



## تحلیل عددی و تجربی آسیب ورق دولایه آلومینیوم-مس در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای

علی زاهدی دیزج یکان<sup>۱\*</sup>، محمدجواد میرنیا<sup>۲</sup>، بیژن ملائی داریانی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مواد و ساخت و تولید، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: azahedi@uma.ac.ir

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۳۰ شهریور ۱۴۰۲

پذیرش: ۱ آبان ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

ورق دولایه

شکل‌دهی تدریجی

معیار آسیب

مدل عددی

مسیر کرنش

### چکیده

شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی است که اعمال تدریجی نیروهای شکل‌دهی و عدم حضور قالب مادگی در این روش، باعث افزایش حد شکل‌پذیری ورق و افزایش دامنه انعطاف‌پذیری فرایند در تولید هندسه‌های پیچیده می‌شود. در این پژوهش شکل‌دهی ورق‌های دولایه آلومینیوم-مس در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای تا رسیدن به حد شکل‌دهی ورق در چند هندسه مختلف مطالعه خواهد شد. با توجه به مکانیزم ناپایداری ورق در این فرایند، در پیش‌بینی عددی رشد و شروع آسیب ورق‌های دولایه، از معیار آسیب ژو-ویرزبیک (Xue-Wierzbicki) در قالب زیربرنامه VUMAT نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. آزمایش‌های تجربی نشان داد که نوع هندسه، به دلیل اعمال شرایط متفاوت تنش و کرنش در ورق، بر روی حد ارتفاع شکل‌دهی مؤثر است. پیش‌بینی مدل عددی از حد ارتفاع شکل‌دهی به طور میانگین برای هندسه‌های مختلف با اختلاف ۸٪ نسبت به آزمایش‌های تجربی انجام شده، همراه است که نشان‌دهنده اعتبار مدل عددی می‌باشد. به این ترتیب، با استفاده از مدل عددی اثر تغییرات کرنش پلاستیک معادل و تنش سه محوری به‌عنوان متغیرهای کلیدی بر توزیع کرنش‌های صفحه‌ای و آسیب در این فرایند تحلیل شد. همچنین نحوه بارگذاری سیکلی و غیرخطی در این فرایند با ترسیم مسیر کرنش برای هندسه‌های مختلف نشان داده شد.

## Numerical and experimental analysis of damage in the single point incremental forming of Aluminum/Copper bilayer sheet

Ali Zahedi Dizajyekan<sup>1\*</sup>, Mohammad Javad Mirnia<sup>2</sup>, Bijan Mollaei Dariani<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Material and Manufacturing Engineering, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Professor, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: azahedi@uma.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 21 September 2023

Accepted: 23 October 2023

#### Keywords:

Bilayer Sheet

Incremental Forming

Damage Criterion

Numerical Model

Strain Path

### Abstract

Incremental forming of metal sheets is one of the new methods of forming, in which the local exertion of forming forces and the absence of a matrix enhances the forming limit of the sheet and extends the flexibility of process in producing of complex geometries. In this research, the forming limit of aluminum/copper bilayer sheets in the single-point incremental forming of different geometries was studied. Considering the instability mechanism of the sheet, the Xue-Wierzbicki damage criterion was used in the form of the VUMAT subroutine of Abaqus in the numerical prediction of the growth and damage initiation of bilayer sheets. Experimental tests showed that the type of geometry has influences on the forming height limit due to the different induced stress and strain states on the sheet. The prediction of the numerical model of the forming height limit on average for different geometries with difference of 8% compared to the experimental tests, which indicates the validity of the numerical model. Accordingly, using the numerical model, the effect of changes in equivalent plastic strain and triaxial stress as crucial variables on the distribution of surface strains and damage was analyzed. Also, cyclic and nonlinear loading in this process was shown by plotting the strain path for different geometries.

### Please cite this article using:

Zahedi Dizajyekan A, Mirnia MJ, Mollaei Dariani B. Numerical and experimental analysis of damage in the single point incremental forming of Aluminum/Copper bilayer sheet. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 March 21;10(1):20-29. doi: 10.22034/IJME.2023.417116.1831 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی با استفاده از ماشین‌های کنترل عددی از روش‌های نوینی می‌باشد که در دهه اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است. از بین انواع مختلف این نوع فرایند شکل‌دهی، شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای<sup>۱</sup> از محبوبیت فراوانی در میان صنایع و محققان برخوردار است. در این فرایند، با توجه به اعمال تدریجی نیروهای شکل‌دهی و نیز موضعی بودن تغییر شکل، حدود شکل‌پذیری ورق نسبت به فرایندهای شکل‌دهی سنتی افزایش می‌یابد. از طرفی با توجه به اینکه در این روش شکل‌دهی لبه‌های ورق در موقعیت خود ثابت هستند و به درون ناحیه شکل‌دهی ورق کشیده نمی‌شوند، تغییرات ضخامت در دیواره‌ی هندسه‌های شکل‌دهی، بیشتر از سایر فرایندها می‌باشد و نازک‌شدگی بیشتری در آن‌ها رخ می‌دهد.

