نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 63-53

# بررسی تجربی شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده بسیار نازک فولاد IF با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

**مهدی صفری*، حامد دیلمی عضدی**

**گروه** دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

(دریافت مقاله: 1399/06/01 ؛ پذیرش مقاله: 1399/07/23)

**چکیده**

در این مقاله بررسی تجربی شکل پذیری ورق‌های بسیار نازک جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی از جنس فولاد IF با ضخامت 0/7 میلیمتر انجام می شود. ابتدا ورق‌ها توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و مطابق با آزمایش‌های تعیین شده بر اساس روش طراحی آزمایشات تاگوچی به یکدیگر متصل می گردند. پارامترهای مورد بررسی در فرایند جوشکاری شامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار می‌باشند. سپس ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده بر اساس تست ارتفاع گنبد تا مرحله ایجاد عیب شکل دهی گردیده و ارتفاع گنبد برای هر آزمایش اندازه گیری می شود. بنابراین اثر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر شکل پذیری ورقهای ترکیبی جوشکاری شده بسیار نازک IF برآورد می شود. نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت دورانی، ارتفاع گنبد در فرایند شکل دهی کاهش می یابد در حالیکه با افزایش سرعت پیشروی، شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی بهبود می یابد. همچنین نتایج بهینه سازی بر مبنای روش نسبت سیگنال به نویز نشان می‌دهند که سرعت دورانی ابزار بیشترین تاثیر را بر ارتفاع گنبد ورق ترکیبی جوشکاری شده دارد.

**کلمات کلیدی**: شکل پذیری، ورقهای ترکیبی جوشکاری شده، فولاد IF، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

# Experimental study of formability of friction stir welded ultra-thin sheets of IF steel

**M. Safari*, H. Deilami Azodi**

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

(Received 22 August July 2020 ; Accepted 14 October 2020)

**Abstract**

In this paper, the experimental investigation of formability of friction stir welded ultra-thin sheets of IF steel is investigated experimentally. First, the sheets are joined by friction stir welding process based on the tests determined according to the Taguchi design of experiments. The investigated parameters in the welding process are as tool rotational and traverse speeds. Then, the tailor welded blanks are formed based on dome height test up to the defect stage and the dome height is measured for each test. Therefore, the effects of friction stir welding process parameters on formability of friction stir welded ultra-thin sheets of IF steel are evaluated. The results show that by increasing the rotational speed, the dome height in forming process decreases, while with increasing the traverse speed, the formability

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

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]

of tailor welded blanks by friction stir welding process improves. Also, the results of optimization based on signal to noise ratio method show that the tool rotational speed has the greatest effect on the dome height of tailor welded blank.

**Keywords**: Rotary frictional welding, Tube sections, Aluminum-copper joints.

## 1- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نوعی فرآیند جوشکاری حالت جامد بوده که در آن از یک ابزار مصرف نشدنی از جنس سخت تر از فلز مورد جوشکاری، که دارای حرکت همزمان دورانی و خطی است استفاده می شود. از مهمترین مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با فرآیندهای جوشکاری حالت مذاب می توان به اعوجاج و تنش پسماند کمتر و همچنین دمای پایین تر اشاره نمود که منجر به کاهش شیب حرارتی در ناحیه مذاب و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی و کیفیت جوش می شود [1].

در طی سالهای اخیر مطالعات بسیار زیادی بر روی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است. این در حالیست که 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. برخی تحقیقات در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها در سال‌های اخیر با موفقیت انجام شده اند.

