



## بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای برای دستیابی به بیش‌ترین نیروی شکست

امیرحسین سخایی<sup>1</sup>، محمد کاظمی نصرآبادی<sup>2\*</sup>، عبدالحسین جلالی آقچای<sup>3</sup>، ابوذر بریمانی ورنندی<sup>4</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر، تهران

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1381963813، kazemi@ssau.ac.ir

### چکیده

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زیر مجموعه‌ای از جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی خطی است که برای ایجاد اتصال نقطه‌ای در ورق‌های نازک با جنس‌های مختلف بدون ذوب فلز پایه مورد استفاده قرار گرفته است. طرح باکس-بنکن بر اساس روش روبه پاسخ، به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترها در فرایندهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر جنس صفحه پشتیبان و بکارگیری طرح باکس-بنکن به منظور بررسی اتصالات ایجاد شده با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در ورق‌های آلایژ آلومینیوم 7075-T6 جهت دستیابی به بیش‌ترین نیروی شکست و مطالعه حالت شکست در اتصالات است. بدین منظور سه پارامتر پیوسته (سرعت دورانی، عمق نفوذ و سرعت پیشروی عمودی ابزار) در سه سطح و یک پارامتر گسسته (جنس صفحه پشتیبان) در دو سطح تعریف شده‌اند. به منظور بررسی تأثیر جنس صفحه پشتیبان از آلایژ آلومینیوم 7178 و آلایژ تیتانیوم Ti6Al4V استفاده شد. محدوده پارامترهای پیوسته با استفاده از آزمایش‌های تجربی و نتایج تحقیقات سایر محققان تعیین شد. نتیجه آزمایش‌ها با استفاده از رابطه چند جمله‌ای مرتبه دوم پیش‌بینی شد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل آماری، میزان تأثیر پارامترهای فرایند بر نیروی شکست اتصال به ترتیب عبارت است از: عمق نفوذ ابزار، جنس صفحه پشتیبان، سرعت پیشروی عمودی ابزار و سرعت دورانی ابزار. شکست از ناحیه اغتشاش (شکست برشی)، شکست از منطقه تو رفتگی شانه و شکست از ناحیه مجاور با تو رفتگی شانه پس از آزمایش کشش در اتصالات مشاهده شد. بیش‌ترین استحکام اتصال در حالت شکست از ناحیه مجاور با شانه ابزار بدست آمد.

### کلیدواژگان

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای  
بهینه‌سازی با روش باکس-بنکن  
جنس صفحه پشتیبان  
نیروی شکست  
حالت شکست اتصالات

## Optimization of friction stir spot welding process parameters to achieve maximum failure load

Amirhossein Sakhaei<sup>1</sup>, Mohammad Kazemi Nasrabadi<sup>2\*</sup>, Abdolhossein Jalali Aghchai<sup>3</sup>, Abozar Barimani Varandi<sup>3</sup>

1- Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research branch, Tehran, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1381963813 Tehran, Iran, kazemi@ssau.ac.ir

### Keywords

Friction stir spot welding  
Optimization by Box-Behnken design  
Backplate material  
Failure load  
Failure mode of joints

### Abstract

Friction stir spot welding (FSSW) process is one of the friction stir welding (FSW) processes which is used for spot joining of thin sheets with different materials without melting of base metals. Box-Behnken design of response surface methodology (RSM) has been used for modelling and optimizing of parameters in different processes. The aim of this study was investigation of the effect of backplate material on the maximum failure load and failure mode in FSSW of AA7075-T6 sheets by using Box-behnen design. Three continuous parameters including rotational speed, plunge depth and plunge speed in three levels and one discrete parameter (backplate material) in two levels were considered. AA7178 and Ti6Al4V were used as backplate sheets. Continuous parameters limits were defined according to experimental tests and previous studies. The results of experimental tests were predicted by second order polynomial. According to statistical results, plunge depth, backplate material, plunge speed and rotational speed affected on the failure load respectively. Shear failure, tensile/shear failure and tensile failure mode were observed after tensile test. Maximum failure load was obtained in tensile failure mode.

Please cite this article using:

A. Sakhaei, M. Kazemi Nasrabadi, A. Jalali Aghchai, A. Barimani Varandi, Optimization of friction stir spot welding process parameters to achieve maximum failure load, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 13-27, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای نشان داده شده است.

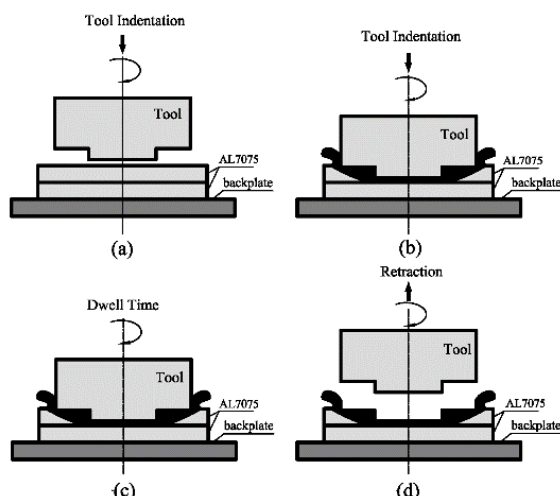


Fig. 1 Schematic of friction stir spot welding process [7]

شکل 1 مراحل روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای [7]

در این فرایند ابزار با سرعت زاویه‌ای بالا شروع به دوران کرده و وارد قطعه کار می‌شود. سپس تا زمانی که شانه ابزار با ورق بالایی تماس برقرار می‌کند جهت ایجاد یک نقطه جوش در قطعه کار نفوذ می‌کند. حرکت عمودی ابزار سبب خارج شدن مواد به شکل پلیسه در اطراف ناحیه اغتشاش می‌شود. بعد از مرحله نفوذ ابزار، مرحله اختلاط از زمانی که ابزار به یک عمق از پیش تعیین شده رسید، آغاز می‌شود.

در این مرحله ابزار به مدت زمان معین (زمان توقف ابزار) در قطعه کار نگه داشته می‌شود. در اثر حرارت اصطکاکی ایجاد شده در مراحل نفوذ و توقف ابزار، مواد مجاور با پین و شانه مخلوط می‌شوند. گرمای ایجاد شده در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، ناشی از اصطکاک ابزار با مواد ورق و تغییر شکل پلاستیک می‌باشد که سبب می‌شود دما در حین فرایند تا حدود 80% نقطه ذوب مواد افزایش یابد. در مرحله آخر زمانی که یک پیوند و اتصال مناسب بین ورق‌ها حاصل شد ابزار از قطعه کار خارج می‌شود [۸،۹]. اتصالات ایجاد شده با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به چهار ناحیه مجزا تقسیم شده است: 1- ناحیه اغتشاشی 2- ناحیه متأثر از حرارت - کار مکانیکی 3- منطقه تحت تأثیر حرارت 4- ناحیه فلز پایه [10]. در شکل 2 نواحی مختلف اتصال ایجاد شده با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای نشان داده شده است. در ناحیه اغتشاشی به دلیل تبلور مجدد، دانه‌ها در ابعاد بسیار کوچک و هم محور ایجاد می‌شوند.

اخیرا استفاده از آلیاژهای سبک وزن از قبیل آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم در صنعت هوافضا، اتومبیل‌سازی و کشتی‌سازی افزایش یافته است [1]. بر این اساس انواع متفاوتی از آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا در مقایسه با فولادها، مورد توجه قرار گرفته است. امروزه در تولیدات صنعتی، جوش نقطه‌ای نقش بسیار زیادی را ایفا می‌کند. به عنوان مثال در بدنه هر خودرو حدود 6000 اتصال وجود دارد که با جوش نقطه‌ای انجام می‌شود. روش‌های متفاوتی جهت ایجاد اتصال نقطه‌ای در قطعات مورد استفاده قرار گرفته است که مهم‌ترین آنها شامل: جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی، جوش کاری نقطه‌ای لیزر و پرچکاری است [2]. جهت ایجاد اتصال در آلیاژهای آلومینیوم با استفاده از روش‌های مذکور معایب متعددی بیان شده است. در فرایند جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی عیوبی از قبیل اعوجاج حرارتی شدید، مصرف ابزار در طول اتصال، افزایش مصرف انرژی و استحکام ضعیف جوش غیرقابل اجتناب است. در اتصالات ایجاد شده با روش جوش کاری لیزر عیوب حفره و تخلخل سبب بهم ریختگی ریزساختار و کاهش خواص مکانیکی اتصال شده است. فرایند پرچ کاری نیز دارای معایبی مانند هزینه بالا، راندمان تولید پایین و افزایش وزن سازه است [3]. برای غلبه بر مشکلات روش‌های ذکر شده، روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای که زیر مجموعه‌ای از روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی است، به طور قابل توجهی رشد و توسعه یافته و در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [4]. استفاده از روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای سبب کاهش 25 درصدی هزینه‌ها در مقایسه با روش جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی شده و از طرفی سادگی فرایند، عدم حساسیت به مواد با جنس‌های مختلف، عدم نیاز به ماده خنک‌کننده، عدم پاشش مواد در حین جوش کاری، عمر ابزار بالا، بازدهی بالا، ریزساختار جوش یکنواخت‌تر در مقایسه با روش‌های ذوبی، تغییر شکل حرارتی کم، قابلیت اتوماسیون بالا، عدم نیاز به گاز یا پودر محافظ، عدم نیاز به تجهیزات الکتریکی پیچیده و هوای فشرده سبب بکارگیری روزافزون این روش شده است [۵،۶]. روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای برای اولین بار برای اتصال ورق‌های آلیاژ آلومینیوم توسط شرکت‌های مزدا موتور و کلاواکی مورد استفاده قرار گرفته است [7]. مکانیزم جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل مراحل نفوذ ابزار، اختلاط و غوطه‌وری، توقف در عمق نفوذ تعیین شده و خارج شدن ابزار از داخل قطعه کار است. در شکل 1 مراحل روش

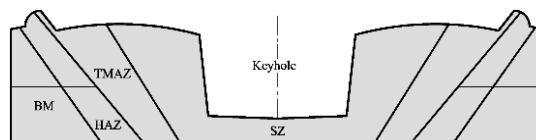


Fig. 2 Schematic of different regions in friction stir spot welding method [11]

شکل 2 نواحی مختلف اتصال ایجادشده با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای [11]

جوش داده شده آلیاژ آلومینیوم 2024 را با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی و استفاده از جنس‌های متفاوت برای صفحه پشتیبان مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که انتخاب صحیح جنس صفحه پشتیبان سبب افزایش همزمان استحکام و چقرمگی در اتصالات می‌شود.

