

## بررسی تأثیر فلز پرکننده بر خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال ترکیبی جوشکاری - لحیم-

### کاری آلومینیم به فولاد گالوانیزه

مهدی ضرونی<sup>۱\*</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>۲</sup>

#### چکیده

در مطالعه حاضر، ورق‌های آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ به وسیله روش ترکیبی جوشکاری- لحیم‌کاری با به کار بردن پرکننده‌های سیمی ۴۰۴۳ و ۴۰۴۷ به ورق‌های فولاد گالوانیزه متصل شدند. اندازه حرارت ورودی جوش و نوع فلز پرکننده روی خواص ریز ساختاری و مکانیکی اتصال حاصل شده موثراند. نتایج بدست آمده از مشاهده‌های ریزساختاری نشان داد که در حرارت ورودی مشابه، ضخامت لایه ترکیب بین فلزی ترد برای اتصال ایجاد شده با فلز پرکننده ۴۰۴۷ تقریباً نصف ضخامت این لایه در اتصال ایجاد شده با فلز پرکننده ۴۰۴۳ است. نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نشان داد که لایه ترکیب بین فلزی شکل گرفته در فصل مشترک فولاد- فلز جوش در طرف فولادی شامل فاز آهن- (آلومینیم، سیلیسیم) با نسبت اتمی ۳/۱ و در طرف فلز جوش شامل فاز آهن- آلومینیم- سیلیسیم با نسبت اتمی ۱۰/۷۳/۱۷ می‌باشد. مشاهده شد که اتصال ایجاد شده با فلز پرکننده ۴۰۴۷ استحکام مکانیکی بالاتری را (۱۷۰ مگاپاسکال) نسبت به اتصال مشابه ایجاد شده با فلز پرکننده ۴۰۴۳ (۱۲۰ مگاپاسکال) از خود نشان داد. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس بر سطح شکست نمونه‌ها، حضور فاز آهن- آلومینیم- سیلیسیم با نسبت اتمی ۱/۱/۶ را نشان داد. افزون بر آن، در اتصال‌های ایجاد شده با فلز پرکننده ۴۰۴۷ فاز آهن- سیلیسیم با نسبت اتمی ۲/۱ که ناشی از فوق اشباع شدن سیلیسیم در ترکیب بین فلزی است، مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: حرارت ورودی جوش، فلز پرکننده، جوشکاری- لحیم‌کاری، لایه ترکیب بین فلزی.

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

<sup>۲</sup> - دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* - نویسنده مسوول مقاله: 9005494@gmail.com

## پیشگفتار

تقاضای رو به رشدی برای سازه‌های ترکیبی آلومینیوم به فولاد در صنایع خودروسازی، هوافضا و صنایع دریایی به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی (از طریق کاهش وزن وسیله نقلیه) به وجود آمده است. با این وجود اتصال آلومینیوم به فولاد به دلایلی، همچون اختلاف گسترده بین دمای ذوب دو فلز، حلالیت خیلی پایین آهن در آلومینیوم و شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی ترد در دماهای بالا<sup>۱</sup>، با چالش بزرگی روبرو است [۱-۴].

چندین فرآیند اتصالی شامل جوشکاری انفجاری، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری آلتراسونیک، پیوند چسبی و جوشکاری قوسی زوج فلزی یا جوشکاری گذار، برای اتصال آلومینیوم به فولاد به‌کار گرفته شده است. با این وجود، این فرآیندها به دلیل هزینه‌ی بالا و هم‌چنین منحصر به فرد بودن شکل و ابعاد قطعات مورد اتصال، محدود می‌شوند. بنابراین، استفاده از یک روش جوشکاری سریع و کم هزینه که آلومینیوم را مستقیماً به فولاد متصل کند، برای صنایع مطلوب است [۴،۵].

در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فاکتورهایی همچون عملیات ترمومکانیکی، آلیاژسازی و عوامل دیگر می‌توانند، سبب خوردگی موضعی از قبیل خوردگی مرزانه‌ای یا خوردگی حفره دار شوند [۶].

جوشکاری قوسی با گاز محافظ خنثی و الکتروود تنگستنی (تیگ) - لحیم‌کاری به عنوان روشی سریع، کم هزینه و منعطف، به یک حوزه تحقیقاتی جذاب در اتصال آلومینیوم به فولاد تبدیل شده است. در این فرآیند اتصال، تنها آلومینیوم ذوب شده و فولاد توسط فلز جوش پوشانده می‌شود و ذوب شدگی برای فولاد رخ نمی‌دهد؛ بنابراین، این فرآیند نسبت به آلومینیوم جوشکاری و نسبت به فولاد لحیم‌کاری است [۷].

ژانگ و همکارانش [۸]، یک روش جوشکاری-لحیم‌کاری اصلاح شده تحت عنوان "فرآیند انتقال فلز سرد"<sup>۴</sup> را برای اتصال آلومینیوم به فولاد گالوانیزه بررسی نمودند. آن‌ها گزارش کردند که ضخامت و ترکیب شیمیایی لایه ترکیب

بین فلزی با تغییر کردن حرارت ورودی جوش تغییر می‌کنند.

دانگ و همکارانش [۹]، جوشکاری تیگ-لحیم‌کاری آلومینیوم به فولاد گالوانیزه را با استفاده از فلزهای پرکننده - آلومینیوم-سیلیسیم، آلومینیوم-مس، آلومینیوم-سیلیسیم-مس و آلومینیوم-روی انجام دادند و گزارش نمودند که حداکثر استحکام کششی برابر با ۱۳۶ مگاپاسکال برای اتصال‌های ساخته شده با پرکننده ۴۰۴۷ به‌دست آمد.

