



## Numerical and Experimental Investigation of Current and Electrode Force Effects on Expulsion in Resistance Spot Welding of Galvanized and Non-Galvanized Low-Carbon Steel Sheets

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Valaee Tale M.<sup>1</sup> MSc,  
Mazaheri Y.<sup>1</sup> PhD,  
Sheikhi M.\*<sup>1</sup> PhD,  
Malek Ghaini F.<sup>2</sup> PhD,  
Yousefifar Gh.R.<sup>3</sup> MSc

#### How to cite this article

Valaee Tale M, Mazaheri Y, Sheikhi M, Malek Ghaini F, Yousefifar Gh.R. Numerical and Experimental Investigation of Current and Electrode Force Effects on Expulsion in Resistance Spot Welding of Galvanized and Non-Galvanized Low-Carbon Steel Sheets. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1797-1804.

### ABSTRACT

During the process of Resistance spot welding (RSW), some of the molten metal comes out of the interface of the two sheets, which causes contamination on the body of the cars. This disrupts the staining process and reduces the safety of the workshop. In this study, by numerical and experimental investigation of the effect of welding current and electrode forces on expulsion in RSW of galvanized and non-galvanized steel sheets, the prediction of expulsion for both sheets was performed. Experimental results showed that with increasing the welding current, nugget diameter and weld strength increased continuously until expulsion occurrence. The resultant nugget in both types of sheets had almost similar diameter at the similar welding current; however, in the galvanized sheet, expulsion occurred at a larger nugget diameter. Increasing the electrode force before the occurrence of expulsion increased the nugget diameter, but, then, reduced the nugget diameter. The results of the study were evaluated with a modified numerical model that were consistent with each other. In this model, increase in the nugget diameter increased the force from within the nugget and accelerated the expulsion, while the electrode force was a hindrance to the expulsion. Zinc coated on galvanized steel sheets with low contact resistance and friction coefficient between zinc-zinc metal resulted in a good fit between two sheets during the welding process, which according to the numerical model, causes expulsion to occur at a larger nugget diameter for galvanized steel sheets.

**Keywords** Resistance Spot Welding; Galvanized Steel; Welding Current; Expulsion; Numerical Model

<sup>1</sup>Materials Department, Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>Materials Engineering Department, Materials Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>SAIPA Corporation, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Chahar Bagh Shahid Mostafa Ahmadi Roshan, Hamedan, Iran. Postal Code: 6517838695  
Phone: +98 (81) 38292509  
Fax: +98 (81) 38292631  
sheikhi.mohsen@basu.ac.ir

#### Article History

Received: September 29, 2018  
Accepted: January 19, 2019  
ePublished: July 01, 2019

### CITATION LINKS

[1] Resistance spot weldability of galvanized coated and uncoated TRIP steel [2] Effect of welding parameters on the peak load and energy absorption of low-carbon steel resistance spot welds [3] Expulsion prediction in resistance spot welding [4] Analysis of resistance welding processes and expulsion of liquid metal from the weld nugget [5] Influence of welding current shape on expulsion and weld strength of resistance spot welds [6] Spot weld properties when welding with expulsion - a comparative study [7] Expulsion monitoring in spot welded advanced high strength automotive steels [8] Expulsion reduction in resistance spot welding by controlling of welding current waveform [9] Weldability and degradation study of coated electrodes for resistance spot welding [10] Thermal modeling of resistance spot welding and prediction of weld microstructure [11] Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel [12] Chemical thermodynamics [13] Welding metallurgy [14] Effects of zinc layer thickness on resistance spot welding of galvanized mild steel [15] An examination of nugget development during spot welding, using both experimental and analytical techniques

## بررسی تجربی و عددی تاثیر جریان و نیروی الکتروود بر پاشش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی کم کربن گالوانیزه و غیرگالوانیزه

مسلم ولایی‌طالع MSc

گروه مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

یوسف مظاهری PhD

گروه مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

محسن شیخی\* PhD

گروه مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

فرشید مالک‌قائینی PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

غلامرضا یوسفی‌فر MSc

شرکت سایپا، تهران، ایران

### چکیده

در حین فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقداری فلز مذاب از فصل مشترک بین دو ورق خارج می‌شود که موجب آلودگی روی بدنه خودروها می‌شود و این موجب اختلال در فرآیند رنگ‌آمیزی و کاهش ایمنی کارگاه می‌شود. در این پژوهش با بررسی تجربی و عددی اثر جریان جوشکاری و فشار الکتروود بر روی میزان پاشش مذاب در جوشکاری نقطه‌ای ورق فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه، پیش‌بینی پاشش مذاب برای هر دو ورق انجام شده است. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش جریان جوشکاری، قطر دکمه جوش و استحکام جوش در هر دو نوع ورق به‌طور پیوسته افزایش یافت تا زمانی که پاشش رخ داد. در یک جریان جوشکاری یکسان، قطر دکمه ایجادشده برای هر دو ورق تقریباً یکسان بود، اما در ورق گالوانیزه پاشش مذاب در قطر دکمه‌های بالاتر اتفاق می‌افتاد. افزایش فشار الکتروود تا قبل از پاشش موجب افزایش قطر دکمه و بعد از پاشش موجب کاهش قطر دکمه می‌شد. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق با یک مدل عددی اصلاح‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت که با یکدیگر همخوانی نسبی داشتند. در این مدل افزایش قطر دکمه موجب افزایش نیروی ناشی از دکمه جوش می‌شد و پاشش مذاب را تسریع می‌کرد، در صورتی که فشار الکتروود به‌عنوان عامل ممانعت‌کننده از پاشش بود. پوشش فلز روی در ورق‌های گالوانیزه، با ضریب اصطکاک و مقاومت تماسی فلز روی - فلز روی کم، موجب ایجاد انطباق خوب ورق‌ها در حین فرآیند جوشکاری می‌شود که این موضوع طبق مدل عددی سبب می‌شود تا پاشش مذاب برای ورق‌های گالوانیزه در قطر دکمه‌های بالاتر اتفاق بیفتد.

**کلیدواژه‌ها:** جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، ورق گالوانیزه، جریان جوشکاری، پاشش مذاب، مدل عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

\*نویسنده مسئول: sheikhi.mohsen@basu.ac.ir

### ۱- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای از مهم‌ترین روش‌های جوشکاری ورق‌ها است. این روش با داشتن قابلیت اتوماسیون‌شدن در جوشکاری بدنه خودروها به کار می‌رود. در صنعت خودروسازی از ورق‌های فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه استفاده می‌شود<sup>[1]</sup>. یکی از چالش‌های مهم در جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه در صنایع خودروسازی، کاهش میزان پاشش مذاب از بین دو ورق در حین جوشکاری است که علاوه بر کاهش استحکام جوش و آسیب به اپراتورها می‌تواند موجب ایجاد پلیسه و آلودگی روی بدنه خودرو و اختلال در فرآیند رنگ‌آمیزی بدنه شود<sup>[2]</sup>. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، افزایش حجم ناشی از تشکیل مذاب و نیروهای الکترومغناطیسی در منطقه دکمه جوش، سبب می‌شود فشار زیادی از طرف دکمه جوش به اطراف وارد شود که این در نهایت می‌تواند منجر به پاشش شود<sup>[3,4]</sup>.