به منظور دستیابی به بهترین خصوصیات مکانیکی در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بایستی پارامترها بهینه‌سازی شوند. یکی از کارآمدترین روش‌ها برای برای بهینه‌سازی پارامترها در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، روش رویه پاسخ<sup>1</sup> است. این روش مجموعه‌ای از مدل‌های آماری و ریاضی است که ابزاری بسیار مفید برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی مسائل مهندسی مطرح شده است [17]. در این روش هدف بهینه‌سازی رویه پاسخ است که تحت تأثیر پارامترهای فرایند قرار گرفته است.

با توجه به مطالعات مشخص شد که تحقیقات بسیار کمی پیرامون ارتباط پارامترهای فرایند با نیرو و حالت‌های شکست در اتصالات ایجاد شده در ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای انجام شده است. با توجه به کاربرد ورق‌های AA7075-T6 در صنایع هوایی مانند بال و بدنه هواپیما، دستیابی به اتصالاتی با بالاترین خواص مکانیکی ضروری است. مدل طراحی باکس- بنکن، به‌عنوان روش طراحی مرتبه دوم بر اساس طراحی سه سطحی معرفی شده است. هم‌چنین با توجه به این‌که انتخاب جنس صفحه پشتیبان تأثیر مهمی را در نوع و میزان انتقال حرارت در ورق‌ها به صورت هدایت و جابجایی حرارت ایجاد شده بر عهده دارد، اما تحقیقات بسیار کمی برای مشخص شدن تأثیر جنس صفحه پشتیبان در خصوصیات مکانیکی اتصالات ایجاد شده با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای انجام شده است. بنابراین لازم است این پارامتر در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بررسی شود.

با توجه به مطالب بیان شده، هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای فرایند (سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، سرعت پیشروی عمودی ابزار و جنس صفحه پشتیبان) با استفاده از روش طراحی آزمایش باکس- بنکن بر مقدار نیروی شکست و بررسی حالت‌های شکست در اتصالات ایجاد شده با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 می‌باشد. هم‌چنین جهت بررسی تأثیر جنس صفحه پشتیبان بر رفتار مکانیکی اتصالات از ورق‌های

در منطقه متأثر از حرارت کار مکانیکی مواد تحت تغییر شکل پلاستیکی قرار گرفته، اما به دلیل عدم وجود حرارت کافی تبلور مجدد در دانه‌ها رخ نمی‌دهد. در ناحیه تحت تأثیر حرارت مواد تحت تأثیر حرارت ناشی از اصطکاک و جریان مواد قرار گرفته که نتیجه آن رشد دانه‌ها و کاهش خواص مکانیکی اتصال است [11].

برای سنجش قابلیت و توانایی‌های این روش، مواد متفاوتی نظیر آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای منیزیم، آلیاژهای تیتانیوم، فولادها و انواع پلیمرها با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای جوش کاری شده‌اند. محققان متعددی پیرامون جنبه‌های مختلف این روش، مانند تأثیر پارامترهای جوش کاری بر رفتار مکانیکی و ریزساختار نمونه‌های جوش داده شده، تأثیر هندسه پین و شانه بر عملکرد جوش کاری، بهینه‌سازی پارامترها با روش های آماری مختلف، شبیه‌سازی فرایند بر اساس تحلیل دما و نیروی ایجاد شده در فرایند، تحلیل حالت شکست نمونه‌ها در آزمایش کشش و عمر ابزار جوش کاری مطالعات گسترده‌ای را انجام داده‌اند [12]. ژانگ و همکاران [13] تأثیر جنس صفحه پشتیبان در اتصالات ایجاد شده با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی را بررسی کردند. نتایج نشان داد، اتصالات ایجاد شده با استفاده از صفحه پشتیبان فولادی خواص مکانیکی بهتری را نتیجه می‌دهد. ایمام و همکاران [14] اثر جنس صفحه پشتیبان در روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب و لب رویهم در آلیاژ آلومینیوم 6063 را ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که تأثیر جنس صفحه پشتیبان در جوش کاری لب رویهم از جوش کاری لب به لب مهم‌تر است. آپادبای و همکاران [15] تأثیر خواص حرارتی صفحه پشتیبان در اتصالات ایجاد شده با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی را در ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم 6061 با ضخامت 25 میلی‌متر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از صفحه پشتیبان آلومینیومی و کامپوزیتی در مقایسه با صفحه پشتیبان فولادی منجر به خواص مکانیکی بهتری در اتصالات شده است. در تحقیقی دیگر ژانگ و همکاران [16] رفتار مکانیکی ورق‌های

<sup>1</sup> Response Surface Methodology (RSM)

بنابراین، شانه ابزار به شکل مقعر با زاویه 4 درجه ایجاد شد. مشخصات ابزار در جدول 3 بیان شده است. همچنین تصویر ابزار در شکل 3 آورده شده است. در نهایت پس از عملیات حرارتی ابزار به مقدار 50 HRC سخت شد.

جدول 3 خصوصیات ابزار استفاده شده

Table 3 Properties of tool used in this study

ارتفاع شانه (mm)	قطر ساقه (mm)	ارتفاع پین (mm)	قطر پین (mm)	نوع پین	قطر شانه (mm)	نوع شانه	جنس شانه و پین
10	20	1/4	6	استوانه رزوه شده	15	مقعر 4°	فولاد گرمکار

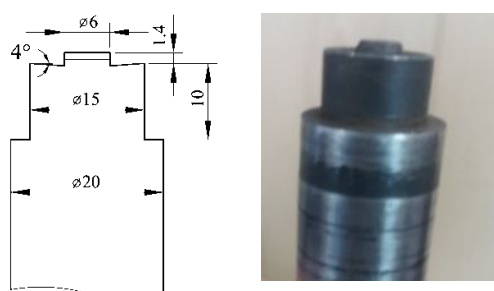


Fig. 3 Schematic of Friction stir spot welding tool

شکل 3 شماتیکی از ابزار جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

ایجاد رزوه در ابزارهای با پین استوانه‌ای باعث بهبود جریان مواد در اطراف پین می‌شود و میزان اختلاط مواد با شدت بیشتری انجام می‌شود، که نتیجه آن بهبود خواص کششی و حالت شکست ورق‌ها است [21]. بر این اساس در پین ابزار رزوه‌ای با گام 0/6 میلی‌متر و جهت رزوه چپ‌گرد ایجاد شد. برای انجام جوش کاری از دستگاه فرز CNC استفاده شد. هم‌چنین فیکسچر مخصوصی برای نگهداری قطعات در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای طراحی و ساخته شد. یکی از اهداف این تحقیق بررسی تأثیر جنس صفحه پشتیبان است. بر این اساس ورق‌هایی در ابعاد 200×30 میلی‌متر از جنس آلیاژهای Al7178 و Ti6Al4V تهیه شد. در شکل 4 تصویری از فیکسچر ارائه شده است.

انتخاب صحیح صفحه پشتیبان جهت دستیابی به اتصالی مناسب و ایده‌آل حیاتی به نظر می‌رسد. بدین منظور از آلیاژهای Al7178 و Ti6Al4V با خواص مکانیکی و حرارتی متفاوت جهت بررسی تأثیر جنس صفحه پشتیبان بر استحکام اتصالات استفاده شد. در جدول 4 خصوصیات مکانیکی و حرارتی آلیاژهای Al7178 و Ti6Al4V در دمای 25 درجه ارائه شده است.

آلیاژ آلومینیوم 7178 و آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V استفاده شد.

## 2- روش تحقیق

### 1-1- مواد استفاده شده

ورق‌های استفاده شده به‌عنوان فلز پایه برای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 با ابعاد 100×25×1/27 میلی‌متر تهیه شدند. آلیاژ آلومینیوم 7075، آلیاژ آلومینیوم و روی است که تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفته است که این عملیات شامل انحلال و کوئنچ در آب و پیرسازی مصنوعی<sup>1</sup> است [18]. ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 نشان داده شده است.

نمونه‌ها به شکل مستطیل با ابعاد 100×25 میلی‌متر بوسیله دستگاه گیوتین بریده شدند. عمل سمباده‌زنی، جهت حذف لایه‌های اکسیدی در سطح اتصال انجام شد و در آخر ورق‌ها توسط استون تمیزکاری شدند. برای انجام جوش کاری از دو ورق به شکل لبروی هم و با ناحیه رویهم افتادگی 25×25 میلی‌متر استفاده شد.

