



## بررسی نحوه تأثیر خواص ورق بر شبیه‌سازی جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژ منیزیم

سهیل میرزااحمدی<sup>1</sup>، داود افشاری<sup>2\*</sup>، زوهیر بارسوم<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

3- دانشیار، مهندسی خودرو، دانشگاه صنعتی سلطنتی سوئد، استکهلم

\* زنجان، صندوق پستی 45371-38791، dafshari@znu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

هدف از این مطالعه بررسی نحوه تأثیر خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ منیزیم AZ61 بر روی نتایج حاصل از مدل المان محدود جوش نقطه‌ای مقاومتی می‌باشد. جوش نقطه‌ای مقاومتی فرآیندی پیچیده و شامل پدیده‌های مختلف از قبیل مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و متالورژیکی می‌باشد که شبیه‌سازی این فرایند را سخت و مشکل ساخته است. در مطالعات مختلف جهت افزایش دقت مدل المان محدود این فرایند توصیه به استفاده از خواص وابسته به دمای ورق شده است. اما دستیابی به این خواص همیشه امکان پذیر نبوده و تست‌های تجربی اندازه‌گیری آن بسیار پرهزینه و زمانبر می‌باشد. در این مطالعه خواص حرارتی-مکانیکی و پارامترهایی چون رسانایی تماسی الکتریکی و حرارتی ورق‌های جوش نقطه‌ای داده شده به صورت تجربی اندازه‌گیری شده و در مدل المان محدود کوپل الکتریکی-حرارتی-مکانیکی جهت پیش بینی توزیع تنش‌های پسماند و اندازه دکمه جوش مورد استفاده قرار گرفته است. خواص حرارتی-مکانیکی، رسانایی تماسی الکتریکی و حرارتی در سه سطح ثابت، خطی و وابسته به دما برای بررسی تأثیر آن‌ها بر روی دقت مدل المان محدود در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد تعریف کلیه خواص اتصال بصورت وابسته به دما در مدل المان محدود ضروری نبوده و تنها خواص: رسانایی حرارتی، مقاومت ویژه الکتریکی و رسانایی تماسی الکتریکی برای افزایش قابلیت اعتماد مدل باید وابسته به دما تعریف شوند. همچنین برای بهبود دقت مدل توصیه می‌شود خواص تنش تسلیم و مدول الاستیسیته بصورت خطی در نظر گرفته شده و سایر پارامترها را می‌توان بصورت ثابت در مدل المان محدود تعریف کرد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 16 شهریور 1397  
پذیرش: 20 آبان 1397  
ارائه در سایت: اسفند 1397

### کلیدواژه‌ها:

جوش مقاومتی نقطه‌ای  
آلیاژ منیزیم AZ61  
مدل المان محدود  
رسانایی تماسی الکتریکی  
رسانایی تماسی حرارتی

## Investigating the effect of material properties on simulation of Mg alloy resistance spot welding process

Soheil Mirzaahmadi<sup>1</sup>, Davood Afshari<sup>1\*</sup>, Zuheir Barsoum<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Department of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

\* P.O.B. 38791-45371 Zanjan, Iran, dafshari@znu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 07 September 2018  
Accepted 11 November 2018  
Available Online March 2019

### Keywords:

Resistance spot welding  
Finite element model  
AZ61 Mg alloy  
ECC  
TCC

### Abstract

The main purpose of this study is investigation the effects of mechanical and thermal properties on accuracy of finite element model in resistance spot welding of AZ61 Mg alloy. In this study temperature dependent thermo-mechanical properties of AZ61 Magnesium alloy sheets and also thermal and electrical contact conductance (TCC and ECC) have been experimentally determined to use in a coupled electrical-thermal-mechanical finite element (FE) model in order to predict distribution of residual stresses and nugget size in resistance spot welding (RSW) process. The thermo-mechanical properties, TCC and ECC have been employed in FE model as: constant, linear and temperature dependent to investigate the effects of these parameters on accuracy of the FE model. In addition, different welding parameters such as welding current, welding time and electrode force have been used in FE model to achieve different nugget size. The results showed that thermal conductivity, electrical resistivity and ECC have significant effect on nugget size and also yield stress and elastic modulus have important influence on distribution of residual stresses. Therefore, the thermal conductivity, electrical resistivity and ECC for prediction of nugget size and also the yield stress and young modulus for prediction of distribution of residual stresses should be assumed to be temperature dependent and linear, respectively. Moreover, remaining thermo-mechanical properties can be taken as constant.

