



## روشی جدید برای بهبود توزیع ضخامت ورق در فرایند شکل دهی تدریجی

سید احمد افتخاری<sup>1</sup>، علی فضلی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

\* قزوین، کد پستی 34148-96818، a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 13 اردیبهشت 1395  
پذیرش: 31 اردیبهشت 1395  
ارائه در سایت: 23 تیر 1395  
کلید واژگان:  
شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای  
شکل دهی چندمرحله‌ای  
توزیع ضخامت  
نازک شدگی

### چکیده

شکل دهی تدریجی یک روش نسبتاً جدید در شکل دهی ورق های فلزی است که می تواند برای تولید تعداد کم قطعات مورد استفاده قرار گیرد. اما یکی از مشکلاتی که این روش دارد، نازک شدگی بیش از حد ورق و عدم توزیع یکنواخت ضخامت در راستای شعاعی آن است. در روش مرسوم شکل دهی تدریجی، قسمت دیواره قطعه تولیدی کاهش شدید ضخامت را نشان می دهد، در حالی که ضخامت ورق در منطقه کف قطعه تولیدی تغییر نمی کند. این مشکل مانع بزرگی در کاربرد گسترده این فرایند در صنعت می شود. در این مقاله یک روش نوین برای اصلاح و بهبود توزیع ضخامت در فرایند شکل دهی تدریجی ارائه می شود. در روش جدید ارائه شده، یک پیش فرم به مراحل شکل دهی تدریجی اضافه می شود که با کاستن از ضخامت در قسمت کف قطعه، منجر به افزایش کمیته ضخامت در منطقه دیواره قطعه و یکنواخت تر شدن توزیع ضخامت قطعه می گردد. فرایند شکل دهی تدریجی با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس مدل سازی و با نتایج تجربی موجود در مقالات صحه گذاری گردید. سپس روش ارائه شده مدل سازی گردید که نتایج آن نشان دهنده قابلیت این روش برای بهبود توزیع ضخامت می باشد.

## A novel strategy for improvement of sheet thickness distribution in incremental sheet metal forming process

Seyyed Ahmad Eftekhari, Ali Fazli\*

Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

\* P.O.B. 34148-96818, Qazvin, Iran, a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 02 May 2016  
Accepted 20 May 2016  
Available Online 13 July 2016

### Keywords:

Single point incremental forming  
multistage forming  
thickness distribution  
thinning

### ABSTRACT

The incremental forming process which can be used in low quantity production of the components is a relatively new forming process for sheet metal components. One of the problems of this method is thinning and non-uniform thickness distribution of the component in radial direction. In the incremental forming process, the sheet thickness in the wall of the formed cup is reduced considerably while the thickness in the bottom of the formed cup is unchanged. This problem hinders the wide application of the incremental forming process in the industry. In this paper, a new method is presented for the improvement of the thickness distribution in the incremental forming process. In the presented method, a new preform is added to forming stages which reduces the sheet thickness in the bottom of the formed cup, increases the minimum thickness in the wall of the formed cup and improves its thickness distribution. The incremental forming process is simulated using the software ABAQUS and verified using the experiments available in the literature. Then the proposed method is simulated and its result indicates the capability of the presented method in thickness improvement.

### 1-مقدمه

تعیین شده حرکت کرده و با شکل دهی موضعی ورق، در نهایت شکل قطعه‌ی نهایی را ایجاد می کند. در این روش برای ایجاد شکل های بسیار پیچیده در ورق ها دیگر نیاز به قالب های گران قیمت نیست و ورق تنها به وسیله ی یک ورق گیر در اطراف مهار می شود. این فرایند شکل دهی یک روش ارزان و بسیار انعطاف پذیر است که می تواند برای نمونه سازی سریع قطعات ورقی استفاده شود. با توجه به سرعت کم شکل دهی تدریجی، این فرایند مناسب برای حجم تولید کم (یا متوسط) و یا ساخت نمونه های اولیه و قطعات سفارشی شده است.

