



## بررسی عددی و تجربی فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق‌های دو لایه

علی زاهدی<sup>1</sup>، بیژن ملائی‌داریانی<sup>2\*</sup>، محمدرضا مروتی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-4413، dariani@aut.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق، شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه ساخته شده از آلومینیوم 1050 و فولاد کم کربن (St12) در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفته است. برای بررسی شکل‌پذیری ورق در این فرایند، مسیر ابزار در نرم‌افزار آباکوس و ماشین کنترل عددی به گونه‌ای تعریف شد که به تدریج زاویه دیواره ورق افزایش یابد و با رسیدن به زاویه حد شکل‌دهی، ورق دچار شکست شود. با توجه به اعمال موضعی تنش‌ها از طرف ابزار، فرایند متقارن نبوده و نیاز به شبیه‌سازی فرایند به صورت سه بعدی است. برای بررسی پارامترهای فرایند، تحلیل فرایند در سه سطح از پارامترهای شعاع ابزار و اندازه گام عمودی صورت گرفت. برای تعیین ارتفاع شکست ورق دو لایه، از منحنی نیروی حاصل از شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که کرنش‌های پلاستیک بیشتری به ورق بیرونی وارد می‌شوند و از این رو ابتدا ورق لایه بیرونی دچار شکست می‌شود. همچنین نتایج حاصل نشان داد افزایش شعاع ابزار و اندازه گام عمودی، با اینکه باعث افزایش سرعت فرایند می‌شوند ولی تأثیر عکس بر روی زاویه حد شکل‌دهی دارند. برای بررسی تجربی فرایند و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، آزمایش‌ها با در نظر گرفتن پارامتر سرعت پیشروی ابزار در سه سطح، طراحی و انجام شد. اختلاف نتایج عددی و تجربی حدود 2/1% در اندازه زاویه حد شکل‌دهی مشاهده شد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 14 تیر 1393  
پذیرش: 20 مرداد 1393  
ارائه در سایت: 19 مهر 1393  
کلید واژگان:  
شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای  
ورق دو لایه  
شکل‌پذیری  
شبیه‌سازی عددی  
زاویه شکست

## Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals

Ali Zahedi, Bijan Mollaei-Darmani\*, Mohammad Reza Morovvati

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, dariani@aut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 05 July 2014  
Accepted 11 August 2014  
Available Online 11 October 2014

**Keywords:**  
Single Point Incremental Forming  
Two-Layer Sheet Metal  
Formability  
Numerical Simulation  
Fracture Angle

### ABSTRACT

In this research, formability of two layer sheet metals of Al1050 and St12 in single point incremental forming (SPIF) has been investigated using numerical and experimental approaches. In order to study the sheet metal formability in this process, the tool paths are defined in ABAQUS and CNC machine so that an increasing wall angle is created until the sheet metal reaches its maximum allowable angle and fracture occurs. Since in this process the tool exerts local stresses on the sheet metal, 3D simulation of the process is necessary. In order to study the effect of process parameters, the analysis is done in three levels of tool radius and vertical step size. In order to derive fracture depth of sheet metal, the force diagram is considered in simulations. It is shown that the outer sheet is subjected to higher plastic strains and therefore failure occurred initially at the outer layer. Results also showed that increasing the tool radius and vertical step size speed up the process but they have inverse effect on forming limit angle. For experimental study and also to validate simulation results, full factorial experiments with respect to forming speed up to three levels were designed and carried out. The difference between FEM and experimental results is about 2.1% in forming limit angle.

### 1- مقدمه

ماشین‌های کنترل عددی، سرعت رشد و توسعه و استفاده از این روش شکل‌دهی نیز افزایش یافت و اخیراً در اروپا و کانادا مورد توجه محققان قرار گرفته است.

شکل‌دهی تدریجی ورق، فرایند انعطاف‌پذیری است که در آن ورق فلزی به تدریج با حرکت ابزار در فضای آزاد شکل می‌گیرد. منظور از فضای آزاد، عدم حضور قالب مادگی است که خود همین امر باعث انعطاف‌پذیری فرایند برای تولید شکل‌هایی با هندسه پیچیده می‌شود. با توجه به این که ورق به

ایده اولیه شکل‌دهی تدریجی در کشور آمریکا و توسط رونس [1] در سال 1960 و نیز لسزاک [2] در سال 1967 به صورت اختراع ثبت شد. با توجه به محدودیت ماشین‌های کنترل عددی در آن زمان، این روش مورد استقبال چندان واقع نشد تا اینکه در اوایل سال‌های 1990 و مخصوصاً در کشور ژاپن مورد توجه قرار گرفت. ماتسوبارا [3] در سال 1994، از این روش برای شکل‌دهی و تولید قطعاتی با ورق فلزی استفاده کرد. با پیشرفته‌تر شدن

صورت موضعی شکل‌دهی می‌شود و نیروها متمرکز بر منطقه تماس ابزار با ورق هستند، شکل‌پذیری ورق در این فرایند افزایش می‌یابد [4] و خود این پدیده دامنه انعطاف فرایند را زیاد می‌کند. در صورتی که طراحی هندسه قطعه تغییر یابد، کافی است مسیر ابزار داده‌شده به ماشین کنترل عددی تغییر کند و نیازی به صرف زمان و هزینه برای طراحی قالب مادگی نیست. در هر صورت و مخصوصاً برای شکل‌های هندسی پیچیده شکل‌پذیری ماده در فرایند باید مشخص باشد.

شیم و پارک [5] در سال 2001 اولین مطالعات را بر روی تعیین منحنی‌های حد شکل‌پذیری در فرایند شکل‌دهی تدریجی انجام و با تعیین منحنی حد شکل‌پذیری برای آلومینیوم نشان دادند که میزان شکل‌پذیری در فرایند شکل‌دهی تدریجی بالاتر از سایر فرایندهای سنتی است. از این رو منحنی حد شکل‌پذیری مورد استفاده در فرایندهای سنتی با منحنی به دست آمده از این فرایند متفاوت بوده و قابل تعمیم نیست. فلیسی و همکارانش [6] با طراحی آزمایش‌های تجربی برای تعیین منحنی حد شکل‌دهی، نشان دادند که افزایش در شکل‌پذیری به دلیل تغییر شکل پلاستیک موضعی در منطقه اطراف ابزار می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر، فراتینی و همکارانش [7] در سال 2004 با بررسی اثر برخی خواص مهم مکانیکی مواد بر روی حد شکل‌پذیری آن‌ها در هر دو فرایند شکل‌دهی سنتی و تدریجی، نشان دادند که توان کرنش سختی مواد، بیش‌ترین تأثیر را بر روی شکل‌پذیری دارد.