در این مطالعه جهت بررسی تأثیر نوع فلز پرکننده روی ظاهر جوش، خواص ریز ساختاری و خواص مکانیکی اتصال‌های جوشکاری-لحیم‌کاری آلومینیوم به فولاد، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با استفاده از پرکننده‌های فلزی ۴۰۴۳ و ۴۰۴۷ به فولاد گالوانیزه متصل شد. حداکثر استحکام مکانیکی به دست آمده در این تحقیق (۱۷۰ مگاپاسکال) نسبت به پژوهش دانگ و همکارانش [۹] بیش تر می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این تحقیق، ورق‌های از جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۳ میلی‌متر و ورق‌های ۲ میلی‌متری از جنس فولاد گالوانیزه بودند. این مواد به وسیله روش جوشکاری تیگ-لحیم‌کاری و با استفاده از پرکننده‌های سیمی ۴۰۴۳<sup>۵</sup> و ۴۰۴۷<sup>۶</sup> با قطر ۲/۵ میلی‌متر به هم متصل شدند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق‌ها و پرکننده‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. یک فلاکس غیر خورنده مخصوص لحیم‌کاری آلیاژهای آلومینیوم (با ترکیب شیمیایی عمده پتاسیم-آلومینیوم-فلور<sup>۷</sup>)، در حلال استون حل شد و سوسپانسیون حاصل شده به طور همگن و با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر روی سطوح رویی و پشتی فولاد، در محدوده‌ی شیار پخ مالیده شد.

5 - (Al-5Si)

6 - (Al-12Si)

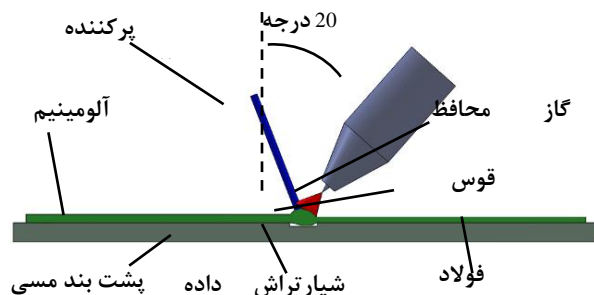
7 - K<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, KAIF<sub>4</sub>3 - Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> و FeAl<sub>3</sub>

4 - Cold Metal Transfer Process

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳، فولاد گالوانیزه، و فلزات پرکننده ۴۰۴۳ و ۴۰۴۷ (درصد وزنی)

فلز پرکننده ۴۰۴۷	فلز پرکننده ۴۰۴۳	فولاد گالوانیزه	آلومینیم ۵۰۸۳
آهن ۰/۸	آهن ۰/۸	آهن ۹۹/۲	آهن ۰/۲۵
مس ۰/۳	مس ۰/۳	کربن ۰/۰۷۳	منیزیم ۳/۹۵
سیلیسیم ۱۱-۱۳	سیلیسیم ۴/۵-۵	سیلیسیم ۰/۰۱۵	سیلیسیم ۰/۲۹
منگنز ۰/۱۵	منگنز ۰/۵	منگنز ۰/۳۸	منگنز ۰/۳
منیزیم ۰/۱	منیزیم ۰/۵	فسفر ۰/۰۱۷	کروم ۰/۱۳۶
روی ۰/۲	روی ۰/۱	گوگرد ۰/۰۲	نیکل ۰/۰۳۳
آلومینیم پایه	آلومینیم پایه	نیکل ۰/۰۵۹	آلومینیم پایه

اپوکسی محکم شدند. این نمونه‌ها تا حصول یک سطح آینه‌ای پولیش شدند و سپس در یک محلول کلر<sup>۱</sup> (با ترکیب شیمیایی: یک میلی‌لیتر اسید فلوریک- یک ونیم میلی‌لیتر اسید کلریک- دو ونیم میلی‌لیتر اسید نیتریک- نود و پنج میلی‌لیتر آب) به مدت ۳-۵ ثانیه اچ شدند. ریز ساختار اتصال‌ها از طریق میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر آن، جهت مشخص شدن ترکیب شیمیایی لایه بین‌فلزی، آنالیزهای نقطه‌ای طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس انجام گرفت.



شکل ۱- شماتیک از فرآیند اتصال

ورق‌ها در ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر مربع بریده شدند و قبل از شروع فرآیند جوشکاری به وسیله سمباده و حلال استون تمیز شدند. طرح اتصال استفاده شده، یک طرح اتصال لب به لب با خصوصیت دوگانه شامل، یک پخ ۳۰ درجه یک طرفه در طرف آلومینیم و یک طرح نیم دایره‌ای در طرف فولاد بود. طرح اتصال و فرآیند اتصال به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. افزون بر آن، یک صفحه پشت بند مسی دارای یک شیار مرکزی با ابعاد ۸×۰/۵ میلی‌متر مربع روی وجه رویی آن استفاده شد.

گاز محافظ مورد استفاده، گاز آرگون با جریان ۹ لیتر بر دقیقه بود. زوایای عرضی و طولی الکتروود با سطح قطعه کار به ترتیب ۲۰ و ۳۰ درجه انتخاب شد. نوع جریان جوشکاری متناوب بوده و الکتروود تنگستنی با قطر ۳ میلی‌متر و از جنس آلیاژ تنگستن-زیرکونیم انتخاب شد. ورق‌ها مطابق پارامترهای جوشکاری جدول ۲ که حرارت ورودی تقریباً یکسان دارند، به هم متصل شدند. میزان حرارت ورودی مطابق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \eta UI / V \quad (1)$$

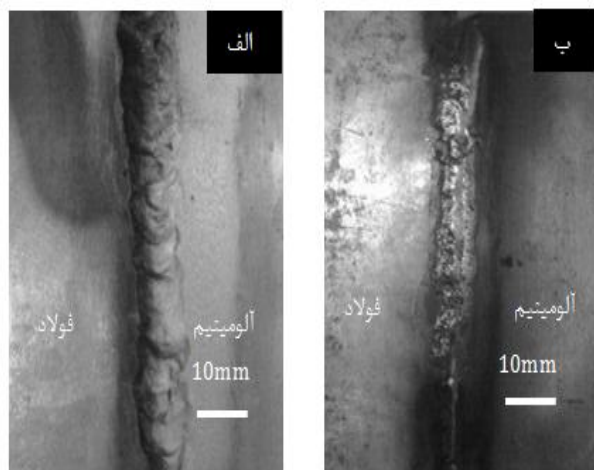
که در آن Q میزان حرارت ورودی، U ولتاژ جوشکاری، I جریان، V سرعت جوشکاری و  $\eta$  بازدهی قوس می‌باشد [۱۰]. مقاطع عرضی از اتصال‌ها بریده شد و در یک زمینه رزین

