



ساخت ورق ترکیبی غیر هم ضخامت از فولاد با پلاستیسیته القایی حاصل از استحاله و فولاد دوفازی به روش جوش لیزر

امیرحسین بامداد، رامین هاشمی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: rhashemi@iust.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از دو فولاد استحکام بالای پیشرفته با کمینه استحکام نهایی ۹۸۰ مگاپاسکال اقدام به ساخت و ارزیابی خواص مکانیکی ورق‌های ترکیبی به روش اتصال لب‌به‌لب به کمک جوش لیزر فایبر شده است. ورق ترکیبی غیرهمجنس و غیرهم‌ضخامت از فولاد دوفازی DP980 و فولاد تریپ با خاصیت پلاستیسیته ناشی از استحاله فازی TRIP980 به ترتیب با ضخامت‌های ۲ و ۱.۸ میلی‌متر ساخته شد. در ساخت ورق ترکیبی و اتصال ورق‌های پایه، پارامترهای توان، سرعت و فرکانس جوشکاری به عنوان متغیرهای مؤثر بر جوش در نظر گرفته شده است که با بهره از طراحی آزمایش مناسب و آزمون اریکسون کیفیت اتصالات ارزیابی شد. برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و پوشش مناسب فضای پارامتری از آرایه تاگوچی سه عامل L9 (سه سطح) استفاده شد. معیار پذیرش اتصال برای ورق‌های ترکیبی، عدم بازشدگی ناحیه جوش و یا ناحیه متأثر از حرارت و شروع ترک و وقوع شکست از ورق‌های پایه تحت کرنش دو محوره پس از آزمون اریکسون تعیین گردید. پس از تعیین مشخصات بهینه در اتصال جوش، نمونه انتخاب شده تحت آزمون‌های کشش تک‌محوره، میکروسختی سنجی و متالوگرافی نوری قرار داده شد. نتایج نشان می‌دهد مجموعه پارامترهای توان ۱.۵ کیلووات، سرعت ۱۸ میلی‌متر بر ثانیه در فرکانس ۱۸ هرتز بهترین ترکیب عملکرد مکانیکی و کیفیت آلیاژی جوش را تولید کرده است. همچنین منطقه جوش به دلیل تشکیل ساختار مارتنزیت سختی بالاتری نسبت به فلزات پایه نشان داده است و شکست در آزمون کشش تک‌محوره در سمت فولاد تریپ رخ داده است که نشان‌دهنده استحکام بالای جوش نسبت به استحکام ورق‌های پایه است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۶ اسفند ۱۴۰۴

پذیرش: ۱۹ تیر ۱۴۰۵

کلیدواژگان:

ورق ترکیبی غیرهمجنس و غیرهم‌ضخامت

فولاد دوفازی DP980

رفتار مکانیکی

طراحی آزمایش

آزمون اریکسون

Manufacturing of tailor-welded blanks with dissimilar thicknesses using TRIP and DP steels via laser beam welding

Amirhossein Bamdad, Ramin Hashemi*

Schools of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: rhashemi@iust.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 25 February 2025

Accepted: 10 July 2026

Keywords:

Dissimilar Tailor-Welded Blank

DP980 Dual-Phase Steel

Mechanical Properties

Design of Experiments

Erichsen Test

Abstract

This research focuses on the fabrication and mechanical characterization of dissimilar tailor-welded blanks produced from two advanced high-strength steels with a minimum ultimate tensile strength of 980 MPa. Sheets of DP980 and TRIP980 steels with thicknesses of 2 mm and 1.8 mm, respectively, were joined by fiber laser butt welding. The primary process variables affecting joint quality including laser power, welding speed and pulse frequency were systematically investigated using a Taguchi L9 orthogonal array to optimize joint performance. Joint acceptability was established based on the requirement that neither crack initiation nor separation occur within the fusion or heat-affected zone; failure had to initiate in the base material under biaxial loading. Once the optimal welding parameters had been established, selected tailor welded blanks were further characterized through a series of mechanical and microstructural evaluations, including uniaxial tensile testing, microhardness measurements and optical metallographic analysis. The results demonstrated that the parameter combination of 1.5 kW, 18 mm/s, and 18 Hz produced the highest joint quality. The weld zone showed increased hardness due to martensitic transformation, and tensile fracture occurred in the TRIP sheet, demonstrating that the weld region possessed higher strength than the base metals.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Bamdad A, Hashemi R. Manufacturing of tailor-welded blanks with dissimilar thicknesses using TRIP and DP steels via laser beam welding. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2026 Jan 21;12(11):33-45. doi: 10.22034/ijme.2026.578088.2169 [In Persian]

۱- مقدمه

با افزایش روزافزون مصرف سوخت همراه با کاهش منابع سوختی و نیز افزایش آگاهی عمومی نسبت به الزامات زیست محیطی جدید با هدف کاهش انتشار دی اکسید کربن، صنعت خودروسازی را بر آن داشته است تا خودروهای سبک وزن با استحکام و قابلیت جذب انرژی مناسب در شرایط تصادف توسعه دهد. نیاز به کاهش وزن بدون به خطر انداختن ایمنی خودرو، این صنعت را به سمت استفاده از مواد جدید با نسبت استحکام به وزن بالا برای ساخت بدنه خودرو سوق داده است. با وجود رقابت مواد مختلف برای پاسخگویی به نیازهای صنعت خودرو، فولادهای پر استحکام پیشرفته^۱ به طور محسوسی برتری یافته اند [۱، ۲]. این فولادها به دلیل وزن کمتر همراه با استحکام بالا، ضمن کاهش وزن خودرو و در نتیجه کاهش مصرف سوخت، به واسطه سختی و شکل پذیری بالا، ایمنی سرنشینان را نیز تضمین می کنند [۳، ۴].

فولادهای پیشرفته پر استحکام، ازدیاد طول بیشتری نسبت به فولادهای سنتی با سطوح مقاومت مشابه که از روش های محلول جامد، رسوب گذاری و سخت شوندگی در ریزساختار خود بهره می برند، نشان می دهند. فولادهای پر استحکام پیشرفته مخصوصاً برای قطعاتی که عملکرد ضربه پذیری بالایی نیاز دارند، مناسب هستند. فاز فریت با جذب انرژی در نرخ کرنش های بالا سبب می شود که شکل پذیری این خانواده از فولادها افزایش یافته و به تبع انتخاب مناسب تری برای تولید اشکال پیچیده نسبت به فولادهای نسل های پیشین خود باشند [۵، ۶].

ورق های ترکیبی که در آن ها دو یا چند ورق فلزی غیرهمجنس با استفاده از فرایند جوشکاری مناسب به هم متصل می شوند، روشی شناخته شده برای به کارگیری ورق های پر استحکام پیشرفته در قطعات خودرو هستند [۷، ۸]. این ورق ها می توانند از نظر ضخامت، ترکیب شیمیایی، پوشش و خواص متفاوت باشند [۹]. استفاده از ورق های ترکیبی امکان توزیع مناسب مواد در نواحی مختلف بسته به نیازهای طراحی را فراهم می کند و مزایای دیگری نظیر کاهش هزینه، دقت ابعادی بالا و کاهش ضایعات نیز دارد [۱۰، ۱۱]. صنعت خودروسازی برای تولید و مونتاژ بدنه و سایر اجزای خودرو اغلب از روش های مختلف جوش استفاده می کند. در میان متداول ترین روش های جوشکاری، جوش لیزر به دلیل مزایایی نظیر قابلیت شکل پذیری بسیار خوب، ناحیه تحت تأثیر حرارت باریک و سهولت انجام جوش جایگاه برجسته ای یافته است [۱۱، ۱۲].

