



## بررسی تجربی و عددی شکل پذیری ورق آلیاژی آلومینیوم 5083 اتصال داده شده با جوش اصطکاکی اغتشاشی در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای

پیام طیبی<sup>1</sup>، علی فضلی<sup>2\*</sup>، پرویز اسدی<sup>2</sup>، مهدی سلطان پور<sup>2</sup>

1 - فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

\* قزوین، صندوق پستی 3414895817، a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 آذر 1396

پذیرش: 03 بهمن 1396

ارائه در سایت: 02 اسفند 1396

کلید واژگان:

شکل دهی تدریجی

شکل پذیری

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

زاویه شکل دهی

توزیع ضخامت

### چکیده

در این مقاله شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای (SPIF) ورق‌های آلیاژی آلومینیوم 5083 که با فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) اتصال داده شده‌اند به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. ورق‌ها با ضخامت 2 میلی‌متر با سرعت دورانی و پیشروی یکسان جوش کاری شده است. برای بررسی اثر جوش کاری FSW بر شکل‌پذیری در فرایند SPIF، ورق‌های یکپارچه و ورق‌های FSW شده به صورت مخروطی شکل دهی شده و حداکثر زاویه دیواره برای هر دو حالت تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که حداکثر زاویه شکل دهی برای ورق FSW شده آلیاژ 5083 با ورق یکپارچه تفاوت زیادی ندارد و جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی تأثیر منفی بر شکل‌پذیری ورق ندارد. برای بررسی اثر فرایند SPIF و FSW بر خواص مکانیکی و میکروساختاری ورق آلومینیوم 5083 اثر این دو فرایند بر میکروسختی و اندازه دانه‌ها تحلیل شده است. در ادامه، فرایند شکل دهی تدریجی ورق یکپارچه و ورق FSW شده با نرم افزار المان محدود آباکوس مدل سازی شده است. پس از صحت‌گذاری شبیه‌سازی، تأثیر فرایند FSW بر توزیع ضخامت و توزیع کرنش در فرایند شکل دهی تدریجی بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده توزیع ضخامت یکنواخت، توزیع کرنش اصلی یکنواخت و توزیع کرنش فرعی غیریکنواخت در شکل دهی نمونه FSW شده است.

## Experimental and numerical investigation of the formability of friction stir welded 5083 aluminum alloy sheets in single point incremental forming process

Payam Tayebi, Ali Fazli\*, Parviz Asadi, Mahdi Soltanpour

Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

\* P.O.B. 3414895817 Qazvin, Iran, a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 December 2017

Accepted 23 January 2018

Available Online 21 February 2018

### Keywords:

Incremental forming

Formability

friction stir welding

forming angle

thickness distribution

### ABSTRACT

In this paper, the single point incremental forming (SPIF) of friction stir welded (FSWed) 5083 aluminum alloy sheets are investigated experimentally and numerically. The aluminum sheets with 2mm thickness are friction stir welded with the same FSW parameters. In order to obtain the effect of FSW on the formability of SPIF, the base sheets and FSWed sheets are formed to conical shapes with different forming angles and then the limiting wall angles are determined for each condition. The experimental results indicate that the limiting forming angle of FSWed sheet is not so much different than the base sheet and FSW does not have a negative effect on the sheet metal formability in SPIF. To study the effect of SPIF and FSW in mechanical and microstructural properties of the formed parts, the effects of these process on the grain size and micro-hardness is investigated. Furthermore, the incremental forming is numerically simulated using the ABAQUS software and the sheet thickness distribution, obtained from the simulation, is compared with the experimental results. After verification of the numerical simulation model, the effect of FSW on the thickness distribution and strain distribution in SPIF is studied. The results indicate that in weld region and base metal region, the distributions of thickness and major strain are uniform while the distribution of minor strain is non-uniform.

### 1- مقدمه

مقرون به صرفه و انعطاف پذیر برای تولید این گونه قطعات استفاده کنند که با حداقل هزینه، تولید قطعات در تعداد کم و متوسط را بدون نیاز به ساخت قالب فراهم سازد. شکل دهی تدریجی<sup>1</sup> یک فرایند جدید برای تولید قطعات ورق فلزی در تولید با حجم کم و نمونه سازی است. از مزیت های این روش می توان به انعطاف پذیری، قابلیت کنترل عددی فرآیند و پایین بودن هزینه

امروزه فرآیندهای شکل دهی فلزات به عنوان یکی از روش های مهم ساخت و تولید قطعات محسوب می شوند. شناخت هرچه دقیق تر روش های شکل دهی، صنعت گران را به سمت تولید قطعات با کیفیت بالاتر سوق می دهد. بالا بودن هزینه تهیه قالب در روش های شکل دهی معمولی و امکانات فراوان مورد نیاز برای شکل دهی قطعات پیچیده صنعتگران را به فکر واداشت تا از روشی

<sup>1</sup> Incremental Forming

### Please cite this article using:

P. Tayebi, A. Fazli, P. Asadi, M. Soltanpour, Experimental and numerical investigation of the formability of friction stir welded 5083 aluminum alloy sheets in single point incremental forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 45-55, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.mme.modares.ac.ir

دانه در منطقه اغتشاش باعث افزایش شکل‌پذیری نمونه می‌شود. احمدنیا و همکارانش [12] تأثیر ارتعاش التراسونیک ابزار FSW بر شکل‌پذیری ورق آلومینیوم 6061 جوش‌کاری شده در آزمون تاگوشی<sup>5</sup> را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ارتعاش التراسونیک با قدرت بالا باعث نرم شدن ماده و کاهش چگالی نابجایی‌ها و نهایتاً بهبود شکل‌پذیری ورق 6061 می‌شود.

در خصوص شکل‌دهی تدریجی ورق‌های جوش‌کاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی نیز در سالیان اخیر تحقیقاتی گزارش شده است. در سال 2006 امبرگیو و همکارانش فرآیند شکل‌دهی تدریجی را بر روی ورق‌های FSW شده انجام دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود بیشتر بر روی زاویه حد شکل‌دهی توجه داشتند و توانستند ورق‌های آلومینیومی با ضخامت 1.2 به شکل هرم را تا زاویه 50 درجه و عمق 40 میلی‌متر شکل‌دهی کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زاویه حد شکل‌دهی در ورق‌های FSW شده آلومینیوم AA6181-T4 نسبت به ورق یکپارچه تنها 8 درجه کمتر است که در مقایسه با روش‌های مرسوم جوش‌کاری بسیار ناچیز است [13]. در سال 2009 سیلوا و همکارانش ورق‌های FSW شده را شکل‌دهی تدریجی کردند و قطعات مخروطی و هرمی معیار<sup>6</sup> با عمق بالا را شکل‌دهی کردند و براساس نتایج اعلام کردند که شکل‌دهی تدریجی امکان تولید قطعات پیچیده از ورق‌های FSW شده را دارد [14]. در سال 2014 راتاناچان و همکارانش شکل‌پذیری ورق‌های غیرهمجنس SUS304 و St37 جوش‌کاری شده با لیزر CO<sub>2</sub> را بررسی و با شکل‌دهی تدریجی ورق یکپارچه از هر کدام از دو ورق پایه مقایسه کردند. شکل‌پذیری ورق یکپارچه SUS304 کمتر از ورق یکپارچه St37 و شکل‌پذیری ورق TWB کمتر از هر دوی آن‌ها بود. پارگی در قطعه TWB شده بر روی خط جوش بوده که به‌علت شکل‌پذیری پایین خط جوش CO<sub>2</sub> و کرنش‌های کمتر روی خط جوش بوده است [15]. ابراهیم‌زاده و همکارانش در سال 2017 شکل‌پذیری ورق‌های FSW شده در روش شکل‌دهی تدریجی SPIF و TPIF را مقایسه کردند [16]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شکل‌پذیری ورق در روش TPIF تا حدود 40 درصد بیشتر از SPIF است. با توجه به شکل‌پذیری بالاتر در فرایند TPIF پارامترهای بهینه این فرایند با روش سطح پاسخ (RMS)<sup>7</sup> به‌دست آمد. علی‌نقیان و همکارانش در سال 2017 اثر زاویه بین خط جوش و جهت نورد را در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های FSW شده بررسی کردند [17]. آن‌ها بیان کردند که ورق‌های با زاویه 45 درجه بین خط جوش و جهت نورد، نسبت به راستای جوش موازی و عمود بر نورد شکل‌پذیری بالاتری دارد. آن‌ها با روش RSM پارامترهای بهینه جوش‌کاری و شکل‌دهی برای حصول به توزیع ضخامت بهتر را به‌دست آوردند.

با وجود کارهایی که در مقالات بیان شده در خصوص شکل‌پذیری ورق‌های FSW شده در فرایند شکل‌دهی تدریجی انجام شده است، اثر شکل‌دهی تدریجی بر ریزساختار ماده و توزیع کرنش بررسی نشده است. در این مقاله زاویه حد شکل‌دهی ورق آلیاژی آلومینیوم 5083 اتصال داده شده با FSW به‌دست آمده با زاویه حد شکل‌دهی ورق یکپارچه مقایسه شده است. همچنین اثر شکل‌دهی تدریجی بر روی ریزساختار و میکروسختی ورق در ناحیه جوش و فلز پایه بررسی شده است. علاوه بر آن برای بررسی توزیع کرنش در ورق‌های جوش داده شده، فرایند SPIF شبیه‌سازی شده و پس از صحنه‌گذاری آن با نتایج تجربی، تأثیر فرایند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی بر توزیع کرنش و توزیع ضخامت در ناحیه جوش و فلز پایه بررسی شده است.

