

## ریزساختار و رفتار شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای ناهمجنس فولاد دوفازی DP600 و فولاد ساده کم کربن St14

مجید پورانوری<sup>۱</sup>، پیروز مرعشی<sup>۲</sup> و مصطفی موسوی‌زاده<sup>۳</sup>

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس تهران

mpouranvari@yahoo.com

### چکیده

مقاله حاضر به بررسی ریزساختار و رفتار شکست اتصال ناهمجنس جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد دوفازی فریتی - مارتزیتی DP600 و فولاد ساده کم کربن St14 می‌پردازد. تأثیر جریان جوشکاری در محدوده ۷/۵ تا ۹/۵ کیلوآمپر بر مشخصه‌های متالورژیکی و مکانیکی جوش بررسی شد. بررسی‌های متالوگرافی نوری، ریزسختی‌سنجی و آزمون کشش - برش انجام شد. برای توصیف رفتار شکست جوش‌ها از پارامترهای نیروی ماکزیمم، انرژی شکست و مود شکست استفاده شد. نتایج نشان داد که ریزساختار دکمه جوش متشکل از مارتزیت، بینیت، فریت آلوتریمورفیک و فریت ویدمن اشتاتن است که منجر به افزایش قابل توجه سختی دکمه جوش نسبت به فلزات پایه می‌شود. با افزایش جریان جوشکاری مود شکست جوش‌ها از فصل مشترکی به محیطی تغییر می‌کند. نشان داده شد که اندازه دکمه جوش مهمترین پارامتر کنترل‌کننده ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی اتصال ناهمجنس DP600/St14 است.

### واژه‌های کلیدی:

جوش مقاومتی نقطه‌ای، فولاد دوفازی، جوشکاری ناهمجنس، ریزساختار، شکست.

### ۱- مقدمه

امروزه استفاده از فولادهای استحکام بالای پیشرفته به‌عنوان یک استراتژی مهم در بسیاری از شرکت‌های خودروسازی بزرگ دنبال می‌شود. استفاده از فولادهای استحکام بالا، با کاهش وزن خودرو موجب کاهش سوخت مصرفی خودرو می‌شود. همچنین مشخص شده‌است که استفاده از این فولادها موجب افزایش قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف می‌شود. به این دلایل

شرکت‌های خودروسازی در جستجوی راه‌هایی برای کاهش مصرف سوخت خودرو و افزایش امنیت سرنشینان هستند. یکی از این راه‌ها استفاده از مواد جدید در ساخت خودرو می‌باشد. هر ماده‌ای که کاندیدای استفاده در خودرو می‌شود باید دارای قابلیت فرم‌دهی، جوشکاری، پوشش‌دهی و تعمیر مناسب باشد.

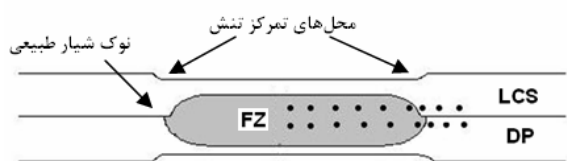
۱- حساسیت زیاد به مود شکست فصل مشترکی  
 ۲- حساسیت زیاد به بیرون زدگی مذاب  
 ۳- تشکیل حفره‌های انقباضی در دکمه جوش  
 ورود فولادهای دوفازی به صنعت خودروسازی، نیاز به اتصال فولادهای دوفازی به فولادهای دیگر از جمله فولادهای کم کربن را فراهم آورده است.  
 در رک رفتار شکست جوش‌های نقطه‌ای همجنس و هم ضخامت چندان پیچیده نیست، اما رفتار شکست اتصالات ناهمجنس به علت تفاوت خواص فیزیکی و مکانیکی دو ورق می‌تواند مشکل باشد. اکثر تحقیقات منتشر شده در مورد اتصالات جوش نقطه‌ای دو فولاد مشابه است. تحقیقات بسیار کمی در مورد اتصال ناهمجنس فولادهای دوفازی با دیگر فولادها صورت گرفته است. برای مثال کو و وکسلر<sup>۱</sup> [۱۱]، با استفاده از یک روش طراحی آزمایشات، جوش نقطه‌ای فولاد DP600 با ضخامت ۲/۲ mm به فولاد HSLA350 با ضخامت ۱/۸ mm را بررسی کردند. میلیتسکای<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۲]، اتصال سه ورقه فولاد DP600، یک فولاد HSLA و یک فولاد کم کربن را بررسی کردند و محدوده پارامترهای مناسب برای جوشکاری را تعیین کردند. در هر دوی این کارها، به سئواله مود شکست توجه نشده است. سونسون<sup>۳</sup> [۱۳]، مدلی برای تخمین سختی دکمه جوش در اتصال دو فولاد نامشابه ارائه داد، اما در این کار خواص مکانیکی جوش و مود شکست مورد توجه قرار نگرفت.  
 مقاله حاضر، به بررسی ریزساختار، مود شکست و خواص مکانیکی اتصال ناهمجنس فولاد دوفازی DP600 و فولاد ساده کم کربن St14 می‌پردازد.

## ۲- روش تحقیق

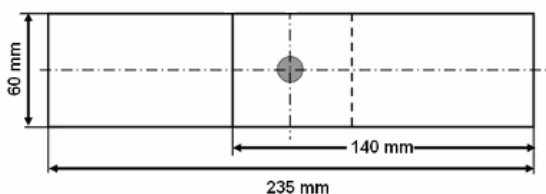
### ۲-۱- فلز پایه‌ها

در این پژوهش از دو ورق فولاد کم کربن (LCS) و فولاد دوفازی DP600 (تولید شده توسط عملیات حرارتی آئیل بین بحرانی) به عنوان دو فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این دو

امروزه بحث بکارگیری ورق‌های فولادی استحکام بالای پیشرفته به ویژه بکارگیری فولادهای دوفازی به عنوان یک بحث داغ مطرح است [۱]. اگر چه تا سال ۲۰۰۱ از فولادهای استحکام بالای پیشرفته در بدنه خودرو استفاده نشده است، اما در سال ۲۰۰۵ سهم ۱۲ درصدی به خود اختصاص داده است. پیش‌بینی شده است تا سال ۲۰۱۵ این مقدار به ۵۰ درصد افزایش یابد [۲].  
 استفاده از فولادهای دوفازی در صنعت خودروسازی نیازمند بررسی جوش پذیری این فولادها می‌باشد. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اصلی‌ترین فرآیند اتصال ورق‌های فلزی به ویژه در صنایع خودروسازی است. خودورهای امروزی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارند [۳]. در رک رفتار مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای در شرایط مختلف بارگذاری اهمیت دارد. مود شکست جوش‌های نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت و کارایی جوش است. به طور کلی، جوش‌های نقطه‌ای در دو مود فصل مشترکی و محیطی دچار شکست می‌شوند. در مود فصل مشترکی، شکست از طریق اشاعه ترک از میان دکمه جوش (منطقه‌ای از اتصال که در حین سیکل حرارتی جوش، ذوب شده و دوباره منجمد می‌شود) صورت می‌گیرد و در مود محیطی، شکست با بیرون کشیده شدن دکمه جوش از یک ورق صورت می‌گیرد. ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی در مود فصل مشترکی به طور قابل توجهی کم‌تر از مود محیطی است، بنابراین برای اینکه جوش‌های نقطه‌ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرآیند باید به گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد [۴-۷].  
 بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای دوفازی تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده است. نتایج کلی این مقالات نشان می‌دهد که مشکلات اصلی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای دوفازی عبارتند از [۸-۱۰]:



شکل (۱): شماتیک ناحیه جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد دوفازی DP600 به فولاد کم کربن، مقدار عمق نفوذ در فولاد دوفازی (DP) بیشتر از فولاد کم کربن (LCS) است. محل‌های انجام آزمون ریزسختی سنجی در شکل مشخص شده‌است.



شکل (۲): ابعاد نمونه آزمون کشش-برش.

اسید پیکرال استفاده شد. به منظور بررسی مشخصه‌های هندسی دکمه جوش، ماکروگراف‌هایی از تمامی نمونه‌ها تهیه شد و ابعاد هندسی دکمه جوش اندازه‌گیری گردید.

#### ۲-۴- آزمون ریزسختی سنجی

آزمون ریزسختی سنجی توسط دستگاه ریزسختی سنج شیمیدزو با بار ۱۰۰ گرم انجام شد. آزمون ریزسختی سنجی در امتداد فصل مشترک و ۵۰ میکرومتر بالاتر و پایین‌تر از خط مرکز جوش و همچنین در راستای عمودی در مرکز جوش انجام شد. محل‌های انجام آزمون سختی در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

#### ۲-۵- آزمون کشش-برش

نمونه‌های آزمون کشش-برش طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند [۱۴]. ابعاد این نمونه‌ها در شکل (۲) آورده شده‌است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلزهای پایه مورد استفاده در این تحقیق.

ترکیب	C	Mn	Si	S	P
St14	۰/۰۶۵	۰/۲۰۴	۰/۰۹۵	۰/۰۱۷	۰/۰۳۸
DP600	۰/۱۳۵	۱/۲۸	۰/۳۸۸	۰/۰۰۴	۰/۰۱۸

فولاد از طریق آنالیز کوانتومتری به دست آمده و در جدول (۱) آورده شده‌است.

#### ۲-۲- فرآیند جوش مقاومتی نقطه‌ای

جوشکاری توسط دستگاه جوش نقطه‌ای ثابت با توان ۱۲۰ kVA انجام شد. برای جوش دادن نمونه‌ها از الکتروود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته بندی RWMA استفاده شد. جنس این الکتروود از آلیاژ مس-کرم-زیرکونیوم است. قطر نوک الکتروود ۸ میلیمتر انتخاب شد.

در این پروژه، متغیرهای جوشکاری به صورت زیر در نظر گرفته شدند:

- جریان جوشکاری با ۹ سطح (از ۷/۵ تا ۹/۵ کیلوآمپر)

- زمان جوشکاری: ۳۰ سیکل

- نیروی الکتروود: ۵/۱ کیلو نیوتن

- زمان فشار: ۴۰ سیکل

- زمان نگهداری الکتروود پس از قطع جریان: ۱۵ سیکل

در این شرایط بیرون زدگی مذاب مشاهده نشد. در هر شرایط جوشکاری چهار سری نمونه جوش داده شد که سه سری برای آزمون کشش-برش و سری دیگر برای بررسی‌های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۲-۳- بررسی‌های ساختاری

برای انجام بررسی‌های ساختاری نمونه‌ها از وسط دکمه برش زده و مانع گرم شدند. برای بررسی ماکرو و میکرو ساختاری، عملیات متالوگرافی نمونه‌ها شامل سمباده‌زنی، پولیش و اچ کردن انجام گردید. برای اچ کردن از محلول‌های نایتال دو درصد و

شد. برای بررسی سطح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید.

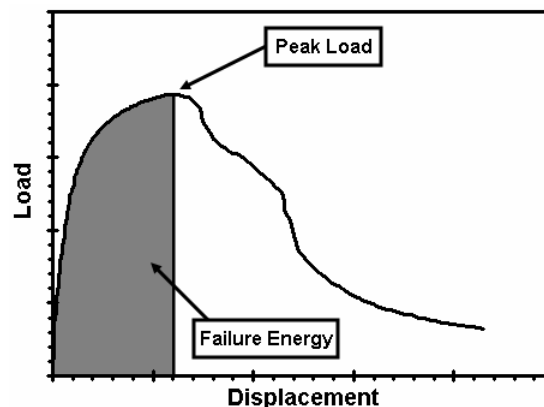
### ۳- نتایج و مباحث

#### ۳-۱- ماکروساختار منطقه اتصال

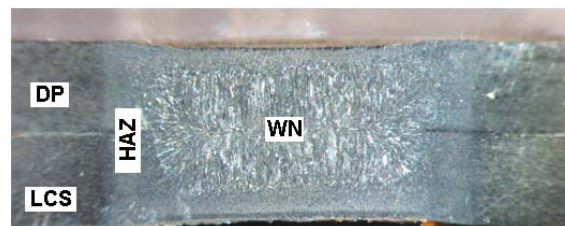
شکل (۱) یک ماکروساختار شماتیک و شکل (۴) یک ماکروساختار متالوگرافیکی یک جوش مقاومتی نقطه‌ای ناهمجنس بین فولاد St14 و DP600 را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود تشکیل یک جوش نقطه‌ای موجب ایجاد تغییرات هندسی و تغییرات ساختاری در ورق‌های فلز پایه می‌شود. ایجاد یک جوش نقطه‌ای از نظر هندسی موجب ایجاد یک شیار طبیعی در محل اتصال دو ورق می‌شود (شکل‌های ۱ و ۴) که رفتار مکانیکی یک جوش را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین فشار الکتروود حین سیکل حرارتی جوش موجب ایجاد فرورفتگی الکتروود (شکل ۱ و ۴) و ایجاد یک محل تمرکز تنش در لبه فرورفتگی می‌شود.

به علت سیکل حرارتی فرآیند جوشکاری نقطه‌ای یک ساختار ناهمگن در محل اتصال تشکیل می‌شود. محل اتصال را می‌توان به ۳ منطقه فلز جوش (دکمه جوش)، منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه تقسیم کرد. همانطور که ملاحظه می‌شود، عمق نفوذ جوش در طرف دوفازی به علت بالاتر بودن مقاومت الکتریکی مقداری بیشتر از فولاد کم کربن است. بالاتر بودن مقاومت الکتریکی فولاد دوفازی به دلیل بالاتر بودن درصد Si آن و همچنین حضور فاز مارتزیت با چگالی بالای عیوب کریستالی در آن ذکر شده است [۱۱].