تاکنون پژوهش های متعددی بر روی تأثیر جوش لیزر بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای پر استحکام پیشرفته انجام شده است. نایاک و همکاران [۱۳] اثر حجم فاز مارتنزیت و بازپخت بر رفتار نرم شوندگی فولادهای دوفازی متفاوت را بررسی کردند. نرم شوندگی در ناحیه متأثر از حرارت^۲ به دلیل تمرکز کرنش بالا در این ناحیه، شکل پذیری ورق های ترکیبی را کاهش داده و موجب شکست زودرس می شود. این پدیده در فولادهای دوفازی به دلیل بازپخت فاز مارتنزیت نسبت داده شده است. در تحقیقی مشابه توسط فارابی و همکاران [۱۴] روی فولادهای دوفازی DP600 شکست در ناحیه متأثر از حرارت را به دلیل افت سختی و کاهش استحکام این ناحیه نشان داده شده است. این گروه با بررسی ورق ترکیبی^۳ DP600-DP980 نشان دادند که بر اثر جوش لیزر، ناحیه ذوب بسیار سخت و با استحکام بالا منجر به کاهش شکل پذیری ورق ترکیبی شد [۱۵]. دنگ و همکاران [۱۶] با مطالعه اثرات پارامترهای لیزر بر روی مشخصات مکانیکی و میکرو ساختارهای فولاد دوفازی DP980 نشان دادند که درصد ازدیاد طول با افزایش توان تابش لیزر رابطه مستقیم داشته است. از سوی دیگر با تغییر سرعت جوشکاری تأثیر محسوسی بر میزان ازدیاد طول نمونه ها مشاهده نشده است. همچنین در این مقاله، با بررسی میکرو ساختار ناحیه متأثر از حرارت جوش و مقایسه با فلز پایه سختی در ناحیه متأثر از حرارت با ۲۳٪ افزایش نسبت به فلز پایه در حدود ۴۱۲ ویکرز مشاهده شده است. در تحقیقاتی دیگر بر روی ورق های ترکیبی فولادی دوفازی غیرهمجنس ساخته شده به کمک جوش لیزر گزارش شده است که ناهمگنی خواص در عرض ناحیه جوش منجر به مشکلات دهی و شکست زود هنگام در آزمون های مکانیکی می شود. دنگ و همکاران [۱۷] در مطالعه ورق های ترکیبی با اتصالات غیرهمجنس DP780-DP980 شکست را در سمت فولاد DP780 مشاهده نمودند. همچنین کاهش میزان شکل پذیری ورق ترکیبی نسبت به ورق های پایه نیز نشان داده شده است. این موضوع نیز در تحقیقی بر روی اتصالات لیزری ورق های ناهمسان دوفازی DP780-DP1180 توسط گونگ و همکاران [۱۸] مشاهده شده است.

¹ Advanced High Strength Steel

² Heat Effected Zone (HAZ)

³ Tailor Welded Blank

ریزساختار حوضچه مذاب^۱ در جوشکاری لیزری فولادهای پر استحکام پیشرفته عمدتاً مارتزیتی است که ناشی از تشکیل آستنیت در حین جوشکاری و نرخ‌های سرد شدن بالا است. ریزساختار و خواص اتصالات لیزری به‌طور اساسی به پارامترهای جوشکاری و نوع لیزر وابسته است [۱۹، ۲۰].

در تحقیقی دیگر اثر پارامترهای مود پالس جوش لیزر نظیر قدرت، مدت‌زمان هر پالس و نرخ تکرار پالس‌ها بر مشخصه‌های مکانیکی یک ورق ضخیم ۱/۶ میلی‌متری 22MnB5 حاوی فولاد بوردار گزارش شده است [۲۱].

در مطالعه‌ای بر روی ورق‌های ترکیبی ساخته شده به روش جوش لیزر با گاز دی‌اکسید کربن و از ورق‌های فولادی دوفازی DP600 و DP800 با ضخامت‌های متفاوت مشاهده شده است که حوضچه مذاب این ورق‌های ترکیبی کاملاً مارتزیتی بوده و نرخ سرد شدن و توان لیزر، شکل فاز مارتزیت و عرض ناحیه متأثر از حرارت را کنترل می‌کنند. همچنین در این مقاله نشان داده شد که سرعت جوشکاری اثر بیشتری نسبت به توان لیزر بر استحکام ورق‌های ترکیبی دارد. در آزمون‌های انجام شده، محل شکست ورق‌های ترکیبی به نسبت ضخامت و تفاوت استحکام ورق‌های پایه بستگی دارد [۲۲].

فی و همکاران [۲۳] برای بهبود خواص مکانیکی جوش لیزر فولادهای فوق استحکام بالا 22MnB5 با پوشش آلومینیوم-سیلیسیومی در عوض حذف پوشش، از سیم جوش‌های آلیاژی مختلف برای کنترل ریزساختار نواحی جوش استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیم جوش حاوی نیکل با کاهش جدایش آلومینیوم و حذف فاز فریت دلتا منجر به تشکیل ریزساختار متراکمی در ورق‌های این فولادها می‌شود. در این بررسی خواص مکانیکی، افزایش استحکام ۵۰٪ و افزایش سختی ناحیه اتصال ۲۶٪ در ورق‌های ترکیبی مشاهده شده است.

میرزالو و همکاران [۲۴] اثرات پارامتری جوش لیزر را در اتصالات جوش نقطه‌ای لیزر ورق‌های استیل ضدزنگ ۳۱۶ بررسی نمودند. با بهره‌گیری از طراحی آزمون تاگوچی^۲ L9 نشان دادند که با افزایش توان لیزر قطر سطح دکمه جوش کاهش یافته و استحکام جوش نقطه‌ای ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش یافته است. همچنین افزایش زمان روشنی پالس و فرکانس لیزر منجر به افزایش استحکام جوش‌های نقطه‌ای در فولاد استیل ضدزنگ می‌شود.

مروان و همکاران [۲۵] در مقاله‌ای بر روی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای پر استحکام پیشرفته TRIP800 و DP600 با ضخامت‌های متفاوت و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند با روش تاگوچی نشان دادند که زمان جوشکاری مهم‌ترین عامل مؤثر بر استحکام و جذب انرژی اتصال است و پارامترهای بهینه پیش‌بینی شده با نتایج تجربی استحکام جوش تطابق نزدیکی دارند.

در این مقاله، فرایند تولید ورق‌های ترکیبی از فولادهای پر استحکام پیشرفته DP980 و TRIP980 برای اولین بار به‌وسیله جوشکاری لیزری بررسی شده و نقش پارامترهای توان، فرکانس و سرعت لیزر در تعیین کیفیت اتصال مورد ارزیابی قرار گرفت. عمده تحقیقات پیشین در حوزه ساخت ورق‌های ترکیبی بر جوش فولادهای هم ضخامت و هم جنس تمرکز داشته‌اند. درحالی‌که در این مقاله ورق‌های ترکیبی ساخته و مطالعه شده هم‌زمان از نظر جنس و ضخامت ناهمسان هستند که باعث ایجاد چالش‌هایی نظیر بحث‌های ترمومکانیکی ناشی از اختلاف ضخامت و ریزساختار (ایجاد گرادیان حرارتی نامتقارن) می‌شود که برای دستیابی به ترکیب بهینه‌ای از عوامل مؤثر در فرایند جوش لیزر از طراحی آزمایش تاگوچی L9 استفاده شده و اتصال بهینه حاصله، مبنای تحلیل‌های مکانیکی و ریزساختاری قرار گرفته است.

در پیشینه پژوهش ورق‌های فولاد استحکام بالای پیشرفته، به‌ندرت فولاد استحاله فازی گرید TRIP980 بررسی شده است و غال با ورق‌های ترکیبی ساخته شده از فولادهای خانواده دوفازی و TRIP780 بوده است. به همین علت برای تبیین ارتباط میان شرایط فرایند و پاسخ مکانیکی اتصال دو ورق DP980 و TRIP980، استحکام اتصال و شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی با آزمون‌های اریکسون^۳ و کشش تک‌محوره سنجیده شده است. در ادامه، با مشخصه‌یابی ناحیه جوش توسط آزمون میکرو سختی و مشاهدات میکروسکوپ نوری تغییرات موضعی اتصال ورق‌های دوفازی و تریپ به‌طور دقیق روشن گردید.

هدف این مقاله ارائه چارچوبی تجربی برای تعیین پارامترهای بهینه جوش لیزر و ارتقای عملکرد ورق‌های ترکیبی غیر هم‌جنس و غیر هم ضخامت از فولادهای پر استحکام پیشرفته است.