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری-لحیم کاری آلومینیم به فولاد گالوانیزه

نمونه	نوع فلز پرکننده	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)	جریان (A)	حرارت ورودی (J/mm)
۱	۴۰۴۳	۱۵	۲/۵۲	۱۵۵	۴۶۱/۳
۲	۴۰۴۷	۱۵	۲/۵۳	۱۵۵	۴۵۹/۵

### نتایج و بحث

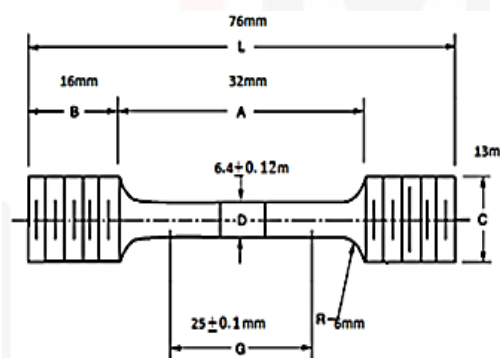
شکل ۳ ظاهر اتصال‌های جوشکاری تیگ-لحیم کاری بین آلومینیم و فولاد گالوانیزه را بعد از تمیز کردن سرباره جوش به وسیله یک برس سیمی فولاد زنگ نزن، نشان می‌دهد.



شکل ۳- ظاهر اتصال‌های جوشکاری تیگ-لحیم کاری (الف) سطح رویی، (ب) سطح زیرین

همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، پخش شدن فلز جوش روی سطوح رویی و زیرین ورق فولادی به خوبی صورت پذیرفته و اتصال‌ها با ظاهر مناسب ایجاد شده است. عیوبی همچون، ذوب ناقص در طرف آلومینیمی یا لحیم ناقص در طرف فولادی مشاهده نشد. لایه سوسپانسیون فلاکس حل

به‌منظور مشخص شدن فازها در صفحات شکست، آنالیز پراش پرتو ایکس نیز انجام شد. همچنین جهت بررسی خواص استحکامی اتصال‌ها، نمونه‌های آزمون کشش، مطابق استاندارد آزمون کشش برای ورق‌های تحت لحیم کاری<sup>۹</sup>، تهیه شدند و آزمون‌های کشش نیز انجام شد. شکل ۲ تعدادی از نمونه‌های آزمون کشش را نشان می‌دهد.