مهم ترین مزیت این فرایند، قابلیت انعطاف زیاد در تولید، زمان کم در توسعه ی تولید، و ارزان قیمت بودن فرایند است. علاوه بر این، می توان با این روش محصولات با عمق زیاد و کرنش های بسیار بالا نسبت به فرایندهای

فناوری شکل دهی تدریجی<sup>1</sup> یک روش نسبتاً جدید در شکل دهی فلزات است که به مجموعه ای از فرایندهای شکل دهی گفته می شود که در تمامی آن ها در هر لحظه از عملیات شکل دهی تنها بخش کوچکی از قطعه کار شکل داده می شود و این نقطه ای که تغییر شکل می گیرد به صورت پیوسته تغییر می کند [1]. یکی از ساده ترین حالت های شکل دهی تدریجی که در شکل 1 نشان داده شده است، شکل دهی تدریجی تک نقطه ای<sup>2</sup> می باشد. در این حالت، اجزای مورد نیاز برای شکل دهی یک ابزار نیم کروی، یک قاب ورق گیر، یک ورق پشتی و یک دستگاه کنترل عددی است. ابزار شکل دهی روی مسیر از پیش

<sup>1</sup> Incremental forming

<sup>2</sup> Single point incremental forming

میزان حد زاویه شکل‌دهی پرداختند.

محققینی نیز بر روی اثر پارامترهای مختلف فرایند بر روی کیفیت سطح قطعه حاصله پرداختند. همیلتون [10] به بررسی فرایند شکل‌دهی تدریجی با پیشروی و سرعت اسپیندل بالا پرداخت، او در این بررسی تجربی تأثیر افزایش سرعت پیشروی و اسپیندل را در کیفیت سطح و شکل‌پذیری ماده نشان داد. اسکاجووت و همکاران [11] به تولید مسیر حرکت مارپیچ و مسیر حرکت پروفیل (یا پله‌ای) در شکل‌دهی تدریجی پرداختند و نشان دادند که در مسیر حرکت مارپیچ کیفیت سطح افزایش می‌یابد. براملی و همکارانش [12] بیان نمودند که ابزار (که عموماً استوانه‌ای با سر نیم‌کروی و قطر 6 تا 25 میلی‌متر است) تأثیر زیادی بر روی کیفیت سطح و نیز شکل‌پذیری ورق دارد، به گونه‌ای که ورق شکل‌دهی شده با ابزار با قطر کمتر، شکل‌پذیری و کیفیت سطح بهتری را نسبت به ابزار با قطر بیشتر دارد. در واقع ابزار بزرگ‌تر سطح تماس بیشتری دارد و این باعث افزایش نیروی وارد بر ورق می‌شود، در مقابل ابزار کوچک‌تر سطح تماس کمتری با قطعه دارد و همین موجب کاهش نیرو و تنش و افزایش کرنش و شکل‌پذیری ماده می‌شود، با این‌وجود عدم ثبات و سفتی ابزار موجب این می‌شود که نتوانیم قطر ابزار را بیش‌ازحد کم کنیم [13]. آلود [14] اثر گام پیشروی را بر روی کیفیت سطح بررسی نمود، او یک شکل مخروطی را با گام‌های مختلف ایجاد کرد و نشان داد که با افزایش اندازه‌ی گام کیفیت سطح افت پیدا می‌کند.

سرعت پیشروی و سرعت اسپیندل دو پارامتر بسیار مهم در شکل‌دهی تدریجی هستند. حرارت تولید شده ناشی از اصطکاک، با حرکت نسبی بین ورق و ابزار به‌طور مستقیم متناسب است. در کل به نظر می‌رسد که به دلیل حرارت به وجود آمده، شکل‌پذیری ماده افزایش می‌یابد، البته در کنار آن مسائل منفی دیگری نیز به وجود می‌آید [13]. افزایش سرعت می‌تواند موجب کاهش کیفیت سطح و افزایش موج بر روی سطح شود، علاوه بر آن افزایش سرعت اسپیندل می‌تواند باعث افزایش شکل‌پذیری ماده شود [12]. افزایش سرعت پیشروی شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد، علت این موضوع کاهش گرمای تولید شده در محل برخورد ورق و ابزار و در نتیجه کاهش تولید گرمای محلی است [6].

