



## اثر ضخامت پوشش فولاد گالوانیزه گرم پیوسته بر خواص اتصال غیرهمسان فولاد-منیزیم به روش جوش نقطه‌ای مقاومتی

علی دهقانی<sup>۱</sup>، صادق بیدارمغز<sup>۲</sup>، محمد صدیقی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: sedighi@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۳ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۸ دی ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

فرایند جوش نقطه‌ای

منیزیم

ورق فولاد گالوانیزه

اتصالات غیرهمسان

ضخامت پوشش

استفاده از فلزات سبک به جای فولاد در بخش‌هایی از بدنه و سازه‌ی خودروها به‌عنوان یک روش کاهش وزن خودرو با هدف کاهش مصرف سوخت موردتوجه خودروسازان و محققان قرار گرفته است. از همین رو، در این تحقیق به بررسی اتصال غیر همسان منیزیم-فولاد به روش جوش نقطه‌ای مقاومتی پرداخته شده و ضخامت پوشش Zn در فولاد گالوانیزه گرم پیوسته به‌عنوان یک پارامتر در نظر گرفته شده است. ورق منیزیم AZ31 و فولاد گالوانیزه گرم پیوسته‌ی مورد استفاده در بدنه‌ی خودروها برای این تحقیق استفاده شده است. برای بررسی اثر ضخامت پوشش بر اتصال، دو ضخامت ۵ μm و ۱۰ μm بر روی ورق گالوانیزه ایجاد شده است. علاوه بر آن، از دستگاه با منبع جریان متناوب برای فرآیند جوشکاری استفاده شده است. برای کنترل توزیع حرارت در فرآیند جوشکاری از دو الکتروود با هندسه متفاوت استفاده شده است که یک الکتروود با سطح تماس کروی در سمت منیزیم و یک الکتروود با سطح تماس تخت در سمت فولاد در نظر گرفته شده است. برای بررسی اتصال آزمون کشش و همچنین بررسی ساختار اتصال با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده افزایش استحکام کششی اتصال به میزان ۱۳ درصد به ازای ۵ μm افزایش ضخامت پوشش می‌باشد. همچنین افزایش ضخامت پوشش موجب کاهش اندازه‌ی دانه‌ها در ناحیه دکمه جوش می‌شود که به دلیل افزایش درصد Zn در ناحیه دکمه جوش می‌باشد.

## The effect of continuous hot-dip galvanized steel coating thickness on the properties of dissimilar steel-magnesium joining using resistance spot welding

Ali Dehghani<sup>1</sup>, Sadegh Bidarmaghaz<sup>2</sup>, Mohammad Sedighi<sup>3\*</sup>

1- PhD Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- MSc Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: sedighi@iust.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 5 October 2023

Accepted: 18 January 2024

#### Keywords:

Spot Welding Process

Magnesium

Galvanized Steel Sheet

Dissimilar Joints

Coating Thickness

### Abstract

The use of light metals instead of steel in parts of the vehicle body to reduce weight and thus lower fuel consumption has attracted the attention of car manufacturers and researchers. Therefore, this study investigates the dissimilar joining of magnesium and steel sheets by resistance spot welding and the thickness of galvanized steel sheet coating is considered as an effective parameter for the joint strength. The materials used in this work were AZ31B Mg alloy sheet and hot-dip galvanized steel sheet. To investigate the influence of the coating thickness on the joint, two coating thicknesses of 5 and 10 μm were applied to the steel sheet. also to balance the thermal generation on both sides of Mg and Steel sheet, two electrodes with different geometries were used, flat electrode on the steel side and domed electrode on the Magnesium side. Tensile-shear tests were performed on the samples using a tensile testing machine and the microstructure was analyzed using optical and SEM microscopy. The results show a 13% increase in joint strength at a coating thickness of 10 μm. The studies show that increasing the coating thickness from 5μm to 10 μm, reduces the grain size in the nugget and thus increases the strength.

### Please cite this article using:

Dehghani A, Bidarmaghaz S, Sedighi M. The effect of continuous hot-dip galvanized steel coating thickness on the properties of dissimilar steel-magnesium joining using resistance spot welding. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 December 22;10(10):59-69. doi: 10.22034/IJME.2024.418127.1841 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

فولاد به‌عنوان جزء جدایی‌ناپذیر از صنایع فلزی شناخته می‌شود. اما به دلیل وزن زیاد آن در برخی حوزه‌ها تصمیم بر حذف و یا کاهش استفاده از فولاد گرفته شده است. از جمله در صنایع حمل‌ونقلی به جهت کاهش مصرف سوخت، جایگزینی فلزات سبک با فولاد، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. فلز منیزیم به‌عنوان یکی از فلزات سبک برای این منظور مورد توجه قرار گرفته است، اما جوشکاری منیزیم به فولاد به دلیل تفاوت در خواص حرارتی و ساختاری چالش‌هایی دارد. از آنجایی که اتصال غالب ورق‌ها در صنایع تولید ماشین‌آلات حمل و نقلی، جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی می‌باشد، اتصال غیرهمسان منیزیم-فولاد با این روش محور تحقیقات سال‌های اخیر قرار گرفته است. اولین تحقیق برای امکان‌سنجی جوش نقطه‌ای مقاومتی منیزیم بر روی دو آلیاژ منیزیم AZ31 و AM50 صورت گرفت [۱].

وانگ و همکارانش [۲] بر روی کیفیت سطح نمونه‌ها مطالعاتی انجام دادند و دریافتند که کیفیت سطح پایین موجب افزایش پاشش مذاب می‌شود. همچنین اسیدشویی نمونه‌ها قبل از فرآیند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی منیزیم، موجب بهبود در ساختار و استحکام اتصال می‌شود [۳]. استفاده از لایه‌های میانی یکی از شیوه‌های اصلاحی می‌باشد. این لایه‌ها می‌تواند بین الکتروود و ورق‌ها قرار گیرد که در این صورت موجب افزایش عمر الکتروودها و همچنین بهبود استحکام اتصال می‌شود [۴، ۵]. همچنین لایه‌های میانی می‌توانند بین دو نمونه غیرمشابه قرار گیرند که در این صورت لایه میانی باعث واکنش بین لایه‌ای می‌شود و می‌تواند تغییرات ساختاری در ناحیه دکمه جوش<sup>۱</sup> و فصل مشترک ایجاد کند و در نتیجه خواص مکانیکی نیز دچار تغییراتی شوند. از جمله این لایه‌های میانی، استفاده از لایه میانی نیکل خالص در اتصال منیزیم AZ31 و آلومینیوم AA5754 می‌باشد که باعث ایجاد لایه پیوسته بین فلزی شد، اما در جریان‌های بالا، لایه نیکل موجب تخلخل در فصل مشترک اتصال می‌شود [۶، ۷]. لایه میانی دیگر، آلومینیوم-سلیسیم می‌باشد که در اتصال منیزیم AZ31 و فولاد 22MnB5 با پوشش آلومینیوم-سلیسیم بررسی شد، که این پوشش با ایجاد یک پیوند متالورژیکی بین فولاد و منیزیم باعث بهبود ساختار اتصال بخصوص در سمت منیزیم شد و از ایجاد و رشد ترک‌ها جلوگیری کرد و استحکام اتصال را بهبود بخشید [۸]. لایه میانی فولاد با پوشش Sn نیز به‌عنوان یک لایه بهبوددهنده ساختار در اتصال منیزیم و آلومینیوم نیز بررسی شد که نتایج نشان‌دهنده بهبود ساختار اتصال با استفاده از این لایه میانی بود [۹]. لایه میانی Zn - Cu نیز در اتصال غیرهمسان فولاد-منیزیم مورد استفاده قرار گرفت که بهبود اتصال را به همراه داشت [۱۰].

