Journal of Aerospace Mechanics/ 2024/ Vol.20/ No.2/ 39-53

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.2.4.8

Determination of Failure in Single Point Incremental Forming Using Generalized Forming Limit Diagram

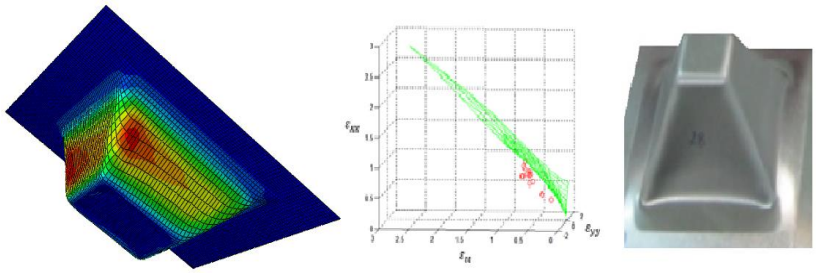
Mohammadmehdi Ghane Shalmani[1], Ali Basti[2*], Abolfazl Taherkhani[3]

[1] Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
[2] Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran

HIGHLIGHTS

- Obtaining the Generalized forming limit diagram
- Investigation of the effect of wall angle on maximum attainable forming depth
- Presenting a new method to failure prediction in the SPIF process

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 31 December 2023
Received in revised form: 20 January 2024
Accepted: 2 April 2024
Available online: 14 April 2024
*Correspondence:
basti@guilan.ac.ir

How to cite this article:
M.G. Shalmani, A. Basti, A. Taherkhani. Determination of failure in single point incremental forming using generalized forming limit diagram. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(2):39-53.

Keywords:
Single point incremental forming
Generalized forming limit diagram
Normal stress
Through thickness shear strain

ABSTRACT

Regarding to the uprising need for production of new components with high efficiency, application of methods that could facilitate the prototyping and minimize the financial and time costs are of high importance. Single Point Incremental Forming, which is a process with no need for die manufacturing, was successful in minimizing the costs and the prototyping period required for design validations. Accordingly, studying this process from different perspectives and obtaining an accurate method for determination of failure in this procedure is important. Some of the benefits of this process are an increase in formability, high flexibility in production of complex shapes and reduction of forming forces. In all available processes that are used for forming of metallic sheets there is a certain limit for formality beyond which typical failures including wrinkle, necking or rupture will occur. Today different experimental and numerical methods are developed for determination of forming limit. In this study in order to obtain the forming limits and to anticipate the failure in Single-Point-Incremental-Forming process, generalized forming limit diagrams are utilized. Initially the Single Point Incremental Forming process is simulated using ABAQUS Software and then resulting strain path of critical elements of the part are compared against the forming limits obtained by generalized forming limit diagrams to study the existence of failure in both simulations and experimental tests.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.

Publisher: Imam Hossein University © Authors

مکانیک هوافضا/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۲۰/ شماره ۲/ صفحه ۳۹-۵۳

نشریه علمی مکانیک هوافضا

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.2.4.8

پیش‌بینی بروز آسیب در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای با استفاده از نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته

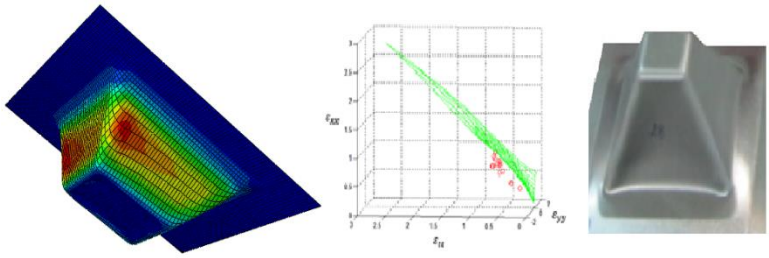
محمدمهدی قانع شلمانی[۱]، علی باستی[۲*]، ابوالفضل طاهرخانی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

[۲] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- به دست آوردن نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته
- بررسی تأثیر زاویه دیواره بر عمق شکل‌دهی قابل‌دستیابی
- ارائه مدلی جهت پیش‌بینی بروز آسیب در فرایند SPIF

چکیده

با توجه به نیاز روزافزون به تولید قطعاتی جدید با بیشترین بازدهی، وجود فرایندهایی که ساخت نمونه اولیه را سهولت بخشند و صرف هزینه و زمان را به حداقل برسانند، بسیار مهم می‌باشد. فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای (SPIF) که در آن برای شکل‌دهی قطعه موردنظر نیازی به تولید قالب نیست تا حد زیادی این هدف را محقق کرده است. از مزایای این روش می‌توان به افزایش شکل‌پذیری، انعطاف بیشتر در تولید اشکال پیچیده و کاهش نیروهای شکل‌دهی اشاره کرد. هدف از انجام این مقاله، دستیابی به روشی جدید جهت پیش‌بینی بروز آسیب در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به‌صورت عددی می‌باشد تا بتوان پیش از انجام فرایند به‌صورت تجربی، بروز آسیب در قطعه را پیش‌بینی کرد. ازآنجایی‌که در فرایند شکل‌دهی تدریجی علاوه بر تنش‌ها و کرنش‌ها صفحه‌ای، تنش‌های نرمال و کرنش‌های برشی ضخامتی قابل‌توجهی بر ورق وارد می‌شود، استفاده از نمودار حدشکل‌دهی مرسوم که در آن شرایط تنشی و کرنشی به‌صورت درون صفحه در نظر گرفته‌شده است، منجر به نتایج نه‌چندان درست و غیرقابل اتکا می‌گردد. ازاین‌رو در این مقاله از نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته به‌منظور پیش‌بینی بروز آسیب استفاده‌شده است. در این مقاله، زاویه دیواره قطعه به‌عنوان یک پارامتر جهت بررسی میزان شکل‌دهی موردمطالعه قرارگرفته است. جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، فرایند شکل‌دهی به‌صورت تجربی نیز برای زوایای دیواره ذکرشده انجام گرفت که نتایج آن تطابق قابل قبولی با نتایج شبیه‌سازی دارد. در هر دو حالت عددی و تجربی زاویه دیواره ۶۷ درجه به‌عنوان حد نهایی شکل‌دهی گزارش‌شده است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

*نویسنده مسئول:

basti@guilan.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای

نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته

تنش نرمال

کرنش برشی ضخامتی

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) توزیع‌شده است.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع)