امبروجیو و همکاران در سال 2008 به بررسی تأثیر افزایش دمای ماده در شکل‌دهی تدریجی آلیاژ منیزیم AZ31 پرداختند [15]. این روش یکی از راحت‌ترین روش‌های گرم کردن ورق محسوب می‌شود. روش کار آن‌ها به این صورت بود که به دور قالب یک باند قرار می‌دادند که وظیفه‌ی تولید گرما را به عهده داشت. آن‌ها به بررسی تأثیرات افزایش حرارت ماده در نیروی وارد شده به ابزار پرداختند. البته افزایش دما در تمام سطح ورق معایبی نیز به دنبال داشت، از جمله این معایب این بود که با افزایش دما امکان به وجود آمدن تغییر شکل‌های نامطلوب در سطح ورق افزایش می‌یافت. برای جبران این معایب باید ورق به‌صورت موضعی گرم شود. گرم کردن موضعی باعث کاهش ریسک تغییر شکل‌های نامطلوب و نیز کاهش میزان انرژی استفاده شده برای گرم کردن ورق می‌شود. دوفلو و همکارانش [16]، با استفاده از یک ربات 6 محوره و یک لیزر سه محوره از نوع 500 W Nd:YA، یک دستگاه شکل‌دهی تدریجی به کمک لیزر ساختند. گوکیانگ فن از عبور جریان مستقیم الکتریسیته از ابزار و قطعه برای گرم کردن موضعی قطعه استفاده نمود. [17]. این روش به روش شکل‌دهی تدریجی به کمک گرمایش الکتریکی<sup>2</sup> معروف است، در این روش ابزار و ورق به یک منبع جریان مستقیم

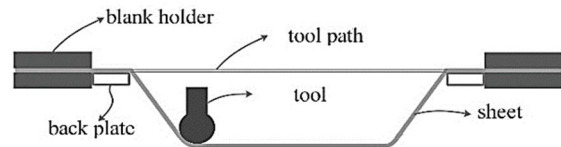


Fig. 1 Single Point Incremental Forming (SPIF)

شکل 1 نمایی از شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای

مرسوم شکل‌دهی ایجاد کرد.

در شکل‌دهی تدریجی پارامترهای بسیاری تأثیرگذار هستند، که مهم‌ترین آن‌ها عبارت است از: جنس ورق، ضخامت ورق، حد زاویه شکل‌دهی، مسیر حرکت ابزار، گام عمودی، سرعت پیشروی، قطر ابزار، شکل ابزار، شرایط روانکار بین سطح ورق و ابزار و هندسه‌ی قطعه. در سالیان اخیر تحقیقات مختلفی در راستای شناخت اثر این متغیرها انجام شده است که در ادامه به اختصار بررسی می‌گردند.

فراستینی و همکاران [2] به بررسی خواص مکانیکی ماده بر روی شکل‌پذیری آن در فرایند شکل‌دهی تدریجی پرداختند و نشان دادند که ضریب کرنش سختی ماده در این فرایند تأثیر زیادی دارد. فیلیسه و همکارانش بیان نمودند که به دلیل اینکه در فرایند شکل‌دهی تدریجی پدیده گلوئی شدن مهار می‌شود، در این فرایند می‌توان به کرنش‌های بالاتری نسبت به سایر روش‌های مرسوم دست یافت [3]. سیلوا و همکاران [4] بیان کردند که تغییرات ضخامت قطعه در راستای شعاعی را می‌توان با استفاده از قانون سینوس تخمین زد. طبق این قانون، ضخامت قطعه را بر حسب ضخامت اولیه ( $t_0$ ) و زاویه دیواره قطعه ( $\alpha$ ) می‌توان به‌صورت  $t = t_0 \sin(90 - \alpha)$  بیان نمود. حسین و گائو [5] به بررسی نازک‌شدگی و شکست در فرایند شکل‌دهی تدریجی پرداختند و نشان دادند که در شکل‌های مخروطی، تغییرات ضخامت در قسمت‌های نزدیک مناطق شکست از قانون سینوس پیروی نمی‌کنند. آن‌ها نشان دادند که در این مناطق بیشترین نسبت نازک‌شدگی و احتمال پارگی وجود دارد. هام و جسویت [6] به بررسی تأثیرات قطر ابزار، ضخامت ورق و اندازه‌ی گام در حد زاویه شکل‌دهی ماده AA3003-O پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش ضخامت ورق، باعث بهبود شکل‌پذیری ماده می‌گردد، زیرا حجم ماده‌ای که شکل می‌پذیرد افزایش می‌یابد.

