



## Investigation of Forming Limit of Aluminum Sheet in Warm Incremental Forming Process

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Roohi H.<sup>1</sup> Msc,  
Deilami Azodi H.\*<sup>1</sup> PhD,  
Safari M.<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Roohi H, Deilami Azodi H, Safari M. Investigation of Forming Limit of Aluminum Sheet in Warm Incremental Forming Process. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(2):259-268.

### ABSTRACT

Incremental sheet forming is one of the novel processes, which is used for rapid prototyping and manufacturing of parts with complex geometries. Forming limit of sheet metal in this process is high compared to other conventional forming processes. In this paper, warm single-point incremental forming process through uniform heating to sheet along with tool heating is studied experimentally and numerically. Formability of sheet is investigated in various process condition based on the straight groove test in experimental approach and numerical simulation, using finite element method. Tool heating along with uniform heating to sheet makes tool and sheet isothermal, reduces the heat loss in deformation zone, and improves the deformation process. So, attainment of high forming limit is made possible. Comparison of forming limit diagrams obtained from experimental and numerical approaches shows a good agreement between the results. Effects of temperature and feed rate on the forming limit of aluminum 1050 sheet are investigated. Results show that increasing the temperature improves the formability of sheet significantly; but, the temperature is more influential on forming limit in low feed rates. Increasing the feed rate reduces the forming limit slightly; this effect is more evident in higher temperatures.

**Keywords** Warm Single Point Incremental Forming; Formability; Forming Limit Diagram; Straight Groove Test; Finite Element Simulation

### CITATION LINKS

[1] Fundamental studies on the incremental sheet ... [2] Asymmetric single point incremental forming ... [3] Single point incremental forming and the forming ... [4] Forming limit of incremental sheet metal stretch forming ... [5] Effect of process parameters on formability in incremental forming ... [6] The formability of aluminium sheet in ... [7] Formability study and forming path optimization in single-point ... [8] Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two ... [9] An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone ... [10] Improved SPIF performance through ... [11] Electric hot incremental forming: ... [12] Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of ... [13] Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming ... [14] Incremental forming of free surface with magnesium alloy AZ31 sheet ... [15] Warm incremental forming of ... [16] Study of forming limit for rotational incremental sheet forming of ... [17] Formability of lightweight alloys by hot ... [18] Electric hot incremental forming of ... [19] Electric hot incremental forming of low carbon steel ... [20] Tool concepts and materials for incremental sheet metal forming with ... [21] Hot single point incremental ... [22] Hot incremental forming of magnesium and aluminum alloy sheets by using ... [23] Mechanical property of Ti-6Al-4V sheet in one-sided ... [24] Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming ... [25] Tool frictional stir effect on dimensional accuracy and formability in single point ... [26] Experimental formability investigation of titanium alloy in hot ... [27] Numerical analysis of large deformation processes at ... [28] Properties and selection: Nonferrous alloys and ... [29] Experimental and numerical study of an AlMgSc sheet formed ... [30] Modeling and optimization of process parameters of the single point incremental forming of aluminum 5052 alloy sheet using genetic ... [31] The significance of friction in the single point ... [32] Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using ... [33] Localized necking in ... [34] An improved method for determining a forming limit diagram in ... [35] Formability: A review of parameters and processes that control, limit or ...

<sup>1</sup>Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, Arak University of Technology, Arak, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Arak University of Technology, Daneshgah Boulevard, Arak, Iran. Postal Code: 3818141167  
Phone: +98 (86) 33400662  
Fax: +98 (86) 33670020  
hdazodi@arakut.ac.ir

#### Article History

Received: June 10, 2018  
Accepted: October 08, 2018  
ePublished: February 01, 2019

## بررسی حد شکل‌دهی ورق آلومینیومی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم

حسین روحی Msc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

حامد دلیلی‌عضدی \* PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

مهدی صفری PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

### چکیده

شکل‌دهی تدریجی ورق از جمله فرآیندهای نوین است که در نمونه‌سازی سریع و ساخت قطعات با هندسه پیچیده به کار می‌رود. حد شکل‌دهی در این فرآیند در مقایسه با سایر فرآیندهای متداول شکل‌دهی بیشتر است. در این مقاله فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گرم با گرمادهی همگن به ورق به‌همراه گرمایش ابزار به‌صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل‌پذیری ورق بر مبنای آزمون شیار مستقیم شرایط مختلف فرآیند با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش اجزای محدود تعیین می‌شود. گرمایش ابزار به‌همراه اعمال سیستم گرمایش همگن به ورق باعث هم‌دماشدن ابزار و ورق شده و با کاهش اتلاف حرارت در منطقه تغییر شکل موجب بهبود فرآیند تغییر شکل شده و امکان دست‌یابی به حدود شکل‌دهی بالایی را میسر می‌سازد. مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی و عددی نشان‌دهنده انطباق خوب بین نتایج در شرایط مختلف فرآیند است. اثر دما و سرعت پیشروی روی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما شکل‌پذیری ورق به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد اما میزان تاثیر دما بر حد شکل‌دهی ورق در سرعت پیشروی پایین‌تر بیشتر است. افزایش نرخ پیشروی، حد شکل‌دهی را به مقدار کمی کاهش می‌دهد. این کاهش شکل‌پذیری در دمای بالا مشهودتر است.

**کلیدواژه‌ها:** شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گرم، شکل‌پذیری، نمودار حد شکل‌دهی، آزمون شیار مستقیم، شبیه‌سازی اجزا محدود

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۶

نویسنده مسئول: hdazodi@araku.ac.ir

### ۱- مقدمه

معمولاً تولید قطعات ورقی مستلزم استفاده از قالب‌ها و دستگاه‌های پرس است، اما این روش‌ها به‌علت هزینه نسبتاً بالای ساخت قالب شکل‌دهی، عموماً در تولید با تعداد کم یا ساخت نمونه‌های اولیه یک قطعه مقرون‌به‌صرفه نیست<sup>[1]</sup>. در سال‌های اخیر به‌علت افزایش تنوع در محصولات و نیاز روزافزون به ساخت سریع نمونه‌های اولیه برای ارزیابی قابلیت‌های محصولات جدید، فرآیندهای نوینی از جمله شکل‌دهی تدریجی ورق (ISF) برای نمونه‌سازی سریع و تولید قطعات در حجم کم توسعه یافته است. از مزایای شکل‌دهی تدریجی ورق می‌توان به انعطاف بالا و هزینه کم فرآیند، نیروی شکل‌دهی کمتر و حد شکل‌دهی بیشتر در مقایسه با سایر فرآیندهای متداول تولید اشاره نمود<sup>[2]</sup>. در شکل ۱ اصول کلی فرآیند شکل‌دهی تدریجی به‌صورت شماتیک نشان داده شده است<sup>[3]</sup>.

برخی پژوهش‌ها با هدف بررسی شکل‌پذیری ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی انجام شده است. ایسکی و کومن<sup>[4]</sup> با استفاده از آزمون اتساع تدریجی نشان دادند که منحنی حد شکل‌دهی (FLC) در این روش تقریباً خطی است. پارک و کیم<sup>[1]</sup>، کیم و پارک<sup>[5]</sup> و شیم و پارک<sup>[6]</sup> ضمن بررسی تجربی شکل‌پذیری ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی و اثر برخی عوامل موثر بر آن، روش آزمون شیار مستقیم را برای ارزیابی شکل‌پذیری ورق در این فرآیند

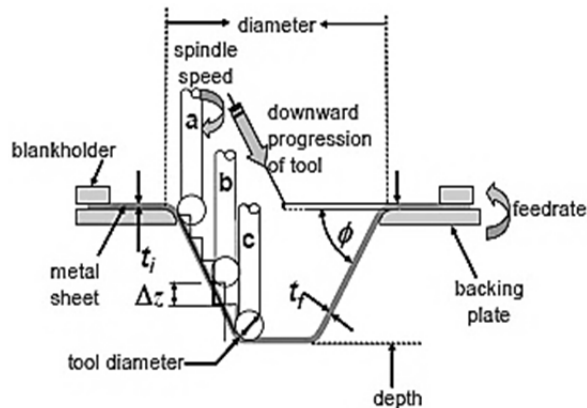
پیشنهاد نمودند. عضدی و همکاران<sup>[7]</sup> در بررسی تجربی و عددی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای با استفاده از دو رویکرد اثر عمق باردهی متغیر بر کرنش معادل و زاویه مسیر شکل‌دهی، به مطالعه شکل‌پذیری ورق آلومینیومی و بهینه‌سازی مسیر شکل‌دهی پرداختند. زهدی و همکاران<sup>[8]</sup> در مطالعه تجربی و عددی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق دولایه فولادی-آلومینیومی با استفاده از شاخص زاویه حد شکل‌دهی مخروط، تاثیر پارامترهای فرآیند روی شکل‌پذیری را مورد بررسی قرار دادند. میرزیا و ملانی‌داریانی<sup>[9]</sup> در مطالعه تجربی و عددی شکل‌دهی تدریجی مخروط ناقص آلومینیومی به‌صورت چندمرحله‌ای، زمان انجام فرآیند و نازک‌شدگی ورق در قطعه نهایی را بهبود بخشیدند. همچنین با طراحی یک استراتژی توانستند محدودیت برآمدگی کف ظرف را به حداقل برسانند.