© نویسندگان

۱- مقدمه

شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ازجمله روش‌های نوین فرم‌دهی ورق‌های فلزی می‌باشد که برای شمار کم تولید قطعات و یا ساخت مدل نمونه اولیه بسیار مناسب است. توسعه روزافزون ماشین‌های کنترل عددی بستر مناسبی را برای به‌کارگیری این روش در صنعت مهیا کرده است. ایده اولیه شکل‌دهی تدریجی توسط لسزاک [۱] مطرح شد. بررسی امکان استفاده از یک ماشین کنترل عددی بجای استفاده از دستگاه‌های تک منظوره که توسط [۲] و فیلیس [۳] انجام گرفت، نقطه شروعی برای موفقیت و پیشرفت سریع این فرایند بشمار می‌رود. کیلر و[۴] برای اولین بار نظریه استفاده از نمودار را جهت پیش‌بینی حد شکل‌پذیری مطرح کردند. کیلر [۵] برای ورق تحت کشش دومحوره، نموداری را پیشنهاد کرد که قسمت امن را از قسمت پارگی جدا می‌کرد که بعدها نمودار حدشکل‌دهی نامیده شد. بررسی‌های اولیه شکل‌پذیری ورق‌های فلزی و به دست آوردن حدشکل‌دهی آن‌ها، از طریق روش‌های تجربی انجام می‌گرفت. کیلر [۵] استفاده از دایره‌های حک‌شده روی سطح ورق را مطرح کرد و توانست سمت راست نمودار را با استفاده از تست کشش دومحوره به دست آورد. گودوین [۶] از روش پیشنهادی کیلر در بسیاری از مطالعات صنعتی استفاده کرد و توانست با استفاده از کشش تک‌محوره سمت چپ نمودار را به دست آورده و آن را کامل کند. به دست آوردن نمودار حدشکل‌دهی با استفاده از روش‌های تجربی نیازمند تست‌های متفاوت تحت شرایط بارگذاری مختلف است که امری پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. همین دلایل گرایش زیادی به سمت استفاده از روش‌های تئوری برای به دست آوردن نمودار حدشکل‌دهی ایجاد کرده است. اولین دیدگاه نظری برای پیش‌بینی حدشکل‌دهی بر مبنای شکاف خوردن و ناپایداری است. در ابتدا هیل [۷] و سوئیفت بودند که ایده ناپایداری نیرو و تنش را برای پیش‌بینی حدشکل‌دهی بکار بردند. هیل معتقد بود که گلویی زمانی در سمت چپ FLD اتفاق می‌افتد که تأثیرات کار سختی با کاهش ضخامت به تعادل برسد. بعد از او سوئیفت بیان کرد که در سمت چپ نمودار، ناپایداری زمانی رخ می‌دهد که تنش در هر دو راستای اصلی به یک مقدار بیشینه برسد اما معروف‌ترین روش برای به دست آوردن نمودار حدشکل‌دهی، روش مارسینیاک و کوزینسکی [۸] است که در سال ۱۹۶۷ مطرح شد و به نام روش M-K شناخته می‌شود. به‌طورکلی این روش برای قسمت سمت راست نمودار حدشکل‌دهی ایجادشده است. ساوربای و دانکن [۹] مدل M-K را با استفاده از بارگذاری‌های مختلف بسط دادند تا کل محدوده نمودار را در برگیرد. فاطمی و همکارانش [۱۰] با در نظر گرفتن تنش‌های فشاری و برشی ضخامتی نمودار حدشکل‌دهی را به دست آوردند و نشان دادند که این تنش‌ها باعث افزایش حدشکل‌دهی شده و شکل‌پذیری ورق را بهبود می‌بخشد. سیلوا و همکاران [۱۱] به بررسی تحلیلی و عددی فرآیند شکل‌دهی تدریجی پرداختند. آن‌ها نتایج روابط تحلیلی که در تحقیقات گذشته به دست آورده بودند را با نتایج عددی در این مقاله بررسی کردند. همچنین آن‌ها نمودار حدشکل‌دهی را که با استفاده از تست‌های تجربی، نتایج تحلیلی و عددی محاسبه کرده بودند باهم مقایسه کردند و نشان دادند که بین این نتایج انطباق خوبی برقرار است. سو و همکاران [۱۲] به بررسی پارامترهای مختلف بر حد شکل‌پذیری در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای پرداختند. آن‌ها قطر و گام حرکت ابزار را موردبررسی قرار دادند.

موحدی‌نیا و همکاران [۱۳] به بررسی فرایند فلرینگ لوله‌های جداره نازک با استفاده از شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به پرداختند. آن‌ها دریافتند که با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای چندمرحله‌ای در مقایسه با فرایند پرس، می‌توان بیشینه زاویه قابل‌دستیابی را تا میزان ۱۰۰٪ افزایش داد. شمساری و همکاران [۱۴] با پیشنهاد دومرحله‌ای کردن فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای توانستند به بهبود قابل‌توجهی در عمق قابل شکل‌دهی و توزیع ضخامت ورق دست یابند. غافری و همکاران [۱۵] به بررسی عملیات‌های حرارتی مختلف پیش و پس از فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای و تأثیرات آن پرداختند. آن‌ها دریافتند در حالتی که پیش از انجام فرایند، آنیل کردن و پس‌ازآن استحکام‌بخشی با محلول جامد و فرایند پیری مصنوعی انجام می‌شود، عمق شکل‌دهی به میزان ۱۰۰٪ و سختی سطح به میزان ۲٪ افزایش می‌یابد.

درزی و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر افزایش دمای ورق تحت فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای پرداختند. آن‌ها دریافتند که اگر این افزایش دما به‌صورت یکنواخت به ورق اعمال شود، تأثیر چشمگیری بر شکل‌پذیری آن خواهد داشت.

میرنیا و همکاران [۱۷] به پیش‌بینی بروز آسیب در فرایند SPIF پرداختند. بدین منظور آن‌ها از نمودار FFLD استفاده کردند. همچنین آن‌ها دریافتند که با توجه به عدم توزیع یکنواخت تنش و کرنش در ورق، در این فرایند شکست از لایه خارجی ورق آغازشده و به سمت داخل حرکت می‌کند.

در مدل M-K فرض بر حالت تنش و کرنش درون صفحه‌ای بوده و این مدل قادر به پوشش فرایندهایی با حالت تنش و کرنشی خارج از صفحه نمی‌باشد. در این مقاله، در ابتدا با بسط دادن تئوری M-K، روابط موردنیاز جهت ترسیم نمودار حدشکل‌دهی با در نظر گرفتن تنش فشاری و تنش‌های برشی ضخامتی به‌دست‌آمده است. با استفاده از این روابط نمودار حدشکل‌دهی در شرایط بارگذاری مختلف ترسیم‌شده و نتایج حاصل با نتایج آلوود و شولر [۱۸] مقایسه شده‌اند که مطابقت بسیار خوبی را نشان می‌دهند. در ادامه با در نظر گرفتن تانسور تنش با شش مؤلفه غیر صفر، نمودار حدشکل‌دهی تعمیم‌یافته به‌دست‌آمده است. سپس فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای جهت شکل‌دهی یک هرم ناقص با زوایای دیواره مختلف انجام‌گرفته است. با استخراج کرنش‌های ایجادشده در قطعه نهایی و مقایسه آن با حدشکل‌دهی به‌دست‌آمده در مرحله قبل، بروز آسیب پیش‌بینی خواهد شد.

۲- مدل تئوری

همان‌طور که بیان شد در روش M-K جهت مشخص کردن مکان موضعی شدن تغییرشکل، یک شیار باریک در ورق تحت بارگذاری در نظر گرفته می‌شود. این شیار ورق را به دو قسمت همگن (A) و دارای نقص (B) تقسیم می‌کند. در ناحیه همگن تغییرشکل به‌صورت یکنواخت و متناسب رخ می‌دهد. در روش ارائه‌شده توسط کیلر، دایره‌های حک‌شده روی ورق، بعد از تغییرشکل به شکل بیضی درمی‌آیند. قطرهای بزرگ و کوچک این بیضی‌ها جهت‌های اصلی را مشخص می‌کنند.

در این روش، یک شیار به‌عنوان نماینده‌ای از ناهمگنی‌های ورق در نظر گرفته می‌شود. فاکتور ناهمگنی اولیه f_0 به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$f_0 = \frac{t_0^B}{t_0^A} \quad (۱)$$

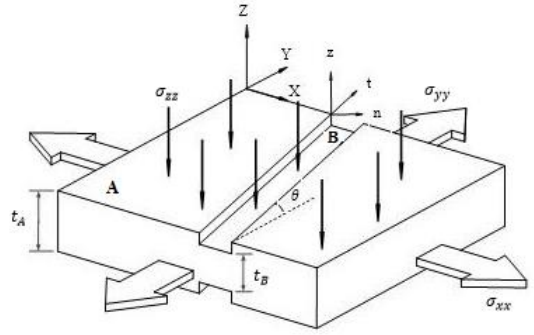
که t_0 ضخامت اولیه ورق است. فاکتور ناهمگنی اولیه بشدت روی نمودار حدشکل‌دهی تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، به دست آوردن دقیق f_0 باعث مطابقت بهتر مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر تجربی می‌گردد. تغییرات f نیز با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$f = f_0 \exp\left(\varepsilon_3^B - \varepsilon_3^A\right) \quad (۲)$$

که ε_3^A و ε_3^A کرنش‌های اصلی در راستای ضخامت به ترتیب در قسمت همگن و ناهمگن ورق می‌باشند. شیار می‌تواند نسبت به مختصات کلی هر زاویه‌ای بین ۰ تا ۹۰ درجه داشته باشد. در اینجا زاویه شیار با راستای تنش اصلی دوم، با θ نشان داده‌شده است. با شروع تغییرشکل پلاستیک، زاویه شیار تغییر می‌کند که این تغییر جهت می‌تواند روی مقدار کرنش بحرانی تأثیر بگذارد؛ بنابراین، جهت به دست آوردن دقیق‌تر نمودار حدشکل‌دهی باید تغییرات زاویه شیار در هر نمو در تغییرشکل پلاستیک به دست آید. رائو و سینگ [۱۹] معادله زیر را برای این منظور ارائه کردند.

$$\tan(\theta + d\theta) = \tan(\theta)\frac{1 + d\varepsilon_{xx}^A}{1 + d\varepsilon_{yy}^A} \quad (۳)$$

که $d\varepsilon_{xx}^A$ و $d\varepsilon_{yy}^A$ نمو کرنش‌های اصلی در قسمت همگن ورق می‌باشند. شماتیکی از مدل M-K اصلاح‌شده در شکل ۱ نشان داده‌شده است.



