E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 12, Number 1, 2026



Effect of welding parameters on energy absorption and fracture mode in resistance spot welding of DP and HSLA automotive steels

A. Siavash Mojaver, S. G. Shabestari, R. Ashiri*
School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

Received 11 December 2025 ; Accepted 21 January 2026

Abstract

In this study, the effects of welding current intensity (9 and 10 kA) and holding time (5 and 40 cycles) on the energy absorption and failure mode of a dissimilar joint between DP590 and HSLA440 steels in the resistance spot welding process were investigated. For this purpose, four parameter combinations were prepared, and a tensile–shear test was performed on each sample. The results showed that increasing the current from 9 to 10 kA at a holding time of 5 cycles led to an increase of about 1 kN in strength; however, at a hold time of 40 cycles, changing the current resulted in a decrease of approximately 1.6 kN in strength. Therefore, the role of current is limited and dependent on the saturation of the weld nugget diameter. In contrast, increasing the hold time from 5 to 40 cycles had the most significant effect, increasing the energy absorption by about 217 J. Failure mode analysis also revealed that samples with longer hold times predominantly exhibited pull-out failure (PF), absorbing significantly more energy compared to interfacial failure (IF). Overall, the results indicate that controlling cooling through increasing the holding time is the most effective factor in enhancing absorbed energy and altering the failure mode in DP590/HSLA440 joints.

Keywords: Resistance spot welding, Fracture mode, Energy absorption, Advanced high-strength steels, Automotive steels.

*Corresponding Author: R. Ashiri, ashiri@iust.ac.ir.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405



اثر پارامترهای جوشکاری بر جذب انرژی و حالت شکست در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای خودرویی DP و HSLA

امیر سیاوش مجاور، سعید شبستری، روح‌اله عشیری *

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایرن، تهران.

دریافت مقاله: 1404/09/20 ؛ پذیرش مقاله: 1404/11/01

چکیده

در این پژوهش اثر شدت جریان جوشکاری (9 و 10 کیلوآمپر) و زمان نگه‌داری (5 و 40 سیکل) بر میزان جذب انرژی و حالت شکست اتصال ناهمسان دو فولاد DP590 و HSLA440 در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بررسی شد. فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در 4 پالس، زمان‌های نگه‌داری 5 و 40 سیکل و جریان جوشکاری 9 و 10 کیلوآمپر انجام شد. به منظور بررسی خواص کششی نمونه‌ها آزمون کشش با نرخ 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. همچنین بررسی سطح شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت. نتایج نشان داد که تغییر جریان از 9 به 10 کیلوآمپر در زمان نگه‌داری 5 سیکل باعث افزایش حدود 1 کیلونیوتنی بار بیشینه شد، اما در زمان نگه‌داری 40 سیکل تغییر جریان موجب کاهش حدود 1,6 کیلونیوتنی بار بیشینه گردید؛ بنابراین نقش جریان محدود و وابسته به اشباع قطر دکمهٔ جوش است. در مقابل، افزایش زمان نگه‌داری از 5 به 40 سیکل بیشترین اثر را داشته و جذب انرژی را تا حدود 217 ژول افزایش داد. تحلیل حالت شکست نیز نشان داد که نمونه‌های دارای زمان نگه‌داری بیشتر عمدتاً دچار شکست بیرون‌کشیدگی (PF) شده و انرژی جذب‌شده بسیار بالاتری نسبت به شکست بین‌سطحی (IF) داشتند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که کنترل سرمایش از طریق افزایش زمان نگه‌داری، مؤثرترین عامل در افزایش انرژی جذب‌شده و تغییر حالت شکست در اتصالات DP590/HSLA440 است.

کلمات کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، حالت شکست، جذب انرژی، فولادهای پیشرفته، فولادهای خودرویی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: روح‌اله عشیری، ashiri@iust.ac.ir.

1- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) یکی از پُرکاربردترین روش‌های اتصال در صنایع تولید انبوه است؛ زیرا سرعت پردازش بالا، قابلیت اتوماسیون و هزینه تجهیزاتی پایینی دارد و آن را به گزینه‌ای مناسب برای جوشکاری فولادهای پیشرفته تبدیل می‌کند [1-3].

استفاده از فولادهای کم‌کربن میکروآلیاژی با استحکام بالا و کم‌آلیاژ (HSLA) در صنایع خودروسازی و سازه‌ای به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است [4-6]، زیرا این فولادها نسبت استحکام به وزن مطلوب، چقرمگی خوب و شکل‌پذیری بسیار مناسبی دارند. در همین حال، فولادهای DP نیز به‌عنوان یک ماده مهندسی پرکاربرد توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]

[7] و ترکیب متعادلی از استحکام، شکل‌پذیری و هزینه تولید را برای انواع سازه‌ها و اجزای بدنه خودرو فراهم می‌کنند[9و8]. تضمین اتصال قابل اعتماد و پایدار میان این دو خانواده فولادی - به‌ویژه در کاربردهای حساس به ایمنی - برای عملکرد کلی مجموعه‌های صنعتی بسیار حیاتی است [11و10]. بنابراین جذب انرژی جوش به عنوان یک فاکتور حائز اهمیت در تصادفات خودروها است که بحث اصلی پژوهش حاضر است. بنابراین، اتصال گروه‌های فولادی ناهمسان در ساخت خودروهای مدرن اجتناب‌ناپذیر است [12]. با این حال، اتصال مواد ناهمسان نسبت به مواد همجنس چالش‌برانگیزتر است، زیرا تفاوت‌هایی در خواص شیمیایی و فیزیکی آن‌ها وجود دارد [14و13و8]. از این رو مطالعات متعددی در زمینه اتصال انواع فولادهای پیشرفته انجام شده است . اما همچنان خلاء مطالعاتی در اتصال ناهمسان HSLA440/DP590 مشاهده می‌شود.