امروزه استفاده از آلیاژهای سبک پُر استحکام از قبیل آلیاژهای منیزیم، تیتانیوم و آلیاژهای پُر استحکام آلومینیوم در صنایع خودرو و هوافضا بسیار مورد توجه است. با وجود چالش‌های زیاد در فرآیند شکل‌دهی این آلیاژها، تلاش‌هایی برای به‌کارگیری فرآیند شکل‌دهی تدریجی در شکل‌دادن به این مواد شده است. عموماً شکل‌پذیری این مواد در دمای پایین بسیار کم بوده، لذا در پژوهش‌های انجام‌شده به‌کارگیری حرارت و شکل‌دهی در دمای بالا به طرق مختلف مورد توجه قرار گرفته است.

پژوهش‌ها روی فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم از حدود سال ۲۰۰۸ میلادی آغاز شد. عمدتاً تامین حرارت مورد نیاز توسط منبع لیزر و یا منبع الکتریکی صورت می‌گیرد. دافلو و همکاران<sup>[10]</sup> با استفاده از یک منبع حرارتی لیزر با کمک سامانه حرکتی کنترل عددی سه‌محوره به بررسی فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای با حرارت‌دهی موضعی متحرک پرداختند. آنها توانستند شکل‌پذیری ورق و دقت ابعادی قطعات را افزایش و نیروی شکل‌دهی را کاهش دهند.

فن و همکاران<sup>[11]</sup>، روش جدیدی را برای ایجاد حرارت در فرآیند شکل‌دهی تدریجی داغ به کار گرفتند. در این روش ابزار شکل‌دهی و ورق، در یک مدار الکتریکی با منبع قدرت جریان مستقیم قرار دارند. با برقراری جریان الکتریکی از ابزار به ورق، تراکم بالای جریان موجب تولید حرارت موضعی می‌شود. مطابق نتایج آنها با افزایش جریان تا یک حد بهینه، حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. گوتمن و همکاران<sup>[12]</sup>، شکل‌دهی تدریجی داغ ورق آلیاژ Ti-6Al-4V به‌کمک لیزر را به‌صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. جی و پارک<sup>[13]</sup>، [14] نیز شکل‌پذیری ورق آلیاژ منیزیم AZ31 را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای ایجاد گرما از دمنده‌های هوای داغ استفاده و تمامی سطح ورق را گرم نمودند. /مبروجیو و همکاران<sup>[15]</sup> با گرم‌کردن تمام سطح ورق با استفاده از یک قالب با طراحی خاص، حدود شکل‌دهی و عوامل موثر بر آن در شکل‌دهی تدریجی گرم ورق آلیاژ منیزیم AZ31 را مورد بررسی قرار دادند. پارک و همکاران<sup>[16]</sup> با در نظر گرفتن حرارت ایجادشده ناشی از حرکت دورانی ابزار در ناحیه تماس با ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی دورانی (RISF) گرم آلیاژ تجاری منیزیم AZ31B-H24، به مطالعه توزیع کرنش در قطعات شکل‌داده‌شده پرداختند. /مبروجیو و همکاران<sup>[17]</sup> با ایجاد اتصال الکتریکی بین منبع قدرت و ابزار چرخان توانستند حد شکل‌دهی ورق‌هایی از جنس آلیاژهای منیزیم AZ31 و تیتانیوم Ti-6Al-4V را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی داغ الکتریکی با چرخش ابزار به دست آورند. فن و همکاران<sup>[18]</sup> با مطالعه شکل‌دهی تدریجی داغ الکتریکی ورق تیتانیوم Ti-6Al-4V موفق به شکل‌دهی قطعه مخروط ناقص

فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گرم با گرمایش همگن ورق و در حالت ابزار و ورق هم‌دما گزارش نشده است. فرآیند با طراحی و فراهم‌نمودن تجهیزات آزمایش به صورت تجربی در شرایط مختلف بررسی خواهد شد. همچنین فرآیند با کمک روش اجزای محدود به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود. ضمن مطالعه حد شکل‌دهی ورق در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گرم همگن با ابزار و ورق هم‌دما، اثر عوامل مختلف بر شکل‌پذیری ورق بررسی خواهد شد.



شکل ۱) شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای

## ۲- مطالعه تجربی

### ۲-۱- تجهیزات و شرایط آزمایش

آزمایش‌های تجربی فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم با استفاده از دستگاه فرز کنترل عددی سه‌محوره انجام شده است. لبه‌های نمونه ورق با استفاده از یک فیکسچر با فضای کار کلی  $170 \times 170 \times 125$  میلی‌متر کاملاً گیربندی می‌شود. با حرکت ابزار شکل‌دهی بسته‌شده به کلگی ماشین فرز کنترل عددی در مسیرهای معین، هندسه نهایی قطعه شکل می‌گیرد.

ابزار شکل‌دهی تدریجی به شکل سر کروی با جنس آلیاژ فولاد کروم‌دار سخت‌کاری‌شده AISI 52100 در ناحیه کلگی بوده که به صورت غیرچرخشی استفاده شده است. غلافی به منظور نگهداری گرم‌کننده الکتریکی در قسمت دنباله ابزار تعبیه شده است. سیستم گرمایش ترکیبی شامل گرمایش همگن ورق از سمت زیر و گرمایش ابزار به منظور انجام فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم مورد استفاده قرار گرفته است. گرمادهی همگن به ورق با استفاده از گرم‌کننده الکتریکی با ولتاژ بیشینه ۲۲۰ ولت و توان نامی ۷۵۰ وات که در یک قالب سرامیکی با ابعاد کاری  $140 \times 110 \times 20$  میلی‌متر با فاصله‌ای معین از ورق در زیر آن تعبیه شده بود، اعمال شده است. همچنین برای جلوگیری از اتلاف حرارت و در نتیجه افزایش راندمان، ابزار شکل‌دهی نیز با مکانیزم انتقال حرارت رسانش گرم می‌شود. برای این منظور، یک گرم‌کننده الکتریکی میله‌ای به قطر ۶ میلی‌متر و طول ۶۰ میلی‌متر، با ولتاژ بیشینه ۷۰ ولت و توان نامی ۳۰۰ وات طوری درون غلاف دنباله ابزار قرار می‌گیرد که انتهای آن به ابتدای قسمت سر کروی تماس یابد. گرم‌کننده‌های الکتریکی به‌کارگرفته‌شده برای حرارت‌دهی به ورق و ابزار در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که بدنه این گرم‌کن عایق الکتریکی بوده است و هیچ‌گونه خطر برق‌گرفتگی برای تجهیزات آزمایش ایجاد نخواهد کرد. همچنین غلاف فولادی دنباله ابزار نسبت به طول این گرم‌کن به اندازه کافی بلند ساخته شده است تا از اثرات نامطلوب حرارتی روی کلگی دستگاه فرز جلوگیری شود.

