



# Experimental Investigation of Effect of Warm Single-Point Incremental Forming Parameters on The Formability of 6061 and 5083 Aluminum Tailor Welded Blanks

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Abbasi A<sup>1</sup>  
Safdarian R<sup>1\*</sup>,

### How to cite this article

Abbasi A, Safdarian R. Experimental Investigation of Effect of Warm Single-Point Incremental Forming Parameters on The Formability of 6061 and 5083 Aluminum Tailor Welded Blanks. Modares Mechanical Engineering, 2023;23(06):323-335.

<sup>1</sup> Faculty of mechanical engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

### \*Correspondence

Address: Qom University of Technology, Martyred Brigadier Khodakaram Blvd, Old Qom-Tehran, road, Qom, Iran

safdarian@qut.ac.ir

### Article History

Received: January 31, 2023  
Accepted: May 02, 2023  
ePublished: June 16, 2023

## ABSTRACT

Single point incremental forming (SPIF) is a cost-effective process with high flexibility and as a result, it is a suitable choice for low-batch production compared to traditional metal forming methods. In the present experimental research, the warm SPIF with ball nose tool was used in the forming of aluminum tailor welded blanks (TWB) that were joined together by the argon welding process. Aluminum sheets of 6061 and 5083 with an equal thickness of 1.5 mm were used as base metals and joined together using the butt-welding method. In this research, the effect of four parameters of temperature, lubricant, step down, and feedrate were investigated on the formability and appearance of aluminum. The temperature range is between room temperature and 290 degrees Celsius, and three types of lubricants are used in the experimental tests. The Taguchi method was used for the design of the experiment. The results of the tests indicated that an increase in the temperature as the most effective parameter led to an increase in the formability of TWB by 79%. The lubrication, step down, and the feedrate was in the next ranks of effectiveness in the formability of aluminum TWB.

**Keywords** Single Point Incremental Forming (SPIF), Aluminum TWB, Lubricant, Elevated Temperatures, Forming Depth, TIG Welding Method

## CITATION LINKS

1- Experimental study on force measurements for single point incremental forming. 2- Influence of mechanical properties of the sheet material on. 3- Analysis of material formability in incremental forming. 4- Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. 5- A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming. 6- Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. CIRP annals. 7- Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31 8- Single point incremental forming at high feed rates and... 9- Thickness distribution and mechanical property of sheet metal... 10- An investigation into thickness distribution in single point incremental forming using sequential limit analysis. 11- Experimental investigation on the effective parameters on forming force... 12- Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. 13- A novel methodology for flexibly producing thin-walled parts. 14- Effect of laser welding parameters on... 15- A review on tailored blanks Production, applications and evaluation. 16- The effects of strength ratio on the... 17- A study on the formability of aluminum tailor... 18- Experimental research on the behaviour of metal active gas... 19- An experimental investigation into single point incremental forming of glass fiber... 20- Experimental Investigation of Elevated Temperature Single Point... 21- 1060 Al electric hot incremental sheet forming process... 22- Effect of heat treatment on single point... 23- Experimental investigation of formability and surface finish into... 24- Dynamic mechanical behavior of 6061 al alloy at... 25- Lubrication aspects during single point incremental forming for steel and aluminum materials.

## بررسی تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم بر روی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳

امیرحسین عباسی<sup>۱</sup>، دکتر رسول صفدریان<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

### چکیده

شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای، فرآیندی مقرون به صرفه با انعطاف‌پذیری بالا می‌باشد و در نتیجه انتخابی مناسب جهت تولید حجم پایین در مقایسه با روش‌های سنتی شکل‌دهی است. در تحقیق تجربی حاضر، شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای گرم با ابزار سرگرد بر روی ورق‌های ترکیبی آلومینیم که توسط فرآیند جوش آرگون به یکدیگر متصل شده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرد. ورق‌های مورد استفاده از جنس آلومینیوم گریدهای 6061 و 5083 با ضخامت یکسان ۱/۵ میلی‌متر می‌باشند که این ورق‌ها به صورت لب به لب به یکدیگر متصل شده‌اند. در این تحقیق تأثیر چهار پارامتر دما، روانکار، مقدار نشست ابزار و سرعت تغذیه میز به عنوان متغیرهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی بر روی میزان شکل‌پذیری و وضعیت ظاهری نمونه‌های ورق ترکیبی آلومینیم مورد بررسی قرار گرفته است. محدوده دمایی مورد بررسی بین دمای محیط تا ۲۹۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و سه نوع روانکار نیز برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای طراحی آزمایش نیز از روش تاگوچی استفاده شد و نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد افزایش دما بعنوان تأثیرگذارترین پارامتر سبب افزایش میزان شکل‌دهی ورق به میزان ۷۹ درصد شده است همچنین روانکار و نشست ابزار و سرعت تغذیه میز در رده‌های بعدی در شکل‌پذیری ورق ترکیبی آلومینیم مؤثر می‌باشند

**کلیدواژه‌ها:** شکل‌دهی تدریجی، ورق ترکیبی آلومینیم، روانکار، شکل‌دهی دما بالا، عمق شکل‌دهی، جوشکاری TIG

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲

\* نویسنده مسئول: safdarian@qut.ac.ir

### ۱- مقدمه

اتصال فلزات غیر هم جنس یک ایده جالب و مؤثر در صنعت می‌باشد. هدف از اتصال فلزات غیر هم جنس ترکیب خواص دو فلز برای افزایش کارایی و بازدهی قطعات تولیدی می‌باشد. همچنین این عمل مقاومت به سایش، خوردگی و استحکام به وزن بالا از یک فلز و قابلیت هدایت حرارتی، مقاومت به خوردگی و وزن کم از فلز دیگر را به دنبال دارد. آلیاژ آلومینیوم دارای وزن کم، استحکام ویژه بالا و هدایت حرارتی خوب می‌باشد. بنابراین اتصال دو آلیاژ مختلف آلومینیوم می‌تواند کاربرد وسیعی در بسیاری از صنایع داشته باشد زیرا باعث کاهش وزن ماشین‌آلات تولیدی می‌شود که این امر به نوبه خود موجب افزایش بازدهی و کاهش مصرف سوخت می‌گردد.

به‌منظور کاهش سرمایه‌گذاری اولیه برای تولید محصول، کاهش نیروهای اعمال شده به ورق فلزی، افزایش قابلیت شکل‌پذیری ورق و تولید قطعات پوسته‌ای شکل با فرم‌های پیچیده و

نامتقارن، استفاده از فرآیندی نوین در شکل‌دهی ورق‌های فلزی امری اجتناب‌ناپذیر است. نحوه طراحی این فرآیند جدید باید به‌گونه‌ای باشد که از بروز بسیاری از معایب و محدودیت‌های مطرح شده در حین عملیات شکل‌دهی جلوگیری کند. این امر سبب می‌شود تا در مدت زمان مشخص، عملیات تغییر شکل پلاستیک در ناحیه کوچکی از ورق متمرکز گردد. بنابراین می‌توان بسیاری از آسیب‌های احتمالی در محصول نهایی را حذف کرد که یکی از شیوه‌های نوین شکل‌دهی، شکل‌دهی تدریجی می‌باشد<sup>[۱]</sup>. در زمینه شکل‌دهی تدریجی فراتینی و همکاران<sup>[۲]</sup> خواص مکانیکی ماده بر روی شکل‌پذیری آن را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که ضریب کرنش سختی ماده تأثیر زیادی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی دارد. آن‌ها برخی از همبستگی‌های مربوطه در میان شکل‌پذیری مواد و سایر خصوصیات مکانیکی مواد مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و مقدار نمودار حد شکل‌دهی، کرنش اصلی شکست در شرایط کرنش صفحه‌ای، برای مواد مختلف را تعیین کردند و تأثیر پارامترهای اصلی مواد بر شکل‌پذیری را به طور دقیق از طریق تجزیه و تحلیل آماری بررسی کردند.

فیلیسه و همکارانش<sup>[۳]</sup> به این نتیجه رسیدند که به دلیل مهار شدن پدیده گلویی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، می‌توان به کرنش‌های بالاتری نسبت به سایر روش‌های مرسوم دست یافت. سیلوا و همکاران<sup>[۴]</sup> نتیجه گرفتند که تغییرات ضخامت قطعه در راستای شعاعی را می‌توان با استفاده از قانون سینوس تخمین زد. حسین و گائو<sup>[۵]</sup> به بررسی نازک شدگی و شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی پرداختند و نشان دادند که در شکل‌های مخروطی، تغییرات ضخامت در قسمت‌های نزدیک مناطق شکست از قانون سینوس پیروی نمی‌کنند.