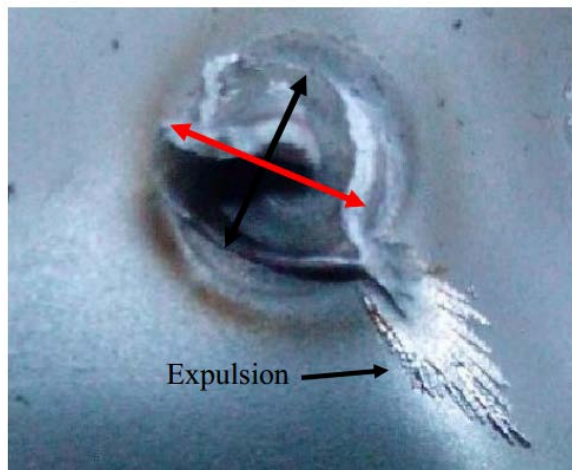
پاشش مذاب به پارامترهای جوشکاری و کیفیت و کارایی تجهیزات جوشکاری وابسته است. جریان ( $I$ )، زمان جوشکاری ( $tw$ ) و نیروی الکتروود ( $F$ ) از پارامترهای موثر بر پاشش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای هستند که تحقیقات زیادی درباره اثر این پارامترها انجام شده است. پودرزاج و همکاران<sup>[5]</sup> با بررسی اثر شکل جریان جوشکاری روی میزان پاشش مذاب، تغییر شکل جریان را بی‌اثر معرفی کردند، اما افزایش مقدار جریان باعث افزایش میزان پاشش و استحکام جوش معرفی شده است. کیمچی<sup>[6]</sup> با بررسی اثر جریان و زمان جوشکاری روی خواص جوش نقطه‌ای ورق غیرگالوانیزه، به این نتیجه رسید که حتی در صورتی که پاشش مذاب رخ دهد، با افزایش جریان و زمان جوشکاری، قطر دکمه و استحکام جوش افزایش می‌یابد. ما و همکاران<sup>[7]</sup> با مانیتورکردن پاشش مذاب در جوشکاری نقطه‌ای ورق گالوانیزه، متوجه افت ناگهانی مقاومت دینامیکی و فشار الکتروود و میزان جابه‌جایی الکتروودها در لحظه پاشش شدند و خاطر نشان کردند که ولتاژ خروجی و شکل سینگال جریان نمی‌تواند پاشش مذاب را شناسایی کند. هوآنگ و همکاران<sup>[8]</sup> با اعمال جریان الکتریکی موجی شکل و پالسی در جوشکاری فولاد استحکام بالا توانستند پاشش مذاب را کاهش دهند. سنکارا و همکاران<sup>[3]</sup> به‌منظور پیش‌بینی زمان پاشش در فرآیند جوش نقطه‌ای فلز آلومینیوم، مدلی را ارائه داده‌اند که براساس این مدل، زمانی پاشش رخ می‌دهد که نیروی ناشی از دکمه جوش از نیروی اعمالی از طرف الکتروودها بیشتر شود. نیروی ناشی از دکمه جوش وابسته به ابعاد دکمه جوش است و بنابراین در این مدل، هنگامی که قطر دکمه جوش به یک اندازه بحرانی برسد پاشش رخ می‌دهد.

تحقیقات محدود انجام‌گرفته در ارتباط با تأثیر پوشش ورق بر پاشش مذاب حاکی از آن است که پاشش در ورق‌های گالوانیزه در جریان‌های بالاتر رخ می‌دهد<sup>[9]</sup>. حال آنکه تحلیل سیستماتیک علت این اختلاف رفتار کاملاً مغفول مانده است. نوآوری این تحقیق، دریافت علت این تفاوت رفتار در پاشش در بین این دو نوع ورق است. از سوی دیگر نکته قابل توجه، توجیه این مفهوم در مدل‌های عددی ارائه‌شده در خصوص پیش‌بینی پاشش مذاب است، به‌گونه‌ای که بتوان علت اختلاف را به‌طور محسوس در بطن مدل گنجاند. لذا هدف از این تحقیق، مقایسه پاشش مذاب در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های گالوانیزه و غیرگالوانیزه مورد استفاده در صنعت خودروسازی و تحلیل تفاوت‌های رفتاری آنها با استفاده از مدل‌های موجود است. همچنین مدل عددی مناسب با رویکرد اصلاح مدل‌های موجود و با قابلیت تحلیل و پیش‌بینی تأثیر نیروی الکتروود و شدت جریان بر پدیده پاشش مذاب ارائه شده است.

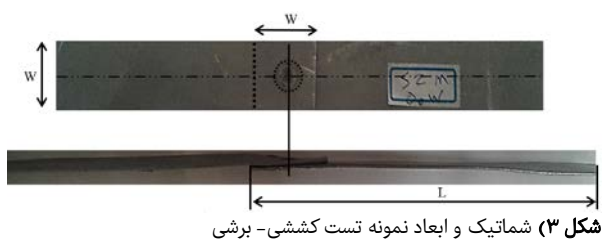
### ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، ورق فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه با ترکیب شیمیایی جدول ۱ و خواص مکانیکی جدول ۲ و با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر توسط دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مدل (ITGCACV11-3002064S-0) با جریان متناوب و ولتاژکاری ۳۸۰ ولت، مطابق استاندارد (AWS C1.1-66) به یکدیگر جوشکاری شدند. پارامترهای فرآیند به‌صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

جریان و نیروی الکتروود، پارامترهایی هستند که در این تحقیق به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند و مقادیر آنها در جدول ۳ آورده شده است. سایر پارامترها از قبیل زمان جوشکاری، زمان نگهداری



شکل ۲) تصویر پاشش مذاب در اطراف دکمه جوش و روش اندازه‌گیری قطر دکمه جوش



### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اثر جریان و نیروی جوشکاری بر ابعاد دکمه جوش

با انجام فرآیند جوشکاری تحت پارامترهای جدول ۳، مقدار قطر دکمه برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. همان گونه که در نمودار ۱ ارائه شده است، با جوشکاری ورق گالوانیزه و غیرگالوانیزه با نیروی ثابت الکتروود (۲۵۰۰ نیوتون) مشخص شد که با افزایش جریان جوشکاری برای هر دو فولاد گالوانیزه و غیرگالوانیزه، اندازه قطر دکمه و شدت پاشش افزایش یافته است. در جوشکاری ورق گالوانیزه، شروع پاشش در قطر دکمه‌های بالاتر یا به عبارتی در جریان‌های جوشکاری بالاتر (۸/۲ کیلوآمپر) اتفاق می‌افتد. این در صورتی است که ورق غیرگالوانیزه در قطر دکمه‌های پایین‌تر و جریان کمتر (۷/۲ کیلوآمپر) دچار پاشش می‌شود. همچنین به‌طور تقریبی قطر دکمه ایجاد شده برای هر دو ورق در جریانی که پاشش شروع می‌شود، یکسان است.

