

# جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI304 و فولاد کم کربن AISI1008: انتقال مود شکست و خواص مکانیکی اتصالات مشابه و نامشابه

مجید پورانوری<sup>۱\*</sup>، پیروز مرعشی<sup>۲</sup>

۱- مربی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، تهران، ایران

\*mpouranvari@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۵/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۹/۱۷)

## چکیده

در این تحقیق، رفتار شکست و رفتار انتقال از مود شکست فصل مشترکی به مود محیطی در اتصالات مشابه و نامشابه جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد ساده کم کربن (CS) و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی (SS) تحت آزمون کشش - برش بررسی شده است. نتایج نشان داد که ریزساختار منطقه - ی ذوب شده و توزیع سختی در محل اتصال تأثیر قابل توجهی بر رفتار شکست دارد. بررسی‌ها نشان داد که جوش مقاومتی نقطه‌ای مشابه SS/SS در مقایسه با اتصال مشابه CS/CS و اتصال نامشابه SS/CS تمایل بیشتری به شکست فصل مشترکی دارد. این رفتار با توجه به محل شکست در مود محیطی و پروفیل سختی اتصالات توضیح داده شد. نشان داده شد که انتقال مود شکست بوسیله نسبت سختی منطقه ذوب شده به سختی محل شکست در مود محیطی کنترل می‌شود.

## واژه‌های کلیدی:

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، اتصال نامشابه، مود شکست، پروفیل سختی.

## ۱- مقدمه

صورت می‌گیرد (مسیر A) و در مود شکست محیطی ( $PF^2$ )، شکست با بیرون کشیده شدن دکمه جوش از یک ورق صورت می‌گیرد. در این مود، شکست ممکن است از فلز پایه (مسیر B)، منطقه متأثر از حرارت (مسیر C) یا از مرز دکمه جوش و منطقه متأثر از حرارت (مسیر D) صورت گیرد. از آنجایی که 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

مود شکست جوش‌های نقطه‌ای یک معیار کیفی از کیفیت جوش است. به طور کلی، جوش‌های نقطه‌ای در دو مود فصل مشترکی و محیطی دچار شکست می‌شوند. شکل (۱) مسیر شکست‌های مرسوم حین آزمون مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در شکست فصل مشترکی ( $IF^1$ )، شکست از طریق اشاعه ترک از میان دکمه جوش (منطقه‌ای از اتصال که در حین سیکل حرارتی جوش، ذوب شده و دوباره منجمد می‌شود)

(رشد ترک در دکمه جوش)، رابطه‌ی (۲) را برای تعیین قطر دکمه‌ی بحرانی در آزمون کشش متقاطع به دست آورد:

$$D_{Cr} = 0.89 \left( \frac{\tau_y^{HAZ}}{K_C^{FZ}} \right)^{\frac{2}{3}} t^{\frac{4}{3}} \quad (2)$$

که در آن  $\tau_y^{HAZ}$  استحکام برشی HAZ و  $K_C^{FZ}$  چقرمگی شکست دکمه جوش است.

اگر چه رابطه‌ای که وی ارائه داده است قطر بحرانی را به چقرمگی شکست دکمه جوش و استحکام شکست برشی HAZ مرتبط می‌کند، اما او تلاش کرد تا نشان داد مدل او وابسته به ماده نیست و در نهایت با توجه به نتایج موجود در منابع رابطه‌ای ارائه داد که تنها وابسته به ضخامت ورق است. در واقع او سعی کرد نشان دهد،

$$\text{نسبت} \left( \frac{\tau_y^{HAZ}}{K_C^{FZ}} \right) \text{ برای فولادهای مختلف ثابت است.}$$

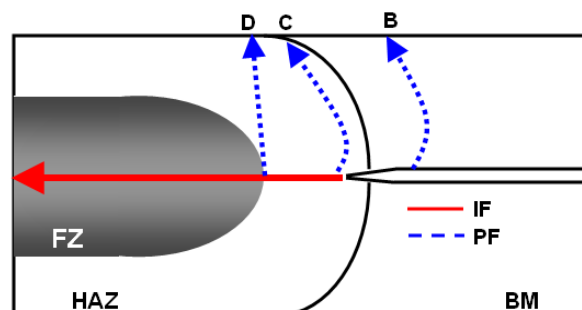
سان و همکارانش [۹] نیز با استفاده از آنالیز حد پایین نیرو و یک تحلیل تنش ساده، رابطه‌ی ۳ را برای تعیین قطر دکمه‌ی بحرانی در یک جوش نقطه‌ای آلومینیوم در آزمون کشش متقاطع ارائه دادند. از آنجایی که جوش نقطه‌ای آلومینیوم بسیار حساس به بیرون زدگی مذاب است، به گونه‌ای که در جریان و زمان‌های جوشکاری پایین که دکمه‌ی جوش کوچک و تمایل به شکست فصل مشترکی وجود دارد نیز رخ می‌دهد، آنها یک فاکتور  $f$  برای کسر تخلخل و حفره‌ی ناشی از بیرون زدگی مذاب در نظر گرفتند.

$$d_{Cr} = 3.2 \frac{t}{f} \quad (3)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود با توجه به رابطه‌ی ۳ ارائه شده، ضخامت ورق، قطر دکمه‌ی جوش و مقدار تخلخل فاکتورهای کنترل کننده‌ی مود شکست جوش‌های آلومینیوم در آزمون کشش متقاطع است.

هدف این مقاله بررسی تغییر مود شکست از فصل مشترکی به محیطی در اتصال مشابه فولاد ساده‌ی کم کربن (CS/CS)، اتصال مشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی (SS/SS) و اتصال نامشابه

نشوند، متغیرهای فرآیند باید به گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد [۱-۴].



شکل (۱): شماتیک مسیر شکست‌های مختلف در آزمون مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای.

اندازه‌ی دکمه‌جوش مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر رفتار مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای است. استانداردهای مختلف صنعتی برای هر ضخامت ورق مشخص، یک حداقل قطر دکمه پیشنهاد کرده‌اند. برای مثال AWS/ANSI/SAE [۵] رابطه‌ی زیر را پیشنهاد داده است:

$$d = 4\sqrt{t} \quad (1)$$

که در آن  $d$  و  $t$  به ترتیب قطر دکمه جوش و ضخامت ورق بر حسب mm می‌باشد. اما این معیار همیشه خوب کار نمی‌کند. برای مثال، نتایج ساوهیل<sup>۳</sup> و همکارانش [۶] و پولارد<sup>۴</sup> [۷] نشان داد در فولادهای HSLA برای اطمینان از حصول مود شکست محیطی به دکمه‌ی جوش با قطری بیشتر از آنچه رابطه‌ی (۱) پیشنهاد می‌کند نیاز است. همچنین تحلیل نتایج کار ماریا<sup>۵</sup> و همکارانش [۸] بر روی مود شکست جوش‌های نقطه‌ای فولادهای دوفازی و نتایج سان<sup>۶</sup> و همکارانش [۹] در مورد مود شکست جوش‌های نقطه‌ای در آلومینیوم نشان می‌دهد که معیار AWS برای حصول مود شکست محیطی، معیار دقیقی نیست. بنابراین به نظر می‌رسد، علاوه بر ضخامت ورق باید فاکتورهای متالورژیکی را نیز در نظر داشت.