متفاوت بودن مکانیزم تغییر شکل در این فرایند و بالا بودن حد کرنش‌های شکل‌دهی و شکست در این فرایند، توجه محققان زیادی را در سال‌های اخیر جلب کرده است. سیلوا و همکاران [۱] با استفاده از آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی تدریجی ورق AA1050 و روابط تحلیلی، نشان دادند که با افزایش نسبت ضخامت ورق به شعاع ابزار شکل‌دهی، تنش سه محوری کاهش و کرنش شکست افزایش پیدا می‌کند و منجر به کاهش نرخ رشد آسیب در شعاع‌های پایین ابزار می‌شود. آسپیک و همکاران [۲] با استفاده از هندسه‌های مخروط و هرم ناقص با زاویه دیواره ثابت به اندازه‌گیری کرنش‌های شکست ورق AA1050 در فرایند شکل‌دهی تدریجی پرداختند و شیوه تجربی جدیدی را برای این منظور ارائه دادند. در کنار آزمایش‌های تجربی، برخی از محققان به تحلیل عددی فرایند پرداختند. القمدی و حسین [۳] نشان دادند که با کاهش اندازه‌ی شعاع ابزار تا مقدار آستانه، فشار هیدرواستاتیک در زیر ابزار افزایش می‌یابد و رشد آسیب کمتر می‌شود. با کاهش اندازه شعاع ابزار از مقدار آستانه، با وجود افزایش فشار هیدرواستاتیک، نرخ تجمع آسیب بیشتر شده و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. این پژوهش نشان می‌دهد که فشار هیدرواستاتیک (و یا تنش سه محوری) به تنهایی نمی‌تواند رشد آسیب را در فرایند شکل‌دهی تدریجی، تبیین کند. میرنیا و شمساری [۴] رشد آسیب و شروع شکست در شکل‌دهی ورق‌های AA6061-T6 در فرایند شکل‌دهی تدریجی را با استفاده از مدل آسیب MMC3 بررسی کردند. در تحلیل عددی با در نظر داشتن تغییرات تنش سه محوری و پارامتر لود، تغییر شکل غیرخطی و افزایش شکل‌پذیری در این فرایند تشریح شده است.

با توجه به ویژگی‌های متنوع ورق‌های دولایه، استفاده از این ورق‌ها در صنعت هوافضا، خودرو و اخیراً در کاربردهای بیومکانیک گسترده‌تر شده است. از این رو علاوه بر ورق‌های تک لایه، شکل‌دهی ورق‌های دولایه نیز در فرایند شکل‌دهی تدریجی مورد توجه قرار گرفته‌است. ساختمانیان و همکاران [۵] به بررسی عددی و تجربی نیروهای شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق‌های دولایه فولاد-تیتانیوم خالص پرداختند. بر اساس این مطالعه، به دلیل شکل‌پذیری بیشتر ورق فولادی در لایه بیرونی و اصطکاک چسبنده تیتانیوم به ابزار در لایه درونی، در حالتی که ورق فولادی در لایه بیرونی باشد نیروهای شکل‌دهی بالاتر و شکل‌پذیری ورق دولایه کمتر خواهد بود. هنریبشه و همکاران [۶] به بررسی فرایند شکل‌دهی تدریجی بر روی ورق‌های دولایه آلومینیوم-مس پرداختند. آن‌ها در این مطالعه به بررسی اثر پارامترهای فرایند در دو سطح مختلف بر روی عمق شکست در هندسه مخروط ناقص با زاویه‌ی متغیر پرداختند. بر اساس این مطالعه، با افزایش اندازه گام عمودی، کاهش شعاع ابزار و کاهش سرعت دوران اسپیندل ابزار، شکل‌پذیری ورق دولایه بهبود می‌یابد. چین و همکاران [۷] با استفاده از شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی تدریجی ورق دولایه آلومینیوم-مس نشان دادند که هر چقدر اندازه گام عمودی کمتر و شعاع ابزار شکل‌دهی بیشتر باشد، ترک بین دولایه دیرتر اتفاق می‌افتد و شکل‌پذیری ورق بهبود می‌یابد. با توجه به اهمیت بررسی شکل‌پذیری ورق دو لایه، جلالی و همکاران [۸] با توجه به مشتق دوم تغییرات کرنش پلاستیک ورق، موفق شدند زاویه‌ی حد شکل‌دهی ورق دو لایه‌ی آلومینیوم-برنج را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند.

با مروری بر پژوهش‌های انجام شده، مشخص‌گردید تحقیقات محدودی بر روی شکل‌دهی و بررسی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه در فرایند شکل‌دهی تدریجی انجام شده که اغلب به صورت بررسی‌های تجربی می‌باشند. از این رو در پژوهش حاضر، در کنار آزمایش‌های تجربی، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس به بررسی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق پرداخته خواهد شد. در این بررسی علی‌رغم مدل‌سازی رفتار ماده در ناحیه الاستیک-پلاستیک، خواص آسیب ورق نیز به نرم‌افزار معرفی خواهد شد تا تحلیل دقیق‌تری از تغییر شکل ورق در طی فرایند شکل‌دهی تدریجی بدست‌آید. برای این منظور از معیار آسیب ژو-ویرزبیک [۹] که در آن اثر فشار هیدرواستاتیک و پارامتر لود بر روی کرنش شکست ورق دیده شده در قالب زیر برنامه VUMAT

<sup>1</sup> Single Point Incremental Forming (SPIF)

استفاده خواهد شد. برای صحت‌گذاری بر شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده و تحلیل شکل‌پذیری ورق‌های دولایه، آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی بر روی ورق‌های دولایه آلومینیوم-مس (C10100/AA1050) که به روش جوشکاری انفجاری تولید شده، انجام خواهد شد. ارتفاع شکست در فرایند شکل‌دهی برای چند هندسه مختلف، تحلیل خواهد شد.