شکل (۵) تغییرات مشخصه‌های هندسی دکمه جوش (اندازه دکمه جوش و درصد فرورفتگی الکتروود در ورق) بر حسب جریان جوشکاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش جریان جوشکاری اندازه دکمه جوش به علت افزایش



شکل (۳): شماتیک نمودار بار-جابجایی در آزمون کشش-برش و پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی خواص مکانیکی جوش‌ها.



شکل (۴): ماکروساختار یک جوش مقاومتی نقطه‌ای ناهمجنس بین DP600 و St14.

آزمون کشش-برش به وسیله دستگاه آزمون کشش اینسترون و با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و نمودار نیرو-جابجایی به صورت همزمان ثبت گردید. با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی دو متغیر: (۱) مقدار حداکثر نیرو و (۲) انرژی شکست تا نقطه ماکزیمم نیرو برای هر نمونه تعیین شد (شکل ۳). انرژی شکست به صورت سطح زیر نمودار بار-جابجایی تا نقطه ماکزیمم نیرو با استفاده از انتگرال گیری عددی به کمک رابطه زیر محاسبه شد:

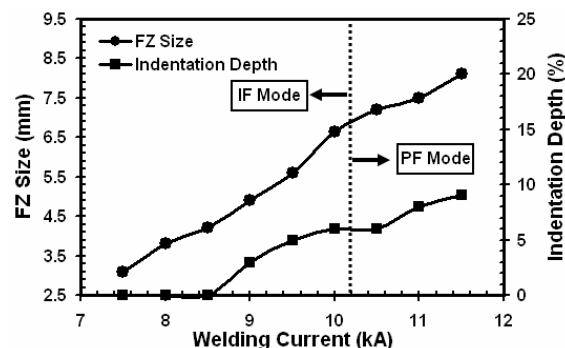
$$\text{Failure Energy} = \sum_{n=1}^N F(n) [X(n) - X(n-1)] \quad (1)$$

که در آن،  $F$  نیرو،  $X$  میزان جابجایی و  $N$  تعداد داده‌های (نقاط) ثبت شده به وسیله نرم‌افزار آزمون کشش است.

با استفاده از نمونه‌های شکسته شده مود شکست نمونه‌ها ثبت

ناهمجنس فولاد کم کربن و فولاد دوفازی متأثر از ترکیب شیمیایی فولاد کم کربن و فولاد دوفازی و مقدار درجه‌ی رقت در این منطقه می‌باشد.

سرعت سرد شدن در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مقایسه با سرعت سرد شدن در دیگر فرآیندهای اتصال از جمله جوشکاری‌های قوسی، جوشکاری پرتو الکترونی و جوشکاری لیزر بالاتر است [۵]. ولگر<sup>۴</sup> [۱۵] گزارش کرد، سرعت سرد شدن در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای هنگامی که زمان نگهداری صفر باشد، به  $1000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  می‌رسد. با افزایش زمان نگهداری به علت اثر کوینچ الکترودهای مسی، سرعت سرد شدن در ورق‌های با ضخامت کم تا بیشتر از  $10000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  می‌رسد [۸]. گولد<sup>۵</sup> و همکارانش [۸]، مدلی تحلیلی برای تخمین سرعت سرد شدن ارائه دادند. بنابر مدل آنها سرعت سرد شدن برای یک ورق به ضخامت ۲ mm، حدود  $3000$  درجه سانتی‌گراد بر ثانیه تخمین زده می‌شود [۸]. این سرعت سرد شدن بالا در دیگر فرآیندهای اتصال بوجود نمی‌آید. این سرعت سرد شدن بالا ناشی از حضور الکترودهای آبگرد مسی و اثر کوینچ آنها و همچنین زمان کوتاه سیکل حرارتی اعمال شده بر محل اتصال است. در این روش بر خلاف دیگر روش‌های مرسوم جوشکاری ذوبی، با کاهش ضخامت فلزات پایه، سرعت سرد شدن افزایش می‌یابد. ریزساختار مشاهده شده در دکمه جوش در مراحل زیر تشکیل می‌شوند: با سرد شدن دکمه جوش تا زیر دمای A3، آستنیت شروع به استحاله می‌کند. اولین فازی که تشکیل می‌شود فریت آلوتریمورفیک است. فریت آلوتریمورفیک تمایل دارد به صورت لایه‌هایی رشد کند و سطح دانه‌های آستنیت را بپوشاند. حین استحاله، کربن در جلوی فریت تجمع کرده و موجب کاهش سرعت رشد لایه فریت با افزایش ضخامت لایه



شکل (۵): تغییرات اندازه دکمه جوش و عمق فرورفتگی الکتروود در ورق با جریان جوشکاری.

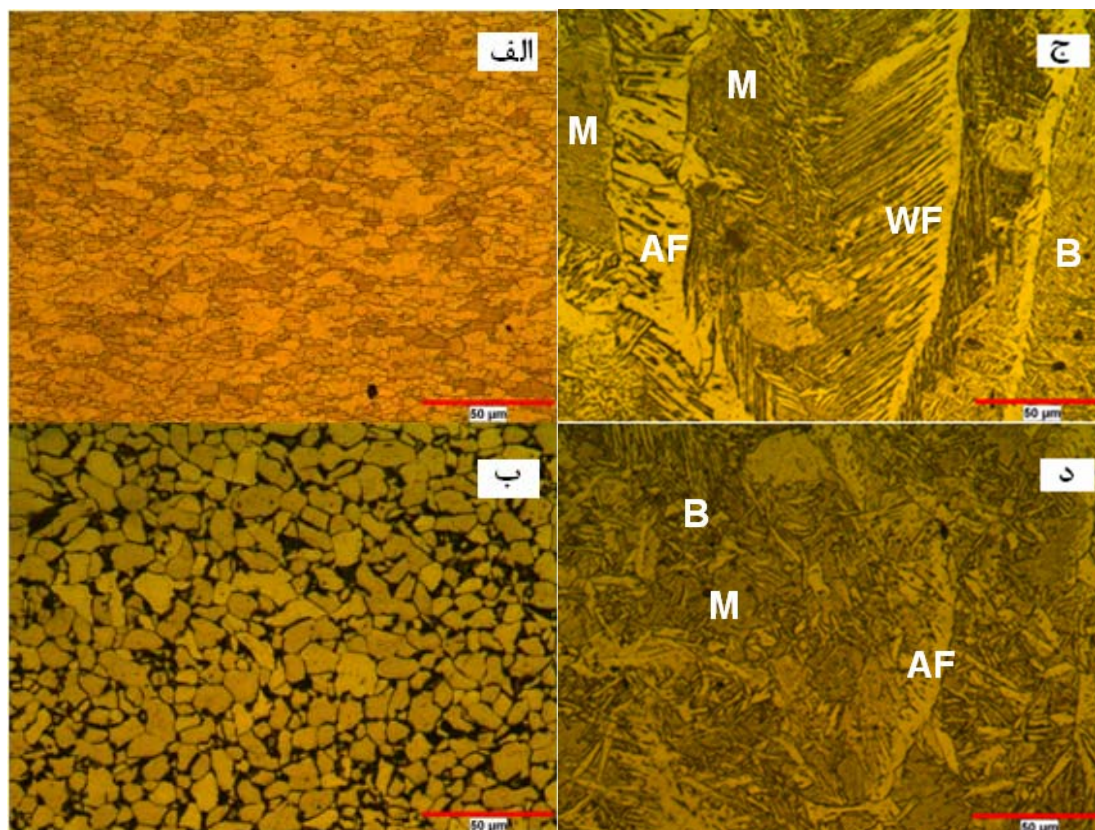
حرارت تولیدی افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان فرورفتگی الکتروود در این شرایط جوشکاری زیر ۱۰٪ است. نشان داده شده است که فرورفتگی الکتروود در این حد تأثیری بر استحکام جوش (نیروی شکست) ندارد [۹].