چااو<sup>۷</sup> [۴] بر اساس رقابت بین دو مود شکست محیطی (تغییر فرم پلاستیک برشی اطراف دکمه‌ی جوش) و شکست فصل مشترکی

دکمه‌ی جوش قابل دستیابی بدون بیرون زدگی مذاب در نظر گرفته می‌شود [۶ و ۷].

جدول (۱): پارامترهای جوشکاری مورد استفاده

نوع اتصال	جریان جوشکاری (kA)	زمان جوشکاری (cycles)	نیروی الکتروود (kN)
CS/CS	۷-۱۱/۵	۱۲	۴/۲
SS/SS	۵-۱۰/۵	۱۲	۴/۲
CS/SS	۷-۱۱/۵	۱۲	۴/۲

جدول (۲): پارامترهای جوشکاری مورد استفاده برای تولید دکمه جوشی با

اندازه‌ی  $5.5t^{0.5}$  (mm)

نوع اتصال	جریان جوشکاری (kA)	زمان جوشکاری (cycles)	نیروی الکتروود (kN)
CS/CS	۱۱/۵	۱۲	۴/۲
SS/SS	۱۰	۱۲	۴/۲
CS/SS	۱۱	۱۲	۴/۲

پس از جوشکاری، نمونه‌ها تحت آزمون کشش-برش قرار گرفتند و با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی مقدار حد اکثر نیرو و حداکثر انرژی شکست (سطح زیر نمودار بار-جابجایی تا نقطه‌ی ماکزیمم نیرو) برای هر نمونه تعیین شد. برای بررسی اینکه محل شکست در مود محیطی در کدام منطقه‌ی ریزساختاری قرار دارد (BM<sup>۱۲</sup> یا HAZ یا مرز FZ/HAZ<sup>۱۳</sup>)، پس از شکست نمونه، از وسط نمونه‌ی شکسته شده در امتداد طول نمونه‌ی آزمون کشش-برش، برش زده شد. سپس این مقطع مانع شد و بوسیله‌ی میکروسکوپ نوری محل شکست مورد بررسی قرار گرفت.

آزمون متالوگرافی به منظور تعیین اندازه دکمه جوش و بررسی ساختار جوش انجام شد. آزمون ریزسختی سنجی نیز در امتداد قطری دکمه جوش با استفاده از یک دستگاه شیمیدزو تحت بار ۱۰۰ گرم انجام شد.

فولاد زنگ‌نزن آستینیتی و فولاد ساده کم کربن (CS/SS) است. از آنجایی که حساسیت به مود شکست فصل مشترکی در آزمون کشش-برش<sup>۹</sup> نسبت به دیگر آزمون‌ها مثل آزمون کندگی مبلمانی<sup>۱۰</sup> و آزمون کشش متقاطع<sup>۱۱</sup> بیشتر است [۱۰] برای بررسی رفتار انتقال از مود شکست فصل مشترکی به محیطی آزمون کشش-برش انتخاب شد. یک مدل تحلیلی برای تحلیل عوامل موثر بر مود شکست در آزمون کشش-برش ارائه شد. در نهایت خواص مکانیکی این اتصالات با هم مقایسه شده است.

## ۲- روش تحقیق

از ورق فولاد زنگ‌نزن آستینیتی ۳۰۴ (SS) با ضخامت ۱/۲ میلیمتر و دیگری ورق فولادی کم کربن گالوانیزه شده (CS) به روش غوطه‌وری گرم با ضخامت ۱/۱ میلیمتر به عنوان فلز پایه استفاده شد. در این تحقیق اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای سه اتصال CS/SS، SS/SS، CS/CS بررسی شد.

جوشکاری توسط دستگاه جوش نقطه‌ای ثابت با توان ۱۲۰kVA با استفاده از الکتروود گروه A، مطابق کلاس ۲ دسته بندی RWMA از جنس آلیاژ مس-کرم-زیرکونیوم و شکل آن به صورت مخروط ناقص با قطر تماس ۷ میلی‌متر، استفاده شد. پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در جدول (۱) خلاصه شده اند. پارامترهای جوشکاری به گونه‌ای انتخاب شدند که از بیرون زدگی مذاب جلوگیری شود. در هر شرایط جوشکاری ۴سری نمونه جوش داده شد که ۳ سری برای آزمون کشش-برش و یک نمونه‌ی دیگر برای بررسی‌های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند.

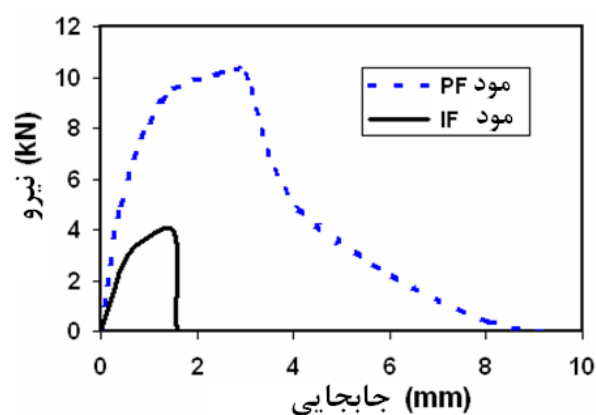
برای ارزیابی بیشتر خواص مکانیکی اتصال نامشابه، استحکام و انرژی شکست اتصالات مشابه و نامشابه SS و CS مقایسه شد. برای این کار خواص مکانیکی اتصالات SS/SS، CS/CS و CS/SS در شرایط جوشکاری داده شده در جدول (۲) مقایسه شد. شرایط جوشکاری به گونه‌ای انتخاب شد که دکمه‌ی جوشی با اندازه‌ی  $5.5t^{0.5}$  (mm) یعنی حدود ۶ میلی‌متر تولید شود. مقدار  $5.5t^{0.5}$  (mm) معمولاً به عنوان ماکزیمم اندازه

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تاثیر مود شکست بر نمودار بار-جابجایی حین آزمون

##### کشش-برش

شکل (۲) نمودار بار-جابجایی در آزمون کشش-برش برای دو نمونه که یکی در مود فصل مشترکی و دیگری در مود محیطی شکسته شده است را مقایسه می‌کند.



شکل (۲): مقایسه نمودار بار-جابجایی در مود فصل مشترکی و مود محیطی در آزمون کشش-برش

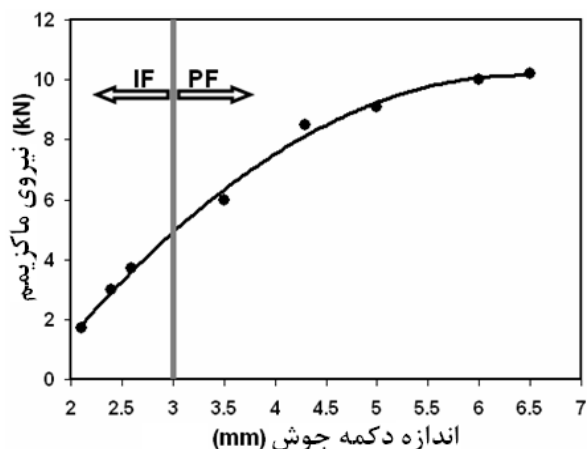
جابجایی در مود فصل مشترکی، در این حالت نمودار دارای یک "دم" دراز است که با نحوه‌ی شکست بیان شده بعد از آغاز رشد ترک متناظر است. همانطور که مشاهده می‌شود، بعد از رسیدن به نقطه‌ی پیک نیرو، نیرو به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. پس از رسیدن به پیک نیرو، به دلیل پارگی فلزات پایه، جذب انرژی هنوز ادامه دارد. این امر موجب افزایش قابلیت جذب انرژی کل جوش نقطه‌ای (یعنی سطح زیر نمودار منحنی بار-جابجایی تا نقطه‌ی شکست نهایی) می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی (مساحت زیر نمودار بار-جابجایی) در مود فصل مشترکی به‌طور قابل توجهی کم‌تر از مود محیطی است، بنابراین برای اینکه جوش‌های نقطه‌ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرایند باید به گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل گردد.