خان و همکارانش [15] اثر جریان جوشکاری را بر ریزساختار اتصالات ناهمسان HSLA/DP بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در چنین اتصالاتی، به دلیل اختلاف در درصد کربن، فولاد HSLA نقش رقیق‌کننده دارد و موجب کاهش کسری حجمی مارتنزیت و در نتیجه کاهش سختی در ناحیهٔ جوش می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش کردند که با افزایش جریان جوشکاری، قطر دکمهٔ جوش افزایش می‌یابد و این امر منجر به تغییر حالت شکست از شکست بین‌سطحی (IF) به شکست کنده شدن (PF) می‌شود. ماریا و همکارانش [16] اظهار کردند که نسبت سختی بیشینه به کمینه در HAZ تعیین‌کننده حالت شکست است. وقتی این نسبت به اندازه کافی بزرگ باشد، ماده تمایل به شکست از طریق سازوکار کنده شدن دارد، زیرا این امر تمرکز کرنش پلاستیک را بیشتر در HAZ تسهیل می‌کند تا در ناحیه جوش. ژانگ و همکارانش [17] نیز مشاهده کردند که در اتصال بین فولادهای DP780 و DP600، شکست از سمت DP780 که استحکام بالاتری دارد آغاز می‌شود. آن‌ها این رفتار را به کارسختی نسبت دادند؛ به‌طوری‌که فولاد DP600 ابتدا به نقطه تسلیم می‌رسد و تمرکز تنش را کاهش می‌دهد، در حالی‌که DP780 به دلیل استحکام بالاتر، تمرکز تنش شدیدتری را تجربه کرده و به‌دنبال برگشت مارتنزیت، ترک از سمت DP780 آغاز می‌شود. به‌طور مشابه، هرناندز و همکارانش [18] گزارش کردند که در اتصالات HSLA/DP780 نرمی در سمت DP780 رُخ می‌دهد که به حضور مارتنزیت بازگشتی در HAZ مربوط است. نتایج آزمایش کشش آن‌ها نشان داد که قطر دکمهٔ جوش و بار بیشینه با افزایش جریان جوشکاری برای فولادهای DP600، DP780 و HSLA افزایش می‌یابد، هرچند با نرخ‌های متفاوت. در اتصالات DP600/DP780 شکست در ناحیه نرم‌شده HAZ در سمت DP780 رخ داد، در حالی‌که در اتصالات DP600/HSLA شکست خارج از HAZ و در فلز پایه HSLA اتفاق افتاد.

در مطالعهٔ حاضر اثر زمان نگه‌داری و شدت جریام جوشکاری چهار پالسه به عنوان عامل حائز اهمیت بر خواص مکانیکی در اتصال مقاومتی نقطه‌ای دو فولاد DP590/HSLA440 مورد بررسی قرار گرفت که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مطالعه با تمرکز بر کنترل حرارت ورودی از طریق زمان‌های نگه داری مختلف، اثر آن را بر ریزساختار، خواص کششی و مد شکست بررسی می‌کند. با تقسیم جریان الکتریکی به چند پالس مجزا و اعمال فواصل زمانی کنترل‌شده بین آن‌ها، امکان کنترل بهتر چرخهٔ حرارتی و بهبود توزیع حرارت در ناحیه جوش فراهم می‌شود. این دیدگاه جدید می‌تواند منجر به تعریف یک پنجره بهینه جریان، زمان نگه‌داری و اتصال چند پالسه شود که با بررسی دیگر مطالعات به عنوان یک خلاء مطالعاتی مشاهده می‌شود.

2- روش تحقیق

در مطالعه حاضر از دو نوع فولاد پیشرفته خودرویی دوفازی (DP590) و استحکام بالای کم آلیاژ (HSLA440) برای جوشکاری ناهمسان استفاده شده است. فولادهای مذکور هر دو به ضخامت 2 میلی‌متر و با ترکیب نشان داده شده در جدول(1) از شرکت پوسکو – کره جنوبی تهیه شدند. برای اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی فولادها از دستگاه کوانتومتری مدل FONDRY MASTER Smart استفاده شد.

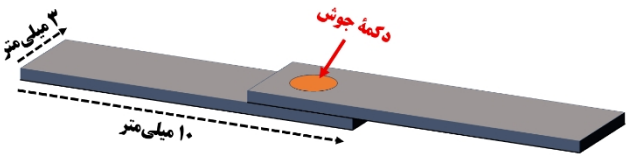
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]

جدول 1- ترکیب شیمیایی فولاد HALA440 و DP590 (درصد وزنی).

DP590	عنصر	Fe	C	Mn	P	S
	درصد	97/400	0/091	1/820	0/018	0/006
HSLA440	عنصر	Fe	C	Mn	P	Mo
	درصد	98/600	0/083	1/240	0/018	0/006