^۱ Fuzion Zone (FZ)

^۲ Taguchi Method

^۳ Erichsen Test

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

ورق ترکیبی مورد بررسی در این مقاله از دو فولاد پر استحکام پیشرفته دوفازی و تریپ ساخته شده است. فولاد دوفازی DP980 با ضخامت ۲ میلی‌متر از ریزساختار دوفازی جزایر مارتنزیتی در زمینه فریتی تشکیل شده که امکان شکل‌پذیری خوب (به دلیل فاز فریت) با افزایش استحکام (به دلیل فاز مارتنزیت) را فراهم می‌کنند. فولاد تریپ TRIP980 با ضخامت ۱/۸ میلی‌متر بود که شامل ریزساختار فریت، باینیت و آستنیت باقیمانده است. وجود فاز آستنیت باقی‌مانده و امکان تبدیل آن به فاز مارتنزیت در حین تغییر شکل پلاستیک، قابلیت شکل‌پذیری مضاعف را برای این فولادها فراهم می‌کند. ترکیب شیمیایی عناصر هر آلیاژ در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق‌های پایه استفاده شده در ورق ترکیبی

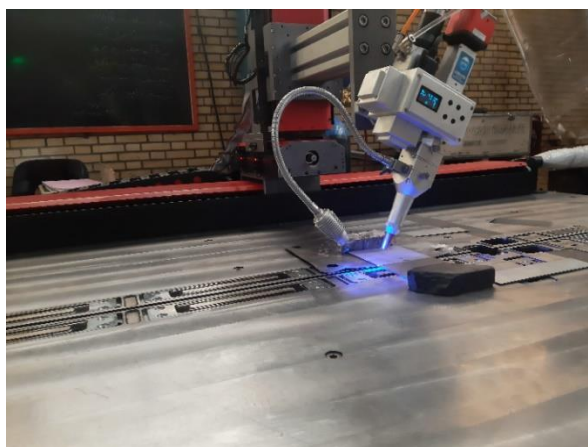
عنصر	فولاد دوفازی	فولاد تریپ
C	۰/۰۷۳۶	۰/۲۰۷
Si	۰/۱۰۶	۱/۳۷۹
Mn	۲/۴۵	۲/۲۲۵
P	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۶۷
S	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲

۲-۲- روش ساخت

۲-۲-۱- جوش لیزر

پیش از عملیات اتصال لیزر، ابتدا نمونه‌ها به صورت دقیق با استفاده از دستگاه برش وایرکات با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر آماده شد و به منظور افزایش کیفیت جوش، لبه‌های اتصال پیش از انجام فرایند، اکسید زدایی و پاک‌سازی از آلودگی‌های سطحی شدند. به منظور اطمینان از توزیع حرارتی یکنواخت و دقت جوش در ساخت، مطابق شکل ۱ از دستگاه جوشی مجهز به میز CNC با ریل‌های آهنربایی برای ثابت نگه‌داشتن لبه‌های اتصال و نازل هدایت‌شونده با بازوی رباتیکی ۶ درجه آزادی به همراه دوربین ماکرو برای کنترل سر نازل و محل جوش استفاده شده است.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، فاصله بین دو لبه ورق‌ها به کمک ریل آهنربایی در کمتر از ۰/۱ میلی‌متر ثابت شدند. به منظور افزایش استحکام اتصال و بهبود شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی، جهت نورد ورق‌های پایه عمود بر خط جوش انتخاب شده است. سپس با انتخاب الگوی حرکت مثلثی نازل و تنظیم پارامترهای توان، سرعت و فرکانس بر حسب طراحی آزمایش‌ها، توزیع حرارتی یکنواختی در طول جوش و محل اتصال ایجاد شد. الگوی مثلثی به دلیل کاهش اعوجاج در فلزات نازک، کاهش تمرکز انرژی در یک نقطه، جلوگیری از ایجاد حوضچه مذاب بیش از حد و افزایش کیفیت و استحکام جوش انتخاب شده است.



شکل ۱ نمای کلی دستگاه جوش لیزر فایبر

۲-۲-۲- طراحی آزمایش

در تولید ورق‌های ترکیبی، از روش طراحی آزمایش مبتنی بر رویکرد تاگوشی با هدف یافتن ترکیب پارامتری بهینه و ارزیابی کیفیت اتصال نسبت به پارامترهای کنترلی استفاده شد. سه پارامتر توان لیزر، سرعت حرکت نازل و فرکانس پالس طی فرایند ساخت به عنوان عوامل مستقل انتخاب شدند که مطابق جدول ۲ هر عامل در سه سطح تعریف گردید.

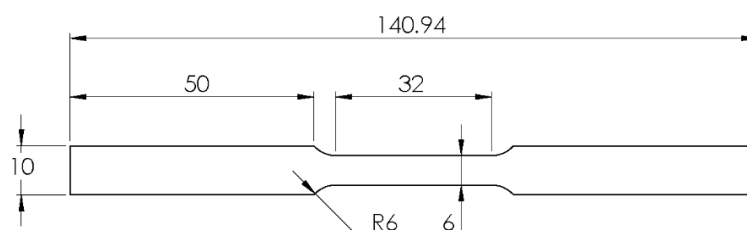
جدول ۲ پارامترهای کنترل شده در فرآیند جوش لیزر حین ساخت ورق ترکیبی و سطوح انتخاب شده آن‌ها

توان لیزر (کیلووات)	سرعت نازل جوش (میلی‌متر بر ثانیه)	فرکانس پالس (هرتز)
۱/۴	۱۸	۱۶
۱/۵	۲۰	۱۸
۱/۶	۲۲	۲۰

انتخاب این عوامل مبتنی بر اصول فیزیکی فرایند جوش لیزر و نیز تحلیل مکانیزم‌های انتقال حرارت و تشکیل ریزساختار در ناحیه ذوب انجام شد. توان لیزر کنترل‌کننده انرژی ورودی، سرعت حرکت نازل بر روی خط جوش تعیین‌کننده زمان برهم‌کنش حرارتی و فرکانس پالس عامل کنترل پایداری حوضچه مذاب و میزان اختلاط دو فولاد پایه در همدیگر در ناحیه جوش است. برای صرفه‌جویی در هزینه، زمان انجام آزمایش و درعین حال حفظ قابلیت تحلیل اثرات اصلی، آرایه متعامد L9 انتخاب شد که امکان بررسی سه عامل در سه سطح را تنها با ۹ آزمایش فراهم می‌کند. در طراحی آزمایش انجام شده برای ساخت ورق‌های ترکیبی، معیار پاسخ طراحی آزمایش‌ها به صورت کیفی بوده و از آزمون اریکسون برای ارزیابی میدان استفاده شده تا اتصالات قابل‌اتکا طی آزمون‌های کشش و متالوگرافی مشخصه‌یابی شوند.

۲-۲-۳- آزمون‌ها

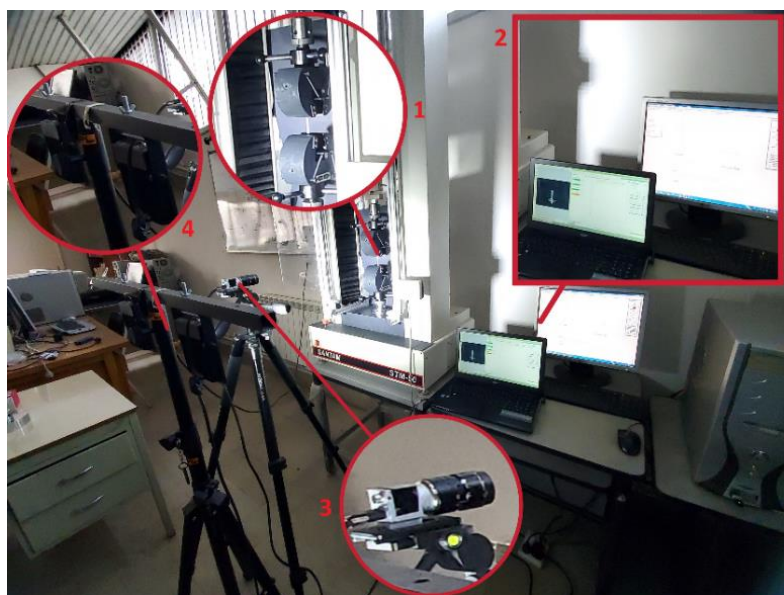
آزمون اریکسون برای کنترل کیفیت جوش در هر نمونه ورق ترکیبی در ناحیه جوش به کمک دستگاه زوییک انجام شد. در این مقاله، مطابق استاندارد ISO 16808 نمونه دایره‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر در قالب ثابت شده و با افزایش فشار هیدرولیک سنبه‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر ناحیه اتصال ورق را تا لحظه پارگی شکل داده است. در آزمون‌های اریکسون برای ارزیابی کیفیت جوش، اتصالی که شروع رشد ترک و یا بازشدگی در آن از ناحیه متأثر از جوش و قسمت جوش نباشد را به عنوان ورق ترکیبی با اتصال مناسب تلقی شد. پس از حصول اطمینان از کیفیت جوش ورق ترکیبی، آزمون‌های کشش تک‌محوره برای ورق‌های پایه و ورق ترکیبی به صورت مجزا به کمک دستگاه سنتام با لودسل ۵ تنی انجام شد. بدین منظور مطابق استاندارد ASTM E08، نمونه‌های کشش تک‌محوره توسط دستگاه وایرکات با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر برش خورده که در شکل ۲ ابعاد نمونه آماده‌شده قابل مشاهده است.