## 2- فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای

در فرایند شکل‌دهی تدریجی نشان داده شده است که توزیع ضخامت ورق از قانون کسینوس پیروی می‌کند [14]. فرض می‌شود  $t_f$  ضخامت اولیه ورق، ضخامت نهایی و  $\theta$  شیب نهایی قطعه شکل داده شده باشد. طبق شکل 1، المان  $ab$  بر روی ورق تغییر شکل نیافته در نظر گرفته می‌شود که در نهایت بعد از تغییر شکل، به المان  $ab'$  تبدیل شده است. ضخامت این المان، از طریق معادله (1) قابل پیش‌بینی است که این رابطه به قانون کسینوس معروف است.

$$t_f = t_i \cos \theta \quad (1)$$

با توجه به معادله (1) اگر شیب قطعه در حین تغییر شکل افزایش یابد، ضخامت آن کاهش خواهد یافت. از این رو، قطعه در حین تغییر شکل در یک نقطه دچار شکست خواهد شد و در واقع باید شکل‌دهی ورق تا قبل از این نقطه باشد. این نقطه که در یک شیب مشخصی قرار دارد، از لحاظ تئوری، حد کاهش ضخامت ورق فلزی است.

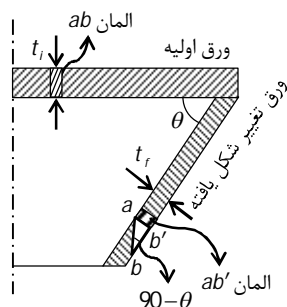
در برخی از قطعات، شکل قطعه به صورتی است که شیب دیواره آن به صورت افزایشی است؛ شکل 2 مدل ساده‌ای از این نوع قطعات را نشان می‌دهد. حسین و همکارانش [12] در سال 2007 رابطه‌ای هندسی برای تعیین زاویه شکست در این گونه اشکال ارائه دادند. در واقع آن‌ها برای تعیین حد شکل‌پذیری ورق، از این نوع مدل استفاده کردند.

همان‌طور که در شکل 2 دیده می‌شود، مولد چنین قطعتهایی می‌تواند کماتی از یک دایره باشد. در این شکل، کمان  $P_1P_2$  به عنوان مولد انتخاب شده است و  $\Delta\theta$  اختلاف زاویه دیواره در ابتدا و انتها است.  $\Delta\theta$  برای جنس نرم که شکل‌پذیری بالاتری دارد بیشتر از بقیه انواع مواد در نظر گرفته می‌شود و برای اینکه خرابی قطعه در طی این فرایند دیده شود، بهتر است که

جسویت و بانگ [8] مطالعه‌ای بر روی حد شکل‌پذیری آلیاژهای مختلف آلومینیوم و همچنین ورق کربن استیل 1011 انجام دادند. آن‌ها مطالعات خود را بر روی پنج نوع شکل مختلف مخروط، کره، هیپربولیک، هرم و شکل خاص گل با پنج قسمت شبیه هم انجام دادند. محققان ضمن تأیید نتایج تحقیقات قبلی مبنی بر افزایش حد شکل‌پذیری در این فرایند، کرنش‌های حد شکل‌پذیری را برای ورق در حالت شکل خاص گل نیز به دست آوردند و گزارش شده است که کرنش‌های فشاری در حین شکل‌دهی این شکل خاص ایجاد می‌شود. مارتینز و همکارانش [9] در مطالعه‌ای ضمن ارائه یک سری روابط تحلیلی برای تنش و کرنش در این فرایند، به تشریح شرایط قبل از شروع پارگی در ورق پرداختند. قاسمی و سلطانی [10] به مطالعه برخی پارامترهای موثر بر روی تغییر ضخامت قطعه تغییر شکل یافته و نیروها در فرایند شکل‌دهی تدریجی پرداختند و نشان دادند که با افزایش سرعت پیشروی نیروی عمودی کاهش می‌یابد و با افزایش سرعت چرخشی ابزار نیروی افقی کاهش می‌یابد و باعث توزیع یکنواخت تر ضخامت می‌شود. میرنیا و ملائی [11] با روش حد بالا به تحلیل نیروهای مماسی در این فرایند پرداختند و نشان دادند که با افزایش گام عمودی و ضخامت ورق، نیروها افزایش می‌یابند. آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش شعاع ابزار، متوسط کرنش معادل کاهش می‌یابد.

برخی از محققان از روشی دیگر برای بیان میزان شکل‌پذیری ورق در طی فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق استفاده کرده‌اند که در آن نیازی به تعیین کرنش‌های حدی نیست. حسین و همکارانش [12] در سال 2007 این روش را ارائه دادند و همچنین به مطالعه و مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر روی میزان شکل‌پذیری ورق در این فرایند پرداختند [13].

تحقیقات انجام‌شده بر روی شکل‌پذیری ورق در این فرایند تاکنون بر روی ورق تک لایه بوده و این در حالی است که با توجه به خواص ورق‌های دولایه و قابلیت‌های این فرایند، می‌توان از این روش برای تولید قطعات ورقی چند لایه استفاده کرد. به طور کلی ورق‌های چند لایه شامل دو یا چند لایه



شکل 1 شماتیک قانون کسینوس

کربن (St12) و به ضخامت هر لایه 0/5 میلی‌متر استفاده شد. ورق‌ها به صورت لوح‌های مربعی و در ابعاد  $160 \times 160$  میلی‌متر بریده شدند. برای اتصال ورق‌ها به یکدیگر ابتدا سطوح ورق‌ها بر اساس استاندارد<sup>1</sup> آماده‌سازی شدند و سپس با استفاده از لایه نازکی از چسب پلی‌یورتان به یکدیگر متصل شدند.

در این مطالعه به منظور شکل‌دهی ورق از مسیر ابزار دایره‌ای با گام عمودی ثابت استفاده شد. در این نوع استراتژی مسیر، ابزار حلقه‌های دایره‌ای را در صفحه X-Y می‌پیماید و فاصله بین این حلقه‌ها را که در واقع همان اندازه گام می‌باشد، در راستای محور Z طی می‌کند. قطر دایره‌ای که ابزار آن را دنبال می‌کند به تدریج کم می‌شود؛ به عبارتی دیگر ابزار بعد از اتمام یک حلقه، ضمن حرکت در راستای محور z، به مرکز دایره‌ها نیز نزدیک می‌شود. این استراتژی مسیر در شکل 4 نشان داده شده است.

