



## Experimental Study of Weld Line Displacement and Drawing Depth in TWBs Steel Sheets Manufactured by Laser and Friction Stir Welding

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Aminzadeh A.<sup>1</sup> MSc,  
Safari A.<sup>1</sup> MSc,  
Parvizi A.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Aminzadeh A, Safari A, Parvizi A. Experimental Study of Weld Line Displacement and Drawing Depth in TWBs Steel Sheets Manufactured by Laser and Friction Stir Welding. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(9): 2183-2192.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran  
Phone: -  
Fax: +98 (21) 61119953  
aliparvizi@ut.ac.ir

#### Article History

Received: November 27, 2018  
Accepted: February 4, 2019  
ePublished: September 01, 2019

### ABSTRACT

Due to higher demands for tailor welded blanks (TWBs) applications in the transportation industry, it is important to understand their forming characteristics in manufacturing processes, especially the deep drawing, in order to produce products with higher qualities. Due to differences between the base materials strength as well as the existence of the welding zone, the formability of TWBs is frequently less than the base metals. The aim of this study is the comparison of weld line displacement and drawing depth in TWBs designed and produced by laser welding and friction stir welding. Laser welding is more appropriate for TWBs production comparing to the other welding processes because of the creation of limited heat affected zone and suitable keyhole. The parameters of the friction stir welding process are very important due to having a high influence on complicated plastic zone variation, the material flow pattern and temperature distribution in TWBs sheets. In this paper, by design experiments, the effect of blank holder force and linear welding velocity on drawing depth and weld line displacement of TWBs have been investigated. Moreover, the harnesses of the weld zone in both processes have been examined. Results show that by increasing the linear velocity of laser welding, the amount of weld line displacement and drawing depth will be increased. Furthermore, the higher linear velocity of friction stir welding will result in the higher weld line displacement and drawing depth. Likewise, the harnesses of the laser welding zone are higher than those ones for friction stir welding zone.

**Keywords** Laser Welding; Friction Stir Welding; Tailor Welded Blanks (TWBs); Weld Line Movement

### CITATION LINKS

[1] A novel forming technology for tailor-welded ... [2] Investigations of weld-line movements for the deep drawing process ... [3] The effect of the drawbead dimensions on the weld-line movements in the deep ... [4] Optimising the variables when deep-drawing ... [5] Wind turbine performance ... [6] A comparison study on the effectiveness of stepped binder and weld line clamping pins on formability ... [7] Superplastically formed friction stir welded tailored aluminum and titanium blanks for ... [8] Tailor made blanks for the aerospace ... [9] New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during ... [10] Forming limit diagram prediction of tailor-welded blank using experimental and ... [11] Optimum tailor-welded blank design using deformation path length ... [12] CO<sub>2</sub> laser welding of interstitial free galvanized steel sheets used in tailor ... [13] Experimental and theoretical investigation of thickness ratio ... [14] Influences of thickness ratio of base sheets on formability ... [15] Evaluation of residual stresses and mechanical properties of IF ... [16] Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor ... [17] Weld line shift in the case of tailor welded blanks subjected to ... [18] Numerical and experimental study of geometrical dimensions on laser-TIG hybrid ... [19] Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in ... [20] Laser-arc hybrid welding of high-strength steel and aluminum alloy joints ... [21] Experimental investigation of formability of Al-1050 ... [22] Welding of automotive aluminum alloys by laser ... [23] Process and outcome comparison between laser, Tungsten Inert Gas (TIG) and laser-TIG hybrid ... [24] Investigation of the capability of hybrid Nd:YAG - TIG welding against Nd:YAG laser welding process ... [25] An investigation on capability of hybrid Nd:YAG laser-TIG ... [26] Influences of laser welding parameters on the geometric profile of NI ... [27] A study on the formability of aluminum tailor welded blanks produced ... [28] Investigation of weld line movement in tailor ... [29] The effects of strength ratio on the forming limit ... [30] Effect of laser welding parameters on forming ... [31] Effect of friction stir welding parameters on the ... [32] Mechanical behaviour of FSW aluminium ...

## مطالعه تجربی جابه‌جایی خط جوش و عمق کشش ورق‌های ترکیبی فولادی تولید شده با روش‌های پرتو لیزر و اصطکاکی اغتشاشی

احمد امین زاده MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

امیر صفری MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

علی پرویزی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

به علت توسعه استفاده از ورق‌های ترکیبی در صنعت حمل‌ونقل، درک رفتار شکل‌پذیری آنها برای تولید محصولات با کیفیت بالا در فرآیندهای شکل‌دهی به‌ویژه کشش عمیق، اهمیت بالایی پیدا کرده است. با توجه به استحکام متفاوت مواد پایه و وجود منطقه جوش، شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی غالباً کمتر از فلزات پایه است. مقایسه جابه‌جایی خط جوش و عمق کشش ورق‌های ترکیبی تولید شده با دو روش جوشکاری لیزر و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، از جمله اهداف این پژوهش است. به علت ایجاد منطقه محدودتر متاثر از حرارت و سوراخ کلیدی مناسب، جوشکاری لیزر نسبت به سایر روش‌های جوشکاری برای تولید این ورق‌ها در اولویت است. پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل تاثیر زیاد بر تغییرات پیچیده ناحیه پلاستیک و متناثر شدن الگوی سیلان ماده و توزیع دما در ورق‌های ترکیبی، بسیار با اهمیت هستند. در این مقاله، با طراحی آزمایش‌های تجربی، تاثیر نیروی ورق‌گیر و سرعت خطی جوشکاری بر عمق کشش و جابه‌جایی خط جوش ورق‌های ترکیبی مورد بررسی شده است. همچنین سختی ناحیه جوش حاصل از این فرآیندها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت خطی جوشکاری لیزر، میزان عمق کشش و جابه‌جایی خط جوش افزایش یافته است. با افزایش سرعت خطی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز میزان جابه‌جایی خط جوش و عمق کشش افزایش یافته است. همچنین سختی ناحیه جوش لیزر بیشتر از سختی ناحیه مربوط به جوش اصطکاکی است.

**کلیدواژه‌ها:** جوشکاری لیزر، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ورق‌های ترکیبی، جابه‌جایی خط جوش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

\*نویسنده مسئول: aliparvizi@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

وسایل نقلیه یکی از مهم‌ترین منابع تولیدکننده دی‌اکسیدکربن در دنیا شناخته شده است. بهترین راهکار برای کاستن از دی‌اکسیدکربن تولیدشده توسط وسایل نقلیه، کاهش وزن آنها است. یکی از روش‌های مبتکرانه برای کاهش وزن سازه‌های حمل و نقل، استفاده از ورق‌های ترکیبی است. استفاده از این نوع ورق‌ها به عبارتی، اجرای تکنیک پدیده گلوله برفی است که اخیراً در بین صنعتگران و دانشگاهیان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پدیده گلوله برفی به فرآیندهایی اطلاق می‌شود که مزیت‌های آنها به صورت زنجیروار افزایش می‌یابد. این فرآیندها می‌توانند تا ۲۵ تا ۳۰٪ وزن کل خودرو را کاهش دهند.