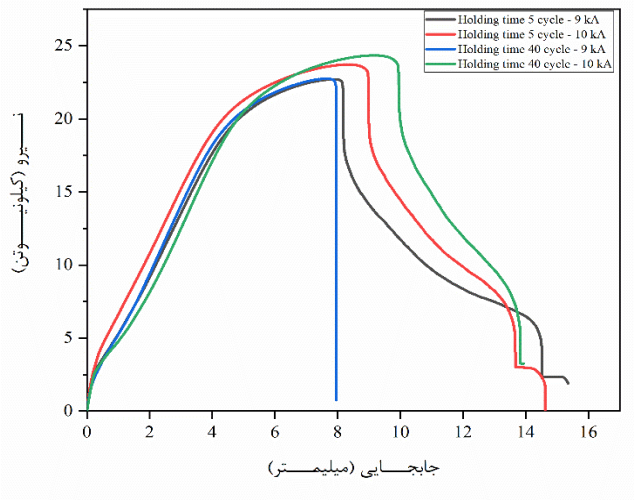
پس از تهیه مواد اولیه، ورقه‌های فولادی بصورت ناهمسان در ابعاد 30 × 100 میلی‌متر مربع بر اساس استاندارد AWS D8.1 با استفاده از گیوتین برش داده شدند. پس از برشکاری ورقه‌ها، سطح ورقه‌ها با استفاده از سنباده 3000 و استون تمیزکاری و بصورت ناهمسان مطابق شکل (1) برای انجام جوشکاری روی یکدیگر ثابت شدند. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در این پژوهش با استفاده از دستگاه جوشکاری آبگرد با الکترود مسی 8 میلی‌متری ساخت شرکت نوین سازان (ایران – تهران) انجام شد. فرایند جوشکاری در پارامترهای ثابت 4 پالس، زمان فشار اولیه 65 سیکل (هر سیکل معادل 20 میلی‌ثانیه)، زمان جوشکاری 28 سیکل، نیروی الکترود 4/5 کیلونیوتن و زمان جوشکاری 7 سیکل مطابق استاندارد AWS D8.1 انجام گرفت. همچنین، دو پارامتر جریان و زمان نگه‌داری به عنوان متغیر در نظر گرفته شدند که شامل زمان نگه‌داری 5 و 40 سیکل و جریان 9 و 10 کیلوآمپر می‌شود. لازم به ذکر است که جوشکاری در ولتاژ ثابت انجام شده است. آزمایش کششی – برشی نمونه‌ها با دستگاه کشش تک محورۀ 30 تنی Universal Testing Machine برای همۀ جریان‌های جوشکاری و زمان‌های نگه داری با نرخ کرنش 1 میلی‌متر بر دقیقه بر اساس استاندارد ASTEM E8 انجام شد. بررسی سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش کشش نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل TESCAN VEGA//XMU) انجام گرفت. همچنین، به منظور سهولت در تشخیص نمونه‌ها، همۀ چهار نمونه نامگذاری شدند. بگونه‌ای که H و D به عنوان نماد و به ترتیب مربوط به فولاد HSLA و DP هستند. همچنین، زمان نگه‌داری و جریان به عنوان ضریب نمایش داده شده‌اند. به عنوان مثال نمونۀ جوشکاری شده در جریان 9 کیلوآمپر و زمان نگه‌داری 40 سیکل به شکل HD409 نمایش داده شده است.



شکل 1- طرح‌وارۀ جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دو فولاد DP590/HSLA440.

3- نتایج و بحث

در شکل (2) منحنی نیرو-جابجایی و در شکل (3) نتایج حاصل از آزمایش کشش جوش مقاومتی نقطه‌ای ناهمسان دو فولاد HSLA440 به DP590 در دو شدت جریان 9 و 10 کیلوآمپر و زمان نگه‌داری 5 و 40 سیکل نمایش داده شده است. مطابق شکل (3-الف تا 3-پ) و جدول (2) مشاهده می‌شود که افزایش شدت جریان در زمان نگه‌داری ثابت منجر به کاهش و یا افزایش قابل توجهی در حداکثر نیرو نشده است. بطوریکه در زمان نگه‌داری ثابت 5 سیکل، افزایش جریان از 9 به 10 کیلوآمپر منجر به افزایش 1 کیلونیوتنی در حداکثر نیرو شد. این درحالی است که در زمان نگه‌داری 40 سیکل این روند معکوس بوده و در اثر افزایش جریان از 9 به 10 کیلوآمپر حداکثر نیرو از 24/3 به 22/7 کیلونیوتن کاهش یافت. بر این اساس تغییر زمان نگه‌داری به عنوان پارامتری که در سرعت سرمایش نقش مهمی را ایفا می‌کند، نقش چشم‌گیرتری را در افزایش بار بیشینه داشته است.



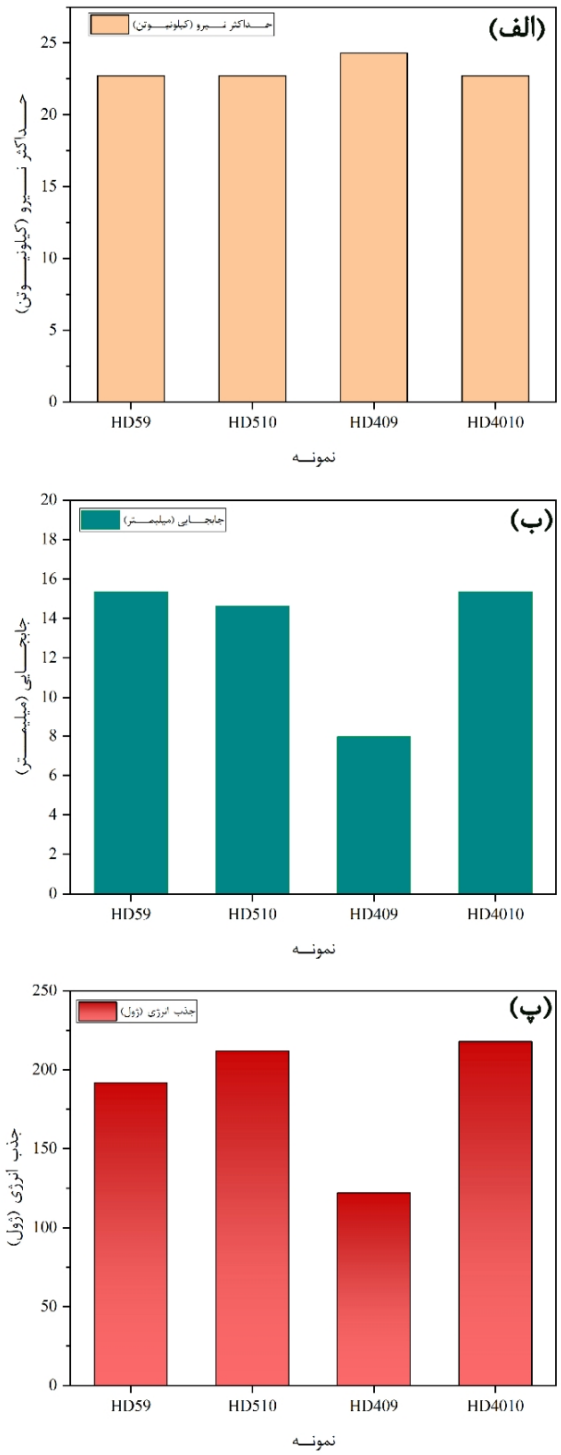
شکل 2- منحنی نیرو-جابجایی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ناهمسان دو فولاد DP590/HSLA440.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]