### 1- مقدمه

ریخته‌گری و شکل پذیری خوب در دماهای بالا، مورد توجه تولیدکنندگان صنایع مختلف از قبیل هوافضا، هواپیما و خودرو سازی قرار گرفته است [1]. بطور معمول اتصال ورق‌های منیزیمی با استفاده از روش جوش مقاومتی نقطه‌ای صورت

در سال‌های اخیر، استفاده از آلیاژهای منیزیم به دلیل ویژگی‌هایی مانند: چگالی پایین، نسبت استحکام به وزن بالا، مدول الاستیسیته بالا، مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ای، قابلیت

### Please cite this article using:

S. Mirzaahmadi, D. Afshari, Z. Barsoum, Investigating the effect of material properties on simulation of Mg alloy resistance spot welding process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 53-60, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

یک مدل المان محدود الکتریکی-حرارتی-مکانیکی کوپل شده جهت بررسی تأثیر رسانایی تماسی حرارتی بر روی شبیه‌سازی جوش نقطه‌ای ورق‌های آلومینیومی و فولادی استفاده کردند. باتی و همکارانش [9] به بررسی تأثیر خواص حرارتی-مکانیکی بر روی توزیع تنش‌های پسماند و اعوجاجات جوش T شکل ورق‌های فولادی پرداختند.

بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر خواص مکانیکی و حرارتی بر روی دقت مدل المان محدود نشان می‌دهد که در زمینه جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم تحقیقات انجام شده بسیار محدود می‌باشد. هدف از این مطالعه نیز بررسی تأثیر این خواص بر دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژ منیزیم AZ61 به روش المان محدود می‌باشد. در این مطالعه خواص مکانیکی و حرارتی در سه سطح بصورت ثابت، خطی و وابسته به دما در مدل المان محدود تعریف شده و تأثیر آنها بر روی پیش بینی قطر دکمه جوش و بیشینه تنش‌های پسماند کششی ایجاد شده در منطقه جوش با نتایج تجربی مقایسه شده است.

## 2- مدل المان محدود

در این مطالعه، یک مدل المان محدود متقارن محوری کوپل شده بصورت الکتریکی-حرارتی-مکانیکی جهت پیش بینی تنش‌های پسماند و اندازه دکمه جوش ورق‌های جوش نقطه‌ای داده شده از جنس آلیاژ منیزیم AZ61 ایجاد شده است. از محیط طراحی به زبان پارامتریک نرم‌افزار انسیس<sup>1</sup> نسخه 12.1 جهت شبیه‌سازی بهره گرفته شده است. برای تحلیل جوش مقاومتی نقطه‌ای، الکترودها و ورق‌ها بصورت متقارن محوری بصورت نشان داده شده در شکل 1 مدل شده‌اند.

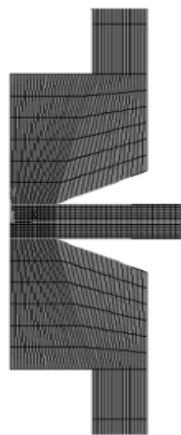


Fig. 1 Axisymmetric FE model used in the calculations

شکل 1 مدل المان محدود متقارن محوری استفاده شده در تحلیل عددی

می‌پذیرد که روشی با صرفه، سریع و دقیق می‌باشد. جوش مقاومتی نقطه‌ای فرایندی پیچیده بوده و شامل پدیده‌های مختلف مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و متالورژیکی می‌باشد؛ لذا شبیه‌سازی آن به روش المان محدود بسیار سخت و مشکل است.

مطالعات قبلی در زمینه شبیه‌سازی این فرایند جوش کاری نشانگر اهمیت نحوه تعریف خواص مکانیکی-حرارتی در مدل المان محدود بر روی نتایج بدست آمده می‌باشد. متأسفانه تعداد خواص اعمالی به مدل المان محدود زیاد بوده و دستیابی به این خواص همیشه امکان پذیر نیست. از طرفی تست‌های تجربی اندازه‌گیری آن نیز بسیار پر هزینه و زمانبر می‌باشد. لذا بررسی امکان تعریف این خواص بصورت ثابت می‌تواند منجر به صرفه جویی در هزینه و زمان پروژه‌های تحقیقاتی شود.

بابو و همکارانش [2] در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر مقاومت تماسی الکتریکی بر واحد سطح پرداخته‌اند. در این مطالعه یک مدل تجربی جهت توضیح روند تغییر مقاومت تماسی الکتریکی بر واحد سطح به عنوان تابعی از فشار در ناحیه تماس، دما و خواص مواد در سطوح تماس ورق-ورق و ورق-الکتروود پیشنهاد شده است. ژو و چاو [3] به بررسی تأثیر خواص حرارتی-مکانیکی بر روی تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌های جوش ورق‌های آلومینیومی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در شبیه‌سازی جوش مورد نظر تنها تنش تسلیم باید وابسته به دما در نظر گرفته شود. چاو و نا [4] به بررسی تأثیر شرایط جوش کاری مقاومتی نقطه‌ای مانند: مقاومت تماسی، شدت جریان الکتریکی، زمان جوش کاری، نیروی الکتروود و شیب کارسختی بر روی توزیع تنش‌های پسماند ورق‌های جوش داده شده از جنس فولاد ضد زنگ سری 304 پرداختند.