شکل ۲ ابعاد نمونه آزمون کشش تک‌محوره

به منظور افزایش دقت نتایج در تمامی آزمون‌های کشش تک‌محوره از دوربین بازرلر^۱ با نرخ عکس‌برداری نامی حداکثر ۳۵ عکس بر ثانیه برای خوانش کرنش سطح نمونه استفاده شد که در شکل ۳ نمای کلی از آزمون کشش و جزئیات دستگاه‌ها مشخص شده است.

^۱ Basler



شکل ۳ نمای کلی تجهیزات آزمون کشش؛ (۱) نمونه و فک دستگاه در حال کشش، (۲) سیستم‌های داده‌برداری مجزا برای دستگاه کشش و دوربین، (۳) دوربین مخصوص خوانش کرنش، (۴) دو منبع نوری متقارن و سه پایه برای ایجاد کنتراست نوری بر روی الگوی نامنظم سطح نمونه

در این روش سطح نمونه‌ها با الگوهای تصادفی نقطه‌ای پوشش داده شده و پس از انجام آزمون به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر مرکوری داده‌های کرنش استخراج شد. سپس با استفاده از کد نویسی در پایتون، داده‌های کرنش با داده‌های استخراجی از دستگاه سنج همگام‌سازی شده و منحنی‌های تنش-کرنش و پارامترهای مکانیکی برای هر نمونه به کمک کد پایتون دیگری به دست آمده است. در این مقاله برای آزمون کشش، جابه‌جایی برای همه نمونه‌ها با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه و نرخ ۳ داده بر ثانیه برای دستگاه سنج تعیین و نرخ عکس‌برداری ۵ فریم بر ثانیه برای خوانش سطح نمونه‌ها تنظیم شد.

جهت بررسی‌های ریزساختاری ورق ترکیبی، با استفاده از وایرکات برش مقطع عرضی نمونه که شامل نواحی حوضچه مذاب، متأثر از جوش و فلزات پایه انجام شد. قطعات برش خورده متناسب با استاندارد ISO 10934 پس از سنباده‌زنی و پولیش با ترکیب محلول $3\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ با خلوص ۸۰٪ تحت شرایط اچ قرار گرفتند. پس از استخراج تصاویر با میکروسکوپ نوری بلافاصله آزمون میکرو سختی نیز بر حسب ویکرز و با نیروی ۱/۹۶ نیوتن به مدت زمان ۱۶ ثانیه مطابق استاندارد ASTM E384 انجام شد. نقاط اندازه‌گیری در فواصل منظم در راستای عمود بر خط از فلز پایه تریپ آغاز شد و تا فولاد دوفازی در سمت دیگر ناحیه جوش ادامه داشت. به‌منظور اطمینان از تکرارپذیری نتایج، تمامی آزمون‌های کشش تک‌محوره و میکروسختی‌سنجی برای نمونه‌های ورق ترکیبی سه بار تکرار شد و به‌صورت میانگین قابل‌اتکا در این مقاله گزارش شده است.

۳- نتایج و بحث

برای تحلیل اثر پارامترهای فرایند جوش در ساخت ورق ترکیبی، طراحی آزمایش بر مبنای آرایه متعامد ۹ حالت سه سطحی مطابق جدول ۳ انجام شد تا تأثیر هم‌زمان سرعت جوشکاری، توان لیزر و فرکانس پالس بر کیفیت اتصال بررسی شود. در جدول ۳ چگالی انرژی خطی جوش حاصل تقسیم توان لیزر بر سرعت نازل جوش است.

در شکل ۴ تصاویر نهایی ترک نمونه‌های ترکیبی پس از انجام آزمون اریکسون برای ۹ آزمون ارائه شده است که نتایج ارزیابی آن‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده است. در کلیه نمونه‌ها روند سرد کردن نمونه‌ها در هوا و در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد بوده و مسیر حرکت نازل به‌صورت الگوی مثلثی ثابت نگه داشته شد تا اثر هندسه جوش و پارامترهای خنک‌سازی نمونه‌ها حذف و تنها اثر پارامترهای مورد بررسی مشخص گردد.

در اتصال ورق‌های ترکیبی با ضخامت و جنس ناهمسان، تحلیل رفتار شکست تحت بارگذاری دو محوره باید از یک دیدگاه ترمومکانیکی-متالورژیکی دوسویه انجام شود. علاوه بر تفاوت رفتار حرارتی در هر سمت اتصال حین فرایند جوش لیزر، پاسخ مکانیکی

آن‌ها نیز در بارگذاری مستقل و نامتقارن است. از سوی دیگر، ناهمسانی توزیع دما و نرخ سرد شدن در دو سمت جوش باعث تشکیل دو ناحیه غیر همسان متأثر از جوش با ریزساختار و خواص مکانیکی متفاوت شود. ورق ترکیبی در سمت فولاد دوفازی به دلیل ضخامت بیشتر و هدایت حرارتی مؤثرتر، گرما را کندتر از دست می‌دهد و در نتیجه شاهد عرض ناحیه متأثر از حرارت بزرگ‌تری هستیم. در سمت تریپ ورق ترکیبی به دلیل ضخامت کمتر و سریع‌تر سرد شدن این ناحیه، عرض ناحیه متأثر از حرارت کوچک‌تر و ریزساختارهای سخت‌تری را انتظار می‌رود که عامل تمرکز تنش موضعی باشد.

جدول ۳ پارامترهای کنترل‌شده در فرآیند جوش لیزر حین ساخت ورق ترکیبی و سطوح انتخاب‌شده آن‌ها

شماره آزمون	توان لیزر (کیلووات)	سرعت نازل جوش (میلی‌متر بر ثانیه)	فرکانس پالس (هرتز)	ارزیابی کیفی	چگالی انرژی خطی (کیلوژول بر میلی‌متر)
۱	۱.۴	۱۸	۱۶	مردود	۰/۰۷۷۸
۲	۱.۴	۲۰	۱۸	مردود	۰/۰۷۰۰
۳	۱.۴	۲۲	۲۰	مردود	۰/۰۵۸۳
۴	۱.۵	۱۸	۱۸	مقبول (منتخب)	۰/۰۸۳۳
۵	۱.۵	۲۰	۲۰	مردود	۰/۰۷۵۰
۶	۱.۵	۲۲	۱۶	مردود	۰/۰۶۲۵
۷	۱.۶	۱۸	۲۰	مقبول (اتصال ترد)	۰/۰۸۸۹
۸	۱.۶	۲۰	۱۶	مردود	۰/۰۸۰۰
۹	۱.۶	۲۲	۱۸	مردود	۰/۰۶۶۷

