

## بررسی جوشکاری نقطه‌ای فولاد TRIP به صورت المان محدود و تجربی (مطالعه دوروش FSSW و RSW)

علی ابراهیم پور<sup>۱\*</sup>، امیر مصطفی پور<sup>۲</sup>، نعیمه حقی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، a.ebrahimpoor@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷

### چکیده

فولادهای TRIP یکی از انواع فولادهای استحکام بالای پیشرفته می‌باشند که به دلیل خواص مکانیکی بسیار خوبشان (به علت برخورداری از یک ریزساختار چندفازی شامل فریت، بینیت، مارتنزیت و آستنیت باقیمانده) در حال جایگزینی با فولادهای معمولی در صنعت خودروسازی می‌باشند. جوشکاری‌های ذوبی به دلیل از بین بردن ریزساختار این فولادها کاربرد آنها را با چالش روبرو کرده‌اند. لذا در این تحقیق دو روش جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی (RSW) و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) که به ترتیب نیمه ذوبی و حالت جامد می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با تحلیل المان محدود توزیع و تاریخچه دمایی در هر دو روش به دست آمد و سپس به صورت تجربی ورق‌ها با این دو روش متصل گردیدند. براساس اطلاعات دمایی حاصل از تحلیل المان محدود و داده‌های حاصل از تست‌های تجربی مانند ریزساختار، میکروسختی، مقدار آستنیت باقیمانده در منطقه جوش و استحکام اتصالها به مقایسه دو روش پرداخته شد. ریزساختار منطقه جوش در هر دو روش عمدتاً مارتنزیتی بود، اما در روش FSSW مقداری آستنیت باقیمانده نیز شناسایی گردید. بیشترین سختی در RSW برابر ۵۰۵ VHN و در FSSW برابر ۴۷۸ VHN بود که علت آن مربوط به دمای بیشینه کمتر و عدم ذوب و انجماد در حین فرآیند و وجود مقداری آستنیت در ریزساختار فلزجوش می‌باشد. بیشینه دمای حاصل برای FSSW و RSW به ترتیب برابر ۹۴۰ و ۱۹۰۰ درجه سانتیگراد بود. همچنین استحکام اتصال در FSSW برابر ۹/۸ کیلونیوتن بود که از استحکام اتصال حاصل از RSW (۷/۸ کیلونیوتن) بیشتر بود. این امر نیز به دلیل وجود ساختار مارتنزیتی با سختی مناسب و باقی ماندن مقداری آستنیت در ساختار نهایی می‌باشد.

### واژگان کلیدی

فولاد TRIP، جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، آنالیز اجزاء محدود

## Finite element and experimental investigation of spot welding of TRIP steel (FSSW and RSW)

A. Ebrahimpoor, A. Mostafapur, N. Haghi

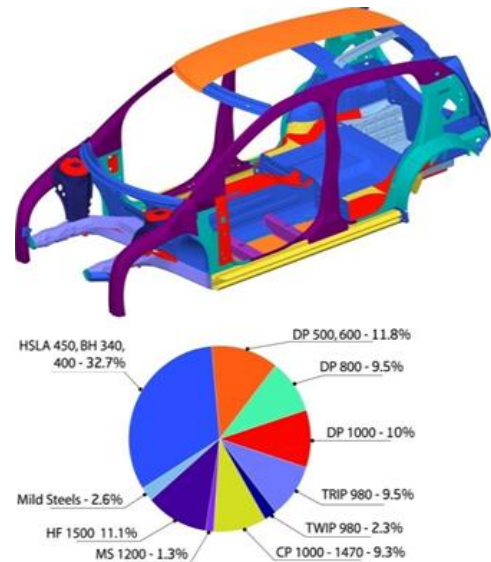
### Abstract

Transformation induced plasticity (TRIP) steel is one of the advanced high strength steels (AHSS) group with multiphase microstructure that are replacing conventional steels in the automotive industry because of their very good mechanical properties. Fusion welding methods have challenged their application by destroying of microstructure. Therefore, in this paper two type of spot joining, resistance spot welding (semi-fusion) and friction stir spot welding (solid state), investigated. First, thermal history of metal during both of welding obtained using finite element analysis. Then, TRIP steel sheets joined under same condition of finite element models. Based on the temperature data obtained from finite element analysis and the data obtained from experimental tests such as microstructure (FE-SEM and XRD), microhardness, residual austenite value in the welding zone and the lap shear strength of joints, a comparison was made between the two methods. The microstructure of the weld region in both methods was mainly martensite, but in the FSSW method, some retained austenite also identified. Also, the maximum hardness in RSW was 505 VHN and in FSSW was 478 VHN. It can be related to the lower peak temperature and non-melting and non-solidification during the process, and the presence of some austenite in the microstructure of the weld metal. The maximum temperatures for the FSSW and RSW were 940 and 1900 °C, respectively. The FSSW strength was 9.8 kN, which was higher than the RSW bond strength (7.8 kN). This is due to the presence of a martensitic microstructure with an appropriate hardness and a certain amount of austenite in the final microstructure.

### Keywords

TRIP steel, FSSW, RSW, Finite element analysis

در دهه‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای تولید فولادهای با استحکام بالا و در عین حال با چقرمگی قابل ملاحظه برای استفاده در صنعت خودرو صورت گرفته است. فولادهای استحکام بالای پیشرفته (AHSS) به دلیل دارا بودن خصوصیات از قبیل کاهش وزن نهایی خودرو (به دلیل کاهش مصرف سوخت)، بالا بودن استحکام (به دلیل افزایش ایمنی سرنشینان خودرو) و بالا بودن جذب انرژی به هنگام تغییر شکل‌های زیاد، برای استفاده در صنعت خودروسازی بسیار مناسب می‌باشند [۱]. انواع فولادهای AHSS را می‌توان به طور خلاصه عبارتند از [۱ و ۲]: فولادهای دوفازی<sup>۱</sup> (DP)، فولادهای تریپ<sup>۲</sup> (TRIP)، فولادهای با ساختار پیچیده<sup>۳</sup> (CP)، فولادهای مارتنزیتی<sup>۴</sup> (M). شکل (۱) افزایش استفاده از فولادهای AHSS در صنعت خودروسازی را براساس پیش‌بینی شرکت FSV نشان می‌دهد.