بدون استفاده از لایه‌های میانی، برخی از اتصالات غیر همسان کیفیت مناسبی ندارند، از جمله اتصال غیر همسان منیزیم AZ31 با فولاد 316L(SSA) که ناحیه فصل مشترک اتصال دارای تخلخل و ترک‌های زیادی بود [۱۱]. لایه میانی Zn به‌عنوان یک لایه اصلاحی به‌صورت پوشش بر روی فولاد در اتصال منیزیم و فولاد پیشنهاد می‌شود که لایه Zn با افزایش دمای فصل مشترک و هم‌زمانی اعمال نیرو، به خارج از مرکز ناحیه دکمه جوش رانده می‌شود و باعث ایجاد اتصال به‌صورت لحیم نرم بین دو ورق می‌شود و در ناحیه مرکزی هم یک سطح فولاد مناسب برای اتصال بهتر با منیزیم را فراهم می‌کند [۱۲، ۱۳]. فنگ و همکارانش [۱۴] نیز بر روی اثر لایه میانی فولاد گالوانیزه گرم در اتصال غیر همسان منیزیم به فولاد الکتروگالوانیزه پرداختند که استفاده از لایه میانی گالوانیزه گرم موجب بهبود استحکام اتصال نسبت به اتصال مستقیم منیزیم به فولاد الکتروگالوانیزه شد. لیو و همکارانش [۱۵] اثر عنصر Zn را در تغییر ساختاری اتصال غیر همسان منیزیم و فولاد بررسی کردند و تغییرات ساختاری را با اتصال همسان منیزیم به منیزیم مقایسه کردند. در تحقیقی دیگر اثر لایه میانی Zn و Al به‌صورت جداگانه در اتصال غیرهمسان منیزیم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان می‌داد اضافه شدن این دو عنصر به ناحیه دکمه جوش موجب از بین رفتن ترک‌ها در ناحیه دکمه جوش و یا ناپیوسته کردن ترک‌ها می‌شد، همچنین ساختار دندریتی هم‌محور در ناحیه دکمه جوش ایجاد می‌کنند [۱۶].

با توجه به اینکه منیزیم هدایت الکتریکی بالایی دارد نقش مقاومت تماسی در فصل مشترک دو ورق بسیار مهم می‌باشد [۱۷]. به همین دلیل باید امکانی برای ایجاد حرارت مورد نیاز ذوب منیزیم در نظر گرفته شود. یکی از روش‌های توزیع مناسب حرارت در اتصالات غیر همجنس، استفاده از الکتروود با هندسه متفاوت در دو طرف می‌باشد، برای اتصالات غیر همجنس منیزیم و فولاد استفاده از الکتروود گنبدی در سمت منیزیم و الکتروود تخت در سمت فولاد پیشنهاد می‌شود [۱۲]. با توجه به مطالعاتی که صورت گرفت، در اتصالات غیر همجنس منیزیم به فولاد گالوانیزه، ضخامت لایه Zn که می‌تواند یک پارامتر اثرگذار باشد مورد بررسی قرار نگرفته است.

<sup>1</sup> Nugget

به همین دلیل در این مقاله به بررسی اثر ضخامت لایه میانی Zn در اتصال منیزیم AZ31 به فولاد گالوانیزه تجاری پرداخته شده است. به همین منظور از فولاد گالوانیزه گرم پیوسته مورد استفاده در صنایع خودروسازی و منیزیم AZ31 استفاده شد و پس از جوشکاری، استحکام کششی بررسی شد و همچنین تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی از ناحیه اتصال، برای بررسی‌های متالورژیکی مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش آزمایش

### ۲-۱- مواد آزمایش

در این پژوهش از ورق منیزیم AZ31 با ضخامت ۲ mm استفاده شده است و ترکیب عناصر مطابق جدول ۱ می‌باشد که با استفاده از آزمون طیف‌سنجی جرمی<sup>۱</sup> بدست آمده است. ورق فولادی مورد استفاده، ورق فولادی ST14 به ضخامت ۱ mm مورد استفاده در صنایع خودروسازی می‌باشد که به روش گالوانیزه گرم پیوسته پوشش‌دهی شده است و ضخامت پوشش Zn آن در محدوده ۸ μm الی ۱۲ μm می‌باشد و ترکیب عنصری فلز پایه آن، بدون پوشش مطابق با جدول ۲ می‌باشد که با آزمون کوانتومتری بدست آمده است.

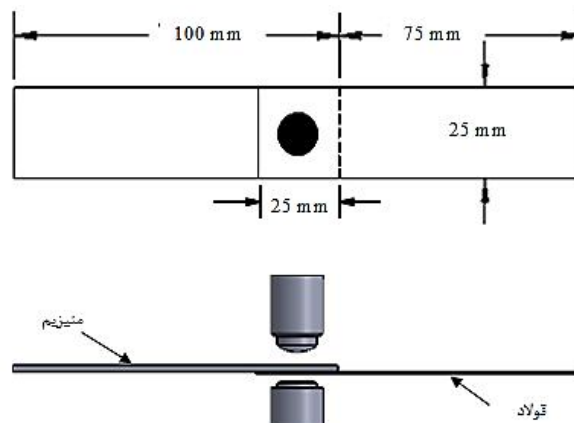
جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق منیزیم AZ31 بر حسب درصد وزنی

Mg	Fe	Cu	Mn	Al	Zn	Ni	Si
Base	0.0026%	0.00079%	0.47%	3.12%	1.05%	0.00082%	0.0092%

جدول ۲ ترکیب شیمیایی ورق St14 بر حسب درصد وزنی

Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Co
99.6	0.0881	0.0385	0.188	0.0256	0.0248	0.169	0.0058
Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	Zn	Se
0.0129	0.0027	0.0034	<0.0050	0.0021	0.0029	0.0022	0.0011