شکل (۱): شماتیکی از مدل M-K اصلاح‌شده.

فرضیات زیر برای ماده و شرایط تغییرشکل در این مقاله در نظر گرفته‌شده است:

- ماده پلاستیک کامل، غیرقابل تراکم و ایزوتروپیک است.
- از معیار تسلیم ون میسز استفاده‌شده است.
- تغییرشکل، یکنواخت و متناسب فرض شده است.
- تنش عمودی روی ورق (σ_{zz}) ناشی از فشار هیدروفرمینگ یا فشار تماس ابزار، دانسته فرض می‌شود و در تمام نواحی ورق یکسان است.
- از دوران مرزها و محورهای اصلی و همچنین تغییرات تنش ضخامتی، صرف‌نظر شده است.

در این مقاله برای به دست آوردن نمودار حدشکل‌دهی تعمیم‌یافته تانسور تنش شش‌مؤلفه‌ای کامل در نظر گرفته‌شده است. ازآنجایی‌که بارگذاری متناسب فرض شده است، نسبت تنش‌ها در حین تغییرشکل ثابت باقی می‌ماند. تانسور نسبت تنش در رابطه ۵ ارائه‌شده است [۱۸]:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ sym & & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{xx}} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{xy} & \alpha_{xz} \\ & \alpha_{yy} & \alpha_{yz} \\ sym & & \alpha_{zz} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

در این مدل یک ورق ایزوتروپیک تحت یک مسیر کرنش یکنواخت قرارگرفته است و نسبت کرنش‌ها در حین تغییرشکل ثابت باقی می‌مانند. ماتریس نسبت تغییرشکل (β) به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸].

$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{xy} & \beta_{xz} \\ & \beta_{yy} & \beta_{yz} \\ sym & & \beta_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d\varepsilon_{xy}}{d\varepsilon_{xx}} & \frac{d\varepsilon_{xz}}{d\varepsilon_{xx}} \\ & \frac{d\varepsilon_{yy}}{d\varepsilon_{xx}} & \frac{d\varepsilon_{yz}}{d\varepsilon_{xx}} \\ sym & & \frac{d\varepsilon_{zz}}{d\varepsilon_{xx}} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

به دلیل اینکه x و y در جهت کرنش‌های صفحه‌ای ماکزیمم و مینیمم انتخاب‌شده‌اند، ماتریس نسبت تغییر کرنش ساده‌سازی خواهد شد:

$$x \,\&\, y \rightarrow 1 \,\&\, 2 \Rightarrow \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = 0 \Rightarrow \beta_{xy} = 0 \quad (۷)$$

از طرفی با توجه به اصل تراکم ناپذیری:

$$d\varepsilon_{11} + d\varepsilon_{22} + d\varepsilon_{33} = 0 \quad (۸)$$

$$d\varepsilon_{xx}(1 + \beta_{yy+}\beta_{zz}) = 0 \Rightarrow \beta_{zz} = -(1 + \beta_{yy}) \quad (۹)$$

بنابراین β_{ij} به‌صورت زیر ساده‌سازی می‌شود.

$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta_{xz} \\ & \beta_{yy} & \beta_{yz} \\ sym & & -(1 + \beta_{yy}) \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

ازآنجایی‌که ماده پلاستیک کامل در نظر گرفته‌شده است، از کرنش‌های الاستیک صرف‌نظر می‌شود. اکنون نموهای کرنش پلاستیک در مسیر کرنش مفروض اعمال می‌شوند.

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{ij})_{old} + d\varepsilon_{ij} \quad (۱۱)$$

که $d\varepsilon_{ij}$ در آن نمو کرنش پلاستیک بوده و در جهت x برابر ۰/۰۰۱ فرض شده است.

با توجه به معادله کرنش معادل ون میسز:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}((\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{xz}^2 + \varepsilon_{yz}^2))^{0.5} \quad (۱۲)$$

و با استفاده از معادلات ۶ و ۱۲:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}\varepsilon_{xx}\left((1 - \beta_{yy})^2 + (\beta_{xx} - \beta_{zz})^2 + (\beta_{yy} - \beta_{zz})^2 + 6(\beta_{xy}^2 + \beta_{xz}^2 + \beta_{yz}^2)\right)^{0.5} \quad (۱۳)$$

حال با توجه به دانستن مقدار $d\varepsilon_{xx}$ و به دست آمدن $\bar{\varepsilon}$، با استفاده از رابطه زیر، نمو کرنش معادل $d\bar{\varepsilon}$ محاسبه خواهد شد.

$$d\bar{\varepsilon} = \bar{\beta} \,.\, d\varepsilon_{xx} \quad (۱۴)$$

طبق تعریف کرنش معادل:

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_{xx}} = \frac{\sqrt{2}}{3}\left((1 - \beta_{yy})^2 + (\beta_{xx} - \beta_{zz})^2 + (\beta_{yy} - \beta_{zz})^2 + 6(\beta_{xy}^2 + \beta_{xz}^2 + \beta_{yz}^2)\right)^{0.5} \quad (۱۵)$$

تنش معادل از معادله کار سختی به دست می‌آید.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n \quad (۱۶)$$

با استفاده از معادله تنش معادل ون میسز:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left((\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx}-\sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2 + 6(\tau_{xy}^2+\tau_{xz}^2+\tau_{yz}^2)\right)^{0.5} \quad (۱۷)$$

و با توجه به معادله ۵:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{xx}}{\sqrt{2}}\left((1-\alpha_{yy})^2 + (1-\alpha_{zz})^2 + (\alpha_{yy}-\alpha_{zz})^2 + 6(\alpha_{xy}^2+\alpha_{xz}^2+\alpha_{yz}^2)\right)^{0.5} \quad (۱۸)$$

نسبت تنش معادل ($\bar{\alpha}$) به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left((1-\alpha_{yy})^2 + (1-\alpha_{zz})^2 + (\alpha_{yy}-\alpha_{zz})^2 + 6(\alpha_{xy}^2+\alpha_{xz}^2+\alpha_{yz}^2)\right)^{0.5} \quad (۱۹)$$

از مقایسه رابطه ۱۸ و ۱۹:

$$\sigma_{xx} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\alpha}} \quad (۲۰)$$

از معادلات جریان و معیار تسلیم ون میسز برای محاسبه نسبت کرنش‌ها استفاده‌شده است. رابطه پرانتل رئوس به‌صورت زیر است.

$$d\varepsilon_{ij}^P = d\lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial(\sigma_{ij})} \quad (۲۱)$$

$$\mathrm{d}\lambda = \frac{3}{2}\frac{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \quad (۲۲)$$

با استفاده از معادلات ۶، ۲۱ و ۲۲:

$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\alpha_{xy}}{2-\alpha_{yy}-\alpha_{zz}} & \frac{\alpha_{xz}}{2-\alpha_{yy}-\alpha_{zz}} \\ & \frac{2\alpha_{yy}-\alpha_{zz}-1}{2-\alpha_{yy}-\alpha_{zz}} & \frac{\alpha_{xz}}{2-\alpha_{yy}-\alpha_{zz}} \\ sym & & \frac{2\alpha_{zz}-\alpha_{yy}-1}{2-\alpha_{yy}-\alpha_{zz}} \end{bmatrix} \quad (۲۲)$$

و همچنین:

$$\alpha_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{3\beta_{xy}(1-\alpha_{zz})}{2+\beta_{yy}} & \frac{3\beta_{xz}(1-\alpha_{zz})}{2+\beta_{yy}} \\ & \frac{\beta_{yy}(2-\alpha_{zz})+\alpha_{zz}+1}{2+\beta_{yy}} & \frac{3\beta_{yz}(1-\alpha_{zz})}{2+\beta_{yy}} \\ sym & & known \end{bmatrix} \quad (۲۲)$$

ازآنجایی‌که فرض شده نقص (شیار) اولیه با راستای تنش صفحه‌ای دوم (σ_{yy}) هم‌راستا نیست، درنتیجه باید تنش‌ها و کرنش‌ها را به مختصات شیار منتقل کرد. بدین منظور از تانسور دوران T استفاده‌شده است.