به عنوان مثال لاکاشمینارایان و بالاسوبرامانیان [2] خواص میکروسکوپی، سختی، استحکام کششی و مقاومت به ضربه اتصالات ایجاد شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی فولاد زنگ نزن فریتی 409M به ضخامت 4 میلیمتر را بررسی نمودند نتایج آنها نشان دهنده تبدیل دانه‌های فریتی فاز اصلی به دانه‌هایی با ساختاری دوگانه فریتی و مارتنزیتی در اثر خنک کاری سریع ناحیه جوش بود. لی و همکاران [3] به بررسی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های فولادی زنگ‌نزن آستنیتی بدون نیکل، با نیتروژن زیاد و با ضخامت 2/4 میلیمتر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که برای جوشکاری این فولادها می‌توان اتصالاتی با کیفیت بالا و خواص مطلوب در سرعت دورانی 400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 100 میلیمتر بر دقیقه ایجاد نمود. توجه به این نکته ضروری است که در اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها، ضخامت حداقل ورق‌های جوشکاری شده در حدود 1/2 تا 1/8 میلیمتر بوده است. این در حالی است که در بسیاری از صنایع از جمله خودروسازی، ورق‌هایی با ضخامت‌های کمتر از یک میلیمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و لازم است که این ورق‌های نازک به یکدیگر جوش داده شوند. از طرف دیگر، مطالعه شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده همواره در سالهای اخیر از موضوعات مورد علاقه پژوهشگران بوده است. اهمیت این موضوع به دلیل وجود نواحی با خواص متفاوت در ورق ترکیبی جوشکاری شده و اثر متفاوت آن‌ها بر میزان شکل‌پذیری اینگونه ورقها می‌باشد. در طی سالیان گذشته تحقیقاتی در زمینه شکل دهی ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده انجام شده است. چوی و همکاران [4] به بررسی حرکت خط جوش ورق‌های ترکیبی دایره ای و مستطیلی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان دهنده جابجایی کمتر خط جوش و همچنین چروکیدگی کمتر در نمونه‌های دایره‌ای نسبت به مستطیلی بود. هئو و همکاران [5] به بررسی اثر کنترل نیروی ورقگیر در فرایند کشش عمیق ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده با لیزر بر حرکت خط جوش ورق‌های ترکیبی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که کنترل حرکت خط جوش با اعمال نیروی غیریکنواخت ورقگیر به قسمتهای مختلف ورق امکان‌پذیر است. عباسی و همکاران [6] به بررسی پدیده چروکیدگی در دیواره ظروف تولیدشده از ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده توسط فرایند کشش عمیق پرداختند. نتایج آنها نشان داد که امواج چروکیدگی، تنها در ناحیه نازک ورق ترکیبی به وجود می‌آیند. همچنین صفدریان و همکاران [7] در یک مطالعه تجربی و به کمک شبیه سازی‌های عددی

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]

نشان دادند که ناهمسانگردی مواد، اثر مهمی بر شکل پذیری ورق‌های ترکیبی دارد و مدل معیار حداکثر نیروی پانچ، بهترین دقت برای پیش بینی ارتفاع کشش را دارا می باشد. فضلی و همکاران [8] با استفاده از روشهای المان محدود، اثر شکل اولیه مناسب و بهینه ورق‌های جوشکاری شده جهت کمینه کردن حرکت خط جوش ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده در فرآیند کشش عمیق را بررسی نمودند. آن‌ها با تعریف مسیرهای مختلف در فرآیند کشش عمیق نتیجه گرفتند که بهینه‌سازی شکل ورق باعث حرکت کمتر خط جوش و افزایش شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی شده است. سونگ و همکاران [9] با انجام آزمایش های تجربی به بررسی اثر نسبت ضخامت در ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده بر شکل پذیری آن‌ها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش نسبت ضخامت‌ها، پارگی به تعویق خواهد افتاد و عمق کشش افزایش می یابد. دیاز و همکاران [10] تأثیر نیروی ورقگیر بر نسبت کشش ورق ترکیبی جوشکاری شده را در فرایند کشش عمیق بررسی قرار دادند و نیروی ورقگیر مناسب را به دست آوردند. کشاروانی و همکاران [11] شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی را با در نظر گرفتن پارامترهای بهینه فرایند برای آلیاژهای آلومینیوم 5754 و 5052 با ضخامت 2 میلیمتر و با استفاده از نسبت حد کشش بررسی نمودند. نتایج نشان داد که نسبت حد کشش در نمونه های جوشکاری شده نزدیک به نمونه‌های بدون جوش است که نشان دهنده کیفیت خوب جوش است. پارنته و همکاران [12] شکل پذیری نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی را برای اتصالات غیر همجنس آلیاژهای آلومینیوم 5182 و 6061 با ضخامت 1 میلیمتر به وسیله نمودارهای FLC در تست ناکازیما بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده قابل مقایسه با نمونه های بدون جوش است و مشاهده گردید که شکل پذیری ورقهای ترکیبی جوشکاری شده وابسته به جهت خط جوش می باشد. انتظاری و همکاران [13] شکل‌پذیری ورق‌های جوشکاری شده AA70705 با روش اصطکاکی اغتشاشی را به صورت تجربی و با استفاده از تست اتساع سنبه کروی بررسی نمودند. در آن تحقیق اثر پارامترهای فرآیند و دما بر شکل پذیری بررسی گردید. کلاهگر و همکاران [14] به بررسی شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی و با نسبت ضخامت های مختلف پرداختند. نتایج آنها نشان داد که نسبت شکل دهی در ورقهای ترکیبی ماشینکاری شده می تواند تا 2/8 برابر ورق‌های یکپارچه برسد. همچنین ثابت گردید که افزایش نسبت ضخامت در ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده باعث کاهش شکل پذیری می‌گردد. حبیبی و همکاران [15] شکل پذیری ورقهای ترکیبی جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی را بررسی نمودند. ورقهای ترکیبی جوشکاری شده از ورقهای فولادی کم کربن با نسبت ضخامت های مختلف تولید شدند. نتایج آنها نشان داد که جوشکاری باعث کاهش شکل پذیری ورقهای ترکیبی جوشکاری شده شده و این کاهش شکل پذیری با افزایش نسبت ضخامت ورقهای پایه شدت می یابد. طیبی و همکاران [16] به بررسی شکل پذیری اتصالات غیر همجنس حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم 6061 و 5083 در فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای به صورت تجربی و عددی پرداختند. ورقهای آلومینیومی 6061، 5083 و ورق ترکیبی حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم 6061 و 5083 توسط فرآیند شکل دهی نقطه ای تدریجی فرم دهی شدند. نتایج آنها نشان داد که شکل پذیری ورق ترکیبی حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خیلی متفاوت از شکل پذیری ورقهای پایه نیست. نمونه جوشکاری شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی از محل آلیاژ آلومینیوم و دور از ناحیه جوشکاری شده شکست خورد. مویدی و همکاران [17] به بررسی اثرات جهت گیری جوش بر شکل پذیری ورقهای فولادی جوشکاری شده نازک به صورت تجربی و عددی پرداختند. به منظور بررسی شکل پذیری از نمودارهای حد شکل دهی استفاده گردید. نتایج آنها نشان داد که برای شرایط شکل دهی با مود کششی، ورقهای ترکیبی جوشکاری شده با جهت خط جوش عمود بر جهت کشش بهترین شکل‌پذیری را ارائه می نمایند در حالی که برای شرایط