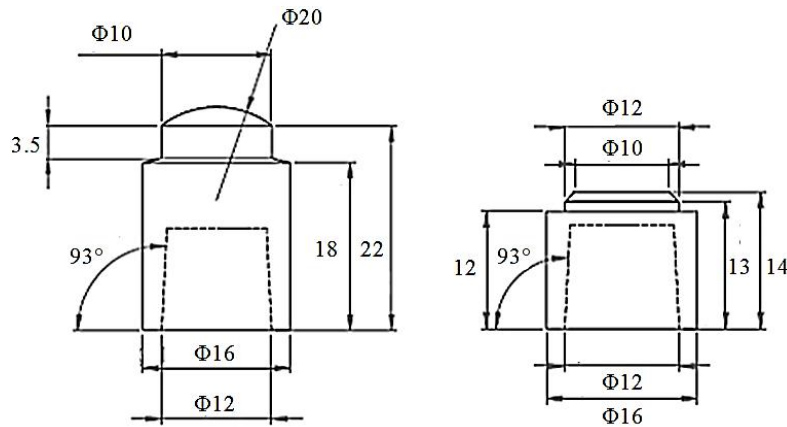
به جهت ایجاد ضخامت‌های مختلف پوشش، ابتدا ورق‌ها در ابعاد ۱۰۰mm×۲۵mm میلیمتر برش داده شدند سپس با سنباده‌زنی ضخامت‌های مختلف پوشش ۵ μm و ۱۰ μm در سمت تماس با ورق منیزیم در ناحیه تماسی ایجاد شد. در سنباده‌زنی از سنباده ۱۰۰۰ در تمامی حالت‌ها استفاده شد تا زبری سطح نهایی تمامی ورق‌ها یکسان باشند. اندازه‌گیری ضخامت پوشش با دستگاه ضخامت‌سنج مدل Benetech GM211 انجام شد. در نهایت نمونه‌های فولادی و منیزیمی در ابعاد ۱۰۰mm×۲۵mm مطابق با استاندارد EN ISO14273 جهت جوشکاری آماده شدند. قبل از فرآیند جوشکاری نمونه‌ها با محلول استون برای رفع چربی‌ها و آلودگی‌های سطحی شست‌وشو شدند. شکل ۱ طرحواره‌ی نمونه‌های آماده‌شده برای جوشکاری می‌باشند.



شکل ۱ طرحواره‌ی نمونه‌های آماده‌شده برای جوشکاری

<sup>1</sup> Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

برای این گزارش، از دو هندسه متفاوت الکتروود در سمت فولاد و منیزیم استفاده شده است. الکتروود با هندسه کروی در سطح تماس با منیزیم و الکتروود با هندسه تخت در سطح تماس با فولاد در نظر گرفته شد [۱۲]، که جنس الکتروودها مس-کروم-زیرکونیوم می‌باشد. شکل ۲ نقشه هندسه‌های استفاده شده برای الکتروودها را نشان می‌دهد که جهت سهولت در معرفی، هر الکتروود با یک حرف لاتین نامگذاری شده است.



شکل ۲ هندسه الکتروودهای مورد استفاده

## ۲-۲- دستگاه جوش و پارامترها

در این مطالعه از دستگاه با جریان متناوب<sup>۱</sup> (AC) مدل ایستگاهی، ساخت شرکت تیسان با حداکثر جریان ۲۲ kA و نیروی ۱۲۰۰ N الی ۱۲۰۰۰ N استفاده شده است و پارامترهای جوشکاری مطابق با جدول ۳ [۱۸] در نظر گرفته شدند. تعداد چهار آزمایش برای هر ضخامت پوشش روی انجام شد که سه نمونه برای هر ضخامت برای انجام آزمون کشش و یک نمونه برای بررسی ریزساختاری مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳ پارامترهای جوشکاری

نوع جریان	نیرو (N)	زمان (سیکل)	جریان (kA)	کد الکتروود فولاد	کد الکتروود منیزیم
AC	1700	14	20	b	a

## ۲-۳- آزمون‌های مکانیکی و بررسی‌های ریزساختاری

برای بررسی کیفیت اتصال، آزمایش‌های کشش و بررسی ریزساختاری انجام گرفت. بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> (FESEM) مدل Mira3 و میکروسکوپ نوری مدل Copa بر روی نمونه‌ها انجام شد و برای تعیین فازهای تشکیل‌دهنده آزمون<sup>۳</sup> XRD از نمونه با ضخامت پوشش ۱۰ μm گرفته شد. آزمون کشش نیز با دستگاه سنتام مدل STM-50 با سرعت ۲ mm/min انجام شد. تصویربرداری FESEM نیز بر روی نمونه‌های شکست و نمونه‌های با برش عرضی صورت گرفت که قبل از آزمایش نمونه‌های شکست به مدت ۵ min در محلول الکل ۹۶ درصد شست و شوی اولتراسونیک شدند و نمونه‌های برش عرضی، به‌وسیله دستگاه وایرکات به جهت جلوگیری از تنش‌های مکانیکی برش داده شدند. سپس نمونه‌ها مانت شده و سنباده زنی انجام و پولیش صورت گرفت و به مدت ۵min در الکل ۹۶ درصد شست‌وشوی اولتراسونیک شدند. همچنین برای آزمایش متالوگرافی با میکروسکوپ نوری، از آنجایی‌که نمونه‌ها دوجنسی می‌باشند، بررسی ساختاری در سمت منیزیم صورت گرفت به‌همین دلیل نمونه‌ها در محلول ۴,۲ gr پیکیک اسید ۷۰ cc اتانول، ۱۰ cc آب مقطر، ۱۰ cc استیک اسید قبل از تصویربرداری در معرض خوردگی قرار گرفتند تا ساختار مشخص گردد.

<sup>1</sup> Alternating Current

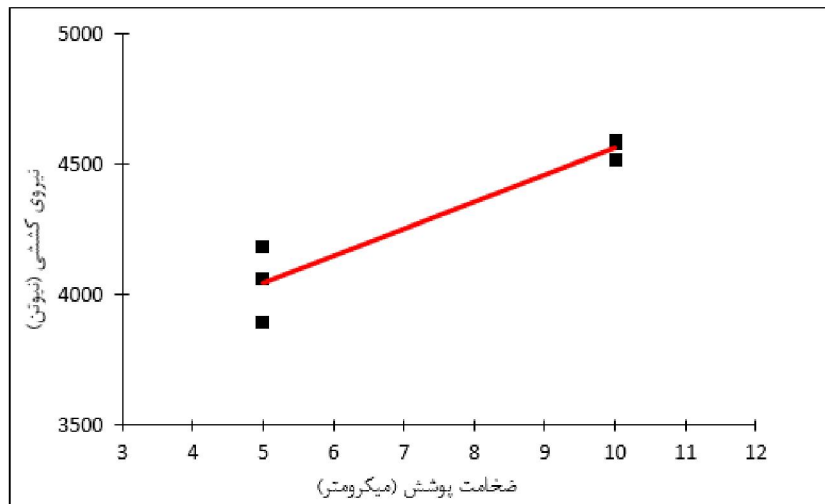
<sup>2</sup> Field Emission Scanning Electron Microscope