فرآیندهای جوشکاری لیزر و اصطکاکی اغتشاشی از جمله پرکاربردترین فرآیندهای موجود مورد استفاده در تولید قطعات صنعتی هستند. فرآیند جوشکاری با پرتوی لیزری از جمله روش‌های نوین جوشکاری ذوبی است. سرعت و دقت بالای این فرآیند از جمله عواملی است که کاربرد آن را در صنایع مختلف گسترش داده است. با تابش پرتوی پراورده لیزر به سطح قطعه‌کار، حرارت مورد نیاز برای ایجاد حوضچه مذاب و انجام فرآیند اتصال فراهم می‌شود. در واقع این فرآیند، تعادلی بین گرمایش و

سرمایش در یک حجم مشخص از یک یا دو ماده جامد است که منجر به تشکیل ماده مذاب و انجماد آن می‌شود. مشخصه جوشکاری لیزری ایجاد ناحیه مذاب مایع توسط جذب شدت اشعه است که منجر به رشد و گسترش حوضچه مذاب به درون ناحیه فصل مشترک جامد می‌شود. در نتیجه، یک اتصال پیوسته میان اجزایی ایجاد می‌شود که به همدیگر متصل خواهند شد. همچنین جوشکاری اصطکاکی، فرآیندی معمول برای اتصال فلزات و ترموپلاستیک‌ها در صنعت خودروسازی است. این روش شامل همجوشی مواد، بدون ذوب آنها و اغلب با استفاده از گرمای حاصل از اصطکاک و فشار است. گرما در اثر تماس یک قطعه متحرک با یک قطعه ثابت تولید می‌شود و برای ایجاد حالت خمیری در فصل مشترک مواد، مورد استفاده قرار می‌گیرد که در همان حال، اعمال فشار جانبی موجب امتزاج و ایجاد اتصال می‌شود. روش‌های متعددی برای جوشکاری اصطکاکی وجود دارد که به منظور اتصال طیف گسترده‌ای از مواد فلزی و غیرفلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

امکان داشتن یک توزیع متنوع در جنس مواد و خواص هندسی در یک قطعه می‌تواند توزیع بهینه مواد را در آن قطعه فراهم آورد و باعث کاهش چشمگیر وزن و هزینه شود [1]. چوی و همکاران [2] به بررسی حرکت خط جوش ورق‌های ترکیبی در فرآیند کشش عمیق پرداختند. آنها دو نمونه دایره‌ای و مستطیلی شکل از این ورق‌ها را تحت فرآیند کشش عمیق بررسی نمودند. نتایج نشان داد که خط جوش در نمونه دایره‌ای کمتر از نمونه مستطیلی شکل جابه‌جا می‌شود و ایجاد چروکیدگی در نمونه‌های دایره‌ای نسبت به میزان چروکیدگی در نمونه‌های مستطیلی کمتر است. هئو و همکاران [3] تاثیر کنترل نیروی اعمالی ورق‌گیر را در حرکت خط جوش ورق‌های ترکیبی که با استفاده از فرآیند جوشکاری لیزر به یکدیگر متصل شده و تحت فرآیند کشش عمیق قرار داده شده‌اند، به صورت تجربی بررسی کردند. آنها نشان دادند که با اعمال نیروی غیریکنواخت ورق‌گیر به قسمت‌های مختلف ورق می‌توان حرکت خط جوش را کنترل کرد.

برون و همکاران [4] با استفاده از روش‌های تجربی به بررسی تاثیر پارامترهای شعاع سنبه، شعاع ماتریس، روانکاری، نیروی ورق‌گیر و سرعت سنبه بر توزیع ضخامت و ماکزیمم نیروی شکل‌دهی پرداختند. آنها با انجام این فرآیند به یک حالت بهینه از پارامترهای فوق به منظور کاهش نیروی شکل‌دهی و توزیع یکنواخت ضخامت دست پیدا کردند. پادمانایهان و همکاران [5] فرآیند کشش عمیق ورق‌های ترکیبی ایجادشده از دو فلز آلومینیوم و فولاد را مورد بررسی قرار دادند. آنها از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای بررسی میزان شکل‌پذیری استفاده کردند و تاثیر پارامترهای این روش را بر میزان عمق کشش مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با ترکیب این دو فلز، میزان شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. چن و همکاران [6] تاثیر ورق‌گیر پله‌دار و پین‌های نگه‌دارنده خط جوش بر شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی را با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی بررسی کردند. آنها گزارش دادند که استفاده از ورق‌گیر پله‌دار به کاهش پدیده چروکیدگی کمک کرده و استفاده هم‌زمان از ورق‌گیر پله‌دار و پین‌های نگه‌دارنده، بهترین اثر را در بهبود شکل‌پذیری محصول داشته است.

ساندرز و همکاران [7] با استفاده از روش شکل‌دهی سوپرپلاستیک برای ورق‌های ترکیبی تیتانیوم و آلومینیوم تولیدشده با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، موفق به کاهش قابل توجهی از وزن یک هواپیمای بوئینگ شدند. سینک و همکاران [8] با استفاده از بررسی

نتایج آنها نشان داد که انحراف خط جوش در جوش لیزر کمتر از جوش تیگ است، ولی عمق کشش در جوش تیگ بیشتر از جوش لیزر است. مرادی و همکاران<sup>[18]</sup> تأثیر ابعاد هندسی برای فولاد ضدزنگ در جوشکاری ترکیبی تیگ و لیزر را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آنها از یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود به‌منظور شبیه‌سازی عددی فرآیند استفاده کردند. سپس با انجام آزمایش‌های تجربی، نتایج حاصل از این مدل را تأیید کردند. مهم‌ترین عامل تأثیرگذار روی ابعاد بستر جوش، رسانایی ماده بود. دیاز و همکاران<sup>[15]</sup> به بررسی تفاوت‌های سختی و خواص مکانیکی دو نوع فرآیند جوشکاری لیزر و پلاسما پرداختند. آنها با انجام آزمایش‌های مختلف و نیز اندازه‌گیری تنش پسماند در دو راستای ضخامت و سطح، هر دو نمونه را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که ورق‌های ترکیبی تولیدشده با استفاده از روش جوشکاری لیزر دارای سختی بیشتر است و خواص مکانیکی مطلوب‌تری نسبت به جوشکاری پلاسما دارد.

مرادی و همکاران<sup>[19]</sup> تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را روی اتصال دو آلیاژ غیرمشابه آلومینیوم بررسی کردند. آنها تأثیر سرعت خطی ابزار و سرعت چرخشی را روی ریزساختار، میکروساختار و خواص مکانیکی اتصال‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد که در نسبت‌های سرعت چرخشی به خطی بالاتر از ۴۰ دور بر میلی‌متر، اثر سرعت تغییر شکل و در نسبت‌های کمتر، اثر دما بر اندازه دانه منطقه اغتشاشی، غالب است. وانگ و همکاران<sup>[20]</sup> روش جوشکاری قوس لیزر هیبریدی برای اتصال آلیاژ فولاد و آلومینیوم توسط پرکننده برنجی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی این اتصالات تحت تأثیر گرمای نسبی ورودی دو منبع حرارتی و لایه روی-مس تشکیل‌شده در ریزساختار است. همچنین حداکثر بار برشی اتصال جوشکاری‌شده، با ایجاد این لایه حدود ۲۰٪ افزایش یافته بود. عبدالله و همکاران<sup>[21]</sup> به بررسی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی پرداختند. آنها از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و ورق‌های آلومینیوم سری هزار با ضخامت‌های مختلف استفاده کردند. پس از کشش عمیق نمونه‌ها، با توجه به نسبت حد ضخامت و خواص مکانیکی به‌دست‌آمده، پارامترهای بهینه جوشکاری را تعیین نمودند.