با بررسی اثر فشار الکتروود در مقادیر مختلف قطر دکمه مشخص شد که افزایش نیرو موجب کاهش میزان پاشش می‌شود. اثر فشار الکتروود روی قطر دکمه در نمودار ۲ برای ورق گالوانیزه و غیرگالوانیزه دیده می‌شود. این نمودار برای هر دو ورق در جریانی که پاشش شروع می‌شود (برای ورق گالوانیزه ۹/۷ کیلوآمپر و برای ورق غیرگالوانیزه ۸/۷ کیلوآمپر) رسم شده است.

در این نمودار، در نیروهای پایین که پاشش رخ می‌دهد، افزایش نیرو موجب افزایش قطر دکمه می‌شود و سپس با افزایش بیشتر نیرو و قطع شدن پاشش، قطر دکمه سیر نزولی پیدا می‌کند. روند تغییرات میزان پاشش و قطر دکمه برای هر دو نوع ورق یکسان است. ورق گالوانیزه برای مقابله با پاشش نیروی کمتری نسبت به ورق غیرگالوانیزه نیاز دارد و با وجود پایین‌تر بودن جریان جوشکاری برای ورق غیرگالوانیزه، این ورق در نیروهای بالا قطر دکمه بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند.

الکتروودها، زمان افزایش جریان و مدت‌زمانی که طول می‌کشد الکتروودها به هم برسند به ترتیب ۱۷، ۱۰، ۳ و ۴۵ سیکل، در همه آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شدند.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی ورق‌های فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه

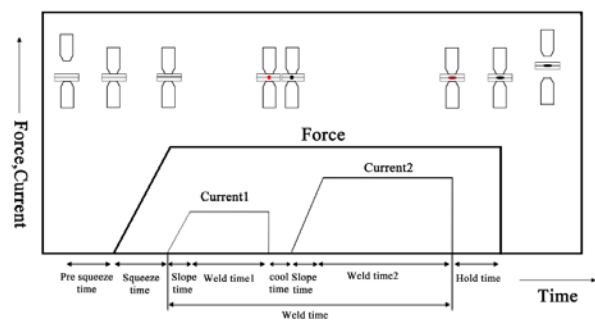
نوع فولاد	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu	Mo
گالوانیزه	۰/۰۰۶	۰/۴۴۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۱۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۵	۰/۰۰۳
غیرگالوانیزه	۰/۰۵۷	۰/۲	۰/۰۱۷	۰/۰۰۹	۰/۰۶۴	۰/۰۱	۰/۰۲۶	۰/۰۸۲	۰/۰۰۳

جدول ۲) خواص مکانیکی ورق‌های فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه استفاده شده

نوع فولاد	سختی (HV)	استحکام تسلیم میانگین (MPa)	استحکام کششی میانگین (MPa)
گالوانیزه	۱۳۴	۲۷۳	۳۷۳
غیرگالوانیزه	۱۰۹	۲۱۷	۳۵۴

جدول ۳) پارامترهای فرآیند مورد استفاده در آزمایشات تجربی

متغیر	مقدار
جریان (kA)	۹/۷، ۸/۷، ۸/۲، ۷/۷، ۷/۲، ۶/۷، ۶/۲، ۵/۷، ۵/۲
نیرو (kN)	۵، ۴/۱۵، ۴، ۳/۱۵، ۳، ۲/۱۵، ۲، ۱/۱۵، ۱، ۰/۱۵



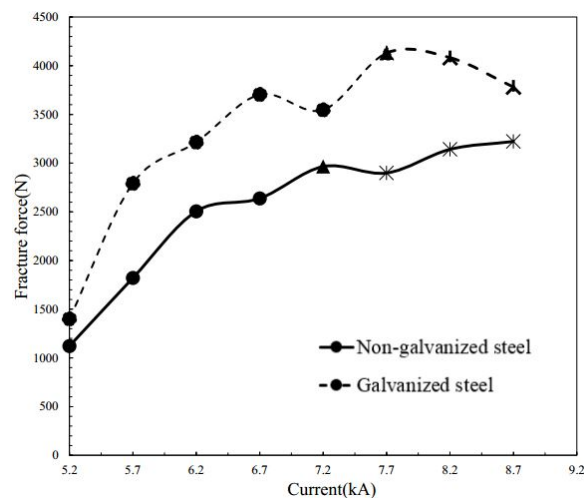
شکل ۱) چرخه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و پارامترهای مؤثر در این فرآیند

در این پژوهش از سیکل جوشکاری تک‌مرحله‌ای استفاده شد و پارامتر زمان رسیدن الکتروودها به هم مقدار صفر را داشت. به‌منظور بررسی تکرارپذیری و دقت در نتایج، از هر یک از شرایط به تعداد سه نمونه تهیه شد. برای اندازه‌گیری ابعاد دکمه جوش پس از انجام آزمون پیل، میانگین قطر دکمه جوش مطابق شکل ۲، با کولیس اندازه‌گیری شد، به نحوی که میانگین طول دو خط قرمز و مشکی برابر با میانگین قطر دکمه است. به‌منظور بررسی اثر پاشش مذاب بر استحکام جوش براساس پارامترهای جدول ۳، نمونه‌های تست کششی- برشی تهیه شد و استحکام جوش در جریان‌های مختلف جوشکاری به دست آمد.

در تحقیق حاضر، در صورت مشاهده پاشش مذاب در حین فرآیند جوشکاری، نمونه جوش شده تحت آزمون پیل قرار گرفته و با توجه به شکل ۲ قطعیت پاشش مذاب به‌صورت چشمی اعلام شده است. ابعاد نمونه استاندارد تست کششی- برشی برای ورق با ضخامت‌های گوناگون متفاوت است. براساس استاندارد برای ورق با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر مطابق شکل ۳ مقادیر W و L باید به ترتیب ۱/۶ و ۷/۶ میلی‌متر باشند. با تهیه نمونه استاندارد تست کششی- برشی، نمونه‌ها توسط دستگاه تست کشش (دستگاه سنتام مدل STM-150) مورد ارزیابی قرار گرفتند و نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی برای هر نمونه به دست آمد. در این نمودارها ماکزیمم مقدار نیرو به‌عنوان نیروی شکست جوش در نظر گرفته شد.

جوش مشخص شد که با افزایش جریان جوشکاری، استحکام جوش برای هر دو ورق افزایش می‌یابد و این با قطر دکمه متناسب است بنابراین استحکام جوش به ابعاد دکمه جوش وابسته است و پاشش مذاب در صورت کاهش ابعاد دکمه جوش منجر به کاهش استحکام جوش خواهد شد.