#### ۳-۲- اندازه دکمه جوش بحرانی

شکل (۳) تغییرات نیروی ماکزیمم (استحکام شکست) و تغییرات مود شکست بر حسب اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در اتصال مشابه فولاد ساده‌ی کم کربن (CS/CS)، اتصال مشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی (SS/SS) و اتصال مشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی و فولاد ساده کم کربن (CS/SS) را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است یک اندازه دکمه جوش بحرانی برای حصول مود شکست محیطی وجود دارد. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بحرانی تابع نوع اتصال است. جوش‌های CS/CS هنگامی که اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بیشتر از ۳/۳ میلی‌متر باشد، در مود محیطی دچار شکست می‌شوند. جوش‌های SS/SS، بیشترین تمایل به شکست فصل مشترکی را از خود نشان می‌دهند. اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بحرانی برای این اتصال ۵/۷۵ میلی‌متر است. اما وقتی که ورق SS به ورق CS جوش داده می‌شود، مود شکست محیطی در اندازه دکمه جوش‌های پایینتری نسبت به اتصال SS/SS رخ می‌دهد.

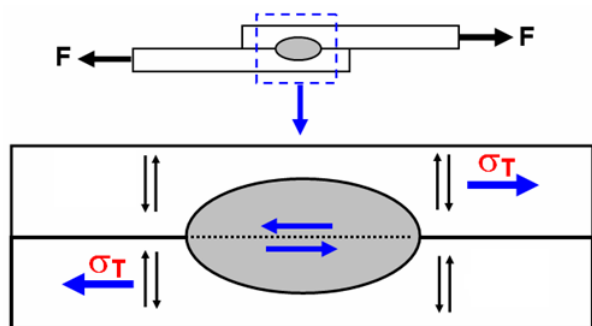
نمودار بار-جابجایی جوش‌های نقطه‌ای که در مود شکست فصل مشترکی دچار شکست شده‌اند، شکل مشخصی دارند. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نمودار پیش از رسیدن به نقطه‌ی ماکزیمم، یک منطقه غیرخطی دارد که مربوط به تغییر فرم پلاستیک دو ورق و کرنش‌سختی مربوط به آن می‌باشد. نقطه‌ی ماکزیمم در نمودار بار-جابجایی متناظر است با شروع رشد ترک از لبه‌ی شیار طبیعی موجود در محل اتصال دو ورق و ورود آن به منطقه‌ی دکمه‌ی جوش است. نیرو پس از رشد سریع ترک در دکمه‌ی جوش سریعاً به صفر می‌رسد. شیار معمولاً در HAZ و یا مرز HAZ/FZ قرار دارد. اما نمودار بار-جابجایی برای جوش نقطه‌ای که در مود محیطی شکسته شده‌اند با نمودار بار-جابجایی در آزمون فصل مشترکی متفاوت است. در این نمودار نیز، منطقه غیرخطی در منحنی ناشی از کارسختی ورق‌های فولادی است. نقطه‌ی ماکزیمم در نمودار متناظر است با رشد ترک از طرف فولاد کربنی. برخلاف نمودار بار-



ج

شکل (۳): تغییرات نیروی ماکزیمم و مود شکست بر حسب اندازه‌ی دکمه‌ی

جوش: الف-CS/CS، ب-SS/SS، ج-CS/SS.



شکل (۴): یک مدل ساده از توزیع تنش در فصل مشترک و محیط دکمه

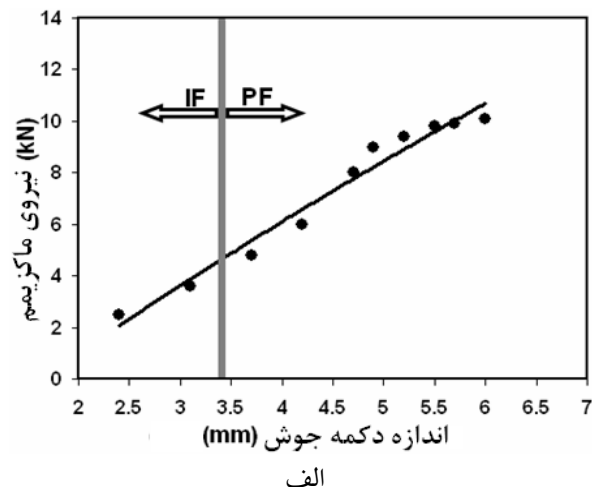
جوش در آزمون کشش-برش

شکل ۴ یک مدل ساده از توزیع تنش در فصل مشترک و محیط دکمه‌ی جوش را نشان می‌دهد. در فصل مشترک جوش، تنش‌ها عمدتاً برشی هستند. در محیط دکمه‌ی جوش تنش‌ها در محل‌های مشخص شده در شکل (۴) با علامت T برشی و کششی هستند. شکست جوش‌های نقطه‌ای در نتیجه‌ی رقابت بین دو مود شکست است بدین معنی که شکست در مودی رخ می‌دهد که نیاز به نیروی کمتری داشته باشد. برای آزمون کشش-برش نیروی محرکه مود محیطی تنش کششی و نیروی محرکه مود فصل مشترکی تنش برشی در خط مرکز جوش است. از نقطه‌نظر مهندسی، می‌توان گفت هر نیروی محرکه یک مقدار بحرانی دارد و رخ دادن هر مود شکست به این بستگی دارد که

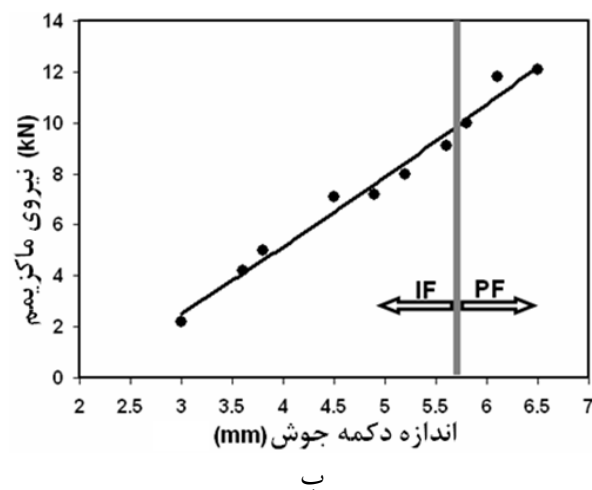
### ۳-۳- تحلیل مود شکست

۳-۳-۱- فاکتورهای کنترل کننده‌ی انتقال از شکست فصل مشترکی به شکست محیطی در جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای در آزمون کشش-برش

در این قسمت یک تحلیل ریاضی ساده برای مود شکست در آزمون کشش-برش ارائه می‌شود. ابتدا به مکانیزم شکست جوش‌های نقطه‌ای در آزمون کشش-برش پرداخته می‌شود. وقتی یک جوش نقطه‌ای تحت آزمون کشش-برش قرار می‌گیرد، رفتار جوش نقطه‌ای در برابر تنش‌های اعمالی بدین گونه است که ابتدا دکمه‌ی جوش برای از بین بردن گشتاور و همراستا شدن با جهت اعمال نیرو چرخش می‌کند. هرچه اندازه‌ی دکمه بیشتر باشد، چرخش دکمه بیشتر است.