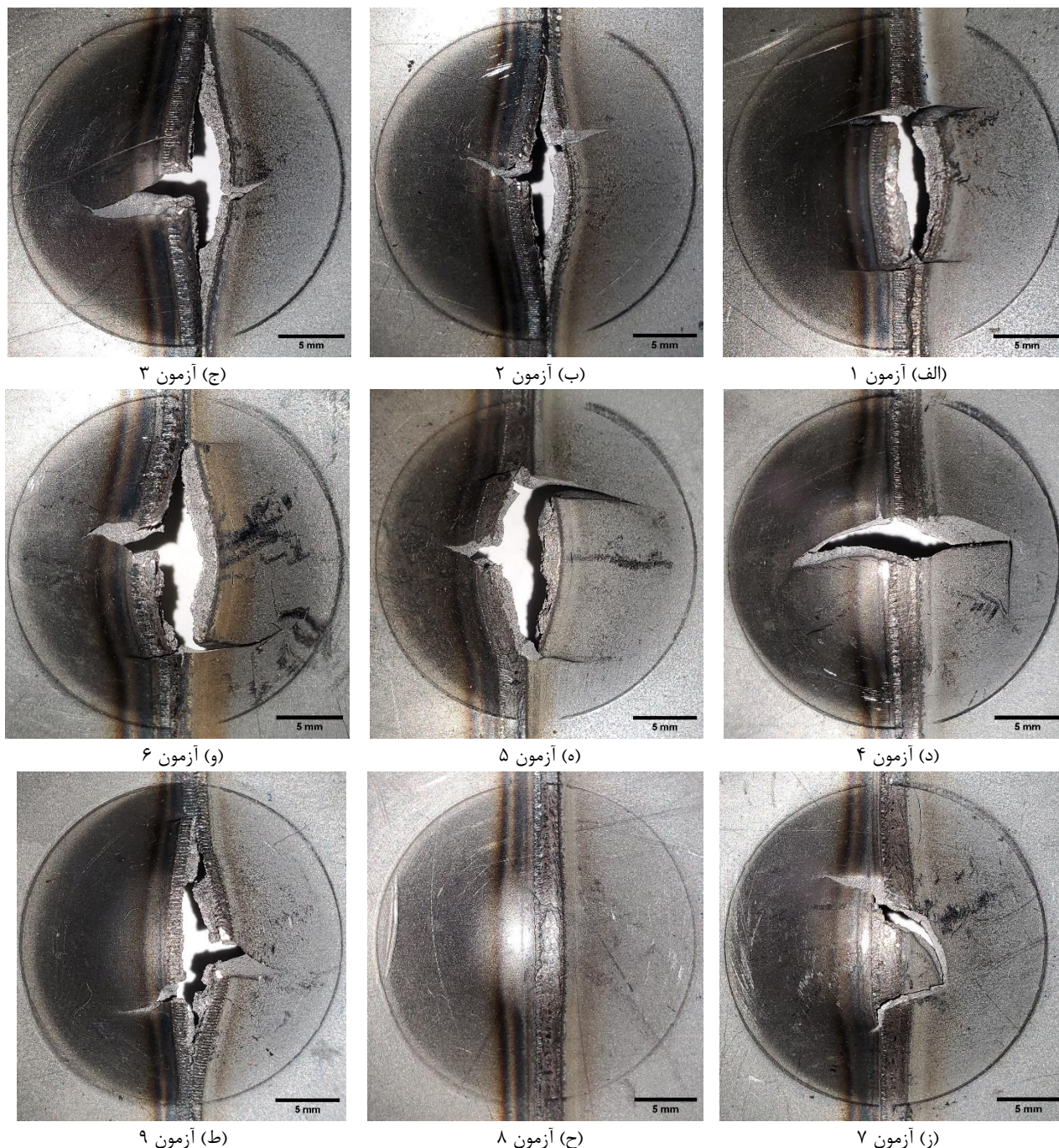
در بررسی‌های کیفی انجام‌شده در تصاویر شکست شکل ۴ (الف-ط) ترک‌ها عمدتاً در داخل ناحیه جوش گسترده شده‌اند و یا در سمت فولاد تریپ آغاز شدند. افزایش سرعت سرد شدن در سمت تریپ منجر به کاهش انرژی ورودی، باریک و سخت شدن ناحیه متأثر از جوش و عدم برقراری نفوذ کامل با سمت فولاد دوفازی با ضخامت بیشتر می‌شود که چنین ترکیبی موجب تمرکز تنش در مرز اتصال ناحیه جوش به فولاد تریپ شده و ترک طولی اولیه در آن سمت ظاهر می‌شود.

مطابق شکل ۴ (الف-ج) در آزمایش‌هایی که ورق ترکیبی ساخته شده با توان لیزر کم بوده است، سطوح شکست نسبتاً صاف و در نواحی داخلی جوش بوده که نشان دهنده شکست شبه ترد ناشی عدم پیوند متالورژیکی مناسب بین دو فلز پایه است.

در آزمایش‌های اریکسون بر روی نمونه‌هایی با توان لیزر متوسط (شکل ۴ ه، و)، محل آغاز شکست و جدایش از ناحیه جوش دور شده و به فلز پایه (عمدتاً به سمت تریپ) انتقال یافته است. این جابه‌جایی محل شکست بیانگر آن است که استحکام جوش و ناحیه اتصال به صورت موضعی از یکی از فلزات پایه حداقل بیشتر است. در چنین زمانی، معیار پذیرش اتصال معمولاً بر مبنای آغاز ترک و بازشدگی در فلز پایه تعریف می‌شود که در آزمایش شماره ۴ (شکل ۴-د) نمونه با توان ۱/۵ کیلووات، سرعت ۱۸ میلی‌متر بر ثانیه و فرکانس ۱۸ هرتز چنین رفتار مشاهده شد. در این نمونه، شروع ترک در فلز پایه (تریپ)، رشد ترک عمود بر خط جوش و انتقال پارگی به سمت فولاد دوفازی همراه با شکل‌پذیری مناسب و عدم وجود نواحی ترد در نواحی متأثر از حرارت مشاهده شد که در ادامه آزمون‌های مشخصه‌یابی برای این ورق ترکیبی خاص انجام شده است.

بررسی تطبیقی این حالت با نمونه‌های با توان جوش بالا (شکل ۴ ز-ط)) نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد انرژی، اگرچه نفوذ مذاب را تضمین می‌کند اما به دلیل دمای بالا و سرد شدن سریع در مرزهای نواحی جوش و متأثر از جوش به ویژه در سمت نازک‌تر ورق ترکیبی باعث تشکیل نواحی سخت و ترد می‌شود. نمونه با توان ۱/۶ کیلووات، سرعت ۱۸ میلی‌متر بر ثانیه و فرکانس ۲۰ هرتز (شکل ۴-ز) مصداق این ویژگی‌ها است. با اینکه این نمونه از منظر معیار کیفی اتصال، شروع ترک در خارج از جوش بوده ولی به دلیل عدم تغییر شکل پلاستیک مناسب به دلیل ریزساختار موضعی ترد برای کاربردهای شکل‌دهی این اتصال مناسب نیست. در این مورد مشاهده شده است سمت تریپ که کم ضخامت‌تر و سریع‌تر سرد شده است محل ترجیحی شروع و به هم پیوستن ترک‌ها می‌شود و به سمت فولاد دوفازی ورق ترکیبی که رفتار نسبتاً نرمی دارد ترک‌ها گسترش می‌یابند.