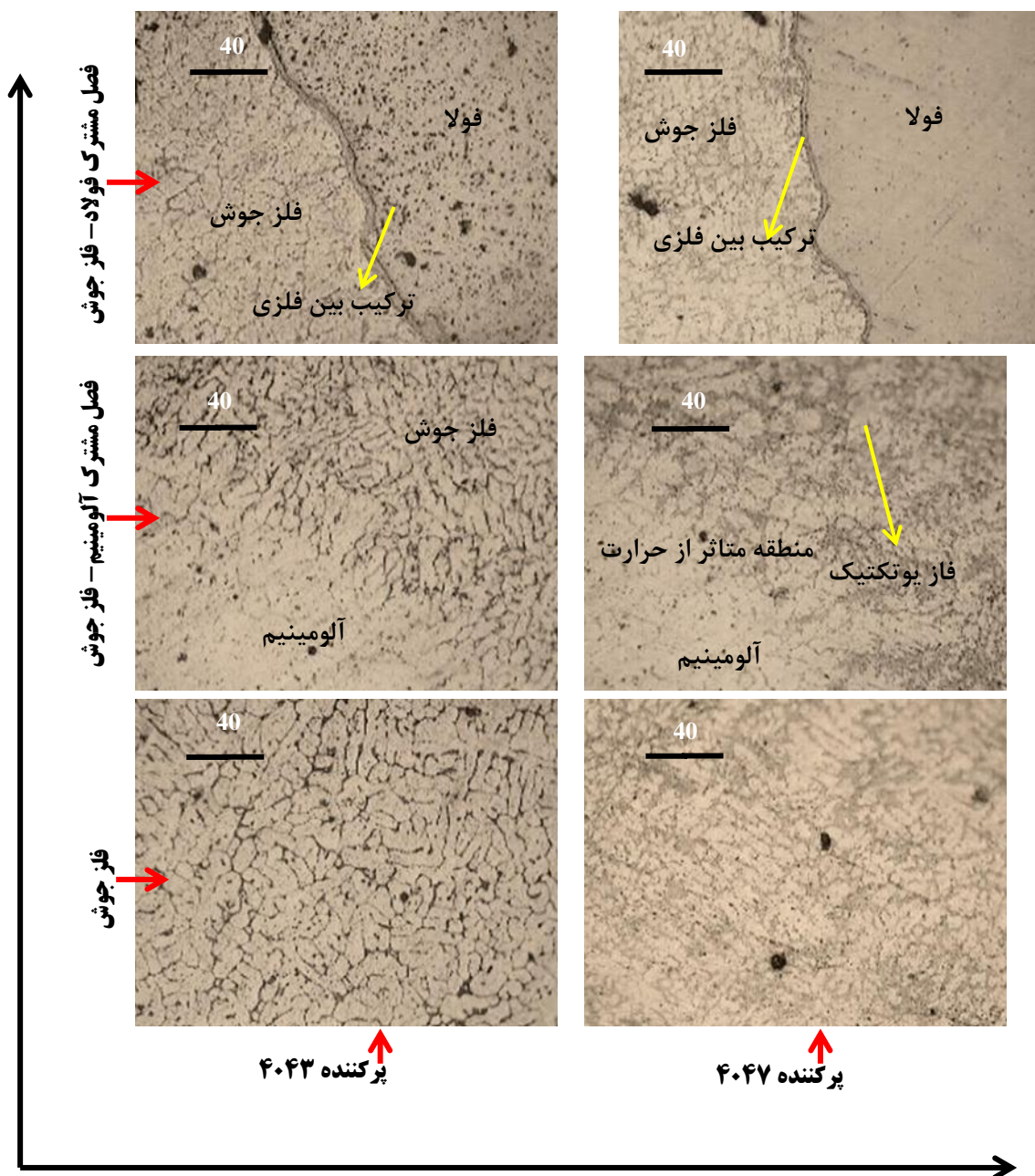
شکل ۲- نمونه‌های آزمون کشش

آلومینیم را در ناحیه فصل مشترک فولاد- فلز جوش نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۵ (الف) و ۵ (ب) نشان می‌دهد که لایه بین فلزی برای اتصال به وجود آمده با پرکننده ۴۰۴۳ از دو قسمت با دو ریخت متفاوت تشکیل شده است در حالی که این لایه در اتصال حاصل شده با پرکننده ۴۰۴۷ تنها از یک قسمت تشکیل شده است. بنابراین، تفکیک شدن یا نشدن لایه بین فلزی به نوع پرکننده بستگی دارد که این واقعیت، هم‌چنین به وسیله دانگ و همکارانش [۱۲] بیان شد. مطابق شکل ۵ (الف) بخش ضخیم‌تر لایه بین فلزی که با رنگ تیره مشخص شده است، دارای ریخت شناسی صفحه مانند است، در حالی که بخش روشن یک ریخت شناسی سوزنی گسسته دارد. تعدادی ریز ترک نیز در فصل مشترک فولاد- لایه بین فلزی دیده می‌شود. تاثیر ترکیبی تنش‌های حرارتی و اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی فولاد و لایه بین فلزی می‌تواند عامل ایجاد چنین ریز ترک‌هایی باشد. این پدیده همان گونه که در شکل ۵ (ب) مشخص است، در اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ دیده نشد که می‌تواند عامل افزایش استحکام این اتصال‌ها باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که ضخامت لایه بین فلزی برای اتصال به وجود آمده با پرکننده ۴۰۴۳ حدود ۶ میکرون و برای اتصال حاصل شده با پرکننده ۴۰۴۷ حدود ۳ میکرون است. به منظور جلوگیری از رشد جوانه‌های لایه بین فلزی می‌بایست از تماس مستقیم آلیاژ آلومینیم و فولاد جلوگیری شود. افزودن سرعت جوشکاری، استفاده از پشت‌بند جوشکاری با هدایت حرارتی بالا و کنترل حرارت ورودی و کم کردن آن روش‌هایی هستند که منجر به کاهش ضخامت لایه بین فلزی می‌شوند [۸، ۱۳].

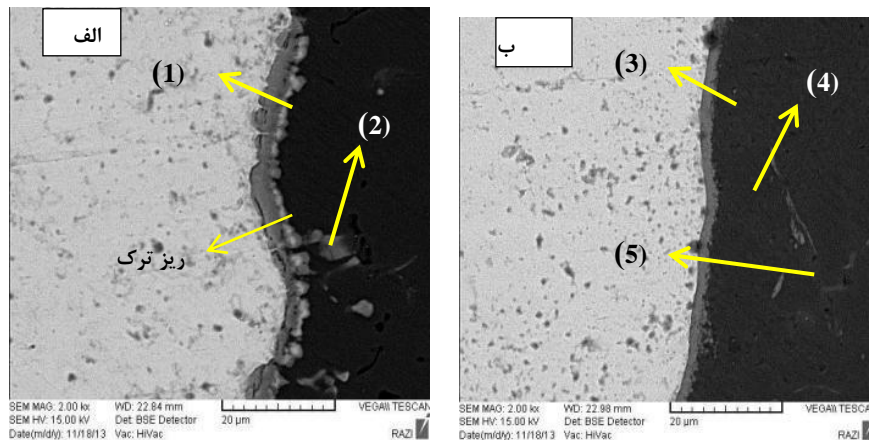
شده در استون که به طور یکنواخت روی سطوح فولاد مالیده شد، از طریق کم کردن انرژی فصل مشترک بین سطوح فولاد، فلز مذاب و کشیدن فلز مذاب به قسمت‌های بالایی سطوح، درز جوش با شکل مناسب را ایجاد نمود. عمل پخش کنندگی فلز مذاب توسط فیلم فلاکس مذاب شده، به وسیله سانگ و همکارانش [۲] توضیح داده شده است.

تصاویر میکروسکوپ نوری در نواحی مختلف اتصال‌های آلومینیم به فولاد برای فلزات پرکننده ۴۰۴۳ و ۴۰۴۷ در شکل ۴ آورده شده است. لایه بین فلزی ترد در فصل مشترک فولاد- فلز جوش شکل گرفته است. همان گونه که از شکل ۴ مشخص است در حرارت ورودی یکسان، اندازه ضخامت لایه بین فلزی برای اتصال حاصل شده با پرکننده ۴۰۴۳، تقریباً نصف اتصال حاصل شده با پرکننده ۴۰۴۷ است. دلیل این پدیده افزایش عنصر سیلیسیم در مجاورت فصل مشترک فولاد- فلز جوش است که علاوه بر آن، تمایل اتم‌های آهن را برای حضور در مناطق فصل مشترکی کاهش می‌دهد، هم‌چنین انرژی اکتیواسیون نفوذ اتم‌های آهن در آلومینیم را کاهش داده و به این صورت ضخامت لایه بین فلزی کاهش می‌یابد.

بلورهای ستونی که در شکل ۴ دیده می‌شوند اولین جوانه‌هایی هستند که در فصل مشترک آلومینیم- فلز جوش جوانه زده و سپس سریع به درون فلز مذاب رشد می‌کنند. پهنا و طول ناحیه بلورهای ستونی برای اتصال‌های حاصل شده با پرکننده ۴۰۴۳ کم‌تر از اتصال‌های مشابه به وجود آمده با پرکننده ۴۰۴۷ است. مناطق متأثر از حرارت به دلیل حرارت ورودی پایین جوش و هم‌چنین زمان کوتاه اچ نمونه‌ها، به سختی دیده می‌شوند. ریز ساختار فلز جوش برای هر دو نوع اتصال ساخته شده با پرکننده‌های ۴۰۴۳ و ۴۰۴۷ شامل، محلول جامد غنی از آلومینیم با ساختار دندریتی، به همراه فاز یوتکتیک آلومینیم- سیلیسیم توزیع شده در مرزدانه‌ها می‌باشد. با مراجعه به دیاگرام دوتایی آلومینیم- سیلیسیم می‌توان مشاهده کرد که مقدار فاز یوتکتیک در سیستم آلیاژی با مقادیر سیلیسیم بالاتر، بیش‌تر است که این موضوع در شکل ۴ نیز دیده می‌شود [۱۱]. شکل ۵، ریزساختارهای میکروسکوپ الکترونی روبروشی اتصال جوشکاری تیگ- لحیم‌کاری بین فولاد و