تجهیزات اشاره کرد. شکل‌دهی تدریجی به‌طور کلی به دو دسته‌ی شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای (SPIF)<sup>1</sup> و دونقطه‌ای (TPIF)<sup>2</sup> تقسیم می‌شود. دقت هندسی و کیفیت قطعه تولیدشده در فرایند شکل‌دهی تدریجی وابسته به تعدادی پارامتر است که این پارامترها عبارت‌اند از: 1- زاویه حد شکل‌دهی 2- جنس ورق 3- مسیر ابزار 4- ضخامت ورق 5- شکل و اندازه ابزار 6- شرایط روان‌کاری 7- سرعت دورانی و پیشروی 8- جهت چرخش اسپیندل 9- گام عمودی. یکی از اجزاء اصلی در شکل‌دهی تدریجی ورق، جنس ورق است که بسیاری از پارامترهای فرایند به آن بستگی دارد و تحقیقات متعددی در این خصوص انجام شده است. لی [1] کاربرد فناوری SPIF برای مواد ترموپلاستیکی را بررسی کرد. آن‌ها در آزمایش‌های خود به بررسی اثر پارامترهای SPIF بر شکل‌پذیری ورق‌های ترموپلاستیکی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که قطر ابزار اثر قابل توجهی بر شکل‌پذیری ورق دارد. اچریف و همکارانش [2] نشان دادند که ورق‌های آلومینیوم نسبت به ورق‌های فولادی نیروی شکل‌دهی کمتری برای شکل‌دهی می‌خواهند. جسویت و همکارانش [3] به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر ابزار، شکل‌پذیری ماده کاهش می‌یابد. هام و جسویت [4] تأثیر قطر ابزار برای ماکزیمم زاویه‌ی شکل‌دهی ورق آلومینیوم AA3003 نشان دادند و دریافتند که استفاده از ابزار شکل‌دهی با قطر کوچکتر به‌دلیل ایجاد گرمای بیشتر در نوک ابزار باعث افزایش شکل‌پذیری ورق می‌شود. لیو و همکارانش [5] نشان دادند که با افزایش گام عمودی از 0.2 میلی‌متر به 0.5 میلی‌متر می‌توان مخروطی با زاویه دیواره بزرگتر به دست آورد که نشان‌دهنده بهبود شکل‌پذیری است. ژو و همکارانش در سال 2013 [6] در آزمایش‌های خود تأثیر سرعت دورانی بر مقدار شکل‌پذیری ورق را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به‌جز بازه سرعتی 200 تا 1000 دور بر دقیقه، در سایر سرعت‌ها با افزایش سرعت دورانی شکل‌پذیری افزایش پیدا می‌کند. زاهدی و همکارانش [7] به این نتیجه رسیدند که با افزایش گام عمودی و شعاع ابزار زاویه حد شکل‌دهی کاهش پیدا می‌کند. طاهرخانی و همکارانش [8] به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی شکل‌پذیری و کیفیت سطح ورق افزایش پیدا می‌کند.

استفاده از ورق‌های تکه‌دوزی شده TWB<sup>3</sup> در صنایع حمل و نقل مزایای ویژه‌ای چون افزایش استحکام و شکل‌پذیری قطعه‌ی نهایی در فرایند شکل‌دهی را در بردارد. همچنین استفاده از این ورق‌ها می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ی تولید، کاهش وزن وسایل نقلیه و نهایتاً کاهش مصرف سوخت شود. لازم به ذکر است که از ورق‌های TWB در صنایع هوافضا و سایر صنایع حساس، می‌توان برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا که با روش‌های معمولی به‌راحتی جوش‌کاری نمی‌شوند، استفاده کرد [9]. یکی از روش‌های تولید ورق‌های TWB جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)<sup>4</sup> است که با توجه به بازدهی انرژی بالا و سازگاری خوبی که با محیط‌زیست دارد، امروزه به‌عنوان یک روش جدید جوش‌کاری حالت جامد در صنایع مختلف کاربرد دارد. در دهه‌ی گذشته، جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی، بیشترین توسعه را در اتصالات داشته است. فرایند اصطکاکی اغتشاشی برای ایجاد تغییرات میکرو ساختاری در مواد نیز، به کار می‌رود [10]. هیراتا و همکارانش [11] تأثیر ریزساختار فرایند FSW بر شکل‌پذیری ورق آلومینیوم 5083 را به‌وسیله آزمون بالج بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که درشت بودن

<sup>1</sup> Single Point Incremental Forming

<sup>2</sup> Two Point Incremental Forming

<sup>3</sup> Tailored Welded Blank

<sup>4</sup> Friction Stir Welding

<sup>5</sup> Taguchi

<sup>6</sup> Benchmark

<sup>7</sup> Response Surface Methodology

## 2- آزمایش‌های تجربی

برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های FSW شده در فرایند شکل‌دهی تدریجی، ابتدا ورق آلیاژی آلومینیوم 5083 با جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی جوش داده می‌شود و سپس ورق‌های جوش کاری شده با فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای شکل داده می‌شود.

### 2-1- جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

ابعاد نمونه‌های موردنظر برای شکل‌دهی تدریجی، مربعی  $160 \times 160$  میلی‌متر می‌باشد که یک خط جوش در مرکز آن و در راستای طول آن قرار دارد؛ اما به دلیل این‌که در ابتدای خط جوش شرایط جوش کاری مناسب نیست و در انتهای خط جوش نیز اثر ابزار بر روی ورق باقی می‌ماند، طول نمونه‌ها به اندازه 30 میلی‌متر از اندازه اسمی ورق بلندتر لحاظ شد و ورق آلومینیومی در ابعاد  $190 \times 80$  میلی‌متر به وسیله گیوتین برش داده شده است.

در حین فرایند جوش کاری نیروهای زیادی به ورق‌ها وارد می‌شود که سبب جدا شدن 2 ورق از یکدیگر می‌شود. برای جلوگیری از این اتفاق یک فیکسچر برای ثابت نگه‌داشتن آن‌ها استفاده شده است. ورق‌ها توسط 6 عدد رولند بر روی سطح فیکسچر مهار شده است. نحوه گیره‌بندی ورق‌ها در شکل (1-a) مشاهده می‌شود.

ابزار مورد استفاده در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی که نقش مهمی در تعیین کیفیت و استحکام جوش اصطکاکی اغتشاشی دارد با توجه به ضخامت ورق هندسه پین ابزار طراحی شد. پین ابزار به صورت مربعی [18] و با ابعاد  $3.5 \times 3.5$  میلی‌متر است. با توجه به ضخامت ورق که 2 میلی‌متر است طول پین ابزار 1.8 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قطر شانه ابزار نیز 14 میلی‌متر با زاویه تقعر 2 درجه در نظر گرفته شده است. در شکل (1-b) ابزار FSW نشان داده شده است. ابزار از جنس فولاد گرم کار H13 ساخته شده است. برای افزایش مقاومت به سایش آن، سختی آن با عملیات حرارتی به 52 تا 54 راکول سی رسیده است.

جهت تأمین حرکت دورانی و خطی ابزار در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی از یک ماشین فرز عمودی مدل FP4M ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده شد. برای جریان بهتر مواد در زیر ابزار، محور اسپیندل نسبت به راستای عمود بر ورق 3 درجه منحرف شد. قبل از بستن ورق‌ها بر روی فیکسچر، منطقه جوش کاری توسط برس سیمی اکسیدزدایی شد. پارامترهای مناسب جوش کاری با آزمون‌های مختلف بدست آمد که نتایج در مقاله [19] گزارش شده است. براساس این نتایج، پارامترهای سرعت دورانی و پیشروی ابزار جوش کاری در تمامی آزمایش‌ها به ترتیب 800 دور بر دقیقه و 40 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته و بر روی دستگاه تنظیم شد. بعد از بستن ورق‌ها، دستگاه روشن شده و ابزار در حال دوران تا زمانی که حدود دو سوم شانه ابزار با ورق در تماس باشد، در ورق فرو می‌رود. برای این‌که درجه حرارت ورق به اندازه کافی بالا برود ابزار در همان حالت نفوذی به مدت حدوداً 30 ثانیه درجا دوران کند و سپس حرکت پیشروی میز شروع شده و ابزار در طول خط جوش حرکت می‌کند.

### 2-2- شکل‌دهی تدریجی

در فرایند شکل‌دهی تدریجی لازم است که محیط ورق کاملاً مهار شود. بدین منظور و با توجه به هندسه مخروطی شکل قطعات فیکسچری نیز به صورت استوانه‌ای شکل که در شکل 2 نشان داده شده است، با قطر خارجی 240

میلی‌متر و قطر داخلی 130 میلی‌متر طراحی و ساخته شد. نیروی ورق‌گیر فیکسچر توسط 3 عدد پیچ تأمین می‌شود.

برای شکل‌دهی تدریجی از یک ابزار سرکروی به قطر 14 میلی‌متر از جنس فولاد VCN150 استفاده شده است.

برای انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی نیاز به حرکت هم‌زمان ابزار با یک مسیر مشخص در 3 جهت X و Y و Z است. لذا برای فرایند شکل‌دهی تدریجی از ماشین فرز CNC سه محوره FP4MD ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز با کنترلر زیمنس D810 استفاده شد. مسیر انتخاب شده در این پژوهش مسیر مارپیچ است و ابزار باید در هر دور دوران با گام مشخصی در راستای محور Z حرکت و قطعه را شکل‌دهی کند. برنامه کنترل عددی مسیر مارپیچ مورد نیاز فرایند توسط نرم‌افزار پاورمیل ایجاد و وارد دستگاه شد. بعد از بسته شدن ورق بر روی فیکسچر شکل‌دهی تدریجی و آماده شدن دستگاه فرز CNC شکل‌دهی تدریجی انجام می‌شود. در آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی سرعت دورانی ابزار 500 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 1200 میلی‌متر بر دقیقه و گام عمودی 0.5 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در "شکل 2" فرایند شکل‌دهی تدریجی با دستگاه فرز CNC مشاهده می‌شود. بعد از شکل‌دهی قطعات برای اندازه‌گیری توزیع ضخامت در قطعات تولید شده، ضخامت قطعه در نقاط مختلفی در راستای یک خط شعاعی و در فواصل 8 میلی‌متر تعیین شد. برای این منظور بعد از تنظیم پین یک ساعت اندازه‌گیری با دقت 0.01 میلی‌متر روی یک پین نوک‌تیز، نقطه موردنظر قطعه بین دو پین قرار گرفت، حداقل مقدار اندازه‌گیری شده توسط ساعت به عنوان ضخامت آن نقطه لحاظ شد.