### 2-2- ابزار و تجهیزات جوش کاری

فولاد گرمکار (H13) رایج‌ترین نوع ابزار جهت جوش کاری ورق‌های آلیاژ آلومینیوم با روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بیان شده است [19]. بنابراین ابزاری از جنس فولاد گرمکار با قطر 20 میلی‌متر تهیه شد و هندسه مورد نظر روی آن تراش کاری شد. با توجه به مطالعات مشخص شد که شانه مقعر به دلیل افزایش ضخامت ورق بالایی، سبب ایجاد اتصالاتی با استحکام بیش‌تر شده است [20].

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 بر حسب درصد وزنی [5]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0/4	0/5	1/2	0/3	2/1	0/18	6/1	0/3	باقیمانده

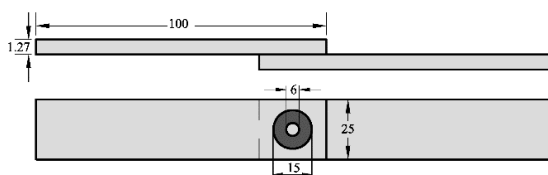
جدول 2 خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 [5,17]

Table 2 Mechanical and thermal properties of 7075-T6 aluminum alloy [5,17]

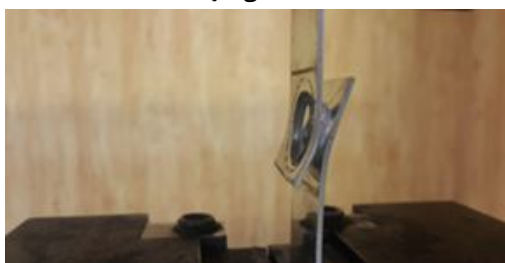
ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)	سختی VHN	درصد ازدیاد طول	استحکام برشی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	کششی نهایی (MPa)
130	160	12	317	410	485

1 Artificial Aging

اتصال انتخاب شدند. جهت تعیین محدوده پارامترها، یکی از پارامترها متغیر و بقیه پارامترها ثابت فرض شدند. بر این اساس تعدادی آزمایش انجام شد و نمونه‌ها ارزیابی شدند. هم‌چنین از نتایج تحقیقات سایر محققان نیز استفاده شد. برای انتخاب محدوده سرعت دورانی ابزار، زمانیکه سرعت دورانی کم‌تر از 800 rpm بود، به دلیل عدم اختلاط مناسب دو ورق، اتصال ضعیفی ایجاد شد. به‌طوریکه در آزمایش کشش، نمونه جوش داده شده با سرعت دورانی 625 rpm تحت بار 1780 N از ناحیه ناگت جوش شکسته شد که گرایش مشابهی با تحقیقات لطفی و نوروزی [22] و تاتر و همکاران [23] دارد. لطفی و نوروزی [22] بیان کردند که در سرعت دورانی پایین جریان ناکافی مواد پلاستیکی به دلیل حرارت کم باعث بوجود آمدن عیوبی نظیر فضاهای خالی ریز و ترک در منطقه اغتشاش می‌شود که منجر به کاهش خواص مکانیکی اتصال می‌گردد. از طرف دیگر سرعت دورانی بالا نیز باعث تولید حرارت بیش از حد در منطقه اغتشاش و ایجاد جریان توربولانس در مواد پلاستیکی می‌شود. هم‌چنین در تحقیق تاتر و همکاران [23] آمده است که ناحیه اختلاط ایجاد شده در ورق‌ها با استفاده از سرعت‌های دورانی کم‌تر از 750 rpm باعث کاهش عرض ناحیه اتصال شده است. آنها کاهش حرارت در منطقه اختلاط را دلیلی بر عدم جریان کافی مواد پلاستیکی در اطراف پین بیان کردند که نتیجه آن کاهش استحکام اتصال است. در شکل 6 تصویر اتصال ایجاد شده در سرعت دورانی 625 rpm ارائه شده است.



(a) ابعاد هندسی نمونه ساخته شده



(b) نمونه بعد از تست کشش

Fig. 5 Picture of (a) geometrical dimensions of specimen (b) specimen after tensile test

شکل 5 تصویر (a) ابعاد هندسی نمونه ساخته شده (b) نمونه پس از آزمایش کشش



Fig. 4 Schematic of created fixture

شکل 4 تصویری از فیکسچر ساخته شده

جدول 4 خصوصیات مکانیکی و حرارتی آلیاژ Ti6Al4V و Al7178

Table 4 Mechanical and thermal properties of Al7178 and Ti6Al4V

ماده	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول	سختی (VHN)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)
Al7178	538	607	10	189	125
Ti6Al4V	957	880	11	350	7/1

### 3-2- آزمایش استحکام کششی / برشی اتصال

به منظور ارزیابی استحکام کششی / برشی اتصالات، از دستگاه آزمایش کشش سنتام استفاده شد. آزمون کشش نمونه‌ها در دمای اتاق با سرعت ثابت 2 mm/min انجام شد و آزمایش با شکستن قطعه متوقف شد. هم‌چنین برای اطمینان از مقادیر بدست آمده برای نیروی شکست اتصالات، برای هر نمونه سه قطعه جهت آزمون استفاده شد و در آخر مقدار استحکام اتصال با میانگین گرفتن از سه مقدار بدست آمده محاسبه شد. در شکل 5 تصویری از ابعاد هندسی نمونه آماده شده جهت انجام آزمایش کشش و نمونه پس از آزمایش کشش نشان داده شده است.

### 4-2- تعیین محدوده پارامترها

شناسایی و انتخاب پارامترها در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای و تعیین محدوده آنها یکی از اهداف بسیار مهم است. در این فرایند پارامترهای متعددی بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری اتصال تأثیرگذار هستند. سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، سرعت پیشروی عمودی ابزار، زمان توقف ابزار، جنس و هندسه ابزار، نیروی محوری ابزار، زاویه انحراف ابزار نسبت به بردار نرمال ورق‌ها و جنس صفحه پشتیبان از مهم‌ترین پارامترهای این فرایند هستند. در این تحقیق بر اساس مطالعات انجام شده، سرعت دورانی، عمق نفوذ، سرعت پیشروی و جنس صفحه پشتیبان جهت بررسی خصوصیات مکانیکی





**Fig. 8** Different regions of joint in tool plunge depth of 1.4 mm (a) schematic of joint (b) lower surface of the upper sheet (c) upper surface of the lower sheet

**شکل 8** قسمت‌های مختلف اتصال ایجاد شده در عمق نفوذ 1.4 mm (a) تصویر اتصال (b) سطح پایینی ورق رویی (c) سطح رویی ورق زیری

در تحقیقات اجو و همکاران [24] نیز بیان شده بود که افزایش بیش از حد عمق نفوذ سبب خارج شدن مواد از زیر شانه شده که نتیجه آن افزایش پلیسه و کاهش کیفیت اتصال است. با توجه به مطالب بیان شده مقادیر عمق نفوذ برابر 1/6، 2 و 2/4 میلی‌متر انتخاب شدند که به ترتیب برابر 63، 79 و 95 درصد مجموع ضخامت ورق‌ها می‌باشد.

برای انتخاب سرعت پیشروی عمودی ابزار، تعدادی آزمایش جهت تعیین محدوده مناسب انجام شد. با توجه به تحقیقات سانگ و همکاران [29] مشخص شد که سرعت‌های پیشروی کم‌تر از 5 mm/min به دلیل کاهش بیش از حد ضخامت ورق بالایی، کاهش استحکام اتصال حاصل شده است. زمانیکه سرعت پیشروی بیش‌تر از 25 mm/min انتخاب شد، به دلیل سرعت بالای فرایند و ایجاد اصطکاک چسبنده بین ابزار و قطعه‌کار، لبه انباشته در سطح جانبی شانه و پین ایجاد شد که نتیجه آن کاهش عمر ابزار و افزایش هزینه است. زاویه انحراف ابزار نسبت به بردار نرمال ورق‌ها و زمان توقف ابزار به‌عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شد و مقادیر آنها به ترتیب 0 درجه و 7 ثانیه انتخاب شدند.

## 2-5- طراحی آزمایش با استفاده از مدل باکس - بنکن

محققان متعددی از روش‌های تجربی سنتی جهت ارزیابی بازدهی و تأثیر پارامترها در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای استفاده کرده‌اند. بطوریکه یک پارامتر به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده و بقیه پارامترها ثابت فرض شده‌اند. این نوع روش طراحی آزمایش، میزان هزینه و زمان را افزایش می‌دهد [25]. جهت حل این مشکل، روش‌های آماری متعددی برای تحلیل فرایندها وجود دارند. این روش‌ها شرایط بهینه‌ای را برای دستیابی به بهترین پاسخ از میان تعداد کمی از آزمایشات ارائه می‌کنند. تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای استفاده از روش طراحی باکس - بنکن به صورت زیر تعریف شده است [17].

$$N = 2K(K - 1) + C_0 \quad (1)$$



**Fig. 6** Different regions of joint in tool rotational speed of 625 rpm (a) schematic of joint (b) lower surface of the upper sheet (c) upper surface of the lower sheet

**شکل 6** قسمت‌های مختلف اتصال ایجاد شده در سرعت دورانی 625 rpm (a) تصویر اتصال (b) سطح پایینی ورق رویی (c) سطح رویی ورق زیری

از طرفی، در تحقیق پایدار و همکاران [21] بیان شده است که افزایش بیش از حد دما باعث ایجاد ذوب موضعی و تشکیل ترک‌های ریز در منطقه اختلاط شده که نتیجه آن کاهش خواص مکانیکی اتصال است. هم‌چنین در تحقیق ساجد [19] مهم‌ترین پارامتر در تغییر حرارت در منطقه اختلاط، سرعت دورانی بیان شده که افزایش آن از حد بهینه سبب درشت شدن دانه‌ها و انحلال رسوبات می‌شود و نتیجه آن کاهش استحکام اتصال است. با توجه به نتایج تحقیقات فوق در این تحقیق نیز زمانیکه سرعت دورانی بیش از 1600 rpm انتخاب شد، افزایش اصطکاک ابزار با قطعه‌کار و تغییر شکل پلاستیک مواد باعث افزایش بیش از حد دما در منطقه اختلاط شد که نتیجه آن دفرمگی و اعوجاج هندسی در ورق‌ها بود. در شکل 7 تصویر اتصال ایجاد شده در سرعت دورانی 2000 rpm ارائه شده است. قابل ذکر است که جهت چرخش ابزار در تمامی اتصالات، به دلیل رزوه چپ‌گرد، ساعتگرد در نظر گرفته شد.