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]

شکل‌دهی کرنش صفحه ای زاویه خط جوش صفر درجه بهترین نتیجه را ارئه می نماید. همچنین برای شرایط کشش دو محوری نیز مشخص گردید جهت خط جوش اثر مهمی بر شکل پذیری ندارد. در این پژوهش به بررسی شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده پرداخته می شود. به منظور اتصال از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده می‌شود و همچنین به منظور بررسی شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده نیز از تست ارتفاع گنبد استفاده می شود. مهمترین نوآوری این پژوهش، بررسی جامع و آماری در رابطه با اثر مهمترین پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر میزان شکل پذیری ورق ترکیبی جوشکاری شده یا به عبارتی ارتفاع گنبد می باشد.

## 2- کار تجربی

در این تحقیق ورقهایی از جنس فولاد IF با ضخامت 0/7 میلیمتر و ابعاد 120×60 میلیمتر جهت تولید ورقهای ترکیبی جوشکاری شده مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین ابزاری از جنس کاربید تنگستن گرید K20 جهت اتصال به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده می شود. در شکل (1) تصویر فیکسچر و ابزار مورد استفاده جهت انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است.

نکته قابل توجه این است که به دلیل ایجاد اعوجاج و تنش پسماند ناشی از اتصال لب به لب ورق ها با استفاده از روش‌های جوشکاری ذوبی، در این تحقیق روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال این ورق‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در جدول (1) ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد IF مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است. به منظور بررسی اثر سرعت دورانی و پیشروی ابزار بر استحکام اتصالات جوشکاری شده و در نهایت شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده، ابتدا با استفاده از ترکیبات مختلف سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام می گردد. به منظور تعیین حدود بالا و پایین سرعت دورانی و پیشروی ابزار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، با توجه به محدودیت سرعت‌های دورانی و پیشروی دستگاه فرز مورد استفاده بوده است. با توجه به این محدودیت‌ها، سه سرعت دورانی 800، 1000 و 1200 دور بر دقیقه و سه سرعت پیشروی 8، 12 و 20 میلیمتر بر دقیقه انتخاب شدند. به منظور بررسی شکل پذیری ورق ترکیبی جوشکاری شده پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، قالب آزمون ارتفاع گنبد مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل (2) قالب آزمون ارتفاع گنبد مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. همچنین در شکل (3) نمونه هایی از ورق‌های ترکیبی شکل‌دهی شده در قالب آزمون ارتفاع گنبد و پارگی های ایجاد شده بر روی آنها نشان داده شده اند. در تحلیل مسائل مهندسی به ویژه در انجام آزمایش‌های تجربی و روش-های شبیه سازی عددی که در آنها پاسخ مسئله تحت تأثیر متغیرهای مختلف ورودی است، بهره‌گیری از روش‌های آماری آزمایش‌ها کمک شایانی به طراحی، مدل‌سازی و تحلیل و بهینه سازی دقیق این فرآیندها می‌نماید. طراحی آزمایش‌ها یکی از مناسب ترین روش‌ها برای محققین در بهبود و اصلاح و صرفه جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و تشخیص دقت و رفع عیوب آنها می‌باشد [18].