در این روش شکل‌دهی بر خلاف کشش عمیق ورق‌های فلزی، تغذیه ورق به ناحیه شکل‌دهی صورت نمی‌گیرد و هم چنین ماتریس وجود ندارد. در واقع در این روش از تجهیزاتی برای ثابت نگه داشتن ورق تحت حرکت ابزار استفاده می‌شود. در این تحقیق نیز قاب نگه‌دارنده ورق با فضای کاری دایره‌ای به قطر 120 میلی‌متر طراحی و ساخته شد.

به منظور شکل‌دهی ورق از ابزارهای سرکروی به شعاع‌های 6، 8 و 10 میلی‌متر استفاده شد. جنس ابزارها، فولاد 4140 است که دارای سختی بالای 20 راکول سی است. جنس سخت ابزار، مانع از سایش آن در برابر ورق می‌شود و همچنین با توجه به طول مورد استفاده در هنگام بستن ابزار به کولت، ابزار دچار کم‌اندامش، تغییر شکل و یا شکست نخواهد شد. ابزارهای با شعاع 6 و 8 میلی‌متر به منظور افزایش استحکام، به صورت دو پله ساخته شدند که قطر بزرگ آن‌ها، 20 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

برای تعیین خواص مکانیکی هر ورق، از تست کشش تک محوری استفاده شد. برای این منظور طبق استاندارد<sup>2</sup> سه نمونه از هر جنس، در راستاهای 0، 45 و 90 درجه با جهت نورد ساخته شد. برای تست کشش نمونه‌های ساخته‌شده، از دستگاه تست کشش یونیورسال استفاده شد. خواص مکانیکی دو ورق آلومینیومی و فولادی کم کربن در جدول 1 ارائه شده است. آزمایش‌های تجربی با استفاده از تجهیزاتی که در شکل 5 نشان داده شده است، انجام می‌شوند. هندسه مورد نظر در این آزمایش‌ها مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر است که شماتیک آن در شکل 3 ارائه شد. ابعاد هندسی این مخروط در جدول 2 ارائه شده است؛ همچنین پارامترهای مورد بررسی در این فرایند همراه با سطوح آن‌ها در جدول 3 آمده است. سرعت حرکت

$\Delta\theta$  عدد بزرگی در نظر گرفته شود تا دوباره فرایند تکرار نشود. اگر شعاع این کمان از دایره R باشد، در این صورت با در اختیار داشتن مختصات مرکز دایره می‌توان مختصات نقاط روی کمان دایره را به دست آورد و در واقع با استفاده از همین مختصات است که مسیر ابزار تعیین می‌شود.

در شکل 3 شماتیکی دو بعدی از هندسه مورد بحث آمده است. با توجه به این شکل فرض می‌شود نقطه  $p(x,y)$ ، نقطه دلخواهی بر روی کمان دایره باشد و  $\theta_p$  زاویه شیب در این نقطه باشد. اگر  $t_p$  ضخامت اولیه ورق فرض شود، در این صورت  $t_p$  ضخامت ورق در این نقطه دلخواه از قانون کسینوس به دست می‌آید و با توجه به تشابه دو مثلث نشان داده شده در شکل 3 می‌توان این ضخامت را به صورت رابطه (2) نوشت:

$$t_p = t_i \cos \theta_p = t_i \frac{y_p}{R} \quad (2)$$

از این رو زاویه شیب در نقطه دلخواه  $p(x,y)$  از رابطه (3) به دست می‌آید:

$$\theta_p = \cos^{-1} \frac{y_p}{R} \quad (3)$$

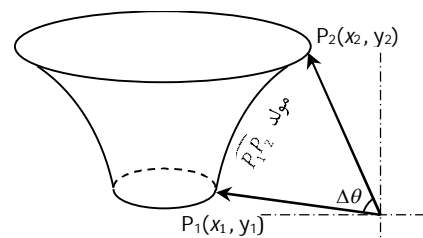
اگر فرض شود که قطعه در نقطه  $D(x_d, y_d)$  دچار شکست می‌شود، در این صورت می‌توان زاویه شکست را در این نقطه از معادله (4) به دست آورد:

$$\theta_d = \cos^{-1} \frac{y_d}{R} = \cos^{-1} \frac{y_d - h_d}{R} \quad (4)$$

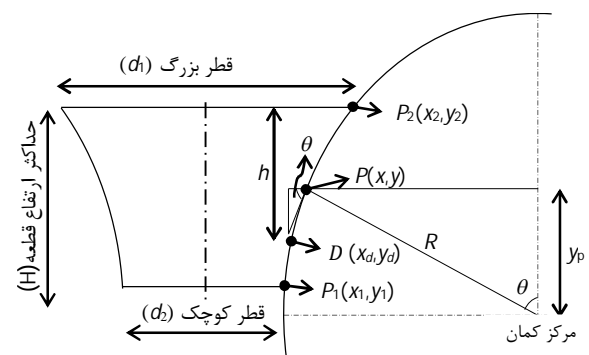
در رابطه (4)،  $y_2$  عرض نقطه  $P_2$  است و  $h_d$  ارتفاعی است که قطعه در آن دچار خرابی شده است.  $\theta_d$  بیش‌ترین زاویه شیب قطعه می‌باشد که در آن قطعه دچار خرابی شده است. مشخص است که هر چقدر شکل‌پذیری ماده بیشتر باشد، اندازه این زاویه نیز افزایش خواهد یافت.