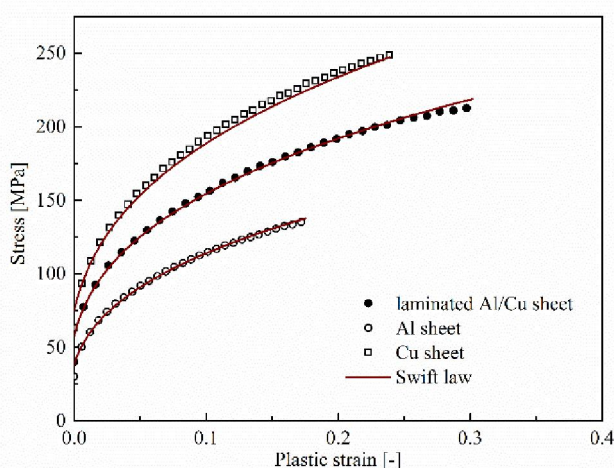
## ۲- روش تحقیق

به منظور بررسی تحقیق از آزمون‌های تجربی شامل آزمون‌های تعیین خواص مواد و آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی و همچنین مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق در محیط نرم‌افزار آباکوس استفاده خواهد شد.

### ۲-۱- آزمون‌های کشش تک محوری

در این پژوهش از ورق‌های دولایه آلومینیوم AA1050 و مس C10100 که به روش جوشکاری انفجاری و یک مرحله نورد سرد تکمیلی تولید شده‌اند، استفاده خواهد شد. ضخامت ورق‌های آلومینیومی و مسی بدست‌آمده از این فرایند تولید، به ترتیب برابر ۰/۶۵mm و ۰/۳۵mm است و ورق دولایه حاصل دارای ضخامت یک میلی‌متر است.

آزمایش‌های کشش تک‌محوری به منظور تعیین رفتار الاستیک-پلاستیک بر روی ورق دولایه و ورق‌های تک‌لایه تشکیل دهنده آن، طبق استاندارد ASTM E08-04 انجام خواهد شد. به منظور دقت بیشتر نتایج ورق‌های تک‌لایه از ورق دولایه به دست آمده جدا شده و با طول گیج- به منظور خواندن کرنش‌ها- ۵۰mm استفاده و هر یک از آزمایش‌ها سه بار تکرار خواهد شد. با استفاده از داده‌های این آزمون‌ها، منحنی تنش-کرنش حقیقی ورق‌ها طبق شکل ۱ بدست خواهد آمد. نتایج نشان داد که قانون سخت‌شوندگی سوئیفت به صورت قابل قبولی رفتار تنش و کرنش ورق‌های تک‌لایه و دولایه را ارائه می‌کند. همچنین تنش تسلیم و استحکام ورق مسی بالاتر از ورق دولایه و ورق آلومینیومی است که نشان دهنده داکتیلیته بالای این ورق می‌باشد. از طرفی، کرنش‌های قابل تحمل در ورق دولایه بیشتر از دو ورق مس و آلومینیوم است که به دلیل ضخامت بیشتر این ورق در مقایسه با ورق‌های تشکیل دهنده آن است.



شکل ۱ منحنی تنش-کرنش حقیقی برای ورق دولایه آلومینیوم-مس و اجزای آن

### ۲-۲- آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی ورق

به منظور بیان شکل‌پذیری ورق در فرایند شکل‌دهی تدریجی، می‌توان از هندسه‌هایی استفاده کرد که زاویه دیواره‌ی آن‌ها به تدریج افزایش پیدا می‌کند. در این حالت با افزایش عمق شکل‌دهی، نازک‌شدگی ورق بیشتر می‌شود و در نهایت شکست اتفاق می‌افتد. با توجه به این مطالب، هندسه‌هایی با زاویه دیواره متغیر و افزایشی برای بررسی شکل‌پذیری و شکست در فرایند شکل‌دهی تدریجی مورد استفاده قرار گرفتند.

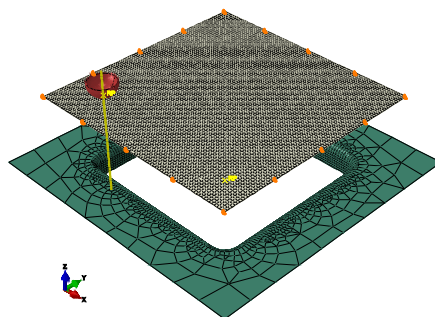
برای اجرای آزمون‌ها از صفحه‌ی پشتی و صفحه کلمپ مناسب استفاده گردید و همچنین به منظور شکل‌دهی از ابزار سرکروی به قطر ۱۰mm و با سرعت حرکت ۱۰۰۰mm/min و بدون چرخش حول محور خود استفاده شد. مسیر حرکت ابزار شکل‌دهی بر مبنای هر هندسه و با در نظر گرفتن حرکت مارپیچی با اندازه‌ی گام عمودی ۰/۵mm از طریق نرم‌افزار اینونتور<sup>۱</sup> استخراج گردید. آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی با استفاده از دستگاه CNC سه محوره طبق مسیر ابزار تعریف شده انجام گرفت. همچنین جهت جلوگیری از سایش ابزار و بهبود شرایط شکل‌دهی و همچنین جهت تشخیص پارگی از روغن مناسب روانکاری استفاده شد. در شکل ۲ تصویری از مجموعه استاپ آزمایش‌های تجربی SPIF نشان داده شده است.