برای انتخاب محدوده عمق نفوذ ابزار، زمانی که عمق نفوذ کم‌تر از 1/6 mm انتخاب شد، به دلیل عدم تغییر شکل و خمیری شدن ورق زیری، اتصال با کیفیت نامناسب ایجاد شد. به‌طوریکه نمونه در آزمایش کشش تحت نیروی 945 N دچار گسیختگی شد. در شکل 8 تصویر اتصال ایجاد شده با عمق نفوذ 1/4 mm آورده شده است.

از طرفی مجموع ضخامت دو ورق برابر 2/54 mm است که افزایش عمق نفوذ از 2/4 mm باعث برخورد نوک پین با صفحه پشتیبان، سوراخ شدن اتصال در ورق زیری و کاهش خواص مکانیکی اتصال خواهد شد.



**Fig. 7** Distortion of sheet in tool rotational speed of 2000 rpm

**شکل 7** تغییر شکل ورق در سرعت دورانی 2000 rpm

بعد  $X_1$  است.  $K$  تعداد پارامترهای ورودی و  $C_0$  تعداد نقاط مرکزی است.

در این تحقیق هدف از طراحی آزمایش، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شرایط تجربی برای بیش‌ترین نیروی شکست اتصال است. سه فاکتور اصلی شامل سرعت دورانی، عمق نفوذ و سرعت پیش‌روی به‌عنوان متغیرهای پیوسته در سه سطح و صفحه پشتیبان به‌عنوان پارامتر گسسته در دو سطح انتخاب شدند. نقطه مرکزی طراحی برای برآورد خطاها، سه مرتبه تکرار شد. در جدول 5 سطوح بالا و پایین پارامترها بر اساس مقادیر کد شده و کد نشده ارائه شده است. ارتباط بین پارامترهای ورودی و پارامتر خروجی در رابطه (2) بیان شده است [17].

$$\text{force} = f(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (2)$$

جدول 5 سطوح بالا و پایین پارامترها بر اساس مقادیر کد شده و کد نشده

Table 5 Upper and lower levels of factors in terms of coded and uncoded symbols

پارامترها	کد شده	کد نشده	سطوح
سرعت دورانی	$x_1$	$X_1$	حد پایین حد وسط حد بالا (-1) (0) (1)
عمق نفوذ	$x_2$	$X_2$	2/4 2 1/6
سرعت پیش‌روی	$x_3$	$X_3$	25 15 5
صفحه پشتیبان	$x_4$	$X_4$	Ti Al

رابطه ریاضی بین متغیرهای کد شده و متغیرهای کد نشده بر اساس معادلات (3-5) مشخص شده است [17].

$$x_1 = \frac{(X_1 - 1200)}{400} \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{(X_2 - 2)}{0.4} \quad (4)$$

$$x_3 = \frac{(X_3 - 15)}{10} \quad (5)$$

در روابط ارائه شده  $X_1$ ،  $X_2$  و  $X_3$  متغیرهای کد نشده و  $x_1$ ،  $x_2$  و  $x_3$  متغیرهای کد شده هستند. با توجه به روابط مشخص است که متغیرهای کد نشده واحد اولیه خود را حفظ کرده، در حالیکه متغیرهای کد شده بی‌بعد شده‌اند. در معادله (6) رابطه خطی بین متغیر خروجی، متغیرهای اصلی و اثر متقابل آنها ارائه شده است [26].

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>1}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6)$$

در رابطه ارائه شده،  $Y$  مقدار پاسخ پیش‌بینی شده،  $b_0$  ضریب جبران،  $b_i$  ضریب تأثیر خطی،  $b_{ii}$  ضریب تأثیر مرتبه دوم (غیر خطی)،  $b_{ij}$  ضریب اثر متقابل و  $\varepsilon$  میزان خطای تصادفی است. هم‌چنین  $i$  و  $j$  شماره شاخص متغیرها و  $x_i$  متغیر کد شده بدون

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بهینه‌سازی بر اساس طرح باکس- بنکن با استفاده از روش رویه پاسخ

برای ارزیابی تأثیر سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، سرعت پیش‌روی عمودی ابزار و جنس صفحه پشتیبان بر استحکام اتصالات از طرح باکس- بنکن بر اساس روش رویه پاسخ استفاده شد. در ابتدا با استفاده از روش باکس- بنکن مدلی ریاضی ایجاد می‌شود. این مدل قادر به توضیح روابط بین پارامترها و تأثیر متقابل آنها جهت پیش‌بینی و کنترل نیروی شکست اتصال با استفاده از پارامترهای مختلف است. سپس با استفاده از آنالیز واریانس، میزان تأثیر هر پارامتر و شرایط بهینه برای نیروی شکست اتصال بر اساس پارامترها بیان خواهد شد.

#### 3-1-1- ایجاد مدل و تحلیل واریانس<sup>1</sup>

مقادیر نیروهای شکست پیش‌بینی شده و حاصل از آزمایش‌های تجربی در جدول 6 ارائه شده است. جهت ایجاد رابطه بین متغیرهای ورودی با نیروی شکست اتصال از دو مدل درجه دو به شکل زیر استفاده شد. استفاده از دو معادله درجه دوم به دلیل وجود پارامتر ورودی گسسته (جنس صفحه پشتیبان) است. در رابطه (7) معادله درجه دو با استفاده از صفحه پشتیبان Al7178 و در رابطه (8) معادله درجه دو با استفاده از صفحه پشتیبان Ti6Al4V ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \text{force} = & -62868 + 12.55x_1 + 59805x_2 - 144.3x_3 \\ & - 0.000270x_1^2 - 12408x_2^2 + 0.113x_3^2 \\ & - 5.489x_1x_2 + 0.0158x_1x_3 + 35.2x_2x_3 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{force} = & -60448 + 10.96x_1 + 59675x_2 - 103x_3 \\ & - 0.000270x_1^2 - 12408x_2^2 + 0.113x_3^2 \\ & - 5.489x_1x_2 + 0.0158x_1x_3 + 35.2x_2x_3 \end{aligned} \quad (8)$$

نتایج حاصل از روش تحلیل واریانس برای مدل بدست آمده در جدول 7 بیان شده است. روش تحلیل واریانس، روشی تحلیلی برای تعیین اهمیت مدل و پارامترها است. ضریب  $R^2$  به‌عنوان نسبت تغییر ایجاد شده به تغییر کلی تعریف می‌شود که مقیاسی برای پیش‌بینی مدل است. در مراجع جهت پیش‌بینی مدلی مناسب، حداقل مقدار  $R^2$  برابر 0/8 پیشنهاد شده است [26]. در این تحقیق مقدار  $R^2$  برابر 0/9879 و مقدار تصحیح شده  $R^2$  برابر 0/9781 ایجاد شد. این مقادیر نشان می‌دهد که مدل پیشنهاد شده قابلیت عکس العمل بسیار خوبی دارد. از

<sup>1</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

بر نیروی شکست اتصال دارد. این در حالی است که سرعت دورانی و سرعت پیشروی عمودی ابزار به لحاظ تأثیر خطی بسیار مهم بوده و تأثیر غیر خطی آنها بسیار ناچیز است. برای بیان اثر متقابل پارامترها، بیش‌ترین میزان اثر بخشی به ترتیب برای سرعت دورانی و عمق نفوذ، سرعت دورانی و جنس صفحه پشتیبان، سرعت پیشروی عمودی ابزار و جنس صفحه پشتیبان است. از طرفی کم‌ترین میزان اثر بخشی به ترتیب برای عمق نفوذ و جنس صفحه پشتیبان، سرعت دورانی و سرعت پیشروی عمودی ابزار، عمق نفوذ و سرعت پیشروی عمودی ابزار است.