### 3- آزمایش‌های تجربی

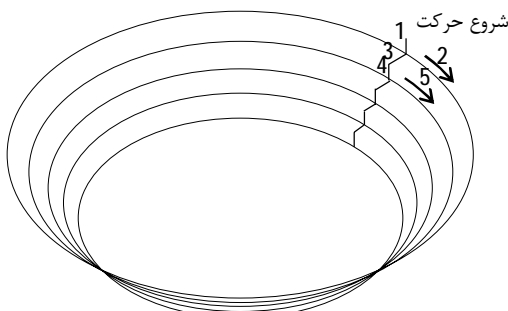
برای ساخت ورق‌های دولایه از دو ورق فلزی آلومینیومی 1050 و فولاد کم



شکل 2 تولید قطعه هیبربولیک با مولد  $\overline{P_1P_2}$  [12]



شکل 3 شماتیک دو بعدی قطعه مخروطی با زاویه متغیر [12]



شکل 4 مسیر ابزار دایره‌ای در شکل‌دهی تدریجی ورق

1- ASTM D2651  
2- ASTM E08-04

دو ورق نسبت به هم صلب در نظر گرفته می‌شوند و حرکتی نسبت به هم ندارند. در این پروژه، از الگوریتم تماس عمومی برای شبیه‌سازی رفتار تماس بین ورق و ابزار استفاده شد. در این الگوریتم انواع تماس‌ها بین سطوح وجود دارد که در اینجا با توجه به نوع تماس بین ابزار و ورق، از روش پنالتی استفاده شد. برای تعریف شرایط اصطکاک بین ورق و ابزار، در اینجا از اصطکاک کولمبی استفاده شد. ضریب اصطکاک بین ورق و ابزار با استفاده از دستگاه دینامومتر 0/1 به دست آمد.

با توجه به اعمال نیروهای موضعی در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق، نمی‌توان از هیچ تقارنی در شبیه‌سازی استفاده کرد؛ همچنین چون در این فرایند کرنش‌های ضخامتی در افزایش حد شکل‌پذیری ورق ایفای نقش می‌کنند، شبیه‌سازی به صورت سه بعدی و در همه ابعاد ورق انجام شد.

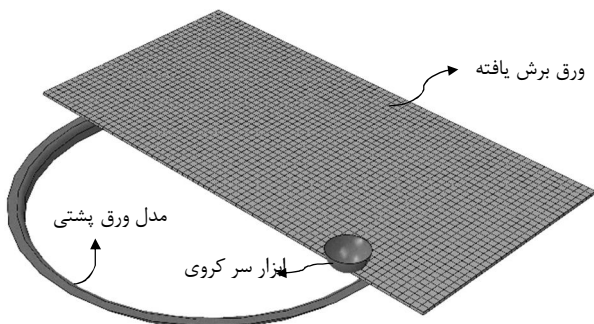
مسیر حرکت ابزار که به صورت دایره‌ای است با استفاده از زیر برنامه به نرم‌افزار معرفی شد. نوع المان انتخاب شده در نرم‌افزار آباکوس، المان سه بعدی مرتبه اول با انتگرال کاهش یافته و با هشت گره<sup>1</sup> است. در اجرای برنامه از 28654 تعداد المان برای تحلیل تغییر شکل ورق استفاده شد. در شکل 6 برشی از مدل تعریف شده برای فرایند در این نرم‌افزار ارائه شده است.

#### 5- نتایج و بحث

شکل‌پذیری ورق دو لایه ساخته شده را می‌توان در دو حالت مورد بررسی قرار داد؛ حالت اول زمانی است که ورق آلومینیومی در تماس با ابزار شکل‌دهی باشد و ورق فولادی کم کربن در تماس با صفحه پشتی و در حالت دوم ورق فولادی کم کربن لایه بالایی بوده و ورق آلومینیومی لایه پایینی است. در ادامه برای بیان حالت اول به اختصار از AS و در حالت دوم از SA استفاده خواهد شد. این دو نوع چینش ورق در شکل 7 نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف، آزمایش‌ها در حالت AS انجام شد و همچنین برای بررسی تأثیر تغییر چینش لایه‌ها، تعدادی آزمایش در حالت SA انجام و نتایج با هم مقایسه شد.

#### 5-1- تحلیل فرایند شکست

در طی آزمایش‌ها در هر دو حالت SA و AS مشاهده شد که ابتدا لایه بیرونی که در تماس با ابزار شکل‌دهی نیست، دچار شکست می‌شود. در حالتی که ورق فولادی کم کربن در لایه بیرونی قرار دارد، قبل از وقوع شکست، گلوئی شدن رخ می‌دهد و سپس ورق دچار شکست می‌شود؛ اما وقتی لایه بیرونی آلومینیوم است، فاصله بین این دو پدیده کوتاه می‌باشد. علت این اختلاف ناشی از اختلاف در رفتار این دو ماده در منطقه تغییر شکل پلاستیک است. با استفاده از نتایج آزمایش‌های تست کشش، توان کرنش سختی برای



شکل 6 برشی از مدل تعریف شده در نرم‌افزار آباکوس

دورانی اسپیندل در تمامی آزمایش‌ها مقدار ثابت 250 دور بر دقیقه است.

#### 4- شبیه‌سازی عددی

برای مدل‌سازی فرایند از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس و به صورت حل صریح استفاده شده است. برای مدل کردن ابزار، با توجه به عدم دخالت اندازه و شعاع ساق ابزار، فقط قسمت کروی آن شبیه‌سازی شد و به همین صورت فقط بخشی از صفحه پشتی که دارای انحنا می‌باشد شبیه‌سازی گردید. هر دوی ابزار و قالب به صورت صلب تحلیلی تعریف شدند و ورق دو لایه به صورت مربع 160×160 میلی‌متر (مطابق تست‌های تجربی) و به صورت تغییر شکل‌پذیر تعیین شد و با توجه به ضخامت هر لایه که 0/5 میلی‌متر است، به دو قسمت مجزا تقسیم شد. در این نوع ایجاد ورق دو لایه،

جدول 1 خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیوم 1050 و فولاد کم کربن (St12)

خواص مکانیکی	آلومینیوم 1050	فولاد کم کربن
ضخامت (mm)	0/5	0/5
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	2/32	6/93
مدول الاستیسیته (GPa)	69	210
ضریب پواسون	0/33	0/28
توان کار سختی	0/14	0/165
ضریب استحکام (MPa)	162/406	478/473

جدول 2 ابعاد هندسی مخروط ناقص مورد بررسی

متغیرهای هندسی	$\theta_1$ (درجه)	$\theta_2$ (درجه)	H (mm)	R (mm)	$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)
مقادیر	45	75	55	126	106	44