الف



ب

سختی آن کمتر و در نتیجه گردنی شدن راحتتر باشد. رابطه‌ی ۵ در حالتی که شکست در BM یا در مرز HAZ و BM رخ دهد به صورت زیر در می‌آید که در آن  $(\sigma_{UTS})_{BM}$  استحکام کششی فلز پایه است.

$$P_{PF} = 2\pi r t (\sigma_{UTS})_{BM} = \pi d t (\sigma_{UTS})_{BM} \quad (6)$$

این رابطه با روابط تجربی ارایه شده تطابق خوبی دارد. برای مثال Sawhill و Backer [۶] رابطه‌ی  $P = f d t (\sigma_{UTS})_{BM}$  را برای استحکام جوش‌های نقطه‌ای در آزمون کشش - برش ارایه دادند که در آن  $f$  ضریبی بین ۲/۵ و ۳/۱ می‌باشد.

شرط اینکه جوش نقطه‌ای در مود محیطی دچار شکست شود این است که نیروی شکست در مود محیطی کم‌تر از نیروی لازم برای شکست در مود فصل مشترکی باشد. بنابراین برای اطمینان از شکست جوش در مود محیطی داریم:

$$F_{PF} \leq F_{IF} \Rightarrow d \geq 4t \frac{(\sigma_{UTS})_{FL}}{\tau_{WN}} \quad (7)$$

بنابراین قطر بحرانی دکمه‌ی جوش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d_{Cr} = 4t \frac{(\sigma_{UTS})_{FL}}{\tau_{WN}} \quad (8)$$

رابطه ۸ بیان می‌کند که مود شکست در نمونه‌های کشش - برش وابسته به ترکیبی از ضخامت ورق، استحکام فلز پایه و استحکام دکمه جوش است. بنابراین معیار شکست به این صورت بیان می‌شود:

اگر در یک جوش نقطه‌ای  $d < d_{Cr}$  آنگاه در حین آزمون در مود فصل مشترکی دچار شکست می‌شود و اگر  $d > d_{Cr}$  در مود محیطی دچار شکست می‌شود.

به علت کوچک بودن ابعاد جوش نقطه‌ای، بدست آوردن استحکام کششی و برشی مناطق مختلف آن به روش آزمون مستقیم مشکل است. طبق معیار ترسکا استحکام نهایی برشی نصف استحکام نهایی کششی است. از طرف دیگر استحکام کششی فلزات با سختی و یکرز آنها متناسب است. بنابراین رابطه ۸ را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$d_{Cr} = 4t \frac{(\sigma_{UTS})_{FL}}{(0.5\sigma_{UTS})_{WN}} = 8t \frac{(H)_{FL}}{(H)_{WN}} \quad (9)$$

کدام نیروی محرکه زودتر به مقدار بحرانی اش می‌رسد. مهمترین پارامتر کنترل کننده‌ی توزیع تنشی در جوش نقطه‌ای، اندازه دکمه جوش است. با کاهش قطر دکمه جوش، تنش برشی بوجود آمده پیش از آن که تنش کششی موجب گردنی شدن شود، به مقدار بحرانی خود می‌رسد و در نتیجه شکست در مود فصل مشترکی رخ می‌دهد. در صورتی که اندازه دکمه‌ی جوش از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد، تنش برشی بوجود آمده روی فصل مشترک به حدی نخواهد بود که موجب رشد ترک از میان دکمه‌ی جوش شود و در نتیجه دکمه‌ی جوش در اثر تنش‌های کششی تولید شده در اطراف دکمه‌ی جوش، در مود محیطی دچار شکست خواهد شد.

بنابراین برای ساختن یک مدل برای پیش بینی مود شکست نیاز است ابتدا روابطی برای بیان ریاضی نیروی شکست در دو مود فصل مشترکی و محیطی بدست آورده شود:

نیروی شکست در مود فصل مشترکی ( $P_{IF}$ ) را می‌توان با فرض توزیع یکنواخت تنش برشی بر دکمه‌ی جوش، که به صورت یک استوانه با قطر  $d$  و ارتفاع  $2t$  فرض می‌شود، بصورت زیر بیان کرد:

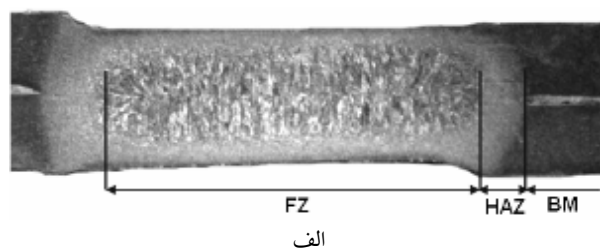
$$P_{IF} = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \tau_{WN} \quad (4)$$

در آن  $\tau_{WN}$ : استحکام برشی دکمه‌ی جوش،  $d$ : قطر دکمه‌ی جوش می‌باشد.

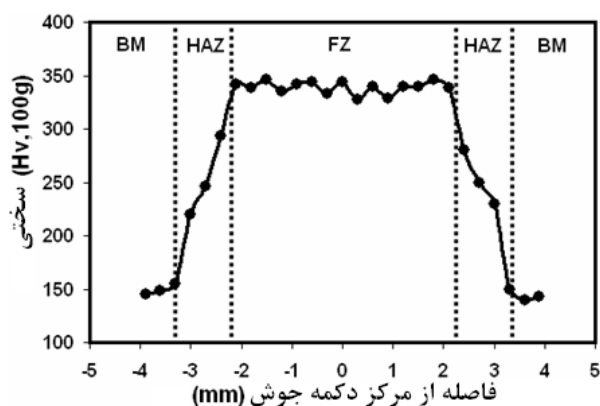
همانطور که ذکر شد مود شکست محیطی با یک مکانیزم کششی رخ می‌دهد. در این حالت فرض می‌شود، شکست هنگامی رخ می‌دهد که تنش در محیط یک نیمه استوانه‌ای شکل دکمه به استحکام نهایی محل شکست برسد. بنابراین در اینجا رابطه‌ی زیر برای برای شکست محیطی جوش‌های نقطه‌ای در آزمون کشش - برش ارایه می‌شود:

$$P_{PF} = 2\pi t (\sigma_{UTS})_{F.L} = \pi d t (\sigma_{UTS})_{F.L} \quad (5)$$

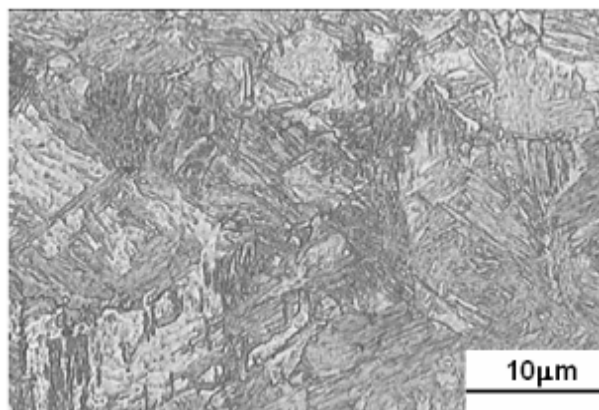
که در آن  $(\sigma_{UTS})_{F.L}$  استحکام کششی محل شکست می‌باشد. در رابطه‌ی فوق از کاهش ضخامت ناشی از فرورفتگی الکتروود در ورق صرف نظر شده است. با توجه به مکانیزم ارایه شده انتظار می‌رود محل شکست در مود محیطی جایی باشد که



الف



ب



ج

شکل (۵): الف) ماکروساختار، ب) پروفیل سختی و ج) ریزساختار دکمه‌ی جوش اتصال CS/CS.