شکل ۲ تجهیزات انجام آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی ورق

### ۳- شبیه‌سازی عددی

به‌منظور شبیه‌سازی و تحلیل عددی آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی تدریجی، از حلگر صریح نرم‌افزار Abaqus 6-14 استفاده گردید. در این شبیه‌سازی ابزار شکل‌دهی دارای سر کروی، ورق پشتی به صورت صلب گسسته و ورق، تغییر شکل‌پذیر تعریف شد و تمام اجزاء، دقیقاً بر اساس ابعاد و هندسه‌ی آزمایش‌های تجربی به نرم‌افزار معرفی شد. در این شبیه‌سازی برای مش‌بندی ورق از المان‌های پوسته مربعی با چهار گره از نوع S4R با انتگرال‌گیری کاهش‌ی استفاده شد. در شکل ۳، مدل ساخته شده برای شبیه‌سازی فرایند SPIF هندسه‌ی هرم ناقص نشان داده شده است؛ در این شکل به منظور نشان‌دادن هندسه‌ی صفحه‌ی پشتی، بین ورق و سطح فاصله داده شده است و در شبیه‌سازی‌ها این فاصله حذف شده است. با آنالیز حساسیت به اندازه‌ی مش، اندازه‌ی المان‌ها ۰/۵mm انتخاب شد و شش نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت ورق تعریف شد. با توجه به اطلاعات بدست آمده از آزمون‌های کشش تک‌محوری و مدل‌رفتاری معرفی شده در ادامه، رفتار ماده از طریق زیربرنامه نویسی در قالب VUMAT به نرم‌افزار معرفی گردید. همچنین در این پژوهش، از تکنیک حذف المان به منظور مطالعه ارتفاع شکست در آزمون‌ها استفاده شد. در این حالت زمانی که در تمام نقاط انتگرال‌گیری یک المان مقدار آسیب به عدد بحرانی یک برسد، المان توانایی تحمل بار نداشته و از مدل عددی حذف می‌گردد.



شکل ۳ مدل تعریف شده برای شبیه‌سازی فرایند SPIF هندسه هرم با زاویه دیواره متغیر

<sup>1</sup> Inventor

## ۳-۱- مدل رفتار مکانیکی ماده

در شبیه‌سازی‌های عددی برای بیان حد تسلیم مواد، از معیار تسلیم فن میسس<sup>۱</sup> طبق فرمولاسیون رابطه (۱) استفاده شد [۱۰].

$$\bar{\sigma} = [(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 6\sigma_{yz}^2 + 6\sigma_{zx}^2 + 6\sigma_{xy}^2]^{1/2} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\sigma_{ij}$  مولفه‌ی تانسور تنش و  $\bar{\sigma}$  تنش مؤثر است. همچنین با توجه به نتایج آزمون تست کشش تک‌محوری، سخت‌شوندگی ماده به صورت همسانگرد و طبق قانون سخت‌شوندگی سوئیفت در نظر گرفته شد. طبق این قانون، ارتباط بین تنش استحکام ماده  $\sigma_M$  و کرنش پلاستیک  $\varepsilon_p$  به صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود [۹]:

$$\sigma_M = \sigma_y \left(1 + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}\right)^n \quad (2)$$

از طرف دیگر، به منظور پیش‌بینی وقوع آسیب از معیار آسیب ژو-ویرزبیکی استفاده شد. با توجه به اینکه در فرمولاسیون کرنش شکست این معیار، اثر تنش هیدرواستاتیک و نیز اثر تنش‌های انحرافی در نظر گرفته شده است، این معیار برای فرایندهایی نظیر شکل‌دهی تدریجی ورق که حضور تنش‌های برشی در فرایند شکل‌دهی غیر قابل چشم‌پوشی است مناسب می‌باشد. یکی دیگر از مزایای این معیار در نظر گرفتن اثر آسیب ماده بر روی کاهش استحکام آن است که برای این منظور در این معیار آسیب از تابع تسلیم  $\varphi$  کوپل با آسیب ماده به صورت رابطه (۳) استفاده شده است [۹]:

$$\varphi = \bar{\sigma} - (1 - D^\beta)\sigma_M \quad (3)$$

در این رابطه  $\beta$  ثابت ماده و  $D$  پارامتر آسیب ماده است که در واقع نماینده‌ای از وضعیت تنش‌ها و کرنش‌های اعمال شده می‌باشد و براساس تغییرات کرنش پلاستیک و کرنش شکست ماده، مدل شده است. رابطه (۴) نحوه‌ی محاسبه‌ی این پارامتر در محاسبات عددی استفاده شده را نشان می‌دهد [۹]:

$$D = \int_0^{\varepsilon_p} m \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_f}\right)^{m-1} \frac{d\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (4)$$

در این رابطه  $m$  ثابت ماده و  $\varepsilon_f$  کرنش شکست است. به منظور تعیین کرنش شکست، روابط متعددی ارائه شده که در اینجا از روابط بر اساس تنش استفاده شده است. در این حالت، اثر متغیرهای فشار هیدرواستاتیک و پارامتر لود به صورت مستقل از هم در نظر گرفته می‌شود. در این صورت کرنش شکست از رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۱]:

$$\varepsilon_f(p, \theta_L) = \varepsilon_0 \left\{ \left(\frac{\sigma_{f0}}{\sigma_{y0}}\right)^{(1/n)} \left[ \left(1 + k_p p\right) \frac{\sqrt{3}}{2 \cos \theta_L} \right]^{(1/n)} - 1 \right\} \quad (5)$$

در نتیجه، در این مدل آسیب، تجمع آسیب علاوه بر کرنش پلاستیک، به وضعیت فعلی تنش‌های هیدرواستاتیک و تنش‌های انحرافی وابسته است که این دو از طریق کرنش شکست در معادله‌ی آسیب معرفی می‌شوند. در پژوهش انجام شده توسط مولفین در مرجع [۱۲] جزئیات بیشتری از این مدل آسیب و نحوه‌ی محاسبه‌ی ثابت‌های آن ارائه شده است. با استفاده از نتایج آزمون‌های کشش تک‌محوری و نیز روش ارائه شده در مرجع [۱۲]، ثابت‌های مربوط به ورق‌های آلومینیوم و مس بدست آمد و در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ ثابت‌های کالیبره شده معیار آسیب ژو-ویرزبیکی برای ورق‌های آلومینیوم و مس