تبیین دقت آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر آزمایش، ارائه نمودارهای برهم‌کنش متغیرهای ورودی، بهینه‌سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها از مزایای مهم روش تاگوچی است.همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدلسازی کند و به صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی ارائه نماید. در این تحقیق از روش تاگوچی که یکی از روش های کارآمد، قوی و مناسب طراحی آزمایش ها می باشد استفاده شده است. به منظور تشکیل ماتریس آزمایش‌ها، فاکتورهای ورودی شامل سرعت دورانی با سه سطح 800، 1000 و 1200 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی به سه سطح 8، 12 و 20 میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته می‌شود و بر اساس روش طراحی آزمایشات تاگوچی جدول (2) که شامل شرایط انجام هر آزمایش می باشد ایجاد می‌گردد.

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]





شکل 1- تصویر فیکسچر و ابزار مورد استفاده جهت انجام فرآیندجوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جدول1- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد **IF**

| ترکیب شیمیایی (wt%) | | | | | | | خواص مکانیکی | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | Ti | N | S | Al | Nb | Fe | (MPa) تنش نهایی | (MPa) تنش تسلیم | (%)درصد ازدیاد طول | (HV) سختی |
| 0.002 | 0.424 | 0.003 | 0.005 | 0.0465 | 0.0029 | Rem | 311 | 186 | 47 | 89.2 |

## 3- نتایج و بحث

تحلیل واریانس پرکاربردترین نوع تحلیل برای برآورد اثر پارامترها بر روی خروجی فرآیند است. با توجه به شکل های (4) و (5) که مربوط به نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده و نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده و تایید آن‌ها می‌باشند در جدول (3) به بررسی اثر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر شکل پذیری ورقهای ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد پرداخته می شود.

نتایج تحلیل واریانس در جدول (3) نشان داده شده اند. در این جدول DF درجات آزادی، Seq SS مجموع مربعات متوالی، Adj SS مجموع مربعات تنظیم شده و Adj MS میانگین مربعات تنظیم شده می باشند. در این تحقیق سطح اطمینان برابر با 95 درصد در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر P-value کمتر از 0/05 نشان دهنده آن است که پارامتر متناظر تاثیر معنا داری بر ارتفاع گنبد ورقهای ترکیبی جوشکاری شده دارد.

همانطور که در جدول (3) مشاهده می شود هر دو پارامتر سرعت دورانی و سرعت پیشروی دارای اثرات معناداری بر شکل‌پذیری ورق ترکیبی جوشکاری شده در آزمون ارتفاع گنبد دارند. به عبارتی با تغییر مقادیر آن‌ها، تغییرات محسوسی در ارتفاع ورق‌های ترکیبی جوشکاری لازم به ذکر است که توان دوم پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی و همچنین برهم کنش آنها به دلیل اینکه مقدار P-value آن‌ها بیش از 0/05 بوده است و اثر معناداری بر شکل پذیری ورق ترکیبی جوشکاری شده نداشته اند در جدول آنالیز واریانس نشان داده نشده اند. تحلیل رگرسیون به منظور یافتن رابطه بین پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد مورد استفاده قرار می گیرد. معادله (1) که ارتباط بین پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و ارتفاع گنبد را نشان می دهد از تحلیل های رگرسیون خطی بدست آمده است. این معادله در زیر نشان داده می شود.

$$\textit{Dome height} = 16.345 - 0.006004 * \textit{Rotational speed} + 0.0842\ \textit{Feed rate} \quad (1)$$

نتایج تحلیل واریانس برای تحلیل رگرسیون نشان می دهند که مدل تخمینی رگرسیون در سطح اطمینان 0/05 معنی دار می باشد. با درنظر گرفتن مقادیر R-sq= 98.57 % و R-sq (adj)= 98.09 % و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها با توجه به شکل(5) می‌توان گفت که مدلسازی صورت‌گرفته از دقت بسیارخوب و مناسبی برخوردار است. در مبحث طراحی آزمایش‌ها یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را مشخص می‌کند مقدار R-sq مدل می‌باشد. هرچه مقدار این

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]

مولفه به عدد 1 و یا 100 درصد نزدیک باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش بینی مدل آماری رگرسیون منطبق شده بـر داده‌هـا دقیق‌تر خواهد بود. با توجه به صحت مدلسازی انجام‌شـده مـی توان به بررسی اثر پارامترهـای فرآینـد جوشـکاری اصـطکاکی اغتشاشی بر شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شـده در تست ارتفاع گنبد پرداخت. در شکل(6) اثر سـرعت دورانـی و سرعت پیشروی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشـی بـر ارتفاع شکل دهی شده در تست ارتفاع گنبد ورق‌هـای ترکیبـی جوشکاری شده نشان داده شده است.