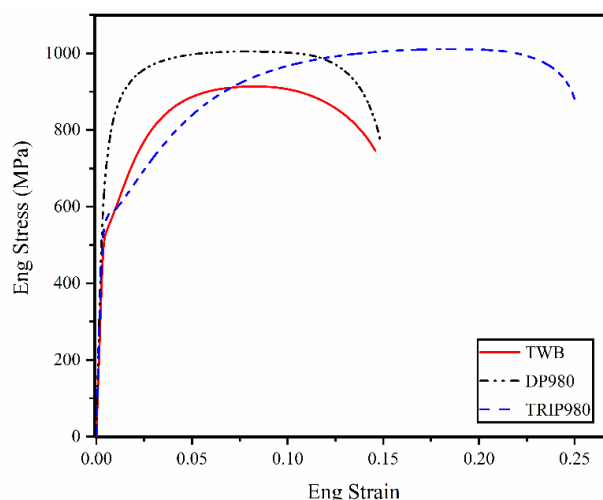
راستای نورد



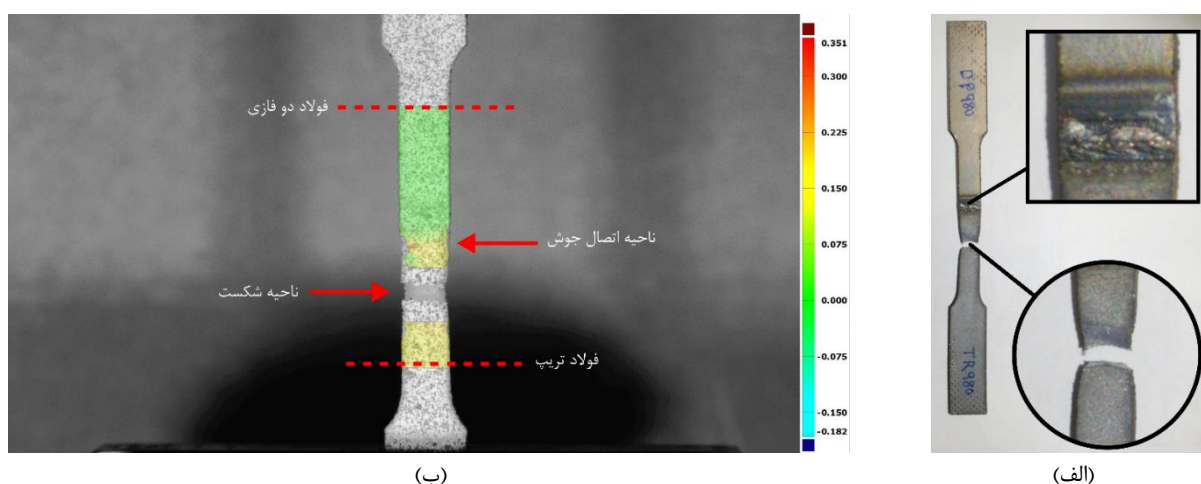
شکل ۴ نمونه‌های آزمون‌های طراحی شده پس از انجام آزمون اریکسون و شکل ترک و پارگی ایجاد شده در ناحیه جوش به ترتیب آزمون‌های جدول ۳ (برای تمامی موارد (الف - ط) به گونه‌ای عکاسی شده است که ورق تریپ در سمت راست ورق ترکیبی و در سمت چپ، ورق دوفازی قرار گیرد).

منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره برای سه ورق فولاد دوفازی، تریپ و ورق ترکیبی منتخب در شکل ۵ ارائه شده است.

وضعیت محل شکست ورق ترکیبی پس از آزمون کشش تک‌محوره و کانتور کرنش حقیقی استخراجی از سطح نمونه ورق ترکیبی در لحظه پیش از شکست در شکل ۶ گزارش شده است. در شکل ۶-الف محل شکست ورق ترکیبی به دور از ناحیه جوش و در قسمت ورق تریپ اتفاق افتاده است که این امر در شکل ۶-ب نیز با از بین رفتن الگوی پراکنده نقطه‌ای در ناحیه شکست به دلیل گلوپی شدن موضعی شدید مشخص است.



شکل ۵ مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی برای ورق‌های پایه در دو جهت نورد و عمود بر نورد و ورق ترکیبی



شکل ۶ الف) نمونه ورق ترکیبی پس از آزمون کشش تک‌محوره با تمرکز بر ناحیه شکست و ناحیه جوش، ب) کانتور کرنش واقعی ورق ترکیبی تحت آزمون کشش تک‌محوره یک فریم پیش از شکست

با استفاده از شکل ۵ مشخصات مکانیکی ورق‌های پایه و ورق ترکیبی در جدول ۴ استخراج شده است.

جدول ۴ مشخصه‌های مکانیکی استخراجی از آزمون کشش تک‌محوره ورق‌های پایه دوفازی، تریپ و ورق ترکیبی

مشخصات مکانیکی	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	استحکام تسلیم (مگا پاسکال)	استحکام نهایی (مگا پاسکال)	کرنش شکست (درصد)
ورق دوفازی	۲۰۵	۷۷۳	۱۱۰۶/۶۵	۱۴/۸۴
ورق تریپ	۱۷۶	۵۳۹	۱۲۲۰/۳۸	۲۵
ورق ترکیبی	۱۵۹	۴۶۶	۹۹۷/۴۴	۱۴/۵۶

از آنجا که خط جوش به صورت عرضی نسبت به جهت بارگذاری تک‌محوره قرار دارد، نیرویی برابر به نواحی جوش و ورق‌های پایه دوفازی و تریپ در ناحیه مؤثر نمونه کشش وارد می‌شود. با مقایسه استحکام تسلیم ورق دوفازی و تریپ مطابق جدول ۴، شروع تسلیم ورق ترکیبی از جزئی که برای تسلیم به کمترین نیرو نیاز دارد امری طبیعی است. به همین علت مطابق منحنی تنش-کرنش شکل ۴، استحکام تسلیم در ورق ترکیبی نزدیک به استحکام تسلیم ورق تریپ است و از قانون اختلاط پیروی نمی‌کند. از سوی دیگر، با توجه به استحکام تسلیم پایین تر و ضخامت کمتر ورق تریپ نسبت به ورق دوفازی، تریپ به عنوان تعیین کننده حد الاستیک ورق ترکیبی عمل می‌کند که در نهایت نیز شکست نمونه ترکیبی از ناحیه ورق تریپ رخ داده است.

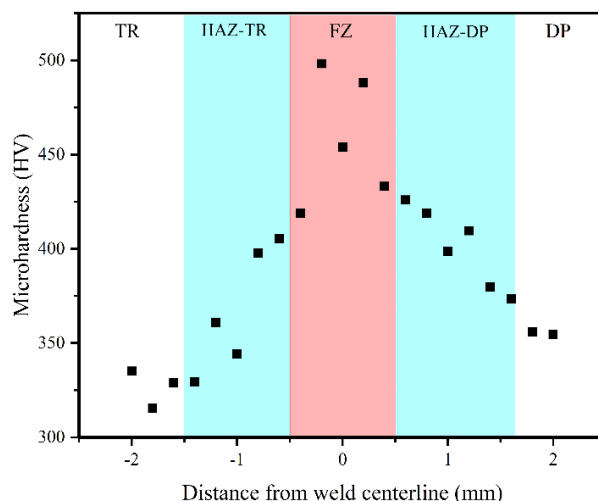
در ورق ترکیبی علی‌رغم تسلیم مبتنی بر ورق تریپ، شکل ناحیه پس از نقطه تسلیم در شکل ۵ به ویژه نرخ کار سختی و رسیدن زود هنگام به استحکام کششی نهایی همانند ورق دوفازی است. با مشاهده پردازش تصویر نمونه کشش ورق ترکیبی پیش از شکست در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود که جابه‌جایی در ناحیه ورق دوفازی کم بوده و عمده جابه‌جایی ورق ترکیبی توسط ورق تریپ جذب شده است. در ورق ترکیبی، جوش به عنوان یک قید هندسی موضعی عمل کرده و اجازه نداده است کرنش به صورت یکنواخت به سمت فولاد دوفازی منتقل شود. در نتیجه ناحیه فعال در حال تغییر شکل تریپ را مجبور کرده است تا زودتر نسبت به طول گیج کلی، به حد تسلیم خود رسیده و دچار ناپایداری پلاستیک شود. از سوی دیگر، در تحلیل تنش-کرنش ورق ترکیبی در شکل ۴ از یک اکتسنسیومتر مجازی در کل ناحیه مؤثر نمونه کشش برای خوانش کرنش کل نمونه باید استفاده شود که این امر موجب می‌شود که در منحنی تنش-کرنش کلی ورق ترکیبی، کرنش‌های شدید موضعی در تریپ و کرنش‌های ناچیز ناحیه فولاد دوفازی هم‌زمان باهم محاسبه شوند و کرنش موضعی واقعی در ناحیه شکست پنهان شود. مطابق شکل ۶-ب راهنمای کانتور کرنش مقدار کرنش حقیقی ثبت شده در تمامی آزمون کشش را تا ۰/۳۵ کرنش موضعی حقیقی نشان می‌دهد که در بررسی‌های با اکتسنسیومترهای موضعی از ناحیه گلوپی در محیط کرنش مهندسی، کرنش حوالی ۰/۲۳ تقریباً مشابه ورق تریپ ثبت شده است.

بر این اساس که هدف اصلی آزمون کشش تک‌محوره بررسی ناحیه جوش و کنترل کیفیت جوش است، شکست نمونه ورق ترکیبی دور از ناحیه جوش تأییدی بر کیفیت استحکام و شکل‌پذیری ورق ترکیبی ساخته شده است. در پردازش تصاویر نمونه‌های ترکیبی کشیده شده، کانتور کرنش حقیقی در نواحی جوش حاکی از تغییر شکل پلاستیک جزئی در این ناحیه است که مطابق شکل ۶-الف در تصویر نزدیک از پشت جوش، تغییر شکلی جزئی در حوالی مرز حوضچه مذاب جوش و ناحیه متأثر از حرارت سمت فولاد تریپ اتفاق افتاده است.