به دلیل وابسته بودن ضخامت دیواره به هندسه و زاویه شکل‌دهی، گاهی می‌توان شکل‌پذیری ماده را با حد زاویه شکل‌دهی ( $\theta_{max}$ ) نشان داد. یکی از راه‌های پیشنهادی برای پیدا کردن حداکثر زاویه دیواره، روش زاویه دیواره‌ی متغیر مخروط ناقص<sup>1</sup> است، که برای اولین بار توسط حسین و گائو [5] در سال 2007 پیشنهاد شد. اساس این روش به این‌صورت است که هم‌زمان با افزایش ارتفاع در حین تولید قطعه، زاویه شکل‌دهی نیز افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود که در یک آزمایش زوایای متعددی مورد آزمایش قرار بگیرند و در هر نقطه که شکست رخ داد حداکثر زاویه شکل‌دهی با روشی خاص محاسبه شود. مارتینز و همکارانش [7] سعی کردند تا حداکثر میزان زاویه شکل‌دهی را در شکل‌دهی قطعات مخروطی پیش‌بینی کنند. در سال 2008، دوفلو و همکاران [8] به بررسی فرایند شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای پرداختند. در این مقاله چندین ماده مختلف به‌صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار گرفت و حد زاویه شکل‌دهی برای این مواد حاصل شد. زیران و همکاران [9] به بررسی تأثیر ابزارهای سرتخت و نیم‌کروی در

<sup>2</sup> Electric Hot Incremental Forming (EHIF)

<sup>1</sup> Variable Wall angle Conical Frustum (VWACF)

## 2- روش تحقیق

در این مقاله فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس<sup>1</sup> مدل‌سازی شده است. تمامی مسیرهای حرکت توسط برنامه‌های نوشته شده در نرم‌افزار متلب<sup>2</sup> ایجاد شده‌اند و خروجی مسیر ایجاد شده به‌عنوان فایل ورودی در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است. برای صحت‌گذاری مدل‌سازی المان محدود از نتایج تجربی ارائه شده در پایان‌نامه هنرارد [26] استفاده شده است و پس از صحت‌گذاری، روش جدیدی برای مسیر حرکت ابزار پیشنهاد شده است که توزیع ضخامت در دیواره قطعه را بهبود می‌دهد.

### 1-2- مدل‌سازی المان محدود

در این بررسی یک ورق دایره‌ای با شعاع اولیه 65.5mm و ضخامت اولیه 1.5mm توسط یک ورق‌گیر مهار می‌شود، سپس یک ابزار با سر نیم‌کروی به قطر 10mm با حرکت در مسیر تعیین شده، در طی چند مرحله ورق را شکل می‌دهد و مخروطی با زاویه 80 درجه ایجاد می‌کند. شکل‌دهی ورق در چهار مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول ورق تخت اولیه به مخروطی با زاویه 50 درجه تبدیل شده، در مرحله دوم این مخروط به مخروط با زاویه 60، در مرحله سوم به مخروط با زاویه 70 تبدیل می‌شود. نهایتاً در مرحله آخر شروع شکل‌دهی مخروط 70 درجه به مخروط 80 درجه تبدیل می‌شود. ارتفاع مخروط در هر 4 مرحله 30mm است. شکل 2 هندسه ورق در مرحله اول و آخر شکل‌دهی را نشان می‌دهد.