باربیری و همکاران<sup>[22]</sup> با روش تجربی، پارامترهای تأثیرگذار در جوش لیزر آلومینیوم را در فرآیند تولید ورق‌های ترکیبی با ضخامت متغیر بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که در اتصالات لب‌به‌لب، تمایل به شکست در مواد پایه ورق با ضخامت کوچک‌تر بیشتر است. همچنین در لبه مفاصل برجسته، حالت پارگی در منطقه تحت تأثیر حرارت از ورق نازک رخ می‌دهد. مرادی و همکاران<sup>[23]</sup>، جوشکاری ترکیبی لیزر و تیگ را با جوشکاری لیزر جوشکاری تیگ مقایسه کردند. آنها بهینه‌ترین فاصله بین دو منبع حرارتی جوشکاری قوس لیزر هیبریدی را انتخاب کردند. همچنین تأثیر حرارت ورودی بر هندسه جوش را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که نفوذ جوشکاری ترکیبی ۵ برابر بیشتر از جوشکاری لیزر و ۲ برابر بیشتر از جوشکاری تیگ است. فرجی و همکاران<sup>[24]</sup> توانایی جوشکاری ترکیبی لیزر-ان‌دی‌یگ-تیگ در مقابل جوشکاری لیزر به‌تنهایی در پل‌های ساندویچی فوم آلومینیوم را مقایسه کردند. آنها همچنین تأثیر پارامترهای جوشکاری را بر ابعاد جوش بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در جوشکاری ترکیبی لیزر-قوس، آستانه توان لیزر مورد نیاز برای تشکیل حفره کلید، نسبت به جوشکاری لیزر کمتر است.

فرجی و همکاران<sup>[25]</sup> توانایی جوشکاری لیزر قوسی هیبریدی در

تجربی، شکل‌پذیری و میزان برگشت فنری ورق‌های ترکیبی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، میزان برگشت فنری را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. عباسی و همکاران<sup>[9]</sup> میزان چروکیدگی دیواره ظروف تولیدشده در فرآیند کشش عمیق ورق‌های ترکیبی را به‌روش عددی و تجربی مورد تحلیل قرار دادند. آنها نشان دادند که امواج چروکیدگی، تنها در ناحیه نازک‌تر به وجود می‌آید و چروکیدگی با توسعه سه موج شروع می‌شود. همچنین با افزایش میزان جابه‌جایی، مقدار این چروکیدگی بیشتر خواهد شد.

صفریان و همکاران<sup>[10]</sup> نشان دادند که معیار مشتق دوم نازک‌شدگی از دقت خوبی برای پیش‌بینی حرکت خط جوش و حد شکل‌دهی در ورق‌های ترکیبی برخوردار است. آنها بیان کردند که ناهمسان‌گردی مواد، اثر مهمی بر شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی دارد. همچنین مدل معیار حداکثر نیروی پانچ، بهترین دقت برای پیش‌بینی ارتفاع کشش را دارد، ولی برای پیش‌بینی حد کشش، فاقد دقت و صحت لازم است. فضل و همکاران<sup>[11]</sup> با استفاده از روش‌های المان محدود، شکل اولیه مناسب و بهینه ورق‌های جوش‌خورده به هم را مورد بررسی قرار دادند. 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. حمیدی‌نژاد و همکاران<sup>[12]</sup> براساس مدلی ریاضی، اثر فرآیند جوشکاری لیزر روی فولاد را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با استفاده از نتایج آزمون کشش، شاخص‌های ارزیابی کیفیت اتصالات انجام‌شده به‌وسیله جوش لیزر را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این، سه پارامتر مهم در فرآیند جوشکاری لیزر، قدرت لیزر، سرعت جوشکاری و موقعیت کانونی را به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار در این فرآیند لحاظ نمودند.

صفریان و همکاران<sup>[13]</sup> با انجام آزمون خمش سه نقطه در راستاهای مختلف و ترکیبی از شش گروه از ضخامت‌ها و جنس‌های متفاوت، خط جوش را بررسی کردند. آنها با رسم نمودارهای نیرو-جابه‌جایی به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در جابه‌جایی خط جوش و همچنین تأثیر زاویه خط جوش بر خواص مکانیکی و انرژی جذب‌شده پرداختند. سوگ و همکاران<sup>[14]</sup> با انجام آزمایش تجربی برای نسبت ضخامت‌های متفاوت در ورق‌های ترکیبی و همچنین استفاده از یک فرمول تجربی برای شبیه‌سازی ناحیه جوشکاری‌شده، شروع شکست ورق را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که با کاهش نسبت ضخامت‌ها، پارگی به تعویق خواهد افتاد و عمق کشش بیشتری را گزارش کردند. دیاز و همکاران<sup>[15]</sup> تأثیر نیروی ورق‌گیر روی نسبت کشش در کشش عمیق را بررسی کردند. آنها شبیه‌سازی را توسط نرم‌افزار انجام دادند و نیروی ورق‌گیر مناسب را به دست آوردند. بندویپاده‌یای و همکاران<sup>[16]</sup> نتیجه گرفتند که کرنش موضعی و تقسیم نابه‌هنگام در مجاورت ناحیه خارجی متأثر از جوش، یکی از عوامل بحرانی در قابلیت شکل‌پذیری جوش لیزر مواد دوفازی در حین کشیدگی است. هدف این گروه، ارزیابی محدودیت نسبت کشش در ورق‌های ترکیبی تولید بود. این نسبت را با استفاده از آزمایش برای سه جنس مختلف به‌صورت دوجه‌دو بررسی کردند و بیشترین ارتفاع کشش را به دست آوردند.

مرادی و همکاران<sup>[17]</sup> با بررسی حرکت خط جوش در دو فرآیند جوشکاری لیزر و جوشکاری تیگ به مقایسه این دو فرآیند در تولید ورق‌های ترکیبی غیرهم‌جنس پرداختند. همچنین میزان شکل‌پذیری ورق‌های تولیدشده با این دو روش را بررسی کردند.

قرار دادند. در این تحقیق، روش طراحی آزمایش تاگوچی به‌منظور طراحی آزمایش و به‌دست‌آوردن سهم درصدی عوامل در نظر گرفته شده است. تست شکل‌پذیری /ریکسون و آزمون کششی برای مقایسه نتایج پارامترهای جوشکاری مختلف در کیفیت فرمولاسیون ورق‌های ترکیبی استفاده شده است.

صفدریان و همکاران<sup>[31]</sup> پارامترهای سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و افست ابزار با سطوح مختلف در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های ترکیبی مس و آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. جوشکاری اصطکاکی با سرعت چرخش ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ دور در دقیقه، سرعت پیشروی ابزار ۴۰ تا ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و افست ابزار از یک تا ۲ میلی‌متر انجام شده است. نتایج نشان داد استفاده از پارامترهای اصطکاکی باعث تشکیل لایه‌های بین‌فلزی نازک و توقف حرکت نابه‌جایی در آزمون کشش شده و سبب افزایش مقاومت کششی بالاتر و بهبود کیفیت اتصال شده است.

در این مقاله، با طراحی آزمایش‌های تجربی، تأثیر نیروی ورق‌گیر و سرعت خطی جوشکاری لیزر و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر میزان عمق کشش و جابه‌جایی خط جوش ورق‌های ترکیبی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سختی ناحیه جوش حاصل از این دو فرآیند نیز اندازه‌گیری و مقایسه شده است. تحقیقات انجام‌شده در زمینه تأثیر جابه‌جایی خط جوش ایجادشده و ارزیابی میزان عمق کشش در قطعات تولیدی با استفاده از این ورق‌های ترکیبی بسیار محدود هستند. اغلب تحقیقات در زمینه ساخت و کاربرد این ورق‌ها، محدود به ارائه روابط نظری و تجربی در ارتباط با حرکت خط جوش بعد از فرآیند شکل‌دهی است. لذا، هدف و علت انجام این پژوهش، وجود خلأ محسوس در بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر تأثیر نوع فرآیند و پارامترهای جوشکاری و همچنین پارامترهای فرآیند کشش عمیق بر میزان جابه‌جایی خط جوش و عمق کشش در محصولات تولیدی است. نوآوری این پژوهش، بررسی امکان ترکیب روش‌های جوشکاری لیزر و اصطکاکی اغتشاشی با روش شکل‌دهی برای ایجاد ورق‌های ترکیبی غیرهمجنس است. نتایج این پژوهش در ساختارهایی کاربرد خواهد داشت که تحت تأثیر انواع تنش‌های خستگی و حرارتی بوده و به‌روش فرآیند کشش عمیق تولید شده‌اند.

