند که در اثر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی فولاد IF تغییری در مؤلفه های بافت ایجاد نمی شود. با توجه به این نکته که فولاد دارای نقـص در چیده شدن زیاد است، بنابراین،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

کریستال ها برای تغییر شکل نیازی نیست تا جهت گیری خود را تغییر دهند. لذا، جهت گیری دانه ها قبل و بعد از تغییر شکل تفاوتی ندارد و می توان علت عدم تغییر در مؤلفه های بافت فولاد IF در اثر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را امری طبیعی دانست.

منابع

1- R.S. Mishra and Z.Y. Ma, "Friction Stir welding and processing". Mater Sci Eng, R 2005;50:1-78.

2- Emam, S. A. and Domiaty, A. E., "A refined energy, based model for friction-stir welding", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 53, No., pp. 1016-1022, 2009.

3- Reynolds A. P., Tang W., Gnaupel-Herold T., Prask H., "Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds", Scripta Materialia, Vol. 48, pp. 1289-1294, 2003.

4- Reynolds A. P., Tang W., Posada M., DeLoach J., "Friction stir welding of DH36 steel", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8, pp. 455-460, 2003.

5-Alptekin A. "The effect of tool rotational speed on welding of AISI 304 austenitic stainless steels by friction stir welding". Temmuz: Pamukkale Universitesi FBE; 2006.

6-Ueji R., Fujii H., Cui L., Nishioka A., Kunishige K., Nogi K., "Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the marten site process", Materials science and Engineering A, Vol. 423, pp. 324-330, 2006.

7-Meran C, Kovan V, Alptekin A. "Friction stir welding of AISI austenitic stainless steel (2007) ". Material-wissencchaft und Werkstofftechnik, 2007; 37 (10): 829-35.

8-Meran C, Canyurt OE. "The effect of tool rotational speed and traverse speed on welding of AISI 304 austenitic stainless steels by friction stir welding method". VII'nci Ulusal Kaynak Teknolojist Kongresi 2008: 157-70.

9-Sathiya P, Aravindan S, Noorul Haq A. "Some experimental invistigations on friction welded stainless steel joints". Mater Des, 2008; 29:1099-109.

10-Saeid T, Abdollah-zadeh A, Assadia H, Malek Ghainia F. "Effect of friction stir welding speed on microstructure and mechanical properties of a duples stainless steel". Mater Sci Eng, A 2008, 496 (1-2): 262-8.

11-Lakshminarayanan A K., Balasubramanian V., "An assessment of microstructure, hardness, tensile and impact strength of friction stir welded ferritic stainless steel joints", Mater Des 2010; 31: 4592-600.

12-H.B. Li , Z.H. Jiang , H. Feng, S.C. Zhang , L. Li , P.D.Han, R.D.K. Misra , J.Z. Li. "Microstructure, mechanical and corrosion properties of friction stir welded high nitrogen nickel-free austenitic stainless steel" . Materials and Design 84 (2015) 291–299.

13- Rai R., De A., Bhadeshia H. K. D. H., DebRoy T., "Review: friction stir welding tools", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 16, pp. 3252-342, 2011.

14-Alidokht, S.A., Abdollah-zadeh, A., Soleymani, S., Saeid, T., Assadi, H., "Evaluation of microstructure and wear behavior of friction stir processed cast aluminum alloy", Materials Characterization, Vol. 63, pp. 90–97, 2012.

15-Mishra, R., Ma, Z., Charit, I., "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite", Materials Science and Engineering: A, Vol. 341, pp. 1–4, 2003.

16- Dillamore, I., Butler, E., Green, D., "Crystal rotations under conditions of imposed strain and the influence of twinning and cross-slip", Metal Science Journal, Vol. 2, pp. 161–167, 1968.

17- Calcagnotto, M., Adachi, Y., Ponge, D., Raabe, D., "Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite / martensite dual-phase steels and the effect of aging", Acta Materialia, Vol. 59, pp. 658–670, 2011.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]