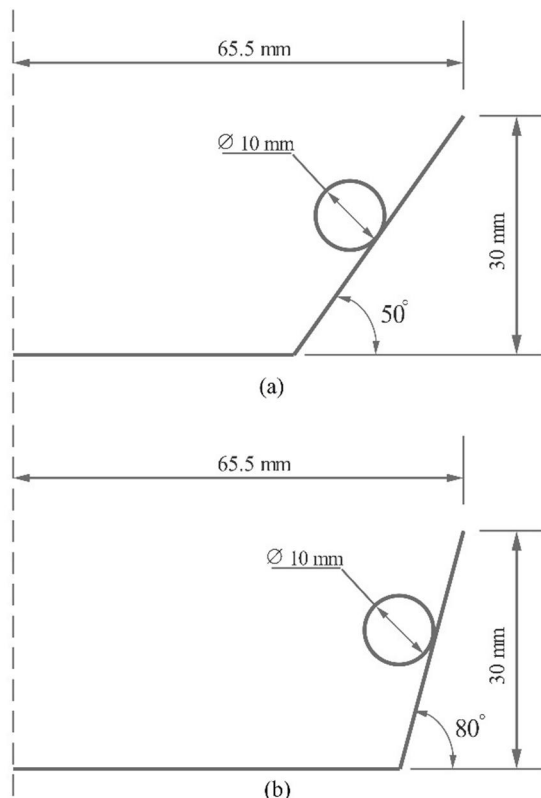


Fig. 2 (a) 50-degree wall-angle cone and (b) 80-degree wall-angle cone

شکل 2 (a) مخروط با زاویه دیواره 50 درجه (b) مخروط با زاویه دیواره 80 درجه

وصل می‌شوند و عبور جریان موجب افزایش گرما و در نتیجه شکل‌پذیری ورق می‌شود. فنو گائو [18] نیز در یک بررسی تجربی و عددی به تحلیل تأثیرات استفاده از این روش در شکل‌دهی تدریجی یک ورق Ti-6Al-4V پرداختند. با توجه به دشواری شکل‌دهی آلیاژهای تیتانیومی به دلیل استحکام بالا، این روش در تسهیل شکل‌دهی این نوع خاص از ورق‌ها مؤثر است. بارانی و همکاران [19] حد شکل‌پذیری آلیاژ تیتانیوم در فرایند شکل‌دهی تدریجی گرم ورق را به‌صورت تجربی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت، کاهش سرعت پیشروی و کاهش گام عمودی در شکل‌دهی تدریجی گرم می‌توان به حداکثر زاویه دیواره‌ی بیشتری دست یافت.

محققان دیگری سایر پارامترهای فرایند شکل‌دهی تدریجی را نیز بررسی نموده‌اند. وحدتی و همکارانش [20] با طراحی و ساخت ابزار شکل‌دهی مرعش، فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق به کمک اولتراسونیک را بررسی نمودند. از نتایج این بررسی می‌توان به کاهش نیرو در حالت شکل‌دهی به کمک اولتراسونیک اشاره کرد. زاهدی و ملائی [21] به بررسی عددی و تجربی شکل‌دهی تدریجی ورق دولایه پرداختند، آن‌ها نشان دادند که در این نوع شکل‌دهی ابتدا ورق بیرونی دچار شکست می‌شود، و با افزایش اندازه‌ی گام عمودی حد زاویه شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

نجف‌آبادی و همکاران [22] با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه توسط الگوریتم عصبی-ژنتیک پارامترهای شکل‌دهی تدریجی ورق را بررسی نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها، شبکه عصبی که با استفاده از نتایج شبیه‌سازی آموزش داده شده، می‌تواند جهت بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی مورد استفاده قرار گیرد. قاسمی و سلطانی [23] اثر تعدادی از پارامتر مؤثر در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند استراتژی حرکت حلزونی و افزایش سرعت پیشروی نیروی عمودی را کاهش می‌دهد. درحالی‌که افزایش گام عمودی نیروی لازم برای شکل‌دهی را افزایش می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج آن‌ها، با افزایش سرعت چرخش ابزار، ضریب اصطکاک بین ابزار و سطح ورق، کاهش می‌یابد.

یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که فرایند شکل‌دهی تدریجی دارد، توزیع غیریکنواخت ضخامت در راستای شعاعی است، به‌گونه‌ای که ضخامت قطعه در قسمت کف ظرف تقریباً برابر با ضخامت ورق اولیه بوده و در قسمت دیواره مخروط ضخامت به‌شدت کاهش یافته و همان‌گونه که گفته شد مقدار کمینه ضخامت در این منطقه از قانون سینوس به دست می‌آید. محققین متعددی برای بهبود این توزیع تلاش نموده‌اند. میرنیا و همکاران [24] با ارائه‌ی یک مسیر حرکت جدید در فرایند شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای، توزیع ضخامت در راستای شعاعی را بهبود دادند. میرنیا و ملائی [25] کنترل نازک‌شدگی در فرایند شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که یکی از راه‌های جلوگیری از نازک‌شدگی زیاد در شکل‌دهی یک مخروط، گسترش منطقه تغییر شکل به کف ظرف مخروطی و جایجایی مواد از کف ظرف به دیوار ظرف توسط شکل‌دهی چند مرحله‌ای می‌باشد. گسترش منطقه تغییر شکل به کف ظرف توسط مسیر تغییر شکل (استراتژی شکل‌دهی) و تعداد مراحل تغییر شکل تعیین می‌شود.