علت این تغییرات جزئی در حداکثر بار را می‌توان در چند مورد جستوجو کرد. اول آنکه جریان به عنوان یک پارامتر مهم در میزان تولید حرارت است. در نتیجه افزایش جریان می‌تواند حرارت ورودی را افزایش داده و در نتیجه بر هندسهٔ جوش اثر بگذارد. منظور از هندسهٔ جوش عمدتاً قطر دکمهٔ جوش است که اثر مستقیمی را در کیفیت و استحکام اتصال دارد. بنابراین، در اثر افزایش جریان حرارت ورودی افزایش می‌یابد که با افزایش قطر دکمهٔ جوش همراه است. از این رو انتظار می‌رود که با افزایش جریان استحکام افزایش یابد. در مورد نمونه‌های HD59 و HD510 قابل مشاهده است که با افزایش شدت جریان جوشکاری مطابق جدول (2) اندازهٔ دکمهٔ جوش تغییر خاصی نداشته است. از این رو، می‌توان اظهار داشت که جریان‌های 9 و 10 کیلوآمپری به حد اشباع رسیده‌اند و این تغییر اندک در قطر دکمهٔ جوش منجر شده است تا تغییرات استحکام نیز کم است. اما با افزایش زمان نگه داری روند تغییر کرد و در نمونهٔ HD409 حداکثر بار حاصل شد بطوریکه بار بیشینه اتصال به 24/3 کیلونیوتن رسید.

دلیل افزایش بار بیشینه در اثر افزایش زمان نگه‌داری را می‌توان مرتبط به سرعت سرمایش دانست. در طول جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای عوامل متعددی بر سرمایش ناحیهٔ جوش اثر گذار هستند که از جملهٔ آن‌ها فلزپایه و الکترودها هستند. به همین دلیل با افزایش زمان نگه‌داری مدت زمانی که الکترود آبگرد در تماس با دکمهٔ جوش است افزایش یافته است و در نتیجهٔ آن سرعت بیش‌تر می‌شود. افزایش سرعت سرد شدن علاوه‌بر اینکه می‌تواند باعث ریزدانه شدن شود؛ افزایش کسر حجمی مارتنزیت را نیز به همراه خواهد داشت که در نتیجهٔ آن استحکام و سختی اتصال افزایش می یابد. در شکل (3-ب) تغییرات جابجایی نمونه‌ها نشان داده شده است. میزان ازدیاد طول نمونه‌ها ارتباط مستقیمی با نوع شکست آن‌ها دارد. در نمونهٔ جوشکاری شده در زمان نگه‌داری 5 سیکل، افزایش جریان جرشکاری از 9 به 10 کیلوآمپر موجب کاهش ازدیاد طول از 15/35 به 14/62 میلی‌متر شد. این در حالی است که میزان انرژی جذب شده (مساحت زیر نمودار نیرو - جابجایی) افزایش یافته است.



شکل 3- نتایج حاصل منحنی نیرو- جابجایی در دو جریان 9 و 10 کیلوآمپر و زمان نگه‌داری 5 و 40 سیکل، الف- حداکثر نیرو، ب- جابجایی و پ- میزان انرژی جذب شده برای شکست.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]

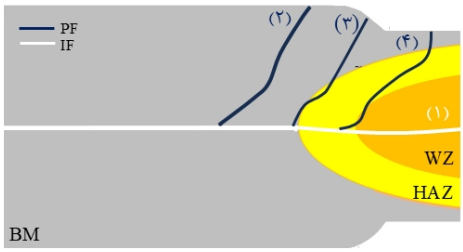
به عبارتی این کاهش اندک در میزان ازدیاد طول با افزایش استحکام و موجب افزایش انرژی جذب شده برای شکست شده است. حال با افزایش زمان نگه‌داری به 40 سکیل، در نمونه‌های HD409 و HD4010 ازدیاد طول به ترتیب در جریان‌های 9 و 10 کیلوآمپر به 7/95 و 15/68 رسید. اما بطور کلی نمونهٔ HD409 در مقایسه با دیگر نمونه‌ها ازدیاد طول و میزان جذب انرژی کمتری داشت. علت این امر را باید در سازوکار شکست جستوجو کرد.

در شکل (3-ب) تغییرات جابجایی نمونه‌ها نشان داده شده است. میزان ازدیاد طول نمونه‌ها ارتباط مستقیمی با نوع شکست آن‌ها دارد. در نمونهٔ جوشکاری شده در زمان نگه‌داری 5 سیکل، افزایش جریان جرشکاری از 9 به 10 کیلوآمپر موجب کاهش ازدیاد طول از 15/35 به 14/62 میلی‌متر شد. این در حالی است که میزان انرژی جذب شده (مساحت زیر نمودار نیرو - جابجایی) افزایش یافته است. به عبارتی این کاهش اندک در میزان ازدیاد طول با افزایش استحکام و موجب افزایش انرژی جذب شده برای شکست شده است. حال با افزایش زمان نگه‌داری به 40 سکیل، در نمونه‌های HD409 و HD4010 ازدیاد طول به ترتیب در جریان‌های 9 و 10 کیلوآمپر به 7/95 و 15/68 رسید. اما بطور کلی نمونهٔ HD409 در مقایسه با دیگر نمونه‌ها ازدیاد طول و میزان جذب انرژی کمتری داشت. علت این امر را باید در سازوکار شکست جستوجو کرد.