طرفی مقادیر  $F$  و  $P$  برای مدل به ترتیب برابر  $100/79$  و  $0/000$  بدست آمد که نشان می‌دهد مدل پیشنهادی بسیار تأثیرگذار است. در مراجع بیان شده که مقدار  $P$  کمتر از  $0/1$ ، اثرگذاری مدل را به لحاظ آماری نشان می‌دهد. درحالی‌که اگر مقدار  $P$  بیش‌تر از  $0/1$  باشد، حاکی از عدم تأثیرگذاری مدل است [26]. آزمایش  $F$  به منظور تعیین اهمیت ضرایب رگرسیون با استفاده از مقدار  $P$  استاندارد است. به‌طور کلی، مقادیر  $F$  بیش‌تر و مقادیر  $P$  کم‌تر نشان دهنده اهمیت بیش‌تر ضرایب ترم‌ها است [27]. ضرایب مربوط به ترم‌های درجه دوم برای عمق نفوذ ابزار بسیار مهم بدست آمد، که نشان می‌دهد این پارامتر تأثیر بسیار زیادی

جدول 6 مقادیر نیروی شکست بر اساس پارامترهای انتخاب شده با استفاده از روش تجربی و پیش‌بینی

Table 6 Experimental and predicted failure load under different factors

درصد خطا	پاسخ پیش‌بینی	تجربی	پارامترهای حقیقی				پارامترهای کد شده				شماره آزمایش
			$X_4$	$X_3$	$X_2$	$X_1$	$x_4$	$x_3$	$x_2$	$x_1$	
4/6	2789/82	2926	A1	15	1/6	800	A1	0	-1	-1	1
0/2	5471/82	5484	A1	15	1/6	1600	A1	0	-1	1	2
-3/8	7838/08	7548	A1	15	2/4	800	A1	0	1	-1	3
-3/8	7007/08	6749	A1	15	2/4	1600	A1	0	1	1	4
1/1	7889/82	7984	A1	5	2	800	A1	-1	0	-1	5
2/8	8689/32	8984	A1	5	2	1600	A1	-1	0	1	6
3/1	6731/07	6952	A1	25	2	800	A1	1	0	-1	7
1/8	7782/57	7931	A1	25	2	1600	A1	1	0	1	8
-6/4	4842/45	4550	A1	5	1/6	1200	A1	-1	-1	0	9
3/1	7852/70	8107	A1	5	2/4	1200	A1	-1	1	0	10
-2/9	3528/20	3426	A1	25	1/6	1200	A1	1	-1	0	11
0/6	7101/45	7149	A1	25	2/4	1200	A1	1	1	0	12
0/1	7805/20	7819	A1	15	2	1200	A1	0	0	0	13
-2/9	7805/20	7584	A1	15	2	1200	A1	0	0	0	14
-0/2	7805/20	7783	A1	15	2	1200	A1	0	0	0	15
3/5	4325/92	4483	Ti	15	1/6	800	Ti	0	-1	-1	16
4/6	5741/42	6023	Ti	15	1/6	1600	Ti	0	-1	1	17
-0/03	9255/68	9252	Ti	15	2/4	800	Ti	0	1	-1	18
-0/4	7158/18	7123	Ti	15	2/4	1600	Ti	0	1	1	19
-2/3	8953/67	8744	Ti	5	2	800	Ti	-1	0	-1	20
-4/6	8486/67	8112	Ti	5	2	1600	Ti	-1	0	1	21
-1/2	8620/92	8516	Ti	25	2	800	Ti	1	0	-1	22
-0/3	8405/92	8373	Ti	25	2	1600	Ti	1	0	1	23
2/1	5332/30	5447	Ti	5	1/6	1200	Ti	-1	-1	0	24
1/8	8224/05	8379	Ti	5	2/4	1200	Ti	-1	1	0	25
-6/7	4844/05	4537	Ti	25	1/6	1200	Ti	1	-1	0	26
1/5	8298/80	8429	Ti	25	2/4	1200	Ti	1	1	0	27
2/6	8648/80	8887	Ti	15	2	1200	Ti	0	0	0	28
-1/4	8648/80	8527	Ti	15	2	1200	Ti	0	0	0	29
1/2	8648/80	8762	Ti	15	2	1200	Ti	0	0	0	30



برای تعیین مدل رگرسیون است، بنابراین با افزایش مقدار  $R^2$  (adj) میزان قدرت پیش‌بینی مدل افزایش خواهد یافت. از طرفی، مقدار  $P$  کم‌تر از 0/03 نشان می‌دهد که مدل بسیار تأثیرگذار است.

### 3-1-3- بررسی آماری دقت مدل

برای دستیابی به مدلی مناسب، بررسی دقت مدل ضروری است. با توجه به جدول 7 مقدار پیش‌بینی  $R^2$  برابر 0/9492 بدست آمد که قابلیت پیش‌بینی 94 درصدی مدل ایجاد شده در تنوع خروجی‌ها را نشان می‌دهد. در شکل 9 نمودار نرمال باقیمانده‌ها و درصد خطا پس از اصلاح مدل اولیه بیان شده است.

جدول 8 نتایج تحلیل واریانس برای مدل بهبود یافته

Table 8 Analysis of variance for modified model

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	86828599	8	10853575	177/7	0/000
$x_1$	341640	1	341640	5/59	0/000
$x_2$	41796225	1	41796225	684/29	0/028
$x_3$	1536360	1	1536360	25/15	0/000
$x_4$	5337457	1	5337457	87/39	0/000
$x_1x_2$	29360034	1	29360034	480/68	0/000
$x_1x_4$	6170584	1	6170584	101/03	0/000
$x_3x_4$	1604022	1	1604022	26/26	0/000
$x_3x_4$	682276	1	682276	11/17	0/003
خطای باقیمانده	1282674	21	61080	-	-
عدم برازش	1183817	17	69636	2/82	0/163
خطای خالص	98857	4	24714	-	-
مجموع	88111273	29	-	-	-
		$R^2=0.9854$		$(pred) R^2=0.9680$	
		$(adj) R^2 = 0.9799$			

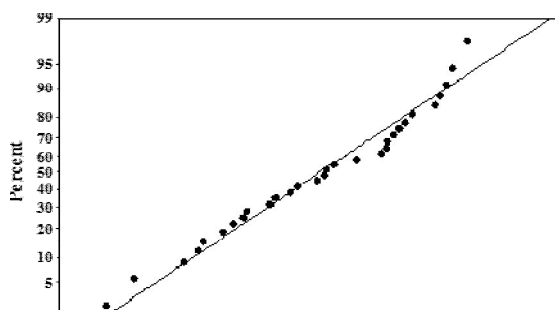


Fig. 9 Normal plot between residual and percentage error after modified model

شکل 9 نمودار نرمال بین باقیمانده و درصد خطا پس از اصلاح مدل

جدول 7 نتایج تحلیل واریانس برای مدل بدست آمده

Table 7 Analysis of variance results for the model

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	87048270	13	6696021	100/79	0/000
$x_1$	341640	1	341640	5/14	0/038
$x_2$	41796225	1	41796225	629/1	0/000
$x_3$	1536360	1	1536360	23/12	0/000
$x_4$	5337457	1	5337457	80/34	0/000
$x_1^2$	13813	1	13813	0/21	0/655
$x_2^2$	29104376	1	29104376	438/07	0/000
$x_3^2$	935	1	935	0/01	0/907
$x_1x_2$	6170584	1	6170584	92/88	0/000
$x_1x_3$	31752	1	31752	0/48	0/449
$x_1x_4$	1604022	1	1604022	24/14	0/000
$x_2x_3$	158484	1	158484	2/39	0/142
$x_2x_4$	14042	1	14042	0/21	0/652
$x_3x_4$	682276	1	682276	10/27	0/006
خطای باقیمانده	10363004	16	66438	-	-
عدم برازش	964146	12	80346	3/25	0/133
خطای خالص	98857	4	24714	-	-
مجموع	88111273	29	-	-	-
		$R^2=0.9879$		$(pred) R^2 = 0.9492$	
		$(adj) R^2 = 0.9781$			

### 3-1-2- اصلاح مدل

پس از بررسی میزان اهمیت و تأثیرگذاری پارامترها، می‌توان مدل پیش‌بینی شده را با حذف ترم‌هایی که تأثیر زیادی ندارند و یا به عبارت دیگر مقدار  $P$  بدست آمده از تحلیل واریانس کمتر از 0/1 است، بهبود بخشید [28] در رابطه (9) مدل بهبود یافته با صفحه پشتیبان Al718 و رابطه (10) مدل بهبود یافته برای صفحه پشتیبان Ti6Al4V ارائه شده است.

$$\text{force} = -63656 + 12.13x_1 + 60202x_2 - 51.46x_3 - 12394x_2^2 - 5.489x_1x_2 \quad (9)$$

$$\text{force} = -61532 + 10.55x_1 + 60202x_2 - 10.34x_3 - 12394x_2^2 - 5.489x_1x_2 \quad (10)$$

نتایج حاصل از تحلیل واریانس برای مدل بهبود یافته، در جدول 8 آورده شده است. با توجه به جدول 8 مشخص است که پس از حذف ترم‌های کم‌تأثیر، مقادیر  $P$  بدست آمده برای مدل بهبود یافته برای تمام ترم‌ها کمتر از 0/1 شده است. مقدار  $R^2$  پس از اصلاح مدل اندکی کاهش یافت و از 0/9879 به 0/9854 رسید، اما مقدار  $(adj) R^2$  پس از اصلاح مدل از 0/9781 به 0/9799 افزایش یافت. از آنجاکه  $(adj) R^2$  فاکتور بسیار مهمی

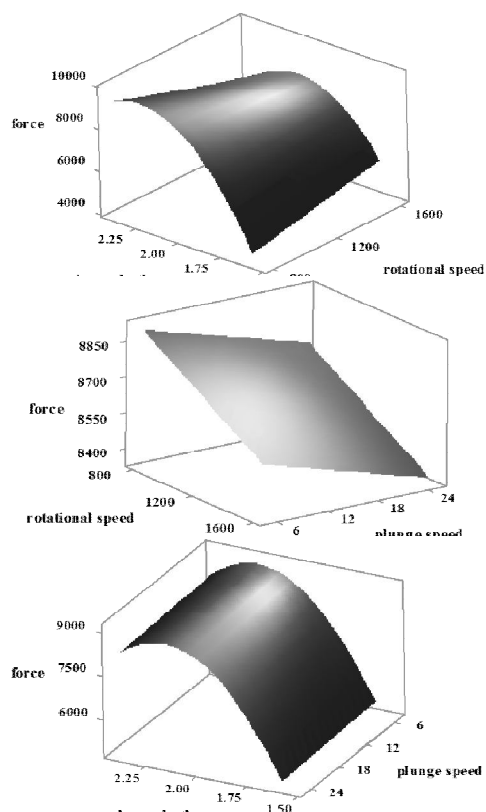


Fig. 11 Effect of continuous parameters on failure load with Ti6Al4V backing plate