$$T = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta & 0 \\ -sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

$$(\sigma)_{ntz} = T^t.(\sigma)_{xyz}.T \quad (۲۴)$$

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n \quad (۲۶)$$

مدل تئوری M-K بر مبنای تعادل نیروها و سازگاری کرنش بین نواحی سالم و دارای عیب استوار است که به‌صورت زیر اعمال می‌شود:

۱) نیروی عمودی در کل ورق یکنواخت و یکسان فرض شده است:

$$\sigma_{zz}^B = \sigma_{zz}^A \quad (۲۷)$$

$$\tau_{nz}^B = \tau_{nz}^A \quad (۲۸)$$

$$\tau_{tz}^B = \tau_{tz}^A \quad (۲۹)$$

۲) با استفاده از معادله سازگاری برای مرز تماس بین دو ناحیه خواهیم داشت:

$$d\varepsilon_{tt}^B = d\varepsilon_{tt}^A \quad (۳۰)$$

۳) با استفاده از معادله تعادل نیرو در جهت عمود بر شیار داریم:

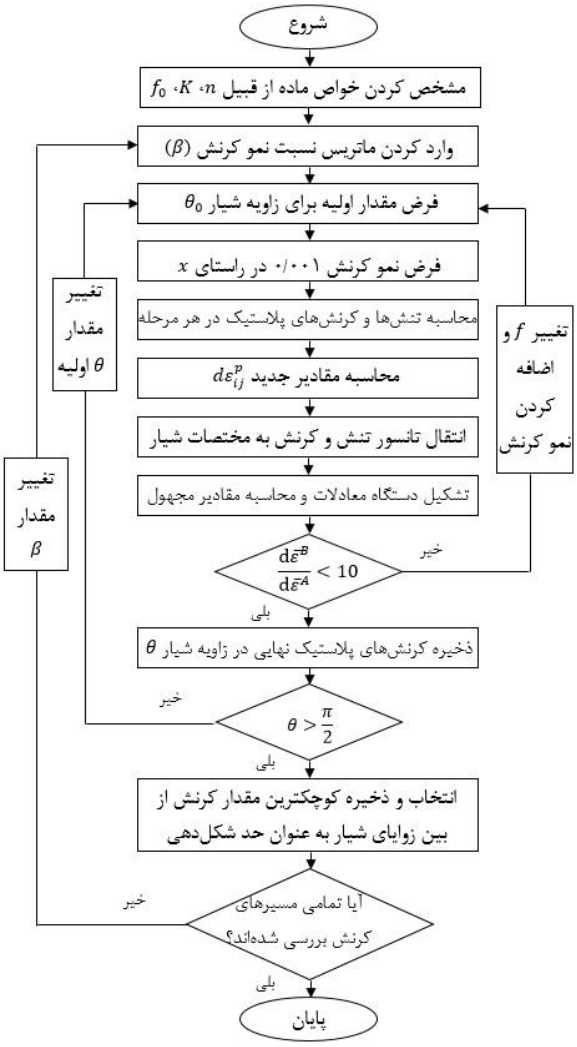
$$f.\sigma_{nn}^B = \sigma_{nn}^A \quad (۳۱)$$

$$f.\tau_{nt}^B = \tau_{nt}^A \quad (۳۲)$$

با استفاده از معادلات فوق و روش نیوتن رافسون، مجهولات محاسبه‌شده‌اند.

این روند تا جایی ادامه می‌یابد که نسبت $\frac{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}^B}{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}^A}$ به مقداری بحرانی که معمولاً برابر ۱۰ در نظر گرفته می‌شود، برسد که در این حالت نرخ تغییرشکل در ناحیه شیار بسیار بیشتر از ناحیه یکنواخت ورق است که می‌تواند آغاز گلویی شدن در نظر گرفته شود. در این حالت، مقادیر ε_{xx} ، ε_{yy} و ε_{tt} ($\varepsilon_{tt} = \sqrt{\varepsilon_{xz}{}^2 + \varepsilon_{yz}{}^2}$) به‌عنوان مقادیر بحرانی برای مسیر کرنش متناظر ذخیره می‌شوند. این کار برای زاویه‌های مختلف شیار انجام‌شده و حداقل مقدار کرنش، به‌عنوان حد کرنش برای ترسیم FLD بکار می‌رود. روند حل عددی این روش در شکل **۲** قابل‌مشاهده می‌باشد. در این تحقیق از نرم‌افزار متلب جهت حل عددی معادلات ذکرشده و به دست

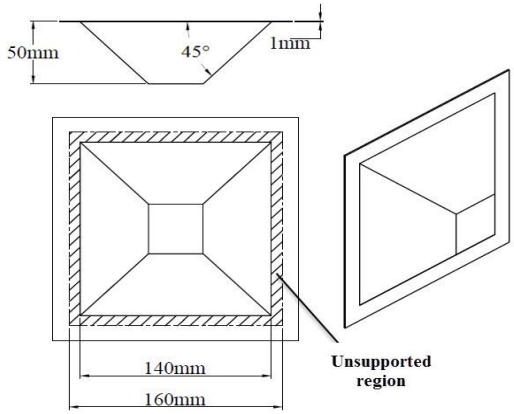
آوردن نمودارهای حدشکل‌دهی در شرایط مختلف استفاده‌شده است.



شکل (۲): فلوچارت به دست آوردن نمودار حدشکل‌دهی.

۳- مدل عددی

در این بخش، به‌عنوان تعریف مسئله، یک قطعه فلزی به شکل هرم ناقص با قاعده مربعی در نظر گرفته‌شده است (شکل **۳**). پارامتر متغیر در این مسئله، زاویه دیواره این قطعه می‌باشد و با افزایش این پارامتر، کرنش‌های ایجادشده در قطعه موردبررسی قرار خواهند گرفت. در ابتدا فرآیند تولید این قطعه طی فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای تحت زوایای دیواره مختلف توسط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی می‌گردد. کرنش‌های ایجادشده در قطعه از نرم‌افزار شبیه‌ساز به‌عنوان خروجی دریافت شده و نسبت به نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت تا بروز آسیب موردبررسی قرار گیرد.



شکل (۳): ابعاد هندسی هرم ناقص تولیدشده توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای.

۳-۱- شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای

برای شبیه‌سازی فرایند از نرم‌افزار آباکوس که یکی از انواع نرم‌افزارهای المان محدود می‌باشد، استفاده‌شده است. مراحل این شبیه‌سازی عبارت‌اند از:

- مدل‌سازی اجزا مختلف فرایند
- تعریف خواص ورق
- سرهم‌بندی اجزا مختلف فرایند
- تعریف شرایط تماسی
- تعریف شرایط مرزی و مسیر حرکت ابزار
- مش‌زنی ورق

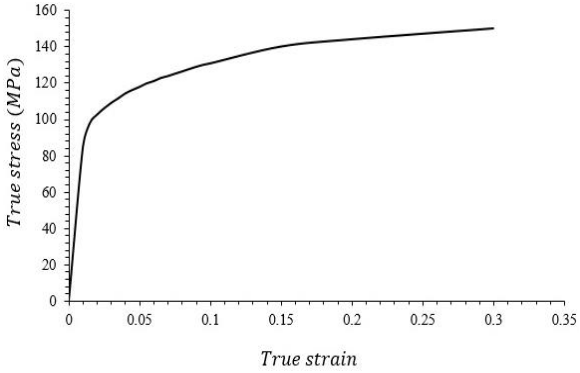
در بخش ابتدایی اجزا مختلف فرایند شامل ورق، تکیه‌گاه و ابزار شکل‌دهی مدل‌سازی می‌شوند.

در ادامه خواص ورق شامل چگالی، خواص الاستیک و پلاستیک تعریف می‌شوند. در این شبیه‌سازی از ورقی از جنس آلومینیوم ۳۱۰۵ به ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده‌شده است که خواص آن در جدول **۱** مشخص‌شده است. برای تعیین خواص مکانیکی ورق، نمونه‌هایی تحت زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد بر اساس استاندارد ASTM(E8M) تهیه و در دستگاه تست کشش یونیورسال مدل (GOTECH, AL-7000LA30) با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا حد شکست کشیده شدند. مشخصات

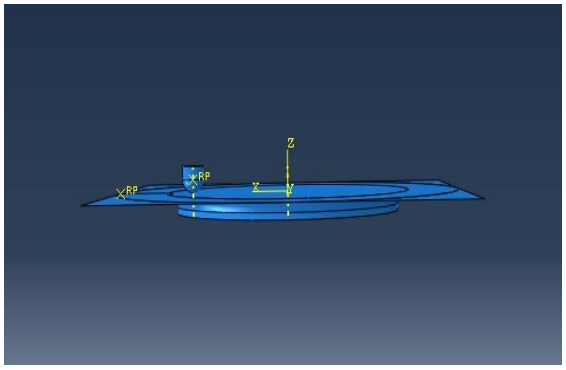
مکانیکی آلیاژ به‌کاررفته و در جدول **۲** آورده شده است [۲۰]. در ادامه قطعات مدل‌سازی شده در مرحله اول، سرهم‌بندی شده‌اند (شکل‌های **۴** و **۵**).