جدول 2- نتایج حاصل از آزمایش کشش.

نمونه	بار بیشینه (کیلونیوتن)	جابجایی (میلی‌متر)	جذب انرژی (ژول)	نوع شکست
HD59	22/70	15/35	191/83	PF
HD510	23/73	14/62	211/88	PF
IHD409	24/3	7/95	123/06	IF
HD4010	22/79	15/68	217/87	PF

شکست در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بطورکلی از دو سازوکار فصل مشترکی و بیرون کشیدگی پیروی می‌کند. طرح‌وارهٔ نواحی که این نوع از شکست اتفاق می‌افتد در شکل (4) نشان داده شده است. در شکست نوع فصل مشترکی (بین سطحی) انتشار ترک در ناحیه ذوب رخ می‌دهد. نیروی محرک برای شکست بین‌سطحی، تنش برشی ایجادشده در امتداد فصل مشترک ورق–ورق است که بطور مستقیم دکمهٔ جوش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور بنیادی، حالت شکست توسط رقابت میان تغییر شکل پلاستیک در ناحیه جوش و تمرکز تنش در پیرامون آن کنترل می‌شود. هنگامی که تغییر شکل پلاستیک در ناحیه جوش غالب باشد، احتمال وقوع شکست IF بیشتر می‌شود؛ در حالی‌که تمرکز تنش خارج از ناحیه جوش - در فلز پایه یا ناحیه متاثر از حرارت - به شکست بیرون کشیدگی منجر می‌شود (شکل 4) [19].



شکل 4- طرح وارهٔ مسیر انواع شکست فصل مشترکی (IF) و بیرون‌کشیدگی (PF) در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای.

علاوه‌بر این، افزایش سختی در ناحیه جوش تمایل به شکست بیرون‌کشیدگی را تقویت می‌کند؛ این نتیجه با مشاهدات پورانوری و همکارانش [20] سازگار است. آن‌ها نشان دادند سختی بالاتر ناحیه ذوب، نقطه آغاز شکست را به سمت HAZ یا فلز پایه هدایت می‌کند. چراکه نواحی با سختی کمتر شکل‌پذیری بهتری دارند که باعث می‌شود تا دچار تغییر شکل شده و شکست از این نواحی بصورت PF اتفاق‌افتد.

همان‌طور که در شکل (4و5) دیده می‌شود، در حالت شکست بیرون‌کشیدگی، گسیختگی خارج از ناحیه جوش اتفاق می‌افتد. در شکست PF، انتشار ترک می‌تواند در مرز BM/HAZ یا مرز FZ/HAZ، HAZ و فلز پایه رخ دهد. نیروی محرک برای شکست PF، تنش کششی متمرکز در اطراف پیرامون دکمهٔ جوش است؛ به‌گونه‌ای که با گلویی‌شدن در اطراف دکمهٔ جوش، شکست PF فعال می‌شود. به بیان دیگر، شکست در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]

ناحیه‌ای آغاز می‌شود که کمترین مقاومت را در برابر تغییر شکل پلاستیک دارد [20و21]. بر این اساس در جهت چرایی کم بودن جذب انرژی شکست در نمونهٔ HD405 می‌توان گفت که حالت شکست این نمونه بر خلاف سه نمونهٔ دیگر از نوع فصل مشترکی است. این نوع شکست باعث شده است تا ترک مسیر کوتاه‌تری را تا شکست ناحیهٔ جوش طی کند که در نتیجهٔ آن شکست سریع‌تر رُخ داده است. به همین دلیل، این نمونه دارای حداقل انرژی جذب (123/06 ژول)، ازدیاد طول برای شکست است. اما با بررسی هر سه نمونهٔ HD59، HD510 و HD4010 که در هر سه نمونه حالت شکست بیرون کشیدگی اتفاق افتاده است، مشاهده می‌شود که با افزایش جریان و زمان نگه‌داری میزان انرژی جذب شده افزایش یافته است.

در اثر افزایش جریان دکمهٔ جوش و ورودی حرارت افزایش می‌یابد تا اینکه تعادلی میان ورودی حرارت و نرخ سرد شدن برقرار گردد. این تعادل معمولاً آستانه‌ای را نشان می‌دهد که در آن حالت شکست از IF به PF تغییر می‌کند. بر این اساس، در اتصال ناهمسان HSLA440/DP590، کرنش برشی پلاستیک در جریان‌های بالاتر از 9 کیلوآمپر در زمان نگه‌داری 5 سیکل و 10 کیلوآمپر زمان نگه‌داری 40 سیکل در خارج از ناحیه جوش متمرکز می‌شود و در نتیجه، حالت شکست از IF به PF تغییر می‌یابد. از آنجا که فولاد HSLA نسبت به فولاد DP استحکام و سختی کمتری دارد، گلویی‌شدن بیشتر در مرز HAZ/FZ در سمت HSLA محتمل است (شکل 5). بر اساس نتایج، شکست IF به‌دلیل جذب انرژی کمتر نسبت به شکست PF نامطلوب در نظر گرفته می‌شود. شکست PF با جذب انرژی بسیار بیشتر همراه است که این ویژگی از سطح شکست بزرگ‌تر و مسیر طولانی‌تر انتشار ترک ناشی می‌شود. همان‌گونه که در جدول(2) نشان داده شده است، با افزایش جریان جوشکاری شکست PF غالب است و جذب انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

در شکل(6 – الف و 6-ب)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌های جوشکاری‌شده تحت جریان جوشکاری 8 کیلوآمپر ــ که حالت شکست بین‌سطحی را نشان می‌دهند ــ برای سمت فولاد HSLA ارائه شده است. ناحیه ذوب فولاد DP رفتار شکست تردتری نسبت به سمت HSLA از خود نشان می‌دهد و این موضوع با تراکم بالاتر صفحات کلیواژ همراه است. این افزایش تردی ناشی از درصد بالاتر کربن و در نتیجه مارتنزیت در فولاد DP است که منجر به سختی و استحکام بیشتر آن می‌شود.