شکل ۱- استفاده از فولادهای AHSS در صنعت خودروسازی [۱]

در میان فولادهای AHSS فولادهای TRIP به دلیل داشتن ترکیب بسیار خوبی از استحکام و شکل‌پذیری از اهمیت بالایی برخوردارند. این فولادها دارای فازهای مختلف در ریزساختار خود می‌باشند که عبارتند از: فریت، بینیت، آستنیت باقیمانده و احتمالاً به صورت جزئی مارتنزیت.

اصطلاح تریپ (بهبود رفتار تغییر شکل پلاستیکی فولاد در اثر دگرگونی آستنیت به مارتنزیت در نتیجه اعمال نیروهای مکانیکی) اولین بار توسط Zackay و همکارانش در سال ۱۹۶۷ به کار گرفته شد [۲]. آنها بیان داشتند مارتنزیتی که از آستنیت

باقیمانده حین تغییر شکل ایجاد می‌شود، سبب بروز خواص مکانیکی مناسب در این فولاد می‌شود. در واقع وجود فاز نیمه پایدار آستنیت در ریزساختار این فولاد سبب بروز خواص مکانیکی مطلوبی مانند افزایش استحکام، افزایش چقرمگی و افزایش انعطاف‌پذیری می‌گردد.

یکی از محدودیت‌ها برای کاربرد گسترده فولاد TRIP جوشکاری این فولادها می‌باشد. تا کنون، تحقیقات بسیاری در رابطه با یافتن یک روش جوشکاری مناسب برای فولاد TRIP انجام شده، اما با موفقیت‌های کمی همراه بوده است. جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی<sup>۵</sup> (RSW) در حال حاضر بیشترین کاربرد را در زمینه مونتاژ خودرو دارد [۴]؛ فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۶</sup> (FSW) که در سال ۱۹۹۱ توسط انستیتو جوش انگلستان ابداع شد [۵] نیز در سال‌های اخیر و به صورت نقطه‌ای (FSSW) برای اتصال ورق‌های فولادی مورد استفاده قرار گرفته و حتی به مرحله صنعتی و تولید انبوه نیز رسیده است [۶].

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای AHSS در برخی تحقیقات قبلی مورد بررسی قرار گرفته است. در یکی از این تحقیقات، Hernandez و همکارانش [۷] با اتصال فولادهای TRIP و DP به یکدیگر به این نتیجه رسیدند که منطقه‌ی جوش در فولاد TRIP با ترکیب C-Mn-Si دارای ریزساختار تک‌فاز مارتنزیتی می‌باشد. Khan و همکارانش [۸] نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. در تحقیقی دیگر Nayak و همکارانش [۹] رابطه بین سختی و ریزساختار را در منطقه ذوب فولادهای TRIP جوشکاری شده به روش RSW بررسی کردند و دریافتند که با افزایش درصد کربن و سیلیسیم مقدار مارتنزیت افزایش می‌یابد. هم‌چنین، Cretteur و همکارانش [۱۰] جوشکاری فولاد TRIP به روش RSW را مطالعه کرده و نشان دادند که با انجام ترکیبی از پیش و پس گرم فولاد می‌توان کارایی ماده را بهبود بخشید. Khan و همکارانش [۴] ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال RSW را در تعدادی از فولادهای AHSS از جمله فولاد TRIP780 مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رابطه بین ترکیب شیمیایی و سختی منطقه ذوب را نیز مطالعه نمودند.

از طرفی دیگر به کارگیری روش اتصال FSW و نوع نقطه‌ای آن با گذشت زمان در صنعت و به ویژه صنایع خودروسازی افزایش یافته است. مزایای این روش از جمله امکان اتصال قطعات غیرهم‌جنس باعث شده تا خودروسازان به استفاده از این روش علاقه‌مند گردند. در یکی از این موارد شرکت هوندا با استفاده از روش جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی

نقطه‌ای دو قطعه غیر هم‌جنس فولاد و آلومینیوم از اجزاء شاسی خودرو را به هم متصل کرده است.

در رابطه با FSW و FSSW فولادهای TRIP کارهای محدودتری انجام شده است. در یکی از این تحقیقات **Mironov** و همکارانش [۱۱] ریزساختار مناطق مختلف جوش FSW در فولادهای TRIP را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از روش‌های مختلف بررسی ریزساختار به این نتیجه رسیدند که در منطقه متاثر از حرارت به دلیل کروی شدن آستنیت‌های باقیمانده در ریزساختار و پراکندگی آنها، پدیده نرم شدن رخ می‌دهد که به نوبه خود باعث کاهش استحکام اتصال در این ناحیه می‌شود. در یک پژوهش دیگر **Tehrani-Moghadam** و همکارانش [۱۲] روش FSP را برای فولادهای TRIP با درصد نیکل بالا به کار برده‌اند و خواص مکانیکی و ریزساختاری را در سرعت‌های پیشروی مابین ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داد که استحکام در نمونه‌های FSP شده افزایش قابل توجهی داشته ولی افزایش طول نمونه‌ها محدود گردیده است که علت آن می‌تواند کاهش اثر TRIP در نمونه‌های FSP شده باشد. همچنین نویسندگان این مقاله در دو تحقیق قبلی خود به بررسی شبیه سازی المان محدود، تاثیر پارامترها بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد TRIP متصل شده به روش FSSW پرداخته‌اند [۱۳ و ۱۴].