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری در نقاط مختلف اتصال جوشکاری تیگ - لحیم کاری، برای فلزات پرکننده متفاوت



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در فصل مشترک فولاد- فلز جوش الف) با پرکننده ۴۰۴۳ و ب) با پرکننده

۴۰۴۷

(آلومینیم، سیلیسیم)<sup>۱۰</sup> با نسبت اتمی ۳/۱ و لایه روشن دارای ترکیب فاز سه‌تایی (۱)<sup>۱۱</sup> می‌باشد. حضور عنصر سیلیسیم سبب می‌شود تا از طریق جایگزین شدن این عنصر با عنصر آلومینیم در ساختار منظم ترکیب فاز دوتایی (۱)<sup>۱۲</sup> و تشکیل شدن فاز آهن- (آلومینیم، سیلیسیم) با نسبت اتمی ۳/۱ سختی فاز دوتایی (۱) افزایش یابد. فاز سه‌تایی (۱) دارای سختی بالاتر نسبت به فاز دوتایی (۱) می‌باشد. البته ریخت‌شناسی و ضخامت آن سبب می‌شود تا تأثیر آن در کاهش استحکام پایین‌تر باشد [۱۴].

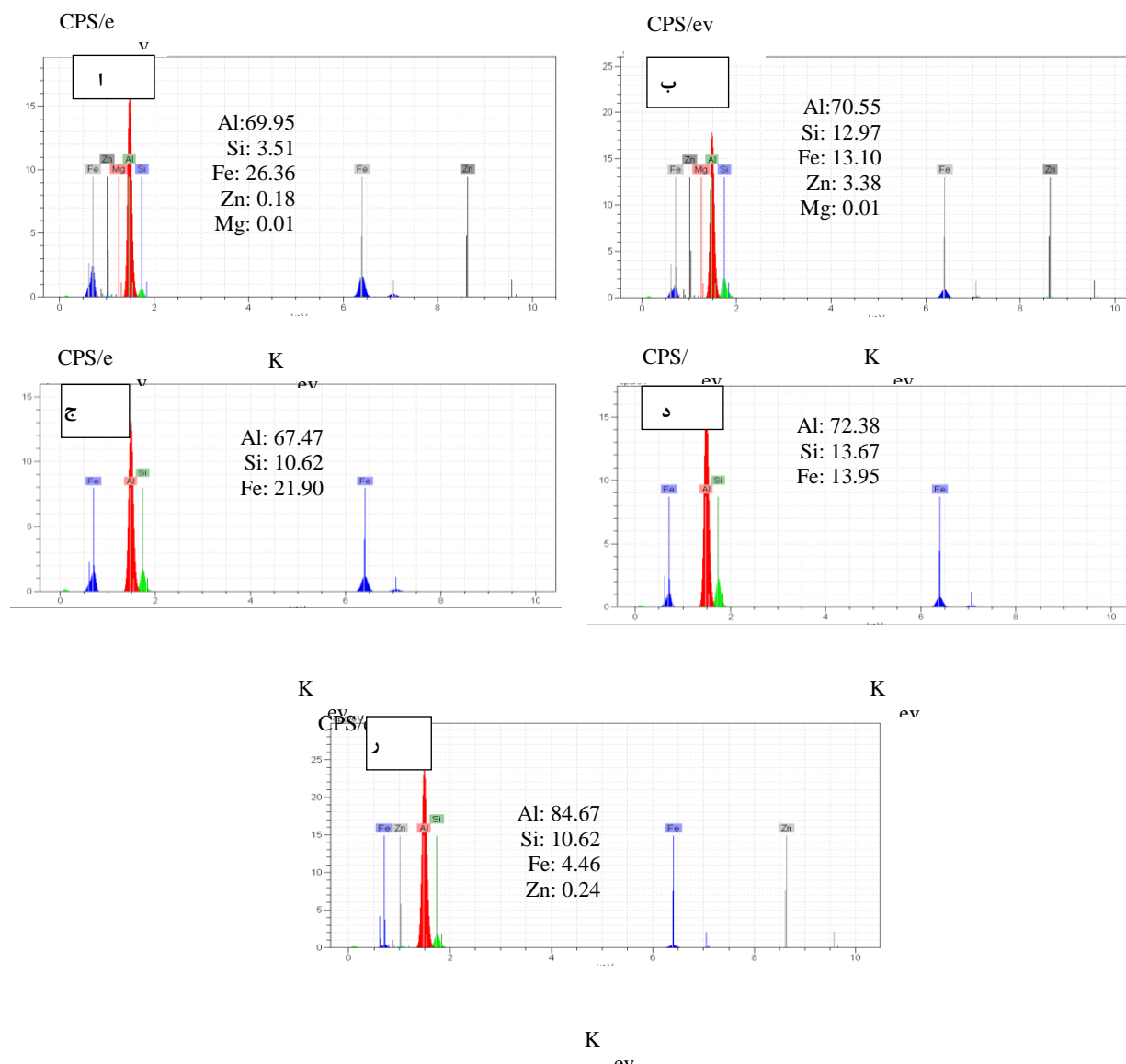
شکل ۵ (ب) ناحیه فصل مشترک بین فولاد و فلز جوش را در اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، لایه بین فلزی در این نوع اتصال‌ها، یک لایه با ضخامت تقریباً ثابت و ریخت ورقه‌ای است. این لایه در طرف فولادی دارای سطح هموار و در طرف فلز جوش دارای سطح ناهموار (سوزن‌های ریز) می‌باشد.