نحوه اجرای کلی روش گرمایشی به‌کارگرفته‌شده در فرآیند

دارای زاویه دیواره ۷۲ درجه در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۶۰۰°C شدند. شی و همکاران<sup>[19]</sup> نیز چگونگی بهبود دقت ابعادی قطعات نهایی ساخته‌شده از جنس فولاد کم‌کربن DC04 را به روش شکل‌دهی تدریجی داغ الکتریکی مورد مطالعه قرار دادند. مایر و همکاران<sup>[20]</sup> به بررسی شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای داغ ورق‌های فولادی کم‌کربن DC01 با حرارت‌دهی براساس مقاومت الکتریکی و با استفاده از دو ابزار متحرک با هدایت دو ربات صنعتی پرداختند. اورتیز و همکاران<sup>[21]</sup> با قراردادن کوره حرارتی الکتریکی در زیر ورق موفق به شکل‌دهی هرمی با زاویه دیواره ۷۰ درجه با فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای داغ شدند. همچنین وان‌سای و تان‌نام<sup>[22]</sup> با گرم‌نمودن همگن ورق از طریق اتصال آن به یک منبع جریان مستقیم به‌کمک دو الکترود، ورق‌هایی از جنس آلیاژ منیزیم AZ31 و آلومینیوم AA5055 را با روش شکل‌دهی تدریجی داغ شکل دادند. بهبود شکل‌پذیری، دقت ابعادی و کاهش برگشت فنی از مهم‌ترین نتایج آنها بوده است. فان و گاتو<sup>[23]</sup> با هدف بهبود دقت قطعات شکل‌داده‌شده با کمک شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی به بررسی فرآیند شکل‌دهی تدریجی داغ الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V پرداختند. هنریش و همکاران<sup>[24]</sup> در بررسی تجربی و عددی فرآیند شکل‌دهی تدریجی داغ با استفاده از جریان الکتریکی، تاثیر پارامترهای فرآیند روی نیروی شکل‌دهی و توزیع ضخامت ورق تیتانیومی را مورد مطالعه قرار دادند. طاهرخانی و همکاران<sup>[25]</sup> در مطالعه‌ای تجربی، اثر حرکت اصطکاکی ناشی از سرعت دورانی بالای ابزار بر دقت ابعادی و قابلیت شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ۳۱۰۵ را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بررسی نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در سرعت دورانی ابزار بیشتر از ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به دلیل حرارت ناشی از اصطکاک بالا و در نتیجه کاهش تنش تسلیم ورق، قابلیت شکل‌پذیری و دقت ابعادی قطعه افزایش می‌یابد. بارانی و همکاران<sup>[26]</sup> در مطالعه تجربی از طریق شکل‌دهی تدریجی گرم ورق آلیاژ تیتانیومی با استفاده از روش گرمایشی عبور جریان الکتریکی از موضع تماس ابزار-ورق، اثر پارامترهای فرآیند بر حداکثر زاویه شکل‌دهی هندسه مخروطی را بررسی نمودند. طبق مشاهدات آنها، افزایش بیش از حد جریان عبوری از سطح تماس ابزار-ورق به منظور ایجاد دماهای بالاتر، موجب سوختگی سطح ورق و کاهش شکل‌پذیری ورق می‌شود.

در این مقاله فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گرم به صورت گرمادهی همگن به ورق به‌همراه گرمایش ابزار مطالعه خواهد شد. گرمایش ابزار به‌همراه اعمال سیستم گرمایش همگن به ورق باعث هم‌دماشدن ابزار و ورق می‌شود، اتلاف حرارت را در منطقه تغییر شکل به شدت کاهش می‌دهد و می‌تواند به بهبود شرایط تغییر شکل کمک نماید. در این پژوهش با استفاده از روش گرمایشی الکتریکی جدید، مشکلات مربوط به روش حرارتی عبور جریان الکتریکی میان ابزار و ورق کاملاً برطرف خواهد شد.

طبق نتایج مرجع<sup>[19]</sup>، حین اجرای روش گرمایش مقاومت الکتریکی با عبور جریان در محل تماس ابزار و ورق، پدیده جرقه‌زنی رخ می‌دهد. جرقه‌زنی مشکلاتی مانند فرسایش شدید سر کروی ابزار و کیفیت سطح نامطلوب ورق شکل‌داده‌شده را به دنبال دارد. این امر منجر به کاهش حد شکل‌دهی و پارگی زود هنگام ورق خواهد شد که در ورق‌های با ضخامت کم شدیدتر است. با توجه به شیوه گرمایش و انتقال حرارت تابشی در این پژوهش، معایب روش گرمایش مقاومت الکتریکی به‌طور کامل برطرف شده است. همچنین براساس مطالعات انجام‌شده تاکنون پژوهشی در خصوص

جدول ۱) مقادیر پارامترهای فرآیند در آزمایش‌های مختلف

شماره آزمایش	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	گام (میلی‌متر)	قطر ابزار (میلی‌متر)	دما (°C)
۱	۲۵۰	۰/۳	۱۴	۲۰
۲	۲۵۰	۰/۳	۱۴	۱۱۰
۳	۲۵۰	۰/۳	۱۴	۲۰۰
۴	۴۰۰	۰/۳	۱۴	۲۰
۵	۴۰۰	۰/۳	۱۴	۱۱۰
۶	۴۰۰	۰/۳	۱۴	۲۰۰

## ۲-۲- خواص مواد

نمونه‌های ورق آزمایش از جنس آلایژ آلومینیوم AA1050-0 با ابعاد  $130 \times 130 \times 0.5$  میلی‌متر بوده است که برای تهیه آنها، ابتدا نمونه‌ها از ورق آلایژ آلومینیوم AA1050-H14 تهیه و سپس به مدت یک ساعت در دمای  $350^\circ\text{C}$  [27] تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفته‌اند. برای تعیین منحنی‌های تنش- کرنش مومسان ورق آلومینیوم AA1050-0 مورد استفاده در دماهای مختلف از نتایج استخراج شده توسط آندراد- کامپوس و همکاران [27] استفاده و سایر خواص مکانیکی ورق مورد استفاده نیز در جدول ۲ [28] آورده شده است.

جدول ۲) خواص فیزیکی ورق AA1050-0

$E$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$k$ (W/m.K)	$\alpha$ (1/k)	$C$ (J/kg.°C)
۶۹	۲۷۰۵	۰/۳۳	۲۳۱	$2/55 \times 10^{-6}$	۹۰۰

## ۳-۲- تعیین حد شکل‌دهی

به منظور ارزیابی شکل‌پذیری ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی از آزمون شیبار مستقیم استفاده شده است. آزمون شیبار مستقیم یکی از مناسب‌ترین آزمایش‌هایی است که سازوکار تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای را برآورده می‌نماید [29، 5]. در این آزمون، شیباری به طول ۴۰ میلی‌متر در ناحیه مرکزی نمونه ورق مربعی از طریق اعمال متناوب جابه‌جایی‌های عمودی و حرکت افقی ابزار با پیشروی ثابت شکل داده می‌شود [30]. آزمون با متغیرهای در نظر گرفته شده برای هر آزمایش تا بروز پارگی در ورق ادامه یافت و کرنش‌های اصلی ایجاد شده در نمونه در لحظه پارگی و نزدیکی نقاط پارگی به عنوان کرنش‌های اصلی حدی اندازه‌گیری شده‌اند. برای اندازه‌گیری کرنش‌ها، سطح نمونه‌ها پیش از اجرای آزمون با استفاده از روش مهرنی جوهری با دایره‌هایی به قطر ۵ میلی‌متر شبکه‌بندی شده است. کرنش‌های اصلی بزرگ و کوچک یا کرنش‌های اصلی و فرعی ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) بر اساس هندسه شبکه‌های تغییر شکل یافته محاسبه شده‌اند.

## ۳- شبیه‌سازی عددی

### ۳-۱- مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود

تدریجی بودن تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق و ماهیت حرارتی- مکانیکی فرآیند به علت شکل‌دهی گرم، حل عددی آن را بسیار پیچیده و زمان‌بر ساخته و از این رو در پژوهش‌های گذشته کمتر به شبیه‌سازی عددی فرآیند پرداخته شده است. در این پژوهش، آزمون شیبار مستقیم برای بررسی حد شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس دینامیک صریح شبیه‌سازی شده است. در مدل‌سازی هندسی فرآیند، ورق به صورت جامد تغییر شکل‌پذیر سه‌بُعدی و ابزار به صورت پوسته صلب تحلیلی سه‌بُعدی در نظر

شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است. تامین انرژی گرم‌کننده‌های الکتریکی و نیز تنظیم دمای ایجاد شده در ورق و ابزار با استفاده از دو منبع تغذیه جریان مستقیم (DC) با قابلیت تنظیم ولتاژ صفر تا ۲۲۰ ولت و محدودکننده جریان الکتریکی در گستره صفر تا ۵ آمپر صورت گرفته است. به منظور جلوگیری از برق‌دار شدن دستگاه فرز و نیز کاهش اتلاف گرما، فیکسچر توسط صفحه فیبر نوسوز در محل اتصال به میز دستگاه فرز عایق شده است.