مزایا و محدودیت‌های دو روش ذکر شده به نحوی است که نیاز به انجام تحقیقاتی گسترده برای دستیابی به اطلاعاتی در رابطه با شرایط بکارگیری هر یک از آنها در اتصال فولادهای TRIP را ضروری به نظر می‌رساند. اگرچه در یک تحقیق **Khan** و همکارانش [۱۵] اتصالات RSW و FSSW را در فولادهای DP600 از نظر ریزساختار و خواص مکانیکی باهم مقایسه نمودند و به این نتیجه دست یافتند که منطقه HAZ برای هر دو روش مشابه است و در جوشکاری FSSW علاوه بر منطقه HAZ، منطقه‌ای دیگر به نام TMAZ، تشکیل می‌شود که دارای ریزساختار مارتنزیتی و بینیتی به همراه فریت می‌باشد، اما تاکنون هیچ تحقیق دیگری در رابطه با مقایسه نتایج حاصل از اتصال ورق‌های فولادی و به خصوص فولادهای TRIP با روش‌های RSW و FSSW انجام نگرفته است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر فرآیندهای یاد شده بر رفتار حرارتی و خواص ریزساختاری و مکانیکی فولاد TRIP می‌باشد.

## ۲- روش تحقیق

ریزساختار چندفازی فولاد TRIP معمولاً بعد از انجام نورد سرد،

طی دو مرحله عملیات حرارتی به دست می‌آید. مرحله‌ی اول شامل عملیات آنیل میان بحرانی<sup>۱</sup> (IA) می‌باشد که در حین آن میزان کسر حجمی آستنیت و فریت در محدوده‌ی دمایی بین  $Ac_1$  و  $Ac_3$  کنترل می‌شود. مرحله‌ی دوم بلافاصله بعد از مرحله‌ی اول انجام می‌شود که در آن نمونه به صورت هم‌دما در محدوده‌ی دمایی استحاله‌ی بینیتی نگه داشته می‌شود که به آن استحاله هم‌دما<sup>۲</sup> (IBT) می‌گویند. در این مرحله بخشی از آستنیت به بینیت تبدیل شده و باعث پایداری آستنیت باقیمانده تا دمای محیط می‌شود [۱۶]. فولاد استفاده شده در این تحقیق دارای ترکیب شیمیایی 0.021 C، 1.5 Si، 1.68 Mn، 0.03 Cr، 0.016 Al، 0.01 Ni و 0.009 S (wt. %) این فولاد بعد از ریخته‌گری، نورد گرم، نورد سرد و عملیات حرارتی دو مرحله‌ای مخصوص تهیه گردید. برای تولید فولاد TRIP از دماهای ۷۹۰ و ۳۵۰ درجه سانتیگراد به ترتیب برای مراحل IA و IBT استفاده شد. نحوه به دست آوردن دماهای مختلف استحاله‌ای مربوط به فولاد مورد مطالعه که از طریق نرم افزارهای **Termo-Calc** و **MCUG83** انجام شد در تحقیق قبلی نویسندگان به طور کامل شرح داده شده است [۱۷]. همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی این فولاد در دیگر تحقیق نویسندگان ارائه گردیده است [۱۴]. از نرم افزار المان محدود **ABAQUS** ورژن ۶.۱۲.۱ برای حل مسئله دینامیکی حرارتی-مکانیکی کوپل صریح<sup>۳</sup> در FSSW و کوپل الکتریکی-حرارتی-مکانیکی برای RSW استفاده شده است. استفاده از روش صریح باعث تسریع محاسبات در مسایل همراه با تغییر شکل زیاد می‌گردد [۱۸].

قطعه‌کار برای تحلیل المان محدود و انجام جوشکاری تجربی شامل دو ورق با ابعاد  $100\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 1/2\text{ mm}$  که به مقدار ۳۵ mm روی هم قرار گرفته‌اند می‌باشد؛ ابعاد قطعه‌کار برابر با ابعاد ورق‌ها در جوشکاری تجربی و مطابق استاندارد **ISO 14273** [۱۹] انتخاب شدند. شکل (۲) هندسه ورق‌ها را در مدل المان محدود و همچنین اندازه مش بندی را نشان می‌دهد. پس از انجام شبیه سازی در اندازه مش‌های مختلف و براساس دقت نتایج به دست آمده برای دما (با توجه به داده‌های تجربی) تعداد حدوداً ۲۴۰۰۰ المان برای مدل انتخاب شد. مش‌بندی قطعه‌کار در نزدیکی محل فرود ابزار ریزتر و با دورشدن از آن بزرگتر می‌شود تا در این ناحیه حساس دقت نتایج افزایش یابد. اندازه مش در ناحیه اطراف محل فرود ابزار حدوداً ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. قطعه کار توسط المان‌های با درجه آزادی حرارت و جابجایی که با کد **C3D8RT**

برای بررسی ریزساختار از دستگاه FE-SEM و میکروسکوپ نوری و برای اندازه گیری درصد آستنیت باقیمانده از روش تفرق اشعه ایکس یا XRD استفاده شد. همچنین میکروسختی نمونه‌ها به روش ویکرز و تحت نیروی ۱۰۰ گرم و مدت زمان ۱۵ ثانیه، اندازه گیری شد. برای مطالعه استحکام اتصال‌ها، نمونه‌های جوشکاری شده که مطابق استاندارد ISO 14273 آماده شده بودند، تحت آزمون کشش برشی قرار گرفتند. دستگاه مورد استفاده از نوع SANTAM و دارای یک اکستنسومتر بود که برای اندازه‌گیری مقدار ازدیاد طول استفاده می‌گردد.