تمام این روش‌ها سعی می‌کنند تا دمای پیک و زمان حضور مذاب را کاهش داده و به این صورت مانع نفوذ اتم‌های آهن در فلز جوش شوند. از سوی دیگر، استفاده از عناصر اضافه شونده‌ای همچون سیلیسیم، روی و مس از طریق تغییر دادن شرایط ترمودینامیکی و جایگزینی فازهای دوتایی با فازهای سه‌تایی با سرعت رشد پایین، منجر به کاهش ضخامت لایه بین فلزی می‌شود [۹].

در غیاب عنصر سیلیسیم اتم‌های آهن جامد به سرعت در آلومینیم مذاب نفوذ کرده و فازهای دوتایی آهن- آلومینیم در فصل مشترک فولاد- فلز جوش تشکیل شده و به سمت فلز جوش رشد می‌کنند. با ورود عنصر سیلیسیم شرایط برای جوانه‌زنی و رشد فازهای سه‌تایی آهن- آلومینیم- سیلیسیم که انرژی آزاد گیبس تشکیل آن‌ها (مطابق داده‌های ترمودینامیکی و دیاگرام‌های سه‌تایی) نسبت به فازهای دو تایی کم‌تر است، فراهم می‌شود. شکل ۶ طیف‌های آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس را برای نمونه‌های اتصال آلومینیم به فولاد در نقاط مشخص شده در شکل ۵ نشان می‌دهد.

بررسی نتایج آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقاط (۱) و (۲) واقع بر شکل ۵ و همچنین دیاگرام سه‌تایی آهن- آلومینیم- سیلیسیم (شکل ۷) نشان داد که در این اتصال‌ها، لایه تیره دارای ترکیب فاز آهن-

10 - Fe (Al,Si)<sub>3</sub>  
11 - Al<sub>7,3</sub>Fe<sub>1,7</sub>Si  
12 - FeAl<sub>3</sub>

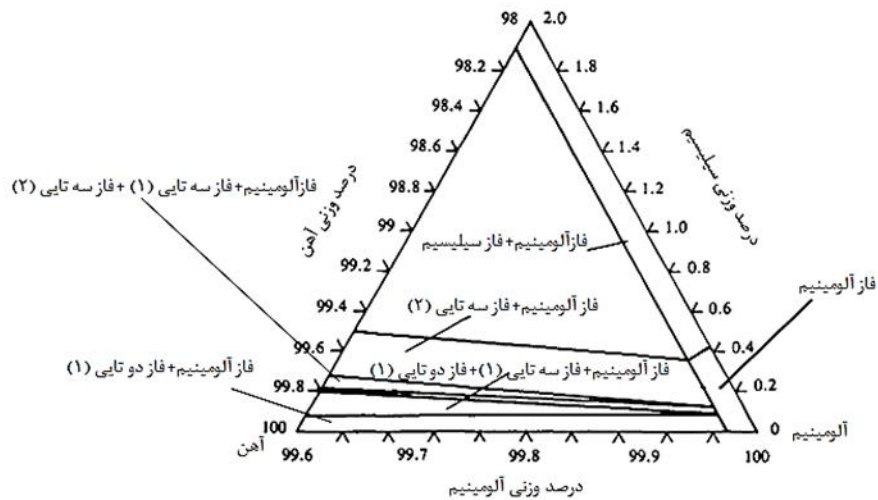


شکل ۶- طیف‌های آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقاط مشخص شده در شکل ۵ (الف) نقطه 1، (ب) نقطه 2، (ج) نقطه 3، (د) نقطه 4 و (ه) نقطه 5 (اعداد برحسب درصد اتمی)

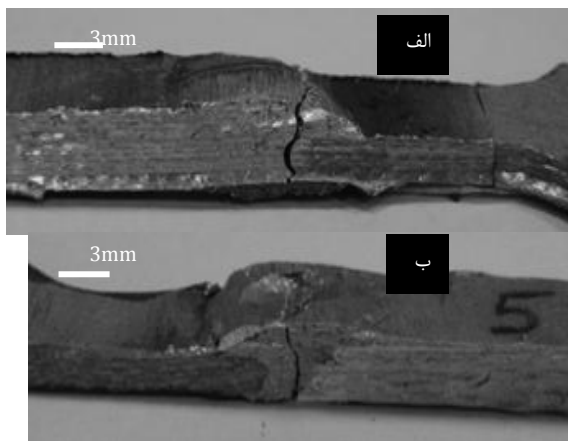
سیلیسیم در این ترکیبات نسبت به نمونه‌های اتصال با پرکننده ۴۰۴۳ کاملاً مشهود است. افزایش این عنصر سبب افزایش سختی ترکیبات می‌شود. در ناحیه فلز ذوب نزدیک فصل مشترک فولاد- فلز جوش، فاز سه‌تایی (۲)  $Fe_3Si$  که نسبت به فاز سه‌تایی (۱) سیلیسیم بالاتر دارد و هم‌چنین فازهای محلول جامد آلومینیم و سیلیسیم تشکیل شده‌اند.

بررسی نتایج آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقاط (۳) و (۴) و هم‌چنین دیاگرام سه‌تایی آهن- آلومینیم- سیلیسیم نشان داد که همانند نمونه‌های اتصال یافته با پرکننده ۴۰۴۳ فاز نزدیک به فولاد، فاز دوتایی (۱) و فاز نزدیک به فلز جوش شامل، رسوبات آهن- سیلیسیم  $Fe_3Si$  و فاز سه‌تایی (۱) می‌باشد. مطابق شکل ۶، افزایش عنصر





شکل ۷ دیاگرام سه تایی آلومینیم- آهن- سیلیسیم در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد [۱۱]