## ۲- نمونه‌سازی تجربی

ابتدا با استفاده از یک دستگاه فرز کنترل عددی چهارمحوره، ورق‌هایی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و از جنس فولاد (St14-St44-TPP) و به ضخامت یک میلی‌متر به‌صورت کاملاً مشابه، برش داده شدند. سپس براساس استاندارد ASTM E8، نمونه‌های آزمون کشش برای بررسی خواص مکانیکی در سه راستای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه از هر ورق به‌صورت جداگانه جدا شده است. دستگاه مورد استفاده در آزمون کشش از نوع یونیورسال است. آزمون کشش تک‌محوره با نرخ کرنش ۰.۱ بر ثانیه انجام گرفته است. خواص مکانیکی به‌دست‌آمده از آزمون کشش برای ورق‌های فولادی استفاده‌شده در این مقاله، در جدول ۱ بیان شده است. همچنین جدول ۲، ترکیب شیمیایی آلیاژهای فولادی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

مقایسه با جوشکاری لیزر را برای آلومینیوم بررسی کردند. در این تحقیق، یک لیزر پیوسته با حداکثر توان ۲۰۰۰ وات و یک قوس الکتریکی ۳۵۰ آمپر به‌عنوان دو منبع حرارت جوش مشترک استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که در جوشکاری لیزر، حالت هدایت اتفاق می‌افتد و سوراخ کلیدی حتی در سرعت‌های جوش پایین نیز شکل نمی‌گیرد و در نتیجه عمق نفوذ بسیار کم است. همچنین، آنها دریافتند که رویکرد دوم (قدرت لیزری بالا همراه با انرژی کم قوس) نسبت به اولین رویکرد (قدرت لیزری کم همراه با انرژی قوس بالا) در جوشکاری لیزر قوسی، برتر است. زیرا حرارت ورودی پایین برای جوشکاری با نفوذ کامل مورد نیاز است و در نتیجه منطقه متأثر از دمای کوچک‌تر ایجاد خواهد شد. مرادی و همکاران<sup>[26]</sup> پارامترهای جوشکاری با لیزر اتوژن لیفتینگ سوپرآلیاژ پایه نیکل را با استفاده از یک لیزر دوبعدی ۲.۲ کیلووات دی‌اکسیدکربن مورد بررسی قرار دادند. این آزمایش‌ها براساس روش سطح پاسخ به‌عنوان یک طرح آماری از رویکرد آزمایشی به‌منظور بررسی اثر پارامترها بر تغییرات پاسخ، دستیابی به معادلات ریاضی و پیش‌بینی نتایج جدید انجام شده است. نتایج تجزیه و تحلیل توسط تکنیک‌های آماری نشان داد که پروفیل جوشکاری تحت تأثیر پارامترهای گرمای لیزر و پارامترهای فرآیند ورودی قرار گرفته است. سرعت جوش به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در جوشکاری لیزر در این آزمایش، اثری معکوس بر خروجی‌های فرآیند خواهد داشت. فشار گاز بی‌اثر یک پارامتر مهم است و فشار گاز بالاتر باعث نقص‌های هندسی جوشکاری می‌شود.

پرنز و همکاران<sup>[27]</sup> یک مطالعه تجربی برای ورق‌های ترکیبی تولیدشده توسط جوشکاری اصطکاکی با صفحات نازک آلومینیوم را ارائه دادند. آنها عملکرد سازگاری با به‌دست‌آوردن منحنی‌های محدود شکل‌پذیری با استفاده از عرض‌های مختلف خالی را مورد بررسی قرار دادند. خواص جوش آلیاژی با ضخامت یک میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفته و شکل‌پذیری آن نسبت به مواد پایه مقایسه شده است. نتایج بیانگر وابستگی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی در جهت خط جوش و نیز کاهش شکل‌پذیری آلیاژ جوش در مقایسه با مواد پایه بود. صفدریان و همکاران<sup>[28]</sup> با ارائه یک مدل تحلیلی، جابه‌جایی خط جوش در ورق‌های ترکیبی را مورد بررسی قرار دادند. این معیار نشان می‌دهد نسبت حد استحکام و نسبت ضخامت برای تشکیل حد شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد هنگامی که نسبت ضخامت یا نسبت استحکام در ورق ترکیبی بزرگ‌تر از مقدار حدی باشد، حرکت جوش خط افزایش خواهد یافت و باعث کاهش شکل‌پذیری خواهد شد.

صفدریان<sup>[29]</sup> تأثیرات نسبت استحکام روی شکل‌پذیری و حد شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی را مورد مطالعه قرار گرفته است. ورق‌های فولادی با ضخامت یک میلی‌متر برای ساخت این ورق‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. یافته‌های تجربی این پژوهش نشان داد که نسبت استحکام می‌تواند بر موقعیت شکست در محصولات ترکیبی اثر بگذارد. صفدریان و همکاران<sup>[30]</sup> تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر بر رفتار شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی را مورد بررسی

جدول ۱) خواص مکانیکی فولادهای St14-St44-TPP

خواص مکانیکی در جهات مختلف (واحد)	صفدرجه St14 (۴۵ درجه)	صفدرجه St44 (۴۵ درجه)	صفدرجه TPP (۴۵ درجه)	صفدرجه St14 (۴۵ درجه)	صفدرجه St44 (۴۵ درجه)	صفدرجه TPP (۴۵ درجه)
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	۲۴۰	۲۸۰	۲۷۰	۳۰۰	۲۸۰	۲۷۰
تنش نهایی (مگاپاسکال)	۳۵۰	۴۱۰	۵۲۰	۵۰۰	۵۲۰	۵۲۰
مدول الاستیک (گیگاپاسکال)	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۷۸۰۰	۷۸۰۰	۷۸۰۰	۷۸۰۰	۷۸۰۰	۷۸۰۰
ضریب پواسون	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳



شکل ۲) ستاپ‌های جوشکاری لیزر و اصطکاکی اغتشاشی

امروزه جوشکاری لیزر یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های تولید ورق‌های ترکیبی در صنایع خودروسازی است. این فرآیند توسط دستگاه پیشرفته جوشکاری لیزر پالسی با حداکثر توان جوشکاری ۷۰۰ وات و با استفاده از گاز محافظ انجام شده است. در این پژوهش، انرژی پالس ۱۸ ژول، پهنای پالس ۱۸ میلی‌متر، موقعیت کانونی ۳۰ میلی‌متر، قطر پرتوی لیزر ۷ میلی‌متر، سرعت روبشی ۲ میلی‌متر بر ثانیه و قله توان ۱۰۰۵۵ کیلووات بوده که برای تمام نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، روشی جدید برای اتصال ورق‌های ترکیبی است. نحوه مونتاژ و دمونتاز ابزار استفاده‌شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در شکل ۳ نشان داده شده است. نحوه ثابت‌کردن حرکت دورانی این ابزار با استفاده از یک پین تعبیه‌شده در بدنه آن است. جنس این ابزار نیز تنگستن کارباید است.