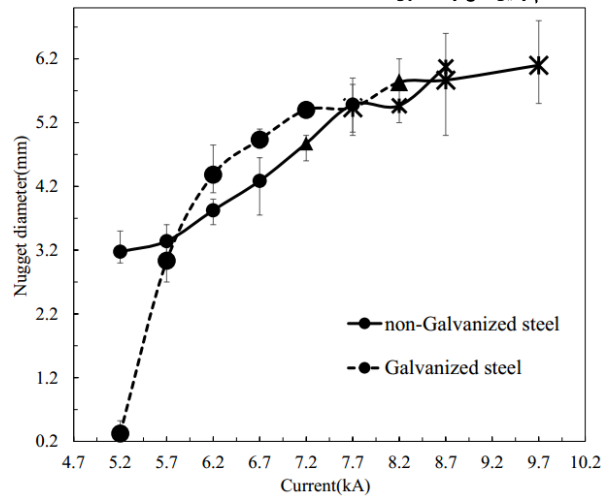
در جریان‌های جوشکاری بالا، استحکام جوش تغییرات مثبت چشمگیری ندارد که این می‌تواند اثر پاشش مذاب باشد چرا که مقداری از حجم مذاب از بین دو ورق خارج شده است. ورق گالوانیزه با داشتن قطر دکمه بالاتر و عبور جریان بهتر در اثر حضور فلز روی [11]، استحکام جوش بیشتری نسبت به ورق غیرگالوانیزه دارد. در خصوص نیروی جوشکاری با توجه به نمودار ۳ در نیروهای بالای جوشکاری، کاهش قطر دکمه رخ داده است، در صورتی که پاشش مذاب نداریم، ولی قطعاً استحکام جوش کاهش خواهد یافت. به‌منظور بررسی اثر پارامتر جریان و نیروی جوشکاری بر میزان پاشش مذاب و نحوه اثرگذاری این دو پارامتر سعی در اصلاح یک مدل عددی شد. در این مدل، پاشش مذاب به قطر دکمه ایجادشده در فرآیند جوشکاری وابسته است. در واقع با افزایش قطر دکمه، میزان برآیند نیروهای ناشی از قطر دکمه جوش که با نیروی اعمالی الکتروود مقابله می‌کند، افزایش می‌یابد که این موضوع پاشش مذاب را سبب می‌شود. در این مدل عددی، نیروی ناشی از قطر دکمه جوش با روابط ترمودینامیک به دست می‌آید و سپس با بررسی مقادیر این نیرو در قطر دکمه‌های مختلف، قطر دکمه‌ای که پاشش در آن رخ می‌دهد مشخص می‌شود.



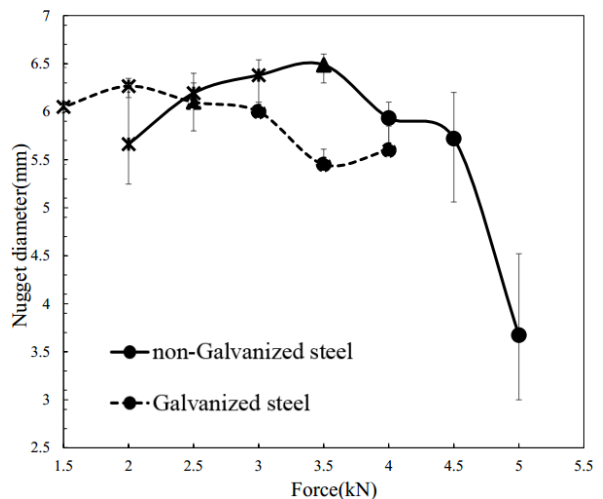
نمودار ۳) اثر جریان جوشکاری بر نیروی شکست جوش برای ورق گالوانیزه و غیرگالوانیزه تحت نیروی الکتروود ۲۵۰۰ نیوتون؛ ●: عدم پاشش، \* : پاشش شدید، ▲: پاشش ضعیف

### ۳-۳- مدل عددی

با عبور جریان الکتریکی از بین دو الکتروود با توجه به مقاومت الکتریکی معادل بین دو الکتروود مسی، گرمای زیادی بین دو ورق فولادی ایجاد می‌شود که منجر به ذوب شدن ورق‌های فولادی می‌شود که مذاب ایجادشده دارای دما و فشار بالایی است، چرا که در محاصره دو ورق فولادی است که توسط الکتروودهای مسی فشرده می‌شود. سنکارا و همکاران برای پیش‌بینی انفجار، فرض کردند انفجار زمانی رخ می‌دهد که فشار ناشی از ناگت از فشار الکتروودها بیشتر شود [3]. فشار ناشی از قطر دکمه جوش را می‌توان با استفاده از قوانین ترمودینامیک به دست آورد. در اثر عبور جریان



نمودار ۱) اثر جریان جوشکاری بر قطر دکمه جوش ورق گالوانیزه و غیرگالوانیزه تحت نیروی الکتروود ۲۵۰۰ نیوتون؛ ●: عدم پاشش، \* : پاشش شدید، ▲: پاشش ضعیف



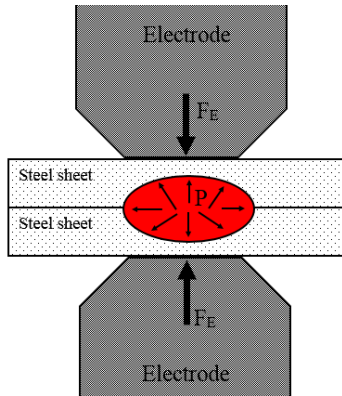
نمودار ۲) اثر نیروی الکتروود بر قطر دکمه جوش برای ورق گالوانیزه و غیرگالوانیزه در جریان جوشکاری (که پاشش شروع می‌شود)؛ ●: عدم پاشش، \* : پاشش شدید، ▲: پاشش ضعیف

### ۳-۲- اثر جریان جوشکاری بر استحکام جوش

نتایج مدل‌سازی‌های انجام‌گرفته روی چرخه حرارتی فرآیند جوشکاری مقاومتی نشان می‌دهد که نرخ سرمایش در این فرآیند با ضخامت ورق‌ها رابطه عکس دارد و با کاهش ضخامت، نرخ سرمایش افزایش می‌یابد. نرخ سرمایش در دمای تجزیه استنیت مستقل از جریان جوشکاری بوده و به میزان بسیاری زیادی تابع ضخامت ورق است. نرخ سرماش در محدوده تجزیه و استحاله استنیت بسته به ضخامت ورق در محدوده  $10^{\circ}\text{C} \times 2$  تا  $10^{\circ}\text{C} \times 5$  بر ثانیه است [10]. علت این نرخ سرمایش بالا قدرت سردکنندگی بالای الکتروودهای مسی آبرگرد است. این نرخ سرمایش بالا سبب می‌شود حتی فولادهای با کربن بسیار پایین و سختی‌پذیری کم هم در حین جوشکاری دارای قطر دکمه جوش مارتنزیتی باشند. این ریزساختار مارتنزیتی در نمونه‌های بررسی‌شده در این تحقیق نیز مشاهده شد و با تغییر جریان جوشکاری، ساختار ناگت تغییری نمی‌کند و تنها ابعاد ناگت تغییر می‌کند. افزایش قطر دکمه موجب افزایش استحکام جوش و کاهش آن، کاهش استحکام جوش را سبب می‌شود [2]. در نمودار ۳ با بررسی اثر جریان جوشکاری بر استحکام