شکل ۸- مسیر شکست طی آزمون‌های کشش الف) با پرکننده ۴۰۴۳ و ب) با پرکننده ۴۰۴۷

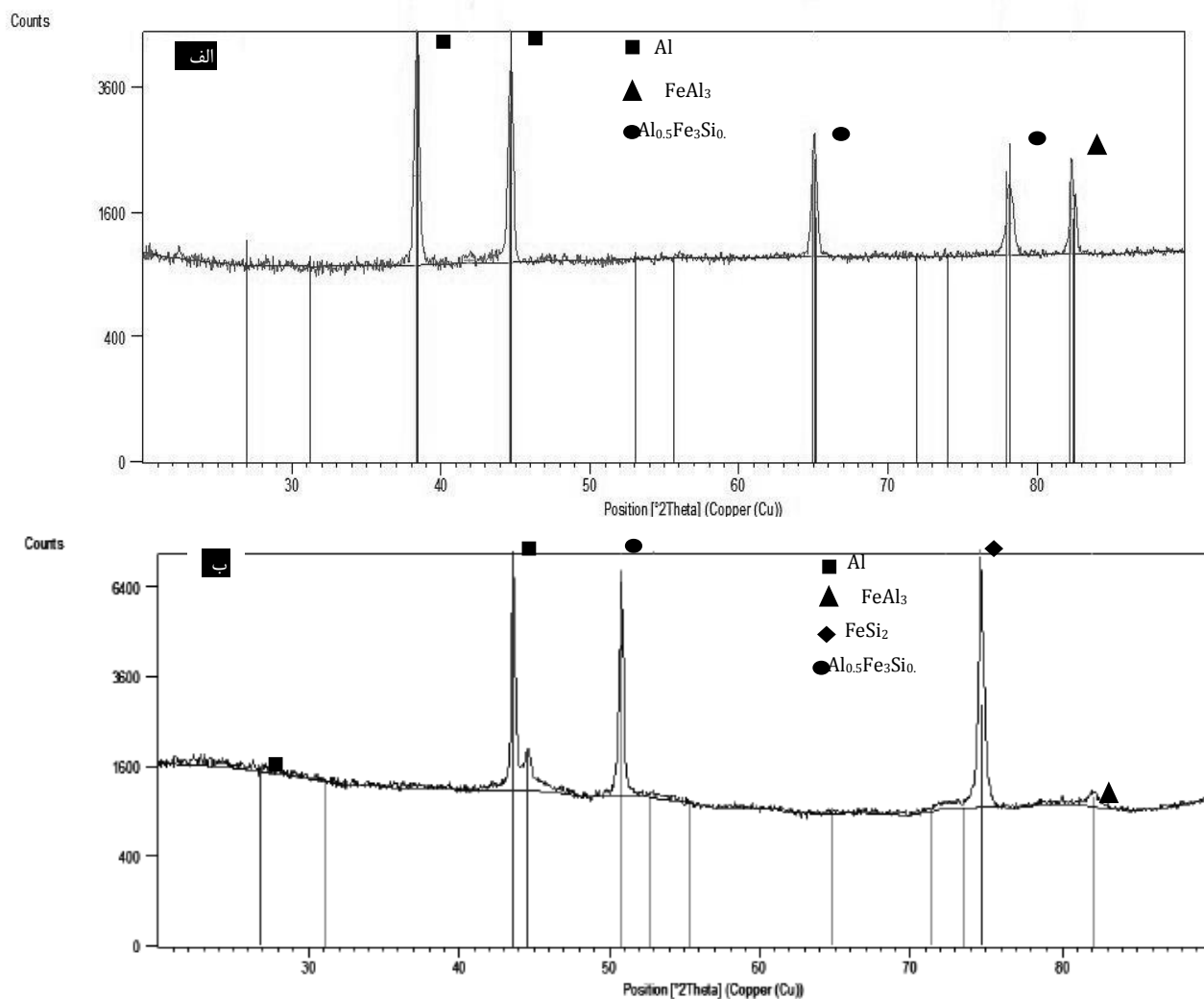
هم‌چنین، شکل ۹ نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس روی صفحه شکست در طرف فولادی را نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۸ مشخص است، مسیر شکست برای اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ در خود حوضچه جوش، و در اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۳ در منطقه بحرانی، یعنی فصل مشترک فولاد- فلز جوش (ناحیه ترکیب بین فلزی ترد) رخ داده است.

نتایج آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقطه (۵) و بررسی دیاگرام سه‌تایی آهن- آلومینیم- سیلیسیم، این موضوع را نشان می‌دهد.

نتایج آزمون‌های کشش نشان داد که برای اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۳، بالاترین استحکام حدود ۱۲۰ مگاپاسکال به دست آمد. و هم‌چنین بالاترین استحکام به دست آمده برای اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷، حدود ۱۷۰ مگاپاسکال است. حضور مقادیر بالاتر عنصر سیلیسیم در اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ نسبت به اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۳، منجر به کاهش ضخامت لایه بین فلزی (از ۶ به ۳ میکرومتر) و در نتیجه افزایش خواص استحکامی شد.

بالاترین استحکامی که توسط دانگ و همکاران [۹] گزارش شده است، حدود ۱۳۶ مگاپاسکال بوده که نسبت به استحکام حاصل شده در این تحقیق پایین‌تر است.

می‌توان بیان نمود که در این نوع فرآیند اتصال که در طرف آلومینیم جوشکاری و در طرف فولاد لحیم‌کاری به وقوع می‌پیوندد، آن چه روی استحکام اتصال مؤثر است، سه عامل ترشوندگی فولاد، تنش پسماند و ضخامت لایه ترد بین فلزی ایجاد شده می‌باشند. این سه عامل خود به حرارت ورودی و نوع پرکننده بستگی دارند. شکل ۸ مقطع شکست نمونه‌های اتصال آلومینیم به فولاد را در این تحقیق نشان می‌دهد.



شکل ۹ نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس در طرف فولادی مسیر شکست، الف- اتصال با پرکننده ۴۰۴۳، ب- اتصال اتصال با پرکننده ۴۰۴۷

شکست، تشخیص داده شد. این نتایج هم‌چنین به عنوان نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس سطح شکست، توسط سانگ و همکارانش [۱۴] حاصل شده است. مطابق شکل ۹ (ب)، در اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ به دلیل مقادیر بالای عنصر سیلیسیم و حلالیت محدود این عنصر در ترکیب و بنابراین فوق اشباع شدن آن، ترکیب دو تایی آهن-سیلیسیم ایجاد شده است [۲].