جدول 3 پارامترهای مورد بررسی در فرایند و سطوح آن‌ها

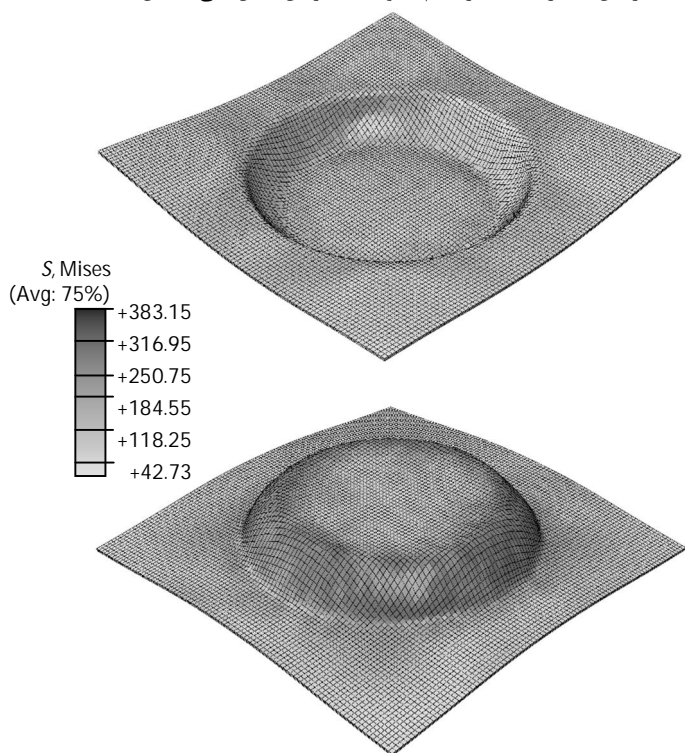
پارامترها	سطوح پارامترها		
سرعت شکل‌دهی (mm/min)	2400	1800	1000
شعاع ابزار (mm)	10	8	6
اندازه گام عمودی (mm)	0/75	0/5	0/25



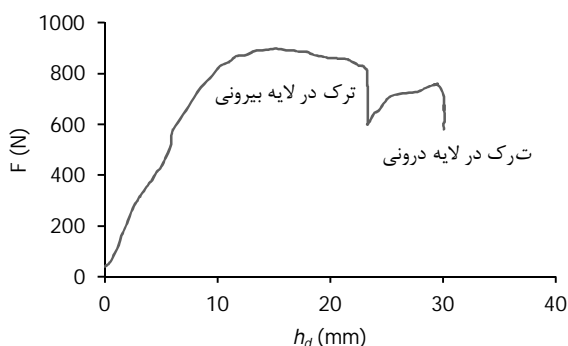
شکل 5 تجهیزات انجام آزمایش‌های تجربی

در شکل 10 ورق تغییر شکل یافته حاصل از شبیه‌سازی در انتهای فرایند نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌ها با توجه به منحنی نیرو بر حسب جابجایی عمودی، ارتفاع شکست محاسبه شده است. در واقع چنانچه در ورق، شکست یا گلوئی شدن رخ دهد، در این صورت نیروی اعمالی از طرف ابزار ( $F$ ) نیز افت خواهد کرد. این نیرو تابعی از تنش‌های اعمال شده به ورق و بیش‌ترین حد نازک شدگی ورق است. در لحظه‌ای که افت این نیرو رخ می‌دهد ارتفاع شکست در لایه بیرونی تعیین می‌شود. در شکل 11 منحنی نیرو برای ورق دو لایه در حالت AS و در شکل 12 این منحنی در حالت SA ارائه شده است. با استفاده از هر کدام از این منحنی‌ها ارتفاعی که هر کدام از لایه‌ها دچار شکست شدند، به دست آمد و با استفاده از معادله (4) حداکثر زاویه مجاز شکل‌دهی در طی سطوح مختلف پارامترهای مورد بررسی، تعیین شد.

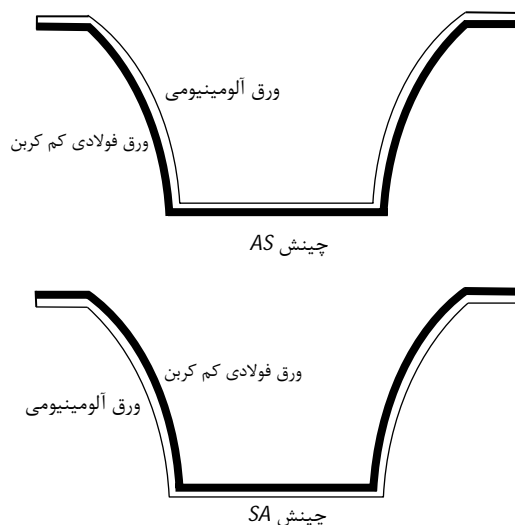
### 5-2- بررسی اثر اندازه گام عمودی بر روی میزان شکل‌پذیری ورق با افزایش مقدار ثابت اندازه گام عمودی ( $z$ ) زمان شکل‌دهی کاهش



شکل 10 اختلاف سطح تنش‌ها در لایه بیرونی و درون

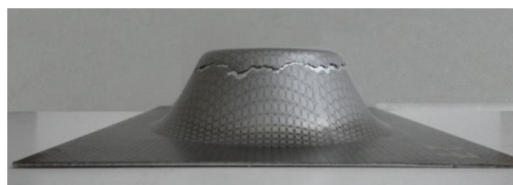


شکل 11 منحنی تغییرات نیرو برای ورق دو لایه در حالت AS حاصل از شبیه‌سازی عددی

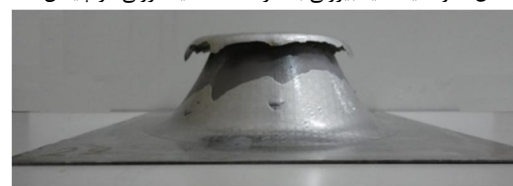


شکل 7 چینش ورق دو لایه در دو حالت SA و AS

آلومینیوم 0/14 و برای ورق فولادی کم کربن مقدار 0/165 به دست آمد. از این رو این شکل‌پذیری ورق آلومینیومی کمتر از ورق فولادی کم کربن است و شکست آن فاصله کوتاهی با گلوئی شدن خواهد داشت. در شکل 8 وضعیت شکست لایه بیرونی بعد از شکست لایه درونی در چینش AS و در شکل 9 این وضعیت در چینش نوع SA نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود و بر اساس مطالب گفته‌شده اختلاف زمان شکست لایه درونی و نیز رفتار متفاوت لایه بیرونی در این دو نوع چینش باعث شده است تا شکست لایه بیرونی در چینش SA تقریباً در تمام نقاط ارتفاع شکست اتفاق افتد. در واقع در حین شکل‌دهی به دلیل کشش موضعی و خمش موضعی منطقه اطراف شعاع ابزار، با نزدیک شدن به سطح خارجی ورق، شدت کرنش‌های پلاستیک زیاد می‌شود، از این رو شکست از بیرونی‌ترین قسمت‌های ورق شروع خواهد شد. البته هر چقدر خواص و رفتار این دو ورق در منطقه پلاستیک نزدیک هم باشد و همچنین اتصال این دو ورق به خوبی صورت گرفته باشد به طوری که مرز بین این دو ورق، خواص مرکبی از دو ورق را ارائه دهد، این خرابی با سرعت یکنواختی به لایه درونی انتقال خواهد یافت و در نهایت به شکست لایه درونی منجر خواهد شد. با توجه به اینکه در این مطالعه، اتصال ورق‌های فلزی با استفاده از چسب پلی یورتان صورت گرفت، این یکنواختی به آن صورت مطلوب وجود نداشت و همان طور که در شکل‌های 8 و 9 مشاهده می‌شود، لایه‌های ورق با اختلاف ارتفاع ملموسی دچار شکست شدند.