### ۳-۲- ریزساختار دکمه جوش

شکل (۶-الف) ریزساختار فولاد کم کربن مورد استفاده در این پروژه را نشان می‌دهد. ریزساختار این فولاد عمدتاً فریتی همراه با درصد بسیار کمی پرلیت در مرز دانه‌ها می‌باشد. دانه‌های فریت در جهت نور کشیده شده‌اند. شکل (۶-ب) ریزساختار میکروسکوپ نوری فولاد دوفازی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، ساختار این فولاد متشکل از دو فاز فریت و فاز مارتنزیت است. در تصویر میکروسکوپ نوری فاز فریت به رنگ روشن و فاز مارتنزیت به رنگ تیره است.

شکل (۶-ج) و شکل (۶-د) ریزساختار متالوگرافی نوری مناطق مختلف دکمه جوش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ریزساختار دکمه جوش یک ریزساختار پیچیده متشکل از مارتنزیت، فریت آلوتریمورفیک، فریت ویدمن اشتاتن و بینیت است.

ریزساختار FZ تابعی از ترکیب شیمیایی و سرعت سرد شدن است. ترکیب شیمیایی منطقه فلز جوش (دکمه جوش) اتصال



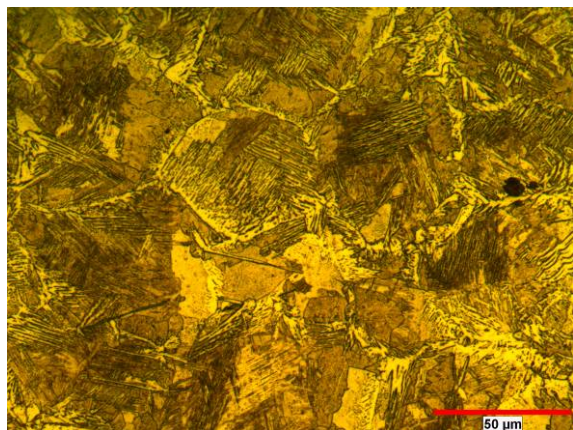
شکل (۶): ریزساختار مناطق مختلف جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد DP600 و St14، الف) فولاد کم کربن، ب) BM فولاد دوفازی، ج و د) دکمه جوش در مکان‌های مختلف.

### ۳-۳- پروفیل سختی

پروفیل سختی معیاری برای تغییرات خواص مکانیکی در امتداد محل اتصال است. سختی هر نقطه تابع ریزساختار آن نقطه است. پروفیل سختی اتصال در امتداد فصل مشترک در دو طرف فولاد کم کربن و فولاد دوفازی در شکل (۷) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود پروفیل سختی از ۳ منطقه متناظر با مناطق ریزساختاری دکمه جوش (FZ)، منطقه متأثر از حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) تشکیل شده است. سختی در دکمه جوش به علت تشکیل فاز مارتنزیت، فریت ویدمن اشتاتن و ... بالاتر از سختی هر دو فلز پایه است. سختی در HAZ نیز به علت تشکیل فازهای غیرتعادلی بالاتر از فلز پایه است. نکته قابل توجه این است که در مجاورت مرز FZ/HAZ در طرف دوفازی یک

فریت می‌شود. از طرف دیگر، فریت ویدمن اشتاتن، به صورت صفحه‌ای رشد کرده و اجازه توزیع و پس زده شدن کربن به اطراف را می‌دهد. این امر اجازه می‌دهد تا طول صفحات فریت ویدمن اشتاتن با یک سرعت پایدار افزایش یابد. سرعت رشد صفحات نوک تیز ویدمن اشتاتن بیشتر از سرعت رشد لایه‌های فریت آلوتریمورفیک است. تبدیل آستنیت به بینیت در دماهای پایین تر رخ می‌دهد. در ادامه آستنیت باقیمانده به مارتنزیت تبدیل می‌شود [۱۶]. باید توجه داشت که سهم هر کدام از این محصولات بستگی به سرعت سرد شدن و سرعت سرد شدن بحرانی دکمه جوش دارد.





شکل (۸): ریزساختار HAZ طرف DP600 در مجاورت FZ.

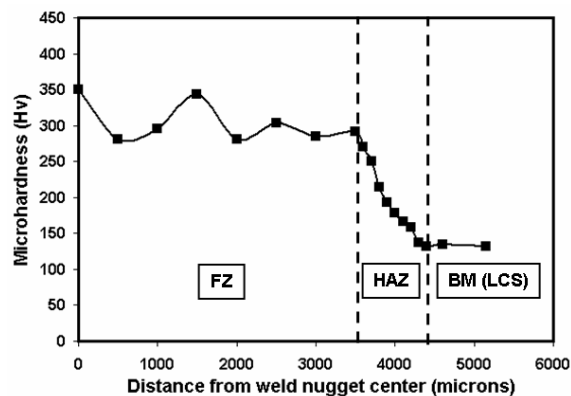
مخلوط شدن دو فلز پایه در FZ (با درصد کربن و منگنز متفاوت) منجر به این می‌شود که سختی‌پذیری و کربن معادل دکمه جوش پایین‌تر از فولاد دوفازی شود. در نتیجه سختی دکمه جوش کمتر از سختی HAZ در طرف DP600 است.