شکل (۵) ماکروساختار، پروفیل سختی و ریزساختار دکمه‌ی جوش اتصال CS/CS نشان می‌دهد. شکل (۵-الف) ماکروساختار یک جوش نقطه‌ای CS/CS را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ساختار یک جوش نقطه‌ای متشکل از سه منطقه است:

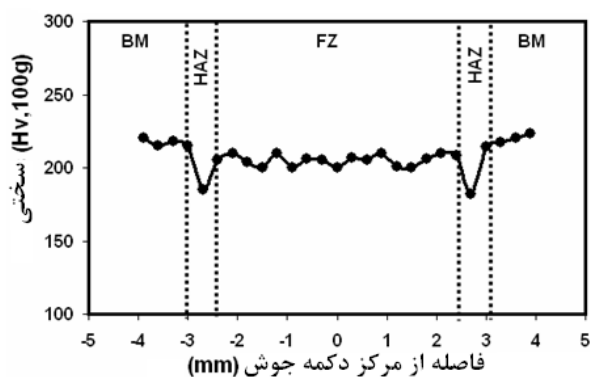
دوباره رابطه ۹، قطر بحرانی را علاوه بر ضخامت ورق به نسبت سختی فلز پایه و سختی دکمه‌ی جوش وابسته می‌کند. در رابطه‌ی فوق سختی‌ها برحسب مقیاس میکرو ویکرز می‌باشند. همانطور که ملاحظه می‌شود در یک نسبت سختی ثابت، هرچه ضخامت ورق بیشتر باشد،  $d_{Cr}$  بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر در یک ضخامت ورق ثابت، هرچه نسبت  $\frac{(H)_{WN}}{(H)_{FL}}$  بیشتر باشد، تمایل به گردنی شدن افزایش و در نتیجه حساسیت به شکست فصل مشترکی کمتر می‌شود. بنابراین رابطه ۹ قطر بحرانی را برخلاف استانداردهای صنعتی موجود (همانند استاندارد AWS، رابطه‌ی ۱) نه تنها به ضخامت ورق بلکه به پارامترهای متالورژیکی ورق (یعنی نسبت سختی دکمه‌ی جوش به سختی محل شکست در مود محیطی) نیز وابسته می‌کند.

۳-۲-۳- انتقال مود شکست در جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای مشابه و نامشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فولاد کم کربن  
بنابر مدل تحلیلی فوق، مهمترین فاکتور متالورژیکی کنترل کننده‌ی مود شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای حین آزمون کشش-برش، نسبت سختی دکمه‌ی جوش به سختی محل شکست در مود محیطی است. بنابراین، برای تحلیل انتقال مود شکست از مود فصل مشترکی به مود محیطی در اتصالات مشابه و نامشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فولاد ساده کم کربن باید به دو مطلب توجه کرد: ۱) محل شکست در مود محیطی و ۲) مشخصه‌های پروفیل سختی اتصال.

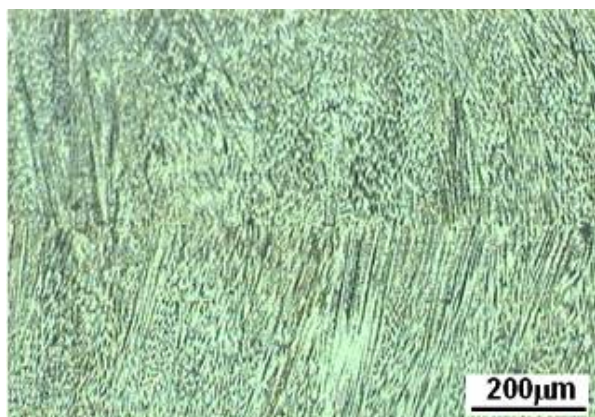
ابتدا به پروفیل سختی و ریزساختار محل اتصال این اتصالات توجه کنید.



الف

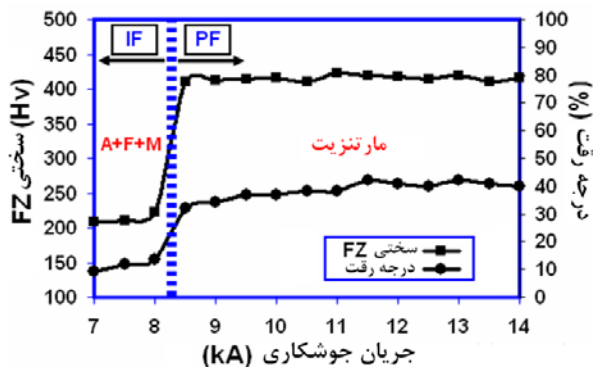


ب



ج

شکل (۶): (الف) ماکروساختار، (ب) پروفیل سختی و (ج) ریزساختار دکمه‌ی جوش اتصال SS/SS



شکل (۷): تاثیر جریان جوشکاری بر درجه‌ی رقت، ریزساختار و سختی دکمه‌ی جوش (FZ) در اتصال نامشابه SS/CS (A: آستنیت، F: فریت و M: مارتنزیت)

۱- دکمه جوش ( منطقه‌ای که در حین فرایند جوشکاری ذوب شدن را تجربه کرده و سپس دوباره منجمد شده)، ۲- منطقه متأثر از حرارت و ۳- فلز پایه است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، سختی دکمه‌ی جوش در اتصال CS/CS بیشتر از سختی فلز پایه و HAZ است ( شکل ۵-ب). این امر را می‌توان به تشکیل فاز مارتنزیت در دکمه‌ی جوش مرتبط کرد ( شکل ۵-ج). در اینجا نیز تشکیل مارتنزیت در دکمه‌ی جوش به دلیل سرعت بسیار زیاد سرد شدن در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای است.

شکل (۶) ماکروساختار، پروفیل سختی و ریزساختار دکمه‌ی جوش اتصال SS/SS نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود بر خلاف پروفیل سختی جوش‌های نقطه‌ای فولادهای کم کربن، تغییرات سختی در امتداد محل اتصال زیاد نیست. با این وجود سختی دکمه جوش و HAZ مقداری کمتر از سختی فلز پایه است. سختی پایین‌تر دکمه‌ی جوش نسبت به فلز پایه را می‌توان به ساختار ریختگی و وجود دانه‌های ستونی درشت در آن نسبت داد. همانطور که ملاحظه می‌شود ساختار دکمه‌ی جوش کاملاً آستنیتی است.