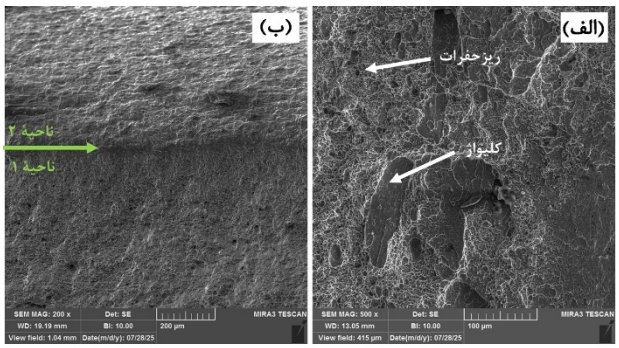
شکل 5- تصاویر شکست نمونه‌ها پس از آزمایش کشش در جریان‌های 9 و 10 و زمان‌های نگه‌داری 5 و 40 سیکل.

در مقابل، سمت فولاد HSLA تعداد زیادی ریزحفره (دیمپل) را نشان می‌دهد که بیانگر آن است که سازوکار شکست تحت جریان جوشکاری 8 کیلوآمپر ترکیبی از سازوکار شکست نرم و ترد بوده است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که شکست در آزمایش کشش عمدتاً از نوع ترد است و آغاز ترک احتمالاً در سمت DP رخ داده و سپس در سراسر اتصال گسترش یافته

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]

است. همان‌گونه که پیش‌تر بحث شد، افزایش جریان جوشکاری به 10 کیلوآمپر باعث تغییر حالت شکست از IF به PF شده و شکست در ناحیه تحت‌تأثیر حرارت (HAZ) فولاد HSLA رخ داد. شکل (6-ب) سطح شکست نمونه جوش‌شده با جریان 10 کیلوآمپر را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح شکست از دو ناحیه مجزا تشکیل شده است. ترک در ناحیه (1) (مطابق شکل (6- ب) آغاز شده و سپس به سوی ناحیه (2) گسترش می‌یابد.

ناحیه (1) دارای تراکم بالایی از دیمپل‌ها در سطح شکست است که نشان‌دهنده یک سازوکار شکست نرم ناشی از تغییرشکل پلاستیک است. در مقابل، ناحیه (2) تحت شرایط بار بیش از حد قرار گرفته و شکست ترد در آن رخ داده است. بنابراین، این ناحیه با صفحات کلیواژ مشخص می‌شود. پورانوری و همکارانش [22] گزارش کرده‌اند که چنین میکروحفره‌هایی نشانگر تغییرشکل برشی شکست نرم ناشی از کرنش پلاستیک هستند. همچنین، در شکست کلیواژی ــ که هنگام انتشار ترک از HAZ به سمت ناحیه رخ می‌دهد ــ بیشینه بار توسط چقرمگی شکست ناحیه ذوب کنترل می‌شود.



شکل 6- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌ها در جریان‌های، الف- 8 کیلوآمپر و ب- 10 کیلوآمپر.

در شکل (7) و (8) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و نوری از ناحیهٔ جوش و ناحیهٔ تحت تاثیر حرارت هر دو فولاد ارائه شده است. مشاهده می‌شود که ناحیهٔ جوش، متشکل از مارتنزیت و بصورت محدود فریت ویدمن اشتاتن است که در اثر ذوب و انجماد و سرعت سرد کردن بالا در ناحیهٔ جوش تشکیل شده‌اند. مشاهده می‌شود که در اثر افزایش زمان نگه‌داری از 5 به 40 سیکل در جریان جوشکاری 10 کیلوآمپر، به دلیل افزایش سرعت سرمایش حجم مارتنزیت تشکیل شده در ناحیهٔ جوش افزایش یافته است.با افزایش زمان نگه‌داری، مدت زمانی که الکترود با مقطع اتصال در تماس است افزایش می‌یابد. سرعت سرمایش بالا، شیب حرارتی شدیدی در ناحیه جوش ایجاد می‌کند. همچنین، حضور عناصر آلیاژی و اختلاف حلالیت آن‌ها در حالت جامد و مایع، نفوذ در جبهه جامد/مایع را محدود می‌کند که باعث ایجاد مادون انجماد ترکیبی می‌گردد.

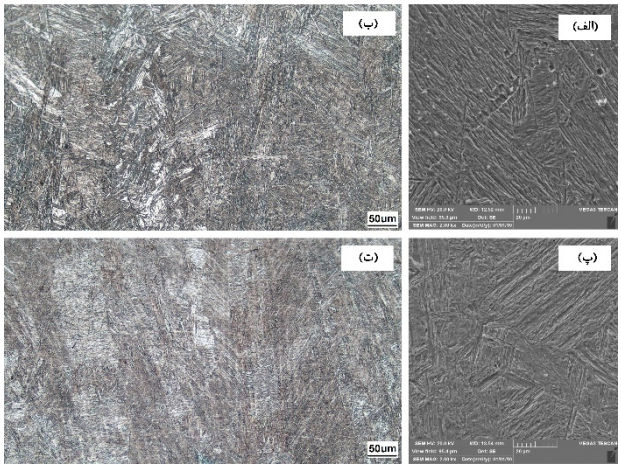
ترکیب این دو عامل باعث می‌شود رشد دانه‌ها نه به صورت هم‌جهت و یکنواخت، بلکه به شکل دانه‌های ستونی که داخل آن‌ها رشد دندریتی حاکم است در راستای عمود بر مرز جامد/مایع صورت گیرد. بنابراین، افزایش انرژی جذب شده (مساحت زیر نمودار) در زمان‌های نگه‌داری بیشتر ناشی از افزایش کسر حجمی مارتنزیت در ناحیهٔ اتصال است.