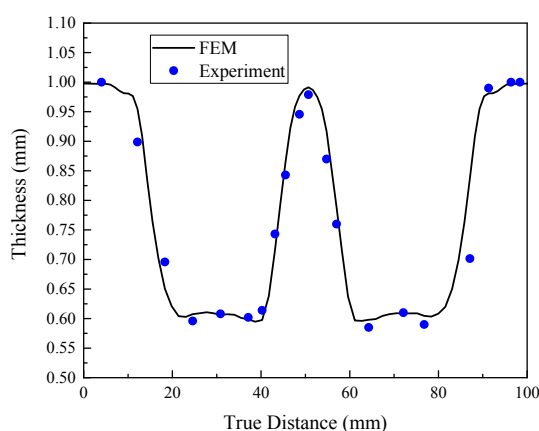
$\sigma_{f0}(MPa)$	$k_p(MPa^{-1})$	$m$	$\beta$	$n$	
159.73	0.0001	2.15	2.1	0.35	آلومینیوم
301.60	0.0003	1.99	2.4	0.32	مس

<sup>۱</sup> Von-Mises

## ۴- نتایج و بحث

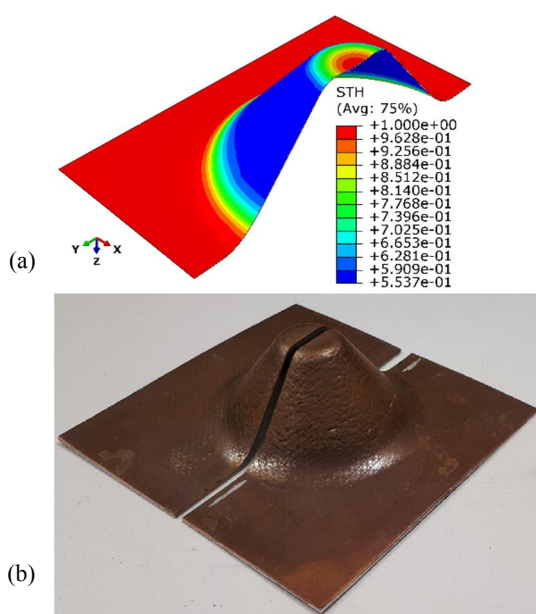
## ۴-۱- بررسی تغییرات ضخامت ورق تغییر شکل یافته

یکی از موارد بااهمیت در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق، کاهش ضخامت ورق و نازک‌شدگی آن است که تا حد امکان باید تحت کنترل باشد. از طرفی دیگر، موضعی از ورق که بیشترین کاهش ضخامت را دارند در معرض گلوئی شدن و در نهایت شکست است. در کنار این مطلب، به منظور صحت‌سنجی مدل المان‌محدود از بررسی تغییرات ضخامت ورق شکل‌دهی استفاده شده است. برای این منظور شکل‌دهی هندسه‌ی مخروط ناقص با زاویه دیواره ثابت ۵۰ درجه که تا انتها بدون مشاهده شکست، شکل‌دهی شد در نظر گرفته شده است. به منظور اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌های تغییر شکل یافته، راستای مناسبی از نمونه‌ها انتخاب شد و با وایرکات نمونه برش خورده بدست آمد و اندازه‌گیری ضخامت به کمک میکروسکوپ داینو لایت انجام گردید. در شکل ۴ تغییرات ضخامت در راستای برش یافته ورق نشان داده شده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات ضخامت به خوبی توسط مدل المان‌محدود پیش‌بینی شده است.



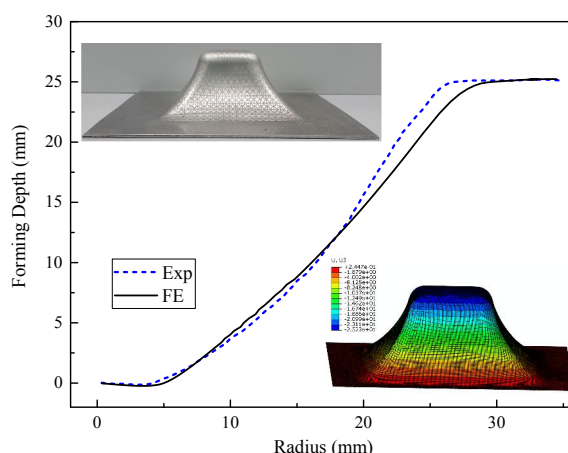
شکل ۴ توزیع ضخامت تجربی و عددی در شکل‌دهی تدریجی هندسه مخروط ناقص با زاویه دیواره ۵۰ درجه

همچنین شکل (۵-a) کانتور توزیع ضخامت مخروط ناقص حاصل از شبیه‌سازی عددی و شکل (۵-b) مخروط ناقص بدست آمده از آزمون تجربی SPIF را که به منظور اندازه‌گیری ضخامت برش داده شده، نشان می‌دهد.