هام و جسویت<sup>[۶]</sup> به بررسی تأثیرات قطر ابزار، ضخامت ورق و اندازه‌ی گام در حد زاویه شکل‌دهی ماده پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش ضخامت ورق، باعث بهبود شکل‌پذیری ماده می‌گردد، زیرا حجم ماده‌ای که شکل می‌پذیرد افزایش می‌یابد. آمبروجیو و همکاران<sup>[۷]</sup> در سال ۲۰۰۸ به بررسی تأثیر افزایش دمای ماده در شکل‌دهی تدریجی آلیاژ منیزیم ۳AZ پرداختند. آن‌ها به بررسی تأثیرات افزایش حرارت ماده در نیروی وارد شده به ابزار پرداختند. از جمله این معایب این کار این بود که با افزایش دما امکان به وجود آمدن اشکال نامطلوب در سطح ورق افزایش می‌یافت. همیلتون و جسویت<sup>[۸]</sup> شکل‌دهی تک نقطه‌ای یک بیضی را برای نرخ‌های پیشروی و سرعت‌های چرخشی بالا آزمایش کردند و تأثیر پارامترهای مذکور را بر کیفیت سطح خارجی قطعه، توزیع ضخامت و میکروساختار مطالعه بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که توزیع ضخامت و میکروساختار مشابه حالتی است که از سرعت‌های پایین استفاده می‌شود. چاو و همکاران<sup>[۹]</sup> شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای یک هرم را با استفاده از نرم افزار آباکوس به همراه المان‌های پوسته‌سازی کردند آن‌ها بیان کردند که

کاهش شکل‌پذیری می‌شود و تغییر ضخامت ناپیوسته در خط جوش زمانی که ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف به هم متصل می‌شوند منجر به تمرکز تنش می‌شود. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که جوشکاری شکل‌پذیری ماده را کاهش می‌دهد و همچنین اعمال عملیات حرارتی موضعی می‌تواند منجر به بهبود شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی شود. صفدریان [16] در تحقیقی به بررسی تأثیر استحکام ورق‌های پایه ورق ترکیبی بر روی میزان شکل‌پذیری و منحنی حد شکل دهی ورق‌های ترکیبی پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نسبت استحکام ورق‌های پایه ورق ترکیبی، سطح منحنی حد شکل دهی کاهش می‌یابد. پرنه و همکاران [17] در تحقیقی به بررسی تأثیر راستای خط جوش در شکل دهی ورق ترکیبی پرداختند. آنها در تحقیق خود از جوشکاری اصطکاکی برای تهیه ورق ترکیبی آلومینیم با سه راستای خط جوش ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ورق استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد سطح منحنی حد شکل دهی با افزایش زاویه کاهش می‌یابد. ولانتین اولکسیک و همکاران [18] در یک تحقیق بر روی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی به این نتیجه رسیدند که در طی فرآیند شکل‌دهی تدریجی یک نقطه‌ای ورق‌های ترکیبی، شکستگی‌ها در ورق‌های ترکیبی جوشی یک طرفه حتی در زوایای متوسط دیواره رخ می‌دهد، درحالی‌که در مورد ورق‌های جوشی دو طرفه، شکل‌پذیری کاهش می‌یابد، اما همچنان می‌توان قطعات را در زوایای متوسط ۵۵ درجه بدون هیچ مشکلی تولید کرد. امامی و همکاران [19] در تحقیقی بر روی شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلیمری تقویت شده با الیاف در دماهای مختلف پرداختند و به این نتیجه رسیدند که می‌توان با استفاده از شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای با افزایش دمای شکل‌دهی و کاهش کسر حجمی الیاف، بهبود شکل‌پذیری ورق کامپوزیت را بدست آورد. همچنین شکل‌پذیری ورق کامپوزیت با جهت الیاف [۹۰/۰] بسیار کمتر از ورق با الیاف یک طرفه است و نازک شدن ورق کامپوزیت بیشتر تحت تأثیر کسر حجمی و جهت الیاف قرار می‌گیرد، درحالی‌که دمای شکل‌دهی کمترین تأثیر را بر نازک شدن ورق دارد.

در تحقیق حاضر برای نخستین بار شکل‌دهی تدریجی گرم ورق‌های ترکیبی ساخته شده از ورق‌های آلومینیم آلیاژی ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱ مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت استحکام به وزن بالای این آلیاژهای آلومینیم و همچنین مقاومت به خوردگی آنها سبب افزایش کاربرد آنها در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی برای ساخت قطعات بدنه خودرو و هواپیما می‌شود. از آنجائیکه گرید ۶۰۶۱ آلومینیم نسبت به گرید ۵۰۸۳ مقاومت حرارتی بالاتری دارد ترکیب این دو آلیاژ بصورت ورق ترکیبی می‌تواند زمینه کاربرد آنها را افزایش دهد. علاوه بر این بررسی شکل‌پذیری این ورق ترکیبی در فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای بدلیل حذف هزینه قالب و همچنین کاهش هزینه مورد نیاز برای تامین پرس سبب کاهش

نازک شدگی ورق در مسیر ابزار مارپیچ نسبت به مسیر دایره‌ای شکل، کمتر است و افزایش شعاع ابزار سبب بهبود توزیع ضخامت و نازک شدگی می‌شود درحالی‌که گام عمودی تأثیر قابل توجهی بر ضخامت کمینه ندارد. میرنیا و همکاران [10] تأثیر قطر ابزار و گام عمودی را بر توزیع ضخامت در شکل‌دهی تدریجی یک نقطه‌ای یک مخروط ناقص را با استفاده از آنالیز حد متوالی و صحت‌سنجی‌های تجربی، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش قطر ابزار سبب افزایش کشش و کاهش ضخامت می‌شود. همچنین افزایش گام عمودی تا یک میزان مشخص سبب بهبود نازک شدگی می‌شود. علاوه بر این، رابطه بین مسیر ابزار و حداقل ضخامت و محل آن مورد بحث قرار گرفت. قاسمی و سلطانی [11] با بررسی تجربی شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای یک هرم ناقص آلومینیومی دریافتند که کاهش سرعت چرخش ابزار سبب بهبود ضخامت کمینه می‌شود. همچنین بکارگیری مسیر ابزار حلزونی به یکنواخت‌تر شدن توزیع ضخامت کمک می‌کند. آن‌ها نتیجه گرفتند افزایش سرعت پیشروی ابزار، نیروی عمودی را کاهش می‌دهد و با افزایش سرعت چرخش، نیروی افقی کاهش می‌یابد. همچنین از روانکار استفاده کردند و مشاهده کردند که موجب بهبود فرایند می‌شود. یانگ و کیم [12] بصورت ساده و با فرض تغییر شکل برشی در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای و با استفاده از امان‌های مثلثی، توزیع ضخامت را برای اشکال غیرممتقارن محوری محاسبه کردند. سپس یک فرایند دو مرحله‌ای را معرفی نمودند که در آن مناطقی که در مرحله دوم کمتر تغییر شکل پیدا می‌کنند در مرحله اول دچار تغییر شکل زیاد می‌شوند و بالعکس. آن‌ها نشان دادند که با فرایند دو مرحله‌ای به جای یک مرحله توزیع ضخامت بهبود پیدا می‌کند و سبب افزایش شکل‌پذیری ورق می‌شود. در سال ۲۰۱۶ ون و همکاران [13] به منظور گسترش دامنه کاربرد فرایند شکل‌دهی تدریجی و بکارگیری هرچه بیشتر قابلیت‌های این فرایند، یک روش جدید به نام شکل‌دهی تدریجی چندجهته ورق معرفی کردند. هدف اصلی این روش توسعه فرایندهای شکل‌دهی کششی غیر دومحوری قطعات جدار نازک می‌باشد.

صفدریان و همکاران [14] در یک تحقیق به بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر بر روی میزان شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی فولادی پرداختند در این تحقیق آن‌ها از آزمون سنبه سر کروی (اریکسون) برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی پرداختند. در نهایت پارامترهای مناسب جوشکاری لیزر با استفاده از روش طراحی آزمایش استخراج شد. این روش نه تنها کاربردهای شکل‌دهی تدریجی را گسترش داده بلکه توانسته است اکثر قطعاتی که توسط روش‌های دیگر به سختی و با هزینه زیاد قابل تولید هستند را به راحتی تولید کند.