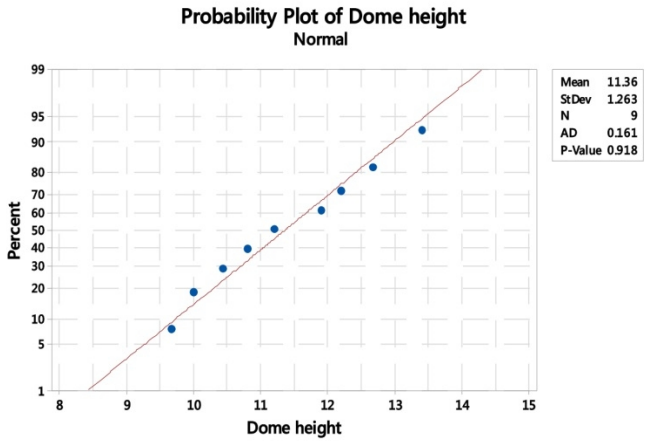


شکل2- قالب آزمون ارتفاع گنبد مورد استفاده در این تحقیق

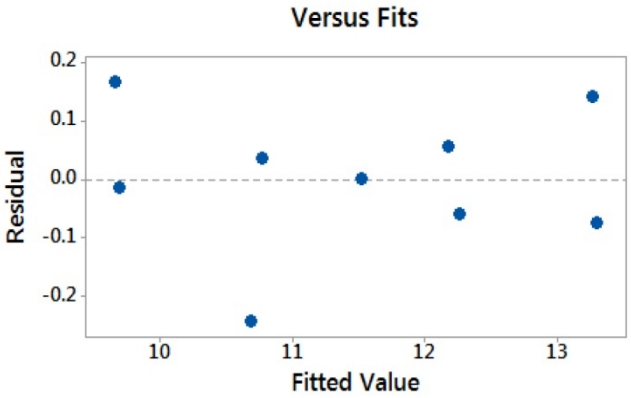


شکل3- نمونه هایی از ورق‌های ترکیبی شکل دهی شده در قالب آزمون ارتفاع گنبد و پارگی های ایجاد شده بر روی آنها

همانطور که از شکل (6) مشخص است با افزایش سرعت دورانی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتفاع ورق ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد و یا به عبارتی شکل‌پذیری آن کاهش می یابد. دلیل این موضوع این است که با افزایش سرعت دورانی ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی حرارت ایجاد شده در محل اتصال بیشتر شده و به دنبال آن نرم شوندگی در محل اتصال و کاهش استحکام جوش ایجاد شده اتفاق می‌افتد. بنابراین در تست ارتفاع گنبد، ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده با سرعت های دورانی بیشتر در ارتفاع کمتری دچار پارگی شده و شکل پذیری کمتری دارند [19]. همچنین از شکل (6) مشاهده می شود با افزایش سرعت پیشروی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتفاع ورق ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد و یا به عبارتی شکل‌پذیری آن افزایش می یابد. دلیل این موضوع اینست که با افزایش سرعت پیشروی ابزار، نرخ سرد شدن افزایش می‌یابد که مانع نرم شدگی در ناحیه متاثر از حرارت می‌شود و به دنبال آن استحکام اتصال ایجاد شده پس از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی افزایش می یابد. بنابراین شکل‌پذیری ورق ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد افزایش می یابد [19]. همچنین در شکل (7)، تاثیر همزمان پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر ارتفاع گنبد در تست ارتفاع گنبد ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده نشان داده شده است.




شکل4- نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده در تحلیل آماری تست ارتفاع گنبد ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده




شکل5- نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده در تحلیل آماری تست ارتفاع گنبد ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]

جدول 2- طراحی آزمایش ها به روش تاگوچی و ارتفاع گنبدهای به دست آمده بر حسب میلیمتر

| شماره نمونه | سرعت دورانی ابزار(دور بر دقیقه) | سرعت پیشروی(میلی متر بر دقیقه) | ارتفاع گنبد(میلی متر) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۲۵۰ | ۸ | ۹/۶۶۹ |
| ۲ | ۱۰۰۰ | ۸ | ۱۰/۸ |
| ۳ | ۸۰۰ | ۸ | ۱۲/۲ |
| ۴ | ۱۲۵۰ | ۱۲ | ۱۰ |
| ۵ | ۱۰۰۰ | ۱۲ | ۱۱/۲ |
| ۶ | ۸۰۰ | ۱۲ | ۱۲/۶۷ |
| ۷ | ۱۲۵۰ | ۲۰ | ۱۰/۴۴ |
| ۸ | ۱۰۰۰ | ۲۰ | ۱۱/۹ |
| ۹ | ۸۰۰ | ۲۰ | ۱۳/۴ |