شکل ۵ (a) کانتور توزیع ضخامت، (b) نمونه برش یافته هندسه مخروط ناقص حاصل از آزمایش تجربی

با توجه به اینکه در مخروط ناقص با زاویه ۵۰ درجه شکل‌دهی تدریجی به صورت کامل و بدون مشاهده شکست انجام گرفت، جهت ارزیابی حد شکل‌دهی ورق از هندسه‌هایی با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر که به تدریج افزایش پیدا می‌کند استفاده شد. هندسه‌ی مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر<sup>۱</sup> و هندسه هرم با زاویه دیواره متغیر<sup>۲</sup> با پروفیل مشترک که در شکل ۶ نشان داده شده است برای این منظور انتخاب شد. در شکل ۶ مقایسه‌ای بین پروفیل حاصل از آزمون تجربی هندسه TPVW ورق آلومینیومی و شبیه‌سازی عددی و صحت‌گذاری مدل عددی ارائه شده است. بررسی نتایج در قسمت عمق شکل‌دهی که بیشترین اختلاف در آن‌جا ظاهر شده است نشان می‌دهد که خطای هندسه حاصل از پیش‌بینی ۸/۹٪ است. بخشی از خطای حاصل مربوط به مدل کردن سخت‌شوندگی همسانگرد ماده با قانون سوئیفت است که هم به صورت کاملاً منطبق با نتایج آزمون‌های کشش تک‌محوری نیست و هم‌اینکه، با توجه به بارگذاری سیکلی و پیوسته در فرایند SPIF، بهتر است که از مدل‌های سخت‌شوندگی ترکیبی سینماتیک-همسانگرد برای انطباق بیشتر با نتایج تجربی استفاده شود.



شکل ۶ مقایسه پروفیل هندسه‌ی مخروط حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

پیش‌بینی عمق پارگی بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود با مدل آسیب، زمینه‌ی خوبی را برای تحلیل تغییر شکل و شکست در فرایند شکل‌دهی تدریجی مهیا می‌کند. برای این منظور با استفاده از ورق دولایه آلومینیوم-مس دو هندسه اشاره شده شکل‌دهی شد و تا بروز شکست در ورق ادامه پیدا کرد و با مشاهده ترک و نشت روغن، عملیات قطع شد. به این ترتیب، میانگین ارتفاع شکل‌دهی هندسه‌های TPVW و TCVW به ترتیب برابر ۱۹/۲mm و ۱۸/۶mm به دست آمد. از طرفی نتایج مدل عددی نشان می‌دهد عمق شکل‌دهی که اولین المان از ورق حذف شده است (حد ارتفاع شکل‌دهی) برای این دو هندسه به ترتیب برابر ۱۸/۳۹mm و ۱۶/۴۴mm است.

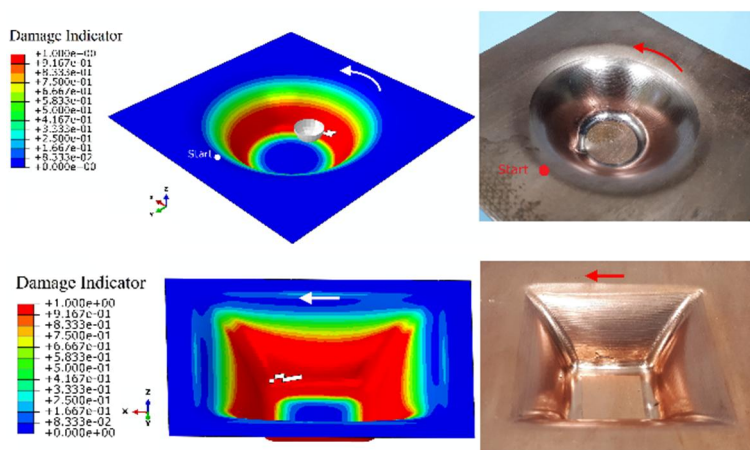
در واقع با محاسبه می‌توان گفت، مدل عددی با اختلاف میانگین ۸٪ ارتفاع شکست را زودتر پیش‌بینی کرده است. در شکل ۷ توزیع آسیب در مدل عددی در انتهای شکل‌دهی هر هندسه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق شکل‌دهی تجمع آسیب در ورق افزایش می‌یابد و البته با توجه به موضع ترک و توزیع آسیب می‌توان مشاهده کرد که در ارتفاعی کمتر از شعاع ابزار از کف قطعه، میزان تجمع آسیب در بیشترین وضعیت خود قرار دارد. مقایسه موضع شروع شکست در دو هندسه با مدل عددی نشان می‌دهد که پیش‌بینی قابل قبولی از محل شروع شکست نیز صورت گرفته است.

نکته‌ی دیگری که باید به آن اشاره کرد اختلاف حد ارتفاع شکل‌دهی در دو هندسه مورد مطالعه است. در واقع به توجه به هندسه‌های مختلف وضعیت کرنش و تنش متفاوتی در این دو هندسه بر ورق اعمال می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، کرنش‌های صفحه‌ای تمامی المان‌های ورق به همراه اندازه و توزیع آسیب در یک فریم مانده به شروع شکست در شکل ۸ و شکل ۹ به ترتیب برای هندسه‌های TCVW و TPVW نشان داده شده است. در این تصاویر کرنش مربوط به اولین المان حذف شده و موقعیت آن در

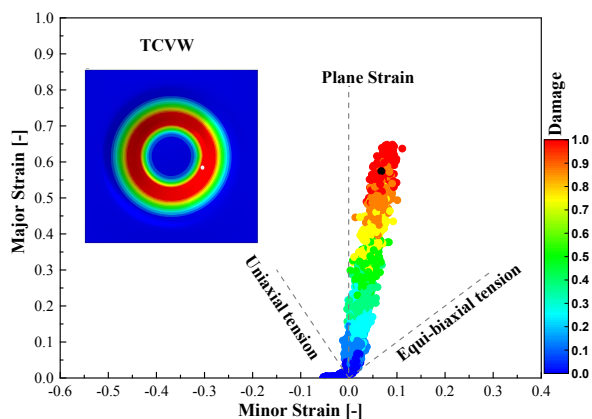
<sup>1</sup> Truncated Cone with Varing Wall angle (TCVW)