مارکلین و همکاران [15] با بررسی مقالات مختلف به این نتیجه رسیدند که جوشکاری ورق‌ها در شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی باعث

عایق بهره گرفته شده است و تنها در سمت قرار گرفتن ورق امکان اتلاف و خروج گرما وجود دارد. فاصله المنت‌ها تا سطح زیرین ورق پیش از شکل‌دهی ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد و برای کنترل دما در حین انجام آزمایش‌ها نیز از ترموستات ۵۰-۳۰۰ که توانایی کنترل دما در محدوده ۵۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس را دارد استفاده شده است. لازم به ذکر است که سیستم برق نگهدارنده ورق به گونه‌ای است که با رسیدن دمای مجموعه قالب به دمای هدف المنت‌ها خاموش شده و با افت و کاهش دما مجدداً المنت‌ها روشن شده و دما دوباره به دمای هدف می‌رسد. محل قرارگیری ترموستات نیز بالای نگهدارنده ورق و در نزدیک ترین قسمت ممکن به ورق بوده تا دمای ورق و ترموستات به هم نزدیک باشند.



شکل ۱) سیستم گرمایش قالبی ورق‌ها

ورق‌ها نیز توسط ورق‌گیر با ۱۲ عدد پیچ مطابق با شکل ۲ به طور کامل ایستا بر روی نگهدارنده ورق مستحکم شده‌اند. ابزار شکل‌دهی تدریجی نیز یک ابزار سرگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر از جنس VCN150<sup>[20]</sup> می‌باشد که توسط فرایند تراشکاری ساخته شده است و سطح تماس آن با ورق به طور کامل پرداخت شده است.



شکل ۲) مجموعه قالب، سیستم گرمایش و ابزار شکل‌دهی تدریجی در حین انجام آزمون تجربی

هزینه تولید و مقرون بصره تر بودن فرآیند می‌گردد. بنابراین نوآوری تحقیق حاضر بررسی پارامترهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی در دمای بالا بر روی میزان شکل‌پذیری ورق ترکیبی آلومینیم با خواص حرارتی و مکانیکی متفاوت می‌باشد. وجود این تفاوت سبب پیچیدگی بیشتر در فرآیند شکل‌دهی و وقوع عیوب جدیدی مانند زبری سطح محصول و تغییر در ارتفاع شکل‌دهی نسبت به شکل‌دهی تدریجی ورق یکنواخت می‌گردد.

برای ساخت ورق ترکیبی نیز ورق‌های مورد استفاده با ضخامت یکسان توسط روش جوشکاری آرگون به یکدیگر جوش می‌شوند. برای انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی نیز از قالبی مجهز به المنت‌های حرارتی برای تامین دماهای بالا استفاده می‌شود. از آنجائی که در این تحقیق تأثیر متغیرهای سرعت پیشروی، گام عمودی، دما و نوع روانکار بر روی عمق شکل‌دهی و وضعیت ظاهری ورق‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت، به منظور بهینه شدن تعداد آزمایش‌ها از آرایه L16 تاگوجی برای طراحی آزمایش استفاده گردیده.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

### ۲-۱- تجهیزات و فرایند آزمایش

برای جوشکاری ورق‌های ترکیبی آلومینیم از روش جوشکاری آرگون استفاده شد. برای انجام جوشکاری نیز از دستگاه TIG WELD 350 DC/AC استفاده شد. ورق‌های آلومینیمی آلیاژی ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ با ضخامت یکسان ۱/۵ میلی‌متر و ابعاد ۸/۵\*۱۷ سانتی‌متر به عنوان ورق پایه به منظور ساخت ورق ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند که پس از جوشکاری به نمونه‌هایی با ابعاد ۱۷\*۱۷ سانتی‌متر مربع تبدیل می‌شود. سیم جوش مورد استفاده نیز از جنس آلومینیموم ۴۰۴۳ می‌باشد. برای نگه داشتن ورق‌ها در حین جوشکاری نیز یک نگهدارنده تهیه گردید تا ورق‌ها در کنار یکدیگر بدون حرکت قرار گیرند. ورق‌های پایه به گونه‌ای برش خورده و کنار هم جوشکاری شدند که خط جوش در راستای نورد قرار بگیرد. برای فرایند جوشکاری نیز مقدار جریان دستگاه جوش در محدوده ۵۵ آمپر و دبی گاز آرگون ۵ می‌باشد. لازم به ذکر است برای انتخاب پارامترهای بهینه جوشکاری آرگون از روش سعی و خطا استفاده شد و با تغییر پارامترها و جوشکاری نمونه‌های مختلف، پارامترهای مناسب انتخاب شدند. از آزمون خمش بعد از هر بار جوشکاری نمونه‌ها برای بررسی کیفیت جوش استفاده شد. پس از جوش دادن ورق‌ها نیز برآمدگی‌های خط جوش سنگ زده شدند و برجستگی جوش هم سطح با ورق گردیدند.

برای انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی از دستگاه CNC مدل Deckel Maho dmc 63v استفاده شد و نگهدارنده ورق، که همزمان یک کوره نیز می‌باشد که توسط دو عدد المنت حرارتی ۳۰۰۰ وات مطابق شکل ۱ تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس می‌تواند حرارت ایجاد کند. قالبی با دیواره دوجداره ساخته شده است و بین دیواره‌های آن از

با توجه به تعداد بالای متغیرهای تحقیق حاضر و همچنین سطوح بررسی شده بر روی متغیرها، نیاز به تعداد زیادی آزمون برای نتیجه‌گیری می‌باشد. بنابراین جهت بهینه شدن تعداد آزمون‌ها از روش طراحی آزمایش تاگوچی (آرایه L16) بهره گرفته شد، که نتایج حاصل از آن در جدول ۲ قابل مشاهده است.

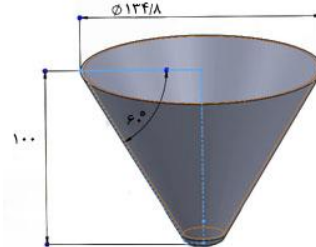
جدول ۲) آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی طراحی شده با آرایه L16 تاگوچی

آزمون	سرعت پیشروی (mm/min)	گام عمودی (mm)	دما (°C)	روانکار
۱	۳۰۰	۰/۲	۲۵	خشک
۲	۳۰۰	۰/۳۵	۱۰۰	پودر گرافیت
۳	۳۰۰	۰/۵	۲۰۰	گریس پایه مولیبدن دی سولفید
۴	۳۰۰	۰/۷	۲۹۰	گریس پایه لیتیموم
۵	۶۰۰	۰/۲	۱۰۰	گریس پایه مولیبدن دی سولفید
۶	۶۰۰	۰/۳۵	۲۵	گریس پایه لیتیموم
۷	۶۰۰	۰/۵	۲۹۰	خشک
۸	۶۰۰	۰/۷	۲۰۰	گرافیت
۹	۹۰۰	۰/۲	۲۰۰	گریس پایه لیتیموم
۱۰	۹۰۰	۰/۳۵	۲۹۰	گریس پایه مولیبدن دی سولفید
۱۱	۹۰۰	۰/۵	۲۵	پودر گرافیت
۱۲	۹۰۰	۰/۷	۱۰۰	خشک
۱۳	۱۲۰۰	۰/۲	۲۹۰	پودر گرافیت
۱۴	۱۲۰۰	۰/۳۵	۲۰۰	خشک
۱۵	۱۲۰۰	۰/۵	۱۰۰	گریس پایه لیتیموم
۱۶	۱۲۰۰	۰/۷	۲۵	گریس پایه مولیبدن دی سولفید

برای انجام هر آزمون شکل‌دهی تدریجی پس از محکم شدن ورق بر روی قالب و روشن شدن المنت‌ها بمدت ۱۰ دقیقه زمان برای هم‌دما شدن ورق و قالب در نظر گرفته شد و سپس فرآیند شکل‌دهی تدریجی شروع گردید. همچنین در طی انجام آزمایش‌ها نیز روانکار بصورت مداوم توسط اپراتور شارژ شده تا تمامی نواحی بطور یکنواخت دارای روانکار باشند. آزمونهای شکل‌دهی تدریجی تا زمان پارگی ورق ادامه پیدا کردند. به منظور مشخص شدن لحظه پارگی ورق در حین انجام آزمایش اپراتور همواره به صورت چشمی ورق را مورد بررسی قرار داده و به محض مشاهده نخستین ترک و یا پارگی آزمون را متوقف کرده و آزمایش پایان یافت این روش تشخیص پایان فرآیند شکل‌دهی تدریجی در مرجع [20] نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