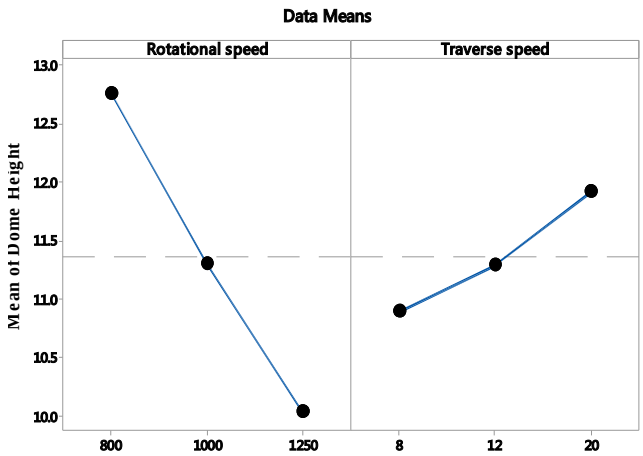
همانطور که از شکل (7) مشاهده می شود با افزایش سرعت پیشروی و کاهش سرعت دورانی شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد بیشتر می شود.

شرایط بهینه با استفاده از روش نسبت سیگنال به نویز بدست می‌آید. اساس این روش یافتن شرایطی است که در آن اثر سیگنال ها (فاکتورهای قابل کنترل) در مقایسه با اثرات نویزها (فاکتورهای غیر قابل کنترل) بیشترین باشد. نوع مسئله بهینه‌سازی برای زاویه خمش، زاویه خمش بزرگ تر می باشد. برای این نوع از مسائل پارامتر نسبت سیگنال به نویز که با $\eta$ نشان داده می شود برای بیشترین ارتفاع گنبد از معادله (2) بدست می‌آید:

$$\eta = -10 \times \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \qquad (2)$$

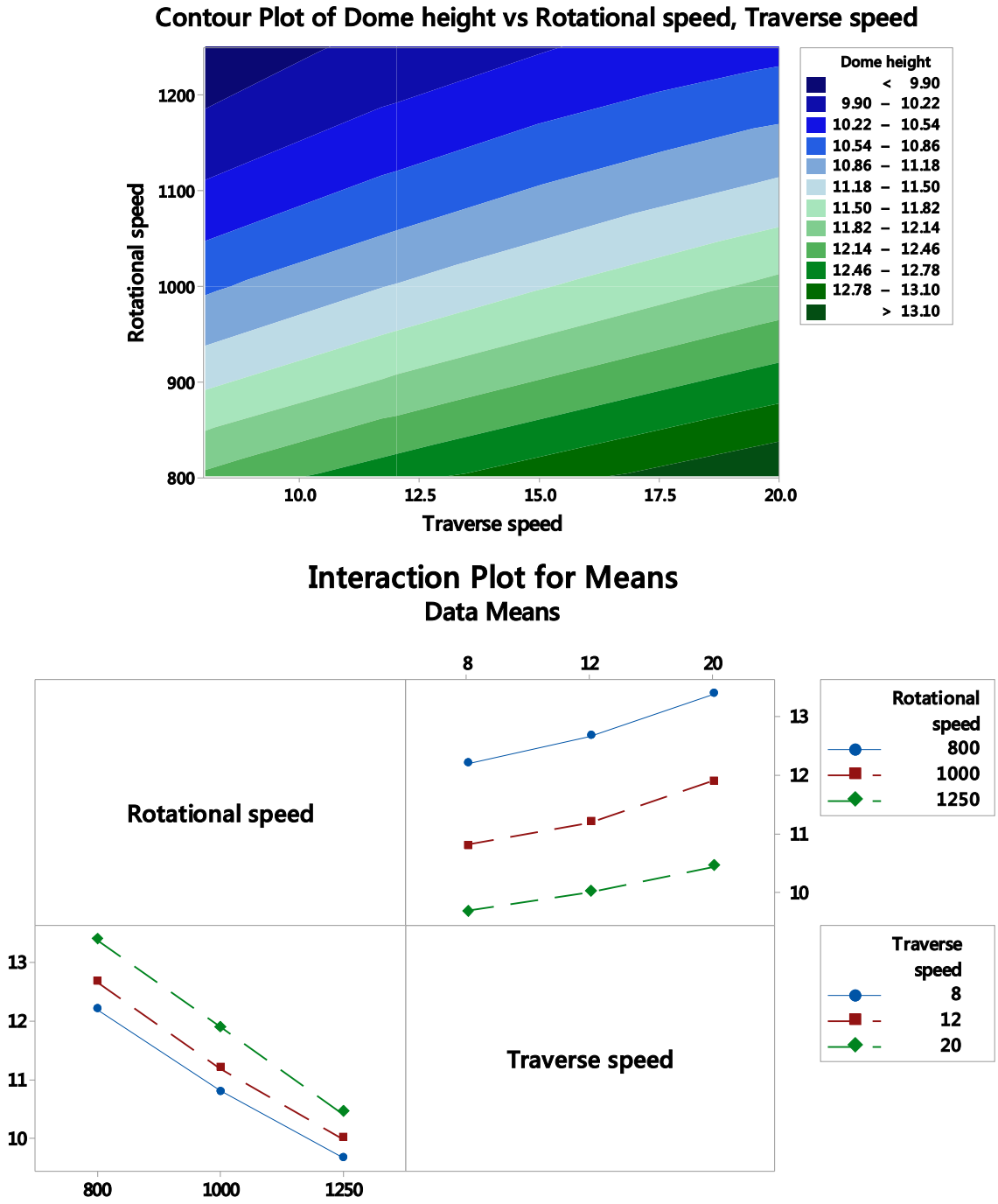
در معادله (2)، $y_i$ مقادیر خروجی و n تعداد تکرارها می‌باشند. $\eta$ برای هر تکرار بدست می آید و سپس برای هر مقدار پارامتر با تعیین میانگین، مقدار $\eta$ مربوط بدست می آید. مقادیر $\eta$ برای ارتفاع گنبد در جدول (4) نشان داده شده اند. مقادیر بزرگ تر $\eta$ نشان دهنده شرایط بهینه هستند.