<sup>3</sup> X-Ray Diffraction

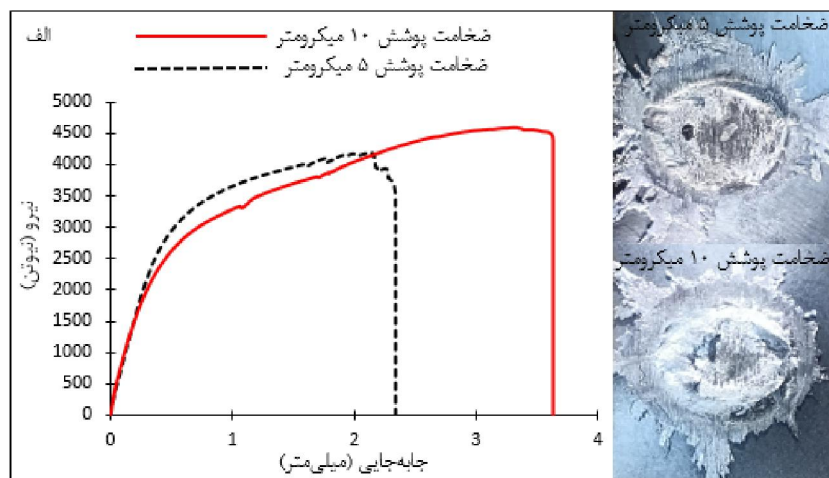
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- خواص کششی

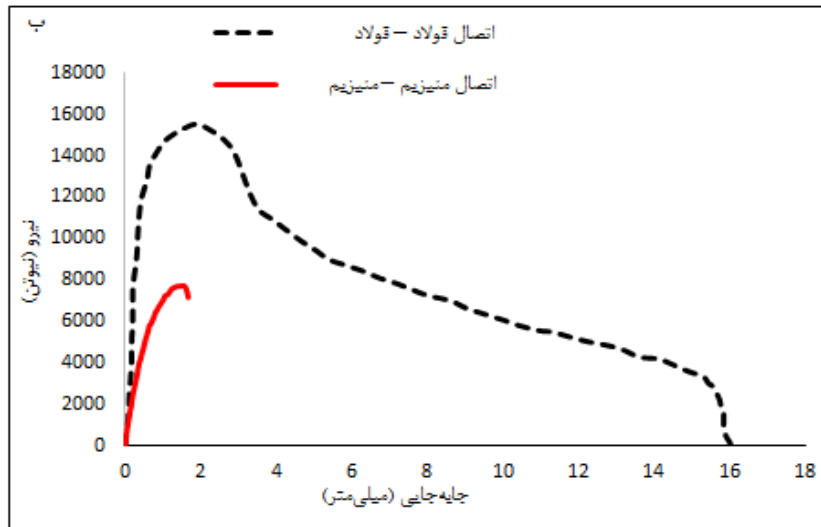
نتایج آزمون کشش برای شش نمونه با دو ضخامت پوشش متفاوت در نمودار شکل ۳ آمده است. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های با ضخامت پوشش  $10 \mu\text{m}$  استحکام کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  دارند. به ازای  $5 \mu\text{m}$  افزایش ضخامت پوشش استحکام اتصال به‌طور میانگین ۱۳ درصد افزایش یافته است. نوع شکست در تمام نمونه‌ها یکسان بوده و شکست از فصل مشترک دو ورق صورت گرفت زیرا در اتصال منیزیم-فولاد با توجه به اینکه ذوب فقط در منیزیم صورت می‌گیرد اتصال با ذوب سپس انجماد منیزیم بر روی فولاد صورت می‌گیرد که مانند یک اتصال چسبی<sup>۱</sup> عمل می‌کند که در این نوع اتصال فلز با دمای ذوب پایین‌تر ذوب می‌شود و این مذاب با انجماد بر روی فلز دیگر تشکیل یک اتصال می‌دهد. در بعضی موارد برای استحکام بخشی به این نوع اتصال از لایه‌های میانی نیز استفاده می‌شود و شکست در این نوع اتصال در اغلب موارد از فصل مشترک دو ورق در ناحیه اتصال صورت می‌پذیرد [۱۳، ۱۴، ۱۶]. در این مقاله پوشش Zn نیز نقش لایه میانی را ایفا می‌کند. شکل ۴ مقایسه نمودار نیرو - جابجایی برای دو نمونه اتصال با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  و  $10 \mu\text{m}$  می‌باشد. مقایسه دو نمودار نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی اتصال با افزایش ضخامت پوشش می‌باشد.



شکل ۳ نمودار اثر ضخامت پوشش Zn بر استحکام کششی



<sup>1</sup> Bonding Joints



شکل ۴ مقایسه نمودار نیرو - جابجایی (الف) دو نمونه اتصال با ضخامت پوشش متفاوت (ب) اتصال فولاد-فولاد [۱۹] و اتصال منیزیم-منیزیم [۲۰]

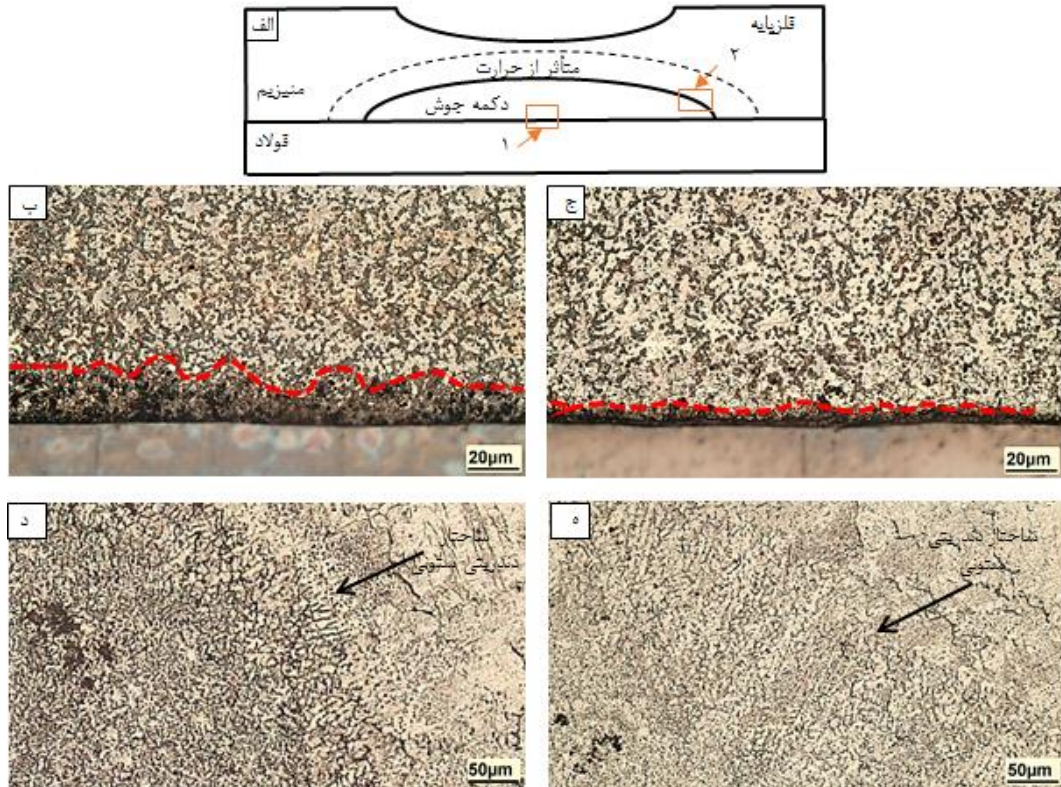
با توجه به اینکه اتصال صورت گرفته بین دو ورق فولاد و منیزیم از نوع اتصال چسبی بوده جدایش از فصل مشترک دو ورق صورت گرفته است اما در اتصال مشابه فولاد-فولاد اتصال به صورت اختلاط کامل مذاب دو ورق در ناحیه اتصال بوده و به همین دلیل جدایش دو ورق در هنگام آزمون کشش با پارگی یکی از ورق‌ها همراه می‌شود که محدوده بعد از بیشترین نیروی کشش در نمودار شکل ۴-ب در واقع مرحله پارگی ورق فولادی می‌باشد [۱۹]. در اتصال منیزیم-منیزیم نیز اختلاط بین مذاب دو ورق در ناحیه اتصال صورت می‌گیرد اما اتصال منیزیم-منیزیم ترد می‌باشد و بعد از تحمل بیشترین نیرو کششی، اتصال سریع دچار شکست می‌شود و کرنش کمتری رخ می‌دهد که این موضوع را می‌توان در نمودار کشش - جابجایی این اتصال در شکل ۴-ب مشاهده کرد [۲۰].