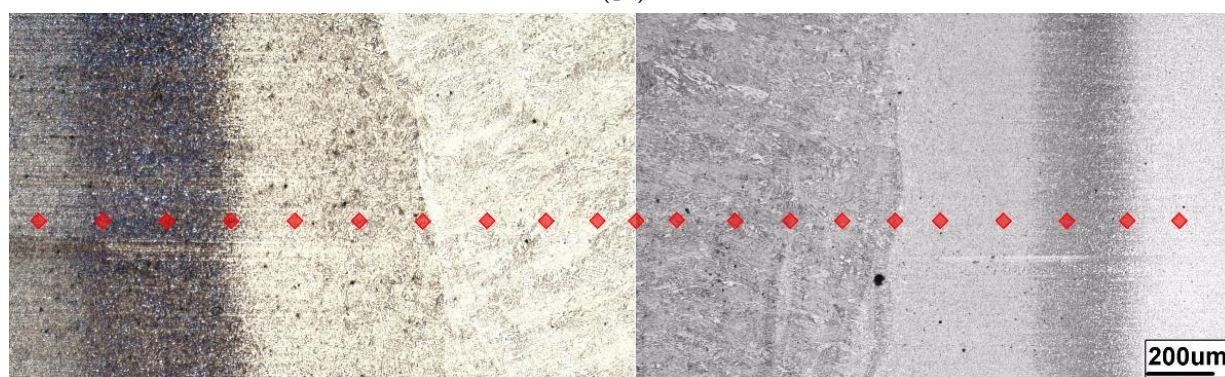
توزیع میکرو سختی برحسب فاصله از ناحیه مرکزی جوش در ورق ترکیبی منتخب مطابق شکل ۷-الف گزارش شده است که به ۵ ناحیه فولاد دوفازی، ناحیه متأثر از حرارت فولاد دوفازی، ناحیه مرکزی جوش، ناحیه متأثر از حرارت فولاد تریپ و فولاد تریپ تقسیم شده است. شکل ۷-ب تصویر حاصل از ناحیه جوش استخراجی از میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد که جوش بدون تخلخل، بریدگی کناره است. همچنین مشاهده شده است که عرض بخش فوقانی حوضچه مذاب پهن‌تر از بخش تحتانی جوش بوده است و با تحلیل تصویر عرض جوش در ناحیه بالایی تقریباً دو برابر عرض آن در ریشه جوش اندازه‌گیری شد. در شکل ۷-الف کمینه مقدار سختی در نواحی دور از خط جوش و در فلزات پایه مشاهده شده است که نشان‌دهنده حفظ ریزساختار اولیه ورق‌هاست. مقدار سختی اندازه‌گیری شده در فلز پایه فولاد دوفازی از فلز پایه فولاد تریپ بالاتر بوده که این اختلاف به تفاوت ریزساختار دو فولاد و نتایج حاصل از کشش تک‌محوره نظیر استحکام تسلیم و مشخصه‌های مکانیکی جدول ۴ مطابقت دارد. حضور جزایر مارتنزیتی در زمینه فریتی موجب افزایش سختی فولاد دوفازی می‌شود درحالی که در فولاد تریپ سهم قابل توجهی از ریزساختار شامل فازهای نرم‌تر نظیر فریت و آستنیت باقیمانده است و بنابراین سختی اولیه آن کمتر است. با نزدیک شدن به خط جوش، مقدار سختی به تدریج افزایش یافته و به دلیل توزیع حرارتی مناسب و سرعت بالای فرایند اتصال و سرد شدن ورق ترکیبی در هر دو سمت مناطق متأثر از جوش افت سختی مشاهده نشده است. در ناحیه مرکزی جوش مطابق تصویر استخراجی از میکروسکوپ نوری در شکل ۷-ب در اثر نرخ سرمایش بالای فرایند جوش لیزری استنتاج می‌شود که این ناحیه غالباً با فاز سخت مارتنزیتی تشکیل شده است و بیشینه مقدار سختی در این ناحیه مشاهده شده است. عدم مشاهده ناحیه نرم در مجاورت خط جوش بیانگر آن است که سیکل حرارتی اعمال شده به اندازه‌ای کوتاه بوده که فرایندهای بازپخت یا رشد دانه که معمولاً موجب افت سختی در فولادهای استحکام بالا می‌شوند، فعال نشده‌اند.

با مقایسه دو ناحیه متأثر از حرارت در طرفین اتصال نشان می‌دهد که اگرچه هر دو سمت افزایش سختی نسبت به فلز پایه داشتند اما به دلیل تفاوت ریزساختاری و ترکیب شیمیایی دو فولاد پایه نحوه سخت شدن آن‌ها متفاوت است. در سمت فولاد دوفازی آستنیتی شدن موضعی و تبدیل سریع آن به مارتنزیت منجر به افزایش سختی شده است، درحالی که در سمت تریپ تبدیل بخشی از آستنیت باقیمانده به مارتنزیت و همچنین تشکیل باینیت ریزدانه عامل افزایش سختی محسوب می‌شود.

بنابراین نتایج سختی‌سنجی و تصویر ریزساختاری شکل ۷ نشان می‌دهند که اتصال ایجاد شده به کمک جوش لیزر فاقد ناحیه بحرانی با افت خواص مکانیکی است و توزیع سختی یکنواخت و افزایشی به سمت خط جوش دلالت بر پایداری متالورژیکی اتصال دارد. این رفتار بیانگر آن است که پارامترهای جوش انتخاب شده موجب ایجاد ریزساختارهای سخت و پایدار در ناحیه ذوب و مجاور آن شده و از تشکیل نواحی تضعیف‌شده جلوگیری کرده‌اند، در نتیجه ورق ترکیبی از دیدگاه متالورژیکی و مکانیکی کیفیت مطلوبی دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۷ الف) منحنی میکرو سختی بر حسب فاصله از مرکز حوضچه مذاب جوش لیزر در ورق ترکیبی منتخب، ب) تصویر میکروسکوپ نوری از نواحی جوش و اطراف آن در ورق ترکیبی و شماتیک نقاط اندازه گیری میکرو سختی (مطابق منحنی سختی سنجی سمت راست ساختار فولاد دوفازی و سمت چپ فولاد تریپ است)

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، ورق های ترکیبی با استفاده از ورق های فولادی پر استحکام پیشرفته دوفازی و تریپ به روش لیزر فایبر ساخته شده است. برای ساخت ورق ترکیبی در این مقاله به دلیل تفاوت توأمان در ضخامت و جنس، با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی L_9 ، پارامترهای توان لیزر، سرعت نازل و فرکانس پالس لیزر در سه سطح آزمایش شد و با استفاده از آزمون اریکسون در ناحیه جوش کیفیت اتصالات بررسی شدند. پس از بررسی های انجام شده بر روی نتایج آزمون اریکسون، پارامترهای توان، سرعت و فرکانس بهینه گزارش شدند و ورق ترکیبی ساخت ه شده طی آزمون های کشش تک محوره و میکرو سختی سنجی و تصویر میکروسکوپی بررسی گردید. اهم نتایج در ذیل آمده است:

- نتایج حاصله نشان داد که با افزایش توان به $1/6$ کیلووات سبب ترد شدن اتصال و کاهش شکل پذیری ورق ترکیبی می شود. از سوی دیگر، با کاهش فرکانس به ۱۶ هرتز مشاهده شد که میزان نفوذ فولاد تریپ با ضخامت کمتر در فولاد دوفازی با ضخامت بیشتر در ناحیه حوضچه مذاب به حد کافی نبوده است و منجر به مردود شدن ورق های ترکیبی در آزمون اریکسون می شود.
- همچنین با تعریف چگالی خطی انرژی که حاصل ضرب توان در سرعت حرکت نازل است مشاهده شده است که برای ورق های ترکیبی با چگالی بالاتر $0/08$ می توان به اتصالی مناسب برای ورق های ترکیبی دست یافت اما این یافته نیز به ترکیب سرعت و توان بستگی دارد چنانچه که در شرایطی که توان $1/6$ کیلووات است سرعت ۲۰ میلی متر بر ثانیه علیرغم دستیابی به چگالی $0/08$ ، منجر به مردود شدن ورق ترکیبی در آزمون اریکسون شد؛ بنابراین علاوه در ساخت ورق ترکیبی، علاوه بر چگالی تأثیر متالورژیکی سرعت و توان در تشکیل حوضچه مذاب و نواحی متأثر از جوش بسیار مهم است.