جدول ۴) مقادیر خواص فیزیکی فولادهای کم‌کربن [3, 9, 10]

مقدار	واحد	نوع پارامتر
۴/۴	$\text{Pa}^{-1} \times 10^{-6}$	K
۰/۸۹	$\text{K}^{-1} \times 10^{-2}$	A
۱/۰۳	-	$V_L/V_S$
۱۵۳۶	K	$T_{\text{melt}}$



شکل ۴) جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و نیروی‌های اعمال شده به منطقه جوش

فشار دکمه جوش، نیرویی تحت عنوان نیروی ناشی از دکمه جوش به ورق فولادی وارد می‌کند که این نیرو در تقابل با نیروی الکتروود است. در شکل ۵، شماتیک مدل و نیروهای اعمالی به یکی از ورق‌ها دیده می‌شود. در این شکل  $F_X$  نیروی وارد شده از ورق پایینی و  $X$  فاصله بین نیروی ورق پایینی و نیروی الکتروود و  $h$  فاصله بین نیروی الکتروود و مجموع نیروی ناگت است و به‌نوعی با میزان هم‌ترازی دو الکتروود مسی متناسب است. شعاع دکمه جوش است. طبق این مدل، پاشش مذاب زمانی رخ می‌دهد که نیروی ناشی از دکمه جوش ( $F_N$ ) برابر یا بیشتر از نیروی موثر الکتروود ( $F_E$ ) باشد که لازمه این شرط صفرشدن نیروی  $F_X$  است. نیروی موثر الکتروود نیرویی است که با نیروی ناشی از دکمه جوش مقابله می‌کند. بنابراین زمانی که  $F_X$  برابر صفر باشد،  $X=r-h$  خواهد بود که با گشتاورگیری حول نقطه  $O$ ، مقدار نیروی موثر الکتروود از رابطه ۸ به دست می‌آید [3]:

$$F_E = \frac{r-h}{r} F_{E,applied} \quad (8)$$

بنابراین با محاسبه نیروی موثر الکتروود و نیروی ناشی از دکمه جوش می‌توان پاشش را پیش‌بینی کرد. فشار دکمه جوش موجب اعمال نیروی‌هایی در راستای افقی و عمودی به دیواره حوضچه جوش می‌شود. از آنجایی که در این مدل برآیند، نیروها در راستای Z مورد بررسی قرار گرفته، بنابراین نیروی عمودی ناشی از فشار دکمه جوش ( $P$ ) مد نظر بوده که با توجه به شکل ۶ این نیرو قابل محاسبه است.

در این شکل، S فصل مشترک بین جامد و مذاب است و  $ds$  المانی از این فصل مشترک خواهد بود که تصویر این المان در صفحه XY نشان داده شده است. با توجه به زاویه  $\gamma$  مقدار نیروی ناشی از دکمه جوش در جهت Z از رابطه ۹ به دست می‌آید.

$$dF_Z = P ds \cos \gamma = P ds_{XY} \quad (9)$$

در این رابطه با انتگرال‌گیری از  $dF_Z$  مقدار نیروی ناشی از دکمه جوش با رابطه ۱۰ به دست می‌آید که انتگرال  $ds_{XY}$  همان مجموع مساحت تصویر المان  $ds$  خواهد بود که برابر  $S_{XY}$  است با:

الکتریکی و با توجه به مقاومت الکتریکی موجود در مسیر عبور جریان، دو ورق در حال تماس، به دمای ذوب می‌رسد و مذاب شکل می‌گیرد. این حجم مذاب ( $V$ ) در اثر استحاله از حالت جامد به مذاب خواهان افزایش حجم است، اما نیروی الکتروود مانع از این افزایش حجم خواهد بود که در رابطه ۱ تغییرات حجم با فشار در یک دمای ثابت با توجه به ضریب تراکم پذیری ( $\kappa$ ) نشان داده شده است [12].

$$\kappa = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (1)$$

فلز مذاب در اثر فشار ناشی از نیروی الکتروود، اجازه انقباض را ندارد، پس فشار آن افزایش می‌یابد که این فشار در واقع با فشار ناشی از تغییر حجم فلز از  $V_L$  به  $V_S$  برابر بوده که مقدار این فشار در رابطه ۲ به دست آمده است.  $V_L$  و  $V_S$  به ترتیب حجم مولی مذاب و جامد هستند.

$$\int_0^P dP = - \int_{V_L}^{V_S} \frac{1}{\kappa V} dV \quad (2)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه ۲، فشار کلی ناشی از این تغییر حجم در دمای ثابت ذوب به دست می‌آید. این فشار به‌عنوان فشار ناشی از ذوب یا تبدیل جامد به مذاب در رابطه ۳ به دست آمده است:

$$P_{\text{ذوب}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{V_L}{V_S} \quad (3)$$

علاوه بر فشار ناشی از ذوب، فشار دکمه جوش در اثر افزایش دمای مذاب نیز بالا می‌رود. در مناطق مرکزی دکمه جوش، دما به بیش از دمای ذوب خواهد رسید. این دمای بالا موجب افزایش حجم مذاب خواهد شد که افزایش فشار دکمه جوش را سبب می‌شود. تغییرات حجم مذاب با دما در یک فشار ثابت از رابطه ۴ به دست می‌آید [11]:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (4)$$

در این رابطه  $\alpha$  ضریب انبساط حجمی در دمای ذوب است. با توجه به رابطه بین  $\alpha$  و  $\kappa$  فشار ناشی از تغییرات دما از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$dp = \frac{\alpha}{\kappa} dT \quad (5)$$

بنابراین با انتگرال‌گیری از رابطه ۵، فشار ناشی از افزایش دمای مذاب را می‌توان به دست آورد که این فشار به فشار ناشی از انقباض مذاب موسوم است.

$$P_{\text{انقباض}} = \frac{\alpha}{\kappa} (T_{\text{melt}} - T_{\text{ave}}) \quad (6)$$