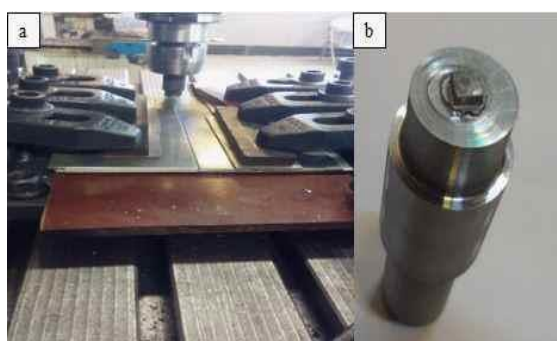


Fig. 1 (a) friction stir welding fixture. (b) Friction stir welding tool with square pin profile

شکل 1. (a) فیکسچر جوش اصطکاکی اغتشاشی. (b) ابزار جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با پین مربعی



Fig. 2 The milling machine and fixture used for incremental forming process

شکل 2 دستگاه فرز و فیکسچر استفاده شده برای فرایند شکل‌دهی تدریجی

### 2-3- میکروسختی و ریز ساختار

منطقه جوش و خواص به‌دست آمده از آزمون کشش ورق پایه به سایر نواحی اعمال شد. ورق، دایره ای به قطر 120 میلی‌متر مدل‌سازی و ابعاد منطقه جوش با توجه به آزمایش‌های تجربی 14 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جهت توزیع یکنواخت و بهتر المان‌ها، ورق با هندسه مناسبی تقسیم‌بندی<sup>4</sup> شد و سپس با المان‌های شل مربعی S4R با اندازه حدود 2 میلی‌متر مش‌بندی شد. بین قالب، ابزار و ورق اصطکاک کولمب با ضریب اصطکاک 0.1 در نظر گرفته شد. در فرایند SPIF محیط ورق توسط ورق‌گیر کاملاً مقید است و امکان حرکت در جهت شعاعی را ندارد. به همین دلیل ورق‌گیر مدلسازی نشد و به جای آن تمام شش درجه آزادی محیط ورق گرفته شد. برای حل مدل ایجاد شده از حل‌گر دینامیکی ضمنی<sup>5</sup> استفاده شد و با توجه به زمان بالای موردنیاز برای تحلیل فرایند شکل‌دهی تدریجی، برای کم کردن زمان حل از بزرگ‌نمایی جرمی 10000 در فرایند شبیه‌سازی استفاده شده است. فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق یکپارچه و ورق جوش کاری شده برای زاویه‌های شکل‌دهی 57.5، 60، 61.3 و 65 درجه شبیه‌سازی شد. با مقایسه نتایج تجربی و مدل‌سازی توزیع ضخامت، مدل‌سازی المان محدود صحه‌گذاری شد و سپس توزیع کرنش در قطعه شکل داده شده بررسی گردید.

### 3- بحث و نتایج

#### 3-1- نتایج فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

نمونه‌های ورق‌های آماده شده با پارامترهای یکسان که در "بخش 1-2" توضیح داده شده جوش داده شدند که کیفیت ظاهری جلو و پشت خط جوش در "شکل 5" مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود جوش ایجاد شده، از نظر کیفیت ظاهری قابل قبول است.

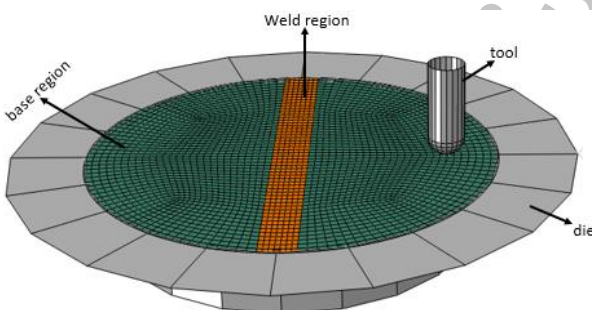


Fig. 4 Finite element model of the incremental forming process in ABAQUS software

شکل 4 مدل المان محدود فرایند شکل‌دهی تدریجی در نرم‌افزار آباکوس

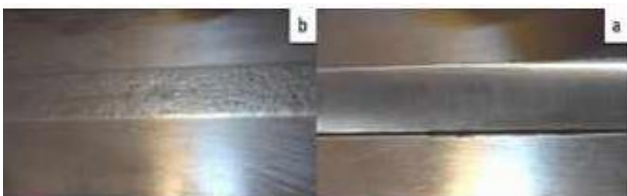


Fig. 5 Friction stir welding of 5083 aluminum sheet. (a) Top surface of the weld, (b) Bottom surface of the weld

شکل 5 جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی ورق آلومینیوم 5083. (a) روی جوش، (b) پشت جوش

برای بررسی تأثیر فرایند FSW و فرایند ISF بر مقدار سختی ورق 5083، از نمونه‌ها بعد از فرایند FSW و فرایند ISF با زاویه شکل‌دهی 60 درجه آزمون میکروسختی ویکرز بر روی سطح مقطع قطعه انجام شده است. در این آزمایش از مقدار بار 100 گرم به مدت 15 ثانیه و با یک فرورونده مربع‌القاعده بر روی سطح پولیش اعمال شده است. سختی در 15 نقطه با فاصله 1 میلی‌متر از هم بر روی سطح مقطع نمونه‌ی جوش کاری شده قبل و بعد از شکل‌دهی اندازه‌گیری شد. برای نمونه‌های ورق یکپارچه قبل و بعد از شکل‌دهی سختی از سطح مقطع در 7 نقطه با فاصله 2 میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

برای بررسی اثر فرایند FSW و فرایند ISF بر میکروساختار ورق آلومینیوم 5083 از نمونه‌های ورق یکپارچه، ورق جوش کاری شده و ورق 5083 جوش کاری شده و شکل‌دهی تدریجی شده، آزمون متالوگرافی به عمل آمد. جهت اچ کردن نمونه‌ها از محلول حکاکی ویک<sup>1</sup> با فرمول شیمیایی 100 ml (H<sub>2</sub>O) + 1gr (NaOH) + 4gr (KMnO<sub>4</sub>) استفاده شد. میکروساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>2</sup> با بزرگ‌نمایی 1000X ارزیابی شد. اندازه‌گیری دانه‌ها نیز توسط نرم‌افزار MIP4 انجام شد.

#### 2-4- تعیین خواص مکانیکی ورق توسط تست کشش

برای بررسی اثر FSW بر خواص مکانیکی منطقه جوش و همچنین تعیین خواص مکانیکی جهت مدل‌سازی المان محدود، از ماده پایه و خط جوش، آزمون کشش گرفته شد. ابعاد نمونه‌های انتخاب شده برابر با نمونه سایز کوچک استاندارد ASTM E8M در نظر گرفته شد. در نمونه تهیه شده از منطقه جوش، نمونه آزمون کشش در راستای خط جوش و مرکز نمونه آزمون کشش بر روی مرکز مسیر حرکت ابزار در نظر گرفته شد. در "شکل 3" نمونه‌های آزمون کشش از ناحیه ورق پایه و جوش مشخص است.

#### 2-5- شبیه‌سازی المان محدود

برای شبیه‌سازی المان محدود فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق FSW شده، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد که مدل ایجاد شده در "شکل 4" نشان داده شده است. ابزار و قالب به‌صورت صلب تحلیلی<sup>3</sup> و ورق به صورت الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شده است و فرض شد که از معیار تسلیم فون-میزز پیروی می‌کند. برای در نظر گرفتن اثر خواص مکانیکی متفاوت منطقه جوش نسبت به منطقه فلز پایه، ورق به سه قسمت تقسیم شد و خواص به‌دست آمده از آزمون کشش خط جوش به



Fig. 3 Prepared samples for tensile test from base metal region (down) and FSWed region (up)

شکل 3 نمونه‌های آماده شده برای آزمون کشش از منطقه فلز پایه (پایین) و منطقه FSW شده (بالا)

<sup>4</sup> Partitioning

<sup>5</sup> Dynamic Explicit

<sup>1</sup> weck

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>3</sup> Analytical rigid



## 2-3- نتایج فرایند شکل‌دهی تدریجی

برای مقایسه اثر جوش کاری FSW بر روی شکل‌پذیری ورق آلیاژی آلومینیوم 5083، ابتدا ورق یکپارچه آلومینیوم 5083 در زوایای مختلف 60، 62.5 و 65 درجه شکل داده شد که قطعه شکل‌داده شده در زاویه 60 درجه سالم و قطعه شکل داده شده در زوایای 62.5 و 65 درجه پاره شدند. نتایج حاصل از شکل‌دهی تدریجی ورق پایه 5083 در "شکل 6" و "جدول 1" بیان شده است. براساس این آزمایش، زاویه حد شکل‌دهی برای ورق پایه 5083 برابر با 60 درجه به دست آمد.

بعد از شکل‌دهی ورق پایه، نمونه‌های ورق‌های FSW شده با شرایط بیان شده تهیه و در زوایای مختلف با فرایند شکل‌دهی تدریجی، شکل داده شدند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول 2 بیان شده‌اند. همان‌گونه که در جدول 2 مشخص است، ورق‌های جوش کاری شده نیز تا زاویه 60 درجه سالم شکل گرفتند و در زوایای بالاتر از 60 درجه پارگی در ورق‌ها مشاهده شد. ورق شکل داده شده با زاویه شکل‌دهی 61.3 درجه از ناحیه جوش و در عمق 48.8 دچار پارگی شد؛ اما ورق‌های شکل داده شده در زاویه 62.5 و 65، قبل از پارگی از ناحیه جوش از ناحیه فلز پایه پاره شدند. نتیجه فرایند شکل‌دهی تدریجی برای زوایای 60، 61.3 و 65 درجه در "شکل‌های 7" نشان داده شده است.