### ۳-۲- ریز ساختار

بررسی تصاویر ساختار اتصال در دو نمونه با ضخامت پوشش متفاوت  $5 \mu\text{m}$  و  $10 \mu\text{m}$  نشان‌دهنده ایجاد ناحیه ذوب‌شده در منیزیم می‌باشد و حرارت ایجاد شده به اندازه‌ای نبوده که بتواند منجر به ذوب فولاد شود. اما با توجه به اینکه دمای ذوب فلز روی کمتر از دمای ذوب منیزیم می‌باشد، ابتدا فلز روی در فصل مشترک ذوب شده است و سپس منیزیم دچار ذوب گردیده است. با ذوب شدن منیزیم، فلز روی مذاب نیز به درون مذاب منیزیم نفوذ می‌کند و منجر به تغییر ساختار و ابعاد لایه واکنشی و تغییر ساختار دکمه جوش می‌شود. به‌طور کلی ناحیه اتصال در سمت منیزیم برای اتصال با هر دو ضخامت پوشش متفاوت، شامل دو ناحیه کلی می‌باشد، یک ناحیه دکمه جوش در مرکز اتصال و مجاورت فصل مشترک و یک ناحیه متأثر از حرارت<sup>۱</sup> (HAZ) که بین دکمه جوش و ساختار پایه فلز منیزیم می‌باشد [۱۲، ۱۳، ۱۶] که در شکل ۵-د و شکل ۵-ه این ساختار و مرزبندی‌ها برای هر دو نمونه اتصال داده شده با ضخامت پوشش متفاوت نشان داده شده‌اند. شکل ۵ به‌طور کلی مقایسه ساختار اتصال دکمه جوش در دو نمونه با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  و  $10 \mu\text{m}$  می‌باشد.

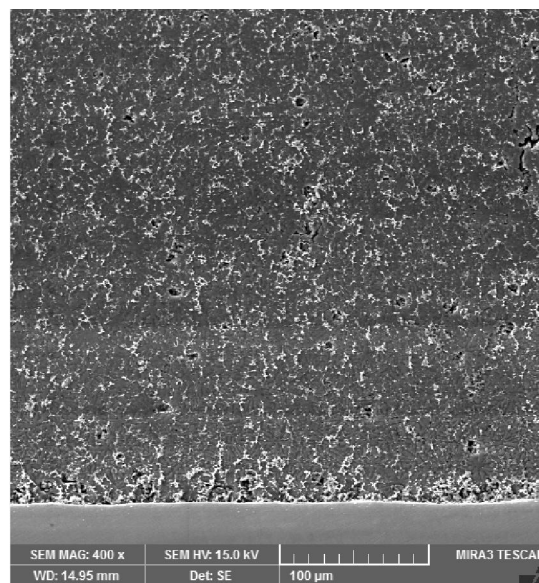
شکل ۵-ب و شکل ۵-ج نشان می‌دهند که افزایش ضخامت پوشش روی موجب نفوذ بیشتر عنصر روی به درون دکمه جوش می‌شود و ساختار دکمه جوش را تغییر می‌دهد. در شکل ۵-ب ضخامت پوشش روی بیشتر بوده و مقدار فازهای بین‌دانه‌ای افزایش یافته است. همچنین در دکمه جوش، در مجاورت با فصل مشترک دو ورق، لایه‌ای واکنشی با ساختاری متفاوت و دانه‌بندی ریزتر نسبت به سایر نواحی دکمه جوش ایجاد شده است که ضخامت این لایه نسبت به لایه ایجاد شده در نمونه جوش داده شده با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  (شکل ۵-ج) بیشتر می‌باشد.

<sup>1</sup> Heat Affected Zone



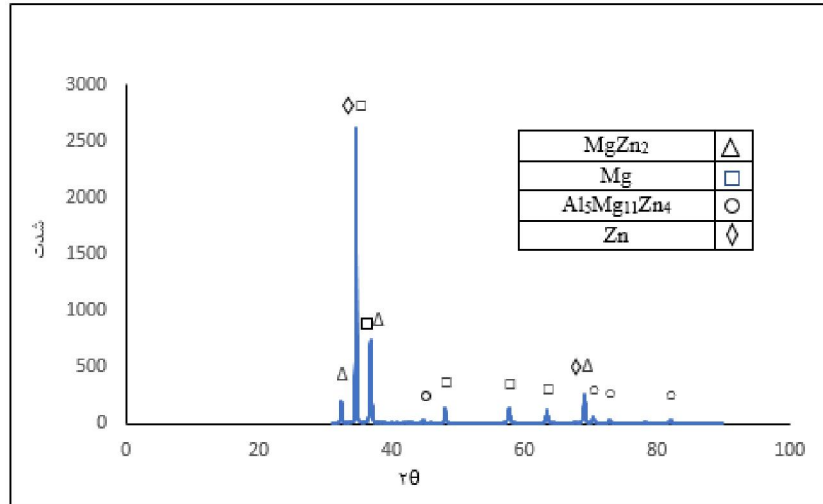
شکل ۵ بررسی ریزساختار اتصال با تصاویر میکروسکوپ نوری (الف) شماتیک برش عرضی مرکز اتصال (ب) تصویر نقطه ۱ برای نمونه با ضخامت پوشش  $10 \mu\text{m}$  (ج) تصویر نقطه ۱ برای نمونه با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  (د) تصویر نقطه ۲ برای نمونه با ضخامت پوشش  $10 \mu\text{m}$  (ه) تصویر نقطه ۲ برای نمونه با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$