شکل 11 تأثیر پارامترهای پیوسته بر نیروی شکست با صفحه پشتیبان Ti6Al4V

با توجه به جدول 6 و شکل‌های 10 و 11، اتصالات با صفحه پشتیبان تیتانیومی تقریباً در تمام موارد دارای استحکام بیش‌تری در مقایسه با صفحه پشتیبان آلومینیومی هستند. در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بواسطه حرارت ناشی از اصطکاک ابزار با ورق‌ها و تغییر شکل پلاستیک مواد، اختلاط بین مواد انجام شده و پیوند متالورژیکی بین ورق‌ها ایجاد می‌شود [29]. با استفاده از صفحه پشتیبان تیتانیومی دمای منطقه اختلاط بواسطه تمرکز حرارتی ایجاد شده ناشی از کنترل دما توسط صفحه پشتیبان، افزایش خواهد یافت. از آنجاکه فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بسیار سریع‌تر از فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی خطی انجام می‌شود، لذا ایجاد دمای کافی در منطقه خمیری الزامی است. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش دما در صورت بکارگیری از صفحه پشتیبان تیتانیومی، مواد تغییر شکل پلاستیک بیش‌تری را تحمل می‌کنند. می‌توان با بهره‌گیری از اصل کار سختی فلزات، افزایش استحکام اتصالات با صفحه پشتیبان تیتانیومی را توجیه نمود. هم‌چنین در تحقیق ایمام و همکاران [14] بیان شده است

شکل 9 بیان می‌کند که نزدیکی نقاط به خط، حاکی از عدم وجود نقطه پرت است. به عبارت دیگر، هرچه نقاط از خط دورتر باشند درصد خطا بیش‌تر است. مطابق با جدول 8 مقدار پیش‌بینی  $R^2$  پس از اصلاح مدل به 0/9680 افزایش یافت که نشان دهنده قابلیت پیش‌بینی 96 درصدی مدل اصلاح شده است.

### 3-1-4- نمودارهای روبه‌ای و تعیین نقطه بهینه

ارتباط بین پارامتر خروجی و پارامترهای ورودی در شکل‌های 10 و 11 نشان داده شده است. در هر تصویر تأثیر دو متغیر در محدوده‌های انتخاب شده، مشخص شده است. لازم به ذکر است که در تصاویر نشان داده شده دو متغیر تغییر کرده، در حالیکه پارامتر دیگر در سطح وسط ثابت شده است. استفاده از تصاویر روبه‌پاسخ<sup>1</sup> سبب تجسم بهتر میزان تأثیر هر متغیر بر مقدار نیروی شکست اتصال خواهد شد [26]. در شکل 10 تأثیر پارامترهای پیوسته بر نیروی شکست با صفحه پشتیبان Al7178 و در شکل 11 با صفحه پشتیبان Ti6Al4V نشان داده شده است.

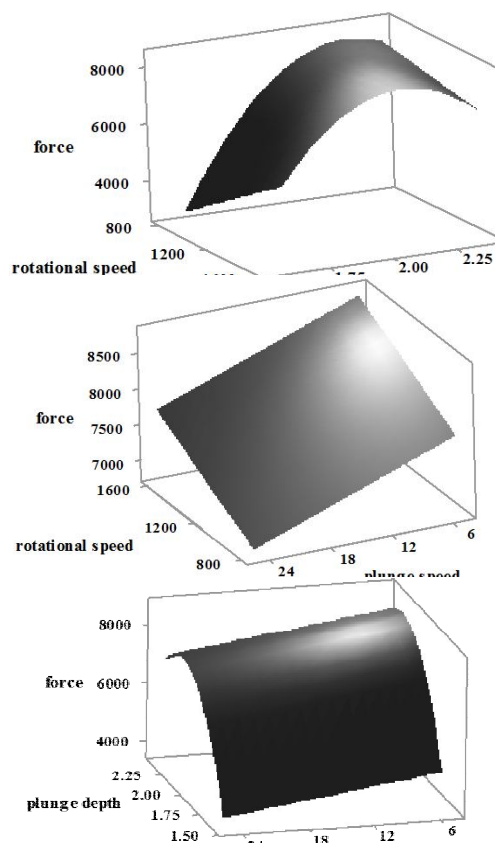


Fig. 10 Effect of continuous parameters on failure load with Al 7178 backing plate

شکل 10 تأثیر پارامترهای پیوسته بر نیروی شکست با صفحه پشتیبان Al7178

<sup>1</sup> Response surface

### 3-2- رفتار مکانیکی اتصالات

از آنجا که هدف از بکارگیری فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای تولید قطعات در صنایع حساس و دقیق است، لذا تحلیل رفتار مکانیکی اتصالات هنگام بارگذاری ضروری به نظر می‌رسد. در جدول 10 ویژگی‌های مکانیکی اتصالات مطابق با شماره آزمایش‌ها در جدول 6 ارائه شده است.

جدول 10 خصوصیات مکانیکی اتصالات

Table 10 Mechanical properties of joints

شماره آزمایش	نیروی شکست (N)	درصد ازدیاد طول نسبی	حالت شکست
1	2962	0/24	شکست از ناحیه اغتشاش
2	5484	0/96	شکست از ناحیه اغتشاش
3	7548	2/47	خارج شدن ناگت
4	6749	1/54	خارج شدن ناگت
5	7984	2/27	شکست از ناحیه اغتشاش
6	8948	2/96	شکست از ناحیه اغتشاش
7	6952	1/92	شکست از ناحیه اغتشاش
8	7931	1/88	شکست از ناحیه اغتشاش
9	4550	0/96	شکست از ناحیه اغتشاش
10	8107	2/59	خارج شدن ناگت
11	3426	0/38	شکست از ناحیه اغتشاش
12	7149	1/55	شکست از ناحیه اغتشاش
13	7819	2/14	شکست از ناحیه اغتشاش
14	7584	1/98	شکست از ناحیه اغتشاش
15	7783	2/34	شکست از ناحیه اغتشاش
16	4483	1/11	شکست از ناحیه اغتشاش
17	6023	1/23	شکست از ناحیه اغتشاش
18	9252	3/01	شکست از مجاور تورفتگی شانه
19	7123	2/51	خارج شدن ناگت
20	8744	2/24	شکست از ناحیه اغتشاش
21	8112	2/4	خارج شدن ناگت
22	8516	2/38	شکست از ناحیه اغتشاش
23	8373	2/56	شکست از ناحیه اغتشاش
24	5447	1/74	شکست از ناحیه اغتشاش
25	8379	2/09	خارج شدن ناگت
26	4537	1/18	شکست از ناحیه اغتشاش
27	8429	2/35	خارج شدن ناگت
28	8887	2/38	خارج شدن ناگت
29	8527	2/14	شکست از ناحیه اغتشاش
30	8762	2/23	شکست از ناحیه اغتشاش

### 3-2-1- هندسه ناحیه هوک

یکی از خصوصیات اتصالات اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای تشکیل عیب هندسی در فصل مشترک دو ورق است که هوک نامیده

که با کاهش ضریب انتقال حرارت صفحه پشتیبان در جوش کاری خطی اتصالاتی با استحکام بیش‌تر حاصل شده است. آنها در نتایج خود بیان کردند که استفاده از صفحه پشتیبان با قابلیت هدایت حرارتی بالا باعث ایجاد عیوب تونلی و حفره در ریزساختار منطقه اختلاط شده، که نتیجه آن کاهش استحکام اتصال است.

نقطه بهینه توسط طرح‌های روبه پاسخ بدست آمده است. پس از ایجاد مدل، بهینه‌ساز نرم‌افزار<sup>1</sup> پارامترهای بهینه را برای ایجاد بیش‌ترین نیروی شکست اتصال بر اساس سرعت دورانی 800 rpm، عمق نفوذ 2/255 mm، سرعت پیشروی عمودی ابزار 5 mm/min با استفاده از صفحه پشتیبان Ti6Al4V برابر 9688 N پیش‌بینی کرد. برای تأیید و اعتبارسنجی مقدار نیروی شکست پیش‌بینی شده با استفاده از روش باکس-بنکن، شش آزمایش تکرار شد. نتایج در جدول 9 نشان داده شده است. بیش‌ترین مقدار خطا 2/9- درصد بدست آمد، که نشان دهنده توانایی بالا در پیش‌بینی نیروها بر اساس مدل ایجاد شده است. مقدار منفی درصد خطا نشان دهنده این است که مقدار پیش‌بینی شده بیش‌تر از مقدار واقعی است.

با توجه به موارد فوق مشخص است که روش باکس-بنکن ابزاری بسیار مفید و مؤثر برای بهینه‌سازی پارامترها در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای است. درصد تأثیر پارامترها در این فرایند بر نیروی شکست اتصال را می‌توان از مقدار  $F$  مشخص کرد. مقادیر  $F$  در جدول 8 بیان شده است. مقدار بالاتر  $F$  بیانگر تأثیر بیش‌تر پارامتر مربوطه است و مقدار  $F$  کم‌تر بیانگر تأثیر کم پارامتر مربوطه است. با توجه به مقادیر  $F$ ، میزان تأثیر عمق نفوذ ابزار بر نیروی شکست اتصال از بقیه پارامترها بیش‌تر است. میزان تأثیر پارامترها بر نیروی شکست اتصال به ترتیب عبارت است از عمق نفوذ ابزار، جنس صفحه پشتیبان، سرعت پیشروی عمودی ابزار و سرعت دورانی ابزار.