## 3-3- بررسی نتایج ریزساختار

فرایند FSW با تغییر شکل شدید و افزایش دما در منطقه جوش همراه است. این افزایش دما در منطقه جوش باعث تبلور مجدد دینامیکی و تغییر در ریز ساختار منطقه اغتشاش<sup>1</sup> و تجزیه رسوبات فازی و درشت شدن دانه‌ها

جدول 2 نتایج شکل‌دهی تدریجی ورق 5083 اتصال داده شده با FSW  
Table 2 Results of the incremental forming of the friction stir welded 5083 aluminum sheet

وضعیت شکل‌دهی	عمق شکل‌دهی (میلی‌متر)	زاویه حد شکل‌دهی (درجه)
سالم	80.75	57.5
سالم	89.75	60
پارگی از ناحیه جوش	48.8	61.3
پارگی از فلز پایه	19.2	62.5
پارگی از فلز پایه	21.28	65

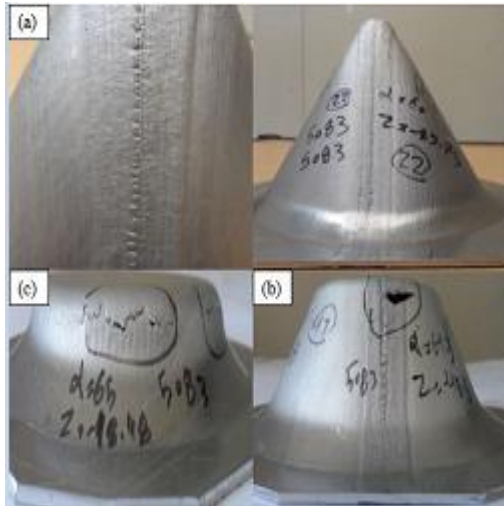


Fig. 7 Incremental forming of friction stir welded 5083 aluminum sheets. (a) 60°, (b) 61.3°, (c) 65°

شکل 7 شکل‌دهی تدریجی ورق آلومینیومی 5083 اتصال داده شده با FSW (a) 60 درجه، (b) 61.3 درجه، (c) 65 درجه

در اطراف منطقه اغتشاش می‌شود. منطقه جوش کاری شده از 3 ناحیه اغتشاش، ناحیه‌ی متأثر از فرایند ترمومکانیکال<sup>2</sup> و منطقه متأثر از حرارت<sup>3</sup> تشکیل شده است. در فرایند FSW به علت تغییر شکل پلاستیک شدید و افزایش دما در منطقه اغتشاش، دانه‌های تیغه‌ای شکل شکسته شده و سپس دانه‌هایی با مزرهایی با زاویه کم ایجاد می‌شود [20]. توزیع اندازه دانه برای ورق یکپارچه 5083 قبل و بعد از فرایند شکل‌دهی تدریجی به ترتیب در "شکل‌های (8-a) و (8-b)" مشخص است. اندازه‌گیری دانه‌ها برای نمونه‌ها انجام شد. به طور میانگین متوسط اندازه دانه برای ورق یکپارچه آلومینیوم 5083 قبل از شکل‌دهی مقدار 30.9 میکرومتر و بعد از فرایند شکل‌دهی مقدار 24.2 میکرومتر بدست آمد. فرایند شکل‌دهی تدریجی با کار سرد در نمونه‌های شکل‌دهی شده همراه است. کار سرد باعث حذف اثرات حاصل از تبلور مجدد دینامیکی شده و افزایش چگالی نابجایی‌ها را به همراه دارد که این می‌تواند از دلایل کاهش اندازه دانه‌ها در نمونه‌های شکل‌دهی شده و در نتیجه افزایش مقدار سختی بعد از فرایند شکل‌دهی باشد. این کار سرد باعث کاهش 21 درصدی اندازه دانه در نمونه ورق پایه می‌شود.

اندازه دانه برای نمونه‌های FSW شده، قبل و بعد از فرایند شکل‌دهی تدریجی به ترتیب در "شکل‌های (8-(c-d)) و (8-(d-f))" نشان داده شده است. متوسط اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی برای ورق FSW شده 12.59 میکرومتر بدست آمد که نسبت به ورق پایه حدود 59 درصد کاهش پیدا کرده است. بعد از فرایند شکل‌دهی تدریجی اندازه دانه برای ورق جوش کاری

جدول 1 نتایج شکل‌دهی تدریجی ورق پایه 5083

Table 1 Results of the incremental forming of the 5083 base sheet

وضعیت شکل‌دهی	عمق شکل‌دهی (میلی‌متر)	زاویه حد شکل‌دهی (درجه)
سالم	89.75	60
پارگی از ناحیه ورق پایه	19.25	62.5
پارگی از ناحیه ورق پایه	18.84	65

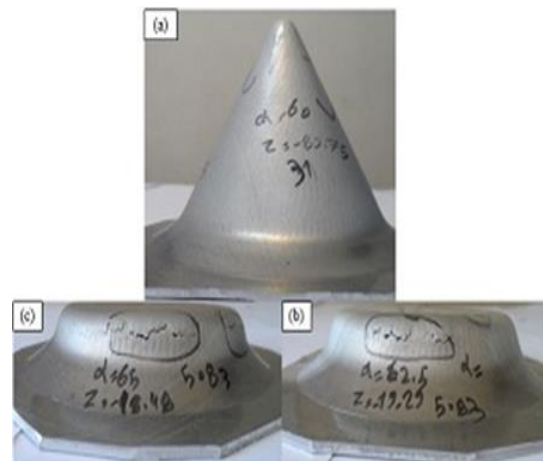


Fig. 6 Incremental forming of 5083 base sheet (a) 60°, (b) 62.5°, (c) 65°

شکل 6 شکل‌دهی تدریجی ورق یکپارچه 5083 (a) 60 درجه، (b) 62.5 درجه، (c) 65 درجه

<sup>2</sup> thermo-mechanically affected zone

<sup>3</sup> Heat affected zone

<sup>1</sup> stir zone

### 3-4 نتایج میکروسختی

نتایج حاصل از میکرو سختی از سطح مقطع نمونه‌ها در "شکل 9" آمده است.

سختی نمونه ورق آلومینیوم 5083 جوش کاری شده، قبل از شکل‌دهی با سختی میانگین 60 ویکرز نسبت به نمونه ورق پایه آلومینیوم 5083 با سختی میانگین 104 ویکرز حدود 43 درصد کاهش پیدا کرده است. همان‌طور که مشخص شد نمونه جوش کاری شده با وجود کاهش اندازه در منطقه اغتشاش با کاهش سختی همراه است. این کاهش سختی به 2 دلیل رخ می‌دهد: 1- کم شدن چگالی نایجایی‌ها و همچنین انجام عملیات آنیل و بازبایی در منطقه جوش 2- تغییرات موضعی دما در حین جوش کاری باعث تغییرات در نرخ انحلال و رسوب مجدد، به خصوص رسوبات سوزنی شکل  $\beta'$  می‌گردد. تشکیل فاز  $\beta'$  که موثرترین عامل استحکام‌دهی از طریق رسوب برای آلیاژ آلومینیوم است، به دلیل سرپایش کم و فرصت نیافتن برای رسوب مجدد در جوش کاری بسیار محدود شده است. با انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی بر روی نمونه آلومینیوم 5083 جوش کاری شده، به علت کرنش سختی، کرنش پلاستیک شدید و افزایش چگالی نایجایی‌ها سختی آن به‌طور میانگین به 82 ویکرز می‌رسد که تا حدود 26 درصد نسبت به قبل از فرایند شکل‌دهی افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که از نمودار سختی نمونه 5083 جوش کاری شده مشخص است کمترین سختی در منطقه اغتشاش یا گلوبی جوش رخ داده است. این کاهش سختی در این منطقه بیشتر برای آلیاژهای عملیات حرارتی‌ناپذیر است. با انجام عملیات شکل‌دهی تدریجی بر روی ورق یکپارچه سختی آن به‌طور میانگین به 119 ویکرز رسیده که به علت کرنش سختی، سختی نسبت به قبل از فرایند شکل‌دهی ورق یکپارچه حدود 16 درصد افزایش پیدا کرده است. به علت خواص مکانیکی متفاوت منطقه جوش با ورق پایه، با وجود کرنش اعمالی یکسان در هر دو حالت، درصد افزایش سختی در دو حالت متفاوت بوده است.

### 3-5 نتایج تست کشش

در "شکل 10" نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش برای ورق پایه و خط جوش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه FSW شده استحکام نسبت به ورق پایه کاهش ولی شکل‌پذیری در نمونه FSW شده حدود 30 درصد افزایش پیدا کرده است.