آرمنتانی و همکارانش [5] در مطالعه‌ای از مقادیر مختلف رسانایی حرارتی جهت پیش‌بینی توزیع تنش‌های پسماند در جوش ذوبی ورق‌های فولادی استفاده کرده است. باروسو و همکارانش [6] به بررسی عددی تأثیر ترکیب حالات مختلفی از خواص حرارتی-مکانیکی بر روی شبیه‌سازی جوش ذوبی ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم پرداخته و به این نتیجه رسیدند که جهت دستیابی به دقت قابل قبول از مدل المان محدود در تعیین خروجی‌های مورد نظر بایستی تمامی خواص مکانیکی ثابت در نظر گرفته شوند. آسرین و همکارانش [7] از روش آنالیز حساسیت در شبیه‌سازی جوش کاری جهت تعیین خواص با اهمیت و تأثیرگذار بر روی تنش‌های پسماند و اعوجاجات جوشی استفاده کردند. کریمی و همکارانش [8] از

<sup>1</sup> Ansys parametric design language

روز رسانی می‌شود؛ به این صورت که در هر گام زمانی توزیع دمایی مورد نظر به عنوان بارگذاری اولیه برای تحلیل حرارتی- مکانیکی آماده شده و سپس تحلیل حرارتی-مکانیکی، تغییر شکل‌های جدید و اندازه ناحیه تماسی جدید را به عنوان خروجی در اختیار گام زمانی بعدی تحلیل الکتریکی-حرارتی قرار می‌دهد و این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که زمان جوش کاری به پایان خود برسد.

در مرحله نگهداری، جریان از الکتروود بالا حذف شده و دکمه جوش در حضور فشار اعمالی، جریان خنک کننده موجود در داخل الکتروودها و هوا خنک شده و شروع به انقباض و تشکیل شدن می‌کند. جهت شبیه‌سازی مرحله نگهداری، در تحلیل الکتریکی-حرارتی بدین شکل عمل می‌شود که پس از حذف جریان الکتریکی، تماس حرارتی بین الکتروودها و ورق‌ها قطع نمی‌گردد و الکتروودها همراه آب موجود در کانال‌هایشان و هوا خنک می‌گردند. در مرحله بعد که به مرحله خاموشی معروف است، این تبادل حرارتی تماسی نیز حذف می‌گردد و ورق‌ها تنها به وسیله هوا در بازه زمانی تعیین شده 250 ثانیه‌ای خنک می‌گردند. در مرحله خنک کاری، با حذف الکتروودها به وسیله روش تولد و مرگ المان جوش مورد نظر در هوا با ضریب تعیین شده خنک می‌گردد. در انتهای انجام تحلیل حرارتی-مکانیکی می‌توان تنش‌های پسماند جوشی را مورد بررسی قرار داد.

### 3- تست‌های تجربی

در این مطالعه نمونه‌های آلیاژ منیزیمی AZ61 با ابعاد  $100 \times 25 \times 1/2$  میلی‌متری (مطابق استاندارد انجمن جوش کاری آمریکا<sup>4</sup>) با استفاده از دستگاه جوش نقطه‌ای ساخت شرکت نوین نوین سازان با توان اسمی 120 کیلوولت-آمپر نشان داده شده در شکل 2 جوش کاری شده‌اند. پارامترهای ورودی جوش کاری جهت به دست آمدن سه قطر مختلف دکمه جوش با اندازه قابل قبول طبق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا<sup>5</sup> در جدول 2 ارائه شده است. از هر دسته پارامتر جوش کاری سه نمونه تهیه شده و ابعاد دکمه جوش در تمامی نمونه‌ها پس از پولیش و اچ با استفاده از میکروسکوپ نوری لایتز متالوکس 3 اندازه‌گیری شده است.

در این مطالعه تمامی خواص مکانیکی و حرارتی مورد نیاز در مدل المان محدود بصورت تجربی و وابسته به دما اندازه‌گیری شده‌اند.

در مدل المان محدود از المان سازه‌ای دوبعدی<sup>1</sup> جهت تحلیل مکانیکی و از المان الکتریکی-حرارتی دوبعدی<sup>2</sup> جهت تحلیل الکتریکی-حرارتی استفاده شده است. از المان‌های تماسی سطح به سطح<sup>3</sup> بدلیل عدم وجود امکان مونتاژ در محیط نرم‌افزار، جهت نمایش سطوح تماسی بین ورق‌ها و ورق-الکتروود استفاده شده است. علاوه بر این، شرایط مرزی اعمال شده در جدول 1 نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی موجود، آنالیز الکتریکی-حرارتی از نوع میدان کوپل شده مستقیم و آنالیز مکانیکی از روش اعمال بار می‌باشد. ابتدا تحلیل مکانیکی برای سیکل فشرده شدن اولیه صورت می‌گیرد. نتایج این مرحله شامل تغییر فرم قطعات، فشار در سطح تماس، شکل و مساحت محل تماس می‌باشد. جواب‌های حاصله از مرحله مکانیکی به بلوک‌های کوپل شده موجود در مرحله جوش کاری منتقل می‌شوند. دو بلوک مورد نظر به ترتیب بلوک تحلیل الکتریکی-حرارتی و بلوک حرارتی-مکانیکی می‌باشد. این بلوک‌ها دارای شبکه بندی و تعداد گره‌های یکسان می‌باشند. بعد از اعمال شرایط اولیه به دست آمده از مرحله پیش فشار و به روز رسانی مدل المان محدود، تحلیل الکتریکی-حرارتی به صورت کوپل مستقیم انجام می‌گیرد، بدین معنا که معادلات الکتریکی و حرارتی در یک تحلیل مشترک و همزمان با تحلیل حرارتی-مکانیکی برای المان‌ها و گره‌ها حل می‌شوند. طی انجام این تحلیل‌ها که به صورت کوپل مستقیم صورت می‌گیرد و به مرحله جوش کاری معروف است، دمای ورق‌ها بالا می‌رود و ناحیه دکمه جوش دچار حالت خمیری می‌شود.