### ۳-۴- مود شکست

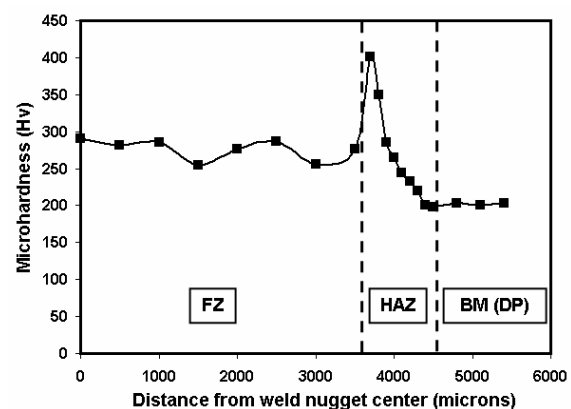
در این قسمت مود شکست‌های مشاهده شده حین آزمون کشش-برش توصیف شده‌است. به‌طور کلی، در محدوده‌های پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق، دو مود شکست متفاوت در آزمون کشش-برش جوش‌های نقطه‌ای فولاد DP600 و St14 مشاهده شد: مود شکست فصل مشترکی و مود شکست محیطی.

### ۳-۴-۱- مود شکست فصل مشترکی

نمودار بار-جابجایی یک جوش نقطه‌ای که در مود فصل مشترکی دچار شکست شده‌است، شکل منحصر به فردی دارد. شکل (۹) نمونه‌ای از نمودار بار-جابجایی مربوط به شکست در مود فصل مشترکی (IF) را نشان می‌دهد. یک سطح شکست نمونه از جوش‌هایی که در مود فصل مشترکی دچار شکست شده‌اند نیز در این شکل نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، این نوع شکست با تغییر فرم پلاستیک کمی همراه است.



(الف)



(ب)

شکل (۷): پروفیل سختی اتصال ناهمجنس جوشکاری مقاوم‌تی نقطه‌ای، (الف) در امتداد فصل مشترک در طرف فولاد کم کربن و (ب) در امتداد فصل مشترک در طرف فولاد دوفازی.

افزایش ناگهانی در سختی مشاهده می‌شود. شکل (۸) ریزساختار HAZ طرف DP600 در مجاورت FZ را نشان می‌دهد، همانطور که ملاحظه می‌شود ریزساختار این ناحیه عمدتاً مارتنزیتی به‌همراه مقداری فریت می‌باشد.

ساختار HAZ در مجاورت FZ به‌دلیل: الف) درشت بودن اندازه دانه آستنیت ناشی از سیکل حرارتی جوشکاری (افزایش اندازه دانه موجب افزایش قابلیت سختی‌پذیری و تشکیل مارتنزیت می‌شود [۱۷])، ب) بالاتر بودن سختی‌پذیری فولاد DP600 نسبت به فولاد کم کربن به‌علت بیشتر بودن درصد کربن و منگنز آن و ج) بالا بودن سرعت سرمایشی که تجربه می‌کند، عمدتاً مارتنزیتی است.

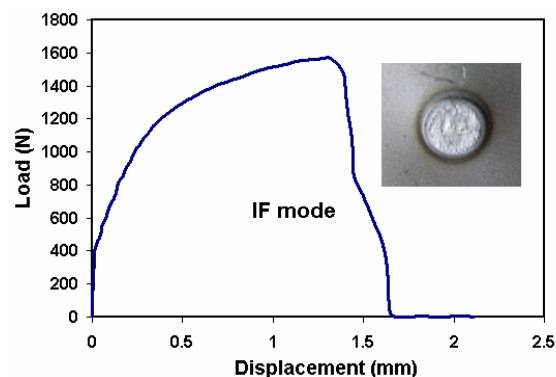
از رشد سریع ترک در دکمه جوش سریعاً به صفر می‌رسد. شیار معمولاً در HAZ و یا مرز HAZ/FZ قرار دارد.

از آنجایی که یکی از مهمترین جنبه‌های جوشکاری فولادهای دوفازی، حساسیت زیاد به مود فصل مشترکی در آنهاست، در اینجا به بررسی سطح شکست این جوش‌ها پرداخته می‌شود.

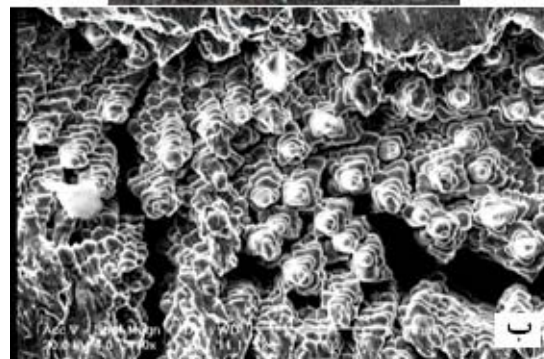
سطح مقطع ماکروسکوپی شکست فصل مشترکی در مقیاس ماکروسکوپی ترد است و بنابراین قابلیت جذب انرژی آن در لحظه شکست تحت تأثیر این امر کاهش خواهد یافت. در سطح شکست بسیاری از جوش‌هایی که در مود شکست فصل مشترکی دچار شکست شده‌اند، حفره مشاهده شد.

شکل (۱۰-الف) سطح شکست یک جوش نقطه‌ای که در مود فصل مشترکی دچار شکست شده و حاوی حفره است را نشان می‌دهد. شکل (۱۰-ب) تصویر SEM از سطح شکست جوش در منطقه حفره را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، ساختار منطقه حفره ساختار دندردیتی دارد و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت حفره‌های مشاهده شده از نوع حفره‌های انقباضی هستند. این نوع ترک‌ها در دکمه جوش در اثر انقباض دکمه در حین انجماد به وجود می‌آید. همانطور که می‌دانیم مذاب درون دکمه جوش هنگام انجماد دچار کاهش حجم می‌شود. بنابراین آخرین قسمتی که منجمد می‌شود با کاهش مذاب روبرو شده و در نتیجه با انجماد مذاب باقی مانده، حفره تشکیل می‌شود. ماهیت ساختار انجمادی متشکل از دندردیت‌های ریز در محل حفره مؤید انقباضی بودن این حفره‌ها است. توجه کنید که این حفره‌ها در اثر بیرون زدگی مذاب بوجود نیامده‌اند. گزارش شده است که افزایش نیروی الکتروود می‌تواند موجب کاهش مقدار حفره‌های انقباضی شود.

سطح شکست در نواحی نزدیک به حفره‌های انقباضی در مود فصل مشترکی یک ساختار دیمپلی دارد (شکل ۱۱-الف).



شکل (۹): نمودار بار-جابجایی مربوط به شکست در مود فصل مشترکی.



شکل (۱۰): الف) سطح شکست ماکروسکوپی در مود شکست فصل مشترکی، در مرکز دکمه جوش حفره انقباضی مشاهده می‌شود و ب) تصویر SEM از منطقه حفره، ساختار دندردیتی به وضوح قابل مشاهده است.