همان گونه که از شکل ۹ مشخص است، حضور فاز دوتایی (۱) که قبلاً تشکیل شدنش توسط بررسی نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و دیگرام‌های سه‌تایی آلومینیم-آهن-سیلیسیم پیش بینی شده بود، توسط آنالیز پراش پرتو ایکس نیز اثبات شد. فازهای دیگر شامل محلول جامد آلومینیم و فاز ترکیب بین فلزی سه‌تایی آهن-آلومینیم-سیلیسیم<sup>۱۵</sup> نیز به عنوان فازهای موجود در صفحه

## نتیجه گیری

- جوشکاری تیگ- لحیم کاری آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ به فولاد گالوانیزه با دو پرکننده سیمی ۴۰۴۳ و ۴۰۴۷ انجام گرفت. ریز ساختار اتصالها از طریق میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و افزون بر آن آزمونهای کشش نیز انجام شد. مهم ترین نتایج مطالعه حاضر به صورت زیر بیان می شود:
- ۱- اندازه ضخامت لایه بین فلزی با تغییر پرکننده فلزی از ۴۰۴۳ به ۴۰۴۷ از ۶ میکرون به ۳ میکرون کاهش یافت. در واقع، افزایش حضور عنصر سیلیسیم در مناطق فصل مشترکی فولاد- فلز جوش، تمایل اتمهای آهن را برای تشکیل ترکیب بین فلزی با اتمهای آلومینیم کاهش داد.
  - ۲- در حرارت ورودی یکسان، اتصالهای ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ نسبت به اتصالهای ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۳، استحکام مکانیکی بالاتری را از خود نشان دادند که دلیل آن پایین بودن ضخامت لایه ترکیب بین فلزی ترد در اتصالهای ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ نسبت به اتصالهای ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۳ بود. بالاترین استحکام اتصالهای ایجاد شده با فلزات پرکننده ۴۰۴۷ و ۴۰۴۳ به ترتیب به مقادیر ۱۷۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال رسید.

- ۳- مسیر شکست برای اتصالهای ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۳، در فصل مشترک فولاد- فلز جوش که محل لایه بین فلزی ترد است رخ داد، در حالی که این مسیر برای اتصالهای ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ در فلز جوش نزدیک فصل مشترک آلومینیم- فلز جوش رخ داد.
  - ۴- نتایج آنالیز نقطه‌ای طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقاط روی فاز ترکیب بین فلزی و هم‌چنین بررسی دیگرام سه‌تایی آهن- آلومینیم- سیلیسیم حضور فازهای  $Al_9Si_2Fe_2$  و  $Al_{7.2}Fe_{1.6}Si$ ،  $Fe(Al, Si)_3$  را در لایه بین فلزی نشان داد.
  - ۵- نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس حضور فاز دوتایی (۱) را در صفحه شکست اثبات نمود. افزون بر آن در اتصالهای ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷ فاز ترکیب بین فلزی آهن- سیلیسیم (که ناشی از فوق اشباع شدن سیلیسیم در ترکیب بین فلزی است)، ایجاد شد.
- در این پژوهش ضمن ثابت نگه داشتن پارامتر حرارت ورودی و انتخاب پارامترهای جوشکاری مناسب که منجر به بهترین ترشوندگی فولادگشت، تاثیر فلز پرکننده روی استحکام اتصال نیز بررسی شد. نتیجه این تحقیق نشان داد که اتصالهای ایجاد شده با پرکننده ۴۰۴۷، بالاترین استحکام را ایجاد نمودند.

## References:

- 1- H. Dong, L. Yang, C. Dong, S. Kou, "Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel", Materials Science and Engineering A, No. 534, pp. 424–435, 2012.
- 2- J. L. Song, S. B. Lin, C. L. Yang, G. C. Ma, H. Liu, "Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding–brazing of aluminum alloy to stainless steel", Materials Science and Engineering A, No. 509, pp. 31–40, 2009.
- 3- H. Zhang, J. Liu, "Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding– brazing

- process", Materials Science and Engineering A, No. 528, pp. 6179–6185, 2011.
- 4- H. Dong, L. Yang, C. Dong, S. Kou, "Arc joining of aluminum alloy to stainless steel with flux-cored Zn-based filler metal", Materials Science and Engineering A, No. 527, pp. 7151–7154, 2010.
  - 5- C. Dharmendra, L. Rao, J. Wilden, S. Reich, "Study on laser welding–brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with azinc based filler", Materials Science and Engineering A, No. 528, pp. 1497–1503, 2011.

۶- ف. غروی، ک. امینی، ف. فدائی فرد، "بررسی استعداد به خوردگی مرزخانه ای مقطع جوشکاری شده آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، مجله مواد نوین، جلد ۵، شماره ۳، ص ۱۳۵-۱۵۰، بهار ۱۳۹۴.

7- S. B. Lin, J. L. Song, C.L. Yang, C. L. Fan, D.W. Zhang, "Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas buttwelding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal", *Materials and Design*, No. 31, pp. 2637-2642, 2010.

8- H. T. Zhang, J. C. Feng, P. He, H. Hackl, "Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process", *Materials Characterization*, No. 58, pp. 588-592, 2007.

9- H. Dong, W. Hu, Y. Duan, X. Wang, C. Dong, "Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al filler wires", *Journal of Materials Processing Technology*, No. 212, pp. 458-464, 2012.

10- C. K. Lee, S. P. Chiew, J. Jiang, "Residual stress study of welded high strength steel thin-walled plate-to-plate joints part2: Numerical modeling", *Thin-Walled Structures*, No. ۵۹, pp. 120-131, 2012.

11- ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams, Vol 3, 8 Edition, 1998.

12- H. G. Dong, W. J. Hu, X. C. Zhang, "Detachment of interfacial layers during arc-brazing of aluminium alloy to carbon steel with filler wire", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, No. 23, pp. 1583-1588, 2013.

13- J. Fan, C. Thomy, F. Vollertsen, "Effect of thermal cycle on the formation of intermetallic compounds in laser welding of aluminium-steel overlap joints", *Phys. Procedia*, No. 12, pp. 134-141, 2011.

14- J. L. Song, S. B. Lin, C. L. Yang, C.L. Fan, "Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum-steel TIG welding-brazing joint", *Journal of Alloys*

and Compounds, No. 488, pp. 217-222, 2009.