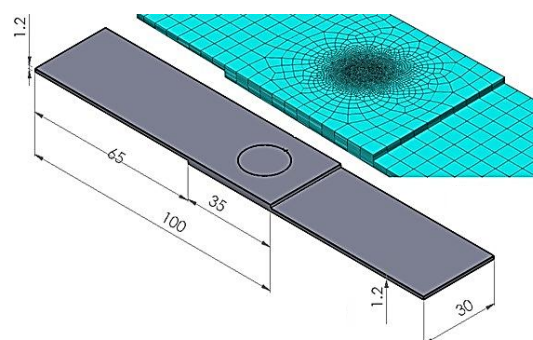
### ۳- نتایج و بحث

شکل (۳) نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد. قطعه متصل شده با روش RSW دارای ظاهر مناسب‌تری می‌باشد. علت این است که گرمای ایجاد شده در این روش در محل تماس دو ورق بالا و پایینی حاصل می‌شود که باعث ذوب نسبی و اتصال می‌گردد و در نتیجه قابل رویت نمی‌باشد. مقطع عرضی دو اتصال در حالت‌های تجربی و شبیه‌سازی در شکل (۴) باهم مقایسه شده است. مقدار دمای به دست آمده از تحلیل المان محدود در این تحقیق مطابقت قابل قبولی با نتایج به دست آمده در مطالعات تجربی و المان محدود قبلی که در شرایط یکسان انجام شده بودند، داشت [۱۳ و ۱۴].

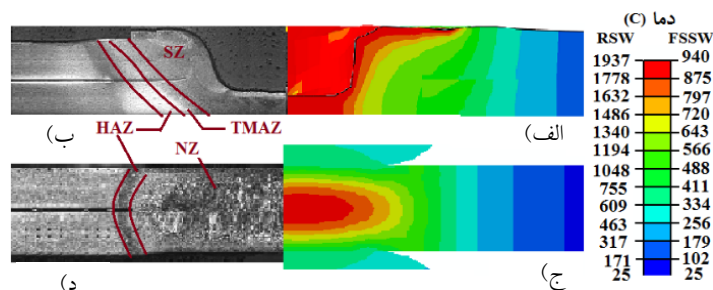


شکل ۳- نمونه‌های جوشکاری شده

در نرم‌افزار تعریف می‌شود مش‌بندی گردید. این المان‌ها دارای ۸ گره می‌باشند. در جوشکاری FSSW که همراه با تغییر شکل‌های گسترده می‌باشد از روش اویلری-لاگرانژی دلخواه (ALE) برای بازسازی مش‌ها در تغییر شکل استفاده گردید. این روش قبلاً با موفقیت برای شبیه‌سازی فرآیند FSW استفاده شده است [۱۳ و ۱۴]. در مطالعات قبلی برای محاسبه بیشینه دما و نرخ سرد شدن در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادهای مشابه با فولاد تحقیق حاضر مقدار ضریب اصطکاک برابر ۰/۴۹ گزارش شده است [۲۰] که در این تحقیق نیز همین مقدار انتخاب گردید. شرایط جوشکاری در RSW عبارت بودند از: شدت جریان ۸ kA، زمان جوشکاری ۲۰ چرخه برق متناوب با فرکانس ۵۰ هرتز و نیروی فشار ۳ کیلو نیوتن. همچنین از الکترودهای مسی با قطر ۵ میلی‌متر استفاده گردید. این مقادیر به عنوان مناسب‌ترین شرایط از منابع انتخاب گردیدند [۲۱]. همچنین شرایط جوشکاری در FSSW که مستخرج از منابع بودند [۱۳ و ۱۴]، عبارت بودند از: سرعت چرخشی ۱۲۰۰ rpm، زمان نگهداری ۲ S و عمق نفوذ ۰/۲ mm از یک ابزار تنگستن، کاربرد با ابعاد ۵، ۱/۹ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب برای قطر پین، طول پین و قطر شانه استفاده گردید.



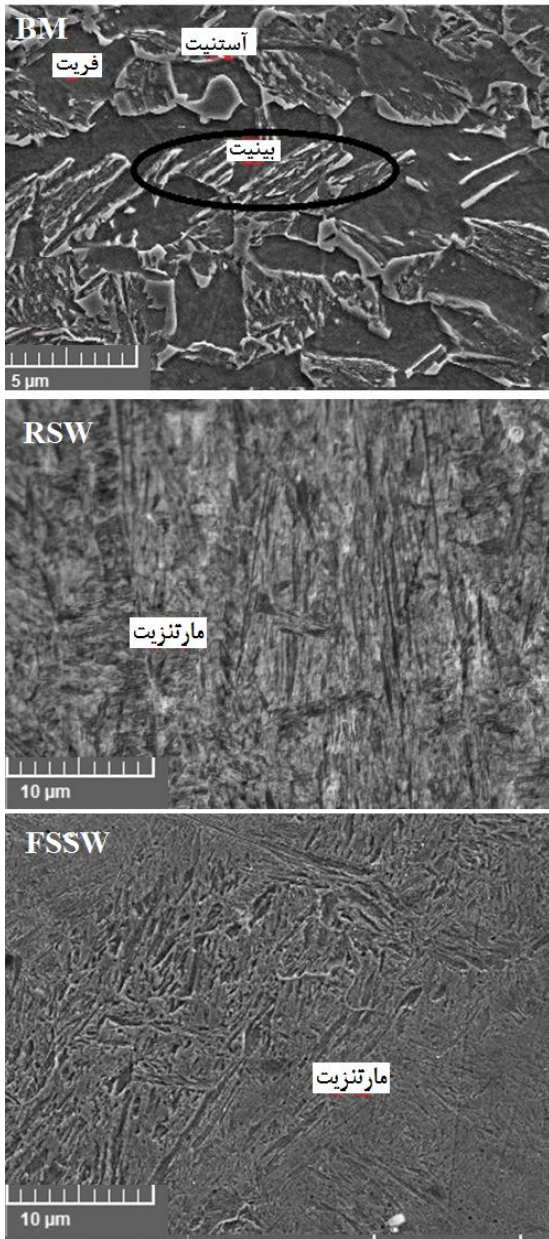
شکل ۲- نمایش ابعاد قطعه کار و مش‌بندی ورق‌ها



شکل ۴- توزیع دمای حاصل از آنالیز المان محدود و تصاویر ماکرو از مقطع جوش و مناطق مختلف

(الف) FSSW، (ب) FSSW، (ج) RSW و (د) RSW

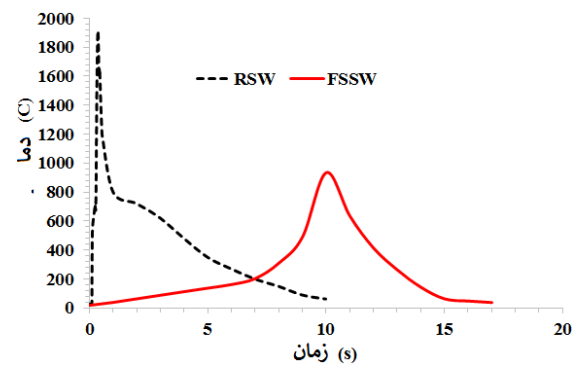
علت این امر افزایش دما تا ناحیه کاملاً آستنیتی و سرد شدن آن با سرعتی بیش از سرعت بحرانی تبدیل مارتنزیتی می‌باشد.