با وجود ارائه راه‌حل‌های مختلف برای بهبود ضخامت ورق در فرایند شکل‌دهی تدریجی، بهبود بیشتر توزیع ضخامت در این نوع فرایند قابل بررسی است. در این مقاله روشی نوین برای بهبود و توزیع ضخامت در فرایند شکل‌دهی تدریجی ارائه می‌گردد و با مدل‌سازی المان محدود، قابلیت این روش در بهبود ضخامت ورق بررسی می‌گردد.

<sup>1</sup> Abaqus

<sup>2</sup> Matlab

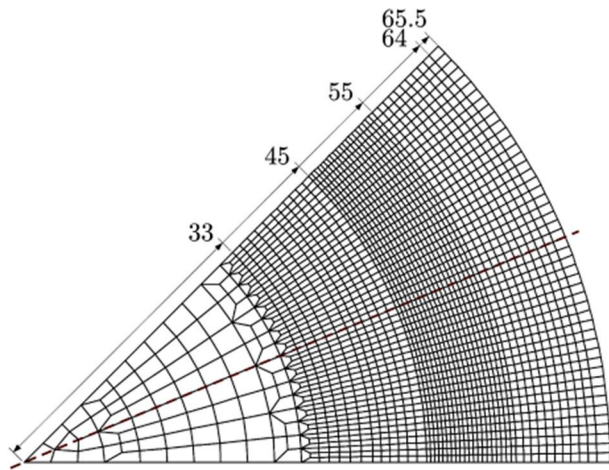


Fig. 3 Partial model 45 degrees

شکل 3 مدل جزئی 45 درجه

جدول 1 خواص الاستیک و کرنش سختی همسانگرد برای AA3003 [26]

مقدار	واحد	پارامتر
7200	MPa	$E$
0.36	-	$\nu$
42.97	MPa	$\sigma_F^0$
2730	$\text{kgm}^{-3}$	$\rho$
180	MPa	$K$
0.00109	-	$\epsilon_0$
0.21	-	$n$

$$\begin{cases} G = \frac{2}{1+r_0}, & H = 2 - G, & F = \frac{H}{r_{90}} \\ N = L = M = (F + G)(r_{45} + \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (3)$$

با توجه به این روابط ضرایب معیار تسلیم هیل محاسبه گردید که در جدول 2 بیان شده‌اند. بعد از محاسبه‌ی ضرایب معیار هیل میزان ناهمسانگردی‌ها با قرار دادن ضرایب هیل در معادلات (4) تا (9)، مطابق جدول 3 حاصل شدند. این مقادیر را می‌توان به صورت مستقیم وارد نرم‌افزار آباکوس کرد.

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (4)$$

$$G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (5)$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (6)$$

$$L = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad (7)$$

$$M = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad (8)$$

$$N = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad (9)$$

مسیرهای حرکت ابزار به کمک نرم‌افزار متلب ایجاد شده است که در مدل‌سازی 45 درجه فرایند، همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده است، ابزار حرکت خود را از نقطه 2 آغاز کرده و بر روی کمانی با زاویه 60 مسیر a را طی می‌کند، و در طی این مسیر ورق را شکل می‌دهد. بعد از رسیدن به نقطه 2 بر روی مسیر b حرکت برگشتی خود را به صورت شیب‌دار ادامه می‌دهد تا به نقطه 3 برسد. برای جلوگیری از برخورد ابزار با ورق، مسیر برگشت به صورت شیب در نظر گرفته شده است. بعد از رسیدن به نقطه 3،