جدول 1 شرایط مرزی اعمال شده بر روی مدل المان محدود

Table 1 Imposed boundary conditions on FE model			
محل اعمال شرایط مرزی	مرحله الکتریکی	مرحله حرارتی	مرحله مکانیکی
محور تقارن	شدت جریان	تغییر دما در جهت	تغییر جابه‌جایی
مدل	برابر صفر	شعاعی صفر	جهت شعاعی صفر
الکتروود بالایی	اعمال	آب خنک کننده 25	اعمال
	جریان	درجه سانتی‌گرادی	نیروی الکتروود
الکتروود پایینی	اعمال	آب خنک کننده 25	تغییر جابه‌جایی
	ولتاژ صفر	درجه سانتی‌گرادی	جهت محور صفر
نواحی غیر تماسی	اعمال	خنک شدن در	تنش اعمالی
از الکتروود و ورق	جریان صفر	معرض هوا	برابر با صفر

نتایج حاصل از تحلیل الکتریکی-حرارتی که توزیع دمایی در هر گره مورد نظر می‌باشد، با توجه به گام زمانی تعیین شده به

<sup>4</sup> American welding society

<sup>5</sup> American society of mechanical engineers

<sup>1</sup> Plane182

<sup>2</sup> Plane67

<sup>3</sup> Conta171 & Targe169

است. نتایج بدست آمده در جدول 3 ارائه شده است. شکل 6 نتایج تست‌های تجربی اندازه‌گیری خواص مکانیکی و حرارتی وابسته به دما ارائه می‌نماید.

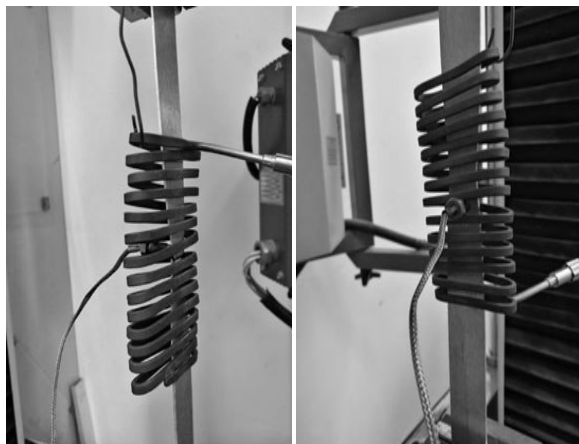


Fig. 3 The temperature dependent tensile test

شکل 3 نحوه انجام تست کشش وابسته به دما

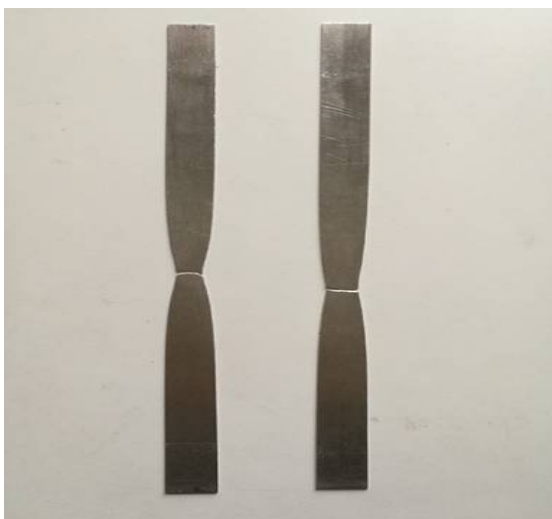


Fig. 4 The failed samples after the tensile tests

شکل 4 نمونه‌های شکسته شده پس از انجام تست کشش



Fig. 5 Experimentally determined Surface roughness of AZ61 sheets with Ra value of 1.2  $\mu\text{m}$

شکل 5 دستگاه زبری سنج ساخت کارخانه میتسو توپو ژاپن

جدول 2 پارامترهای جوش کاری مورد استفاده جهت جوش کاری نمونه‌ها  
Table 2 Different samples with different welding input parameters