پس از آماده‌سازی نمونه‌های جوشکاری‌شده، سنبه و ماتریس در نرم‌افزار کتیا طراحی شده و قالب کشش مورد نظر ساخته شده است. شکل ۴، سنبه و ماتریس قالب کشش عمیق را نشان می‌دهد. سپس نمونه‌ها در قالب‌های کشش عمیق قرار داده شده‌اند. پارامترهای ورودی فرآیند طبق جداول طراحی آزمایش، تنظیم و آزمایش‌ها انجام شده است. فرآیند کشش عمیق در دستگاه پرس مولر با سرعت ۶۶ میلی‌متر بر ثانیه و با تناژ ۳۱۵ تن انجام شده است.

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری حرکت و جابه‌جایی خط جوش از تکنیک عکس‌برداری و نرم‌افزار شبیه‌سازی کتیا استفاده شده است. روش کار بدین صورت است که کولیس به اندازه معین باز و در کنار قطعه قرار داده شده است. سپس توسط دوربینی که در فاصله معین از قطعه قرار دارد از نمونه عکس گرفته شده و عکس در نرم‌افزار کتیا وارد شده است. با در نظر گرفتن اندازه واقعی کولیس و مقدار اندازه‌گیری شده، یک ضریب تصحیح به دست آورده می‌شود و با استفاده از این ضریب تصحیح، مقدار جابه‌جایی خط جوش به دست آمده است. همچنین برای اندازه‌گیری عمق کشش نمونه‌ها از کولیس ارتفاع‌سنج استفاده شده که در شکل ۵ نشان داده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌های جوشکاری‌شده، سنبه و ماتریس در نرم‌افزار کتیا طراحی شده و قالب کشش مورد نظر ساخته شده است. سپس نمونه‌ها در قالب‌های کشش عمیق قرار داده شده‌اند. پارامترهای ورودی فرآیند طبق جداول طراحی آزمایش، تنظیم و آزمایش‌ها انجام شده است.

جدول ۲) ترکیب شیمیایی فولادهای St14-St44-TPP

نوع و درصد عناصر آلیاژی	آلومینیوم	کربن	نیترژن	سیلیسیم	منیزیم	فسفر	گوگرد
St14	۰.۲	۰.۰۸	-	-	-	-	-
St44	-	۰.۲۱	۰.۰۰۹	۰.۰۵	۱.۶	۰.۰۴	۰.۰۴
TPP	-	۰.۱	۰.۰۷	-	-	-	-

صافی سطح بالا در فرآیندهای جوشکاری، برای دستیابی به نفوذ کافی بین دو ماده بسیار مهم است، لذا ورق‌های خارج‌شده از مرحله ماشین‌کاری، ابتدا به خوبی سنباده‌زنی و پولیش شده و سپس توسط محلول استون به خوبی شست‌وشو شده‌اند تا چربی‌ها و آلودگی‌های موجود در سطح مقطع برش کاملاً تمیز شوند. شکل ۱، آماده‌سازی سطح نمونه‌های بریده‌شده توسط محلول استون را نشان می‌دهد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، با توجه به جداول طراحی آزمایش، نمونه‌ها دسته‌بندی شدند. سپس با تنظیم پارامترهای مورد نظر، عملیات جوشکاری با استفاده از دو روش لیزر و اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. پارامترهای طراحی آزمایش‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. شکل ۲، ستاپ‌های این دو روش جوشکاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱) آماده‌سازی سطح نمونه‌های بریده‌شده توسط استون

جدول ۳) جدول طراحی آزمایش نمونه‌های جوشکاری لیزر

انرژی پالس (ژول)	فرکانس (هرتز)	سرعت خطی (میلی‌متر بر ثانیه)	توان (وات)	نیروی ورق‌گیر (ن)	جنس نمونه	کد نمونه
۱۸	۲۰	۱۰	۲۰۰	۱۵	St14-TPP	A'
۱۸	۲۰	۸	۲۰۰	۱۵	St14-TPP	B'
۱۸	۲۰	۸	۲۰۰	۱۵	St14-St44	C'
۱۸	۲۰	۱۰	۲۰۰	۱۵	St14-St44	D'

جدول ۴) جدول طراحی آزمایش نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی

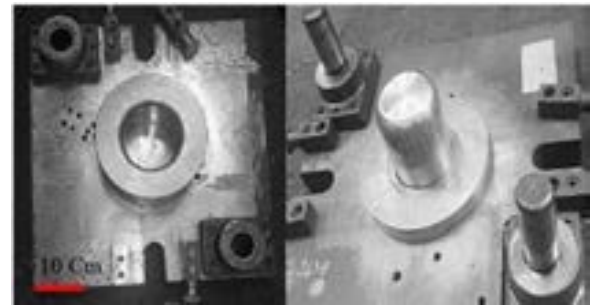
زاویه ابزار (درجه)	نیروی عمودی (کیلو نیوتن)	سرعت خطی (میلی‌متر بر دقیقه)	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	نیروی ورق‌گیر (ن)	جنس نمونه	کد نمونه
۳	۵.۲	۶۰	۱۲۰۰	۱۰	St14-TPP	A
۳	۵.۲	۸۰	۱۲۰۰	۱۵	St14-St44	B
۳	۵.۲	۵۰	۱۲۰۰	۱۰	St14-TPP	C
۳	۵.۲	۶۰	۱۲۰۰	۱۵	St14-St44	D

۳- بحث و نتایج

نمونه‌های نهایی جوشکاری شده به روش لیزر و اصطکاکی اغتشاشی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. یکی از معایب مخرب و پارامترهای بحرانی در شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی، جابه‌جایی و حرکت خط جوش از موقعیت اصلی خود پس از انجام فرآیند کشش عمیق است. تخمین میزان جابه‌جایی خط جوش، تأثیر مستقیمی روی تخمین شکل‌پذیری ورق خواهد داشت. جابه‌جایی خط جوش باعث تغییر در کرنش پلاستیک ناحیه اتصال و به دنبال آن ایجاد یک ناحیه مستعد برای شروع شکست خواهد بود. کنترل این میزان جابه‌جایی با استفاده از پارامترهایی نظیر اصطکاک، نیروی ورق‌گیر، کیفیت خط جوش و غیره انجام می‌شود. جابه‌جایی خط جوش پس از کشش عمیق برای نمونه‌های جوشکاری لیزر و اصطکاکی اغتشاشی به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. جدول‌های ۵ و ۶ نیز مقادیر عمق کشش و جابه‌جایی خط جوش را نشان می‌دهند.



شکل ۳) مونتاژ و دمو نتاژ ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



شکل ۴) سنبه و ماتریس قالب کشش عمیق



شکل ۶) نمونه‌های نهایی جوشکاری لیزر



شکل ۵) اندازه‌گیری عمق کشش نمونه‌ها



شکل ۷) نمونه‌های نهایی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



A'



C'



B'



D'

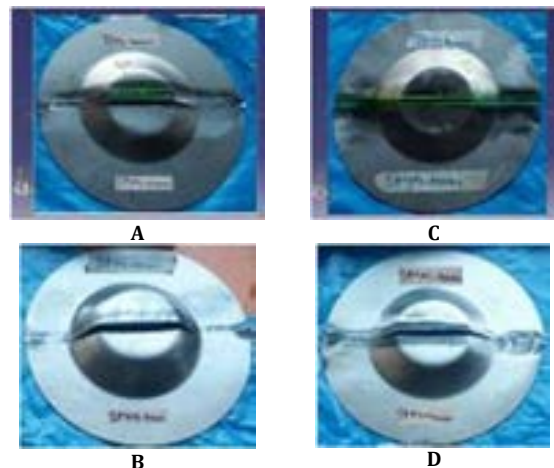
شکل ۸) جابه‌جایی خط جوش نمونه‌های جوشکاری لیزر