از جدول (4) نتیجه گرفته می شود که پارامتر سرعت دورانی ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بیشترین تاثیر و پارامتر سرعت پیشروی ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کمترین تاثیر را بر ارتفاع گنبد ورق ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد و در مجموع بر شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده دارد.




شکل6- تاثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ارتفاع شکل دهی شده در تست ارتفاع گنبد ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]




شکل 7- تاثیر همزمان پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر ارتفاع گنبد در تست ارتفاع گنبد ورق‌های ترکیبی جوشکاری

همانطور که در جدول (4) دیده می شود، پارامتر سرعت دورانی ابزار بیشترین مقدار η (2/72) را دارد. ترکیب بهینه برای دستیابی به بیشترین زاویه خمش در جدول (5) ارائه شده است. موثرترین سطح هر فاکتور بر زاویه خمش در این جدول آورده شده است.

## 4- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی شکل پذیری ورق‌های ترکیبی بسیار نازک جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شد. ورق‌های مورد بررسی، فولاد IF با ضخامت 0/7 میلیمتر بودند. بدین منظور تاثیر مهمترین پارامترهای فرایند جوشکاری

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]

جدول3- تحلیل واریانس برای ارتفاع گنبد ورقهای ترکیبی جوشکاری شده

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|---|
| رگرسی‌ون | ۲ | ۱۲/۵۸۳۱ | ۱۲/۵۸۳۱ | ٦/۲۹۱۵ | ۲۰٦/۳٤ | ۰/۰۰۰ |
| سرعت دورانی | ۱ | ۱۰/۹۹٤۰ | ۱۰/۹۹٤۰ | ۱۰/۹۹٤۰ | ۳٦۰/۵٦ | ۰/۰۰۰ |
| سرعت پی‌شروی | ۱ | ۱/۵۸۹۱ | ۱/۵۸۹۱ | ۱/۵۸۹۱ | ۵۲/۱۱ | ۰/۰۰۰ |
| خطای باقی‌مانده | ٦ | ۰/۱۸۳۰ | ۰/۱۸۳۰ | ۰/۰۳۰۵ | | |
| مجموع | ۸ | ۱۲/۷٦٦۰ | | | | |

جدول 4- مقادیر $\eta$ برای ارتفاع گنبد ورق ترکیبی جوشکاری شده

| سطح | سرعت دورانی ابزار در فرآی‌ند جوشکاری | سرعت پی‌شروی ابزار در فرآی‌ند جوشکاری |
|---|---|---|
| ۱ | ۱۲/۷٦ | ۱۰/۸۹ |
| ۲ | ۱۱/۳۰ | ۱۱/۲۹ |
| ۳ | ۱۰/۰٤ | ۱۱/۹۱ |
| Eta | ۲/۷۲ | ۱/۰۲ |

جدول 5- ترکیب پارامترهای بهینه جهت دستیابی به حداکثر زاویه خمش ورق ترکیبی ماشینکاری شده

| سطح | سرعت دورانی ابزار در فرآی‌ند جوشکاری | سرعت پی‌شروی ابزار در فرآی‌ند جوشکاری |
|---|---|---|
| شماره سطح | ۳ | ۱ |
| مقدار فاکتور | ۸۰۰ | ۲۰ |

اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر میزان شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده بررسی گردید. میزان شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری‌شده نیز توسط آزمون ارتفاع گنبد تعیین گردید. به منظـور بررسی جامع و دقیق تر اثر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر میزان شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده از روش طراحی آزمایش های تاگوچی استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دادند که با افزایش سرعت دورانی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتفاع ورق ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد و یا به

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]