نمودار پیش از رسیدن به نقطه ماکزیمم، یک منطقه غیرخطی دارد که مربوط به تغییر فرم پلاستیک دو ورق و کرنش سختی مربوط به آن می‌باشد. نقطه ماکزیمم در نمودار بار-جابجایی متناظر با شروع رشد ترک از لبه شیار طبیعی موجود در محل اتصال دو ورق و ورود آن به منطقه دکمه جوش است. نیرو پس



آغاز شد نه از طرف با استحکام کمتر (شکل ۱۲-الف).  
مرحله (۲): گردنی شدن و رشد ترک در طرف فولاد کم کربن (LCS) همزمان با رشد ترک دور دکمه در طرف فولاد دوفازی (DP) (شکل ۱۲-ب).

مرحله (۳): مرحله نهایی شکست و جدا شدن کامل ورق‌ها. این مرحله به دو صورت رخ می‌دهد:

نوع (۱): بیرون کشیده شدن دکمه از طرف فولاد DP همراه با مقدار کمی پارگی ورق در طرف LCS (شکل ۱۲-ج).

نوع (۲): بیرون کشیده شدن دکمه از طرف فولاد DP و پارگی کامل ورق در طرف LCS (شکل ۱۲-د).

از نکات جالب شکست محیطی در اتصال نامشابه بین فولاد DP600 و St14، دو طرفه بودن شکست محیطی در این اتصال است. شکست‌های محیطی مشاهده شده در اتصالات مشابه فولاد کم کربن اغلب یک طرفه بوده به این معنی که دکمه جوش از یک ورق بیرون می‌آید و در واقع رشد ترک در یک ورق رخ می‌دهد. اما در کار حاضر جوانه‌زنی و رشد ترک در هر دو ورق صورت گرفت (شکل ۱۲). این امر به افزایش قابلیت جذب انرژی حین شکست کمک می‌کند.

نمودار بار-جابجایی جوش‌های مقاوم‌تی نقطه‌ای که در مود محیطی دچار شکست می‌شوند با نمودار جوش‌هایی که در مود فصل مشترکی دچار شکست می‌شوند، متفاوت است. شکل (۱۳) نمودار بار-جابجایی برای جوش نقطه‌ای که در مود محیطی شکسته شده و جدا شدن نهایی ورق‌ها به صورت نوع (۱) بوده است، نشان می‌دهد. در این نمودار نیز، منطقه غیرخطی در منحنی ناشی از کارسختی ورق‌های فولادی است. نقطه ماکزیمم در نمودار متناظر است با رشد ترک از طرف فولاد DP.



شکل (۱۱): سطح شکست در مود فصل مشترکی، الف) منطقه شکست نرم با مشخصه دیپلی و ب) منطقه شکست ترد با مشخصه کلیواژی در لبه دکمه جوش.

وجود دیپل در ساختار بیانگر نرم بودن شکست است. در مناطق مجاور HAZ، سطح شکست از نوع کلیواژ است. این نوع شکست بیانگر یک شکست ترد است. این نوع شکست در لبه دکمه جوش و در مجاورت HAZ، جایی که سختی بالایی به علت تشکیل مارتزیت دارد، مشاهده شد (شکل ۱۱-ب).

### ۳-۴-۲- مود شکست محیطی

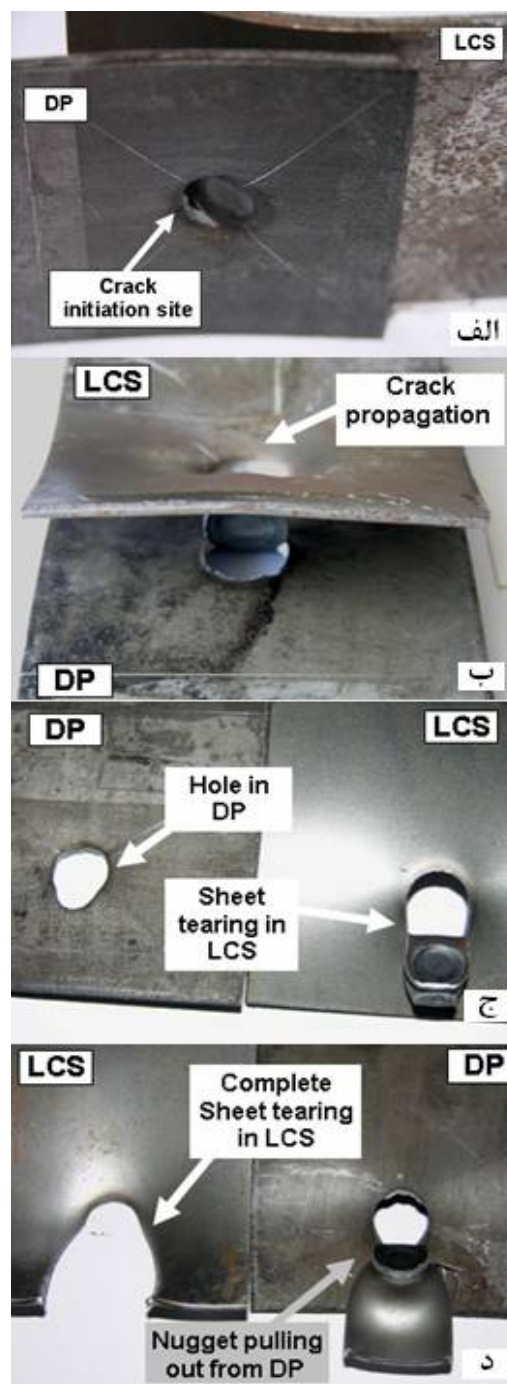
بر اساس مشاهدات میکروسکوپی مراحل شکست محیطی در اتصال جوش نقطه‌ای نامشابه بین فولاد DP600 و St14 را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد:

مرحله (۱): بر خلاف انتظار اولیه، در تمام نمونه‌هایی که در مود شکست محیطی دچار شکست شدند، مود شکست با رشد ترک از دور دکمه در طرف فولاد با استحکام بیشتر (فولاد دوفازی)

بر خلاف نمودار بار-جابجایی در مود IF، در این حالت نمودار دارای یک "دم" دراز است که با نحوه شکست بیان شده بعد از آغاز رشد ترک متناظر است.

همانطور که مشاهده می شود، بعد از رسیدن به نقطه پیک نیرو، نیرو به صورت تدریجی کاهش می یابد. پس از رسیدن به پیک نیرو، به دلیل پارگی فلز پایه ها، جذب انرژی هنوز ادامه دارد. این امر موجب افزایش قابلیت جذب انرژی کل جوش نقطه ای (یعنی سطح زیر نمودار منحنی بار-جابجایی تا نقطه شکست نهایی) می شود. تغییرات مشاهده شده در شیب نمودار بار-جابجایی در قسمت "دم" متناظر است با تغییر در مسیر رشد ترک. پیک نیرو متناظر است با شروع ایجاد ترک در ورق DP600 و شکستگی نمودار در قسمت دم متناظر است با ایجاد ترک در ورق St14. این نکته نیز قابل ذکر است که نمودار بار-جابجایی جوش هایی که در مود محیطی نوع (۲) دچار شکست شده اند، به علت پارگی کامل فلز پایه فولاد کم کربن "دم" درازتری دارند.