شکل ۶- ریزساختار فلز پایه، منطقه جوش NZ در RSW و منطقه FSSW در SZ

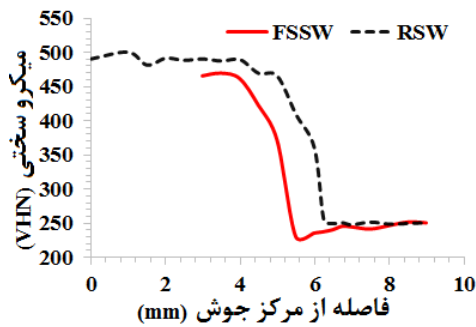
در FSSW در کنار مارتنزیت، فازهای فریت، بینیت و آستنیت باقیمانده نیز به مقدار خیلی کم قابل مشاهده می‌باشند که علت آن مربوط به رخ دادن فعل و انفعالات ترمومکانیکی نظیر بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی فریت می‌باشد. این نتایج در تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ نوری هم قابل مشاهده می‌باشد. شکل (۷) ریزساختار ناحیه SZ برای اتصال

با معیار دما می‌توان دو ناحیه ناگت (NZ) و متاثر از حرارت (HAZ) را در RSW نسبت به فلز پایه متمایز کرد. در FSSW با توجه به تحمیل کرنش از طرف فرآیند بر فولاد بر اساس معیارهای دما و کرنش سه ناحیه اختلاطی (SZ)، متاثر از حرارت و تغییر شکل (TMAZ) و متاثر از حرارت (HAZ) را می‌توان نسبت به فولاد پایه متمایز کرد. مشاهده می‌گردد که اندازه NZ در RSW بزرگتر از مجموع نواحی در FSSW می‌باشد. شکل (۵) تاریخچه دمایی نقاطی در مرکز منطقه جوش دو نوع اتصال را با یکدیگر مقایسه می‌کند. همانگونه که مشخص است دما در RSW از دمای ذوب فراتر رفته است (۱۹۳۷ درجه سانتیگراد). اما دمای بیشینه در FSSW در حدود ۹۴۰ درجه می‌باشد.



شکل ۵- تاریخچه دمایی نقاطی واقع در مرکز جوش در FSSW و RSW

شکل (۶) ریزساختار FE-SEM ناحیه اتصال در هر دو روش را در کنار ریزساختار فولاد پایه نشان می‌دهد. در فلز پایه فریت با رنگ کاملاً تیره و به عنوان فاز زمینه مشاهده می‌شود. فاز بینیت به وضوح با ساختاری لایه لایه که شامل فریت بینیتی و آستنیت باقیمانده می‌باشد، قابل مشاهده است. آستنیت باقیمانده به صورت دانه‌های حکاکی نشده و با سطحی کاملاً صاف و روشن مشاهده می‌شود. مارتنزیت برخلاف آستنیت دارای سطحی زبر است که باعث شناسایی آسان‌تر آن می‌شود؛ تشخیص مارتنزیت از آستنیت تنها از طریق صافی و زبری سطح این دو فاز امکان پذیر است. روش پیشنهاد شده برای شناسایی مارتنزیت و آستنیت در تصاویر SEM این است که قبل از انجام SEM فولاد تحت دمای ۲۰۰ تا ۲۶۰ °C قرار گیرد که ممکن است باعث بازیخت<sup>۱</sup> مارتنزیت شود و در نتیجه سطح مارتنزیت زبرتر گردد [۲۲ و ۲۳]. با وجود این در این مطالعه بدون بازیخت مارتنزیت، برخی از دانه‌های آن با سطحی زبرتر به صورت نسبی قابل شناسایی در تصویر SEM بود. ناحیه اتصال در هر دو روش عمدتاً به مارتنزیت تبدیل شده است.