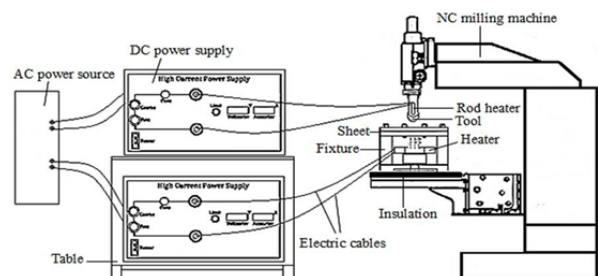
در شکل ۴، مجموعه تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است. به منظور کنترل فرآیند، دمای ابزار و ورق با استفاده از دماسنج تماسی دیجیتال قابل حمل نوع k در طول فرآیند اندازه‌گیری شده است. برای صحت‌سنجی دقت دماسنج نیز در مواردی از دوربین تصویربرداری مادون قرمز SAT-G90 استفاده شد. بررسی تصاویر دوربین حرارتی، صحت اندازه‌گیری دماسنج دیجیتال را مورد تایید قرار داد.

با توجه به بالابودن دمای فرآیند، از گریس سفید پایه لیتیمیوم مقاوم به دمای بالای نوع SKF-LGHB به عنوان روانکار استفاده شده است.

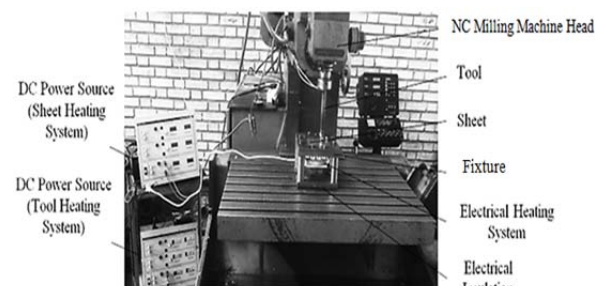
برای انجام آزمایش‌ها با توجه به جنس ورق، فرآیند در سه دمای ۲۰، ۱۱۰، و  $200^\circ\text{C}$  انجام شده است. همچنین دو سرعت پیشروی ۲۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. سایر شرایط فرآیند از جمله قطر ابزار شکل‌دهی و گام ابزار در تمامی آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مقادیر پارامترهای فرآیند در آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۲) گرم‌کن‌های الکتریکی برای حرارتی‌دهی به ورق و ابزار: (الف) ورق، (ب) ابزار



شکل ۳) شماتیک سازوکار گرمایش هم‌دمای ابزار و ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای

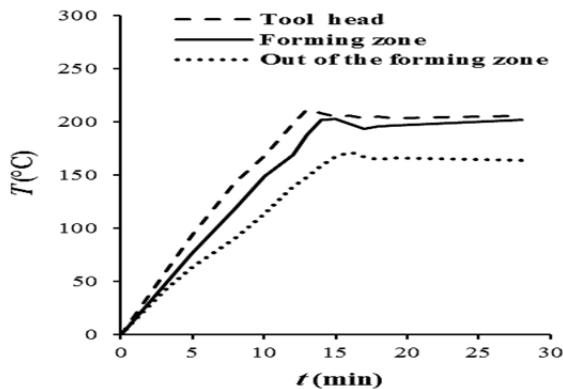


شکل ۴) تجهیزات آزمایش

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- توزیع دما

تغییرات دما در طول فرآیند در نواحی تغییرشکل‌یافته ورق، اطراف ورق و سر ابزار برای دمای هدف  $200^{\circ}\text{C}$  در نمودار ۲ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که دمای نواحی بدون تغییر شکل اطراف ورق به دلیل اتلاف حرارت، کمتر از دمای مورد نظر آزمایش است. همچنین گرمایش ابزار موجب افزایش دمای ناحیه اصلی تغییر شکل ورق نسبت به سایر نواحی آن می‌شود و برطرف نمودن اتلاف حرارت به بهبود شرایط تغییر شکل کمک می‌نماید.



نمودار ۲) تغییرات دمای ورق و ابزار برای دمای هدف  $200^{\circ}\text{C}$

##### ۴-۲- سازوکار تغییر شکل

نمونه ورق شکل‌داده شده در آزمون شیار مستقیم به صورت تجربی و نمونه شبیه‌سازی شده در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. سازوکار تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی تدریجی بسیار پیچیده بوده و می‌توان گفت ترکیبی از برش، خمش، اثرات کشش چرخه‌ای و تنش تماسی زیاد است [35]. در نمودار ۳، توزیع کرنش‌های حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود در شیار شکل‌داده نشان داده شده است. در این نمودار،  $\epsilon_{11}$  مولفه کرنش در راستای طول شیار،  $\epsilon_{22}$  مولفه کرنش در راستای ضخامت ورق،  $\epsilon_{33}$  کرنش در راستای عرض شیار و  $\epsilon_{\theta\theta}$  کرنش موثر است. همچنین به منظور مقایسه و صحت‌سنجی، مقادیر کرنش‌های اندازه‌گیری شده صفحه‌ای در آزمایش تجربی نیز در نمودار توزیع کرنش آورده شده است که مطابقت قابل قبول نتایج تجربی و عددی را نشان می‌دهد.

با توجه به توزیع کرنش‌های به دست آمده می‌توان دریافت که سازوکار تغییر شکل در نواحی ابتدا و انتهای شیار (گوشه‌ها) به صورت کرنش سه‌محوره بوده، در حالی که در مناطق میانی شیار، تغییر شکل به صورت کرنش صفحه‌ای است. بیشترین مقدار کرنش ضخامتی در گوشه‌های شیار بوده است، در نتیجه بیشترین نازک‌شدگی در نواحی ابتدایی و انتهایی شیار روی خواهد داد. در آزمایش‌های تجربی نیز پارگی ورق در گوشه‌های شیار رخ داده است. همچنین مقدار کرنش موثر حاصل از تحلیل عددی نیز در ابتدا و انتهای شیار، بیشینه شده است. لازم به توضیح بوده که علت مشاهده اختلاف قابل ملاحظه بین مقادیر مولفه کرنش در جهت عرض شیار ( $\epsilon_{33}$ ) با کرنش موثر ( $\epsilon_{\theta\theta}$ ) این است که کرنش موثر، از مقادیر تمام مولفه‌های تانسور کرنش از جمله کرنش‌های برشی محاسبه می‌شود. در واقع بررسی نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که توزیع کرنش‌های برشی به نحوی بوده که این اختلاف را به وجود آورده است.

گرفته شده است. با توجه به این که فیکسچر، صرفاً نقش گیربندی ورق را ایفا می‌کند، در شبیه‌سازی لحاظ نشده و به جای آن تمام درجات آزادی لبه‌های ورق بسته شده است.

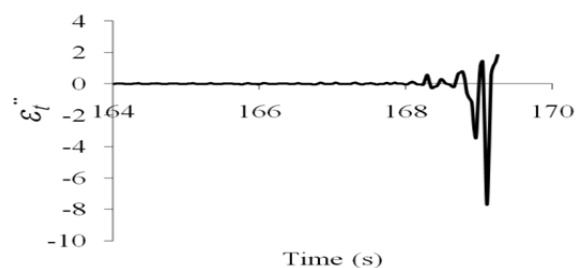
خواص ورق آلومینیوم AA1050-0 مشابه آزمایش‌های تجربی مطابق جدول ۲ و منحنی‌های تنش-کرنش استخراج شده توسط کامپوس و همکاران [27] در دماهای مختلف است. با توجه به انجام عملیات آنیل روی ورق پیش از شکل‌دهی، ورق به صورت همسان‌گرد در نظر گرفته شده است.