شکل 8 وضعیت لایه بیرونی بعد از شکست لایه درونی در چینش AS



شکل 9 وضعیت لایه بیرونی بعد از شکست لایه درونی در چینش SA

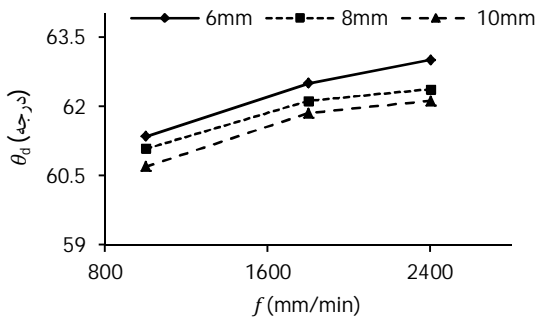
با توجه به این منحنی‌ها، افزایش اندازه گام عمودی باعث کاهش میزان شکل‌پذیری در فرایند شکل‌دهی تدریجی می‌شود. در واقع علت این امر به دلیل تمرکز تنش زیاد به هنگام افزایش اندازه گام عمودی است که باعث تجمع سریع خرابی‌ها بر اثر تنش‌های وارده می‌شود و وقوع شکست را تسریع می‌کند. همچنین با توجه به این منحنی‌ها، میزان کاهش شکل‌پذیری در گام 0/75 میلی‌متر نسبت به گام 0/5 میلی‌متر بیشتر از این کاهش در گام 0/25 میلی‌متر نسبت به گام 0/25 میلی‌متر است، این مطلب نشان دهنده زیاد بودن نرخ کاهش شکل‌پذیری نسبت به نرخ افزایش اندازه گام است.

### 3-5- بررسی اثر سرعت پیشروی بر روی میزان شکل‌پذیری ورق

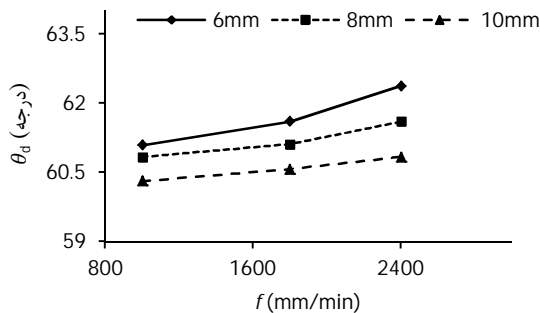
تأثیر افزایش سرعت پیشروی ابزار بر روی شکست لایه بیرونی در حالت AS، در نمودارهای شکل‌های 16، 17 و 18 ارائه شده است. همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود، روند تغییرات زاویه شکست به صورت خطی نیست و در حالت کلی به نظر می‌رسد که با افزایش سرعت شکل‌دهی شکل‌پذیری بهبود می‌یابد. ممکن است افزایش سرعت در یک بازه‌ای باعث افزایش حرارت در منطقه تماس ابزار با ورق می‌شود و شرایط شکل‌دهی را به سمت شکل‌دهی گرم پیش می‌برد و از این رو باعث افزایش زاویه حد شکل‌دهی می‌شود ولی چنانچه این سرعت از حد بهینه خود عبور کند شرایط اصطکاکی در منطقه تماس باعث افت شکل‌پذیری ورق شود.

### 4-5- بررسی اثر شعاع ابزار بر روی میزان شکل‌پذیری ورق

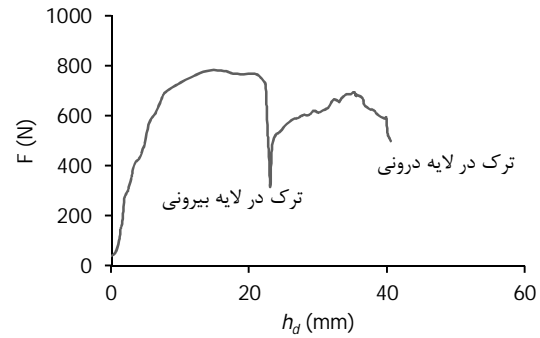
اثر تغییرات شعاع ابزار بر روی حداکثر زاویه مجاز قابل شکل‌دهی را می‌توان از روی منحنی‌های دو قسمت قبلی بررسی کرد. با توجه به منحنی‌هایی که



شکل 16 منحنی زاویه حد شکل‌پذیری لایه بیرونی بر حسب سرعت پیشروی در حالت AS و z=0/25 mm

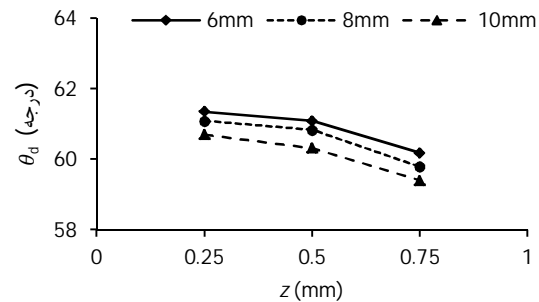


شکل 17 منحنی زاویه حد شکل‌پذیری لایه بیرونی بر حسب سرعت پیشروی در حالت AS و z=0/5 mm