پس از انجام هر آزمایش نوک ابزار به وسیله سنباده پرداخت شده تا اثرات چسبندگی از بین برود. پس از اتمام آزمایش‌ها مقدار عمق شکل‌دهی هر نمونه بوسیله ارتفاع سنج محاسبه و در بخش تحلیل نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

هندسه طراحی شده برای شکل‌دهی تدریجی یک مخروط با ابعاد هندسی نشان داده شده در شکل ۳ می‌باشد. آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی تا انتهای عمق قطعه مخروطی شکل ادامه پیدا نکرده است بلکه با مشاهده نخستین پارگی در ورق آزمایش متوقف گردیده و عمق اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳) هندسه طراحی شده برای شکل‌دهی تدریجی (ابعاد به میلی‌متر می‌باشد)

در طی فرآیند شکل‌دهی تدریجی موارد سرعت چرخش اسپیندل، سرعت پیشروی ابزار، دمای شکل‌دهی تدریجی، گام عمودی، ضخامت ورق، روانکار، جنس ورق و شکل ابزار از متغیرهای تأثیر گذار بر شکل‌پذیری ورق می‌باشند. در این تحقیق با مطالعه مقالات مختلف و همچنین با توجه تجهیزات در دسترس چهار متغیر سرعت تغذیه، مقدار گام عمودی، دما و نوع روانکار مورد بررسی قرار گرفت.

در طی انجام آزمایش‌ها نیز سرعت چرخش اسپیندل ثابت و برابر با صفر می‌باشد زیرا چرخش آن سبب ایجاد گرما شده و باعث افزایش دمای سطح ورق، بیشتر از دمای تنظیمی می‌شود [21]. برای انتخاب نوع روانکار نیز با توجه به دمای بالای آزمایش‌ها باید نوعی از روانکار استفاده شود که در دمای بالا دچار تبخیر نشده و همچنین خاصیت روانکاری خود را نیز حفظ کند. بنابراین روانکارهای استفاده شده گریس پایه مولیبدن دی سولفید، گریس پایه لیتیموم و پودر گرافیت می‌باشند [20,22]. سرعت پیشروی نیز در محدوده ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده [20,21]. میزان گام عمودی نیز بین ۰/۲ تا ۰/۷ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است [21]. دمای آزمایش‌ها نیز محدوده دمای اتاق تا ۲۹۰ درجه سلسیوس می‌باشد. دمای ۲۹۰ درجه سلسیوس به عنوان حداکثر دما می‌باشد. زیرا با توجه به امکانات موجود رسیدن به دمای بالاتر از ۲۹۰ درجه سلسیوس امکان پذیر نبوده است. متغیرهای فرآیند و سطوح تغییر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱) متغیرهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی

سرعت تغذیه (mm/min)	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰
دما (°C) محیط	۲۹۰	۲۰۰	۱۰۰	دمای محیط
گام عمودی (mm)	۰/۲	۰/۳۵	۰/۵	۰/۷
روانکار	خشک	گریس پایه لیتیموم	پودر گرافیت	گریس پایه مولیبدن دی سولفید





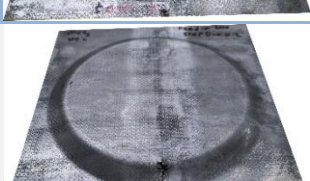

### ۳- تحلیل نتایج






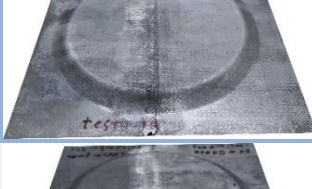


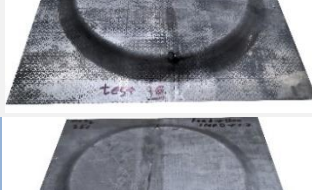
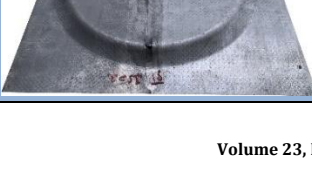
عیوبی مانند بریدگی خط جوش در مقطع جوش مشاهده نشد. عیب تخلخل یا مک یک از عیوبی است که در مقطع جوش دیده می‌شود که دلیل آن وجود رطوبت و حساس بودن ورق آلومینیوم به جوشکاری ذوبی می‌باشد که در نتایج سایر محققین نیز به این موضوع اشاره شده است. چگالی تخلخل‌ها یا تعداد آنها در مقطع جوش محدود می‌باشد و کم بودن تعداد آنها مانع از شکست نمونه از مقطع جوش در آزمون خمش می‌شود.

در جدول ۳ نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها بصورت خلاصه نمایش داده شده است. در این جدول عمق حاصل از شکل‌دهی تدریجی و وضعیت ظاهری نمونه‌ها ذکر شده و در ادامه به طور مفصل این نتایج و تأثیر هر کدام از متغیرها برای بر روی شکل‌دهی تدریجی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

همانطور که در بخش آزمایش‌های تجربی بیان شد برای بررسی کیفیت جوش نمونه‌ها و انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری از روش سعی و خطا استفاده شد و بعد از هر بار جوشکاری با آزمون خمش کیفیت جوش مورد بررسی قرار گرفت. به این صورت که نمونه‌ها در راستای خط جوش (بحرانی‌ترین وضعیت) تحت خمش قرار گرفتند و در صورت شکست نمونه از خط جوش، با تغییر پارامترها نمونه دیگری جوشکاری و مجدداً مورد آزمون خمش قرار گرفت. شکل ۴ یک نمونه با کیفیت مناسب پس از آزمون خمش را نشان می‌دهد. علاوه بر این ریزساختار مقطع جوش نمونه‌ای که در تست خمش دچار شکست نشد، مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۵ ارائه شده است. همانطور که از این شکل مشخص است نفوذ در مقطع جوش بطور کامل انجام شده است

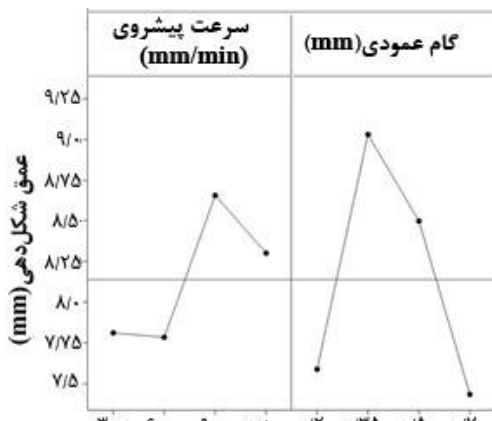
**جدول ۳) نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها (در جدول منظور از روی ورق سطحی از ورق بوده که در تماس با ابزار است و پشت ورق نیز سطح مقابل می‌باشد)**

نمونه عمق (mm)	تصویر نمونه‌ها پس از شکل‌دهی	بررسی وضعیت ظاهری نمونه‌ها
۱ ۴/۳۵		روی ورق: صافی سطح، مطلوب و همراه با مقداری چسبندگی و طول ترک بلندتر نسبت به پشت ورق پشت ورق: صافی سطح مطلوب
۲ ۶/۹		روی ورق: صافی سطح بسیار نامطلوب و همراه با چسبندگی ذرات ورق و پودر گرافیت پشت ورق: صافی سطح خیلی خوب ولی دارای برآمدگی حاصل از چسبندگی‌ها است.
۳ ۷/۵۰		صافی سطح در هر دو طرف ورق بسیار مطلوب
۴ ۱۲/۵۰		صافی سطح در هر دو طرف ورق بسیار مطلوب
۵ ۶/۹۰		صافی سطح در هر دو طرف ورق بسیار مطلوب
۶ ۷/۵۳		صافی سطح در هر دو طرف ورق بسیار مطلوب