شماره نمونه	شدت جریان الکتریکی (کیلو آمپر)	زمان جوش کاری (سیکل)	نیروی الکتروود (نیوتن)
1	16	10	848
2	16	16	990
3	14	16	990



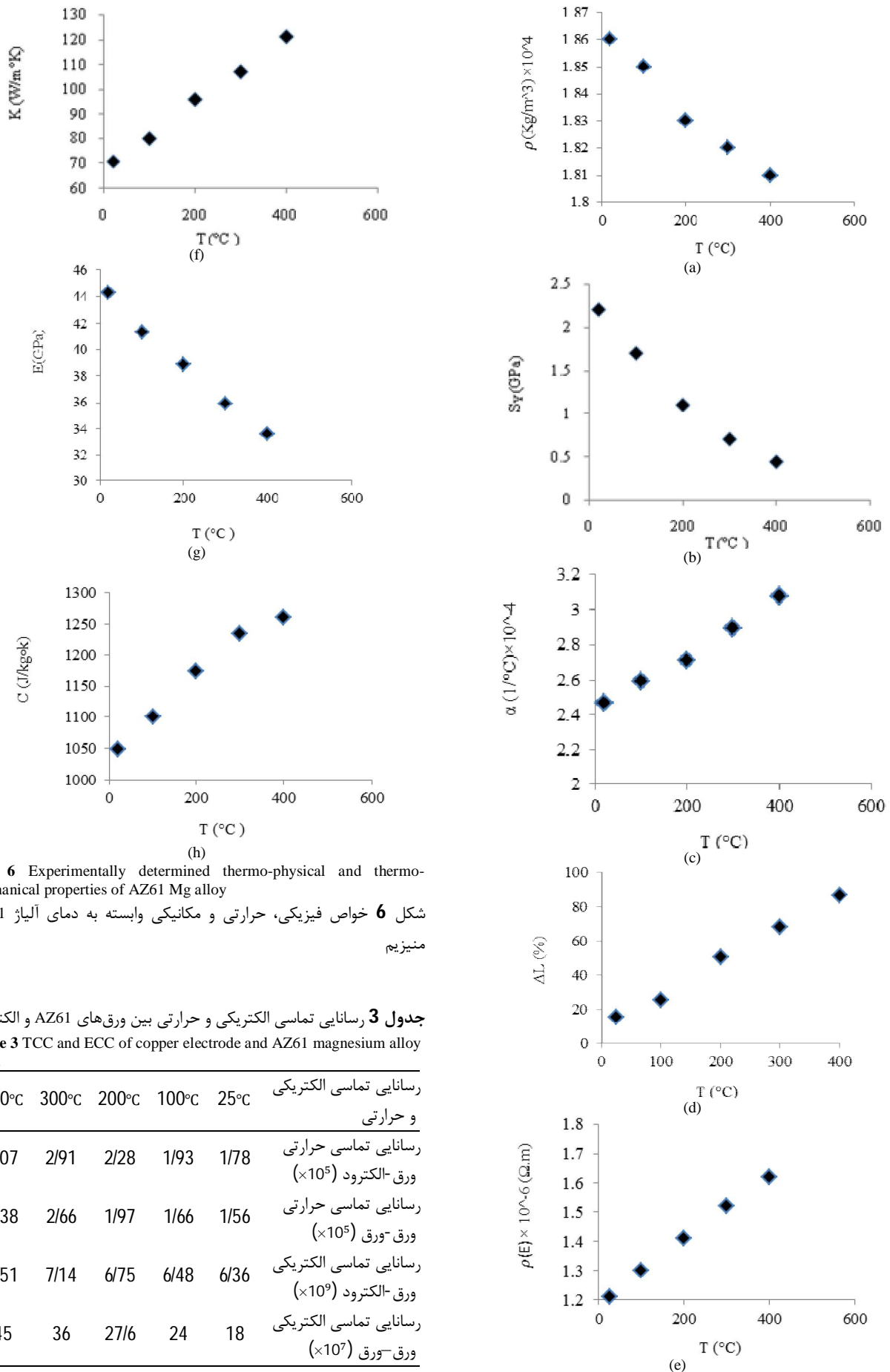
Fig. 2 Novin Sazan spot welding machine

شکل 2 ماشین جوش نقطه‌ای ساخت شرکت نوین سازان ایران

تست کشش وابسته به دما جهت اندازه‌گیری خواص مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش ساخت شرکت سنتم انجام شده است. همچنین از یک المنت سرامیکی به دلیل عدم استفاده از کوره جهت افزایش دمای نمونه‌ها تا  $500^{\circ}\text{C}$ ، از یک ترموستات ساخت شرکت شیراز جهت نمایش دمای المنت سرامیکی، از ترموکوپل نوع K و پیرومتر جهت چک کردن دمای نمونه‌ها استفاده شده است. نحوه انجام تست کشش وابسته به دما و تجهیزات استفاده شده در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری رسانایی تماسی الکتریکی و حرارتی از ترکیب تست‌های تجربی، مدل المان محدود و روابط تحلیلی بدست آمده از مطالعات پیشین استفاده شده است [8]. بدین منظور ابتدا با استفاده از دستگاه زبری سنج ساخت شرکت میتسو توپو ژاپن (شکل 5) متغیرهایی مانند: صافی سطح و شیب آن اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از تحلیل مکانیکی مدل المان محدود جهت اندازه‌گیری فشار تماسی موجود مابین ورق-ورق و ورق-الکتروود استفاده شده است.