جدول (۱): خواص مکانیکی AA3105 [۲۰].

خاصیت	مقدار
چگالی (kg/m^3)	۲۷۰۰
تنش تسلیم (MPa)	۹۹/۵
مدول یانگ (GPa)	۶۹
ضریب پواسون	۰/۳۳

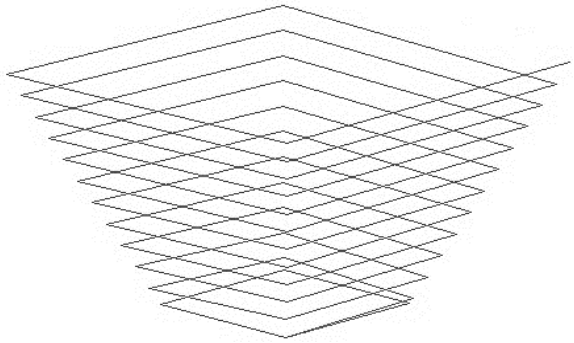


شکل (۴): نمودار تنش کرنش AA3105 [۲۰].



شکل (۵): سرهم‌بندی قسمت‌های مختلف فرایند.

در قسمت تعریف شرایط تماسی با توجه به روانکاری انجام‌شده در تست‌های تجربی، ضریب اصطکاک برابر با ۰/۰۳ تعریف‌شده است. مسیر حرکت ابزار تأثیر چشم‌گیری بر دقت ابعادی، زبری سطح، زمان فرایند و توزیع ضخامت خواهد داشت. دو استراتژی مسیر ابزار مارپیچ و پلکانی بیشترین استفاده را در بین استراتژی‌های مختلف دارا می‌باشند. در این تحقیق از استراتژی مسیر ابزار مارپیچ استفاده‌شده است. با استفاده از نرم‌افزار پاورمیل مسیر ابزار جهت شکل‌دهی هرم ناقص با ابعاد ارائه‌شده در شکل **۳** به‌دست‌آمده است که در شکل **۶** قابل‌مشاهده می‌باشد.



شکل (۶): مسیر ابزار جهت شکل‌دهی هرم ناقص توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای.

در مرحله بعد شرایط مرزی برای قطعات مختلف و همچنین سرعت پیشروی ابزار تعریف می‌گردد. ابزار در هر سه محور x، y و z قادر به حرکت و همچنین دارای حرکت دورانی حول محور z می‌باشد؛ اما حرکت دورانی آن حول محورهای x و y محدودشده است. شرایط مرزی برای ورق و تکیه‌گاه نیز به‌صورت کاملاً گیردار تعریف‌شده است و هر چهار طرف ورق و تکیه‌گاه کاملاً مقید شده‌اند. مسیر ابزار به‌دست‌آمده نیز در همین مرحله به شبیه‌ساز تعریف می‌گردد.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های شبیه‌سازی، مش‌زنی ورق تحت شکل‌دهی می‌باشد. ازآنجایی‌که اندازه المان‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ مسئله دارد، اندازه آن‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که با کوچک‌تر کردن اندازه‌شان تأثیر قابل‌توجهی در پاسخ‌های مسئله ایجاد نشود. از طرفی با کوچک شدن المان‌ها و افزایش تعداد آن‌ها زمان شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. به همین دلیل باید حالت بهینه‌ای بین اندازه و تعداد المان‌ها در نظر گرفته شود. بدین‌منظور شبیه‌سازی فرایند با اندازه مش‌های مختلف انجام‌گرفته است. همان‌طور که در شکل **۷** قابل‌مشاهده است، با کاهش اندازه مش، زمان شبیه‌سازی به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. با توجه به همگرایی نتایج (کرنش ماکزیمم) برای مش‌هایی با اندازه ۰/۵ میلی‌متر و کوچک‌تر، این مقدار (۰/۵ میلی‌متر) به‌عنوان حالت بهینه انتخاب‌شده است.

در اکثر شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این زمینه، المان‌ها به‌صورت پوسته‌ای تعریف‌شده‌اند؛ اما ازآنجایی‌که در این

پژوهش هدف از شبیه‌سازی فرآیند، به دست آوردن تمامی کرنش‌های ایجادشده در قطعه از جمله کرنش‌های برشی ضخامتی (ε_{tz} و ε_{nz}) می‌باشد، ازاین‌رو در قسمت انتخاب حالت المان، المان‌های solid در نظر گرفته‌شده‌اند. همچنین از انواع مختلف المان‌های سالید، از المان C3D8R در شبیه‌سازی استفاده‌شده است (حرف C بیانگر خانواده المان یعنی پیوسته می‌باشد، 3D به معنی سه‌بعدی بودن المان، ۸ بیانگر تعداد گره و R بیانگر دارای فرمول‌بندی کاهش‌یافته، می‌باشد).

۴- انجام فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به‌صورت تجربی

همان‌طور که بیان شد، در این آزمایش از ورقی از AA3105 با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده‌شده است. همچنین در فرآیند SPIF معمولاً از ابزاری با قطر بین ۴ تا ۱۲ میلی‌متر استفاده می‌شود. در این تحقیق از ابزاری از جنس فولاد SPK با قطر نوک ابزار ۹ میلی‌متر استفاده‌شده که در شکل **۹** قابل‌مشاهده است.

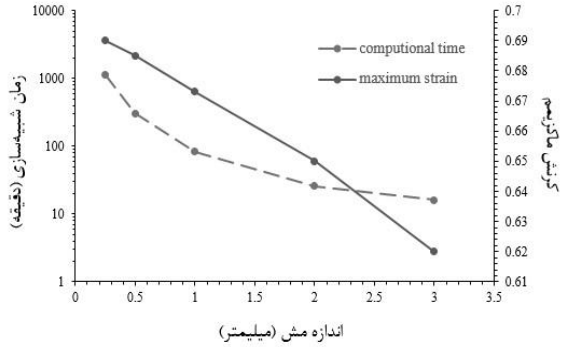
ازآنجایی‌که شکست در فرایند SPIF در هندسه‌های کنج‌دار در گوشه‌های قطعه ایجاد می‌شود، نقاط موردبررسی ازلحاظ بروز آسیب، کنج‌های قطعه خواهد بود. همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، در رسم نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته تنش فشاری وارد بر قطعه ثابت فرض می‌شود. به‌منظور به دست آوردن این مقدار از رابطه ارائه‌شده توسط سیلوا و همکاران [۱۱] استفاده خواهد شد.

$$\alpha_{zz} = \frac{\sigma_t}{\sigma_\phi} = -2\frac{t}{r_{tool}} \qquad (۳۳)$$

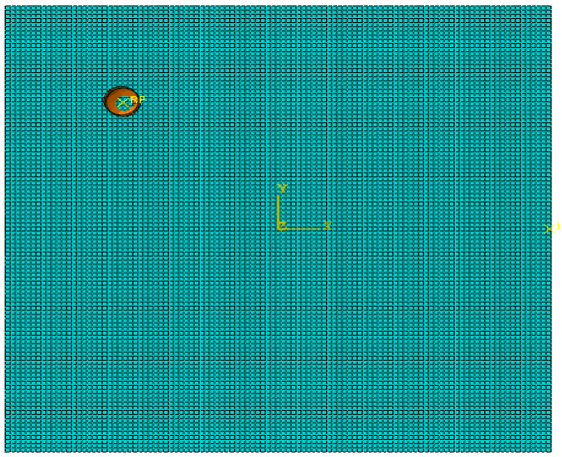
با توجه به ضخامت ورق و قطر ابزار در نظر گرفته‌شده برای انجام فرایند شکل‌دهی، مقدار فوق برابر ۰/۴۴- به دست می‌آید. به‌منظور ثابت ماندن ورق تحت فرآیند، از مکانیسمی متشکل از ورق‌گیر، صفحه نگه‌دارنده و سازه استفاده‌شده است. جهت انجام فرآیند شکل‌دهی از یک دستگاه CNC سه محوره مدل VMC850 استفاده‌شده است (شکل **۱۰**) که قادر به ایجاد سرعت دورانی ابزار تا ۸۰۰۰ دور در دقیقه می‌باشد. مسیر ابزار برای این فرآیند توسط نرم‌افزار پاورمیل به‌دست‌آمده است. گام عمقی ابزار ۰/۵۰ میلی‌متر و سرعت حرکت ابزار ۲۰۰ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته‌شده است که در طول فرآیند ثابت خواهد بود. در طول انجام فرآیند از روانکارهای مناسب جهت کاهش اصطکاک میان نوک ابزار و ورق استفاده می‌شود که در این تحقیق از روغن هیدرولیک برای این منظور استفاده‌شده است.