جدول 9 نتایج اعتبارسنجی

Table 9 Validation results

شماره نمونه	نیروی شکست اتصال (N)	درصد خطا
	مقدار پیش‌بینی	مقدار واقعی
13	7819	0/1
14	7805/20	-2/9
15	7783	-0/2
28	8887	2/6
29	8648/80	-1/4
30	8762	1/2

<sup>1</sup> Response Optimizer

1- شکست سطحی از ناحیه اغتشاش (شکست برشی): این حالت شکست با ایجاد ترک در نوک هوک آغاز شده و با حرکت در مسیر عرض اتصال جدایش ورق‌ها حاصل شده است. در این حالت اتصالات بدون تغییر شکل زیادی شکسته شدند. در شکل 13 شماتیکی از مقطع اتصال و تصویر نمونه شکسته شده در حالت برشی آورده شده است. با توجه به شکل 13، در حالت شکست برشی فاصله نوک هوک تا سوراخ کلیدی کم‌تر از فاصله نوک هوک تا ورق بالایی است، که نتیجه آن گسترش ترک در مسیر عرض اتصال و شکست برشی است. مطابق با جدول 10، تمامی اتصالات با عمق نفوذ  $1/6 \text{ mm}$  بصورت برشی شکسته شدند و سایر پارامترها در این عمق نفوذ تأثیری بر نوع شکست اتصال ندارند. نتایج بدست آمده تشابه نزدیکی با تحقیقات ژانگ [11]، بزکارت [25] و پایدار [31] دارد.

2- شکست از ناحیه تو رفتگی شانه: در این حالت نیز مشابه شکست برشی، ابتدا ترک در نوک هوک آغاز شده و سپس با حرکت در مسیر ضخامت ورق رویی جدایش ورق‌ها ایجاد شده است. به عبارت ساده‌تر، ناحیه ایجاد شده توسط شانه ابزار پس از آزمایش کشش از ورق بالایی جدا شده است. اتصالات شکسته شده در این حالت تغییر شکل بیش‌تری را در مقایسه با شکست برشی از خود نشان دادند.

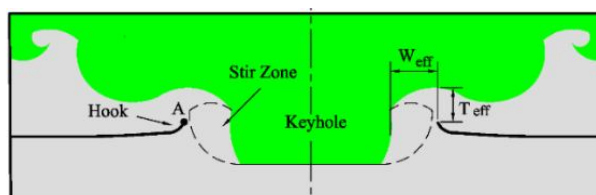


Fig. 12 Schematic cross section of FSSW joints

شکل 12 شماتیک مقطع عرضی اتصال جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

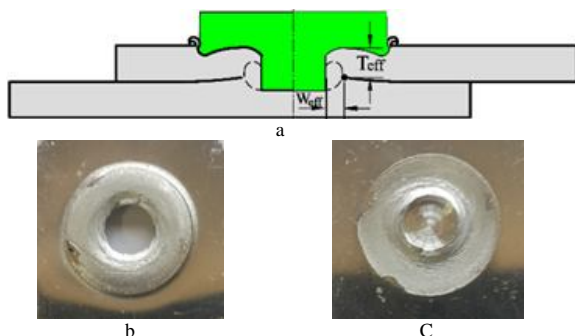


Fig. 13 a) Schematic of joint section leading to shear failure mode b) bottom view of upper sheet c) top view of lower sheet

شکل 13 شماتیکی از مقطع اتصال منجر به حالت شکست برشی (b) نمای پایین از ورق بالایی (c) نمای بالا از ورق زیری

شده است [29] به عبارت دیگر، هوک پیوند متالورژیکی ضعیف بین دو ورق است که شکل و ابعاد آن بر استحکام و حالت شکست اتصال تأثیرگذار است. هندسه هوک و مساحت منطقه اغتشاش حالت شکست را در هنگام بارگذاری کششی/ برشی تعیین می‌کند [21]. در شکل 12 ناحیه اغتشاش و هوک نشان داده شده است. با توجه به شکل 12 در هر دو سمت سوراخ کلیدی، دو ناحیه هم‌اندازه تشکیل شده و ناحیه هوک کنار منطقه اغتشاشی ایجاد شده است. با توجه به انتخاب پارامترها در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای الگوهای متفاوتی از جریان مواد در ناحیه اغتشاش بدست آمده که نتیجه آن ایجاد نواحی اغتشاشی مختلف است. مطابق با مطالب بیان شده، ناحیه هوک به شکل مستقیم از ناحیه اغتشاش تبعیت می‌کند [11]. دو ویژگی هندسی بر اساس ناحیه هوک تعریف شده است: 1- عرض مؤثر جوش  $W_{eff}^1$  2- ضخامت مؤثر ورق بالایی  $T_{eff}^2$ . کم‌ترین فاصله بین نوک هوک و محیط سوراخ کلیدی عرض مؤثر جوش ( $W_{eff}$ ) نامیده شده و کوتاه‌ترین فاصله بین نوک هوک تا سطح ورق رویی، ضخامت مؤثر ورق بالایی ( $T_{eff}$ ) نامیده شده است [1]. جهت دستیابی به اتصالی با خواص مکانیکی مطلوب بایستی طول  $W_{eff}$  و  $T_{eff}$  تا حد امکان افزایش یابد [29].

### 3-2-2- حالت شکست اتصالات

در هنگام آزمایش کشش، ترک از ناحیه نوک هوک آغاز شده است. سپس مسیر گسترش ترک بر اساس  $W_{eff}$  و  $T_{eff}$  مشخص شده و در نهایت شکست در اتصال ایجاد شده است [19,11,7,1]. در حالت کلی، دو نوع شکست برای اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مطرح شده است: 1- شکست سطحی از ناحیه اغتشاش (شکست برشی) 2- خارج شدن ناگت جوش [25,11]. در موارد محدودی انواع دیگری نیز برای شکست ورق‌ها مشاهده شده است. پایدار و همکاران [21] چهار نوع متفاوت از شکست اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را بیان کردند. جانکره و همکاران [30] سه حالت برای شکست اتصالات مطرح کردند. در تحقیق مرزوق و همکاران [9] بیان شد که حالت شکست در جوش‌های نقطه‌ای توسط ضخامت ورق‌ها، قطر جوش و استحکام موضعی اتصال قابل تعیین است. ورق‌های ضخیم‌تر، جوش‌های با قطر کم‌تر و اتصالات معیوب باعث شکست برشی شده است. در این تحقیق پس از آزمایش کشش سه حالت متفاوت برای شکست ورق‌ها مشاهده شد.

<sup>1</sup> Effective Weld Width ( $W_{eff}$ )

<sup>2</sup> Effective Thickness of Upper Sheet ( $T_{eff}$ )

با توجه به جدول 10 اتصال شکسته شده در این حالت، بیش‌ترین درصد ازدیاد طول را در میان تمامی اتصالات نشان داده است. در این حالت با انتخاب پارامترهای بهینه، مقدار  $W_{eff}$  و  $T_{eff}$  افزایش یافته و باعث دستیابی به اتصالی با خواص مکانیکی مطلوب شده است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش باکس- بنکن در اتصالات ورق‌های آلایژ آلومینیوم 7075-T6 مدل‌سازی و بهینه‌سازی شد. هم‌چنین تأثیر پارامترهای سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، سرعت پیشروی عمودی ابزار و جنس صفحه پشتیبان بر نیرو و حالت‌های شکست در اتصالات بررسی شد و نتایج به شرح زیر بدست آمد:

- تعیین محدوده پارامترها بر اساس آزمایش‌های تجربی انجام شد. انتخاب مقادیر پارامترها خارج از محدوده تعریف شده باعث ایجاد اتصالاتی با خواص مکانیکی ضعیف شد.

- مدل ایجادشده قابلیت پیش‌بینی 96 درصدی نیروی شکست این نوع اتصال با شرایط و مواد بررسی شده در این تحقیق را دارا می‌باشد.

- بر اساس پاسخ بهینه نرم‌افزار، بیش‌ترین نیروی شکست اتصال برابر 9688 با استفاده از سرعت دورانی 800 rpm، عمق نفوذ 2/255 mm، صفحه پشتیبان Ti6Al4V و سرعت پیشروی عمودی ابزار 5 mm/min پیش‌بینی شد که افزایش 4/7 درصدی را نسبت به بیشترین نیروی حاصل از آزمایش تجربی نشان می‌دهد.

- با توجه به مقادیر  $F$  مشخص شد که عمق نفوذ ابزار، بیشترین تأثیر را بر نیروی شکست اتصال دارد. میزان تأثیر پارامترها بر نیروی شکست اتصال به ترتیب عبارت است از: عمق نفوذ، جنس صفحه پشتیبان، سرعت پیشروی عمودی و سرعت دورانی ابزار.

- برای اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی شده شش آزمایش تکرار شد. میزان خطا بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده کم‌تر از 3- درصد بدست آمد، که قابلیت پیش‌بینی بسیار بالای مدل را نشان می‌دهد.