در پایان از خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما که بصورت تجربی اندازه‌گیری شده برای بدست آوردن رسانایی حرارتی معادل، مدول الاستیسیته معادل استفاده شده و با استفاده از روابط تحلیلی رسانایی تماسی حرارتی محاسبه شده



**Fig. 6** Experimentally determined thermo-physical and thermo-mechanical properties of AZ61 Mg alloy

شکل 6 خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی وابسته به دمای آلایژ AZ61 منیزیم

**جدول 3** رسانایی تماسی الکتریکی و حرارتی بین ورق‌های AZ61 و الکترود

**Table 3** TCC and ECC of copper electrode and AZ61 magnesium alloy sheet

400°C	300°C	200°C	100°C	25°C	رسانایی تماسی الکتریکی و حرارتی
4/07	2/91	2/28	1/93	1/78	رسانایی تماسی حرارتی ورق-الکترود ( $\times 10^5$ )
6/38	2/66	1/97	1/66	1/56	رسانایی تماسی حرارتی ورق-ورق ( $\times 10^5$ )
9/51	7/14	6/75	6/48	6/36	رسانایی تماسی الکتریکی ورق-الکترود ( $\times 10^9$ )
45	36	27/6	24	18	رسانایی تماسی الکتریکی ورق-ورق ( $\times 10^7$ )

## 4- نتایج و بحث

دکمه جوش، تمام حالت‌های به دست آمده از مدل المان محدود با نتایج حاصله از تست‌های تجربی نشان داده شده در جدول 5 مقایسه شده است. ولی برای بررسی تأثیر خواص حرارتی و مکانیکی بر روی تنش‌های پسماند؛ بدلیل عدم انجام تستهای تجربی، حالت وابسته به دمای خواص حرارتی-مکانیکی به عنوان معیاری جهت ارزیابی در نظر گرفته شده است.

نتایج ارائه شده در جدول 4 نشان می‌دهد که با ثابت و خطی نگه داشتن رسانایی حرارتی، مقدار حرارت کمتری در دماهای بالا به نواحی اطراف جوش انتقال پیدا کرده و حرارت بیشتری در موضع اتصال باقی مانده است. در نتیجه باعث افزایش قطر دکمه جوش شده است.

مقاومت ویژه هر ماده با مقاومت الکتریکی ماده در یک دمای مشخص رابطه مستقیم دارد. با در نظر گرفتن حالت ثابت و خطی مقاومت ویژه، مقاومت الکتریکی ماده کاهش می‌یابد. در نتیجه مقدار حرارت کمتری در منطقه اتصال تولید شده که خود دلیلی بر کاهش اندازه دکمه جوش بوده است.

در این مطالعه خواص حرارتی-مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ61 در سه سطح ثابت، خطی و وابسته به دما در در مدل المان محدود در نظر گرفته شده است. منظور از ثابت نگه داشتن خاصیتی از ماده، استفاده از مقدار کمی آن خاصیت در دمای محیط و ثابت نگه داشتن آن در کل تحلیل المان محدود می‌باشد. همچنین برای بررسی نوع خطی خواص حرارتی-مکانیکی، از دو مقدار خاصیت مورد نظر به ترتیب در دماهای محیط و 400°C استفاده شده است. در تمام 17 حالت نشان شده در جدول 4 برای هر سه نمونه مورد نظر، مقادیر ضریب پواسن و چگالی به دلیل عدم تغییر قابل توجهشان نسبت به دما، ثابت و برابر با مقدارشان در دمای محیط به ترتیب 0/35 و 1860 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده‌اند. هر کدام از ردیف‌ها در جدول به دست آمده از مدل المان محدود گویای حالت ثابت، خطی و یا وابسته به دما بودن پارامتر مورد نظر بوده و این در حالی است که سایر خواص حرارتی-مکانیکی، وابسته به دما در مدل اعمال شده است.