روی ورق: صافی سطح بسیار نامطلوب و دارای چسبندگی زیاد و پس‌زدگی ابزار از مسیر حرکت پشت ورق: صافی سطح نسبتاً مطلوب و دارای برآمدگی و پس‌زدگی ابزار می‌باشد.		۷	۱۱/۳۰
روی ورق: صافی سطح بسیار نامطلوب و دارای چسبندگی زیاد و پس‌زدگی ابزار از مسیر حرکت پشت ورق: صافی سطح نسبتاً مطلوب و دارای برآمدگی و پس‌زدگی ابزار می‌باشد.		۸	۵/۴۰
صافی سطح در هر دو طرف ورق بسیار مطلوب		۹	۱۰/۵۰
صافی سطح در هر دو طرف ورق بسیار مطلوب		۱۰	۱۲/۲۰
روی ورق: صافی سطح بسیار نامطلوب و دارای چسبندگی زیاد و پس‌زدگی ابزار از مسیر حرکت پشت ورق: صافی سطح نسبتاً مطلوب و دارای برآمدگی و پس‌زدگی ابزار می‌باشد.		۱۱	۶/۵۰
روی ورق: صافی سطح مطلوب و دارای ترک می‌باشد پشت ورق: صافی سطح نسبتاً مطلوب و دارای برآمدگی جزئی می‌باشد.		۱۲	۵/۴۳
روی ورق: صافی سطح بسیار نامطلوب و دارای چسبندگی زیاد و پس‌زدگی ابزار از مسیر حرکت پشت ورق: صافی سطح نسبتاً مطلوب و دارای برآمدگی و پس‌زدگی ابزار می‌باشد.		۱۳	۸/۶۰
روی ورق: صافی سطح بسیار نامطلوب و دارای چسبندگی زیاد و پس‌زدگی ابزار از مسیر حرکت پشت ورق: صافی سطح نسبتاً مطلوب و دارای برآمدگی و پس‌زدگی ابزار می‌باشد.		۱۴	۹/۵۰
صافی سطح در هر دو طرف ورق بسیار مطلوب		۱۵	۸/۷۰
صافی سطح در هر دو طرف ورق بسیار مطلوب		۱۶	۶/۴۰

پیشروی ۹۰۰ میلی‌متر بر دقیقه سرعت مناسبی برای بهبود شکل‌پذیری می‌باشد.

با بررسی نتایج داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های تجربی در نرم افزار مینی تب که در شکل ۶ نیز قابل رویت است می‌توان مشاهده کرد که با افزایش گام عمودی از ۰/۲ به ۰/۳۵ میلی متر عمق کشش از ۷/۵۸ به ۹/۰۳ میلی‌متر افزایش یافته است. همچنین با افزایش گام عمودی از ۰/۳۵ به ۰/۷ میلی‌متر عمق شکل‌دهی از ۹/۰۳ به ۷/۵ میلی‌متر کاهش پیدا کرده است.



شکل ۶) تأثیر تغییرات گام عمودی و سرعت پیشروی بر عمق کشش

بنابراین با بررسی روند عمق شکل‌پذیری در گام‌های عمودی از ۰/۳۵ تا ۰/۷ میلی‌متر می‌توان مشاهده نمود که شکل‌پذیری به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. با توجه به این امر که گام عمودی تأثیر مستقیمی بر روی نیروهای عمودی وارد شده به ورق دارد، می‌توان این گونه نتیجه گرفت که با افزایش گام عمودی، نیروی‌های عمودی وارد شده به ورق ترکیبی آلومینیم بیشتر از ظرفیت شکل‌پذیری ورق‌ها بوده و هر چه میزان گام عمودی بیشتر شده عمق شکل‌پذیری کاهش یافته است.

همچنین در گام عمودی ۰/۲ نیز که عمق شکل‌دهی پایین است می‌توان بدین گونه توضیح داد، که میزان همپوشانی سطحی از ورق، که ابزار در گام های متوالی طی می‌کند [23] با کاهش بیش از اندازه گام، همپوشانی مسیرهای ابزار بالا رفته و در نتیجه یک سطح مشخص از ورق در گام‌های متوالی مکرراً تحت تنش‌های عمودی و اصطکاکی قرار گرفته و به تبع آن عیوب بیشتری در ماده شکل گرفته و پارگی، زودتر از موعد، نسبت به گام های عمودی بالاتر رخ می‌دهد.

#### ۴-۲- بررسی تأثیر دما و روانکار بر عمق شکل‌دهی تدریجی

با تحلیل نتایج آزمایش‌های تجربی مشاهده گردید که افزایش دما سبب افزایش قابل توجه عمق شکل‌دهی تدریجی می‌شود. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در دمای محیط عمق شکل‌دهی به اندازه ۶/۲ میلی متر می‌باشد اما با افزایش دما به

اما با بررسی اجمالی جدول ۳ مشاهده می‌شود که بیشترین عمق شکل‌دهی در آزمایش ۴ اتفاق افتاده است که دما ۲۹۰ درجه سلسیوس بوده و روانکار نیز گریس پایه لیتیموم می‌باشد. کمترین عمق شکل‌دهی نیز در آزمایش ۱ اتفاق افتاده است که آزمون در درمای اتاق بوده و روانکار نیز استفاده نشده است.



شکل ۴) نمونه جوش شده پس از آزمون خمش



شکل ۵) ریزساختار مقطع جوش ورق آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳

#### ۴-۴- تأثیر پارامترهای فرآیند بر عمق شکل‌دهی تدریجی

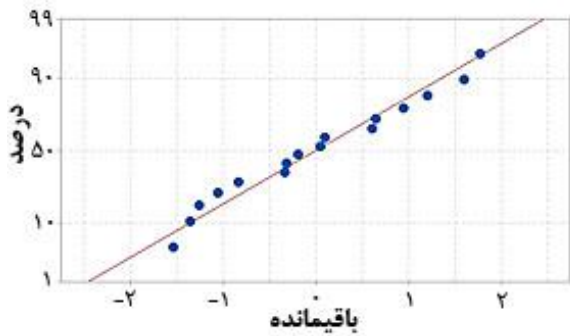
##### ۴-۱- بررسی تأثیر سرعت پیشروی و گام عمودی بر عمق شکل‌دهی تدریجی

با تحلیل نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تجربی به وسیله نرم افزار مینی تب، نمودار عمق کشش بر حسب سرعت پیشروی و گام عمودی در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، افزایش سرعت از ۳۰۰ به ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه سبب تغییر عمده‌ای در شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی نشده است. اما با افزایش سرعت پیشروی از ۶۰۰ به ۹۰۰ میلی‌متر بر دقیقه عمق کشش از ۷/۷۸ به ۸/۶۵ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش سرعت پیشروی از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، عمق کشش از ۸/۶۵ به ۸/۳ میلی‌متر رسیده است که نشان از کاهش عمق شکل‌پذیری است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت



تر روانکار پودری در مقایسه با گریس می‌تواند دلیل اصلی شکل‌پذیری پایین تر ورق در حضور آن باشد [20].

در شکل ۸ مقایسه نتایج آزمایش‌های صورت گرفته با مقادیر احتمال نرمال ارائه شده است. همانطور که از شکل قابل برداشت است نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی با مقادیر مدل فرضی حاصل از طراحی آزمون تاگوشی نزدیک می‌باشند که نشان از صحت آزمایش‌ها دارند.



شکل ۸) نمودار احتمال نرمال

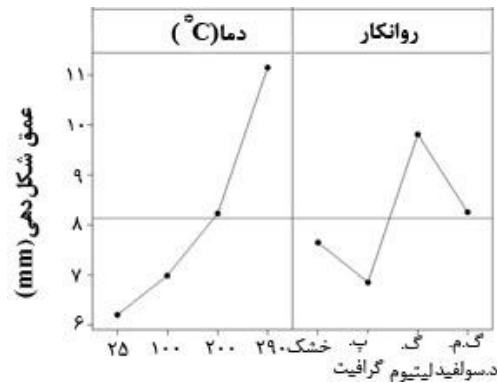
در ادامه اثر تعاملی همزمان دو متغیر مستقل بر عمق شکل‌دهی از طریق نمودارهای اثر تعاملی همزمان دو متغیر درحالی‌که بقیه متغیرها را در سطوح میانی در فضای طراحی ثابت نگه می‌دارد، بررسی می‌شوند.

با بررسی نمودار شکل ۹ الف و ب مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار گام عمودی در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۷ میلی‌متر و سرعت پیشروی در محدوده ۳۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر بر دقیقه رنگ نمودار تیره‌تر شده که نشان می‌دهد مقدار عمق شکل‌دهی افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش سرعت پیشروی در محدوده ۷۵۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و در گام‌های عمودی پایین در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر نیز رنگ نمودار تیره‌تر شده که نشان می‌دهد مقدار عمق شکل‌دهی افزایش پیدا کرده است. اما به طور دقیق‌تر در ناحیه سرعت پیشروی ۹۰۰ تا ۱۰۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و گام عمودی ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ میلی‌متر نمودار در تیره‌ترین حالت ممکن یعنی عمق کشش ۱۲/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد بنابراین این مقادیر از گام عمودی و سرعت پیشروی حالت بهینه‌ای برای حداکثر عمق کشش می‌باشند.