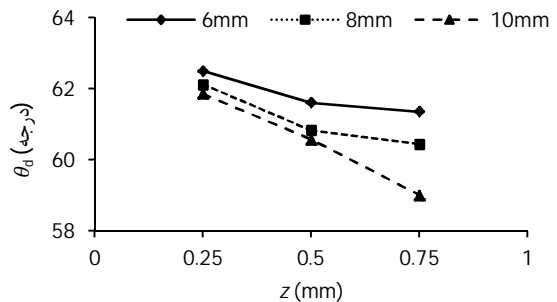


شکل 12 منحنی تغییرات نیرو برای ورق دو لایه در حالت SA حاصل از شبیه‌سازی عددی

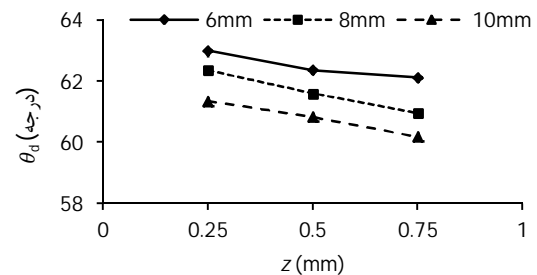
می‌یابد ولی از طرفی دیگر، محدودیت‌های طراحی در هندسه قطعه مطرح می‌شود که یکی از این محدودیت‌ها در ارتباط با شکل‌پذیری ورق است. اثر افزایش اندازه گام عمودی بر روی شکل‌پذیری ورق‌ها در طی آزمایش‌های تجربی و در سه سرعت پیشروی (r) مختلف برای سه شعاع ابزار (r) متفاوت در نمودارهای شکل 13، شکل 14 و شکل 15 نشان داده شده است.



شکل 13 منحنی‌های اثر اندازه گام بر روی زاویه حد شکل‌دهی در حالت AS و f=1000 mm/min



شکل 14 منحنی‌های اثر اندازه گام بر روی زاویه حد شکل‌دهی در حالت AS و f=1800 mm/min

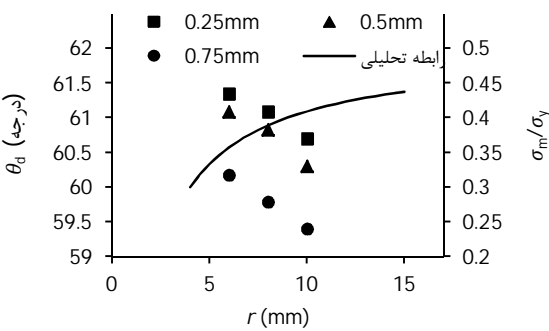


شکل 15 منحنی‌های اثر اندازه گام بر روی زاویه حد شکل‌دهی در حالت AS و f=2400 mm/min

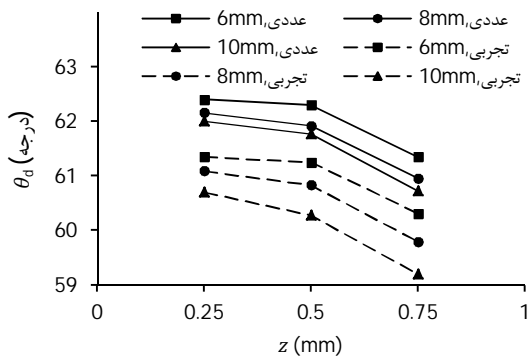
می‌گیرد که باعث می‌شود در مقایسه با آزمایش‌های تجربی حد زاویه شکل‌پذیری بالایی داشته باشد؛ اما با افزایش شعاع ابزار با توجه به کار تحقیقی [16] نیروهای فرایند افزایش می‌یابد و باعث می‌شود تا این فرض عدم جدایش لایه‌ها از واقعیت دورتر باشد و در نتیجه همان طور که در جدول (4) مشاهده می‌شود درصد خطا در شعاع‌های بالاتر زیاد باشد. همین طور اختلاف در حالتی که شعاع ابزار از 8 میلی‌متر به 10 میلی‌متر می‌رسد، افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد در شعاع‌های بالای ابزار در محدوده مورد بررسی، اختلاف نتایج عددی و تجربی بیشتر می‌شود.

### 6- نتیجه‌گیری

در این مطالعه شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه از جنس ورق آلومینیومی 1050 و ورق فولادی کم کربن (St12) در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای مورد بررسی تجربی و عددی قرار گرفت. در این بررسی فرایند شکست در این



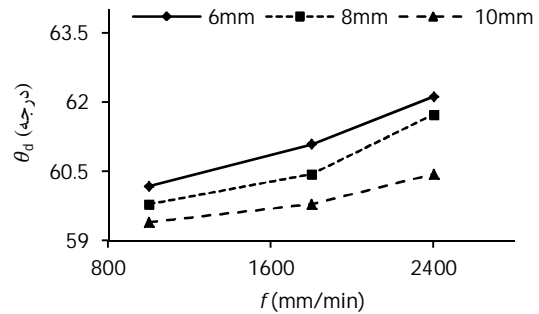
شکل 19 منحنی تغییرات نسبت  $\sigma_m/\sigma_y$  و زاویه حد شکل‌پذیری بر اساس شعاع ابزار



شکل 20 مقایسه نتایج تجربی و عددی

جدول 4 مقایسه کمی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی

شماره آزمایش	زاویه شکست عددی (درجه)	زاویه شکست تجربی (درجه)	درصد خطا
1	63/29	61/35	1/71
4	62/69	61/09	1/75
7	62/3	60/18	2/15
10	62/86	61/24	1/73
13	62/09	60/83	1/79
16	61/65	59/79	2/47
19	62/3	60/7	1/72
22	61/57	60/31	1/95
25	60/53	59/4	2/58



شکل 18 منحنی زاویه حد شکل‌پذیری لایه بیرونی بر حسب سرعت پیشروی در حالت z=0/75 mm و AS

در این دو قسمت نشان داده شد، می‌توان گفت که هر چقدر شعاع ابزار کم باشد، شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد. در واقع در شعاع‌های بالای ابزار، شرایط تغییر شکل ورق در ناحیه تماس با ابزار به شرایط فرایند اتساع نزدیک می‌شود و باعث افزایش کرنش‌های کششی در این ناحیه می‌شود و در نهایت منجر به شکست می‌شود. با کاهش شعاع ابزار، نیروهای تغییر شکل در منطقه کوچکی به ورق اعمال می‌شود و باعث می‌شود تا شکل‌پذیری افزایش یابد. محققان روابط تحلیلی را برای تعیین نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش تسلیم  $(\sigma_m/\sigma_y)$  در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای به دست آورده‌اند [9]. در روابط ارائه شده، در صورتی که نسبت شعاع ابزار به ضخامت ورق افزایش یابد، نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش تسلیم  $(\sigma_m/\sigma_y)$  افزایش یافته و باعث خواهد شد تا تنش‌ها زودتر به تنش شکست برسد و در نتیجه زاویه حد شکل‌دهی کاهش خواهد یافت. آنچه که در نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش حاصل شد، با نتایج این روابط تحلیلی مطابقت دارد. در شکل 19 روند افزایش نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش تسلیم با افزایش شعاع ابزار برای ورق با ضخامت 1 میلی‌متر بر اساس معادلات مرجع [9] رسم شده است. در این نمودار نقاط مربوط به شکست ورق مورد مطالعه نیز در شعاع‌های ابزار مختلف مورد آزمایش نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، با افزایش شعاع ابزار، حداکثر زاویه مجاز شکل‌دهی روند نزولی را طی می‌کند و نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش تسلیم افزایش می‌یابد.