در بررسی تأثیر خواص حرارتی و مکانیکی بر روی اندازه

جدول 4 نتایج به دست آمده با استفاده از مدل المان محدود در حالت‌های مختلف تعریف خواص ماده

Table 4 The results obtained from FE model for different kind of material properties

حالات مختلف	شرایط خاصیت ماده	نمونه 1		نمونه 2		نمونه 3	
		قطر دکمه (میلی‌متر)	ماکزیمم تنش (مگا پاسکال)	قطر دکمه (میلی‌متر)	ماکزیمم تنش (مگا پاسکال)	قطر دکمه (میلی‌متر)	ماکزیمم تنش (مگا پاسکال)
1	خواص وابسته به دما	6/1	219	6/63	241	5	214
2	رسانایی تماسی الکتریکی ثابت	پاشش	...	پاشش	...	پاشش	...
3	رسانایی تماسی الکتریکی خطی	پاشش	...	پاشش	...	پاشش	...
4	رسانایی تماسی حرارتی ثابت	6/18	220	6/63	243	5/1	218
5	رسانایی تماسی حرارتی خطی	6/1	219	6/6	241	5	214
6	تنش تسلیم ثابت	6/1	74/9	6/59	74/9	5	55/8
7	تنش تسلیم خطی	6/1	225	6/55	238	4/95	219
8	مدول یانگ ثابت	6/13	163	6/48	125	5	180
9	مدول یانگ خطی	6/13	228	6/59	240	5	228
10	رسانایی حرارتی ثابت	6/71	218	7/23	228	5/67	216
11	رسانایی حرارتی خطی	6/26	219	6/78	237	5/21	217
12	ضریب انبساط حرارتی ثابت	5/67	216	6/63	235	5	227
13	ضریب انبساط حرارتی خطی	6/1	217	6/63	240	5	217
14	گرمای ویژه ثابت	6/18	220	6/63	244	5	213
15	گرمای ویژه خطی	6/16	219	6/63	242	5	214
16	مقاومت ویژه الکتریکی ثابت	4/62	221	5/1	220	3/92	236
17	مقاومت ویژه الکتریکی خطی	5/5	218	5/9	234	4/62	219

است. لذا جهت افزایش دقت مدل المان محدود این سه خاصیت باید وابسته به دما در نظر گرفته شوند. عدم وابسته به دما در نظر گرفتن خواص نام برده شده، مدل المان محدود را در پیش بینی و ارزیابی نتایج به دست آمده با خطاهای قابل توجهی روبه رو می‌کند. همچنین برای بهبود دقت مدل المان محدود جهت شبیه‌سازی فرایند جوش‌کاری، پیش بینی قطر دکمه جوش، توزیع تنش‌های پسماند و برای جلوگیری از خطاهای احتمالی توصیه می‌شود خواص مکانیکی مانند: تنش تسلیم و مدول یانگ بصورت خطی تعریف شوند. با توجه به نتایج بدست آمده سایر خواص ورق را می‌توان بصورت ثابت در مدل المان محدود در نظر گرفته و از صرف هزینه و زمان جهت دستیابی به مقادیر وابسته به دمای آنها اجتناب کرد.

### 5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ61 بصورت تجربی و وابسته به دما اندازه‌گیری شده است. این خواص در سه سطح ثابت، خطی و وابسته به دما در مدل المان محدود شبیه‌سازی جوش نقطه‌ای تعریف شده‌اند. مدل المان محدود مورد استفاده در این مطالعه بصورت الکتریکی-حرارتی-مکانیکی کوپل شده و برای پیش‌بینی قطر دکمه جوش و توزیع تنش‌های پسماند استفاده شده است.

همچنین با استفاده از اندازه‌گیری قطر دکمه جوش بدست آمده از نمونه‌های جوش‌کاری شده، به اعتبار سنجی مدل المان محدود پرداخته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که: رسانایی حرارتی، مقاومت ویژه الکتریکی و رسانایی تماسی الکتریکی بیشترین تأثیر را بر روی دقت مدل المان محدود داشته است. لذا جهت افزایش دقت مدل المان محدود و جلوگیری از خطاهای قابل توجه اعمالی در پیش بینی قطر دکمه جوش و توزیع تنش‌های پسماند، خواص حرارتی ذکر شده بایستی وابسته به دما در نظر گرفته شوند.

همچنین مدول الاستیسیته و تنش تسلیم به عنوان خواص مکانیکی جهت بهبود دقت مدل المان محدود و جلوگیری از خطاهای احتمالی در پیش‌بینی نتایج حاصل از مدل المان محدود بهتر است بصورت خطی در نظر گرفته شوند. با توجه به نتایج بدست آمده سایر خواص ورق را می‌توان بصورت ثابت در مدل المان محدود در نظر گرفته و از صرف هزینه و زمان جهت دستیابی به مقادیر وابسته به دمای آنها اجتناب کرد.