با بررسی شکل ۱۰ الف و ب نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دما و مقدار سرعت پیشروی محدوده سبز رنگ نمودار پررنگ تر شده که نشان می‌دهد مقدار عمق شکل‌دهی افزایش پیدا کرده است. اما نواحی قابل توجه که در شکل ۸ ب نیز مشخص است زمانی است که سرعت پیشروی در بازه‌ای شامل مقادیر ۸۵۰ تا ۱۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و دما در محدوده ۱۷۵ تا ۲۹۰ درجه سلسیوس سبب افزایش عمق شکل‌پذیری شده است. یعنی در این نواحی می‌توان به محدوده‌ای برای مقادیر دما و سرعت پیشروی دست پیدا کرد که میزان شکل‌دهی در حداکثر مقدار ممکن قرار باشد.

۲۹۰ درجه سلسیوس عمق شکل‌دهی به ۱۱/۱۵ میلی‌متر می‌رسد، یعنی به اندازه ۷۹ درصد عمق شکل‌دهی افزایش پیدا می‌کند.

این پدیده را می‌توان اینگونه توضیح داد که با افزایش دما، انرژی نایجایی‌ها برای حرکت‌های صعودی و لغزش افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه نایجایی‌ها از موانع راحت‌تر عبور کرده و شکل‌پذیری آسان‌تر می‌شود.

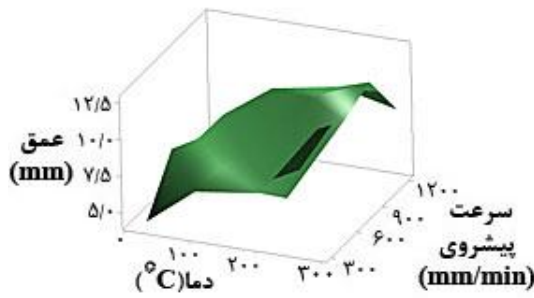


شکل ۷) تاثیر تغییرات روانکار و دما بر عمق کشش

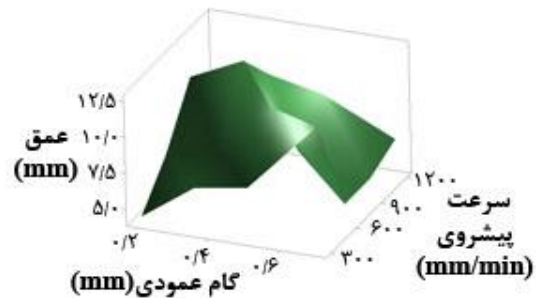
همچنین با گذرکردن دما از مقدار نیمی از دمای ذوب ورق‌های آلومینیم و تغییرات در ریزساختار ماده، از جمله کاهش چگالی نایجایی ناشی از تشدید پدیده تبلور مجدد دینامیکی و همچنین فعال شدن صفحات لغزشی بیشتر، شکل‌پذیری ماده افزایش می‌یابد. [24]

همانطور که در شکل ۷ نیز قابل رویت است، مشاهده گردید که نوع روانکار، تأثیر بسزایی بر روی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی دارد. بدین صورت که با استفاده از روانکار گریس پایه لیتیم عمق شکل‌دهی تدریجی ۹/۸ میلی‌متر می‌باشد و با استفاده از گریس پایه مولیبدن دی سولفید عمق کشش ۸/۲۵ میلی‌متر شده است، در آزمون بدون روانکار نیز عمق کشش ۷/۶۴ میلی‌متر و در آزمون شکل‌دهی با پودر گرافیت نیز عمق کشش ۶/۸۵ میلی‌متر شده است.

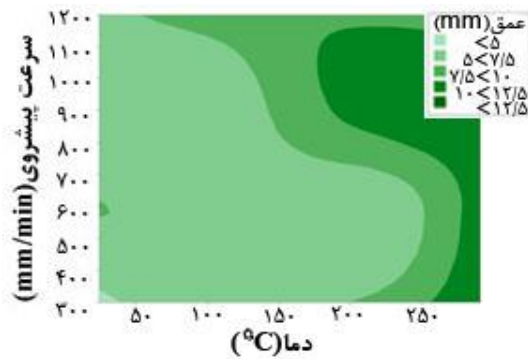
دلیل اختلاف شکل‌پذیری در حضور روانکارهای مختلف را می‌توان در توانایی روانکار در نفوذ میان ابزار و ورق و عیوب ناشی از آن جستجو کرد. روانکارهای گریس، دارای ذرات پخش شده در گریس است و در نتیجه با چسبیدن به سطح ابزار، مواد لازم برای روانکاری را در ناحیه مورد نظر همواره حفظ می‌کند. ولی در مورد روانکار پودری، به دلیل عدم اتصال مناسب روانکار به ورق، با حرکت ابزار، ذرات روانکار به اطراف رانده می‌شوند. لذا تأمین همیشگی روانکار پودری لازم در ناحیه شکل‌دهی در طول فرآیند، امری دشوار است. همچنین تجمع پودر ناشی از رانده شدن ذرات به کناره‌ها سبب می‌شود که در فرآیند شکل‌دهی تدریجی نقطه‌ای، ابزار در طی مسیر با پودر جمع شده برخورد کرده و بر روی ورق ترک و سطوح ناهموار ایجاد کند. عیوب سطحی ناشی از عملکرد ضعیف



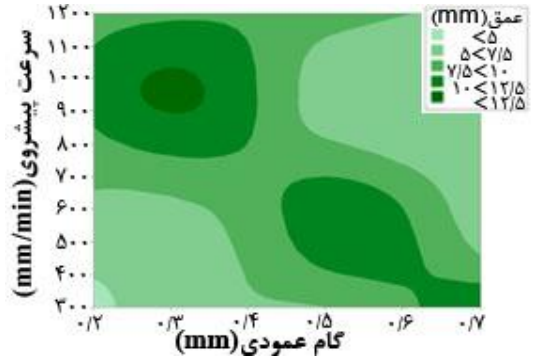
الف



ب



ب



ب

شکل ۹ (الف) نمودار سه بعدی اثر تعاملی همزمان دو متغیر گام عمودی و سرعت پیشروی بر عمق شکل‌دهی (ب) نمودار دو بعدی اثر تعاملی همزمان دو متغیر دما و سرعت پیشروی بر عمق شکل‌دهی

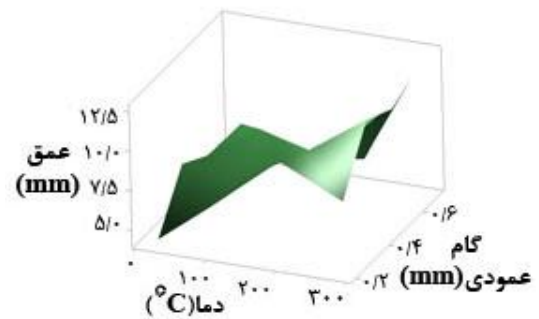
شکل ۹ (الف) نمودار سه بعدی اثر تعاملی همزمان دو متغیر گام عمودی و سرعت پیشروی بر عمق شکل‌دهی (ب) نمودار دو بعدی اثر تعاملی همزمان دو متغیر دما و سرعت پیشروی بر عمق شکل‌دهی

با بررسی شکل ۱۱ الف و ب نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دما در محدوده ۱۸۵ تا ۲۹۰ درجه سلسیوس محدوده سبز نمودار پررنگ تر شده که نشان می‌دهد مقدار عمق شکل‌دهی افزایش پیدا کرده است. ولی با افزایش مقدار گام عمودی از ۰/۲ تا ۰/۷ میلی‌متر ناحیه پررنگ تر در راستای عمودی نمودار کاهش پیدا کرده است که نشان می‌دهد افزایش گام عمودی سبب کاهش محدوده کاری و در نتیجه کاهش شکل‌پذیری ورق ترکیبی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی می‌گردد. بنابراین با توجه به شکل ۱۱ ب نواحی دمایی ۱۸۵ تا ۲۹۰ درجه سلسیوس و گام عمودی ۰/۲ تا ۰/۴۸ میلی‌متر بیشترین ناحیه عمق کشش را شامل می‌شوند.