تماس میان سطوح ابزار شکل‌دهی و ورق به صورت سطح به سطح تعریف شده است. ضریب اصطکاک کولمب به ترتیب برای دماهای  $20^{\circ}\text{C}$  و  $110^{\circ}\text{C}$  برابر با  $0.1$ ،  $0.14$  و  $0.18$  در نظر گرفته شده است [31]. از اثر اصطکاک ناشی از افزایش سطح تماس ابزار- ورق با گذشت زمان صرف نظر شده است. با توجه به حرارت‌دهی پیوسته به ورق و ابزار در طول فرآیند، دما با تقریب خوبی ثابت بوده، از این رو اتلاف گرمای محسوس وجود نداشته و انتقال حرارت در شبیه‌سازی، مدل‌سازی نشده است.

شبکه‌بندی ورق با استفاده از المان C3D8RT انجام شده است. این نوع المان به صورت هشت‌گره‌ای آجری همراه با حرارت، جابه‌جایی و دمای سه‌خطی، حل با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و کنترل عیب ساعت شنی است. در راستای ضخامت ورق از سه عدد المان استفاده شده است. ابزار، شبکه‌بندی نمی‌شود، زیرا به صورت صلب تحلیلی مدل شده است. شبکه‌بندی ورق را می‌توان با دو روش چگالی شبکه ثابت و چگالی شبکه متغیر اجرا نمود. در شبکه‌بندی با چگالی المان ثابت، زمان حل عددی بسیار بالا است. در این تحقیق با توجه به این که ناحیه اصلی تغییر شکل ورق در آزمون تجربی، مستطیلی به ابعاد  $36 \times 22$  میلی‌متر با تقارن مرکزی بوده، از شبکه‌بندی با چگالی المان متغیر استفاده شده است که این مساله زمان حل عددی را به‌طور محسوس کاهش می‌دهد. با بهره‌گیری از این روش، ناحیه شکل‌دادن شیار با المان‌های مربعی کوچک و نواحی اطراف ورق با المان‌های بسیار بزرگ‌تری شبکه‌بندی شده است. با اجرای روند همگرایی شبکه برای یافتن اندازه المان مناسب، المان مربعی بهینه به ضلع  $1/6$  میلی‌متر به دست آمده است.

##### ۳-۲- معیار تعیین حد شکل‌دهی در شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش، بروز گلوبی موضعی به عنوان معیار حد شکل‌دهی قطعات در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی عددی موقعیت و زمان رخ‌دادن گلوبی موضعی در ورق، از معیار شکست دوشاخه‌شدن استفاده شده است. در این معیار که توسط استورن و رایس [33] ارایه شده است، گلوبی موضعی با یک اختلاف سرعت در تغییر شکل رخ می‌دهد. در این لحظه، مشتق دوم کرنش ضخامتی نسبت به زمان، مقدار بیشینه خود را دارد [34]. نمودار ۱، مشتق دوم کرنش ضخامتی نسبت به زمان را برای المان بحرانی نشان می‌دهد. نقاط پیک نمودار، گلوبی شدن ورق را مشخص می‌نماید.



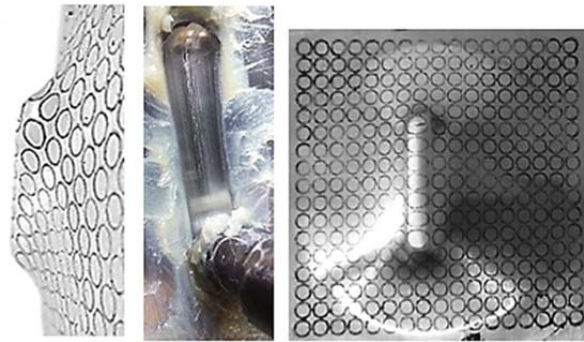
نمودار ۱) نمودار مشتق دوم کرنش ضخامتی بر حسب زمان

توجه به این که هدف این مقاله معرفی حدود تغییر شکل کاملاً سالم و کاربردی قطعه بوده، نمودار حد شکل‌دهی نازک‌شدگی به‌عنوان معیار شکل‌پذیری در نظر گرفته شده است.

در نمودارهای ۱۰-۵، حد شکل‌دهی به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی در شرایط مختلف فرآیند نشان داده شده است. چنان که مشهود است، منحنی حد شکل‌دهی ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی به‌صورت خطی مستقیم با شیب منفی در ناحیه کرنش‌های اصلی و فرعی مثبت است، از این رو می‌توان حد شکل‌دهی را در این فرآیند به‌صورت یک تابع خطی از کرنش‌های اصلی و فرعی بیان داشت. با توجه به نتایج و شکل خاص منحنی حد شکل‌دهی در این فرآیند، بیشترین حد شکل‌دهی در حالت کشش کرنش صفحه‌ای یعنی حالتی که کرنش فرعی برابر صفر است ( $\epsilon_2=0$ )، اتفاق می‌افتد. بررسی حد شکل‌دهی ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی و مقایسه آن با فرآیندهای معمول شکل‌دهی نشان می‌دهد که حد شکل‌دهی ورق در این فرآیند به‌طور چشمگیری از فرآیندهای معمول شکل‌دهی ورق بیشتر است [5]. علت این امر را می‌توان به دو دلیل عمده مشخصه تدریجی بودن فرآیند و شرایط ناحیه شکل‌دهی نسبت داد. در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق، معمولاً عمق بار عمودی، کمتر از ضخامت اولیه ورق بوده و بدین معنی است که ابزار از یک نقطه حقیقی، چند بار عبور می‌کند که این امر موجب می‌شود، ماده در معرض کشش تکرار شونده قرار گیرد. از طرفی دیگر به‌خاطر هندسه ابزار، تغییر شکل در اطراف ناحیه کوچک تماس ابزار با ورق متمرکز شده است. هنگامی که گلویی شکل می‌گیرد، زمانی برای گسترش یافتن ندارد و ناحیه تغییر شکل به‌سرعیت به نقطه دیگری حرکت می‌کند. در واقع گلویی موضعی، پیوسته به تاخیر می‌افتد و طول فرآیند رخ نمی‌دهد، در نتیجه حد شکل‌دهی نسبت به فرآیندهای شکل‌دهی سنتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [35]. هم‌دمانمودن ابزار و ورق حین فرآیند، با کاهش اتلاف حرارت در منطقه تغییر شکل، امکان دستیابی به حدود شکل‌دهی بالایی را میسر ساخته است.

منحنی‌های حد شکل‌دهی نشان‌داده‌شده در نمودارهای ۱۰-۵ نشان از انطباق خوب بین نتایج تجربی و عددی در شرایط مختلف فرآیند دارد.

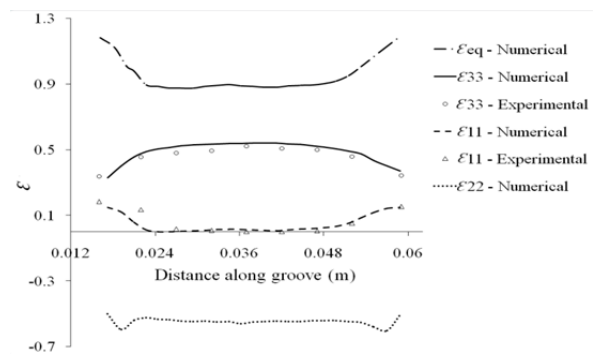
از مقدار کرنش حدی ورق می‌توان در شرایط کرنش صفحه‌ای به‌عنوان شاخصی برای بیان شکل‌پذیری ورق استفاده نمود. این مقدار که با  $FLD_0$  نشان داده می‌شود، بیانگر مقدار حدی کرنش اصلی بوده، در حالتی که  $\epsilon_2=0$  است.  $FLD_0$  در واقع محل تقاطع منحنی حد شکل‌دهی با محور عمودی در فضای کرنش‌های اصلی و فرعی ( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ) است، حالتی که در فرآیند شکل‌دهی تدریجی بیشترین مقدار کرنش حدی به دست می‌آید. در جدول ۳ مقادیر تجربی و عددی  $FLD_0$  در شرایط مختلف آزمون به‌همراه مقادیر عمق پارگی آورده شده است. عمق پارگی که نشان‌دهنده بیشترین عمق قطعه شکل‌داده‌شده بدون بروز پارگی است، نیز می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای بیان حد شکل‌دهی قطعه مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از حالت‌های مورد بررسی بیشترین حد شکل‌دهی در دمای  $200^\circ\text{C}$  و سرعت پیشروی  $250$  میلی‌متر بر دقیقه (آزمایش شماره ۳) و کمترین حد شکل‌دهی در دمای  $20^\circ\text{C}$  و سرعت پیشروی  $400$  میلی‌متر بر دقیقه (آزمایش شماره ۴) بوده است. ضمن این که در تمام شرایط مورد بررسی، گام و قطر ابزار به‌ترتیب برابر  $0/3$  و  $4$  میلی‌متر بوده است. مقادیر  $FLD_0$  حاصل‌شده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی دارای مطابقت قابل قبولی با همدیگر بوده و میزان خطا کمتر از  $5\%$