برای شبیه‌سازی FEM و برای تعریف خواص مواد، نیاز به داشتن تنش و کرنش حقیقی از ماده می‌باشد. لذا تنش و کرنش مهندسی به‌دست‌آمده از آزمون کشش باید به تنش و کرنش‌های حقیقی تبدیل شود. برای تبدیل

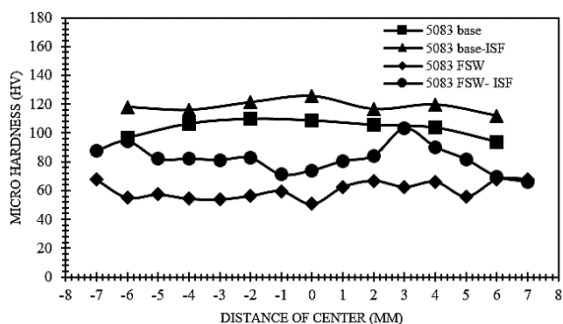


Fig. 9 Vickers hardness tests from cross section of 5083 base and FSWed aluminum sheet before and after SPIF

شکل 9 سختی‌سنجی ویکرز از سطح مقطع نمونه‌های آلومینیوم 5083 یکپارچه و FSW شده قبل و بعد از شکل‌دهی SPIF

شده به‌طور میانگین مقدار 8.24 میکرومتر به‌دست آمد که نسبت به ورق پایه شکل‌دهی شده حدود 65 درصد و نسبت به نمونه جوش کاری شده حدود 34 درصد کاهش دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت که هم جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی و هم شکل‌دهی تدریجی با اعمال تغییر شکل پلاستیکی باعث کاهش اندازه دانه می‌شوند. اگرچه فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت به فرایند شکل‌دهی تدریجی از دمای کاری بسیار بالاتری برخوردار است و دمای بالا می‌تواند اثر تغییر شکل پلاستیکی را در کاهش اندازه دانه تضعیف کند. اما مقایسه اندازه دانه در نمونه جوش کاری شده (12.59 میکرون) و نمونه شکل‌دهی شده (24.2 میکرون) نشان می‌دهد که کرنش‌های اعمال شده در جوش کاری اغتشاشی بسیار بیشتر از شکل‌دهی تدریجی است.

مقادیر گزارش شده برای کرنش موثر در جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی حدود 50 تا 100 بوده [22,21] در حالی که کرنش موثر برای فرایند شکل‌دهی تدریجی با توجه به نتایج شبیه‌سازی المان محدود به‌طور میانگین حدود 1.2 به‌دست آمد. بنابراین عامل حاکم بین این دو فرایند در تعیین اندازه دانه، بیش از دمای کاری، مقدار کرنش اعمال شده است.

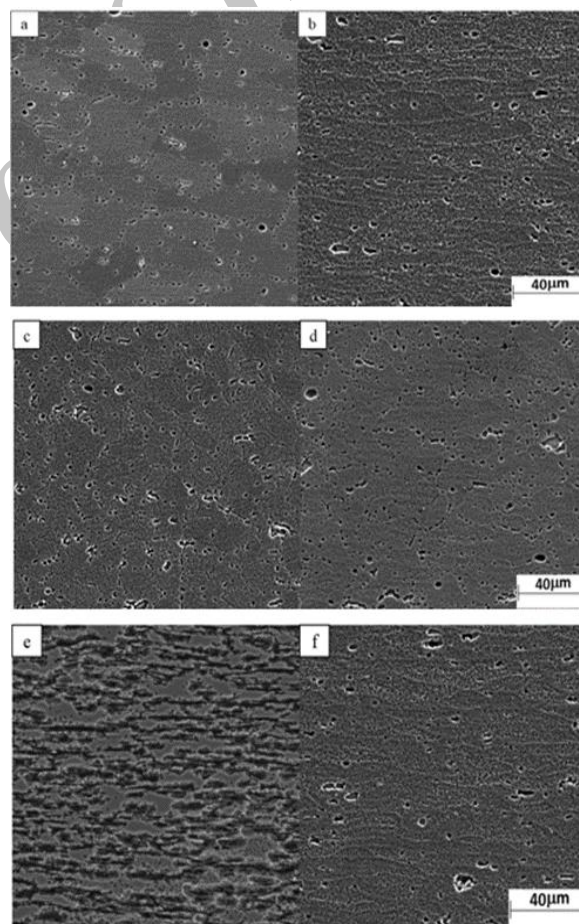


Fig. 8 SEM micrograph of microstructure from. (a) Base sheet, (b) base sheet after ISF, (c) Stir zone of FSWed sheets (before forming), (d) Heat effected zone of FSWed sheets (before forming), (e) Stir zone after ISF, (f) Heat effected zone after ISF.

شکل 8 ریزساختار میکروسکوپ الکترونی. (a) ورق یکپارچه، (b) ورق یکپارچه بعد از فرایند ISF، (c) منطقه اغتشاشی ورق FSW شده قبل از شکل‌دهی، (d) منطقه متأثر از حرارت در ورق FSW شده قبل از شکل‌دهی. (e) منطقه اغتشاشی در ورق FSW شده بعد از SPIF، (f) منطقه متأثر از حرارت در ورق FSW شده بعد از SPIF.

ضخامت تنها در راستای یک خط شعاعی به‌دست آمده است؛ اما در قطعه جوش داده شده، توزیع ضخامت در هر دو راستای شعاعی روی خط جوش و راستای شعاعی عمود بر خط جوش به‌دست آمده است. رابطه تئوری استفاده شده برای توزیع ضخامت ورق در شکل‌دهی ورق یکپارچه، قانون کسینوس‌ها است که با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$t_f = \cos \theta \cdot t_i \quad (4)$$

در این رابطه  $t_f$  ضخامت نهایی ورق بعد از فرایند شکل‌دهی تدریجی،  $\theta$  زاویه حد شکل‌دهی و  $t_i$  ضخامت اولیه ورق است. طبق قانون کسینوس‌ها، ضخامت دیواره نهایی با افزایش زاویه حد شکل‌دهی کاهش می‌یابد. این نتیجه به‌صورت تجربی در آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که توزیع ضخامت قطعه به‌دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی انطباق قابل قبولی با یکدیگر و همچنین با قانون کسینوس دارند. قسمتی از نتایج عددی که ضخامت بالا را نسبت به قانون کسینوس‌ها نشان می‌دهد مربوط به قسمت لبه بیرونی ورق است که حین فرایند شکل‌دهی بین قالب و ورق گیر بسته می‌شود و به همین دلیل تغییر شکل و تغییر ضخامتی نمی‌دهد. همچنین مقایسه نتایج توزیع ضخامت در قطعات جوش‌کاری شده در "شکل 13 و 14" در دو راستای شعاعی جوش و عمود بر جوش نشان می‌دهد که با وجود اختلاف قابل توجه در خواص مکانیکی منطقه جوش و فلز پایه (شکل 9)، توزیع ضخامت در این دو راستا اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند و توزیع کلی ضخامت این ناحیه نیز از قانون کسینوس‌ها پیروی می‌کند؛ بنابراین استفاده از ورق‌های جوش‌کاری شده به جای ورق پایه، تفاوت چندانی در توزیع ضخامت ایجاد نخواهد کرد. البته مدل توزیع ضخامت برای ورق پایه با زاویه حد شکل‌دهی 60 درجه و همچنین برای ورق جوش‌کاری شده با زاویه حد شکل‌دهی 57.5 و 60 درجه در "شکل 15" نشان داده شده است که با بررسی این مدل‌ها مشخص می‌شود که ضخامت منطقه جوش نسبت به منطقه ورق پایه به ویژه در مجاورت خط جوش کمتر است که دلیل این مسأله استحکام پایین‌تر منطقه جوش نسبت به فلز پایه است.

### 3-6-2- بررسی توزیع کرنش

برای بررسی المان محدود توزیع کرنش در فرایند شکل‌دهی تدریجی کرنش‌های اصلی ( $\epsilon_1$ ) و فرعی ( $\epsilon_2$ ) در المان‌های مختلف به‌دست‌آمده و نمودار توزیع کرنش ترسیم شده است. با مقایسه کرنش‌های اصلی و فرعی

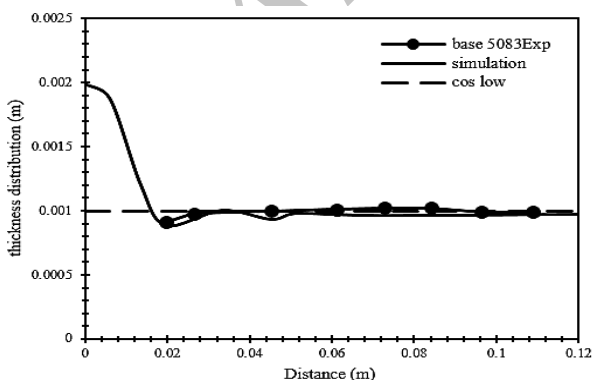


Fig. 12 Comparison of experimental, numerical and cos low for thickness distribution of AA5083 base sheet formed to the conical angle of 60-degree

شکل 12 مقایسه نتایج تجربی، شبیه‌سازی و قانون کسینوس‌ها برای توزیع ضخامت ورق FSW شده در زاویه شکل‌دهی 60 درجه

کرنش مهندسی ( $\epsilon$ ) به کرنش حقیقی ( $\epsilon$ ) از رابطه (1) و برای تبدیل تنش مهندسی ( $S$ ) به تنش حقیقی ( $\sigma$ ) از رابطه (2) استفاده می‌شود.

$$\epsilon = \ln(e + 1) \quad (1)$$

$$\sigma = S \cdot (\epsilon + 1) \quad (2)$$

با توجه به این‌که فرایند شکل‌دهی تدریجی یک فرایند کرنش بالا است و منحنی تنش-کرنش به‌دست‌آمده از آزمون کشش، به خاطر تک محوری بودن فرایند حداکثر تا نقطه گلوپی شدن قابل استفاده است، برای محدوده بعد از گلوپی شدن، لازم است که منحنی به‌دست‌آمده از تنش و کرنش حقیقی تا کرنش‌های بالاتر برون‌یابی شود. برای این منظور یک منحنی هولومان مناسب (که از رابطه (3) به دست می‌آید) بر نتایج تنش و کرنش حقیقی به‌دست آمده از آزمون کشش انطباق داده شد و با فرض همین رفتار در کرنش‌های بالاتر، رفتار ماده برای کرنش‌های بالاتر برون‌یابی شد.