همانطور که ذکر شد یکی از پدیده های جالب مشاهده شده در این تحقیق، بیرون کشیده شدن دکمه از طرف فولاد مستحکم تر (DP600) بود که امری بر خلاف انتظار اولیه است. این امر را می توان گرادیان شدید سختی در مجاورت دکمه جوش در HAZ فولاد DP780 و تمرکز تنش در آن محل مرتبط کرد. گرادیان شدید سختی می تواند به عنوان یک شیار متالورژیکی عمل کند. گزارشات محدودی بیرون کشیده شدن دکمه از طرف فولاد مستحکم تر را گزارش کرده اند. برای مثال بالتازار<sup>۶</sup> و همکارانش [۱۸] در آزمون کشش-برش جوش نقطه ای DP600 به DP780 مشاهده کردند که شکست از طرف DP780 آغاز شده است.



شکل (۱۲): مراحل شکست محیطی، (الف) مرحله (۱)، آغاز شکست با شروع ترک در طرف فولاد دوفازی، (ب) مرحله (۲)، رشد ترک در طرف فولاد کم کربن، (ج) مرحله (۳)، نوع ۱، بیرون کشیده شدن کامل دکمه از ورق دوفازی به همراه پارگی جزئی در ورق کم کربن و (د) مرحله (۳)، نوع ۲، بیرون کشیده شدن کامل دکمه از ورق دوفازی و پارگی کامل ورق کم کربن.

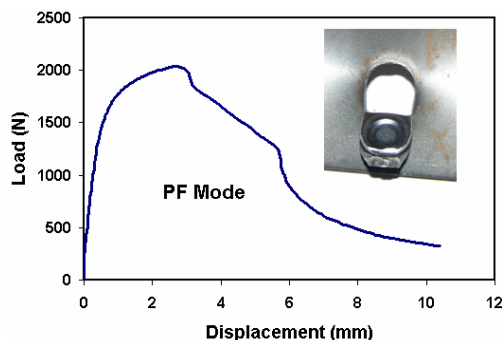
تنش‌های برشی وارد بر فصل مشترک دو ورق شده و در نتیجه تمایل به شکست فصل مشترک می‌یابد. به‌طور کلی یک اندازه دکمه جوش بحرانی وجود دارد که بالای آن مقدار، مود شکست محیطی حاصل می‌شود [۴، ۵، ۱۹ و ۲۰].

### ۳-۵- خواص مکانیکی

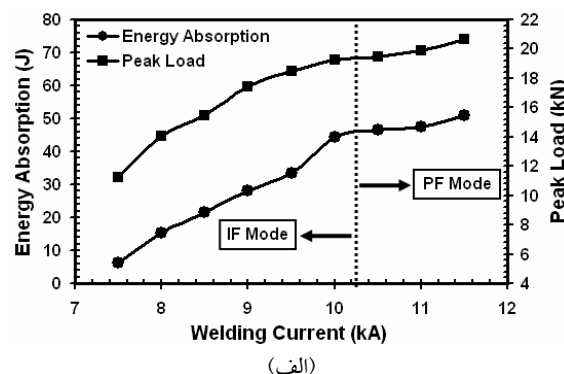
شکل (۱۴-الف) تأثیر جریان جوشکاری بر ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی پیش از شکست را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش جریان جوشکاری در محدوده بررسی شده موجب بهبود خواص مکانیکی اتصال می‌شود.

شکل (۱۴-ب) تأثیر اندازه دکمه جوش بر ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی جوش‌های نقطه‌ای را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یک رابطه مستقیم بین اندازه دکمه جوش، استحکام و انرژی شکست وجود دارد. نقطه ماکزیمم در نمودار بار-جابجایی آزمون کشش-برش در مود شکست فصل مشترک، متناظر با اشاعه ترک درون دکمه جوش و در مود محیطی متناظر با رشد ترک حول دکمه جوش است. در مود شکست فصل مشترک هر چه اندازه دکمه بیشتر باشد، مقاومت فصل مشترک به‌برش بیشتر می‌شود و در مود محیطی با افزایش قطر دکمه، مقاومت دکمه در برابر چرخش دکمه (به‌دلیل اعمال گشتاور به‌نمونه حین تست کشش ناشی از عدم همراستا بودن جهت اعمال نیرو با محور نمونه، دکمه جوش حین تست کشش-برش می‌چرخد) و همچنین سطح تحمل‌کننده نیرو افزایش یافته و در نتیجه نیروی لازم برای شروع شکست افزایش می‌یابد.

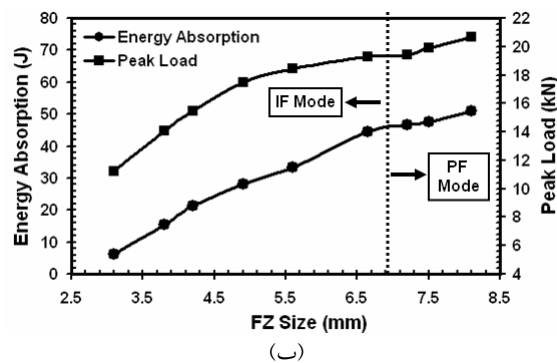
به‌هر حال در هر دو مود شکست افزایش قطر دکمه موجب افزایش نیرو و انرژی لازم برای شکست می‌شود. لازم به‌ذکر است که در صورتی که به‌جای محاسبه انرژی تا نقطه ماکزیمم، انرژی شکست تا لحظه شکست اندازه‌گیری شود، اختلاف انرژی شکست در مود فصل مشترک و مود محیطی بسیار بیشتر



شکل (۱۳): یک نمودار بار-جابجایی مربوط به شکست در مود محیطی، نوع ۱



(الف)



(ب)

شکل (۱۴): الف) تأثیر جریان جوشکاری و ب) تأثیر اندازه دکمه جوش بر خواص مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای ناهمجنس DP600/St14.

### ۳-۴-۳- تأثیر جریان جوشکاری بر مود شکست

همانطور که در شکل (۵) مشخص شده‌است، با افزایش جریان جوشکاری مود شکست از فصل مشترک به محیطی تغییر می‌کند. این امر به‌دلیل افزایش اندازه دکمه جوش است. عامل شکست فصل مشترک تنش‌های برشی در فصل مشترک ورق/ورق است. افزایش اندازه دکمه جوش، موجب کاهش

۴- بر خلاف انتظار اولیه، محل شکست در مود محیطی از منطقه نرم تر (یعنی طرف فولاد کم کربن) نبود و شکست از طرف DP600 رخ داد. این امر را می توان به تمرکز تنش ناشی از پیک سختی در HAZ طرف DP600 نسبت داد.

۵- نشان داده شد که یک رابطه مستقیم بین اندازه FZ و ظرفیت تحمل نیرو و همچنین قابلیت جذب انرژی جوش های نقطه ای ناهمجنس DP600/St14 وجود دارد.

### ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می دانند که از حمایت های دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی کنند.

### ۶- مراجع

- [1] A. Bag, K. K. Ray and E. S. Dwarakadasa, "Influence of Martensite Content and Morphology on the Toughness and Fatigue Behavior of High-Martensite Dual-Phase Steels", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 32, pp. 2207-2217, 2001.
- [2] M. D. Tumuluru, "Resistance Spot Welding of Coated High-Strength Dual Phase Steels", Weld J., Vol. 87, pp. 31-37, 2007.
- [3] H. Zhang and J. Senkara, Resistance Welding: Fundamentals and Applications, Taylor & Francis CRC Press, 2005.
- [4] Y. J. Chao, "Failure Mode of Resistance Spot Welds: Interfacial Versus Pullout", Sci. Technol. Weld. Joining, Vol. 8, pp. 133-137, 2003.
- [5] M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadeh, P. H. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of Weld Nugget Size on Overload Failure Mode of Resistance Spot Welds", Sci. Technol. Weld. Joining, Vol. 12, pp. 217-225, 2007.
- [6] M. Marya, K. Wang, L. G. Hector and X. Gayden, "Tensile-Shear Forces and Fracture Modes in Single and Multiple Weld Specimens in Dual-Phase Steels", J. Manufact. Sci. Eng., pp. 287-298, 2006.
- [7] X. Sun, E. V. Stephens and M. A. Khaleel, "Effects of Fusion Zone Size and Failure Mode on Peak Load and Energy Absorption of Advanced High Strength Steel Spot Welds Under Lap Shear Loading Conditions", Engineering Failure Analysis, Vol. 15, pp. 356-367, 2005.
- [8] J. E. Gould, S. P. Khurana and T. Li, "Predictions of Microstructures When Welding Automotive Advanced High-Strength Steels", Weld J., Vol. 86, pp. 111s-116s, 2006.

خواهد بود. ریوت<sup>۷</sup> [۲۱] گزارش کرد اگر چه ممکن است نیروی شکست در مود فصل مشترکی با مود محیطی تفاوت چندانی نداشته باشد اما انرژی شکست کل در مود محیطی حدود ۲۵۰ درصد بیشتر از مود فصل مشترکی خواهد بود. بر اساس شکل (۱۴-ب) می توان نتیجه گرفت، اندازه دکمه جوش اصلی ترین فاکتور کنترل کننده استحکام و انرژی شکست جوش های نقطه ای است.

### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله ریزساختار، رفتار شکست و خواص مکانیکی اتصال جوش مقاومتی نقطه ای ناهمجنس فولاد کم کربن St14 به فولاد دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP600 بررسی شد. موارد زیر نکات مهم مستخرج از این کار می باشد:

- ۱- ریزساختار و سختی FZ اتصال ناهمجنس جوش مقاومتی نقطه ای DP600/St14 تابع مخلوط شدن دو فلز پایه در هم و سرعت سرد شدن بالای این فرآیند می باشد. ریزساختار FZ شامل مارتنزیت، مقداری فریت آلوتریمورفیک، فریت ویدمن اشتاتن و بینیت است. مقدار ماکزیمم سختی در HAZ طرف فولاد DP600 بیشتر از سختی FZ است زیرا سختی پذیری FZ به علت مخلوط شدن دو فلز پایه و کاهش درصد کربن و منگنز آن نسبت به قسمت درشت دانه HAZ طرف DP600 کاهش می یابد.
- ۲- با افزایش جریان جوشکاری مود شکست از فصل مشترکی به مود محیطی تبدیل می شود. این امر به دلیل افزایش اندازه دکمه جوش است. با افزایش دکمه جوش مقاومت جوش نقطه ای در برابر مود شکست فصل مشترکی افزایش می یابد.
- ۳- سطح شکست نمونه های شکسته شده در مود فصل مشترکی حاوی حفره هایی بودند که نتایج SEM و حضور ساختار دندریتی در این مناطق نشان داد این حفره ها ناشی از انقباض حین انجمادی هستند. سطح شکست مود فصل مشترکی در اغلب نقاط حالت دیمپلی و در نقاط مجاور HAZ در طرف DP600 حالت کلیواژ دارد.

- [19] M. Pouranvari, A. Abedi, P. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of Expulsion on Peak Load and Energy Absorption of Low Carbon Resistance Spot Welds", *Sci. Tech. Weld. Join*, Vol. 13, pp. 39-43, 2008.
- [20] P. H. Thornton, A. R. Krause and R. G. Davies, "The Aluminum Spot Welds", *Welding Journal*, Vol. 75, pp. 101s-108s, 1996.
- [21] R. M. Rivett, "Assessment of Resistance Spot Welds in Low Carbon and High Strength Steel Sheet-Pat 1 Static Properties", Research Report, The Welding Institute, 1982.

۷- پی‌نوشت

- 1- Kuo and Wexler
- 2- Milititsky
- 3- Severson
- 4- Volger
- 5- Gould
- 6- Baltazar
- 7- Rivet

- [9] M. Marya and X. Q. Gayden, "Development of Requirements for Resistance Spot Welding Dual-Phase (DP600) Steels Part 2: Statistical Analyses and Process Maps", *Weld J.*, Vol. 84, pp. 197s-204s, 2005.
- [10] M. I. Khan, M. L. Kuntz and Y. Zhou, "Effects of Weld Microstructure on Static and Impact Performance of Resistance Spot Welded Joints in Advanced High Strength Steels", *Sci. Technol. Weld. Joining*, Vol. 13, pp. 294-304, 2008.
- [11] M. Kuo and A. Wexler: Proc. Conf. AWS SMWC XI, Detroit, MI, USA, RoMan Engineering Services Inc., Paper 5-6, 2004.
- [12] M. Milititsky, E. Pakalnins, C. H. Jiang and A. Thompson, "On Characteristics of DP600 Resistance Spot Welds", SAE Report 2003-01-0520, Warrendale, PA, USA, 2003.
- [13] L. E. Svensson, "Prediction of Hardness of Spot Welds in Steels", *Welding in the World*, Vol. 48, pp. 31-35, 2004.
- [14] American Welding Society: "Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials", ANSI/AWS/SAE/D8. 9-97.
- [15] M. Volger, "Investigation of Resistance Spot Weld Formation", Ph. D. Thesis of Stanford University, Palo Alto, CA, USA, 1993.
- [16] A. De, C. A. Walsh, S. K. Maiti and H. K. D. H. Bhadeshia, "Prediction of Cooling Rate and Microstructure in Laser Spot Welds", *Sci. Technol. Weld. Joining*, Vol. 8, pp. 391-398., 2003.
- [17] G. G. Kraus, "Principle of Heat Treatment", ASM International, 1989.
- [18] V. H. Baltazar Hernandez, M. L. Kuntz, M. I. Khan and Y. Zhou, "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, 2008.