در این مقاله، برای سختی‌سنجی نمونه‌ها از آزمون سختی راکول استفاده شده است. دلیل پذیرش عمومی این آزمایش، قابلیت تشخیص تغییرات کوچک سختی در فولاد سخت‌شده، سرعت آن، کوچک بودن اندازه فرورفتگی، عدم امکان بروز خطا از طرف اپراتور و عدم صدمه دیدن قطعات است. این آزمون‌ها تحت شرایط استاندارد آزمایشگاهی انجام گرفته‌اند. ابتدا یک نیروی اولیه ۱۰ کیلوگرم با استفاده از نفوذکننده به نمونه وارد می‌شود که سبب نفوذ اولیه شده و نفوذکننده در مکان نگه داشته شده و صفحه نمایش روی عدد صفر تنظیم شده است. سپس بار اضافی برای رسیدن به تمام بار مورد نیاز آزمون اعمال می‌شود. این نیرو برای مدت زمان از پیش تعیین شده (زمان ماندگاری) نگه داشته می‌شود تا اجازه بازگشت الاستیک وجود داشته باشد. در این مقاله مدت زمان ماندگاری ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. با استفاده از جدول تبدیل سختی استاندارد، مقدار سختی راکول برای نیروی اعمال شده، قطر نفوذکننده و عمق نفوذ اندازه‌گیری شده است. نمونه‌های مورد آزمون به صورتی انتخاب شده‌اند که هم تأثیر پارامترهای جوشکاری و هم تأثیر نوع فرآیندهای جوشکاری مورد ارزیابی قرار داده شوند. پس از اندازه‌گیری سختی در هر ناحیه از جوش، تبدیل‌های سختی انجام شده و سختی راکول به سختی معادل برینل و سپس سختی ویکرز تبدیل و بازنویسی شده است.

جوشکاری لیزر، جنس نمونه‌ها بر میزان جابه‌جایی خط جوش و افزایش عمق کشش تأثیر دارد. افزایش سرعت لیزر همراه با نیروی ورق‌گیر زیاد، موجب پارگی از ناحیه جوش در اتصال St14-TPP شده است. در همه نمونه‌ها به‌علت تفاوت استحکام دو فلز پایه، حرکت خط جوش به سمت فلز با استحکام تسلیم بالاتر رخ داده است. با افزایش سرعت جوشکاری، مقدار عمق کشش و میزان جابه‌جایی خط جوش در نمونه‌ها افزایش یافته است. زیرا با افزایش سرعت جوشکاری، جوش کیفیت بهتری داشته و عمق کشش افزایش یافته است، البته باید توجه داشت که میزان افزایش عمق کشش باعث افزایش مقدار جابه‌جایی خط جوش نیز خواهد شد. افزایش بیش از اندازه این پارامتر باعث ایجاد چروکیدگی در ناحیه فلنج می‌شود. لذا در صورتی افزایش سرعت جوشکاری در کشش عمیق ورق‌های ترکیبی مفید خواهد بود که برای کنترل جابه‌جایی خط جوش نیز استراتژی مشخصی را اتخاذ کرد. همچنین با افزایش سرعت جوشکاری، سرعت سرد شدن ناحیه جوش بیشتر می‌شود. این مقدار سرعت، دارای یک حالت بهینه است که عبور از این مقدار باعث ترد شدن بیش از حد ناحیه جوش ورق‌ها و تفاوت ساختار متالورژیکی بین دو منطقه متأثر از حرارت و منطقه نفوذ می‌شود. در نتیجه، افزایش تنش‌های محلی در این ناحیه موجب رشد ترک و شکست از ناحیه متأثر از حرارت خواهد شد.

با توجه به جدول ۴، نمونه‌های A و C و نمونه‌های B و D مربوط به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، با سرعت خطی متفاوت و در شرایط یکسان ارزیابی شده‌اند. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهند که میزان عمق کشش در نمونه A بیشتر از نمونه C و در نمونه B بیشتر از نمونه D است. با افزایش ۱۰ درصدی سرعت خطی، عمق کشش حدود ۱۲٪ افزایش یافته است. همچنین با افزایش ۳۳ درصدی سرعت خطی، عمق کشش حدود ۳۲٪ افزایش یافته است. زیرا با افزایش سرعت خطی، سرعت سرد شدن مذاب افزایش یافته و باعث تشکیل فاز سخت‌تر شده است. این تغییر در نهایت باعث افزایش سختی ناحیه جوش و در نتیجه افزایش عمق کشش می‌شود. در نمونه A، حرکت خط جوش به سمت فلز با استحکام تسلیم بالاتر رخ داده که همین اتفاق در نمونه C نیز رخ داده است. دلیل این پدیده، تنش سیلان پایین فلز با استحکام کمتر است و خط جوش به سمت فلز با استحکام بالاتر حرکت می‌کند [25]. جابه‌جایی خط جوش در نمونه A بیشتر از C است. با افزایش ۱۰ درصدی سرعت خطی، جابه‌جایی خط جوش حدود ۳۴٪ افزایش یافته است. پس با افزایش سرعت خطی، جابه‌جایی خط جوش نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر، کاهش امکان نفوذ و در نتیجه کاهش کیفیت جوشکاری است. این جابه‌جایی باعث می‌شود تا قطعات تولیدی در این نواحی به‌علت ایجاد کرنش‌های پلاستیک محلی بیشتر، مستعد شکست و پارگی باشند. کنترل این پارامتر به پیش‌بینی ناحیه شکست در قطعات تولید شده کمک بسزایی خواهد کرد [32]. در مورد نمونه‌های A و C، باید توجه داشت که جابه‌جایی خط جوش بیشتر و نیروی ورق‌گیر کمتر، باعث ایجاد چروکیدگی در ناحیه فلنج ورق‌ها شده است.

در نمونه‌های B و D، پارگی اتصال از ناحیه جوش رخ داده است. نیروی ورق‌گیر در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های A و C افزایش یافته است. با افزایش نیروی ورق‌گیر، میزان جابه‌جایی خط جوش کاهش یافته است، زیرا افزایش نیروی ورق‌گیر، به‌دلیل افزایش اصطکاک بین ورق با اجزای قالب از نفوذ ورق به داخل حفره قالب جلوگیری می‌کند. لذا این افزایش اصطکاک باعث می‌شود جریان



شکل ۹) جابه‌جایی خط جوش نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی

جدول ۵) نتایج کشش عمیق نمونه‌های جوشکاری لیزر

کد نمونه	عمق کشش (میلی‌متر)	جابه‌جایی خط جوش (میلی‌متر)
A'	۲۴.۶۲	جدایش از ناحیه جوش (پارگی از ناحیه جوش)
B'	۲۱.۹۵	۴.۰۵
C'	۲۲.۵	۳.۳۳
D'	۲۶.۳۱	۱۲.۶۱

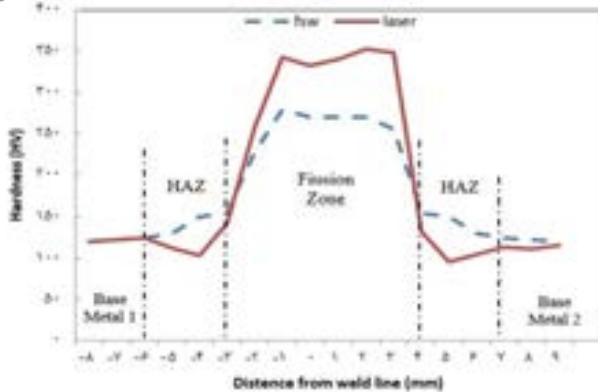
جدول ۶) نتایج کشش عمیق نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی

کد نمونه	عمق کشش (میلی‌متر)	جابه‌جایی خط جوش (میلی‌متر)
A	۱۷.۲	۸.۳۷
B	۲۰.۳۵	جدایش از ناحیه جوش (پارگی از ناحیه جوش)
C	۱۵.۳۱	۶.۲۳
D	۱۵.۴۵	جدایش از ناحیه جوش (پارگی از ناحیه جوش)

پس از انجام فرآیند کشش عمیق، با توجه به تنش‌های اعمالی، خط جوش از موقعیت اصلی خود به یک سمت منحرف می‌شود. جابه‌جایی خط جوش را می‌توان براساس ماهیت تنش در ورق توجیه کرد. عامل مؤثر در جابه‌جایی خط جوش، مؤلفه‌های تنش است که عمود بر خط جوش اعمال می‌شود. به‌دلیل اینکه در طول خط جوش، تنش‌های کششی در مرکز از دیواره بیشتر است، پس میزان حرکت خط جوش از دیواره‌ها به سمت مرکز ورق افزایش می‌یابد. همچنین از آنجایی که تنش در ناحیه فلنج از نوع فشاری است، لذا خط جوش به سمت ماده نازک‌تر حرکت می‌کند [13].

با توجه به جدول ۳، نمونه‌های A' و B' و نمونه‌های C' و D' مربوط به روش جوشکاری لیزر، با سرعت متفاوت و در شرایط یکسان ارزیابی شده‌اند. نتایج جدول ۵ بیان می‌کنند که میزان عمق کشش در نمونه A' بیشتر از نمونه B' و در نمونه D' بیشتر از نمونه C' است. با افزایش ۲۵ درصدی سرعت جوشکاری در اتصال St14-TPP، عمق کشش حدود ۱۲٪ افزایش یافته است. با افزایش ۲۵ درصدی سرعت در اتصال St14-St44، عمق کشش حدود ۱۷٪ افزایش یافته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش سرعت جوشکاری در اتصال St14-TPP، پارگی از ناحیه جوش رخ داده، در حالی که مقدار جابه‌جایی خط جوش در نمونه D' نسبت به نمونه C' افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. با افزایش ۲۵ درصدی سرعت جوشکاری در اتصال St14-St44، جابه‌جایی خط جوش حدود ۴ برابر است.

نتایج فوق نشان می‌دهد که با افزایش سرعت خطی در روش



نمودار ۱) مقایسه سختی جوشکاری لیزر و اصطکاکی اغتشاشی

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- با در نظر گرفتن جنس و نیروی ورق گیر یکسان، عمق کشش برای نمونه‌های حاصل از روش جوشکاری لیزر حدود ۲۹٪ بیشتر از نمونه‌های حاصل از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. همچنین با توجه به جابه‌جایی خط جوش، روش جوشکاری لیزر نتایج بهتری را به دست می‌دهد.

۲- با افزایش ۲۵ درصدی سرعت جوشکاری لیزر در اتصال St14-TPP، عمق کشش حدود ۱۲٪ افزایش یافته است. با افزایش ۲۵ درصدی سرعت در اتصال St14-St44، عمق کشش حدود ۱۷٪ افزایش یافته و جابه‌جایی خط جوش حدود ۴ برابر شده است.

۳- با افزایش ۱۰ و ۳۳ درصدی سرعت خطی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، عمق کشش به ترتیب حدود ۱۲ و ۳۲٪ و جابه‌جایی خط جوش حدود ۳۴٪ افزایش یافته است.

۴- سختی ناحیه جوش لیزر بیشتر از سختی ناحیه مربوط به جوش اصطکاکی است.

۵- با افزایش نیروی ورق‌گیر نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تا محدوده ۱۵ اثن و در نتیجه، کاهش میزان جابه‌جایی خط جوش، پارگی بیشتر و چروکیدگی کمتری در ناحیه فلنج ورق‌ها مشاهده شده است. در حالی که با کاهش نیروی ورق‌گیر به حدود ۱۰ اثن، چروکیدگی بیشتری ایجاد شده است.

۶- در نمونه‌های جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی، جدایش و شکست از ناحیه جوش بوده است. در نتیجه در کشش عمیق نمونه‌های جوشکاری شده با این روش، طراحی اتصال ناحیه جوش باید با ضریب اطمینان بیشتری انجام شود.

۷- به دلیل اعمال کرنش‌های شدید مکانیکی و حرارتی به قطعه در حالت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در مواقعی که ضخامت ورق‌های ترکیبی کم باشد، نمونه در ناحیه جوش ضعیف‌تر می‌شود. بنابراین استفاده از جوشکاری لیزر در حالت ورق‌های با ضخامت کم، نتیجه مطلوب‌تری دارد. زیرا سوراخ کلیدی در جوشکاری لیزر راحت‌تر اتفاق می‌افتد و جوش، کیفیت مطلوب‌تری خواهد داشت.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**سهم نویسندگان:** احمد امین‌زاده (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ امیر صفری (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۲۵٪)؛ علی پرویزی (نویسنده سوم)، تحلیلگر آماری (۲۵٪)

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

مواد به داخل حفره کاهش یابد. همچنین با افزایش نیروی ورق‌گیر، تنش اعمال‌شده به ورق باعث افزایش تنش سیلان می‌شود و به دنبال آن عمق کشش نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به جدول‌های ۳ و ۶، نمونه‌های C' و D' از جوشکاری لیزر و نمونه‌های B و D از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با جنس و نیروی ورق‌گیر یکسان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که عمق کشش برای نمونه‌های حاصل از روش جوشکاری لیزر، حدود ۲۹٪ بیشتر از نمونه‌های حاصل از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. همچنین با توجه به جابه‌جایی خط جوش، روش جوشکاری لیزر نتایج بهتری را به دست می‌دهد. البته در نمونه‌های جوشکاری شده با این روش، جدایش و شکست از ناحیه جوش نیز وجود دارد. در نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی علی‌رغم عمق کشش کمتر، جدایش و شکست بیشتر از ناحیه جوش بوده است. در نتیجه در کشش عمیق نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی، طراحی اتصال ناحیه جوش باید با ضریب اطمینان بیشتری انجام شود. به دلیل اعمال کرنش‌های شدید مکانیکی و حرارتی به قطعه در حالت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در مواقعی که ضخامت ورق‌های ترکیبی کم باشد، نمونه در ناحیه جوش ضعیف‌تر می‌شود. بنابراین استفاده از جوشکاری لیزر در حالت ورق‌های با ضخامت کم، نتیجه مطلوب‌تری دارد. علاوه بر این در ورق‌های با ضخامت کم، سوراخ کلیدی در جوشکاری لیزر راحت‌تر اتفاق می‌افتد و جوش، کیفیت مطلوب‌تری خواهد داشت.

در جوشکاری لیزر، شکل‌گیری سوراخ کلیدی، باعث بیشتر شدن نسبت عمق به پهنای جوش و همچنین منجر به باریک شدن منطقه متأثر از حرارت جوش در مقایسه با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده است. شکل حوضچه جوش به وسیله سرعت حرکت نازل روی قطعه‌کار و سرعت از دست‌دادن حرارت در فصل مشترک جامد و مایع کنترل می‌شود. به عبارت دیگر، برای حفظ شکل ثابتی در مورد حوضچه جوش، بایستی سرعت ذوب با سرعت انجماد از طریق کنترل سرعت حرکت نازل و نرخ سرد شدن، متوازن شود. در غیراین صورت، شکل حوضچه تغییر خواهد کرد و در مرحله شکل‌دهی ورق‌ها به شدت آسیب‌پذیر خواهند شد. چون سرعت جوشکاری در روش لیزر بالا بوده، پارامتر زمان که از پیش‌نیازهای رشد دانه است نیز کمتر می‌شود. رشد دانه به دو عامل زمان و دما وابسته بوده که در لیزر با کاهش این دو عامل، فرصت برای رشد دانه بسیار کم است. پس در نتیجه، منطقه متأثر از حرارت کوچکی تشکیل خواهد شد.