شکل(8) مشاهده می‌شود که در یک شدت جریان ثابت، با افزایش زمان نگه داری از 5 به 40 سیکل، بر کسر حجمی مارتنزیت در ناحیهٔ تحت تاثیر حرارت به دلیل افزایش سرعت سرمایش افزوده شده است. به گونه‌ای که در سمت فولاد HSLA440 نیز مقادیری از فاز ماتنزیت مشاهده می‌شود؛ اما مقادیر آن در مقایسه با فولاد DP590 که از کربن بالاتری برخورد دارد است کمتر است. در طول جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، حداکثر دمایی که این ناحیه تجربه می‌کند بیش از خط Ac_3 است و بطورکلی دما در محدودهٔ بالایی منطقهٔ آستنیت است (بیش‌از 1100 درجهٔ سانتی‌گراد) و ماده بطور یکنواخت در این ناحیهٔ آستنیته می‌شود.

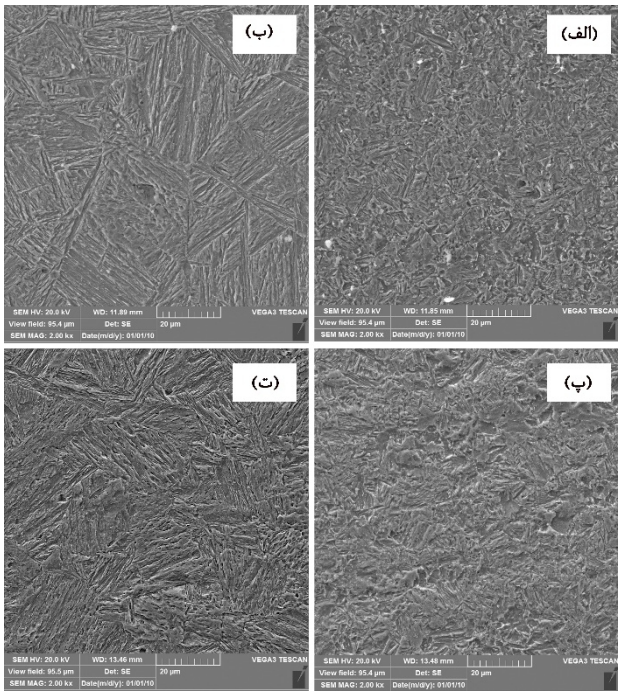
با آستنیته‌شدن کامل و پس از آن به سبب سرد شدن سریع و غیرتعادلی، فاز مارتنزیت از آستنیت رسوب می‌کند. وجود مارتنزیت کمتر در سمت فولاد HSLA440 باعث شده است تا استحکام این ناحیهٔ در مقایسه با فولاد DP590 کمتر شود که در نتیجهٔ آن شکست از ناحیهٔ تحت تاثیر حرارت فولاد HSLA440 اتفاق افتاده است. بنابراین، مشاهده می‌شود که ازدیاد طول در نمونه‌هایی که بصورت PF شکسته‌اند، بیشتر است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]



شکل 7 – تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و میکروسکوپی نوری منطقه جوش در جریان 10 کیلوآمپر، الف- زمان‌نگه‌داری 5 سیکل و پ و ت- زمان نگه‌داری 40 سیکل.



شکل 8- تصاویر ریزساختار ناحیهٔ تحت تاثیر حرارت در جریان 10 کیلوآمپر، در سمت فولاد HSLA440

الف- زمان نگه‌داری 5 سیکل پ- زمان نگه‌داری 40 سیکل، در سمت فولاد DP590 ب- زمان نگه‌داری 5 سیکل و ت- زمان نگه‌داری 40 سیکل.

4-نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش اثر زمان نگه‌داری و جریان جوشکاری بر میزان جذب انرژی و حالت شکست در جوشکاری ناهمسان دو فولاد DP950/HSLA440 بود. نتایج حاصل از این پـژوهش به شرح زیر است:

-افزایش شدت جریان جوشکاری در محدوده 9 و 10 کیلوآمپر تغییر قابل توجهی در بار بیشینه ایجاد نکرد.

-زمان نگه‌داری نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به جریان داشت؛ به گونه‌ای که افزایش آن موجب افزایش سرعت سرمایش، بار بیشینه و ازدیاد طول شد.

-افزایش زمان نگه‌داری گرچه جریان لازم برای شکست بیرون‌کشیدکی را افزایش داد اما؛ در نهایت منجر به افزایش قابل توجه میزان جذب انرژی شکست.

-شکست در زمان نگه‌داری 5 سیکل در دو جریان 9 و 10 کیلوآمپر از نوع بیرون کشیدگی و در زمان نگه‌داری 40 سیکل، در جریان 9 کیلوآمپر از نوع فصل مشترکی و 10 کیلوآمپر از نوع بیرون کشیدگی بود.

-نمونهٔ جوشکاری‌شده در جریان 10 کلوآمپر و زمان نگه‌داری 40 سیکل با جذب انرژی 217/87 ژول و بیشنیهٔ بار 24/3 کیلونیوتن نمونهٔ بهینه بود.

منابع

1-R. Ashiri, M. Shamanian, H. R. Salimijazi, Y. Park, and M. R. Salmani, "Welding challenges facing advanced automotive steels in resistance spot welding process: A review," JWSTI, vol. 6, no. 2, p. 13, 2020. [Online]. Available: http://jwsti.iut.ac.ir/article-1-325-fa.html.