### 5-5- مقایسه نتایج عددی و تجربی

نتایج به دست آمده از دو روش عددی و تجربی برای زاویه حد شکل‌دهی در شکل 20 ارائه شده است. میانگین اختلاف نتایج روش تجربی از روش عددی 2/1% در پیش‌بینی زاویه حد شکل‌دهی می‌باشد که با توجه به کار تحقیقاتی مرجع [15] این اختلاف قابل قبول است.

فرض اصطکاک کولمبی در تماس ابزار با ورق با اینکه بهترین حالت قابل ایجاد در شبیه‌سازی‌ها است اما این فرض به دلایل مختلفی از جمله متفاوت بودن زبری سطح ورق در نقاط مختلف آن، در همه شرایط تغییر شکل نمی‌تواند فرض کاملاً درستی باشد. همچنین در شبیه‌سازی‌های عددی دو لایه کاملاً به یکدیگر اتصال دارند و جدایش آن‌ها تنها در لحظه شکست رخ می‌دهد از طرفی با اینکه در ساخت ورق‌های دو لایه حداکثر تلاش بر این بود که این دو لایه بهترین اتصال را به یکدیگر داشته باشند اما این اتصال نمی‌تواند مانند اتصال مکانیکی روکش کاری باشد؛ از این رو لایه بیرونی در شبیه‌سازی‌های عددی تحت تغییر شکل اندکی کم‌تر و پیوسته‌ای قرار

- [3] S. Matsubara, Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Head Tool-A Study of a Numerical Control Forming System II, *Journal-Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 35, pp. 1311-1311, 1994.
- [4] W. Emmens, A. Van den Boogaard, An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3688-3695, 2009.
- [5] M. S. Shim, J. J. Park, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *Journal of Material Processing and Technology*, Vol. 113, pp. 654-658, 2001.
- [6] L. Filice, L. Fratini, F. Micari, Analysis of Material Formability in Incremental Forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 199-202, 2002.
- [7] L. Fratini, G. Ambrogio, R. Di Lorenzo, L. Filice, F. Micari, Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 207-210, 2004.
- [8] J. Jeswiet, D. Young, Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 219, No. 4, pp. 359-364, 2005.
- [9] P. Martins, N. Bay, M. Skjødt, M. Silva, Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 247-252, 2008.
- [10] H. Ghasemi, B. Solttani, Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 89-96, 2014. (In Persian)
- [11] M. J. Mirnia, B. M. Dariani, Analysis of incremental sheet metal forming using the upper-bound approach, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 0954405412445113, 2012.
- [12] G. Hussain, L. Gao, A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 3-4, pp. 419-435, 2007.
- [13] G. Hussain, L. Gao, N. Hayat, N. U. Dar, The formability of annealed and pre-aged AA-2024 sheets in single-point incremental forming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, pp. 543-549, 2010.
- [14] H. Y. Wei, L. Gao, S. G. Li, Investigation on thickness distribution along bulge type incrementally formed sheet metal part with irregular shapes, in *Proceeding of the International Manufacturing Conference, Jinan, China*, 1672-3961, 2004.
- [15] R. Malhotra, L. Xue, T. Belytschko, J. Cao, Mechanics of fracture in single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 7, pp. 1573-1590, 2012.
- [16] R. Aereens, P. Eyckens, A. Van Bael, J. Duflou, Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 9-12, pp. 969-982, 2010.

دو لایه تحلیل شد و نیز اثر پارامترهای شعاع ابزار، اندازه گام عمودی و سرعت پیشروی ابزار بر روی زاویه حد شکل‌پذیری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی به صورت زیر است:

- آزمایش‌های تجربی نشان دادند که در هر حالت، ابتدا لایه بیرونی ورق دو لایه دچار شکست می‌شود علت این امر کشش موضعی و خمش موضعی منطقه اطراف شعاع ابزار است که با نزدیک شدن به سطح خارجی ورق، شدت کرنش‌های پلاستیک بر اثر این مکانیزم‌ها زیاد شده و در نتیجه شکست از بیرونی‌ترین قسمت‌های ورق شروع می‌شود.
- بررسی اثر تغییرات شعاع ابزار بر روی زاویه حد شکل‌پذیری نشان می‌دهد که با افزایش شعاع ابزار، لایه‌های درونی و بیرونی ورق دو لایه زودتر به شکست می‌رسند و با کاهش شعاع ابزار، نیروهای تغییر شکل در منطقه کوچکی به ورق اعمال شده و باعث افزایش زاویه حد شکل‌پذیری می‌شود.
- اثر افزایش اندازه گام عمودی مانند اثر افزایش شعاع ابزار است و باعث کاهش زاویه حد شکل‌دهی می‌شود. در اینجا نیز علت، تمرکز تنش زیاد به هنگام افزایش اندازه گام عمودی است که باعث تجمع سریع خرابی‌ها بر اثر تنش‌های وارده شده و وقوع شکست را تسریع می‌کند.
- افزایش سرعت پیشروی ابزار باعث بهبود شرایط شکل‌دهی شده است به این معنی که زمان شکل‌دهی کاهش و زاویه حد شکل‌دهی افزایش یافته است. با این وجود نمی‌توان گفت که در تمامی محدوده‌های سرعت، این موضوع برقرار باشد.
- مقایسه شکل‌پذیری ورق دو لایه در دو نوع چینش نشان داد که زمانی که ورق با شکل‌پذیری بالا در لایه بیرونی قرار می‌گیرد شکل‌پذیری بهبود می‌یابد.

## 7- مراجع

- [1] P. Rous, Machines for shaping sheet metal, Google Patents, 1960.
- [2] E. Leszak, Apparatus and process for incremental dieless forming, Google Patents, 1967.