نمودار نتایج سختی‌سنجی نمونه‌های جوشکاری شده توسط روش‌های لیزر و اصطکاکی اغتشاشی، برحسب سختی ویکرز نسبت به فاصله از خط جوش به صورت مقایسه‌ای در نمودار ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی ناحیه جوش لیزر بیشتر از سختی ناحیه مربوط به جوش اصطکاکی است. این به دلیل سرعت بالای انجام فرآیند جوشکاری لیزر است که باعث افزایش سرعت سرد شدن و به وجود آمدن فازهای سخت‌تر نسبت به فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌شود. همچنین می‌توان مشاهده کرد که سختی منطقه متأثر از حرارت در فرآیند جوشکاری لیزر به مراتب کمتر از ناحیه فلز پایه است. دلیل این اتفاق، ایجاد یک ناحیه نرم‌شدگی در منطقه متأثر از حرارت است که به علت اختلاف گرادیان دمایی بالا در فرآیند، این ناحیه دچار یک نوع عملیات حرارتی آنیل موضعی می‌شود.



G. Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;217:48-64.

17- Satya Suresh VVN, Regalla SP, Gupta AK, Padmanabham G. Weld line shift in the case of tailor welded blanks subjected to differential strengths with respect to TIG and laser welding. *Materials Today Proceedings*. 2015;2(4-5):3501-3510.

18- Moradi M, Ghoreishi M, Rahmani A. Numerical and experimental study of geometrical dimensions on laser-TIG hybrid welding of stainless steel 1.4418. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*. 2016;5(2):21-31.

19- Moradi MM, Jamshidi Aval H, Jamaati R. Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(9):394-402. [Persian]

20- Wang H, Feng B, Song G, Liu L. Laser-arc hybrid welding of high-strength steel and aluminum alloy joints with brass filler. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018;33(7):735-742.

21- Abdullah ME, Abdel-Magied RK, Elsheikh MN. Experimental investigation of formability of Al-1050 tailor-welded blanks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;89(1-4):791-801.

22- Barbieri G, Cognini F, Moncada M, Rinaldi A, Lapi G. Welding of automotive aluminum alloys by laser wobbling processing. *Materials Science Forum*. 2017;879:1057-1062.

23- Moradi M, Ghoreishi M, Khorram A. Process and outcome comparison between laser, Tungsten Inert Gas (TIG) and laser-TIG hybrid welding. *Lasers in Engineering Old City Publishing*. 2018;39(3-6):379-391.

24- Faraji AH, Goodarzi M, Seyedein SH, Maletta C. Investigation of the capability of hybrid Nd:YAG - TIG welding against Nd:YAG laser welding process for aluminum foam sandwich panels. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(11):349-356. [Persian]

25- Faraji AH, Moradi M, Goodarzi M, Colucci P, Maletta C. An investigation on capability of hybrid Nd:YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy. *Optics and Lasers in Engineering*. 2017;96:1-6.

26- Moradi M, Ghoreishi M. Influences of laser welding parameters on the geometric profile of Ni-base superalloy Rene 80 weld-bead. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;55(1-4):205-215.

27- Parente M, Safdarian R, Santos AD, Loureiro A, Vilaca P, Natal Jorge RM. A study on the formability of aluminum tailor welded blanks produced by friction stir welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;83(9-12):2129-2141.

28- Safdarian Korouyeh R, Moslemi Naeini H, Liaghat GH, Kasaei MM. Investigation of weld line movement in tailor welded blank forming. *Advanced Materials Research*. 2012;445:39-44.

29- Safdarian R. The effects of strength ratio on the forming limit diagram of tailor-welded blanks. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018;45(1):17-24.

30- Safdarian Korouyeh R, Moslemi Naeini H, Torkamany MJ, Sabaghzadee J. Effect of laser welding parameters on forming behavior of tailor welded blanks. *Advanced Materials Research*. 2012;445:406-411.

1- Kinsey B, Liu Z, Cao J. A novel forming technology for tailor-welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;99(1-3):145-153.

2- Choi Y, Heo Y, Kim HY, Seo D. Investigations of weld-line movements for the deep drawing process of tailor welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;108(1):1-7.

3- Heo YM, Wang SH, Kim HY, Seo DG. The effect of the drawbead dimensions on the weld-line movements in the deep drawing of tailor-welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;113(1-3):686-691.

4- Browne MT, Hillery MT. Optimising the variables when deep-drawing C.R.1 cups. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;136(1-3):64-71.

5- Padmanabhan R, Baptista AJ, Oliveira MC, Menezes LF. Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tailor-welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;184(1-3):288-293.

6- Chen W, Lin GS, Hu SJ. A comparison study on the effectiveness of stepped binder and weld line clamping pins on formability improvement for tailor-welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;207(1-3):204-210.

7- Sanders D, Edwards P, Grant G, Ramulu M, Reynolds A. Superplastically formed friction stir welded tailored aluminum and titanium blanks for aerospace applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19(4):515-520.

8- Sinke J, Zadpoor AA, Benedictus R. Tailor made blanks for the aerospace industry. In: Kinsey BL, Wu X, editors. *Tailor welded blanks for advanced manufacturing*. Cambridge UK: Woodhead Publishing; 2011. pp. 181-201.

9- Abbasi M, Ketabchi M, Labudde T, Prael U, Bleck W. New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process. *Materials & Design*. 2012;40:407-414.

10- Safdarian Korouyeh R, Moslemi Naeini H, Liaghat GH. Forming limit diagram prediction of tailor-welded blank using experimental and numerical methods. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012;21(10):2053-2061.

11- Fazli A. Optimum tailor-welded blank design using deformation path length of boundary nodes. *International Journal of Automotive Engineering*. 2013;3(2):435-445.

12- Hamidinejad SM, Hasanniya MH, Salari N, Valizadeh E. CO<sub>2</sub> laser welding of interstitial free galvanized steel sheets used in tailor welded blanks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;64(1-4):195-206.

13- Safdarian Korouyeh R, Moslemi Naeini H, Torkamany MJ, Liaghat GH. Experimental and theoretical investigation of thickness ratio effect on the formability of tailor welded blank. *Optics & Laser Technology*. 2013;51:24-31.

14- Song Y, Hua L. Influences of thickness ratio of base sheets on formability of tailor welded blanks. *Procedia Engineering*. 2014;81:730-735.

15- Dias JS, Chuvas TC, Cindra Fonseca MDP. Evaluation of residual stresses and mechanical properties of IF steel welded joints by laser and plasma processes. *Materials Research*. 2016;19(3):721-727.

16- Bandyopadhyay K, Panda SK, Saha P, Padmanabham

Chaparro BM, Antunes JM, Vilaça P, Rodrigues DM, Loureiro A. Mechanical behaviour of FSW aluminium tailored blanks. *Materials Science Forum*. 2008;587-588:961-965.

31- Safdarian R, Habibian Tavan O. Effect of friction stir welding parameters on the ultimate tensile strength of Al-Cu tailor welded blanks. *Iranian Journal of Materials Forming*. 2018;5(2):84-95.32- Leal RM,