شکل ۵) نمونه ورق شکل‌داده‌شده در آزمون تجربی



شکل ۶) شبیه‌سازی آزمون شیار مستقیم

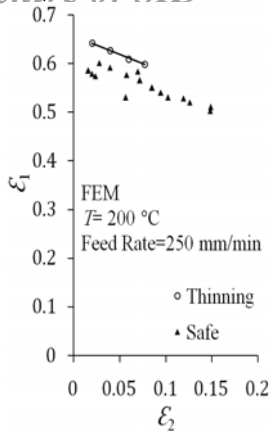


نمودار ۳) توزیع مولفه‌های کرنش در شیار شکل‌داده‌شده

### ۴-۳- نمودارهای حد شکل‌دهی

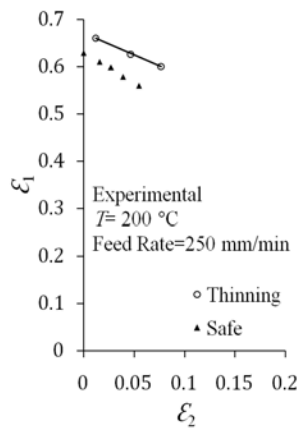
در این مقاله مقصود از حد شکل‌پذیری، حد شکل‌دادن کاملاً سالم و مطمئن قطعه و نه حد شکست است. در واقع شکل‌پذیری به‌وسیله نمودار حد شکل‌دهی نازک‌شدگی (TFLD) مشخص شده است. در این نمودار، منحنی حد شکل‌دهی با برازش منحنی از روی نقاط نازک‌شدگی رسم شده است. این نقاط دچار ترک خوردگی یا پارگی نشده‌اند و در واقع نقاط سالم بحرانی هستند.

در نمودار ۴، نمودارهای تجربی حد شکل‌دهی شکست (FFLD) و نازک‌شدگی (TFLD) مربوط به یکی از شرایط تجربی (آزمایش شماره ۶) مقایسه شده است. در این نمودار، حد شکل‌دهی شکست با عبور خط از دو زوج کرنش حاصل از اندازه‌گیری شبکه شامل پارگی در دو گوشه شیار رسم شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که در شرایط آزمایش، شاخص  $FLD_0$  در منحنی حد شکل‌دهی شکست نسبت به حد شکل‌دهی نازک‌شدگی به میزان قابل توجه  $22/22\%$  بیشتر است. در فاصله موجود بین دو نمودار FFLD و TFLD، هیچ زوج کرنشی که بتواند در آزمایش تجربی به آن دست یافت، وجود ندارد و نمی‌توان در مورد سلامت قطعه شکل‌داده‌شده در این بازه کرنشی اظهار نظر قطعی نمود. با



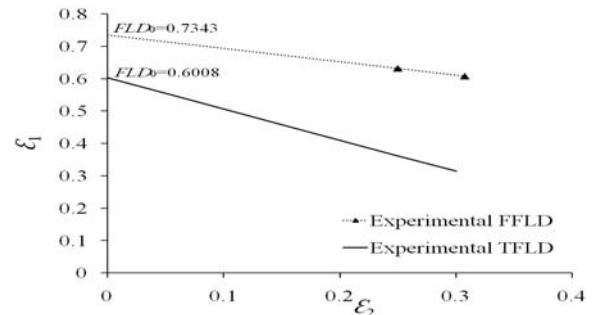
(ب)

نمودار (۷) نمودار حد شکل‌دهی تجربی و عددی آزمون ۳: الف) حد شکل‌دهی تجربی، ب) حد شکل‌دهی عددی آزمون ۳  
( $T = 200^\circ\text{C}$ , Feed Rate = 250 mm/min)

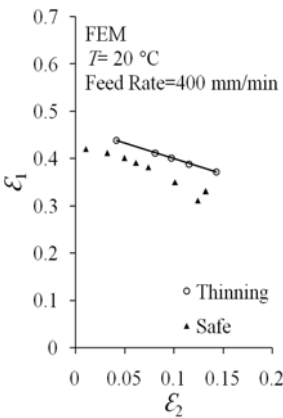


(الف)

بوده است. براساس نتایج استخراج شده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی مطابق منحنی‌های حد شکل‌دهی نمودارهای ۱۰-۵، معادلات حد شکل‌دهی با استفاده از برازش خط از نقاط حدی در جدول ۴ آورده شده است. ضریب رگرسیون خطی در تمامی خطوط برازش‌شده، در بازه ۰/۹۹ تا ۱ قرار دارد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول روابط استخراج شده است.

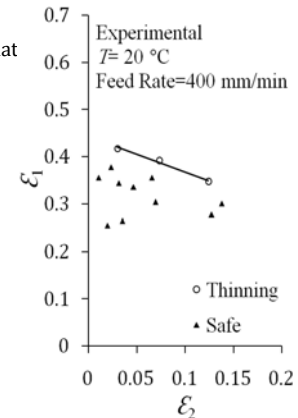


نمودار (۴) مقایسه نمودارهای تجربی حد شکل‌دهی شکست و نازک‌شدگی آزمون ۶

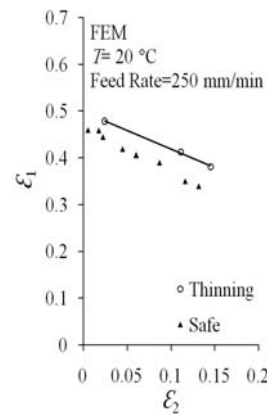


(ب)

نمودار (۸) نمودار حد شکل‌دهی تجربی و عددی آزمون ۴: الف) حد شکل‌دهی تجربی، ب) حد شکل‌دهی عددی آزمون ۴  
( $T = 20^\circ\text{C}$ , Feed Rate = 400 mm/min)

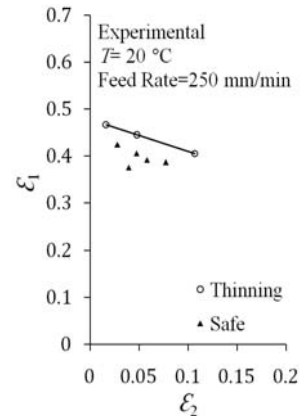


(الف)

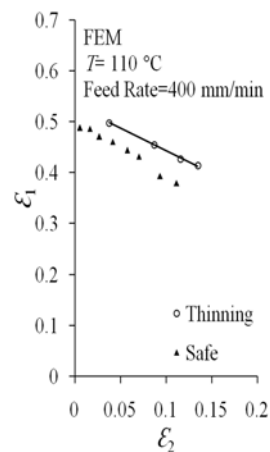


(ب)

نمودار (۵) نمودار حد شکل‌دهی تجربی و عددی آزمون ۱: الف) حد شکل‌دهی تجربی، ب) حد شکل‌دهی عددی آزمون ۱  
( $T = 20^\circ\text{C}$ , Feed Rate = 250 mm/min)

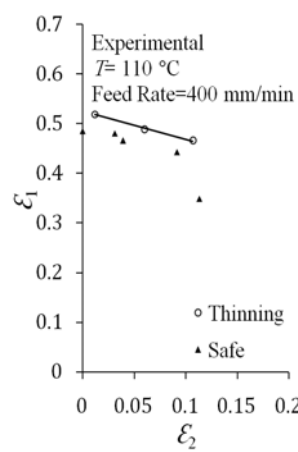


(الف)

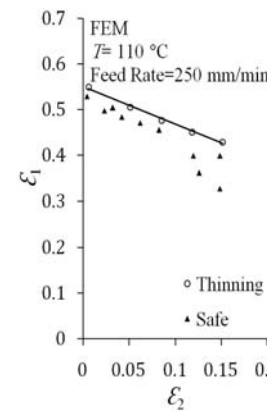


(ب)

نمودار (۹) نمودار حد شکل‌دهی تجربی و عددی آزمون ۵: الف) حد شکل‌دهی تجربی، ب) حد شکل‌دهی عددی آزمون ۵  
( $T = 110^\circ\text{C}$ , Feed Rate = 400 mm/min)