- با استفاده از صفحه پشتیبان تیتانیومی دمای منطقه اختلاط بواسطه تمرکز حرارتی ایجاد شده ناشی از کنترل دما توسط صفحه پشتیبان، افزایش خواهد یافت. از آنجاکه فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بسیار سریع‌تر از فرایند

در شکل 14 شماتیکی از مقطع اتصال و تصویر نمونه شکسته شده در حالت شکست از ناحیه تورفتگی شانه ارائه شده است. در این حالت شکست فاصله نوک هوک تا ورق بالایی کم‌تر از فاصله نوک هوک تا سوراخ کلیدی است، که نتیجه آن گسترش ترک در مسیر ضخامت ورق بالایی است. با توجه به جدول 10، اغلب اتصالات با عمق نفوذ 2/4 mm بصورت شکست از ناحیه تورفتگی شانه جدا شدند. بنابراین عمق نفوذ ابزار مهم‌ترین پارامتر در تغییر حالت شکست اتصالات است. این مشاهده با نتایج مرزوق و همکاران [9] و سانگ و همکاران [29] قابل تأیید است.

3- شکست کششی (شکست از ناحیه مجاور تورفتگی شانه): این حالت شکست در شرایط استفاده از پارامترهای سرعت دورانی 800 rpm، عمق نفوذ 2/4 mm، سرعت پیشروی عمودی 15 mm/min با استفاده از صفحه پشتیبان تیتانیومی بدست آمد. در شکل 15 تصویر اتصال پس از شکست ارائه شده است. در این حالت با وجود اعمال بار در آزمایش کشش، ترک ایجاد شده در قسمت نوک هوک قادر به حرکت در مسیر عرض جوش و یا ضخامت ورق رویی نبوده و قبل از ایجاد نیروی کافی برای گسترش ترک در جهات  $W_{eff}$  و  $T_{eff}$ ، ورق از ناحیه مجاور با تورفتگی شانه پاره شده است.

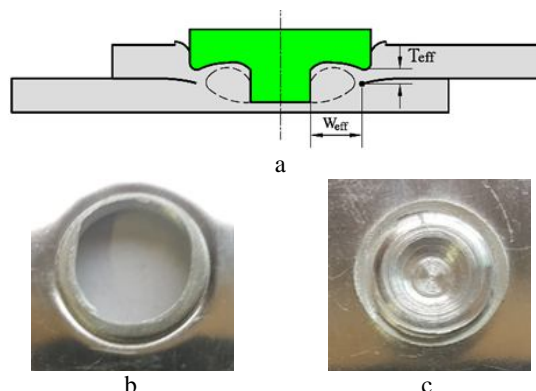


Fig.14 a) Schematic of joint section leading to nugget pull out b) bottom view of upper sheet c) top view of lower sheet

شکل 14 a) شماتیکی مقطع اتصال منجر به حالت شکست از ناحیه تورفتگی شانه (b) نمای پایین از ورق بالایی (c) نمای بالا از ورق زیری

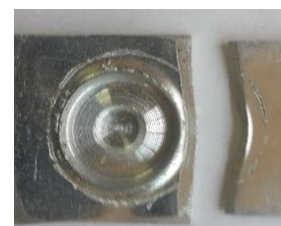


Fig. 15 Picture of failed joint in adjacent region of shoulder indentation شکل 15 تصویر اتصال شکسته شده از ناحیه مجاور با تورفتگی شانه

- [9] M. Merzoug, M. Mazari, L. Berrahal, A. Imad, Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys, *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 3023-3028, 2010.
- [10] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, 844-851, 2010.
- [11] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu and B. Zou, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 4462-4470, 2011.
- [12] M. Sajed, Parametric study of two stage refilled friction stir spot welding, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, pp. 307-317, 2016
- [13] Z. Zhang, W. Li, J. Shen, Y. J. Chao, J. Li, Y. E. Ma, Effect of backplate diffusivity on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints, *Materials & Design*, Vol. 50, pp. 551-557, 2013.
- [14] M. Imam, V. Racherla, K. Biswas, Effect of backing plate material in friction stir butt and lap welding of 6063-T4 aluminium alloy, *International Journal of Advance Manufacture Technology*, Vol. 77, pp. 2181-2195, 2015.
- [15] P. Upadhyay, A. Reynolds, Effect of Backing Plate Thermal Property on Friction Stir Welding of 25 mm Thick AA6061, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 45, pp. 2091-2100, 2014.
- [16] Z. H. Zhang, W. Y. Li, Y. Feng, J. L. Li, Y. J. Chao, Improving mechanical properties of friction stir welded AA2024-T3 joints by using a composite backplate, *Materials Science & Engineering*, Vol. 598, pp. 312-318, 2014.
- [17] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 4th edition, New York, John Wiley & Sons, 2001.
- [18] A. H. Azizi, V. Zakeri Mehrabad, A. Mostofi Zadeh, R. Azarafza, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminum alloy joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 56-66, 2013. (In Persian)
- [19] M. Sajed and H. Bisadi, Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys, *Weld World*, Vol. 60, pp. 33-40, 2016.
- [20] H. Badarinarayan, Y. Shi, X. Li, K. Okamoto, Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. *International Journal of Machine tools & Manufacture*, Vol. 49, pp.814-823, 2009.
- [21] M. Paidar, A. Khodabandeh, M. Lali Sarab, M. Taheri, Effect of welding parameters (plunge depths
- جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی خطی انجام می‌شود، لذا ایجاد دمای کافی در منطقه خمیری الزامی است. بنابراین با افزایش دما در صورت بکارگیری از صفحه پشتیبان تیتانیومی، مواد تغییر شکل پلاستیک بیش‌تری را تحمل می‌کنند.
- سه حالت متفاوت برای شکست ورق‌ها پس از آزمایش کشش مشاهده شد. (a) شکست سطحی از ناحیه اغتشاش (b) شکست از ناحیه تورفتگی شانه (c) شکست از ناحیه مجاور با تورفتگی شانه. اتصال شکسته شده در حالت c، بهترین خصوصیات مکانیکی را از خود نشان داد.
- عمق نفوذ ابزار مهم‌ترین پارامتر در تغییر حالت شکست اتصالات است. بطوریکه در عمق نفوذ 1/6 mm تمامی اتصالات بصورت برشی شکسته شدند و با افزایش عمق نفوذ اغلب اتصالات از ناحیه تورفتگی شانه شکسته شدند.

## 5- مراجع

- [1] Z. K Shen, X. Q Yang, Z. H Zhang, L. Cui, Y. H. Yin, Mechanical properties and failure mechanisms of friction stir spot welds of AA 6061-T4 sheets, *Materials & Design*, Vol. 49, pp. 181-191, 2013.
- [2] R. S. Mishra, Z. Y. Mahoney, Friction stir welding and processing. *Material Science Engineering*, Vol. 50, pp 1-78, 2005.
- [3] N. Nguyen, D. Y. Kim, H. Y. Kim, Assessment of the failure load for an AA6061-T6 friction stir spot welding joint, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, pp. 1746-1756, 2011.
- [4] A. Garg, A. Bhattacharya, On lap shear strength of friction stir spot welded AA6061 alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 26, pp. 203-215, 2017.
- [5] Z. Shen, X. Yang, Z. Zhang, L. Cui, T. Le, Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints, *Materials & Design*, Vol. 44, pp. 476-486, 2013.
- [6] W. J. Aebegast, Friction stir welding after a decade of development, *Weld Journal*, Vol. 85, pp. 28-35, 2006.
- [7] V. X. Tran, J. Pan, T. Pan, Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3724-3739, 2009.
- [8] Q. Yang, S. Mironov, Y. S. Sato, K. Okamoto, Material flow during friction stir spot welding. *Materials Science and Engineering*, Vol. 527, pp. 4389-4398, 2010.

- parameters for joining AA2024 aluminum alloy using RSM, *International Journal of Advance Manufacture Technology*, Vol. 51, pp. 173-183, 2010.
- [27] A.I. Khuri, J. Cornell, Response surfaces (design and analysis), Marcel Dekker, New York, 1996.
- [28] M. Sundaram, B. Visvalingam, Optimizing the friction stir spot welding parameters to attain maximum strength in Al/Mg dissimilar joints, *Journal of Welding and Joining*, Vol. 34, pp. 23-30, 2016.
- [29] X. Song, L. Ke, L. Xing, F. Liu, C. Huang, Effect of plunge speeds on hook geometries and mechanical properties in friction stir spot welding of A6061-T6 sheets, *International Journal of Advance Manufacture Technology*, Vol. 71, pp. 2003-2010, 2014.
- [30] C. Jonckheere, B. Meester, C. Cassiers, M. Delhay, A. Simar, Fracture and mechanical properties of friction stir spot welds in 6063-T6 aluminum alloy, *International Journal of Advance Manufacture Technology*, Vol. 62, pp. 569-575, 2012.
- [31] M. Paidar, A. Khodabandeh, H. Najafi, A. Sabour Rouh-aghdam, Effects of the tool rotational speed and shoulder penetration depth on mechanical properties and failure modes of friction stir spot welds of aluminum 2024-T3 sheets, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, pp. 4893-4898, 2014.
- of shoulder, pin geometry and tool rotational speed) on the failure mode and stir zone characteristics of friction stir spot welded aluminum 2024-T3 sheets, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, pp. 4639-4644, 2015.
- [22] A. Lotfi, S. Nourouzi, The microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy by the use of design of experiment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 17-26, 2014. (In Persian)
- [23] M. Tutar, H. Aydin, C. Yuce, N. Yavuz, A. Bayram, The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array, *Materials & Design*, Vol. 63, pp. 789-797, 2014.
- [24] O. Ojo, E. Taban, E. Kaluc, Understanding the role of welding parameters and tool profile on the morphology and properties of expelled flash of spot welds, *Materials & Design*, Vol. 108, pp. 518-528, 2016.
- [25] Y. Bozkurt, M. Bilici, Application of Taguchi approach to optimize of FSSW parameters on joint properties of dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloy, *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 513-521, 2013.
- [26] R. Karthikeyan, V. Balasubramanian, Predictions of the optimized friction stir spot welding process