- (۳) در نهایت مشاهده شد که توان ۱/۵ کیلووات، سرعت ۱۸ میلی‌متر بر ثانیه و فرکانس ۱۸ هرتز می‌تواند ترکیب مناسبی برای ساخت ورق ترکیبی باشد که در آزمایش‌های کشش تک‌محوره، به دلیل استحکام تسلیم پایین‌تر این فولاد نسبت به فولاد دوفازی و نیز ضخامت کمتر فولاد تریپ، نقطه شکست در ناحیه ورق پایه فولاد تریپ مشاهده شد. از سوی دیگر با بررسی سختی سنجی و تصویر میکروسکوپی از ناحیه جوش در این ورق ترکیبی، مشاهده شد که سختی فولاد تریپ کمتر از فولاد دوفازی است که این امر با مقایسه استحکام تسلیم دو فولاد از آزمون کشش تک‌محوره همخوانی دارد. همچنین شکست از فولاد تریپ علی‌رغم مشاهده بیشینه سختی در ناحیه مرکزی جوش حاکی از آن است که مقدار بیشینه سختی در محدوده شکست ترد نیست و گرادیان سختی به صورت تدریجی بود و تمرکز تنش بحرانی ایجاد نکرده است.
- (۴) ترکیب بهینه پارامترهای انتخابی منجر به توزیع سختی متعادل، عدم ایجاد ناحیه فوق ترد و ایجاد اتصال متالورژیکی سالم شده‌اند. چنین ورق ترکیبی به دلیل عدم مشاهده افت سختی شدید در نواحی متأثر از جوش و مشاهده قابلیت شکل‌پذیری در ناحیه جوش نشانه یک تعادل در دستیابی به اتصال بهینه است.

References

- [1] Pereira R, Peixinho N, Costa SL. A review of sheet metal forming evaluation of advanced high-strength steels (AHSS). *Metals*. 2024 Mar 28;14(4):394. doi: 10.3390/met14040394
- [2] Schmitt JH, lung T. New developments of advanced high-strength steels for automotive applications. *Comptes Rendus. Physique*. 2018;19(8):641-56. doi: 10.1016/j.crhy.2018.11.004
- [3] Majji R, Xiang Y, Ding S, Yang C. Numerical simulation on chain-die forming of an AHSS top-hat section. In *AIP Conference Proceedings* 2018 May 2 (Vol. 1960, No. 1, p. 160018). AIP Publishing LLC. doi: 10.1063/1.5035044
- [4] Mohapatra S, Satpathy B, Sarkar A, Kumar S, Aich S, Oh MS. Recent advances in medium-manganese steel: a review of key findings, challenges, and future perspectives. *Journal of Materials Science*. 2025 Jun;60(23):9447-528. doi: 10.1007/s10853-025-11010-5
- [5] Escherová J, Krbat'a M, Klučiar P, Jus M, Chochlíková H, Daniel K, Polášek M. The Influence of Heat Treatment of High-Strength Steels on the Change of Tribological Properties by the Ball on Flat Method. *Key Engineering Materials*. 2025 Jul 5;1016:85-96. doi: 10.4028/p-t0n2eS
- [6] Xia P, Sabirov I, Petrov R, Verleysen P. Review of performance of advanced high strength steels under impact. *Advanced Engineering Materials*. 2025 Apr;27(7):2402016. doi: 10.1002/adem.202402016
- [7] Song S, Aminzadeh A, Bakhtiari R, Ghassemi-Armaki H, Butcher C, Biro E. A review of forming behavior and influencing mechanisms in laser-welded advanced high-strength steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2025 Sep 10;149101. doi: 10.1016/j.msea.2025.149101
- [8] Tu H, Xie W, Nian K, Fu R, Zhang X. Microstructure and mechanical properties of dissimilar welded joints of Inconel 718 alloy and 316L stainless steel thin sheets produced using ultrasonic vibration-assisted gas tungsten arc and fiber laser welding technologies. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2025 Jun 5;25(4):192. doi: 10.1007/s43452-025-01248-w
- [9] Safari M, Farzin M. Experimental and numerical investigation of laser bending of tailor machined blanks with different bending mechanisms. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Jan 20;7(11):52-65. (In Persian)
- [10] Shahroudi S, Khorsand H. Investigation of welding of advanced high-strength steel sheets used in automotive bodies. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Welding and Non Destructive Testing & 26th National Conference on Welding & Inspection & 15th National Conference on NDT & 4th National Conference on Additive Manufacturing*; 2026 Feb 9; Tehran, Iran. Tehran: Iranian Institute of Welding and Non Destructive Testing; 2026. [In Persian]
- [11] Reed D, Belanger P. Hot stamped steel one-piece door ring in the all-new 2019 Ram 1500. *Great Designs in Steel*. 2018.
- [12] Hamada A, Ali M, Ghosh S, Jaskari M, Keskitalo M, Järvenpää A. Mechanical performance and formability of laser-welded dissimilar butt joints between medium-Mn stainless steel and high-strength carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2022 Jan 13;831:142200. doi: 10.1016/j.msea.2021.142200
- [13] Yaakob KI, Ishak M, Quazi MM, Salleh MN. Optimizing the pulse wave mode low power fibre laser welding parameters of 22Mnb5 boron steel using response surface methodology. *Measurement*. 2019 Mar 1;135:452-66. doi: 10.1016/j.measurement.2018.10.035
- [14] Nayak SS, Biro E, Zhou Y. Laser welding of advanced high-strength steels (AHSS). In *Welding and joining of advanced high strength steels (AHSS)* 2015 Jan 1 (pp. 71-92). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-85709-436-0.00005-9

- [15] Farabi N, Chen DL, Li J, Zhou Y, Dong SJ. Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 Feb 15;527(4-5):1215-22. doi: [10.1016/j.msea.2009.09.051](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.051)
- [16] Farabi N, Chen DL, Zhou Y. Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011 Jan 21;509(3):982-9. doi: [10.1016/j.jallcom.2010.08.158](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.08.158)
- [17] Dong W, Bao L, Li W, Shin K, Han C. Effects of laser forming on the mechanical properties and microstructure of DP980 steel. *Materials*. 2022 Oct 28;15(21):7581. doi: [10.3390/ma15217581](https://doi.org/10.3390/ma15217581)
- [18] Dong D, Liu Y, Wang L, Yang Y, Jiang D, Yang R, Zhang W. Microstructure and deformation behaviour of laser welded dissimilar dual phase steel joints. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016 Feb;21(2):75-82. doi: [10.1179/1362171815Y.0000000067](https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000067)
- [19] Gong H, Wang S, Knysh P, Korkolis YP. Experimental investigation of the mechanical response of laser-welded dissimilar blanks from advanced-and ultra-high-strength steels. *Materials & Design*. 2016 Jan 15;90:1115-23. doi: [10.1016/j.matdes.2015.11.057](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.057)
- [20] Kuril AA, Ram GJ, Bakshi SR. Microstructure and mechanical properties of keyhole plasma arc welded dual phase steel DP600. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019 Aug 1;270:28-36. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2019.02.018](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.018)
- [21] Marques ES, Pereira AB, Silva FJ. Quality assessment of laser welding dual phase steels. *Metals*. 2022 Jul 26;12(8):1253. doi: [10.3390/met12081253](https://doi.org/10.3390/met12081253)
- [22] He X, Gu F, Ball A. A review of numerical analysis of friction stir welding. *Progress in Materials Science*. 2014 Aug 1;65:1-66. doi: [10.1016/j.pmatsci.2014.03.003](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.003)
- [23] Öztürk E, Arıkan H. Investigation of mechanical properties of laser welded dual-phase steels at macro and micro levels. *Optics & Laser Technology*. 2023 Jan 1;157:108713. doi: [10.1016/j.optlastec.2022.108713](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108713)
- [24] Teng F, Wang X, Jiang Z, Liu R, Lv D, Xu X, Di H. Effect of filler wire composition on microstructure and properties of 1500 MPa ultrahigh-strength steel by laser welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2025 Jul;56(7):2459-72. doi: [10.1007/s11661-025-07792-7](https://doi.org/10.1007/s11661-025-07792-7)
- [25] Mirzaloo M, Modabberifar M, Taheri M, Alighourchi I, Karian A. Experimental investigation of the effects of laser parameters on the strength and size of the weld nugget in laser spot welding of stainless steel sheet 316. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021;8(5):23-29. [In Persian]
- [26] Marwan K, Aljadi M, Morgham M, Abuqunaydah MA. Strength Optimization of Spot Resistance Welded AHSS Dissimilar Thickness by Taguchi Method. *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences*. 2026 Feb 9:227-34.