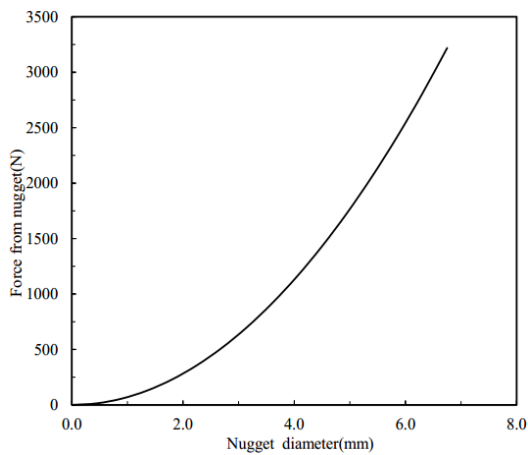
با توجه به محاسبات بالا، فشار کلی دکمه جوش برآیند دو فشار ناشی از ذوب فلز پایه و انقباض مذاب خواهد بود که در رابطه ۷ نشان داده شده است [3]:

$$P_{\text{دکمه جوش}} = \frac{\alpha}{\kappa} (T_{\text{melt}} - T_{\text{ave}}) + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{V_L}{V_S} \quad (7)$$

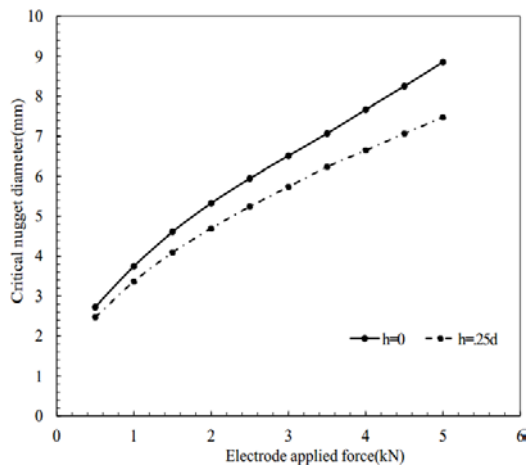
$T_{\text{melt}}$  و  $T_{\text{ave}}$  به ترتیب دمای میانگین و دمای ذوب هستند.  $V_L$  حجم مذاب و  $V_S$  حجم جامد است. مقادیر مربوط به این پارامترها برای فولاد در جدول ۴ آورده شده است. در شکل ۴، حجم مذاب تشکیل‌شده در بین دو الکتروود و فشار وارد شده از این مذاب به دیواره ورق‌ها به خوبی دیده می‌شود.

۳-۴- بررسی تأثیر جریان و نیروی جوشکاری بر پاشش با استفاده از مدل اصلاح شده

با استفاده از رابطه ۱۰ نیروی ناشی از دکمه جوش محاسبه شد و نمودار تغییرات این نیرو با قطر دکمه جوش در نمودار ۴ آورده شده است. همان گونه که در این نمودار دیده می‌شود با افزایش قطر دکمه نیروی ناشی از دکمه بیشتر می‌شود. در واقع با افزایش قطر دکمه، مساحت تحت تأثیر فشار ناشی از دکمه جوش، افزایش و به دنبال آن نیروی ناشی از دکمه جوش نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، مقادیر دمای میانگین، ضریب تراکم‌پذیری و انبساط حجمی در طول فرآیند جوشکاری تغییرات چندانی نمی‌کنند و روی میزان فشار ناشی از دکمه جوش اثرگذار نخواهد بود و همچنین این مقادیر برای هر دو ورق گالوانیزه و غیرگالوانیزه یکسان است. با مقایسه مقادیر نیروی دکمه جوش با نیروی مؤثر الکتروود، قطر دکمه بحرانی که پاشش رخ می‌دهد به دست آمد و نمودار تغییرات قطر دکمه بحرانی با نیروی اعمالی الکتروود در نمودار ۵ رسم شد.



نمودار (۴) تأثیر قطر دکمه بر میزان نیروی دکمه جوش

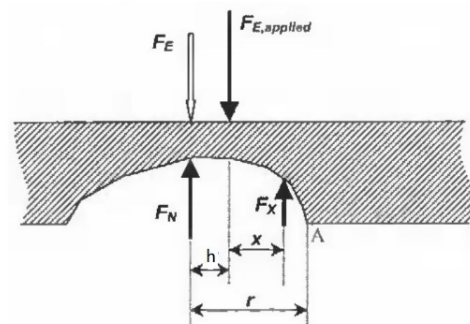


نمودار (۵) قطر بحرانی پاشش مذاب در فشار الکتروودهای مختلف و اثر عدم انطباق ورق‌ها بر میزان این قطر

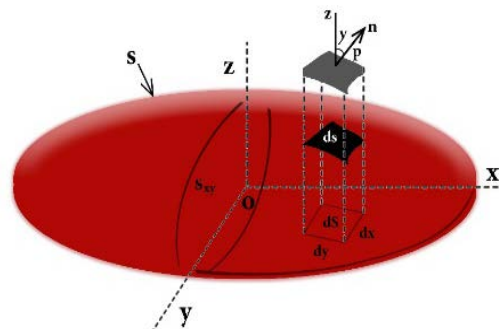
همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود، افزایش نیروی الکتروود موجب می‌شود تا پاشش در قطر دکمه بحرانی بالاتری رخ بدهد. چرا که نیروی الکتروود با نیروی ناشی از دکمه مقابله می‌کند. البته در این نمودار برای مقادیر مختلف  $h$  قطر بحرانی مختلفی به دست می‌آید که افزایش  $h$  موجب افزایش مقدار قطر بحرانی می‌شود. از

$$F_Z = \int_S dF_Z = P \int_S ds_{XY} = PS_{XY} \quad (10)$$

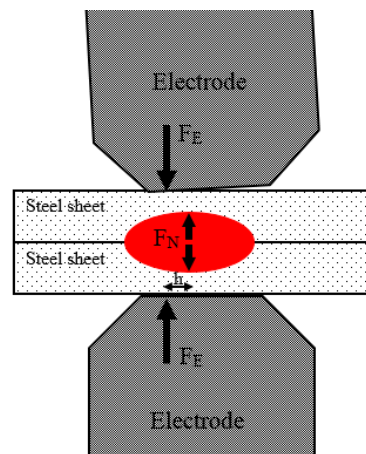
حال با محاسبه نیروی ناشی از دکمه جوش با کمک رابطه ۱۰ می‌توان با مقایسه این مقدار نیرو با نیروی مؤثر الکتروود پاشش را پیش‌بینی کرد. نیروی مؤثر الکتروود تابعی از قطر دکمه جوش و میزان عدم انطباق ورق‌های فولادی و الکتروودهای جوشکاری است که این عامل تحت عنوان پارامتر  $h$  در رابطه ۸ دیده می‌شود. نحوه اثرگذاری این پارامتر در شکل ۷ دیده می‌شود. علاوه بر نیروهای اعمال شده به ورق که در شکل ۵ دیده می‌شود، نیروی لورنتز که ناشی از جریان الکتریکی عبوری از الکتروودها و میدان مغناطیسی ناشی از این جریان است، نیز اعمال می‌شود. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، این نیرو با ایجاد جریان گردابی در درون حوضچه جوش فقط موجب بزرگ‌تر شدن حجم دکمه می‌شود و بر شدت پاشش مؤثر نیست [12, 13].