با توجه به اینکه جهت حرکت ابزار در فرایند شکل‌دهی تدریجی مخروط، حالت متقارنی ندارد، نمی‌توان این فرایند شکل‌دهی را متقارن محوری در نظر گرفت. بنابراین برای مدل‌سازی واقعی فرایند، نیاز به مدل‌سازی کامل و 360 درجه فرایند می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به زیاد بودن طول مسیرهای حرکت ابزار، مدل‌سازی کامل قطعه در بررسی‌های پارامتری بسیار زمان‌بر خواهد بود. هنرارد [26] در بررسی که انجام داد، نشان داد که با وجود متقارن نبودن فرایند، مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی به صورت 45 درجه تطابق قابل قبولی با مدل 360 درجه دارد. لازم به ذکر است که بررسی‌های نگارنده نیز این تطابق را تأیید نمود. بنابراین برای کاهش زمان حل، مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی به صورت 45 درجه صورت پذیرفت. مدل المان محدود ورق در مدل‌سازی بیان شده، در شکل 3 نشان داده شده است. در مدل‌سازی 45 درجه، بر روی لبه‌های ورق، شرط متقارن بودن اعمال گردید تا شرایط آن ورق به حالت واقعی نزدیک‌تر گردد.

برای مقایسه‌ی نتایج تجربی با نتایج مدل‌سازی 45 درجه از مسیر شعاعی 22.5 درجه استفاده گردید که تا حد امکان از لبه‌های ورق دور باشد و شرایط مرزی بر روی نتایج تأثیر نگذارد. در شکل 3 می‌توانید نمایی از قطاع 45 درجه را مشاهده کنید. در مدل‌سازی المان محدود با توجه به اینکه کف قطعه تغییر شکل نمی‌دهد، از المان بزرگ‌تر در این منطقه استفاده کردید. در قسمت‌هایی که بیشترین تغییر شکل را دارند، اندازه المان‌ها کوچک‌تر انتخاب شد تا نتایج دقیق‌تر حاصل گردد. حدود اندازه المان‌ها در کف قطعه برابر با 2 میلی‌متر و در دیواره قطعه برابر با 0.5 میلی‌متر است.

شرایط مرزی بر روی دو لبه‌های کناری ورق از نوع متقارن انتخاب شده است. تمامی درجات آزادی در کمان محیطی ورق نیز کاملاً مقید شده است. سرعت حرکت ابزار برابر با 8 m/min در نظر گرفته شد و برای کاهش زمان حل بزرگنمایی جرم<sup>1</sup> نیز در این تحلیل برابر با 10000 در نظر گرفته شده است. در تمامی تحلیل‌ها نسبت انرژی جنبشی به انرژی کل کمتر از 5 درصد شده است که نشان می‌دهد استفاده از بزرگنمایی جرم تأثیر چندانی بر روی نتایج تحلیل نداشته است. ورق‌ها با المان‌های پوسته‌ای S4R و اجزای قالب با المان‌های صلب R3D4 مدل‌سازی شده‌اند. تعداد المان‌ها در مدل جزئی برابر با 3692 است. مطابق مرجع [26] نوع تماس بین ابزار شکل‌دهی و ورق بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است.

در مدل‌سازی المان محدود از ماده‌ی AA3003-O استفاده شده است. در جدول 1 خواص کرنش سختی همسانگرد ماده داده شده است. مدل کرنش سختی استفاده شده در این شبیه‌سازی مدل سوئیفت<sup>2</sup> است که به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$\sigma = K(\epsilon + \epsilon_0)^n \quad (1)$$

برای مدل‌سازی رفتار ماده در منطقه پلاستیک از معیار تسلیم درجه دو هیل<sup>3</sup> استفاده گردید [26]. ضرایب لانکفورد<sup>4</sup> استفاده شده برای ماده عبارت‌اند از:

$$\begin{cases} r_0 = 0.68 \\ r_{45} = 0.73 \\ r_{90} = 0.66 \end{cases} \quad (2)$$

با داشتن ضرایب لانکفورد، ضرایب معیار تسلیم هیل از رابطه‌های (3) قابل محاسبه است:

<sup>1</sup> Mass Scaling<sup>2</sup> Swift<sup>3</sup> Hill<sup>4</sup> Lankford

شعاعی برای زاویه دیواره‌های مختلف استفاده شده است.