۵- نتایج و بحث

در این بخش در ابتدا روابط ارائه‌شده جهت دست‌یابی به نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته در ادامه شبیه‌سازی فرایند SPIF مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد.



شکل (۷): بررسی حساسیت نتایج به اندازه مش.



شکل (۸): ورق مش بندی شده.

شکل (۹): ابزار با سر کروی ۹ میلی‌متر و از جنس فولاد SPK (مقیاس برحسب سانتی‌متر می‌باشد).

شکل (۱۰): دستگاه CNC سه محوره.

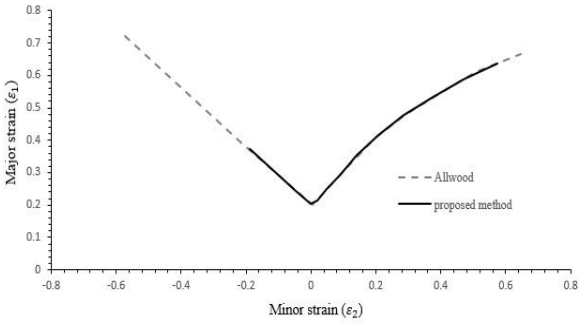
۵-۱- صحت‌سنجی روابط ارائه‌شده جهت دست‌یابی به نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته

در این بخش در ابتدا به‌منظور صحت‌سنجی روابط ارائه‌شده جهت دست‌یابی به نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته، نمودارهای حدشکل‌دهی در شرایط تنشی و کرنشی مختلف به‌دست‌آمده و با نتایج آلوود و همکاران [۱۸] مورد مقایسه قرار می‌گیرند. بدین منظور در ابتدا نمودار حدشکل‌دهی برای ورقی از جنس AA1050 در شرایط تنش صفحه‌ای به‌دست‌آمده و با نتایج آلوود و همکاران [۱۸] مقایسه شده است. خواص مکانیکی موردنیاز جهت ترسیم نمودار در جدول **۲** ارائه‌شده‌اند. همان‌طور که در شکل **۱۱** قابل‌مشاهده است، نمودار حدشکل‌دهی به‌دست‌آمده در این حالت (تنش صفحه‌ای) تطابق کاملی با نتایج آلوود و همکاران [۱۸] دارد. در ادامه، جهت صحت سنجی بیشتر روابط ارائه‌شده، نمودارهای حدشکل‌دهی برای ورقی از جنس AA1050 (مشابه حالت قبل) با در نظر گرفتن تنش نرمال نیز به‌دست‌آمده و با نتایج آلوود و همکاران [۱۸] مورد مقایسه قرارگرفته‌اند که تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

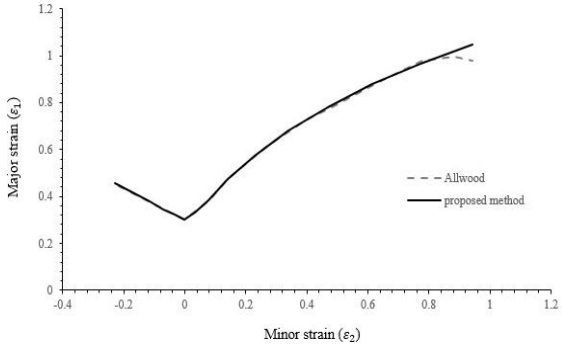
با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در حالت‌های مختلف تنشی و کرنشی، می‌توان گفت استفاده از روابط ارائه‌شده منجر به دستیابی به نمودارهای حدشکل‌دهی قابل‌اتکا می‌گردد. ازاین‌رو در ادامه نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته با استفاده از این روابط به‌دست‌آمده است. ازآنجایی‌که نرم‌افزار شبیه‌ساز قادر به دریافت نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته به‌عنوان یک معیار شکست نیست، ازاین‌رو به‌منظور پیش‌بینی بروز آسیب، از رسم هم‌زمان نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته و نقاط کرنش استفاده‌شده است.

جدول (۲): پارامترهای موردنیاز جهت رسم نمودار حدشکل‌دهی [۱۸ و ۱۹].

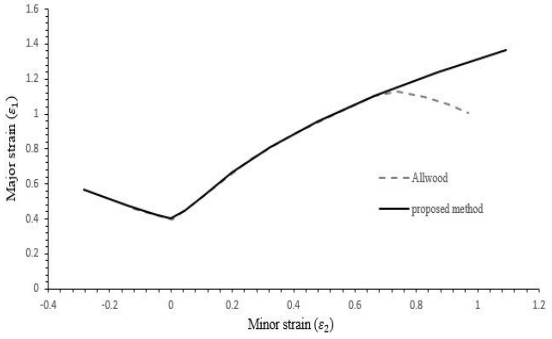
خاصیت	AA1050	AA3105
ضریب کار سختی K	۱۵۰	۱۸۰
نمای کار سختی n	۰/۲۲	۰/۱۹۵
ضریب ناهمگنی اولیه f_0	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳



شکل (۱۱): نمودار حدشکل‌دهی به‌دست‌آمده در حالت تنش صفحه‌ای.



(الف)



(ب)

شکل (۱۲): نمودار حدشکل‌دهی به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن تنش نرمال: الف) $\alpha_{zz} = -0.5$ ؛ ب) $\alpha_{zz} = -1$.

۵-۲- صحت‌سنجی روابط ارائه‌شده جهت دست‌یابی به نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته

در این قسمت با توجه به نتایج تجربی موجود و به‌منظور صحت سنجی مدل‌سازی، فرایند شکل‌دهی قطعه‌ای به شکل هرم ناقص انجام‌گرفته و با نتایج محمدی و همکاران [۲۱] مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد. این قطعه هرمی ناقص با زاویه دیواره ۶۰ درجه و قاعده‌ای مربعی شکل و به عمق ۲۳ میلی‌متر می‌باشد (شکل **۱۳ الف**). ورق اولیه به شکل مربع به ضلع ۲۰ سانتیمتر می‌باشد. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی قطر ابزار برابر با ۱۵ میلی‌متر، ضریب اصطکاک برابر با ۰/۰۵ و گام عمودی برابر با ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است.

ماده مورداستفاده در این آزمایش، آلیاژ AA1050 بوده که ابتدا در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه آنیل شده تا ساختاری همسانگرد (ایزوتروپیک) بیابد. سپس با استفاده از آزمایش‌های کشش توسط یک دستگاه آزمایش مکانیکی تمام‌خودکار، خواص مکانیکی این ماده استخراج‌شده است. رفتار پلاستیک منحنی تنش کرنش این ماده طبق رابطه کار سختی توانی زیر می‌باشد:

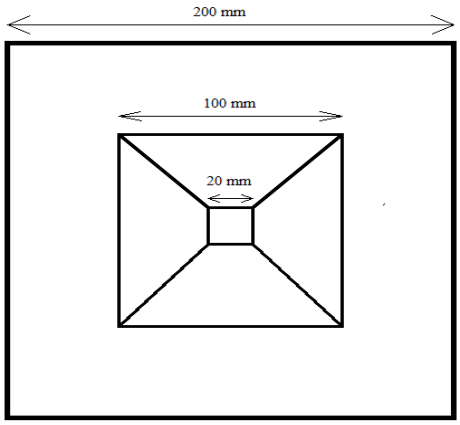
$$\bar{\sigma} = 143\bar{\varepsilon}^{0.28} \qquad (۳۴)$$

قطعه به‌دست‌آمده از فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای که توسط محمدی و همکاران [۲۱] انجام‌شده است، در شکل **۱۳ ب** قابل‌مشاهده می‌باشد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی شکل‌دهی قطعه موردنظر مطابق شکل **۱۴** می‌باشد.حال نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی از لحاظ توزیع ضخامت و دقت ابعادی با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۵-۲-۱- توزیع ضخامت در ورق شکل داده‌شده

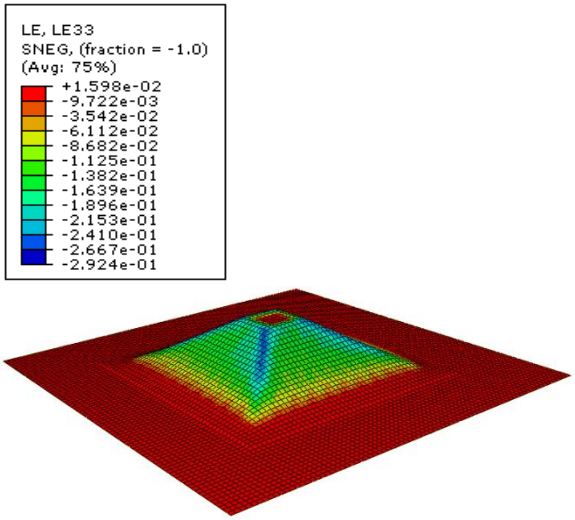
شکل **۱۵**، توزیع ضخامت به‌دست‌آمده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج در این دو حالت تطابق قابل قبولی دارند.