شکل (۵) شماتیک ساده‌شده نیروهای اعمالی و موقعیت آنها [3]

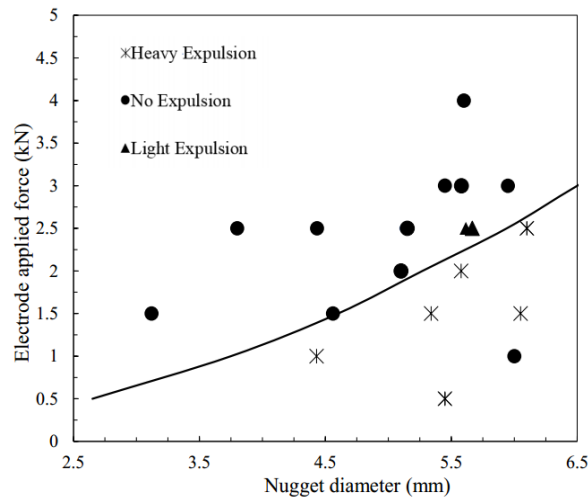


شکل (۶) شماتیک فشار هیدرواستاتیک دکمه جوش

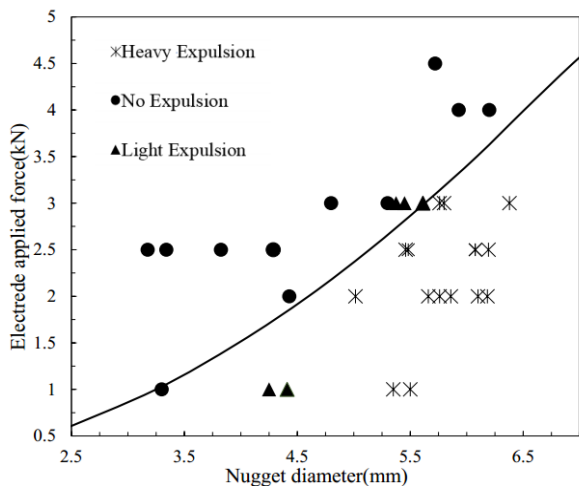


شکل (۷) قطر بحرانی پاشش مذاب در فشار الکتروودهای مختلف و اثر عدم انطباق ورق‌ها بر میزان این قطر

با داشتن مقاومت تماسی پایین، نقطه کانونی خوبی را برای ارسال جریان الکتریکی از محل اعمال نیروی الکتروود به ورق دیگر مهیا می‌کند و این باعث می‌شود که اختلاف مکان بین نیروی اعمالی الکتروود و نیروی ناشی از دکمه جوش کمتر باشد و نیروی موثر الکتروود بیشتر باشد و در نیروی‌های کمتر، الکتروود پاشش قطع شود. لازم به ذکر است که این مدل برای ورق‌های گالوانیزه و غیرگالوانیزه، پاشش مذاب را بدون در نظر گرفتن تغییر فرم نواحی اطراف دکمه جوش در اثر تنش‌های اعمالی از مذاب پیش‌بینی می‌کند و پیش‌بینی دقیق‌تر پاشش، هدف تحقیقات آینده خواهد بود.



نمودار ۶) تعیین مرز پاشش برای ورق گالوانیزه با  $h=0$  با استفاده از مدل عددی و نتایج تجربی تغییرات قطر دکمه با نیروی الکتروود



نمودار ۷) تعیین مرز پاشش برای ورق غیرگالوانیزه با  $h=0.25d$  با استفاده از مدل عددی و نتایج تجربی تغییرات قطر دکمه با نیروی الکتروود

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی اثر پارامترهای جریان و فشار الکتروود بر میزان پاشش مذاب و پیش‌بینی آن برای دو ورق فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- ورق‌های گالوانیزه در جریان جوشکاری بالاتر (قطر دکمه بالاتر) و ورق‌های غیرگالوانیزه در جریان پایین‌تر (قطر دکمه کوچک‌تر) دچار پاشش می‌شوند.
- ۲- مدل عددی اصلاح شده می‌تواند روند تأثیر متغیرهای جوشکاری

آنجایی که پارامترهای موجود در رابطه ۱۰ برای هر دو ورق فولادی یکسان است، بنابراین مقدار نیروی دکمه جوش برای هر دو فولاد یکسان خواهد بود، اما نیروی موثر الکتروود برای هر ورق متفاوت خواهد بود. ورق‌های گالوانیزه به دلیل داشتن پوشش فلز روی، در مجموع دارای مقاومت تماسی کمتری هستند [8, 14] و با در نظرگیری اثر نشت جریان این ورق‌ها در برخی جریان‌های جوشکاری، قطر دکمه بزرگ‌تری دارند (نمودار ۱). این در صورتی است که در جریان‌های بالای جوشکاری با بخار شدن فلز روی از سطح ورق گالوانیزه قطر دکمه برای هر دو ورق تقریباً یکسان است.

در نمودار ۲ با ایجاد قطر دکمه یکسان برای هر دو ورق، افزایش نیروی الکتروود مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که فشار الکتروود مانعی برای خروج مذاب بوده [3]، بنابراین کاهش میزان پاشش در فشارهای بالا قابل توجیه است. از طرفی با افزایش فشار، مجموعه مقاومت‌های الکتریکی بین دو ورق کاهش می‌یابد، چرا که مقاومت تماسی، وابسته به فشار است و افزایش فشار تماس بین دو سطح را بیشتر می‌کند و شرایط برای عبور جریان بهتر می‌شود. بنابراین قطر دکمه با افزایش حرارت تولیدی افزایش می‌یابد. با قطع شدن پاشش مذاب، قطر دکمه برای هر دو ورق کاهش یافته است که این به دمای بالای حوضچه جوش و تغییر شکل ورق در اثر نیروی بالای الکتروود مربوط می‌شود. در واقع با قطع پاشش دمای حوضچه جوش (خروج مذاب از درون حوضچه، قطعاً دمای حوضچه و تغییر شکل آن را کم می‌کند)، به دلیل وجود حجم بالایی از مذاب بسیار مستعد به تغییر شکل است و طبق رابطه، افزایش بیش از حد فشار موجب فشرده شدن ورق‌ها و کاهش  $(L)$  یا به عبارتی ضخامت اتصال در محل تماس الکتروودها و کاهش مقاومت الکتریکی هر دو ورق طبق رابطه  $(R = \rho \frac{L}{A})$  می‌شود [15]. پس حرارت ورودی به دکمه کمتر شده و قطر دکمه کم می‌شود [2]. ورق گالوانیزه چون در جریان بالاتری قرار دارد و از طرفی افزایش نیرو به دلیل وجود فلز روی عبور جریان به درون آن را راحت‌تر می‌کند، بنابراین تغییر شکل و در نتیجه کاهش قطر دکمه آن بیشتر خواهد بود. علت اتفاق افتادن پاشش مذاب برای ورق گالوانیزه در جریان بالاتر که به عبارتی قطر دکمه بالاتر محسوب می‌شود، با اصلاح مدل عددی معرفی شده قابل توجیه است. با افزایش قطر دکمه (ناشی از افزایش جریان)، میزان نیروی هیدرواستاتیک ناشی از حوضچه مذاب که به دیواره ورق وارد می‌شود افزایش می‌یابد و با فشار الکتروود مقابله می‌کند و این موجب افزایش احتمال پاشش مذاب می‌شود که این موضوع با نتایج مدل مطابق است. اما در نمودارهای ۶ و ۷ در یک قطر ثابت، فشار لازم برای مقابله با پاشش برای ورق گالوانیزه کمتر از ورق غیرگالوانیزه است و پاشش برای ورق گالوانیزه دیرتر اتفاق می‌افتد که این با توجه به مدل عددی قابل توجیه بوده و با تغییر در پارامتر عدم انطباق ورق‌ها و در نظرگیری اثر فلز روی این امکان فراهم است.