در نزدیکی فصل مشترک با توجه به اینکه دما به بالاتر از دمای ذوب منیزیم می‌رسد و این دما بسیار بالاتر از دمای ذوب روی می باشد، مقدار زیادی از عنصر روی موجود در خود منیزیم به مرزهای منطقه دکمه جوش به سمت فلز پایه منیزیم رانده می‌شود و عنصر روی پوشش نیز به سمت مرزهای ناحیه اتصال در امتداد فصل مشترک رانده می‌شود [۱۵] و بخشی از آن هم به درون ناحیه دکمه جوش نفوذ می‌کند که با افزایش ضخامت پوشش، میزان عنصر روی رانده شده به اطراف و ناحیه دکمه جوش افزایش می‌یابد و به‌صورت فازهای ثانویه در درون منطقه دکمه جوش به‌صورت پراکنده رسوب می‌کند. شکل ۶ تصویر FESEM از برش عرضی نمونه با ضخامت پوشش  $10 \mu\text{m}$  را نشان می‌دهد که فازهای میانی و توزیع آنها به‌خوبی در آن قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۶ تصویر FESEM از برش عرضی نمونه با ضخامت پوشش  $10 \mu\text{m}$

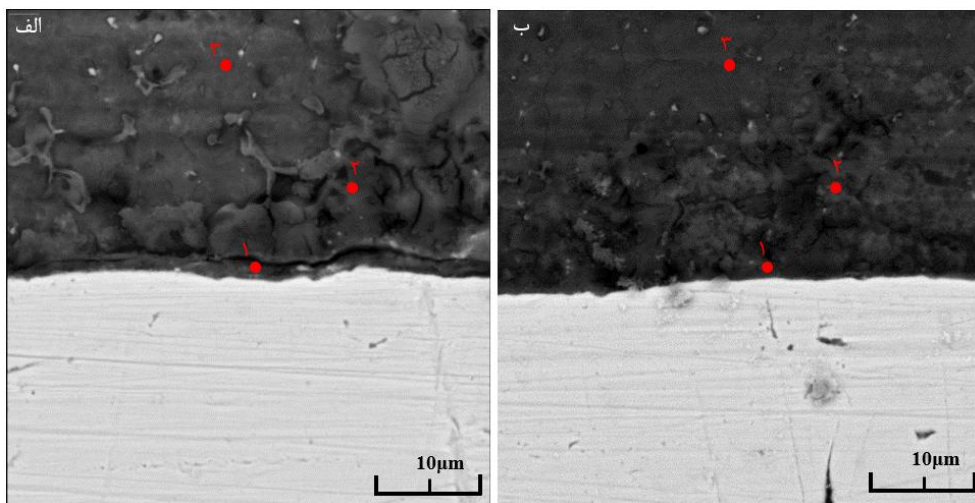
همچنین شکل ۷ نیز نمودار XRD از ناحیه اتصال نمونه با ضخامت پوشش  $10\ \mu\text{m}$  می‌باشد. با توجه به نمودار XRD می‌توان دریافت که فاز  $\text{MgZn}_2$  به‌عنوان فازهای ثانویه به‌صورت بین‌دانه‌ای رسوب کرده‌اند و همچنین فاز  $\text{Al}_5\text{Mg}_{11}\text{Zn}_4$  نیز فاز تشکیل شده در ناحیه مرکزی دکمه جوش و در مرز اتصال یا همان لایه واکنشی می‌باشد [۱۲، ۱۳].



شکل ۷ نمودار XRD نمونه با ضخامت پوشش  $10\ \mu\text{m}$

با انجام آزمایش آنالیز عنصری نقطه‌ای EDS برای سه نقطه در این دو نمونه‌ی اتصال داده‌شده با ضخامت متفاوت می‌توان دریافت که ایجاد این لایه واکنشی و تغییر ساختاری در ناحیه دکمه جوش به دلیل تفاوت در میزان روی وارد شده به ناحیه دکمه جوش و لایه واکنشی می‌باشد. شکل ۸ تصویر FESEM از منطقه مرکزی اتصال دو ورق می‌باشد و جدول ۴ نیز آنالیز EDS نقطه‌ای برای نقاط مشخص شده در شکل ۸ را نشان می‌دهد که از ناحیه ۱ در شکل ۵-الف برای دو نمونه با ضخامت پوشش متفاوت جهت بررسی انتخاب شده است و این ناحیه همان مرکز اتصال در مرز منیزیم و فولاد می‌باشد.

در جدول نتایج EDS برای شکل ۸-الف تغییرات درصد عنصر روی مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه این اتصال دارای ضخامت پوشش  $5\ \mu\text{m}$  بوده است، میزان تغییرات عنصر روی با افزایش فاصله از فصل مشترک تغییر چندانی نکرده است. در نمونه اتصال با ضخامت  $10\ \mu\text{m}$ ، درصد عنصر Zn و همچنین Al نسبت به ضخامت  $5\ \mu\text{m}$  بیشتر می‌باشد.



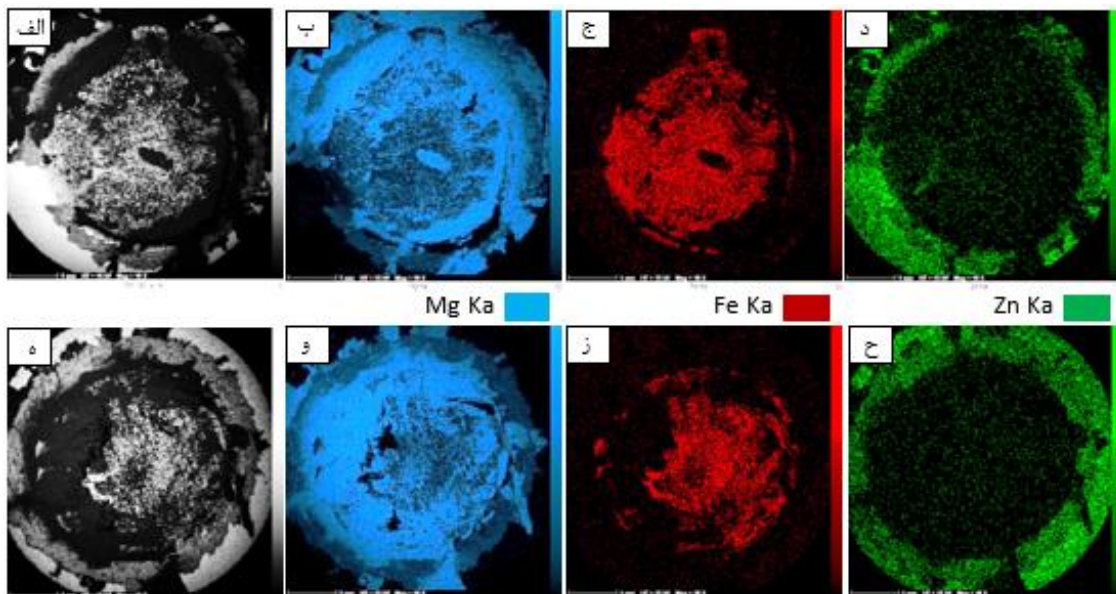
شکل ۸ تصاویر SEM مرکز اتصال دو نمونه با ضخامت الف)  $5\ \mu\text{m}$  ب)  $10\ \mu\text{m}$