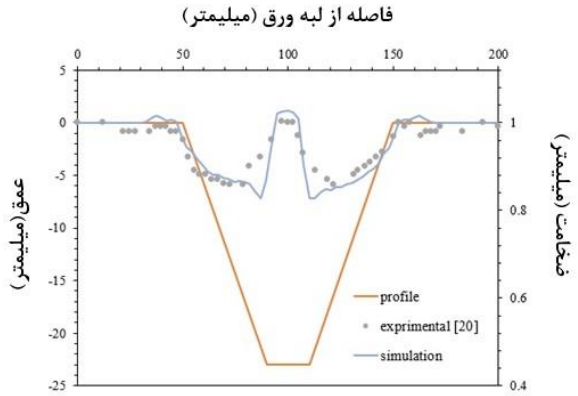
(الف)

(ب)

شکل (۱۳): الف) ابعاد هندسی هرم ناقص شکل‌دهی شده در شبیه‌سازی و تست تجربی؛ ب) قطعه به‌دست‌آمده از تست تجربی [۲۱].



شکل (۱۴): کانتور به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص.

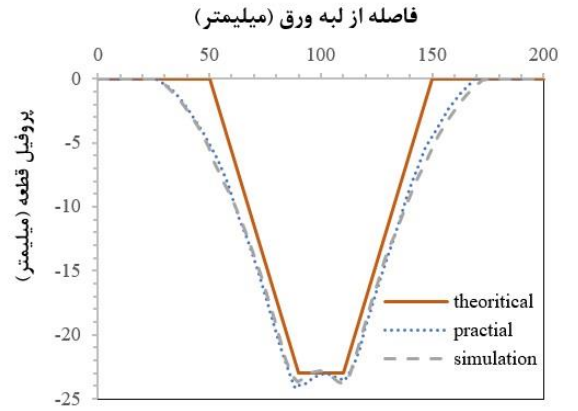


شکل (۱۵): مقایسه توزیع ضخامت در قطعه نهایی در شبیه‌سازی و تست تجربی [۲۱].

۵-۲-۲- دقت هندسی

در شکل **۱۶** مقایسه‌ای بین پروفیل اولیه هرم ناقص تعریف‌شده که توسط کد متلب به‌دست‌آمده است، پروفیل به‌دست‌آمده توسط شبیه‌سازی و پروفیل حاصل‌شده از آزمایش تجربی، انجام‌شده است. پروفیل حاصل از تست تجربی توسط محمدی و همکاران [۲۱] با استفاده از سیستم اندازه‌گیری ویدئویی به‌دست‌آمده است. مشاهدات، بیانگر تطابق مطلوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد.

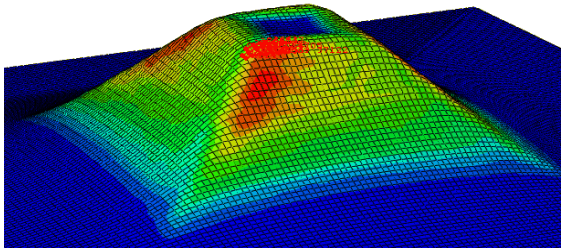
با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در قسمت‌های مقایسه توزیع ضخامت و پروفیل، انحراف موجود بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی تا حد مطلوبی کوچک می‌باشد و فرایند شبیه‌سازی تطابق قابل قبولی با تست تجربی دارد.



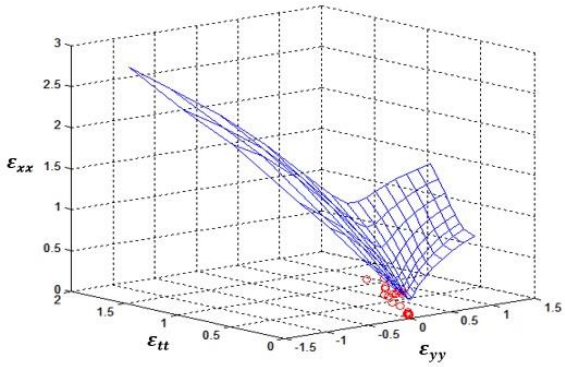
شکل (۱۶): بررسی ابعادی پروفیل اولیه تعریف‌شده و پروفیل‌های حاصل‌شده از شبیه‌سازی و تست تجربی [۲۱].

۵-۳- نتایج نهایی

در ابتدا شبیه‌سازی برای قطعه‌ای با زاویه دیواره ۵۵ درجه انجام‌شده و نتایج حاصل در شکل **۱۷** قابل‌مشاهده می‌باشد. در ادامه با افزایش زاویه دیواره بروز آسیب در قطعه تحت فرایند بررسی خواهد شد. جهت مشخص شدن جزئیات و فاصله بین نقاط کرنش و نمودار، در شکل **۱۸** تصاویر از نمای جانبی نشان داده‌شده‌اند.



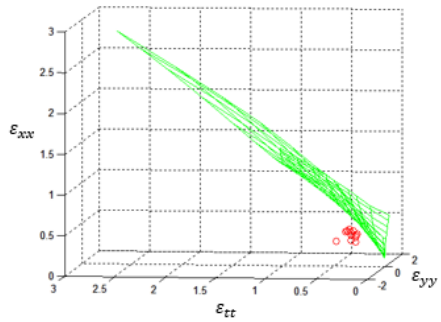
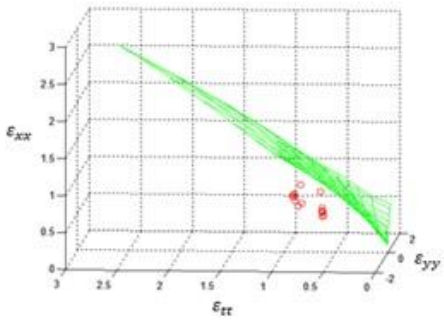
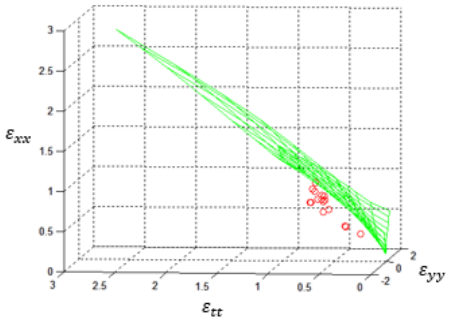
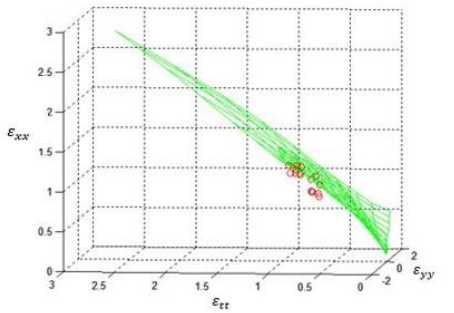
شکل (۱۷): انتخاب المان‌های کنج قطعه جهت بررسی بروز آسیب.



شکل (۱۸): بررسی بروز عیب با رسم هم‌زمان نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته و نقاط کرنش.