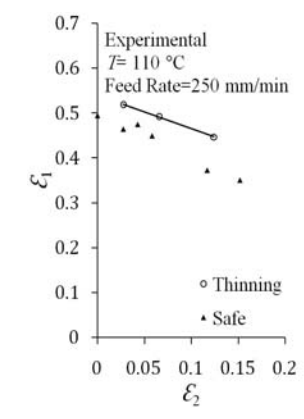


(الف)



(ب)

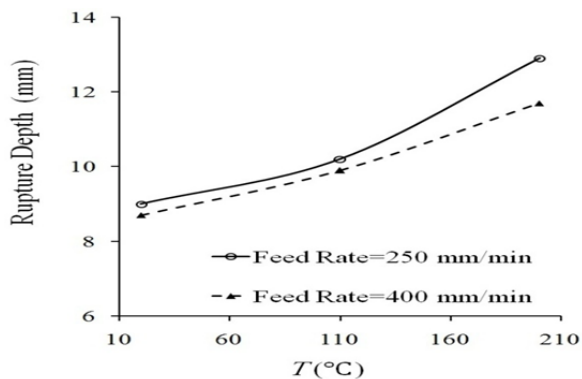
نمودار (۶) نمودار حد شکل‌دهی تجربی و عددی آزمون ۲: الف) حد شکل‌دهی تجربی، ب) حد شکل‌دهی عددی آزمون ۲  
( $T = 110^\circ\text{C}$ , Feed Rate = 250 mm/min)



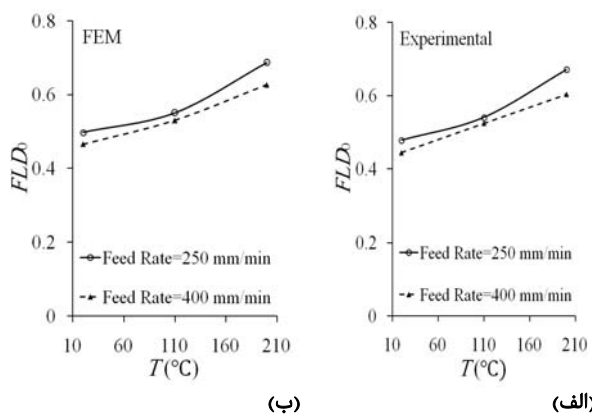
(الف)

ابزار از ۲۵۰ به ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، عمق پارگی ورق به مقدار ۹/۳۰٪ کاهش یافته است.

با توجه به نمودار ۱۲- الف، در دمای ۲۰۰°C، برای سرعت‌های پیشروی ۲۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، مقدار  $FLD_0$  به ترتیب ۴۰/۴۶ و ۳۵/۴۴٪ نسبت به شکل‌دهی در دمای محیط افزایش یافته است. همچنین در دمای ۲۰۰°C، افزایش سرعت پیشروی ابزار از ۲۵۰ به ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه باعث کاهش ۱۰/۴۶ درصدی در مقدار  $FLD_0$  شده است.



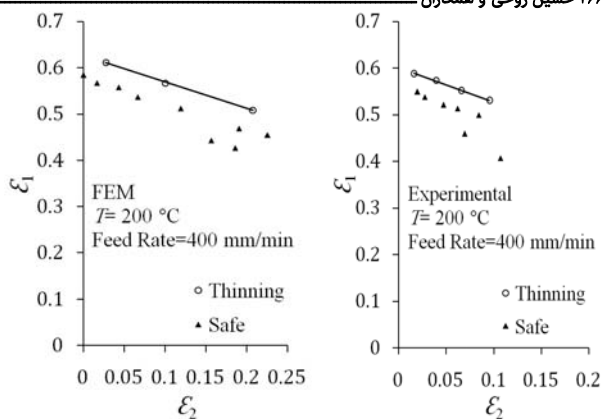
نمودار (۱۱) اثر متقابل دما و سرعت پیشروی بر عمق پارگی



نمودار (۱۲) اثر متقابل دما و سرعت پیشروی بر  $FLD_0$  در روش‌های تجربی و عددی؛ الف) روش تجربی، ب) روش عددی آزمون ۲

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گرم با گرمادهی همگن به ورق به همراه گرمایش ابزار به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. حد شکل‌دهی ورق در شرایط مختلف فرآیند با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی تعیین شد. ارزیابی شکل‌پذیری ورق بر مبنای آزمون شیار مستقیم انجام شده است. مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی و عددی نشان‌دهنده انطباق خوب بین نتایج در شرایط مختلف فرآیند است. گرمایش ابزار به همراه اعمال سیستم گرمایش همگن به ورق باعث هم‌دماشدن ابزار و ورق می‌شود، با کاهش اتلاف حرارت در منطقه تغییر شکل موجب بهبود فرآیند تغییر شکل شده و امکان دستیابی به حدود شکل‌دهی بالایی را میسر ساخته است. با بررسی اثر دما و سرعت پیشروی ابزار بر حد شکل‌دهی ورق می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما در سرعت‌های پیشروی مختلف باعث افزایش عمق پارگی ورق و همچنین افزایش شاخص  $FLD_0$  شده است. اما میزان این افزایش، به سرعت پیشروی ابزار وابسته بوده، بدین صورت که در سرعت‌های



نمودار (۱۰) نمودار حد شکل‌دهی تجربی و عددی آزمون ۶؛ الف) حد شکل‌دهی

تجربی، ب) حد شکل‌دهی عددی آزمون ۶  
( $T = 200^\circ\text{C}$ , Feed Rate = 400 mm/min)

جدول (۳) حدود شکل‌دهی به‌دست‌آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اجرای محدود

شماره آزمایش	عمق پارگی (mm)	$FLD_0$ تجربی	$FLD_0$ شبیه‌سازی
۱	۹	۰/۴۷۷۷	۰/۴۹۷۵
۲	۱۰/۲	۰/۵۴۰۱	۰/۵۵۰۸
۳	۱۲/۹	۰/۶۷۱۰	۰/۶۸۶۷
۴	۸/۷	۰/۴۴۳۶	۰/۴۶۵۷
۵	۹/۹	۰/۵۲۴۱	۰/۵۳۰۵
۶	۱۱/۷	۰/۶۰۰۸	۰/۶۲۶۷

جدول (۴) معادله‌های حد شکل‌دهی استخراج شده براساس نتایج تجربی و عددی شماره آزمایش معادله حد شکل‌دهی تجربی معادله حد شکل‌دهی شبیه‌سازی

۱	$E_1 = -0.6832E_2 + 0.4777$	$E_1 = -0.7882E_2 + 0.4975$
۲	$E_1 = -0.5156E_2 + 0.5401$	$E_1 = -0.8247E_2 + 0.5508$
۳	$E_1 = -0.9167E_2 + 0.6710$	$E_1 = -1.2680E_2 + 0.6867$
۴	$E_1 = -0.7576E_2 + 0.4436$	$E_1 = -0.6598E_2 + 0.4657$
۵	$E_1 = -0.5655E_2 + 0.5241$	$E_1 = -0.8173E_2 + 0.5305$
۶	$E_1 = -0.4497E_2 + 0.6008$	$E_1 = -0.5207E_2 + 0.6267$

## ۴-۴ اثر دما و سرعت پیشروی بر حد شکل‌دهی

اثر برهم‌کنش دمای ورق و سرعت پیشروی ابزار بر عمق پارگی ورق و  $FLD_0$ ، به ترتیب در نمودارهای ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. در سرعت‌های پیشروی ۲۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، با افزایش دما از ۲۰ به ۲۰۰°C، عمق پارگی ورق به ترتیب ۴۳/۳۳ و ۳۴/۴۸٪ افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هر چند افزایش دما باعث افزایش حد شکل‌دهی ورق می‌شود، اما میزان این افزایش در سرعت‌های پیشروی مختلف، متفاوت بوده، به‌گونه‌ای که در سرعت‌های پیشروی پایین‌تر، اثر دما بر حد شکل‌دهی چشمگیرتر است. همچنین نمودار ۱۱ نشان می‌دهد که افزایش عمق پارگی با افزایش دما از ۲۰ به ۱۱۰°C، در هر دو سرعت پیشروی ۲۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با شیب تقریباً یکسانی رخ می‌دهد. اما در محدوده دمایی ۱۱۰ تا ۲۰۰°C، عمق پارگی ورق در سرعت پیشروی ۲۵۰ میلی‌متر بر دقیقه با شیب بیشتری نسبت به سرعت پیشروی ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت در محدوده دمایی کمتر از ۱۱۰°C، اثر سرعت پیشروی بر عمق پارگی چندان محسوس نیست، اما در دماهای بالاتر اثر سرعت پیشروی بر عمق پارگی بیشتر می‌شود و با افزایش سرعت پیشروی ابزار عمق پارگی کاهش می‌یابد. در دمای ۲۰۰°C، با افزایش سرعت پیشروی



metal. CIRP Annals. 2005;54(2):88-114.