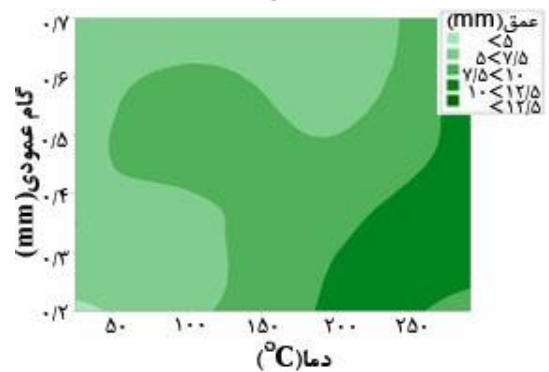
#### ۵- تأثیر پارامترهای آزمایش بر وضعیت ظاهری ورق‌ها در شکل‌دهی تدریجی

##### ۵-۱- بررسی تأثیر متغیرها بر وضعیت کیفی ظاهری

با بررسی ظاهری ورق‌های شکل‌دهی شده توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم مشخص گردید که سرعت پیشروی تأثیر بسزایی بر روی ظاهر و صافی سطح ورق‌ها ندارد. همچنین با بررسی متغیر گام عمودی نیز مشخص گردید که این متغیر نیز بر روی ظاهر و صافی سطح ورق‌ها خیلی تأثیرگذار نیست. هر چند که مقدار گام عمودی پایین سبب همپوشانی مسیرهای حرکتی می‌شود و می‌تواند بر روی بافت سطوح تأثیرگذار باشد اما به صورت بصری

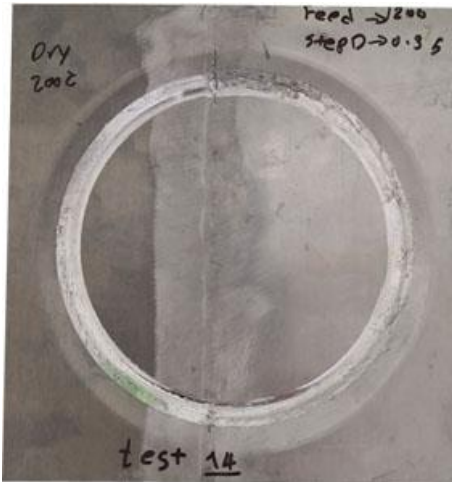


الف



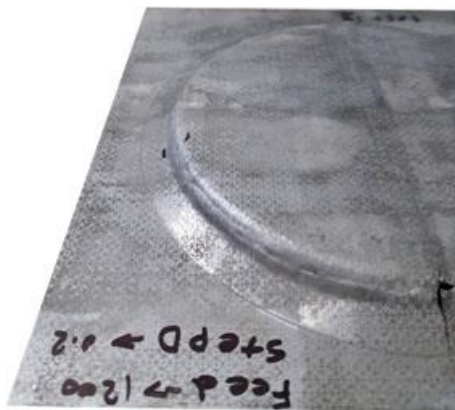
ب

شکل ۱۱ (الف) نمودار سه بعدی اثر تعاملی همزمان دو متغیر گام عمودی و دما بر عمق شکل‌دهی (ب) نمودار دو بعدی اثر تعاملی همزمان دو متغیر گام عمودی و دما بر عمق شکل‌دهی



شکل ۱۳) آزمون ۱۴ بدون روانکار، سمت راست ورق ۶۰۶۱ و سمت چپ ورق ۵۰۸۳

۴- در نمونه‌هایی که از روانکار پودر گرافیت استفاده شده است اثر چسبندگی بین ذرات جدا شده از ورق‌های آلومینیوم و پودر گرافیت و همچنین اثرات بی‌نظمی در سطوح به وضوح مشخص می‌باشد و با افزایش دمای فرآیند این چسبندگی به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. همچنین اثرات برجستگی و اعوجاج در دو سمت ورق همانند شکل ۱۴ قابل رویت می‌باشد



شکل ۱۴) آزمون ۱۳ برجستگی و اعوجاج سطح شکل‌دهی شده

با استفاده از پودر گرافیت با اتمام فرآیند شکل‌دهی تدریجی مشاهده می‌شود که همانند شکل ۱۵ صافی سطح ورق ۶۰۶۱ در وضعیت نامطلوب‌تری نسبت به ۵۰۸۳ قرار گرفته است. همچنین برای استفاده از روانکار پودری باید توجه داشت که ایجاد لایه یکنواخت روانکار بسیار دشوار بوده و با جابجایی روانکار تجمع پودری ایجاد شده و سبب نامطلوب شدن سطح می‌شود.

#### ۶- جمع بندی

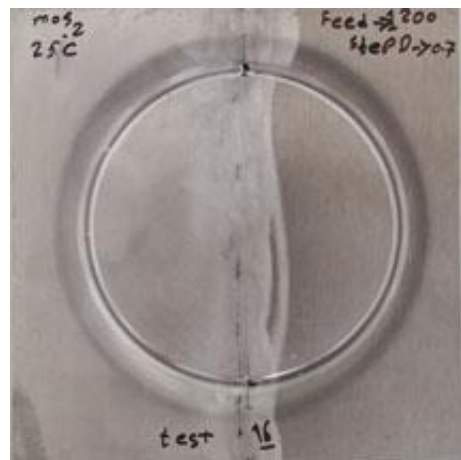
در تحقیق حاضر تأثیر مهم‌ترین پارامترهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای در دمای بالا بر روی میزان شکل‌پذیری ورق

این تاثیرات قابل رویت نبوده و در طی انجام این آزمایش‌ها تغییر محسوسی در سطوح مشاهده نگردید.

با بررسی شرایط دمایی نیز مشاهده می‌شود که در نمونه‌هایی که روانکار بصورت گریس می‌باشد وضعیت ظاهری صافی سطح در تمامی دماها مطلوب می‌باشد زیرا روانکارهای گریس با ایجاد لایه فیلمی مانع ایجاد اصطکاک و چسبندگی بین ابزار و ورق می‌شود. اما در نمونه‌هایی که بدون روانکار و روانکار پودر گرافیت می‌باشد با افزایش دما چسبندگی به شدت افزایش یافته و صافی سطح نامطلوب بوده و در سطح تماس ابزار با ورق اثر برآمدگی و بی‌نظمی به وضوح قابل مشاهده است.

در بررسی نوع روانکارهای استفاده شده نیز مشاهده می‌شود که در طی انجام آزمایش‌ها بیشترین تأثیر روانکار بر صافی سطح ورق‌ها می‌باشد بدین ترتیب که:

- ۱- در نمونه‌هایی که روانکار گریس پایه مولیبدن دی سولفید می‌باشد صافی سطح در هر دو سمت ورق‌های ترکیبی دارای کیفیت مطلوب است و هیچ اثری از بی‌نظمی و چسبندگی و یا برآمدگی مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۲).
- ۲- در نمونه‌هایی که روانکار گریس پایه لیتیوم می‌باشد نیز صافی سطح در هر دو سمت ورق دارای کیفیت خوبی است و هیچ اثری از بی‌نظمی و چسبندگی و یا برآمدگی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۲) آزمون ۱۶ روانکار گریس پایه مولیبدن دی سولفید، سمت چپ ورق ۶۰۶۱ و سمت راست ورق ۵۰۸۳

۳- در نمونه‌هایی که روانکار استفاده نشده است اثر چسبندگی و بی‌نظمی در سطوح مانند شکل ۱۳ به وضوح مشخص می‌باشد و با افزایش دمای فرآیند شکل‌دهی تدریجی چسبندگی به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. همچنین در این آزمایش‌ها در هر دو سمت ورق اثر برجستگی و اعوجاج مشخص بوده و در پایان انجام فرآیند صافی سطح ورق ۶۰۶۱ در وضعیت نامطلوب‌تری نسبت به ۵۰۸۳ قرار گرفته است.

شکل‌دهی برای ورق ترکیبی آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ بدست خواهد آمد: سرعت پیشروی محدوده ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، گام عمودی محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۴۵ میلی‌متر، دما محدوده ۱۸۰ تا ۲۹۰ درجه سلسیوس و روانکاز نیز گریس پایه لیتیم.