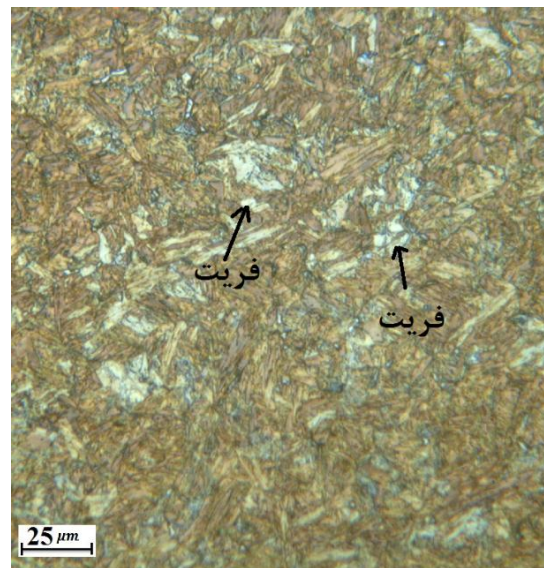


شکل ۸- میکروسختی در منطقه جوش برای هر دو روش

شکل (۹) ریزساختار ناحیه HAZ برای هر دو روش را نشان می‌دهد. در این شکل فازهای سفید رنگ فریت می‌باشند و مناطق تیره نشان دهنده مارتنزیت (یا بینیت) هستند. همانگونه که مشهود است مقدار فاز مارتنزیت در RSW بیشتر است و علت آن این است که در این روش ناحیه HAZ دمای بالاتری را تجربه می‌کند (دما تا ناحیه آستنیتی شدن بالا می‌رود) و در هنگام سرد شدن بخشی از آستنیت تشکیل شده به مارتنزیت تبدیل می‌شود. این نتیجه در شکل (۸) نیز تایید شده است به طوریکه سختی ناحیه HAZ در روش RSW بالاتر از FSSW می‌باشد. در واقع سرعت زیاد سرد شدن باعث افزایش سختی پذیری و افزایش مقدار مارتنزیت و در نتیجه افزایش سختی می‌شود. با توجه به شکل (۸)، در ناحیه HAZ روش FSSW و در فاصله حدود ۵/۵ میلیمتر از مرکز جوش، یک کاهش سختی دیده می‌شود که حتی از سختی فلز پایه نیز کمتر است. دمای این ناحیه کمتر از  $Ac_1$  می‌باشد. دمای کمتر از  $Ac_1$  باعث به وجود آمدن مارتنزیت جدیدی نمی‌شود (البته مقدار کمی مارتنزیت در این ناحیه محاسبه نگردیده است و شیب افزایشی مشاهده شده در نمودار صرفاً موید افزایش مارتنزیت از BM به HTHAZ می‌باشد)، اما ممکن است باعث بازپخت مارتنزیت موجود در فلز پایه گردد که این امر به نوبه خود باعث کاهش سختی می‌گردد [۲۸]. در تحقیقات قبلی به تاثیر پدیده تبلور مجدد در ناحیه HAZ بر اندازه دانه‌ها و سختی پرداخته شده است. نویسندگان این مقاله در تحقیق قبلی خود وقوع پدیده تبلور مجدد در نواحی مختلف فولاد TRIP را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳ و ۱۴]. وقوع این پدیده باعث کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود که به نوبه خود باعث افزایش سختی این ناحیه می‌گردد.

شکل (۱۰) مقدار فاز آستنیت باقیمانده در ناحیه اتصال را نشان می‌دهد. درصد آستنیت باقیمانده در فولاد پایه ۱۲ درصد

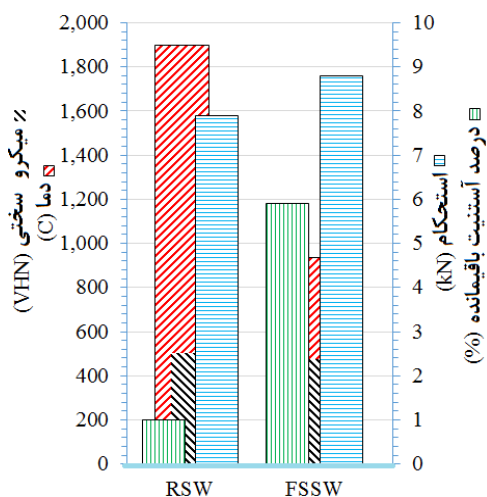
FSSW را نشان می‌دهد که در آن دانه‌های ریز فریت به رنگ سفید دیده می‌شوند و با فلش نشان داده شده‌اند. وجود فریت در ناحیه اختلاطی اتصال FSSW که قبلاً نیز گزارش شده است [۱۶ و ۲۴] دلایل مختلفی دارد؛ یکی از دلایل می‌تواند پایدار شدن برخی از فریت‌های موجود در فلز پایه در حضور عناصری مانند Zn و O باشد [۲۵]. از طرفی این احتمال وجود دارد که این فریت‌ها در اثر جوانه‌زنی در حفره‌ها<sup>۱۱</sup> یا نواحی با نابجایی‌های شدید در طول سرد شدن به وجود آمده باشند [۲۶]. هم‌چنین، Mazzaferro [۲۴] گزارش داده است که وجود این فریت‌ها می‌تواند به این دلیل باشد که سرعت خنک شدن به اندازه‌ای نیست که ساختاری ۱۰۰٪ مارتنزیتی حاصل شود. سرعت خنک شدن بحرانی که منجر به ساختار ۱۰۰٪ مارتنزیتی می‌شود، در این فولاد برابر  $90^\circ\text{C/s}$  ذکر شده است [۲۷]. البته باید توجه داشت که در فولاد با ترکیب مشخص که به طور کامل آستنیتی شده است، ریزساختار نهایی علاوه بر سرعت سرد شدن به اندازه دانه‌های آستنیت اولیه نیز بستگی دارد؛ به طوری که هرچه قدر اندازه دانه‌ها کوچک‌تر باشد، سختی‌پذیری کاهش می‌یابد.



شکل ۷- ریزساختار میکروسکوپ نوری ناحیه SZ در روش FSSW (حرف F نشان دهنده فریت می‌باشد).

نتایج حاصل از میکروسختی سنجی این نواحی که در شکل (۸) نشان داده شده است نیز نتایج ریزساختاری را تایید می‌کنند. بیشترین سختی در RSW برابر ۵۰۵ VHN در FSSW برابر ۴۷۸ VHN می‌باشد.

جوشکاری وابسته است [۳۰]. در شرایط جوشکاری به کار رفته در این تحقیق که در واقع شرایط پرکاربردی نیز می‌باشند نتایج بیان شده حاصل گردیده است. با توجه به مزایای بسیار زیاد روش FSSW (از قبیل کاهش مصرف انرژی، کاهش آلایندگی و ...) حتی اگر استحکام این روش اندکی کمتر از استحکام جوش مقاومتی نقطه‌ای باشد (که در برخی از تحقیقات گزارش شده است) باز هم می‌توان این روش را در تولید انبوه قطعات خودروسازی ترجیح داد.