با استفاده از مدل و تلاش برای توجیه و تطبیق آن برای هر دو فولاد، با تغییر مقادیر به منظور تعیین مرز منطقه پاشش و منطقه عدم پاشش مشخص شد که ورق گالوانیزه با مقدار  $h=0$  و ورق غیرگالوانیزه با مقدار  $h=0.25d$  قطر دکمه بوده، دارای مرز مشترک با منطقه پاشش و عدم پاشش است که نتایج آن در نمودارهای ۶ و ۷ دیده می‌شود. در این نمودارها منحنی رسم شده بر اساس نتایج به دست آمده از مدل است. ورق‌های گالوانیزه به دلیل داشتن پوشش فلز روی، دارای انطباق خوبی با یکدیگر هستند، چرا که فلز روی دارای ضریب اصطکاک کمتری نسبت به فولاد است و

- galvanize coated and uncoated TRIP steels. *Metals*. 2016;6(12):299.
- 2- Pouranvari M. Effect of welding parameters on the peak load and energy absorption of low-carbon steel resistance spot welds. *ISRN Mechanical Engineering*. 2011;2011:824149.
- 3- Senkara J, Zhang H, Hu SJ. Expulsion prediction in resistance spot welding. *Welding Journal*. 2004 Apr:123-S-132-S.
- 4- Mikno Z, Pilarczyk A, Korzeniowski M, Kustroń P, Ambroziak A. Analysis of resistance welding processes and expulsion of liquid metal from the weld nugget. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018;18(2):522-531.
- 5- Podrżaj P, Polajnar I, Diaci J, Kariž Z. Influence of welding current shape on expulsion and weld strength of resistance spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006;11(3):250-254.
- 6- Kimchi M. Spot weld properties when welding with expulsion - a comparative study. *Welding Research Supplement*. 1984 Feb:58-s-63-s.
- 7- Ma C, Bhole SD, Chen DL, Lee A, Biro E, Boudreau G. Expulsion monitoring in spot welded advanced high strength automotive steels. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006;11(4):480-487.
- 8- Hwang IS, Kang MJ, Kim DC. Expulsion reduction in resistance spot welding by controlling of welding current waveform. *Procedia Engineering*. 2011;10:2775-2781.
- 9- Chan KR. Weldability and degradation study of coated electrodes for resistance spot welding [Dissertation]. Waterloo: University of Waterloo; 2005.
- 10- Sheikhi M, Valaee Tale M, Useffar GR, Fattah Alhosseini A. Thermal modeling of resistance spot welding and prediction of weld microstructure. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017;48(11):5415-5423.
- 11- Rao SS, Chhibber R, Arora KS, Shome M. Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;246:252-261.
- 12- Prigogine I, Defay R, Everett DH. *Chemical thermodynamics*. London: Longmans; 1954.
- 13- Kou S. *Welding metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2003. pp. 431-446.
- 14- Lin HC, Hsu CA, Lee CS, Kuo TY, Jeng SL. Effects of zinc layer thickness on resistance spot welding of galvanized mild steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;251:205-213.
- 15- Gould JE. An examination of nugget development during spot welding, using both experimental and analytical techniques. *Welding Research Supplement*. 1987 Jan:1-s-11-s.

بر پاشش را به درستی پیش‌بینی کند، ولی در پیش‌بینی رخداد پاشش با واقعیت اختلاف دارد که می‌تواند ناشی از صرف نظر کردن از تأثیر تغییر فرم پلاستیک فلز پایه باشد. با این وجود، این مدل با تغییر در مقدار پارامتر عدم انطباق یا حتی تغییر در سایر پارامترها، قابلیت پیش‌بینی پاشش برای سایر فلزات با شرایط مختلف از جمله ورق‌های گالوانیزه را دارد.

۳- جریان جوشکاری با افزایش قطر دکمه موجب افزایش میزان پاشش مذاب برای هر دو ورق می‌شود. افزایش قطر دکمه جوش موجب افزایش نیروی ناشی از دکمه جوش می‌شود و این تسریع پاشش را ممکن می‌کند.

۴- فشار الکتروتود تا مرحله قبل از پاشش موجب افزایش قطر دکمه می‌شود و میزان پاشش را کم می‌کند، اما بعد از قطع شدن پاشش فشار الکتروتود، قطر دکمه را می‌کاهد. کاهش قطر دکمه ناشی از پاشش مذاب موجب کاهش استحکام جوش خواهد شد.

۵- ورق غیرگالوانیزه، نیروی بیشتری برای مقابله با پاشش نیاز دارد که این موضوع با انطباق خوب ورق‌های گالوانیزه در حین فرآیند جوشکاری قابل اثبات است. فلز روی موجب ایجاد انطباق خوب بین ورق‌ها خواهد شد.

۶- افزایش فشار الکتروتود باعث افزایش قطر دکمه بحرانی و کاهش میزان پاشش می‌شود که این با مقادیر تجربی و عددی مطابق است. افزایش بیش از حد فشار الکتروتود بعد از قطع شدن پاشش مذاب به دلیل بالاترفتن بیش از حد دمای مذاب و تغییر شکل حوضچه موجب کاهش قطر دکمه و حتی سوراخ شدن دکمه حاصل می‌شود.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از گروه خودروسازی سایپا که در انجام آزمایشات، همکاری لازم را داشته است، نهایت سپاس را داشته باشند.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**سهم نویسندگان:** مسلم ولایی طالع (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ یوسف مظاهری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ محسن شیخی (نویسنده سوم)، ۲ پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۲۰٪)؛ فرشید مالک‌قائینی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ غلامرضا یوسفی‌فر (نویسنده پنجم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

## منابع

- 1- Ertek Emre H, Kaçar R. Resistance spot weldability of