<sup>2</sup> Truncated Pyramid with Varing Wall angle (TPVW)

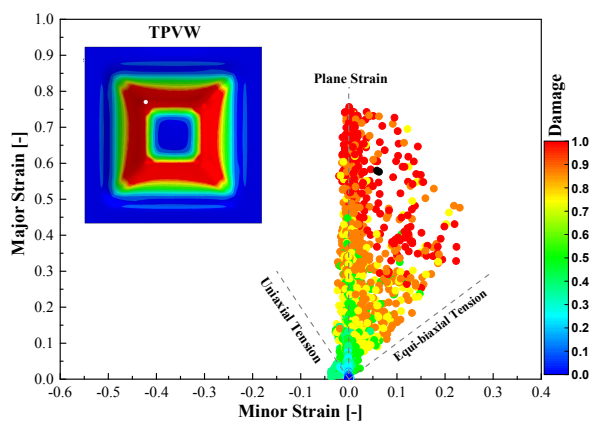
مدل عددی به ترتیب با دایره‌های توپر مشکی و سفید ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در هندسه‌ی TCVW شرایط کرنش‌ها نزدیک به وضعیت کرنش صفحه‌ای است. در این حالت از شکل‌دهی در فرایندهای شکل‌دهی سنتی، کمترین حد شکل‌دهی اتفاق می‌افتد، اما با توجه به اینکه در این فرایند، شکل‌دهی تا رسیدن به کرنش‌های شکست ادامه پیدا می‌کند می‌توان انتظار کرنش‌های بالاتری را داشت که در این نمودارها دیده می‌شود. در هندسه TPVW توزیع کرنش‌ها از شرایط نزدیک به کرنش صفحه‌ای تا نزدیک به کشش دو محوری می‌باشد. با بررسی مدل المان محدود، در گوشه‌های هرم شرایط کرنش به کشش دو محوری نزدیک است.



شکل ۷ شکست در شکل‌دهی SPIF ورق‌های دولایه Al/Cu نمونه‌های تجربی و پیش‌بینی شده با نمایش توزیع آسیب



شکل ۸ توزیع کرنش‌های صفحه‌ای و آسیب در هندسه TCVW

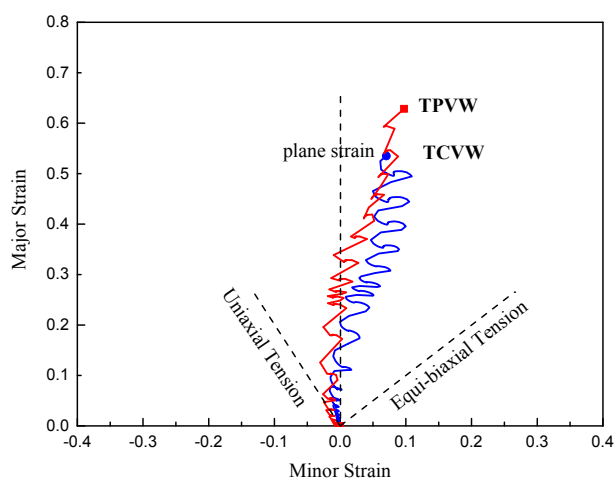


شکل ۹ توزیع کرنش‌های صفحه‌ای و آسیب در هندسه TPVW



نتایج المان محدود نشان می‌دهد، توزیع کرنش‌ها بر روی دیواره‌ی هندسه‌ها، غیرممتقارن می‌باشد و کرنش در راستای ابزار، افزایشی است. با پیشرفت فرایند شکل‌دهی، کرنش‌ها افزایش می‌یابد؛ ولی با نزدیک شدن به کف قطعه (قسمتی که تغییر شکل پیدا نمی‌کند) اندازه کرنش‌ها، به صورت کاهشی تغییر می‌کند. توزیع ضخامت بر روی هندسه قطعه نیز غیرممتقارن است. در صورتی که از این فرایند برای تولید قطعه استفاده شود، باید این موارد غیریکنواختی در دیواره‌های قطعه باید در نظر گرفته شود.

همچنین شایان ذکر است که با توجه به ضخامت ورق و افزایش شعاع خم در لایه‌ی بیرونی، ناپایداری ورق از لایه‌ی بیرونی (نقاط انتگرال‌گیری بیرونی) ورق شروع می‌شود و به سمت لایه‌ی داخلی حرکت می‌کند و در نهایت منجر به حذف المان و شروع ترک می‌شود. در واقع علاوه بر کرنش‌های صفحه‌ای، کرنش ضخامتی نیز در این فرایند نقش قابل توجهی در حد شکل‌دهی ورق ایفا می‌کند و به این دلیل مشاهده می‌شود که المان‌هایی که بیشترین سطح از کرنش‌های صفحه‌ای دارند المان آغازین برای شروع شکست نیستند و مجموع شرایط بارگذاری است که این مسئله را تعیین می‌کند و البته در مدل آسیب در نظر گرفته شده است. به همین دلیل همان‌طور که در دو شکل اخیر مشاهده می‌شود، برخی از المان‌هایی که سطح بالایی از کرنش‌های صفحه‌ای را دارند، اندازه آسیب آن‌ها در سطوح پایین است و وارد منطقه بحرانی نشده‌اند.