با افزایش زاویه دیواره نقاط کرنش به سمت حدشکل‌دهی حرکت کرده و به نمودار نزدیک می‌شوند. همان‌طور که در شکل **۱۹** دیده می‌شود، در زاویه دیواره ۵۵ درجه کرنش‌های ایجادشده با حد مجاز (نمودار حدشکل‌دهی) فاصله زیادی داشته و امکان بروز آسیب وجود ندارد. با افزایش زاویه دیواره و رسیدن به مقادیر ۶۰ و ۶۵ درجه نقاط کرنش به‌تدریج به نمودار نزدیک می‌شود. با توجه افزایش احتمال بروز آسیب در زوایای دیواره بالاتر از ۶۵

درجه، زاویه دیواره بعدی جهت شبیه‌سازی ۶۷ درجه انتخاب‌شده است که طبق پیش‌بینی در این زاویه برخی از نقاط کرنش از نمودار فراتر رفته که به معنای بروز آسیب در قطعه می‌باشد. برای صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی به‌صورت تجربی نیز انجام‌شده است که در نتایج آن در شکل **۲۰** ارائه‌شده است.

زاویه دیواره	رسم هم‌زمان نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته و نقاط کرنش
۵۵	
۶۰	
۶۵	
۶۷	

شکل (۱۹): بررسی بروز آسیب در قطعه با زوایای دیواره مختلف.

زاویه دیواره	قطعه شکل داده‌شده
۵۵	
۶۰	
۶۵	
۶۷	

شکل (۲۰): نتایج حاصل از تست تجربی فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای در قطعه با زوایای دیواره مختلف

۶- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مقاله، دستیابی به روشی جدید جهت پیش‌بینی بروز آسیب در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به‌صورت عددی می‌باشد تا بتوان پیش از انجام فرایند به‌صورت تجربی، بروز آسیب در قطعه را پیش‌بینی کرد. با توجه به نارسایی نمودارهای حدشکل‌دهی مرسوم در پیش‌بینی بروز آسیب در فرایندهایی که علاوه بر تنش‌ها و کرنش‌ها صفحه‌ای، تنش‌های نرمال و کرنش‌های برشی ضخامتی قابل‌توجهی بر ورق وارد می‌شود (شرایط تنش صفحه حاکم نیست.)، در این مقاله به‌منظور پیش‌بینی بروز آسیب از نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته استفاده‌شده است. در این تحقیق، زاویه دیواره قطعه به‌عنوان یک پارامتر جهت بررسی میزان شکل‌دهی موردمطالعه قرارگرفته است. جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، فرایند شکل‌دهی به‌صورت تجربی نیز برای زوایای دیواره ذکرشده انجام گرفت که نتایج آن تطابق قابل قبولی با نتایج شبیه‌سازی دارد و در هر دو حالت عددی و تجربی زاویه دیواره ۶۷ درجه به‌عنوان حد نهایی شکل‌دهی گزارش‌شده است. با انجام شبیه‌سازی و تست‌های تجربی و بررسی نتایج حاصل‌شده نتایج زیر به‌دست‌آمده است:

- نمودار حدشکل‌دهی تکامل‌یافته با در نظر گرفتن تنش‌های نرمال و کرنش‌های برشی ضخامتی تا حد مطلوبی قادر به پیش‌بینی بروز آسیب در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای می‌باشد.
- با افزایش زاویه دیواره در قطعه تحت شکل‌دهی امکان بروز آسیب و پارگی افزایش خواهد یافت.
- با افزایش زاویه دیواره در قطعه تحت شکل‌دهی، عمق قابل‌دستیابی کاهش خواهد یافت.
- در هرم‌های ناقص شکل‌داده‌شده توسط فرایند SPIF، کاهش ضخامت بیشینه در کنج‌های قاعده پایینی مشاهده می‌شود که این موضوع بیانگر مستعدتر بودن این نواحی نسبت به بروز آسیب خواهد بود.
- در فرایند SPIF، بیشترین خطای ابعادی در قطعه در نزدیکی تکیه‌گاه دیده می‌شود که با انتخاب مناسب ابعاد ورق‌گیر و تکیه‌گاه می‌توان آن را کاهش داد.

۷- فهرست علائم

t_0 (mm)	ضخامت اولیه ورق
t (mm)	ضخامت ورق
f	ضریب ناهمگنی
f_0	ضریب ناهمگنی اولیه
ε	کرنش
σ (MPa)	تنش
α	تانسور ضرایب نسبت تنش‌ها
β	تانسور ضرایب نسبت کرنش‌ها
$\bar{\sigma}$ (MPa)	تنش معادل
$\bar{\varepsilon}$	کرنش معادل
K (MPa)	ثابت سخت‌شوندگی ماده
n	نمای سخت‌شوندگی ماده
σ_t (MPa)	تنش ضخامتی
σ_φ (MPa)	تنش نصف‌النهاری
r_{tool} (mm)	شعاع ابزار

۸- مراجع

[1] Leszak E. Apparatus and process for incremental dieless forming. 1967. Patent US3342051A1.

[2] Jeswiet J. Incremental single point forming. Trans NAMRI/SME. 2001;29:75-9. **DOI** https://doi.org/10.1115/IMECE2000-1847.

[3] Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of material formability in incremental forming. CIRP Annals. 2002;51(1):199-202. **DOI** https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61499-1.

[4] Keeler SP. Forming limit criteria—sheets. InAdvances in deformation processing 1978 (pp. 127-157). Boston, MA: Springer US.

[5] Keeler SP. Circular grid system—a valuable aid for evaluating sheet metal formability. Sae Transactions. 1968:371-9.

[6] Goodwin GM. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. Sae Transactions. 1968:380-7.

[7] Hill RT. On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1952;1(1):19-30. **DOI** https://doi.org/10.1016/0022-5096(52)90003-3.

[8] Marciniak Z, Kuczynski K. Limit strains in the processes of stretch forming sheet steel. Journal of

the Mechanics and Physics Solids. 1967:1609-620. **DOI** https://doi.org/10.1016/0020-7403(67)90066-5.

[9] Sowerby R, Duncan J. Failure in sheet metal in biaxial tension. International Journal of Mechanical Sciences. 1971;13(3):217-29. **DOI** https://doi.org/10.1016/0020-7403(71)90004-X.

[10] Fatemi A, Dariani BM. The effect of normal and through thickness shear stresses on the formability of isotropic sheet metals. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2016;38:119-31. **DOI** https://doi.org/10.1007/s40430-015-0424-3.

[11] Silva MB, Nielsen PS, Bay N, Martins PAF. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011;56(9):893-903. **DOI** https://doi.org/10.1007/s00170-011-3254-1.

[12] Su C, Lv S, Wang R, Lv Y, Lou S, Wang Q, Guo S. Effects of forming parameters on the forming limit of single-point incremental forming of sheet metal. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021;113:483-501. **DOI** https://doi.org/10.1007/s00170-020-06576-0.

[13] Movahedinia H, Mirnia MJ, Elyasi M, Baseri H. An investigation on flaring process of thin-walled tubes using multistage single point incremental forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;94(1):867-80. **DOI** https://doi.org/10.1007/s00170-017-0971-0.

[14] Shamsari M, Mirnia MJ, Elyasi M, Baseri H. Formability improvement in single point incremental forming of truncated cone using a two-stage hybrid deformation strategy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;94(5):2357 -68. **DOI** https://doi.org/10.1007/s00170-017-1031-5.

[15] Ghaferi M, Mirnia MJ, Elyasi M, Jamshidi Aval H. Evaluation of different heat treatment cycles on improving single point incremental forming of AA6061 aluminum alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;105(1):83-100. **DOI** https://doi.org/10.1007/s00170-019-04167-2.

[16] Darzi S, Mirnia MJ, Elyasi M. Experimental investigation of elevated temperature single point incremental forming of AA6061 Aluminum sheet. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(8):2171-84. **DOR** http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1399.20.8.27.2.

[17] Mirnia MJ, Shamsari M. Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion. Journal of Materials Processing Technology. 2017;244:17-43. **DOI** 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.029.

[18] Allwood JM, Shouler DR. Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states. International journal of Plasticity. 2009;25(7):1207-30. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.11.001.

[19] Sing W, Rao K. Influence of material properties on sheet metal formability limits. Journal of materials processing technology. 1995;48(1-4):35-41. **DOI** https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01630-J.

[20] 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):665-74. **DOR** http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1395.16.12.71.6.

[21] Mohammadi H, Sharififar M, Ataee AA. Numerical and experimental analysis and optimization of process parameters of AA1050 incremental sheet forming. Journal of Computational Applied Mechanics. 2014;45(1):35-45. **DOI** https://doi.org/10.22059/JCAMECH.2014.52314.