عبارتی شکل پذیری آن کاهش می یابد. دلیل این موضوع این است که با افزایش سرعت دورانی ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی حرارت ایجاد شده در محل اتصال بیشتر می شود و به دنبال آن نرم شوندگی در محل اتصال و کاهش استحکام جوش ایجاد شده اتفاق می افتد. همچنین نتیجه گرفته شد که با افزایش سرعت پیشروی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتفاع ورق ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد و یا به عبارتی شکل پذیری آن افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که با افزایش سرعت پیشروی ابزار، نرخ سرد شدن افزایش می‌یابد که این مانع نرم شدگی در ناحیه متاثر از حرارت می شود و به دنبال آن استحکام اتصال ایجاد شده پس از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج بهینه سازی بر مبنای روش نسبت سیگنال به نویز نشان دادند که پارامتر سرعت دورانی ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بیشترین تاثیر را بر ارتفاع گنبد ورق ترکیبی جوشکاری شده در تست ارتفاع گنبد و در مجموع بر شکل پذیری ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده دارد.

## منابع

[1] صفری، م.، مستعان، ح. و بختیاری آ.، "بهینه سازی متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با هدف دستیابی به استحکام شکست بیشینه"، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال 2، شماره 2، ص ص 32 – 48، 1395.

[2] Lakshminarayanan, A K., Balasubramanian, V., "An assessment of microstructure, hardness, tensile and impact strength of friction stir welded ferritic stainless steel joints", Materials & Design, Vol. 31, pp. 4592-4600, 2010.

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

[4] Choi, Y., Heo, Y., Kim, H.Y., Seo, D., "Investigations of weldline movements for the deep drawing process of tailor welded blanks", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 108, pp. 1-7, 2000.

[5] Heo, Y.M., Wang, S.H., Kim, H.Y., Seo, D.G., "The effect of the drawbead dimensions on the weld-line movements in the deep drawing of tailor-welded blanks", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 686-691, 2001.

[6] Abbasi, M., Ketabchi, M., Labudde, T., Prahl, U., Bleck, W., "New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process", Materials & Design, Vol. 40, pp. 407-414, 2012.

[7] Safdarian Korouyeh, R., Moslemi Naein, H., Liaghat, G.H., "Forming limit diagram prediction of tailor-welded blank using experimental and numerical methods", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 21, pp. 2053-2061, 2012.

[8] Fazli, A., "Optimum tailor-welded blank design using deformation path length of boundary nodes", International Journal of Automotive Engineering, Vol. 3, pp. 435-445, 2013.

[9] Song, Y., Hua, L., "Influences of thickness ratio of base sheets on formability of tailor welded blanks", Vol. 81, pp. 730-735, 2014.

[10] Dias, J.S., Chuvas, T.C., Cindra Fonseca, M.D.P., "Evaluation of residual stresses and mechanical properties of IF steel welded joints by laser and plasma processes", Materials Research, Vol. 19, pp. 721-727, 2016.

[11] Kesharwani, R. K., Panda, S. K., Pal, S. K., " Experimental Investigations on Formability of Aluminum Tailor Friction Stir Welded Blanks in Deep Drawing Process", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 24, pp. 1038-1049, 20125.

[12] Parente, M., Safdarian, R., Abel, D., Loureiro, A., Vilaca, P., Natal, R. M, "A study on the formability of aluminum tailor welded blanks produced by friction stir welding", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 83, pp. 2129-2141, 2016.

[13] Entesari, S., Abdollah-Zadeh, A., Habibi, N., Mehri, A., "Experimental and numerical investigations into the failure mechanisms of friction stir welded AA7075-T6 thin sheets", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 29, pp. 74-84, 2017.

[14] Kolahgar, S., Ghaffarpour, M., Habibi, N., Kokabi, A. H., Akbarzadeh, A., "Formability of Friction Stir-Welded Blanks with Different Thickness Ratios", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 47, pp. 2177-2187, 2016.

[15] Habibi, M., Hashemi, R., Fallah Tafti, M., Assempour, A., "Experimental investigation of mechanical properties, formability and forming limit diagrams for tailor-welded blanks produced by friction stir welding", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 31, pp. 310–323, 2018.

[16] Tayebi, P., Fazli, A., Asadi, P., Soltanpour, M., "Formability analysis of dissimilar friction stir welded AA 6061 and AA 5083 blanks by SPIF process", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 25, pp. 50-68, 2019.

[17] Moayedi, H., Darabi, R., Ghabussi, A., Habibi, M., Foong, L. K., "Weld orientation effects on the

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]

formability of tailor welded thin steel sheets", Thin–Walled Structures, Vol. 149, pp. 106669, 2020.
[18] Montgomery, D.C., "Design and Analysis of Experiments": Second Edittion. 2008, New York: John Wiley & Sons.

[19] Alinaghian, I., Ranjbar, H., Beheshtizad, M. A., "Forming Limit Investigation of AA6061 Friction Stir Welded Blank in a Single Point Incremental Forming Process: RSM Approach", Transactions of the Indian Institute of Metals, Vol. 70, pp. 2303–2318, 2017.

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-19 ]