شکل ۱۰ مسیر کرنش المان‌های بحرانی در هندسه‌های TPVW و TCVW

مطلب دیگری که باید در تحلیل فرایندهایی نظیر فرایند SPIF در نظر گرفته شود، مسیر بارگذاری غیرخطی در آن است و یکی از دلایلی که استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی ورق (FLD) در فرایندهایی نظیر این فرایند کاربرد ندارد این موضوع است. برای بررسی این موضوع، در مطالعه حاضر با استفاده از مدل المان محدود، مسیر کرنش المان‌های بحرانی در دو هندسه مورد بحث بدست آمد و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، مسیر کرنش غیرخطی در این فرایند حاصل شده است و البته می‌توان آن را شبیه به یک مسیر زیگزاگی تشبیه کرد که در نتیجه اعمال کرنش از طریق دفعات مکرر عبور ابزار از روی المان بدست آمده است و یکی از عوامل بهبود دهنده حدود شکل‌دهی در این فرایند است. از طرفی دیگر، با عبور ابزار از روی المان، کرنش پلاستیکی در آن المان ایجاد می‌شود و باعث انباشت کرنش پلاستیک می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش را می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه کرد:

- با استفاده از فرایند SPIF ورق دولایه آلومینیوم-مس شکل‌دهی شد و حد ارتفاع شکل‌دهی در هندسه‌های هرم و مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی متغیر به ترتیب ارتفاع ۱۹/۲mm و ۱۸/۶mm بدست آمد. حد ارتفاع متفاوت شکل‌دهی این دو هندسه، مربوط به هندسه متفاوت و در نتیجه بروز متفاوت تنش و کرنش است.

- مدل آسیب ژو-ویرزبیک با توجه به در نظر گرفتن پارامتر لود و تنش سه محوری و همچنین اثر آسیب بر روی استحکام ماده، قابلیت خوبی در پیش‌بینی حدود شکل‌دهی ورق در فرایند SPIF دارد.
- پروفیل بدست آمده از فرایند SPIF، توزیع ضخامت و محل شروع شکست در این فرایند با دقت قابل قبول کمتر از ۱۰٪ توسط مدل آسیب ژو-ویرزبیک پیش‌بینی شد. همچنین با خطای ۸٪ پیش‌بینی زود هنگامی از ارتفاع شکست توسط مدل عددی بدست آمد.
- بررسی توزیع کرنش‌های صفحه‌ای ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) نشان می‌دهد که در هندسه TCVW شرایط تغییر شکل نزدیک به کرنش صفحه‌ای در تمام طول فرایند برقرار است در حالی که در شکل‌دهی هندسه TPVW این شرایط بین دو وضعیت کرنش صفحه‌ای و کشش دو محوری است.
- با توجه به مدل المان محدود، مسیر کرنش در فرایند SPIF بر خلاف اکثر فرایندهای سنتی شکل‌دهی، غیرخطی به دست آمد که یکی از دلایل افزایش حدود شکل‌دهی در این فرایند می‌باشد.
- با توجه به نحوه بارگذاری سیکلی در این فرایند و تغییر شکل موضعی و متوالی ورق، به نظر می‌رسد در صورت استفاده از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی سینماتیکی-همسانگرد برای ورق، بتوان پیش‌بینی دقیق‌تری از وضعیت تنش و کرنش و در نهایت حدود شکل‌دهی در این فرایند داشت.

## References

- [1] Silva M, Nielsen P, Bay N, Martins P. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology: 2011; 56: 893-903. doi: 10.1007/s00170-011-3254-1
- [2] Isik K, Silva M, Tekkaya A, Martins P. Formability limits by fracture in sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology: 2014; 214(8): 1557-1565. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.02.026
- [3] Al-Ghamdi K, Hussain G. Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: experimental and FE investigations. International Journal of Machine Tools and Manufacture: 2015; 88: 82-94. doi: 10.1016/j.ijmactools.2014.09.005
- [4] Mirnia M, 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
- [5] Sakhtemanian M, Honarpisheh R, Amini S. Numerical and experimental study on the layer arrangement in the incremental forming process of explosive-welded low-carbon steel/CP-titanium bimetal sheet. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology: 2018; 95(9): 3781-3796. doi: 10.1007/s00170-017-1462-z
- [6] Honarpisheh M, Keimasi M, Alinaghian I. Numerical and experimental study on incremental forming process of Al/Cu bimetals: influence of process parameters on the forming force, dimensional accuracy and thickness variations. Journal of mechanics of materials and structures: 2018; 13(1): 35-51. doi: 10.2140/jomms.2018.13.35
- [7] Qin Q, He L, Li C. Control and optimization of bulge defect in incremental forming of cu-Al bimetal. International Journal of Material Forming: 2021;14: 1243-1258. doi: 10.1007/s12289-020-01605-5
- [8] Jalali A, Hashemi R, Rajabi M, Tayebi P. Finite element simulations and experimental verifications for forming limit curve determination of two-layer aluminum/brass sheets considering the incremental forming process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications: 2022; 236(2): 361-373. doi:10.1177/14644207211045212
- [9] Xue L, Wierzbicki T. Ductile fracture initiation and propagation modeling using damage plasticity theory. Engineering Fracture Mechanics: 2008; 75(11): 3276-3293. doi: 10.1016/j.engfracmech.2007.08.012
- [10] Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences: 1948 May 27;193(1033):281-97. doi: 10.1098/rspa.1948.0045
- [11] Xue L. Stress based fracture envelope for damage plastic solids. Engineering Fracture Mechanics: 2009 Feb 1;76(3):419-38. doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.11.010
- [12] Zahedi A, Mollaei Dariani B, Mirnia M. Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model. International Journal of Mechanical Sciences: 2019; 153: 358-413. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.02.002