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (3)$$

در "شکل 11" نتیجه برون‌یابی نمونه ورق آلیاژ آلومینیوم 5083 جوش‌کاری شده را نشان می‌دهد که با  $n=0.2586$  و  $k=3.58 \times 10^8$  (Pa) به‌دست آمده است. برای نمونه آلومینیوم 5083 پایه نیز رابطه هولومان با مقادیر (Pa)  $n=0.1709$  و  $k=4.53 \times 10^8$  بهترین انطباق را با رفتار ماده داشت.

### 3-6-3- نتایج شبیه‌سازی المان محدود فرایند شکل‌دهی تدریجی

#### 3-6-3-1- توزیع ضخامت

برای صحت‌گذاری شبیه‌سازی المان محدود و بررسی تأثیر فرایند شکل‌دهی تدریجی بر توزیع ضخامت ورق 5083، توزیع ضخامت برای نمونه‌های 57.5 و 60 درجه با آزمون‌های تجربی به‌دست آمد و سپس نتایج تجربی با مدل المان محدود و همچنین قانون کسینوس‌ها مقایسه شد. نتایج این مقایسه برای زوایای مختلف شکل‌دهی ورق یکپارچه و ورق FSW شده در "شکل‌های 12 تا 14" بیان شده است. در قطعه شکل داده شده از ورق یکپارچه، توزیع

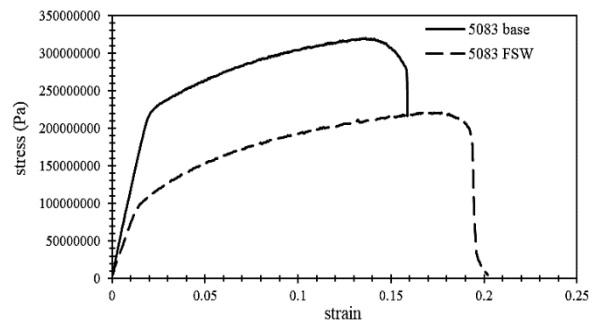


Fig. 10 Result of Tensile Test from base and FSWed regions

شکل 10 نتیجه آزمون کشش از منطقه فلز پایه و منطقه FSW شده

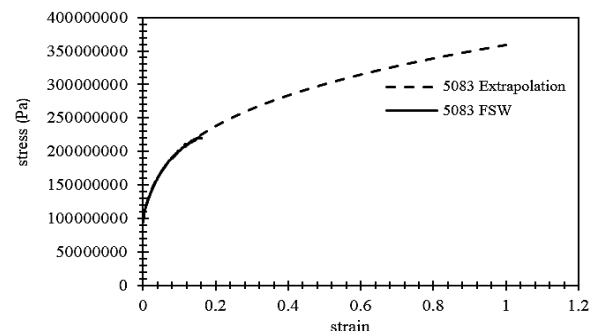
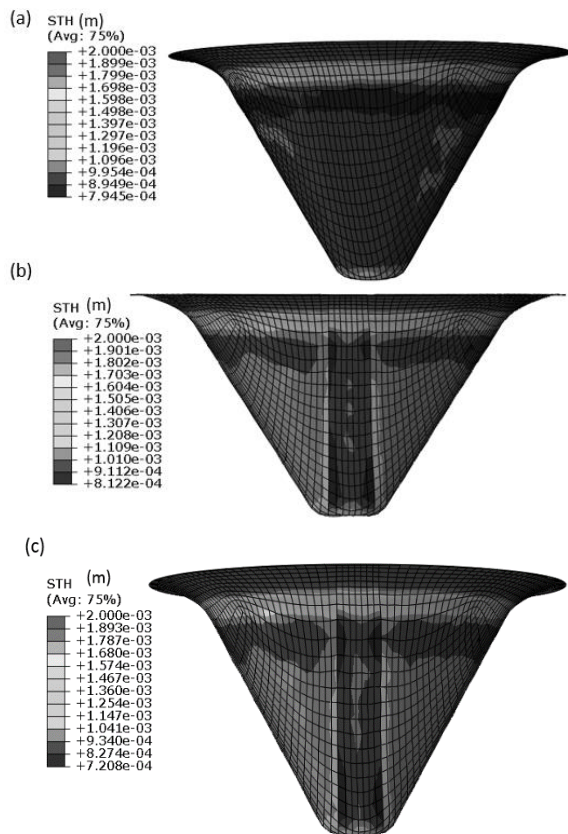


Fig. 11 Extrapolation of the true stress-strain curve of the FSWed region of 5083 aluminum sheet

شکل 11 برون‌یابی منحنی تنش-کرنش حقیقی منطقه FSW شده ورق ورق آلومینیوم 5083





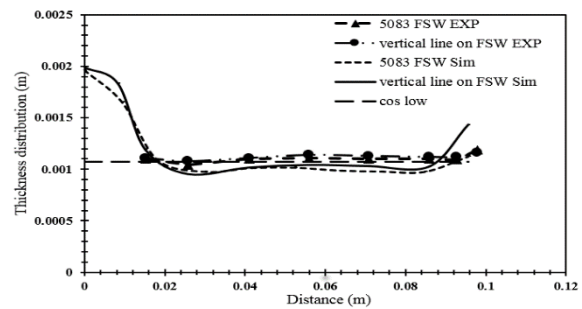
**Fig. 15.** Thickness Distribution of the AA5083 aluminum sheet after SPIF (a) base sheet with 60-degree forming angle, (b) FSWed sheet with 57.5-degree forming angle, (c), FSWed sheet with 60-degree forming angle

شکل 15 توزیع ضخامت برای ورق آلومینیوم 5083 بعد از SPIF (a) ورق یکپارچه 5083 با زاویه شکل‌دهی 60 درجه، (b) ورق FSW شده با زاویه شکل‌دهی 57.5 درجه، (c) ورق FSW شده با زاویه شکل‌دهی 60 درجه

پیوستگی) است و به علت استحکام پایین‌تر ماده مربوط به منطقه جوش (شکل 10) کرنش فرعی در منطقه جوش بیشتر شده و تا میزان 0.245 افزایش می‌یابد. البته با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی که در "شکل 7" نشان داده شده است، با توجه به شکل‌پذیری بالاتر منطقه جوش، این میزان افزایش در حدی نبوده که منجر به پارگی قطعه گردد.

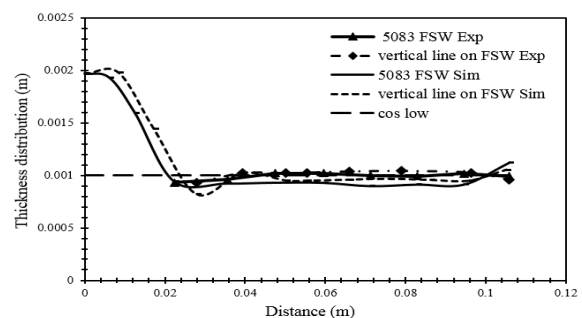
در "شکل 18" نیز نمودار توزیع کرنش برای زاویه حد شکل‌دهی 60 درجه برای ورق یکپارچه و ورق FSW شده نشان داده شده است. حداکثر کرنش اصلی برای هر 2 قطعه ورق یکپارچه و ورق FSW شده یکسان و در حد کرنش 1.07 است؛ اما حداکثر کرنش فرعی برای زاویه حد شکل‌دهی 60 درجه ورق FSW شده 0.27 است؛ درحالی‌که در قطعه شکل داده‌شده از ورق یکپارچه، حداکثر کرنش فرعی برابر 0.15 است؛ بنابراین مشاهده می‌شود که در این قطعه نیز توزیع کرنش اصلی مستقل از جوش و بیشتر به هندسه قطعه مرتبط است، اما توزیع کرنش فرعی به خواص مکانیکی قطعه مرتبط است. البته با توجه به نتایج تجربی، در این زاویه نیز افزایش کرنش فرعی و اصلی منجر به پارگی قطعه نگردیده است (شکل 7).

کرنش‌های اصلی و فرعی برای ورق‌های جوش‌کاری شده در زاویه‌های شکل‌دهی 61.3 و 65 نیز بررسی و مقایسه شد. در "شکل 19" حداکثر کرنش اصلی برای قطعه با زاویه شکل‌دهی 61.3 مقدار 1.3 به‌دست‌آمده است. در صورتی که برای زاویه حد شکل‌دهی 65 درجه حداکثر کرنش اصلی



**Fig. 13** Comparison of experimental, numerical and cos low for thickness distribution of AA5083 FSWed sheet formed to the conical angle of 57.5-degree

شکل 13 مقایسه نتایج تجربی، شبیه‌سازی و قانون کسینوس‌ها برای توزیع ضخامت ورق FSW شده در زاویه شکل‌دهی 57.5 درجه