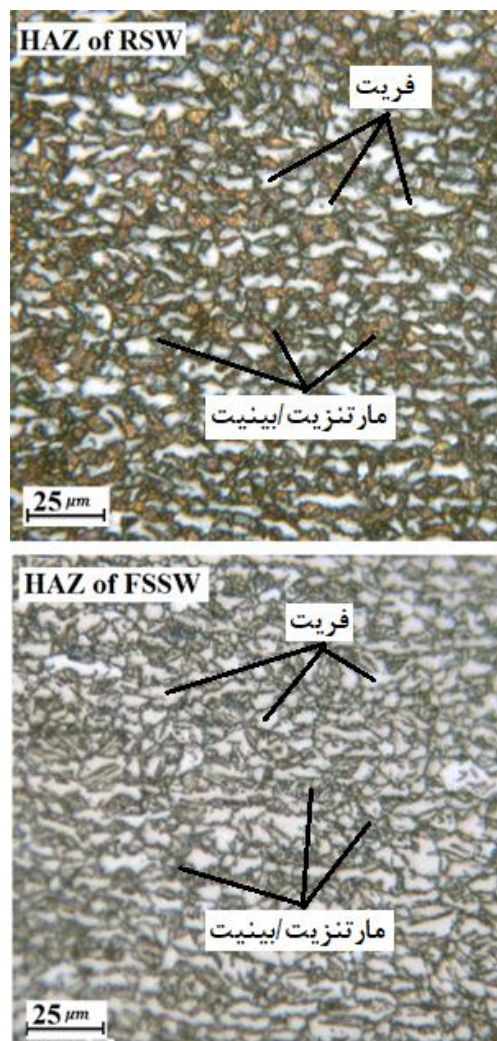


شکل ۱۰- مقایسه دمای بیشینه، سختی بیشینه، آستنیت باقیمانده در منطقه جوش و استحکام اتصال برای دو روش RSW و FSSW

#### ۴- نتیجه‌گیری

آستنیت باقیمانده مهمترین عنصر در ریزساختار فولاد TRIP می‌باشد که باعث به وجود آمدن خواص منحصر به فرد نظیر استحکام بالا و شکل پذیری بسیار خوب در آن می‌شود. علت اصلی این امر تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت در حین تغییر شکل مکانیکی است. متاسفانه روش‌های ذوبی مرسوم باعث از بین رفتن این ویژگی ممتاز می‌شود و در نتیجه کاربرد این فولادها در صنایع مختلف و به خصوص صنعت خودروسازی را محدود می‌کند. در این تحقیق دو روش اتصال نقطه‌ای FSSW و RSW مورد بررسی قرار گرفتند. برای به دست آوردن توزیع و تاریخچه حرارتی از تحلیل المان محدود استفاده گردید و نتایج به دست آمده از آن با نتایج مطالعات قبلی اعتبارسنجی گردید که مطابقت بسیاری خوبی داشتند.

دمای بیشینه در FSSW برابر ۹۴۰ درجه و در RSW در حدود ۱۹۰۰ درجه حاصل گردید. ذوب و انجماد به وقوع



شکل ۹- ریزساختار میکروسکوپ نوری ناحیه HAZ برای دو روش (نواحی روشن فاز فریت و نواحی تیره فاز مارتنزیت/باینیت می‌باشند).

بود که از طریق روش XRD حاصل شد. مقدار آستنیت باقیمانده در FSSW در حدود ۶ درصد و در RSW تقریباً صفر می‌باشد. در واقع سرعت سرد شدن در RSW بیشتر است و همه ریزساختار به مارتنزیت تبدیل شده است.

شکل (۱۰) همچنین استحکام برشی اتصالات نقطه‌ای را نشان می‌دهد. استحکام ضروری پیشنهاد شده از طرف استاندارد AWS برابر ۷/۵ کیلو نیوتن می‌باشد [۲۹] که در هر دو روش برآورده گردیده است. همانگونه که مشخص است استحکام در روش FSSW (۹/۸ کیلونیوتن) بیشتر از RSW (۷/۸ کیلو نیوتن) است. البته این بدین معنی نیست که همیشه استحکام اتصالات جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از جوش مقاومتی بیشتر است. در واقع استحکام این اتصالات شدیداً به پارامترهای

- [11] Mironov, S., Sato, Y.S., Yoneyama, S., Kokawa, H., Fujii H.T. and Hirano, S. (2018), "Microstructure and tensile behavior of friction-stir welded TRIP steel", Vol. 717, pp. 26-33.
- [12] Tehrani-Moghadam, H., Jafarian, H.R. Salehi, M.T. and Eivani, A.R. (20158), "Evolution of microstructure and mechanical properties of Fe-24Ni-0.3 C TRIP steel during friction stir processing", Vol. 718, pp. 335-344.
- [13] Mostafapour, A., Ebrahimpour, A. and Saeid, T. (2017), "Numerical and experimental study on the effects of welding environment and input heat on properties of FSSWed TRIP steel", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 90, pp. 1131-1143.
- [14] Mostafapour, A., Ebrahimpour, A. and Saeid, T. (2017), "Finite element investigation on the effect of FSSW parameters on the size of welding subdivided zones in TRIP steels", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 88, pp. 277-289.
- [15] Khan, M.I., Kuntz, M. L., Su, P., Gerlich, A.P., North, T. and Zhou, Y. (2007), "Resistance and friction stir spot welding of DP600: a comparative study", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 12, pp. 175-182.
- [16] Lomholt, T.N., Adachi, Y., Peterson, J., Steel, R., Pantleon, K. and Somers, M. (2011), "Microstructure characterization of friction stir spot welded TRIP steel", Advanced Materials Research, Vol. 409: pp. 275-280.
- [17] Mostafapour, A., Ebrahimpour, A. and Saeid, T. (2015), "Investigation of two stage heat treatment on microstructure and mechanical properties of TRIP steel", Journal of structure and steel, Vol. 18, pp. 63-74.
- [18] Awang, M. and V.H. Mucino, (2010), "Energy generation during friction stir spot welding (FSSW) of Al 6061-T6 plates", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 25, pp. 167-174.
- [19] ISO 14273, 2002, Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds.
- [20] Manvatkar, V., De, A., Svensson, L.-E. and DebRoy, T. (2015), "Cooling rates and peak temperatures during friction stir welding of a high-carbon steel", Scripta Materialia, Vol. 94, pp. 36-39.
- [21] Eshraghi, M., Tschopp, M.A., Zaeem, M.A. and Felicelli, S.D. (2014), "Effect of resistance spot welding parameters on weld pool properties in a DP600 dual-phase steel: a parametric study using thermomechanically-coupled finite element analysis", Materials & Design, Vol. 56: p. 387-397.
- [22] Jacques, P., Delannay, F., Cornet, X., Harlet, Ph. and Ladriere, J. (1998), "Enhancement of the mechanical properties of a low-carbon, low-silicon steel by formation of a multiphased microstructure containing retained austenite", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 29, pp. 2383-2393.
- [23] Timokhina, I., Hodgson, P. and Pereloma, E. (2004), "Effect of microstructure on the stability of retained austenite in transformation-induced-plasticity steels", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 35, pp. 2331-2341.
- [24] Mazzaferro, C., Rosendo, T., Tier, M., Mazzaferro, J.A.E., Santos, J.F. and Strohaecker, T.R. (2015), "Microstructural and mechanical observations of galvanized TRIP steel after friction stir spot welding", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 30, pp. 1090-1103.