3- Ham M, Jeswiet J. Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. CIRP Annals. 2006;55(1):241-244.

4- Iseki H, Kumon H. Forming limit of incremental sheet metal stretch forming using spherical rollers. Journal Japan Society for Technology of Plasticity. 1994;35(11):1336.

5- Kim YH, Park JJ. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. Journal of Materials Processing Technology. 2002;130-131:42-46.

6- Shim MS, Park JJ. The formability of aluminium sheet in incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. 2001;113(1-3):654-658.

7- Azodi HD, Dariani BM, Sedaghat H, Mohammadi H. Formability study and forming path optimization in single-point incremental forming process. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;11(1):15-27.

8- Zahedi A, Mollaei Dariani B, Morovvati MR. Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(14):1-8. [Persian]

9- Mirnia MJ, Mollaei Dariani B. An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(14):262-270. [Persian]

10- Duflou JR, Callebaut B, Verbert J, De Baerdemaeker H. Improved SPIF performance through dynamic local heating. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008;48(5):543-549.

11- Fan G, Gao L, Hussain G, Wu Z. Electric hot incremental forming: A novel technique. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008;48(15):1688-1692.

12- Göttmann A, Diettrich J, Bergweiler G, Bambach M, Hirt G, Loosen P, et al. Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts. Production Engineering. 2011;5(3):263-271.

13- Ji YH, Park JJ. Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature. Journal of Materials Processing Technology. 2008;201(1-3):354-358.

14- Ji YH, Park JJ. Incremental forming of free surface with magnesium alloy AZ31 sheet at warm temperature. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008;18(1):s165-s169.

15- Ambrogio G, Filice L, Manco GL. Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31. CIRP Annals. 2008;57(1):257-260.

16- Park J, Kim J, Park N, Kim Y. Study of forming limit for rotational incremental sheet forming of magnesium alloy sheet. Metallurgical and Materials Transactions A. 2010;41:97.

17- Ambrogio G, Filice L, Gagliardi F. Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming. Materials & Design. 2012;34:501-508.

18- Fan G, Sun F, Meng X, Gao L, Tong G. Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;49(9-12):941-947.

19- Shi X, Gao L, Khalatbari H, Xu Y, Wang H, Jin LL. Electric hot incremental forming of low carbon steel sheet: Accuracy improvement. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013;68(1-4):241-247.

پیشروی پایین‌تر، افزایش دما تاثیر بیشتری بر حد شکل‌دهی ورق داشته است. نتایج نشان داد، افزایش دما از ۲۰ به ۱۱۰°C در سرعت‌های ۲۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه موجب افزایش عمق پارگی با شیب‌های تقریباً یکسان می‌شود. اما اثر دما بر عمق پارگی در محدوده دمایی ۱۱۰ تا ۲۰۰°C برای سرعت پیشروی ۲۵۰ میلی‌متر بر دقیقه نسبت به سرعت پیشروی ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه شدیدتر بوده است. مطابق نتایج در محدوده دمایی کمتر از ۱۱۰°C، سرعت پیشروی اثر نسبتاً کمی بر عمق پارگی و شکل‌پذیری ورق داشته، در حالی که این اثر در دماهای بالاتر قابل توجه بوده و با افزایش سرعت پیشروی ابزار شکل‌پذیری کاهش یافته است.

**تشکر و قدردانی:** بدینوسیله از دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اراک که امکان انجام این پژوهش را فراهم نمود، تشکر و قدردانی می‌شود.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی و چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتوای علمی و ادبی مقاله حاضر مستخرج از فعالیت علمی نویسندگان است.

**تعارض منافع:** نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل پژوهشی مستقل بوده، هیچ گونه تضاد منافی با اشخاص یا سازمان‌های دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** حسین روحی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ حامد دیلمی‌عضدی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ مهدی صفری (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

**منابع مالی:** منابع مالی خاصی برای انجام این پژوهش استفاده نشده است.

#### ۶- پی‌نوشت

علائم	شرح
<b>علائم اختصاری</b>	
$C$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )
$E$	مدول الاستیسیته (GPa)
$FLD_0$	عرض از مبدا نمودار حد شکل‌دهی
$k$	ضریب رسانایی حرارتی ( $W/m \cdot K$ )
$t$	زمان (s)
$T$	دما ( $^\circ C$ )
<b>علائم یونانی</b>	
$\alpha$	ضریب انبساط حرارتی ( $1/K$ )
$\epsilon$	کرنش (mm/mm)
$\epsilon_1$	کرنش اصلی بزرگ
$\epsilon_2$	کرنش اصلی کوچک
$\epsilon_t$	مشتق دوم کرنش نسبت به زمان
$\nu$	ضریب پواسون
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	تنش (MPa)

#### منابع

1- Park JJ, Kim YH. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. Journal of Materials Processing Technology. 2003;140(1-3):447-453.

2- Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley A, Duflou J, Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet

- 28- ASM International Handbook Committee, editor. Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials. 10th Edition. Russell Township: ASM International; 1990. pp. 3-215.
- 29- Bouffioux C, Lequesne C, Vanhove H, Duflou JR, Pouteau P, Duchêne L, et al. Experimental and numerical study of an AlMgSc sheet formed by an incremental process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011;211(11):1684-1693.
- 30- Varthini R, Gandhinathan R, Pandivelan C, Jeevenantham AK. Modeling and optimization of process parameters of the single point incremental forming of aluminum 5052 alloy sheet using genetic algorithm-back propagation neural network. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 2014;2(5):55-62.
- 31- Eyckens P, Duflou J, Van Bael A, Van Houtte P. The significance of friction in the single point incremental forming process. *International Journal of Material Forming*. 2010;3 Suppl 1:947-950.
- 32- Lu B, Fang Y, Xu DK, Chen J, Ou H, Moser NH, et al. Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2014;85:14-29.
- 33- Stören S, Rice JR. Localized necking in thin sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1975;23(6):421-441.
- 34- Petek A, Pepelnjak T, Kuzman K. An improved method for determining a forming limit diagram in the digital environment. *Strojniški vestnik Journal of Mechanical Engineering*. 2005;51(6):330-345.
- 35- Emmens WC. Formability: A review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet metal. Heidelberg: Springer Science & Business Media; 2011.
- 20- Meier H, Magnus C, Buff B, Zhu JH. Tool concepts and materials for incremental sheet metal forming with direct resistance heating. *Key Engineering Materials*. 2013;549:61-67.
- 21- Ortiz M, Penalva M, Puerto MJ, Homola P, Kafka V. Hot single point incremental forming of Ti-6Al-4V alloy. *Key Engineering Materials*. 2014;611-612:1079-1087.
- 22- Van Sy L, Thanh Nam N. Hot incremental forming of magnesium and aluminum alloy sheets by using direct heating system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*. 2013;227(8):1099-1110.
- 23- Fan G, Gao L. Mechanical property of Ti-6Al-4V sheet in one-sided electric hot incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;72(5-8):989-994.
- 24- Honarpisheh M, Abdolhoseini MJ, Amini S. Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti-6Al-4V sheet using electrical current. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;83(9-12):2027-2037.
- 25- Taherkhani A, Basti A, Narimanzadeh N, Jamali A. Tool frictional stir effect on dimensional accuracy and formability in single point incremental forming at high rotational speeds. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(12):665-674. [Persian]
- 26- Barani Shooli A, Amini Najafabadi S, Farzin M. Experimental formability investigation of titanium alloy in hot incremental sheet forming process. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(6):107-114. [Persian]
- 27- Andrade-Campos A, Menezes LF, Teixeira-Dias F. Numerical analysis of large deformation processes at elevated temperatures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2006;195(33-36):3947-3959.