از آنجایی که فلز پایه‌ی مورد استفاده در این پژوهش فولاد زنگ نزن آستنیتی استحال ناپذیر است بنابراین تغییرات فازی در منطقه متأثر از حرارت مشاهده نمی‌شود. اما کاهش جزئی سختی در HAZ فولادهای زنگ نزن آستنیتی را می‌توان به رشد دانه در این منطقه وابسته کرد [۱۱].

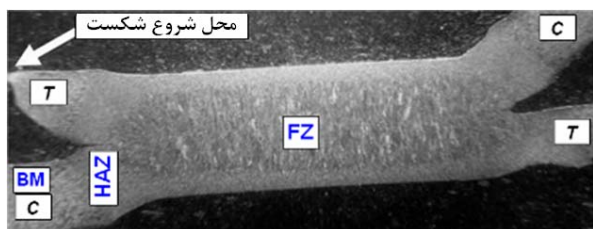
شکل (۷) ارتباط جریان جوشکاری، درجه‌ی رقت، سختی دکمه‌ی جوش و ریزساختار پیشینی شده توسط دیاگرام شیفلر برای اتصال ناهمجنس SS/CS نشان داده شده است.



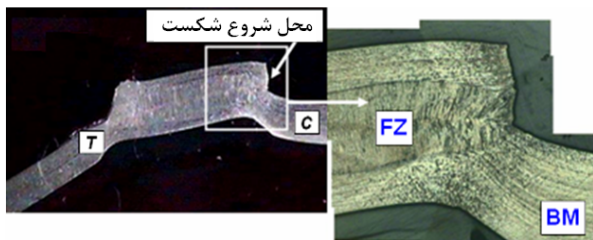
همانطور که پیش از این ذکر شد، جوش‌های SS/SS بیشترین تمایل به شکست فصل مشترکی را از خود نشان می‌دهند. نسبت سختی در مورد جوش‌های SS/SS برابر

$$\frac{H_{FZ}}{H_{FL}} = \frac{205}{175} = 1.17$$

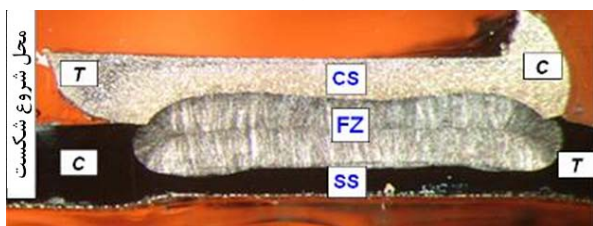
است. این نسبت پایین سختی موجب تشویق مود شکست فصل مشترکی می‌شود. اما این نسبت برای فولاد کم کربن CS/CS برابر  $\frac{H_{FZ}}{H_{FL}} = \frac{330}{140} = 2.4$  است. این نسبت سختی بالا، اندازه‌ی دکمه‌ی بحرانی کمتر اتصال CS/CS نسبت به SS/SS را نشان می‌دهد.



الف



ب



ج

شکل (۸): مقطع متالوگرافی نمونه‌های شکسته شده جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای در آزمون کشش-برش، T بیانگر محلی که در معرض تنش کششی است و C بیانگر محلی که در معرض تنش فشاری است. الف) CS/CS، ب) SS/SS و ج) CS/SS

در مورد اتصال نامشابه SS/CS، این نسبت سختی وابسته به ریزساختار FZ است که بوسیله‌ی میزان اختلاط فلزات پایه CS و

حالا برای تحلیل مود شکست اتصالات ابتدا به محل شکست محیطی جوش‌های نقطه‌ای توجه کنید. شکل ۸ ماکروگراف مقطع طولی نمونه‌های شکسته شده‌ی جوش‌های CS/CS، SS/SS و CS/SS را نشان می‌دهد. همانطور که پیش تر ذکر شد، عامل شکست محیطی تنش‌های کششی در اطراف دکمه‌ی جوش است. محل شکست در مود محیطی جایی خواهد بود که تنش کششی و گردنی شدن را تجربه کند. براساس شکل (۸) موارد زیر قابل استخراج است:

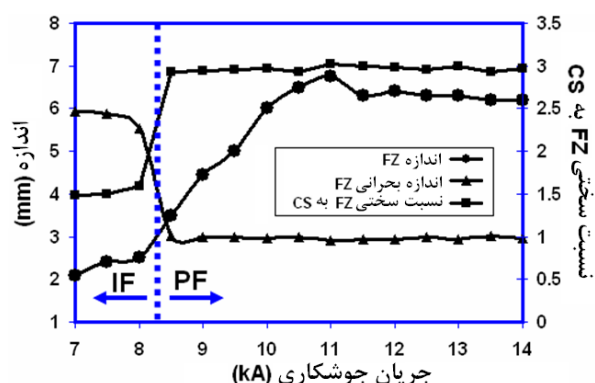
(۱) براساس شکل (۸-الف)، محل شکست اتصال CS/CS، در BM است. این امر را می‌توان به سختی پایین تر BM نسبت به HAZ و FZ وابسته کرد. سختی کم BM یک محل ترجیحی برای گردنی شدن حین آزمون کشش-برش تولید می‌کند.

(۲) براساس شکل (۸-ب)، محل شکست اتصال SS/SS، در مرز FZ/HAZ است. از آنجایی که تغییرات قابل توجهی در پروفیل سختی در امتداد این اتصال مشاهده نمی‌شود، تمرکز تنش در لبه‌ی دکمه‌ی جوش (مرز FZ/HAZ) فاکتور کلیدی تعیین کننده‌ی محل شکست است. به علاوه، نرم شدگی ناشی از رشد دانه در HAZ فولاد زنگ نزن می‌تواند موجب شروع شکست محیطی از این محل شود.

(۳) براساس شکل (۸-ج)، محل شکست اتصال CS/SS در BM طرف CS است. در این مورد، محل شکست محیطی بوسیله‌ی رقابت بین SS و CS برای گردنی تعیین می‌شود. از آنجایی که سختی و استحکام کششی ورق CS کمتر از SS است، این منطقه گردنی شدن شدیدتری نسبت به فولاد زنگ نزن تجربه می‌کند و شکست از این محل آغاز می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استحکام جوش مقاومتی نقطه‌ای CS/SS در مود محیطی بوسیله‌ی استحکام فلز پایه‌ی فولاد کم کربن کنترل می‌شود.

حال برای تحلیل پدیده‌ی انتقال مود شکست از فصل مشترکی به محیطی در این سه نوع اتصال، باید نسبت سختی دکمه‌ی جوش (FZ) به سختی محل شکست (FL) را در نظر گرفت.

محیطی (در مورد اتصال SS/CS، فلز پایه CS است چون سختی کمتری دارد و گردنی شدن راحت تر است) افزایش می‌یابد. در این شکل اندازه دکمه‌ی بحرانی براساس رابطه‌ی ۶ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در جریان‌های جوشکاری ۷، ۷/۵ و ۸ کیلوآمپر قطر دکمه‌ی جوش از قطر دکمه‌ی بحرانی کمتر است و بنابراین جوش‌ها در مود فصل مشترکی دچار شکست شده‌اند. اما در جریان‌های جوشکاری بیش از ۸ کیلوآمپر قطر دکمه‌ی جوش بیشتر از قطر دکمه‌ی بحرانی شده و در نتیجه جوش‌ها در مود محیطی دچار شکست شده‌اند.