۶- در بحث ظاهری نیز روانکار بیشترین تأثیر را داشته و پس از آن دما، گام عمودی و سرعت پیشروی تأثیرگذار می‌باشند. استفاده از روانکارهای گریس نیز سبب بهبود قابل توجه صافی سطح شده اما در مقابل روانکار پودری اثرات نامطلوبی بر روی صافی سطح می‌گذارد.

۷- در این تحقیق تأثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی شامل نوع روانکار، دمای شکل‌دهی، گام عمودی و سرعت پیشروی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجائیکه پارامترهای بررسی شده پارامترهای فرآیندی می‌باشند و تغییر هندسه نمونه تأثیری بر انتخاب پارامترها ندارد، می‌توان از پارامترهای بهینه پیشنهاد شده برای شکل‌دهی تدریجی ورق ترکیبی آلومینیم با سایر هندسه‌ها نیز استفاده نمود و نتایج بدست آمده قابل تعمیم به سایر هندسه‌ها نیز می‌باشد.

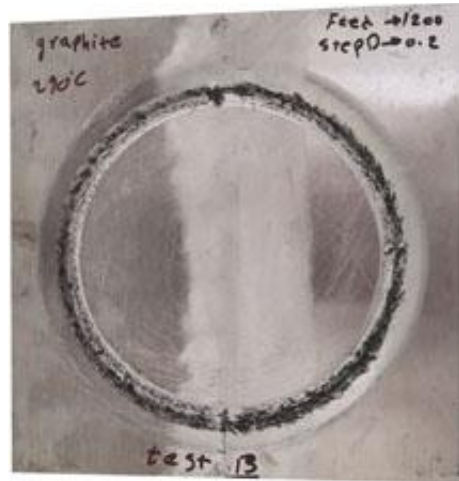
**تائیدیه‌های اخلاقی:** نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

**منابع مالی:** تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

#### منابع

- 1- Dufflou J, Tunckol Y, Szekeres A, Vanherck P. Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007 6;189(1-3):65-72.
- 2- Fratini L, Ambrogio G, Di Lorenzo R, Filice L, Micari F. Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals*. 2004 1;53(1):207-10.
- 3- Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of material formability in incremental forming. *CIRP Annals*. 2002 1;51(1):199-202.
- 4- Silva MB, Skjødt M, Martins PA, Bay N. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008 1;48(1):73-83.
- 5- Hussain G, Gao L. A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007 1;47(3-4):419-35.
- 6- Ham M, Jeswiet J. Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. *CIRP annals*. 2006 1;55(1):241-4.
- 7- Ambrogio G, Filice L, Manco GL. Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31. *CIRP annals*. 2008; 57(1):257-60.



شکل ۱۵) آزمون ۱۳ روانکار پودر گرافیت، سمت راست ورق ۶۰۶۱ و سمت چپ ورق ۵۰۸۳

ترکیبی آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

۱- از حیث اهمیت متغیرها مشاهده گردید که به ترتیب دما، روانکار و گام عمودی بیشترین اثر و سرعت پیشروی کمترین اثر را بر روی شکل‌پذیری دارند.

۲- افزایش سرعت پیشروی سبب بهبود ناچیز شکل‌پذیری می‌شود، زیرا با افزایش سرعت از ۳۰۰ به ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه عمق شکل‌دهی تقریباً ثابت بوده اما با افزایش سرعت به ۹۰۰ میلی‌متر بر دقیقه عمق شکل‌دهی افزایش گشته و با افزایش مجدد سرعت به ۱۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه عمق شکل‌دهی اندکی کاهش می‌یابد. اما بطور کلی با افزایش سرعت پیشروی در این تحقیق عمق شکل‌دهی حداکثر ۱۱ درصد بیشتر شده است.

۳- افزایش دما سبب افزایش عمق شکل‌دهی می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دما از دمای اتاق تا ۲۹۰ درجه سلسیوس، شکل‌دهی تا ۷۹ درصد افزایش پیدا می‌کند.

۴- روانکار نیز در افزایش شکل‌دهی بسیار تأثیرگذار بوده و استفاده از روانکارهای گریس سبب بهبود شکل‌دهی می‌شود. زیرا می‌تواند با ایجاد لایه فیلم بین ابزار و ورق، فاصله بین آن دو را حفظ کرده و با کاهش قابل توجه اصطکاک، نیروهای وارد شده به ورق را کاهش داده و شکل‌دهی را افزایش دهد. اما روانکار پودری خود سبب ایجاد عیوب بیشتری شده و باید توجه داشت که هنگام استفاده از روانکار پودری ایجاد لایه یکنواخت روانکار بسیار دشوار بوده و با جابجایی روانکار تجمع پودری ایجاد شده و سبب نامطلوب شدن سطح می‌شود و از شکل‌دهی ورق می‌کاهد. در مورد گریس‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که آن‌ها به طور کلی پوشش خوبی بر روی سطح ارائه می‌دهند.<sup>[25]</sup>

۵- با بررسی نمودارهای تعاملی می‌توان نتیجه گرفت که اگر متغیرها در نواحی ذکر شده زیر انتخاب شوند، بیشترین میزان

- incremental forming for titanium grade 2 sheet. In 2018 Third International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT) 2018 19 (pp. 1-4). IEEE.
- 23- Vahdani M, Mirnia MJ, Gorji H, Bakhshi-Jooybari M. Experimental investigation of formability and surface finish into resistance single-point incremental forming of Ti-6Al-4V titanium alloy using Taguchi design. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019 1;72:1031-41.
- 24- Fan X, Suo T, Sun Q, Wang T. Dynamic mechanical behavior of 6061 Al alloy at elevated temperatures and different strain rates. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2013;26(2):111-20.
- 25- Azevedo NG, Farias JS, Bastos RP, Teixeira P, Davim JP, Alves de Sousa RJ. Lubrication aspects during single point incremental forming for steel and aluminum materials. *International Journal of precision engineering and manufacturing*. 2015 ;16:589-95.
- 8- Hamilton K, Jeswiet J. Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences. *CIRP annals*. 2010 1;59(1):311-4.
- 9- LI JC, Chong LI, Zhou TG. Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012 1;22:s54-60.
- 10- Mirnia MJ, Mollaei Dariani B, Vanhove H, Dufloy JR. An investigation into thickness distribution in single point incremental forming using sequential limit analysis. *International Journal of Material Forming*. 2014;7:469-77.
- 11- Soltani B. Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming. *Modares Mechanical Engineering*. 2014 10;14(1):89-96.
- 12- Kim TJ, Yang DY. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000 1;42(7):1271-86.
- 13- Wen T, Chen X, Zheng J, Qing J, Tang ZX. Multi-directional incremental sheet forming—a novel methodology for flexibly producing thin-walled parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;91:1909-19.
- 14- Korouyeh RS, Naeini HM, Torkamany MJ, Sabaghzadee J. Effect of laser welding parameters on forming behavior of tailor welded blanks. In *Advanced Materials Research 2012 (Vol. 445, pp. 406-411)*. Trans Tech Publications Ltd.
- 15- Merklein M, Johannes M, Lechner M, Kuppert A. A review on tailored blanks—Production, applications and evaluation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014 1;214(2):151-64.
- 16- Safdarian R. The effects of strength ratio on the forming limit diagram of tailor-welded blanks. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018 2;45(1):17-24.
- 17- Parente M, Safdarian R, Santos AD, Loureiro A, Vilaca P, Jorge RN. A study on the formability of aluminum tailor welded blanks produced by friction stir welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016 ;83:2129-41.
- 18- Oleksik V, Dobrota D, Racz SG, Rusu GP, Popp MO, Avrigean E. Experimental research on the behaviour of metal active gas tailor welded blanks during single point incremental forming process. *Metals*. 2021 22;11(2):198.
- 19- Emami R, Mirnia MJ, Elyasi M, Zolfaghari A. An experimental investigation into single point incremental forming of glass fiber-reinforced polyamide sheet with different fiber orientations and volume fractions at elevated temperatures. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2022 2:08927057221074266.
- 20- Darzi S, Mirnia MJ, Elyasi M. Experimental Investigation of Elevated Temperature Single Point Incremental Forming of AA6061 Aluminum Sheet. *Modares Mechanical Engineering*. 2020 10;20(8):2171-84.
- 21- Li Z, Lu S, Zhang T, Zhang C, Mao Z. 1060 Al electric hot incremental sheet forming process: Analysis of dimensional accuracy and temperature. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018;71:961-70.
- 22- Sornsuwit N, Sittisakuljaroen S, Sangsai N, Suwankan P. Effect of heat treatment on single point