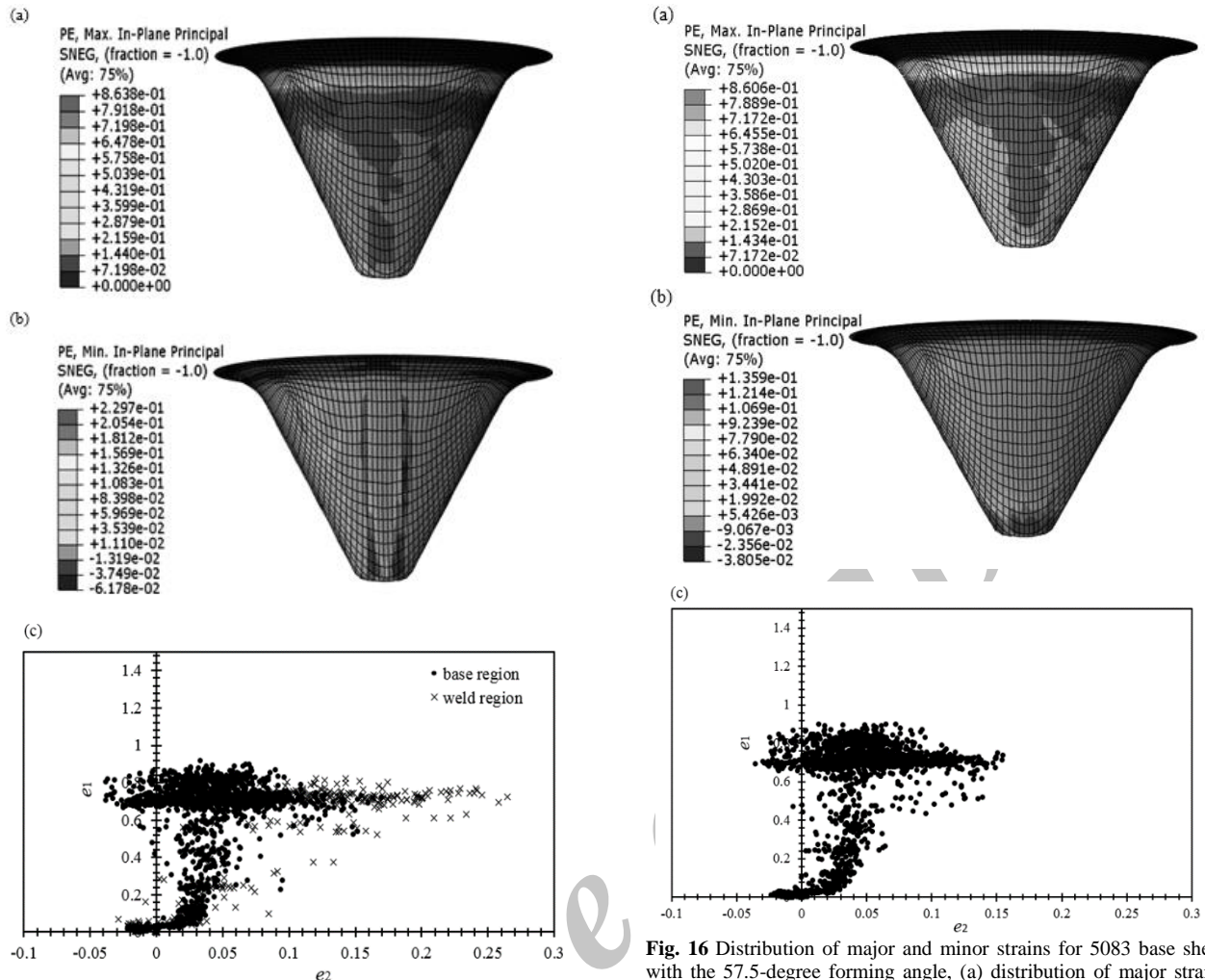


**Fig. 14** Comparison of experimental, numerical and cos low for thickness distribution of AA5083 FSWed sheet formed to the conical angle of 60-degree

شکل 14 مقایسه نتایج تجربی، شبیه‌سازی و قانون کسینوس‌ها برای توزیع ضخامت ورق FSW شده در زاویه شکل‌دهی 60 درجه

برای زاویه شکل‌دهی 57.5 درجه در ورق یکپارچه و ورق FSW شده (شکل 16 و 17) مشخص است که حداکثر کرنش اصلی که در راستای یال مخروط است، برای هر دو قطعه به‌دست‌آمده از ورق یکپارچه و ورق FSW شده برابر با یکدیگر و در حد کرنش 0.86 است. همچنین در حالی که حداکثر کرنش فرعی (که در راستای محیطی است) در شکل‌دهی تدریجی ورق FSW شده حدود 0.25 است، در قطعه شکل داده شده از ورق یکپارچه حداکثر کرنش فرعی برابر با 0.154 می‌باشد. مقایسه توزیع کرنش‌های اصلی و فرعی در "شکل 16" با "شکل 17" نشان می‌دهد که کرنش‌های اصلی که در راستای یال مخروط است، در هر دو قطعه تولید شده از ورق یکپارچه و ورق FSW شده توزیع نسبتاً یکسانی دارد؛ اما کرنش فرعی در قطعه تولید شده از ورق یکپارچه، همان‌گونه که در "شکل (16-b)" نشان داده شده است، توزیع نسبتاً یکنواختی دارد و در تمام دیواره یال مخروط به جز نوک مخروط کرنش فرعی ناچیز و در حد 0.03 است که نشان‌دهنده حالت کرنش صفحه‌ای در دیواره مخروط است؛ اما در قسمت نوک مخروط به علت نزدیک بودن شعاع نوک مخروط به شعاع ابزار، کرنش فرعی به شدت افزایش یافته و به حدود 0.14 می‌رسد. در شکل‌دهی تدریجی ورق FSW شده نیز مشابه شکل‌دهی تدریجی ورق یکپارچه [23] در قسمت پایین قطعه شکل‌دهی شده، کرنش‌های اصلی کمترین مقدار و کرنش‌های فرعی بیشترین مقدار را دارا می‌باشند. در قطعه تولید شده از ورق FSW شده همان‌گونه که در "شکل (17-b)" نشان داده شده است، در منطقه جوش و در مجاورت ورق پایه، کرنش فرعی به شدت تغییر کرده است که دلیل آن اختلاف خواص مکانیکی دو سمت خط جوش و قید کرنش اصلی یکسان این دو منطقه (به دلیل





**Fig. 17** Amount of major and minor strains for 5083 sheet welded with the 57.5-degree forming (a) Distribution of major strain, (b) Distribution of minor strain, (c) Distribution of major and minor strains of elements of formed part

شکل 17 توزیع کرنش‌های اصلی و فرعی برای ورق FSW شده 5083 با زاویه شکل‌دهی 57.5 (a) توزیع کرنش اصلی، (b) توزیع کرنش فرعی، (c) دیاگرام توزیع کرنش‌های اصلی و فرعی المان‌های مختلف قطعه شکل‌داده شده

#### 4- نتایج

در این مقاله شکل‌پذیری ورق 5083 اتصال داده شده با جوش اغتشاشی اصطکاکی (FSW) توسط فرایند شکل‌دهی تدریجی به صورت تجربی و عددی بررسی شد. با بررسی آزمایش‌های تجربی و عددی انجام شده نتایج زیر بدست آمد.

- با آزمایش‌های تجربی بر روی ورق آلیاژی آلومینیوم 5083 زاویه حد شکل‌دهی برای ورق یکپارچه مقدار 60 درجه به دست آمد. زاویه حد شکل‌دهی برای ورق‌های FSW شده نیز همان مقدار 60 درجه به دست آمد؛ بنابراین زاویه حد شکل‌دهی در ورق دو تکه تولید شده با فرایند FSW در مقایسه با ورق یکپارچه تغییری نکرده است. با توجه به عدم کاهش زاویه حد شکل‌دهی ورق‌های FSW شده نسبت به ورق یکپارچه آلومینیوم 5083، این روش می‌تواند بدون کاهش شکل‌پذیری برای اتصال ورق‌های آلومینیوم 5083 هم‌ضخامت و کاهش ضایعات آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

**Fig. 16** Distribution of major and minor strains for 5083 base sheet with the 57.5-degree forming angle, (a) distribution of major strain, (b) Distribution of minor strain, (c) Distribution of major and minor strains of elements of formed part.

شکل 16 توزیع کرنش‌های اصلی و فرعی برای ورق یکپارچه 5083 با زاویه شکل‌دهی 57.5 درجه. (c) توزیع کرنش اصلی، (b) توزیع کرنش فرعی، (c) دیاگرام توزیع کرنش‌های اصلی و فرعی المان‌های مختلف قطعه شکل‌داده شده

مقدار 1.37 به دست آمده است. از نتایج به دست آمده مشخص است که مقدار کرنش‌های اصلی برای زاویه‌های 61.3 و 65 درجه اختلاف زیادی نسبت به یکدیگر ندارند؛ اما با مقایسه کرنش‌های فرعی مشخص شد که کرنش‌های وارده به ناحیه جوش نسبت به ورق پایه بسیار بیشتر است. برای زاویه شکل‌دهی 61.3 حداکثر کرنش فرعی در منطقه جوش مقدار 0.307 است که این مقدار برای منطقه ورق پایه 0.214 است. حداکثر کرنش فرعی برای زاویه شکل‌دهی 65 درجه در منطقه جوش مقدار 0.315 به دست آمد؛ که این مقدار برای منطقه ورق پایه مقدار 0.253 است. مقایسه نتایج به دست آمده برای کرنش‌ها برای دو زاویه 61.3 و 65 درجه نشان می‌دهد که کرنش فرعی در ورق پایه در زاویه شکل‌دهی 65 درجه به میزان بیشتری افزایش یافته است که می‌تواند دلیل تفاوت نقطه شکست در زاویه شکل‌دهی 61.3 و 65 در "شکل 7" باشد. به نظر می‌رسد که این میزان افزایش کرنش فرعی در زاویه 65 درجه منجر به آن شده است که قبل از شکست منطقه جوش، به‌علت شکل‌پذیری کمتر فلز پایه و کرنش بالاتر وارد به آن، شکست در فلز پایه رخ دهد.

در نرخ انحلال و رسوب مجدد به خصوص رسوبات سوزنی شکل  $\beta'$  می‌شود. با انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی سختی در ناحیه FSW شده نسبت به قبل از فرایند شکل‌دهی به علت کرنش سختی حدود 26 درصد افزایش یافته است. در ورق یکپارچه سختی بعد از فرایند شکل‌دهی تدریجی نسبت به قبل از فرایند شکل‌دهی حدود 16 درصد افزایش پیدا کرده است. از نتایج سختی سنجی مشخص است که سختی در ورق‌های FSW شده که تحت فرایند IF قرار گرفته‌اند نسبت به ورق یکپارچه شکل‌دهی شده کاهش پیدا کرده است.