شکل (۹): تاثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه‌ی جوش و نسبت سختی FZ به سختی محل شکست (CS) و ارتباط آن با مود شکست

### ۳-۴- مقایسه رفتار مکانیکی اتصال مشابه و نامشابه فولادهای

#### زنگ نزن آستنیتی و ساده‌ی کم کربن

برای ارزیابی بیشتر خواص مکانیکی اتصال نامشابه، استحکام و انرژی شکست اتصالات مشابه و نامشابه SS و CS مقایسه شد. برای این کار خواص مکانیکی اتصالات SS/SS، CS/CS و CS/SS در شرایط جوشکاری داده شده در جدول (۲) مقایسه شد. اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بدست آمده در این شرایط جوشکاری در اتصالات SS/SS، CS/CS و CS/SS به ترتیب ۶/۴، ۶ و ۶ میلی‌متر است. برای در نظر گرفتن این اختلاف در اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و مقایسه‌ی خواص مکانیکی این اتصالات، مقادیر استحکام و انرژی شکست با تقسیم کردن بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش (D) نرماله شدند.

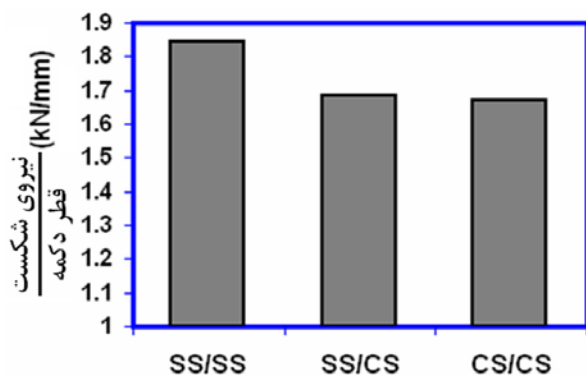
SS در دکمه‌ی جوش تعیین می‌شود. شکل (۷) ارتباط جریان جوشکاری با درجه رقت، ریزساختار FZ، سختی FZ و مود شکست جوش‌های نقطه‌ای SS/CS را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در جریان‌های جوشکاری کمتر از ۸/۵ کیلوآمپر درجه‌ی رقت در حدود ۸-۱۲ درصد می‌باشد. براساس دیاگرام شیفلر، اختلاط دو فلز پایه به این میزان موجب تولید یک ریزساختار فریت + آستنیت + مارتنزیت می‌شود. سختی کم FZ مویید تشکیل این ریزساختار می‌باشد. سختی FZ در این نمونه‌ها حدود ۲۰۰ ویکرز می‌باشد. شکست فصل مشترکی این نمونه‌ها را می‌توان با توجه به دو مطلب توجیه کرد: (۱) در این شرایط جوشکاری استحکام برشی FZ به علت سختی کم آن پایین است و در نتیجه در مقایسه با فلز پایه یک مسیر ترجیحی برای رشد ترک فراهم می‌شود.

(۲) از طرف دیگر، اندازه دکمه‌ی جوش پایین در این نمونه‌ها موجب تولید تنش برشی زیادی در فصل مشترک ورق/ورق در FZ شده که موجب می‌شود پیش از آنکه تنش‌های کششی موجب گردنی شدن اطراف دکمه‌ی جوش شوند، تنش‌های برشی در FZ موجب رشد ترک از میان این منطقه‌ی نرم شوند. ترکیب این دو عامل شکست فصل مشترکی در این نمونه‌ها را توجیه می‌کند.

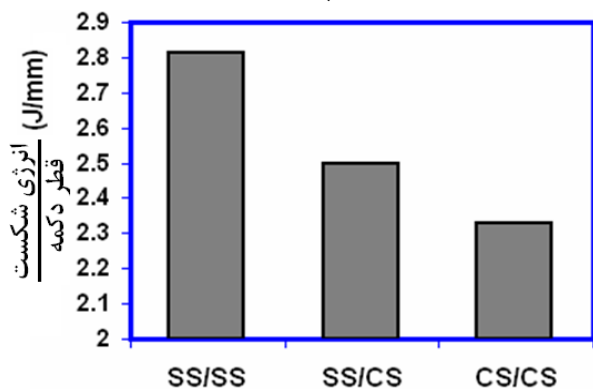
با افزایش جریان جوشکاری بیش از ۸ کیلوآمپر، درجه‌ی رقت در حدود ۳۳-۴۰ درصد می‌باشد. براساس دیاگرام شیفلر، اختلاط دو فلز پایه به این میزان موجب تولید یک ریزساختار مارتنزیتی می‌شود. سختی بالای FZ مویید تشکیل این ریزساختار می‌باشد. سختی FZ در این نمونه‌ها حدود ۴۰۰ ویکرز می‌باشد. سختی بالای FZ به همراه افزایش اندازه دکمه‌ی جوش موجب شکست محیطی در این نمونه‌ها می‌شود. بنابراین در این مورد پارامترهای جوشکاری باید به گونه‌ای تنظیم شوند که درجه‌ی رقت در محدوده‌ای باشد که موجب تشکیل مارتنزیت در دکمه‌ی جوش شود. شکل (۹) بحث بالا را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش جریان جوشکاری نسبت سختی FZ به سختی محل شکست در مود

HAZ با سختی ۱۷۵ و یکرز) نسبت به استحکام محل شکست CS/CS (فلز پایه CS با سختی ۱۴۰ و یکرز) است. استحکام CS/CS و SS/CS تقریباً نزدیک به هم هستند. این امر به این دلیل است که شکست محیطی اتصال SS/CS از فولاد CS شروع می‌شود و بنابراین استحکام اتصال SS/CS بوسیله استحکام فلز پایه CS کنترل می‌شود.

علیرغم استحکام تقریباً مشابه اتصالات SS/CS و CS/CS، انرژی SS شکست اتصال نامشابه SS/CS بیشتر است (شکل ۱۲). دلیل این امر را می‌توان به داکتیلیتی بالاتر و ضریب کارسختی بیشتر فولاد SS نسبت فولاد CS دانست. این امر به افزایش تغییر فرم پلاستیک حین فرایند شکست محیطی اتصال SS/CS کمک کرده و انرژی شکست اتصال افزایش می‌یابد. انرژی شکست بالای جوش‌های SS/SS ناشی از استحکام بالاتر به دلیل استحکام کششی بالاتر فلز پایه و همچنین بالاتر بودن داکتیلیتی و ضریب کار سختی آن می‌باشد.



شکل (۱۱): مقایسه استحکام جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای اتصالات مشابه و نامشابه SS و CS



شکل (۱۲): مقایسه انرژی شکست جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای اتصالات مشابه و نامشابه SS و CS

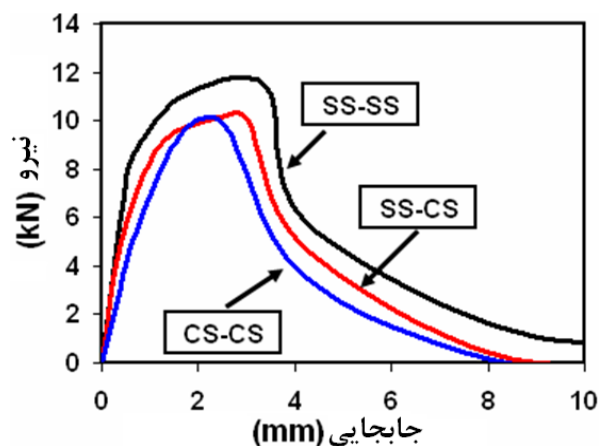
شکل (۱۰) نمودار بار-جابجایی اتصالات SS/SS، CS/CS و CS/SS در آزمون کشش-برش را مقایسه می‌کند. شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب مقایسه استحکام و انرژی شکست اتصالات SS/SS، CS/CS و CS/SS را نشان می‌دهد.