### 6- فهرست علائم

$$C \text{ گرمای ویژه (J/kg}^\circ\text{k)}$$

جدول 5 قطر دکمه جوش‌های به دست آمده از تست تجربی

Table 5 Experimentally determined nugget size of AZ61 Mg alloy

نمونه‌ها	قطر دکمه جوش (میلی‌متر)
نمونه 1	5/96
نمونه 2	6/33
نمونه 3	4/85

از طرف دیگر با ثابت و خطی نگه داشتن رسانایی تماسی یا به عبارت دیگر با تمرکز بیش از اندازه حرارت در سطوح تماسی، پدیده پاشش در موضع اتصال رخ داده است. نتایج بدست آمده از بررسی ضریب انبساط حرارتی نشان می‌دهد که با ثابت و خطی نگه داشتن این خاصیت، انبساط ناحیه ذوب شده به مقدار کمتری بوده و نواحی اطراف راحت‌تر می‌توانند انبساط ناحیه ذوب شده را محدود کنند. در نتیجه در مدل المان محدود قطر دکمه جوش کوچکتری نسبت به نتایج تجربی بدست آمده است. گرمای ویژه به مقدار گرمای مورد نیاز جهت افزایش دمای ماده مورد نظر به اندازه 1 درجه سانتی‌گراد اطلاق می‌گردد. با ثابت و خطی نگه داشتن گرمای ویژه یا به عبارت دیگر با مقدار حرارت تولید شده یکسان در دماهای بالا به ازای مقادیر پایینی از گرمای ویژه نسبت به حالت وابسته به دما، قطر دکمه جوش بزرگتری بدست آمده است. با توجه به جدول بدست آمده از مدل المان محدود، ورق‌های منیزیمی بر خلاف آلومینیوم [8] تمایل زیادی به ذخیره حرارت در ناحیه جوش‌کاری داشته و حرارت کمتری را به نواحی اطراف دکمه جوش انتقال می‌دهند. در نتیجه رسانایی تماسی حرارتی تأثیر کمتری بر روی اندازه دکمه جوش و مقادیر تنش‌های پسماند داشته است.

با در نظر گرفتن حالت ثابت و خطی تنش تسلیم، نواحی اطراف دکمه جوش مقاومت بیشتری در برابر انبساط دکمه جوش و کرنش‌های حاصل از آن نشان می‌دهند. در نتیجه مقادیر تنش‌های پسماند کششی کمتری در انتهای سیکل خنک کاری به دست آمده است. با انتخاب حالت ثابت و خطی مدول یانگ یا حالتی که ماده در دماهای بالا دارای مدول یانگ بالا و تنش تسلیم پایین باشد، مقادیر کرنش‌های حرارتی بواسطه انبساط ناحیه خمیری شکل پایین بوده است. در نتیجه در انتهای سیکل خنک‌کاری، به دلیل حضور تنش‌های پسماند فشاری بالا در انتهای سیکل جوش‌کاری، از مقادیر تنش‌های پسماند کششی کاسته شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که رسانایی حرارتی، مقاومت ویژه الکتریکی و رسانایی تماسی الکتریکی به عنوان خواص حرارتی بیشترین تأثیر را بر روی دقت مدل المان محدود داشته

between welding conditions and residual stress of resistance spot welded 304-type stainless steels, *Journal of manufacturing systems*, Vol. 22, pp. 181-189, 2003.

- [5] E. Armentani, R. Esposito, R. Sepe, The effect of thermal properties and weld efficiency on residual stresses in welding, *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, Vol. 20, pp. 319-322, 2007.
- [6] A. Barroso, J. Canas, R. Picon, F. Paris, C. Mendez, I. Unanue, Prediction of welding residual stresses and displacements by simplified models. experimental validation, *Materials and design*, Vol. 31, pp. 1338-1349, 2010.
- [7] O. Asserin, A. Loreda, M. Petelet, B. Looss, Global sensitivity analysis in welding simulations—what are the material data you really need?, *Finite elements in analysis and design*, Vol. 47, pp. 1004-1016, 2011.
- [8] M. R. Karimi, M. Sedighi, D. Afshari, Thermal contact conductance effect in modeling of resistance spot welding process of aluminum alloy 6061-T6, *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 77, pp. 885-895, 2015.
- [9] A. A. Bhatti, Z. Barsoum, H. Murakawa, I. Barsoum, Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion, *Materials and design*, Vol. 65, pp. 878-889, 2015.

$E$  مدول یانگ (GPa)

$K$  رسانایی حرارتی ( $W/m^{\circ}k$ )

$S_Y$  استحکام تسلیم (GPa)

$T$  دما

علایم یونانی

$\rho(E)$  مقاومت ویژه الکتریکی ( $\Omega.m$ )

$\rho$  چگالی ( $kgm^{-3}$ )

$\alpha$  ضریب انبساط حرارتی ( $1/^{\circ}C$ )

$\Delta L$  درصد تغییر طول (%)

## 7- مراجع

- [1] P. Kramar, P. Vondrous, M. Kolarikova, K. Kovanda, L. Kolarik, M. Ondruska, Resistance spot welding of magnesium alloy AZ61, *Modern machinery science journal*, pp. 596-599, 2015.
- [2] S. S. Babu, M. L. Santella, Z. Feng, B. W. Riemer, J. W. Cohron, Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals, *Science and technology of welding and joining*, Vol. 6, pp. 126-132, 2001.
- [3] X. K. Zhu, Y. J. Chao, Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation, *Computers and structures*, Vol. 80, pp. 967-976, 2002.
- [4] B. W. Cha, S. J. Na, A study on the relationship