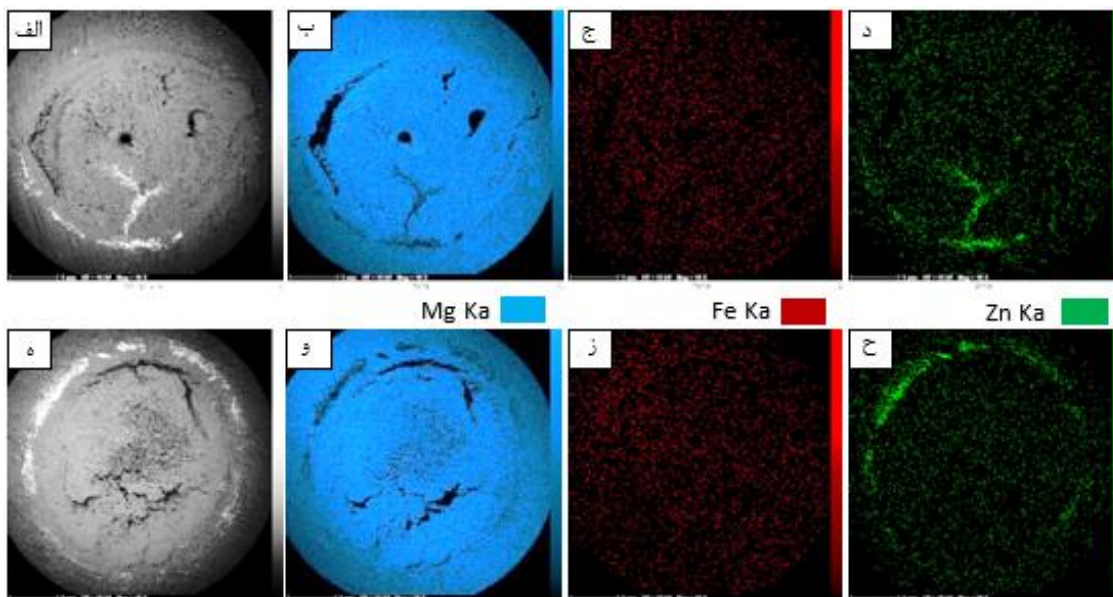
جدول ۴ آنالیز EDS نقطه‌ای برای نقاط مشخص شده در شکل ۸

Zn%	Cu%	Ni%	Fe%	Mn%	Si%	Al%	Mg%	ضخامت پوشش نمونه (میکرومتر)	موقعیت نقطه
1.75	0.31	0.05	0.23	0.04	1.21	2.97	93.44	5	نقطه ۱
2.33	0.23	0.04	0.18	0.08	1.06	3.92	92.16	10	
1.60	0.29	0.07	0.05	0.04	0.98	3.73	93.24	5	نقطه ۲
2.31	0.36	0.05	0.08	0.09	1.01	4.10	92.00	10	
1.88	0.42	0.06	0.06	0.08	1.13	3.30	93.08	5	نقطه ۳
2.40	0.37	0.04	0.09	0.01	0.96	4.37	91.76	10	

شکل ۹ تصویر مقایسه توزیع عناصر از سطح شکست سمت فولاد در دو نمونه با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  و  $10 \mu\text{m}$  می‌باشد، که به ترتیب دارای استحکام اتصال  $4180 \text{ N}$  و  $4590 \text{ N}$  می‌باشند. با بررسی این تصاویر می‌توان افزایش میزان روی رانده‌شده به اطراف ناحیه اتصال در نمونه با ضخامت پوشش بالاتر را مشاهده کرد. رنگ سبز نشانگر عنصر روی می‌باشد که ضخامت نوار سبز رنگ در نمونه با ضخامت پوشش  $10 \mu\text{m}$  بیشتر و یکنواخت‌تر می‌باشد. همچنین با کاهش میزان عنصر Fe در سطح شکست نمونه با ضخامت پوشش  $10 \mu\text{m}$  نسبت به نمونه دیگر، می‌توان دریافت که لایه منیزیم و روی بیشتری بر روی سطح شکست این نمونه باقی‌مانده است. با مقایسه نتایج تصاویر شکل ۹ و شکل ۵-ب و شکل ۵-ج می‌توان گفت شکست از مرز لایه واکنشی بین فصل مشترک و ناحیه میانی منطقه دکمه جوش صورت می‌گیرد و همین علت باعث می‌شود سطح فولادی نمونه شکست در نمونه با پوشش  $10 \mu\text{m}$  بیشتر با محصول لایه واکنشی پوشیده شود.

شکل ۹ توزیع عناصر در سطح شکست سمت فولاد برای دو نمونه با ضخامت الف)  $5 \mu\text{m}$  و ب)  $10 \mu\text{m}$ 

شکل ۱۰ نیز تصویر توزیع عناصر در سطح شکست سمت منیزیم برای دو نمونه اتصال با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  و  $10 \mu\text{m}$  می‌باشد. شکل ۱۰-الف نمونه با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  و شکل ۱۰-ب نمونه با ضخامت  $10 \mu\text{m}$  می‌باشد. در این دو نمونه نیز حلقه‌ای از عنصر روی در اطراف ناحیه مرکزی اتصال مشخص می‌باشد که این حلقه در نمونه با ضخامت پوشش  $10 \mu\text{m}$  یکنواخت و پیوسته می‌باشد اما در نمونه با ضخامت پوشش  $5 \mu\text{m}$  ناپیوسته و بسیار ضعیف توزیع شده است. از آنجایی که وجود عنصر روی در اطراف ناحیه مرکزی اتصال موجب اتصال به صورت لچیم نرم می‌شود، افزایش ابعاد این ناحیه می‌تواند موجب افزایش استحکام نیز شود.