استحکام یک جوش نقطه‌ای تابع فاکتورهای مختلفی از جمله مشخصه‌های هندسی دکمه‌ی جوش (اندازه‌ی دکمه‌ی جوش، عمق فرورفتگی الکتروود در ورق و ...)، مود شکست و استحکام محل شکست بستگی دارد.

انرژی شکست یک جوش نقطه‌ای به صورت مساحت زیر نمودار بار-جابجایی تا نقطه‌ی ماکزیمم محاسبه می‌شود:

$$Energy\ Absorption = \int_0^{l_{max}} F dl \propto P_{max} \times l_{max}$$

در رابطه‌ی فوق  $P_{max}$ ، نیروی ماکزیمم،  $l_{max}$  جابجایی ماکزیمم متناظر با نیروی ماکزیمم است.  $l_{max}$  بیانگر داکتیلیتی جوش است که تابع داکتیلیتی محل شکست است. بنابراین مقدار انرژی جذب شده حین شکست تابع فاکتورهای کنترل کننده‌ی استحکام شکست و داکتیلیتی محل شکست است.



شکل (۱۰): مقایسه نمودار بار-جابجایی اتصالات SS، CS/CS و CS/SS در آزمون کشش-برش

در اندازه دکمه جوش‌های بدست آمده در این شرایط جوشکاری، هر سه اتصال در مود محیطی دچار شکست شدند. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود استحکام جوش‌های SS/SS بیشتر از استحکام جوش‌های CS/CS است. این امر به دلیل استحکام بالاتر محل شکست نمونه‌ی SS/SS (مرز FZ و

#### ۴- نتیجه گیری

۱- یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی مود شکست جوش‌های نقطه‌ای در آزمون کشش-برش جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای ارائه شد. براساس این مدل، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بحرانی مورد نیاز برای اطمینان از حصول مود شکست محیطی تابع نسبت سختی دکمه‌ی جوش به سختی محل شکست در مود محیطی دارد. پروفیل سختی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای تاثیر قابل توجهی بر رفتار شکست و مود شکست جوش‌های نقطه‌ای دارد.

۲- محل شکست در مود محیطی برای جوش‌های SS/SS، CS/CS و CS/SS به ترتیب مرز HAZ و FZ، BM و BM می‌باشد.

۳- اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بحرانی مورد نیاز برای اطمینان از حصول مود شکست محیطی در آزمون کشش-برش جوش‌های مشابه SS/SS و CS/CS متفاوت با جوش CS/SS است. اندازه‌ی دکمه جوش بحرانی در مورد اتصال SS/SS بیشترین مقدار را دارد. این امر را می‌توان به سختی کم دکمه‌ی جوش نسبت به محل شکست در مود محیطی وابسته کرد.

۴- در اتصال نامشابه CS/SS، ریزساختار و سختی دکمه‌ی جوش که بوسیله‌ی درجه‌ی رقت دو فلز پایه کنترل می‌شود و همچنین اندازه دکمه‌ی جوش در فصل مشترک ورق/ورق کنترل کننده‌ی مود شکست است. افزایش جریان جوشکاری بیش از ۸ کیلوآمپر موجب افزایش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش شده به علاوه با افزایش درجه‌ی رقت موجب تشکیل یک ساختار مارتزیتی در دکمه‌ی جوش می‌شود. این دو عامل موجب تغییر مود شکست از مود فصل مشترکی به مود محیطی می‌شود.

۵- استحکام جوش‌های SS/SS بیشتر از استحکام جوش‌های CS/CS است. این امر به دلیل استحکام بالاتر محل شکست نمونه‌ی SS/SS (مرز FZ و HAZ با سختی ۱۷۵ ویکرز) نسبت به استحکام محل شکست CS/CS (فلز پایه CS با سختی ۱۴۰ ویکرز) است. استحکام CS/CS و SS/CS تقریباً نزدیک به هم هستند. دلیل این امر این است که شکست محیطی اتصال SS/CS از فولاد CS شروع می‌شود و بنابراین استحکام اتصال SS/CS بوسیله‌ی استحکام فلز پایه‌ی CS کنترل می‌شود.

۶- علیرغم استحکام تقریباً مشابه اتصالات SS/CS و CS/CS، انرژی شکست اتصال نامشابه SS/CS بیشتر است. دلیل این امر

را می‌توان به داکتیلیتی بالاتر و ضریب کارسختی بیشتر فولاد SS نسبت فولاد CS دانست. این امر به افزایش تغییر فرم پلاستیک حین فرایند شکست محیطی اتصال SS/CS کمک کرده و انرژی شکست اتصال افزایش می‌یابد. انرژی شکست بالای جوش‌های SS/SS ناشی از استحکام بالاتر به دلیل استحکام کششی بالاتر فلز پایه و همچنین بالاتر بودن داکتیلیتی و ضریب کارسختی آن می‌باشد.

#### ۵- مراجع

- [1] H. Zhang, J. Senkara, Resistance Welding: Fundamentals and Applications, Taylor & Francis CRC Press, 2005.
- [2] M. Pouranvari, A. Abedi, P. Marashi, M. Goodarzi, "Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon resistance spot welds", Sci. Technol. Weld. Joining, Vol. 13, pp.39-43, 2008.
- [3] 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.
- [4] Y. J. Chao, "Failure Mode of Resistance Spot Welds: Interfacial Versus Pullout", Sci. Technol. Weld. Joining, Vol. 8, pp. 133-137, 2003.
- [5] 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, 1997.
- [6] J. M. Sawhill, H. Watanabe and J.W. Mitchell, "Spot Weldability of Mn-M0-Cb, V-N and SAE 1008 Steels", Weld J., Vol.56, pp. 217s-224s, 1977.
- [7] B. Pollard, "Spot Welding Characteristics of HSLA Steel for Automotive applications", Weld. J., Vol.53, pp. 343s-350s, 974
- [8] 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., Vol.128, pp. 287-298, 2006.
- [9] X. Sun, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. A. Khaleel, D. J. Spinella, " Effects of fusion zone size on failure modes and static strength of aluminum resistance spot welds", Weld. J., Vol. 83, pp. 88-s-195-s, 2004.
- [10] 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, 2005, pp. 197s-204s, 2005.
- [11] C. Lippold, D. J. Kotecki, Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, John Wiley & Sons, 2005.

**۶- پی نوشت**

- 1 Interfacial failure
- 2 Pullout failure
- 3 Sawhill
- 4 Pollard
- 5 Marya
- 6 Sun
- 7 Chao
- 8 Heat Affected Zone
- 9 Tensile-shear
- 10 Coach-peel
- 11 Cross-tension
- 12 Base Metal
- 13 Fusion Zone