پیوسته در RSW باعث افزایش سختی پذیری و تشکیل مارتزیت بیشتر می گردد. میکروسختی حاصل برای نواحی مختلف در دو روش موید این مطلب بود به نحوی که بیشینه سختی در RSW تا ۵۰۵ ویکرز افزایش یافت درحالی که برای FSSW برابر ۴۷۸ ویکرز بود.

مقدار آستنیت باقیمانده در فولاد پایه، جوش FSSW و جوش RSW به ترتیب برابر ۱۲، ۶ و صفر درصد بود که نشان دهنده تغییرات فازی گسترده تر در RSW می باشد. در واقع ذوب شدن نسبی و انجماد دوباره فلز جوش در جوش مقاومتی اجازه به وجود آمدن مجدد آستنیت باقیمانده را نداده است.

استحکام اتصال FSSW برابر ۹/۸ کیلو نیوتن و استحکام RSW برابر ۷/۸ کیلو نیوتن به دست آمد. استحکام بیشتر در FSSW مربوط به ریزساختار مارتزیتی با سختی پایین تر و وجود اندکی (حدود ۶ درصد) آستنیت باقیمانده در ریزساختار آن می باشد.

#### ۵- مراجع

- [1] Keeler, S. and M. Kimchi, 2015, Advanced high-strength steels application guidelines V5, published by: World Auto Steel.
- [2] Kuziak, R., Kawalla, R. and Waengler, S. (2008), "Advanced high strength steels for automotive industry", Archives of civil and mechanical engineering, Vol. 8, pp. 103-117.
- [3] Zackay, V.F., Parker, E.R. Fahr, D. and Bush, R. (1967), "The enhancement of ductility in high-strength steels", Transactions of the ASM, Vol. 60, pp. 252-257.
- [4] Khan, M.I., Kuntz, M.L., Biro, E. and Zhou, Y. (2008), "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels", Materials Transactions, Vol. 49, pp. 1629-1637.
- [5] Thomas, W.M., (1991), "Friction stir butt welding", U.S. Patent NO. 5460, 317, USA.
- [6] Science News, (2014), Lighter cars with new robotic welding method, Source: University West.
- [7] Baltazar Hernandez, V.H., Kuntz, M.L., Khan, M.I. and Zhou, Y. (2008), "Influence of microstructure and weld size on the mechanical behaviour of dissimilar AHSS resistance spot welds", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 13, pp. 769-776.
- [8] Khan, M.I., Kuntz, M.L. and Zhou, Y. (2008), "Effects of weld microstructure on static and impact performance of resistance spot welded joints in advanced high strength steels", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 13, pp. p. 294-304.
- [9] Nayak, S.S., Baltazar Hernandez, V.H., Okita, Y. and Zhou, Y. (2012), "Microstructure-hardness relationship in the fusion zone of TRIP steel weld", Materials Science and Engineering: A, Vol. 551: pp. 73-81.
- [10] Cretteur, L., Koruk, A.I. and Tosal-Martinez, L. (2002), "Improvement of weldability of TRIP steels by use of in-situ pre-and post-heat treatment", Steel Research, Vol. 73, pp. 314-319.



- [28] Sinha, A.K., (2002), Physical Metallurgy Handbook, McGraw-Hill.
- [29] AWS, (2007), Specification for automotive weld quality - resistance spot welding of steel, AWS D8.1M:2007.
- [30] Mostafapour, A., Ebrahimpour, A. and Saeid, T. (2017), "Finite element investigation on the effect of FSSW parameters on the size of welding subdivided zones in TRIP steels", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 88, pp. 277-289.
- [25] ASM Handbook Volume 03, (1992), Alloy phase diagrams, ASM International, Materials Park, OH, USA.
- [26] Cheng, L. and K. Wu, (2009), "New insights into intragranular ferrite in a low-carbon low-alloy steel", Acta Materialia, Vol. 57, pp. 3754-3762.
- [27] Gould, J.E., Khurana, S.P. and Li, T. (2006), "Predictions of microstructures when welding automotive advanced highstrength steels", Welding Journal, Vol. 85, pp. 111S-116S.

### پی نوشت

- <sup>1</sup> Dual phase (DP)
- <sup>2</sup> Transformation induced plasticity (TRIP)
- <sup>3</sup> Complex phase (CP)
- <sup>4</sup> Martensitic (M)
- <sup>5</sup> Resistance spot welding (RSW)
- <sup>6</sup> Friction stir welding (FSW)
- <sup>7</sup> Intercritical annealing (IA)
- <sup>8</sup> Isothermal bainitic transformation (IBT)
- <sup>9</sup> Dynamic explicit coupled temperature displacement
- <sup>10</sup> Temper
- <sup>11</sup> Inclusion