شکل ۱۰ توزیع عناصر در سطح شکست سمت منیزیم برای دو نمونه با ضخامت الف) ۵ و ه) ۱۰ μm

#### ۴- نتیجه‌گیری

- این مقاله به بررسی اثر ضخامت لایه میانی Zn بر اتصال غیرهمسان فولاد به منیزیم AZ31 به روش جوش نقطه‌ای مقاومتی پرداخته است که نتایج حاصل از بررسی‌های مکانیکی و ریزساختاری به شرح زیر می‌باشد
- با افزایش ضخامت از ۵ μm به ۱۰ μm به‌طور میانگین استحکام کششی اتصال ۱۳ درصد افزایش پیدا کرده است
  - افزایش ضخامت لایه میانی Zn موجب ریزدانه شدن ساختار ناحیه دکمه جوش و افزایش فازهای ثانویه و همچنین افزایش ضخامت لایه واکنشی در فصل مشترک اتصال می‌شود.
  - به دلیل نقطه ذوب پایین Zn نسبت به فولاد و منیزیم این عنصر زودتر ذوب شده و از مرکز فصل مشترک منطقه دکمه جوش به اطراف رانده می‌شود که افزایش ضخامت لایه میانی باعث می‌شود میزان عنصر رانده‌شده به اطراف که موجب لحیم نرم می‌شود بیشتر گردد. در نتیجه، ضخامت ناحیه لحیم نرم افزایش می‌یابد و استحکام نیز افزایش پیدا می‌کند. از طرفی افزایش ضخامت لایه Zn باعث می‌شود مقدار بیشتری از Zn نیز وارد منطقه دکمه جوش شود.
  - با توجه به نوع شکست حاصل از آزمون کشش، اتصال غیرهمسان فولاد - منیزیم فاقد منطقه اختلاط بوده و صرفاً منیزیم به‌صورت یک جامد بر روی سطح فولاد چسبیده و فصل مشترک دو ورق پس از اتصال دارای خط مرزی می‌باشد.

#### References

- [1] Munitz A, Kohn G, Cotler C. Resistance spot welding of Mg-AM50 and Mg-AZ91D alloys. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). 2002.
- [2] Yarong W, Jicai F. Influence of Surface Condition on Expulsion in Spot Welding AZ31B Magnesium Alloy. Journal of Materials Sciences and Technology. 2005 Sep 28;21(05):749.
- [3] Liu L, Zhou SQ, Tian YH, Feng JC, Jung JP, Zhou YN. Effects of surface conditions on resistance spot welding of Mg alloy AZ31. Science and Technology of Welding and Joining. 2009 May 1;14(4):356-61.
- [4] Qiu R, Shi H, Yu H, Zhang K, Tu Y, Satonaka S. Effects of electrode force on the characteristic of magnesium alloy joint welded by resistance spot welding with cover plates. Materials and Manufacturing Processes. 2010 Dec 3;25(11):1304-8. doi: 10.1080/10426914.2010.505619
- [5] Qiu RF, Satonaka S, Iwamoto C. Mechanical properties and microstructures of magnesium alloy AZ31B joint fabricated by resistance spot welding with cover plates. Science and Technology of Welding and Joining. 2009 Nov 1;14(8):691-7. doi: 10.1179/136217108X365313
- [6] Sun M, Niknejad ST, Zhang G, Lee MK, Wu L, Zhou Y. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded AZ31/AA5754 using a nickel interlayer. Materials & Design. 2015 Dec 15;87:905-13. doi: 10.1016/j.matdes.2015.08.097

- [7] Miyamoto K, Nakagawa S, Sakamoto H, Iwatani S, Hojo S, Tachibana T, Ogura T, Hirose A, Kojiro K. Dissimilar Joining of Magnesium Alloy and Steel by Resistance Spot Welding. Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan. 2012 Mar;43(6).
- [8] Zhang K, Wu L, Tan C, Sun Y, Chen B, Song X. Influence of Al-Si coating on resistance spot welding of Mg to 22MnB5 boron steel. Journal of Materials Processing Technology. 2019 Sep 1;271:23-35. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.03.024
- [9] Sun M, Niknejad ST, Gao H, Wu L, Zhou Y. Mechanical properties of dissimilar resistance spot welds of aluminum to magnesium with Sn-coated steel interlayer. Materials & Design. 2016 Feb 5;91:331-9. doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.121
- [10] Jiang X, Yu H, Lin Q, Xu R. Effects of Cu-Zn alloy additions on microstructure and strength of welded joints between magnesium alloy and mild steel. In 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15) 2015 Apr (pp. 616-619). Atlantis Press. doi: 10.2991/meic-15.2015.140
- [11] Manladan SM, Yusof F, Ramesh S, Zhang Y, Luo Z, Ling Z. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded in welding-brazing mode and resistance element welded magnesium alloy/austenitic stainless-steel joints. Journal of Materials Processing Technology. 2017 Dec 1;250:45-54. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.006
- [12] Liu L, Xiao L, Feng JC, Tian YH, Zhou SQ, Zhou Y. The mechanisms of resistance spot welding of magnesium to steel. Metallurgical and Materials Transactions A. 2010 Oct;41:2651-61. doi: 10.1007/s11661-010-0333-0
- [13] Xu W, Chen DL, Liu L, Mori H, Zhou Y. Microstructure and mechanical properties of weld-bonded and resistance spot welded magnesium-to-steel dissimilar joints. Materials Science and Engineering. A. 2012 Mar 1;537:11-24. doi: 10.1016/j.msea.2011.12.096
- [14] Feng Y, Li Y, Luo Z, Ling Z, Wang Z. Resistance spot welding of Mg to electro-galvanized steel with hot-dip galvanized steel interlayer. Journal of Materials Processing Technology. 2016 Oct 1;236:114-22. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.05.015
- [15] Liu L, Xiao L, Chen DL, Feng JC, Kim S, Zhou Y. Microstructure and fatigue properties of Mg-to-steel dissimilar resistance spot welds. Materials & Design. 2013 Mar 1;45:336-42. doi: 10.1016/j.matdes.2012.08.018
- [16] Zhang Y, Zhou Z, Fu Y, Li H, Li Z, Mariusz B, Senkara J. Effects of Al/Zn interlayer on the solidification path and liquation cracking susceptibility of AZ31/ZK61 dissimilar magnesium alloy resistance spot welding joints. Journal of Manufacturing Processes. 2022 Mar 1;75:60-71. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.12.017
- [17] Feng JC, Wang YR, Zhang ZD. Nugget growth characteristic for AZ31B magnesium alloy during resistance spot welding. Science and Technology of Welding and Joining. 2006 Mar 1;11(2):154-62. doi: 10.1179/174329306X84364
- [18] Penner P. Resistance spot welding of Al to Mg with different interlayers (Master's thesis, University of Waterloo).
- [19] Safanama DS, Marashi SP, Pouranvari M. Similar and dissimilar resistance spot welding of martensitic advanced high strength steel and low carbon steel: metallurgical characteristics and failure mode transition. Science and Technology of Welding and Joining. 2012 May 1;17(4):288-94. doi: 10.1179/1362171812Y.0000000006
- [20] Behraves SB, Jahed H, Lambert S. Characterization of magnesium spot welds under tensile and cyclic loadings. Materials & Design. 2011 Dec 1;32(10):4890-900.