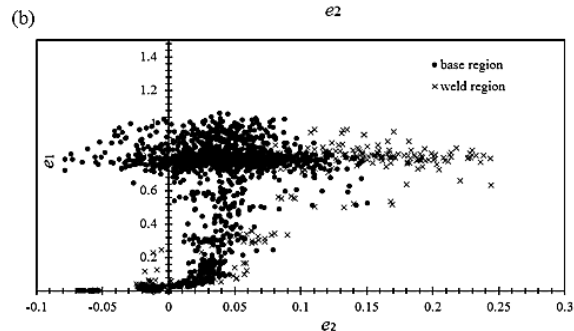
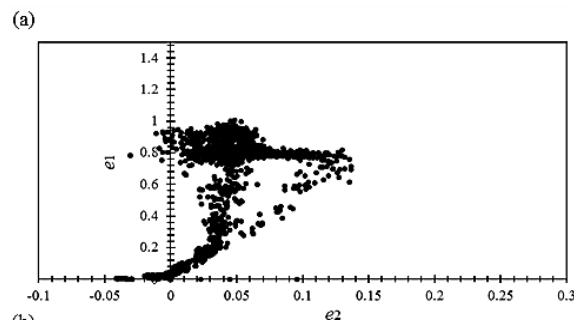
- نتایج آزمایش متالوگرافی نشان داد که فرایند شکل‌دهی تدریجی به دلیل اعمال تغییر شکل پلاستیکی سرد، باعث کاهش اندازه دانه می‌شود. این کاهش اندازه دانه باعث افزایش سختی در منطقه جوش نسبت به قبل از فرایند شکل‌دهی تدریجی می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که هم جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی و هم شکل‌دهی تدریجی با اعمال تغییر شکل پلاستیکی باعث کاهش اندازه دانه می‌شوند. اگرچه فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت به فرایند شکل‌دهی تدریجی از دمای کاری بسیار بالاتری برخوردار است و دمای بالا می‌تواند اثر تغییر شکل پلاستیکی را در کاهش اندازه دانه تضعیف کند اما کرنشهای اعمال شده در جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی بسیار بیشتر از شکل‌دهی تدریجی بوده و در مجموع جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی اثر بیشتری در کاهش اندازه داشته است.

- با بررسی تجربی و عددی توزیع ضخامت در 2 راستای خط جوش و خط عمود بر جوش ( ناحیه ورق پایه ) مشخص شد که توزیع کلی ضخامت در ورق‌های FSW شده نیز مشابه با ورق یکپارچه از قانون کسینوس‌ها پیروی می‌کند. البته به دلیل استحکام پایین‌تر منطقه جوش نسبت به فلز پایه، ضخامت منطقه جوش نسبت به منطقه ورق پایه به میزان جزئی پایین‌تر است.

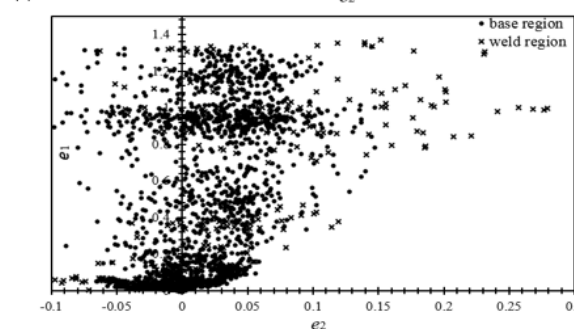
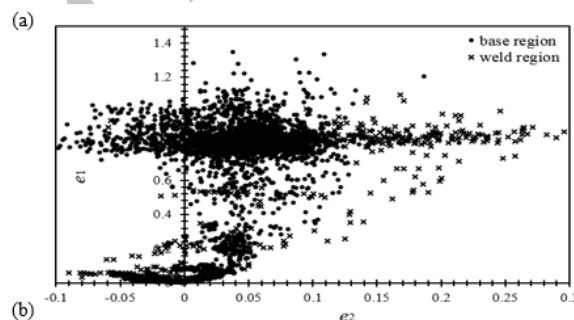
- با مقایسه و بررسی نمونه‌های شکل‌دهی شده مشخص شد که توزیع کرنش اصلی برای نمونه‌های FSW شده در منطقه جوش و فلز پایه اختلاف چندانی ندارند و مشابه با توزیع در ورق یکپارچه است. اما توزیع کرنش فرعی در منطقه جوش و فلز پایه نمونه FSW شده متفاوت بوده و حداکثر کرنش فرعی در منطقه جوش و در مجاورت فلز پایه رخ می‌دهد.

### 5- منابع

- [1] V. S. Le, A. Ghiotti, G. Lucchetta, Preliminary studies on single point incremental forming for thermoplastic materials, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, No. 1, pp. 1179–1182, 2008.
- [2] S. B. M. Echrif, M. Hrairi, Research and progress in incremental sheet forming processes, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 5, pp. 1404–1414, 2011.
- [3] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 88–114, 2005.
- [4] M. Ham, J. Jeswiet, Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 241–244, 2006.
- [5] Z. Liu, Y. Li, P. A. Meehan, Experimental investigation of mechanical properties, formability and force measurement for AA7075-O aluminum alloy sheets formed by incremental forming, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 11, pp. 1891–1899, 2013.
- [6] D. Xu, W. Wu, R. Malhotra, J. Chen, B. Lu, J. Cao, Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 73, No. 3, pp. 37–46, 2013.
- [7] A. Zahedi, B. Mollaei-darjani, M. R. Morovvati, Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 1–8, 2014. (in Persian فارسی)



**Fig. 18** Distribution of major and minor strains of elements of 5083 sheet in 60-degree forming angle (a) base sheet, (b) FSWed sheet  
 شکل 18 نمودار توزیع کرنش‌های اصلی و فرعی المان‌های مختلف ورق 5083 شکل داده شده زاویه شکل‌دهی 60. (a) ورق یکپارچه، (b) ورق FSW شده



**Fig. 19** Distribution of major and minor strains of elements of FSWed 5083 sheet (a) with the 61.3-degree forming angle, (b) with the 65-degree forming angle

شکل 19 نمودار توزیع کرنش‌های اصلی و فرعی برای ورق FSW شده 5083، (a) با زاویه شکل‌دهی 61.3 درجه، (b) با زاویه شکل‌دهی 65 درجه

- با انجام آزمایش ریزسختی بر روی نمونه‌های FSW شده مشخص شد که با وجودی که فرایند FSW یک فرایند کرنش بالا (با حدود کرنش مؤثر 100) است، سختی در ناحیه جوش قبل از شکل‌دهی نسبت به ورق پایه حدود 43 درصد کاهش یافته است. دلیل این کاهش سختی، کم شدن چگالی نایبایی‌ها، همچنین انجام عملیات آنیل و بازبایی در منطقه جوش است. همچنین تغییرات موضعی دما در حین جوش کاری باعث تغییرات

- of *Process Mechanical Engineering*, Vol. 231, No. 5, pp. 1–14, 2017.
- [17] I. Alinaghian, H. Ranjbar, M. Ali, Forming limit investigation of aa6061 friction stir welded blank in a single point incremental forming process: RSM approach, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 70, No. 9, pp. 2303–2318, 2017.
- [18] J. Marzbanrad, M. Akbari, P. Asadi, S. Safaei, Characterization of the influence of tool pin profile on microstructural and mechanical properties of friction stir welding, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 45, No. 5, pp. 1887–1894, 2014.
- [19] P. Tayebi, A. Fazli, P. Asadi, F. Yusefi, The effect investigating of rotational speed and feed rate of the friction stir welding process on the formability of aluminium sheets 6061 and 1050 by incremental forming method, *Second International Conference on Mechanical Engineering and Aerospace Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–8, 2017. (in Persian فارسی)
- [20] Z. Y. Ma, R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075Al alloy, *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 17, pp. 4419–4430, 2002.
- [21] P. Asadi, R. A. Mahdavinjad, S. Tutunchilar, Simulation and experimental investigation of FSP of AZ91 magnesium alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 21, pp. 6469–6477, 2011.
- [22] P. Asadi, M. K. B. Givi, M. Akbari, Simulation of dynamic recrystallization process during friction stir welding of AZ91 magnesium alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 1–4, pp. 301–311, 2016.
- [23] C. Raju, N. Haloi, C. S. Narayanan, Strain distribution and failure mode in single point incremental forming ( SPIF ) of multiple commercially pure aluminum sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 30, No. 2, pp. 328–335, 2017.
- [8] A. Taherkhani, A. Basti, N. Narimanzadeh, A. Jamali, Tool frictional stir effect on dimensional accuracy and formability in single point incremental forming at high rotational speeds, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 665–674, 2016. (in Persian فارسی)
- [9] R. Kopp, C. Wiedner, A. Meyer, Flexibly rolled sheet metal and its use in sheet metal forming, *Advanced Materials Research*, Vol. 6–8, No. 1, pp. 81–92, 2005.
- [10] V. Sharma, U. Prakash, B. V. M. Kumar, Journal of Materials Processing Technology Surface composites by friction stir processing: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 224, No. 4, pp. 117–134, 2015.
- [11] T. Hirata, T. Oguri, H. Hgino, T. Wook, et al., Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering*, Vol. 456, No. 1–2, pp. 344–349, 2007.
- [12] M. Ahmadnia, A. Seidanloo, R. Teimouri, Determining influence of ultrasonic-assisted friction stir welding parameters on mechanical and tribological properties of AA6061 joints, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, No. 9–12, pp. 2009–2024, 2015.
- [13] G. Ambrogio, Incremental forming of friction stir welded tailored sheets, *8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Vol. 4, No. 9–12, pp. 1–6, 2006.
- [14] M. B. Silva, M. Skjoedt, P. Vilaça, N. Bay, P. A. F. Martins, Single point incremental forming of tailored blanks produced by friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 811–820, 2009.
- [15] K. Rattanachan, K. Sirivedin, C. Chungchoo, Formability of tailored welded blanks in single point incremental forming process, *Advanced Materials Research*, Vol. 979, No. 4, pp. 339–342, 2014.
- [16] P. Ebrahimzadeh, M. J. M. Baseri, Hamid, Formability of aluminum 5083 friction stir welded blank in two-point incremental forming process, *Journal*