2-M. Wohner, N. Mitzschke, and S. Jüttner, "Resistance spot welding with variable electrode force—development and benefit of a force profile to extend the weldability of 22MnB5+AS150," Welding in the World, vol. 65, no. 1, pp. 105-117, 2021/01/01 2021, doi: 10.1007/s40194-020-01001-2.

3-M. S. Khan, S. D. Bhole, D. L. Chen, G. Boudreau, E. Biro, and J. V. Deventer, "Resistance Spot Welding Characteristics and Mechanical Properties of Galvannealed HSLA 350 Steel," Canadian Metallurgical Quarterly, vol. 48, no. 3, pp. 303-310, 2009, doi: http://10.1179/cmq.2009.48.3.303.

4-A. Ghandi, M. Shamanian, and M. R. Salmani, "Investigation of structural changes in resistance spot welding of advanced high strength steel DP590," JWSTI, vol. 6, no. 1, p. 57, 2020. [Online]. Available: http://jwsti.iut.ac.ir/article-1-301-fa.html.

5-D. Zhao, N. Vdonin, L. Radionova, L. Glebov, and K. Guseinov, "Resistance spot welding of high-strength low-alloyed (HSLA) 420 steel and bake-hardening (BH) 220 steel," The International Journal of Advanced

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]

nano/ultrafine-grained IF steel sheets," Materials Chemistry and Physics, vol. 281, p. 125909, 02/01 2022, doi: 10.1016/j.matchemphys.2022.125909.
15-M. Khan, s. D. Bhole, D. Chen, E. Biro, G. Boudreau, and J. Deventer, "Welding behaviour, microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welds between galvannealed HSLA350 and DP600 steels," Science and Technology of Welding & Joining, vol. 14, pp. 616-625, 2009, doi: http://10.1179/136217109X12464549883295.
16-M. Marya and X. Q. Gayden, "Development of requirements for resistance spot welding Dual-Phase (DP600) steels part 1 - The causes of interfacial fracture," Welding journal, vol. 84, pp. 172-s, 2005.
17-H. Zhang, A. Wei, X. Qiu, and J. Chen, "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints," Materials & Design (1980-2015), vol. 54, pp. 443-449, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.027.
18-V. Baltazar-Hernandez, M. Kuntz, M. Khan, and Z. Yushan, "Influence of microstructure and weld size on the mechanical behaviour of dissimilar AHSS resistance spot welds," Science and Technology of Welding & Joining, vol. 13, pp. 769-776, 2008, doi: http://10.1179/136217108X325470.
19-V. Feizollahi et al., "Factors affecting weld quality in resistance spot welding of advanced high strength steels," Scientific Reports, vol. 15, no. 1, p. 30012, 2025, doi: http://10.1038/s41598-025-14174-x.
20-M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors," Materials Science and Engineering: A, vol. 528, no. 29, pp. 8337-8343, 2011.
https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.017.
21-M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi, and M. Goodarzi, "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds," Science and Technology of Welding and Joining, vol. 12, no. 3, pp. 217-225, 2007.
http://10.1179/174329307X164409.
22-M. Pouranvari, "Understanding the factors controlling the interfacial failure strength of advanced high-strength steel resistance spot welds: hardness vs. fracture toughness," Science and Technology of Welding and Joining, vol. 23, no. 6, pp. 520-526, 2018, doi: http://10.1080/13621718.2017.1421303.
Manufacturing Technology, vol. 128, no. 3, pp. 1441-1453, 2023/09/01 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12013-9.
6-P. Gillela, J. Jaidi, K. Gangaraju, and S. Pramanik, "Experiments and Simulations Study on Resistance Spot Welding of HSLA Steel Sheets: Process Parameters and Quality Analysis," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 34, 04/29 2025, doi: 10.1007/s11665-025-11270-x.
7-V. Singh, M. M. Pande, K. Bhanumurthy, V. Chavan, and I. Samajdar, "Resistance Spot Welding (RSW) of Dual-Phase (DP590) Steel," Journal of Materials Engineering and Performance, 2025/10/22 2025, doi: 10.1007/s11665-025-12284-1.
8-I. A. Soomro, S. R. Pedapati, and M. Awang, "Double Pulse Resistance Spot Welding of Dual Phase Steel: Parametric Study on Microstructure, Failure Mode and Low Dynamic Tensile Shear Properties," Materials, vol. 14, no. 4, p. 802doi: 10.3390/ma14040802.
9-S. Nayak, E. Biro, and Y. Zhou, Resistance Spot Welding of Dual-phase Steels: Heat affected zone softening and tensile properties. 2012.
10-A. Bahmani and R. Ashiri, "Investigating the effect of zinc coating on microstructure and mechanical properties in resistance spot welding of QP980 advanced high-strength automotive steel," JWSTI, vol. 11, no. 1, p. 81, 2025, doi: 10.47176/JWSTI.2025.21.
11-G. Janardhan, K. Kishore, K. Dutta, and G. Mukhopadhyay, "Tensile and fatigue behavior of resistance spot-welded HSLA steel sheets: Effect of pre-strain in association with dislocation density," Materials Science and Engineering: A, vol. 793, p. 139796, 2020/08/19/ 2020.
https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139796.
12-A. S. Adkine and S. K. Biradar, "A review of the effects of resistance spot welding on metallurgical and mechanical characteristics," Welding International, vol. 39, no. 2, pp. 52-65, 2025/02/01 2025, doi: 10.1080/09507116.2024.2419551.
13-F. Yaghoobi, R. Jamaati, and H. J. Aval, "Resistance spot welding of high-strength DP steel and nano/ultrafine-grained IF steel sheets," Materials Chemistry and Physics, vol. 281, p. 125909, 2022/04/01/ 2022, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125909.
14-F. Yaghoobi, R. Jamaati, and H. Jamshidi Aval, "Resistance spot welding of high-strength DP steel and

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.23]