در شکل 5 توزیع ضخامت در قسمت‌های مختلف قطاع 45 درجه مشاهده می‌شود، همان‌طور که در بخش مربوط به نحوه مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی گفته شد، در شکل کاملاً مشخص است که شرایط مرزی اعمال شده در طرح باعث ایجاد خطا شده و توزیع ضخامت در مسیرهای شعاعی مختلف چندان یکنواخت نیست، باین‌وجود، در مسیر وسط نتایج شبیه‌سازی کاملاً با نتایج تجربی و نتایج مدل‌سازی 360 درجه همخوانی دارد. در شکل 6 سطح مقطع و توزیع ضخامت قطعه به‌دست‌آمده با مدل‌سازی 45 درجه برای مخروط 50 درجه با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود که انطباق قابل قبولی بین نتایج تجربی و مدل‌سازی المان محدود وجود دارد و کمینه ضخامت پیش‌بینی شده حاصل از مدل‌سازی و نتایج تجربی نیز با مقدار پیش‌بینی قانون سینوس نیز هم‌خوانی دارد. ضخامت در مناطق مرکزی ورق تا حدود شعاع 35 mm تقریباً ثابت است و کاهش ضخامت محسوسی در این مناطق مشاهده نمی‌شود. در مناطق بین شعاع‌های 55 تا 60 میلی‌متر که نزدیک به لبه‌ی ورق هستند کاهش ضخامت محسوسی مشاهده نمی‌شود.

صحه‌گذاری برای مراحل شکل‌دهی 60، 70 و 80 درجه نیز انجام شده که هر سه انطباق قابل قبول نتایج مدل‌سازی و تجربی را نشان می‌دهد که در اینجا به جهت رعایت اختصار تنها نتایج مربوط به مخروط با زاویه 80 درجه در شکل 7 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، برای شکل‌دهی مخروط 80 درجه نیز نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی به‌خوبی هم‌خوانی دارد و آن را صحه‌گذاری می‌کند. البته مشاهده می‌شود که در فرایندهای چندمرحله‌ای پیش‌بینی قانون سینوس برای کمینه ضخامت، کمی کمتر از مقادیر به‌دست‌آمده از مدل‌سازی و نتایج تجربی است. دلیل این امر این موضوع است که پیش‌بینی قانون سینوس برای فرایندهای تک‌مرحله‌ای می‌باشد، و با توجه به این‌که فرایند در اینجا به‌صورت چندمرحله‌ای صورت گرفته است، کاهش ضخامت کمتر، و همچنین توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را نسبت به فرایند تک‌مرحله‌ای می‌توان مشاهده کرد. کمینه‌ی میزان ضخامت در هر دو مخروط در فاصله‌ی 30 تا 55 میلی‌متری از مرکز ورق قرار دارند.

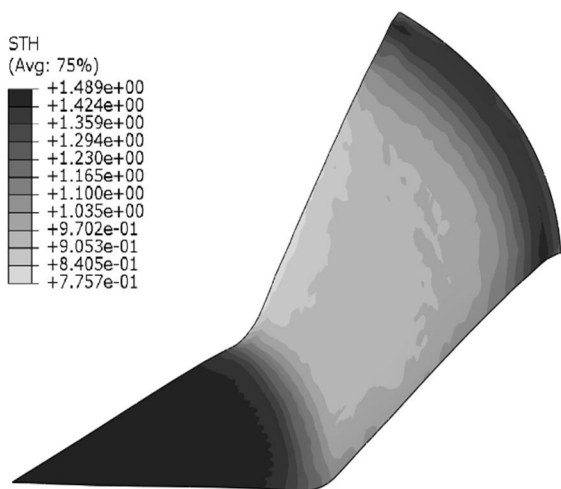


Fig. 5 Thickness distribution (mm) of a 50-degree cone in 45-degree partial model

شکل 5 توزیع ضخامت (mm) برای مخروط 50 درجه در مدل جزئی 45 درجه

جدول 2 خواص ناهمسانگردی هیل برای ماده AA3003 که از سه تست کشش و یک تست برشی حاصل شده است [26]

Table 2 Hill's 1948 yield locus parameters for AA3003 identified with three tensile tests and a shear test [26]

پارامتر	مقدار
$F$	1.224
$G$	1.193
$H$	0.807
$N=M=L$	4.06

جدول 3 مقادیر نسبت تنش تسلیم ناهمسانگرد برای AA3003

Table 3 Anisotropic Yield Stress Ratios for AA3003

پارامتر	مقدار
$R_{11}$	0.64
$R_{22}$	0.7
$R_{33}$	0.59
$R_{12}$	0.60
$R_{13}$	0.60
$R_{23}$	0.60

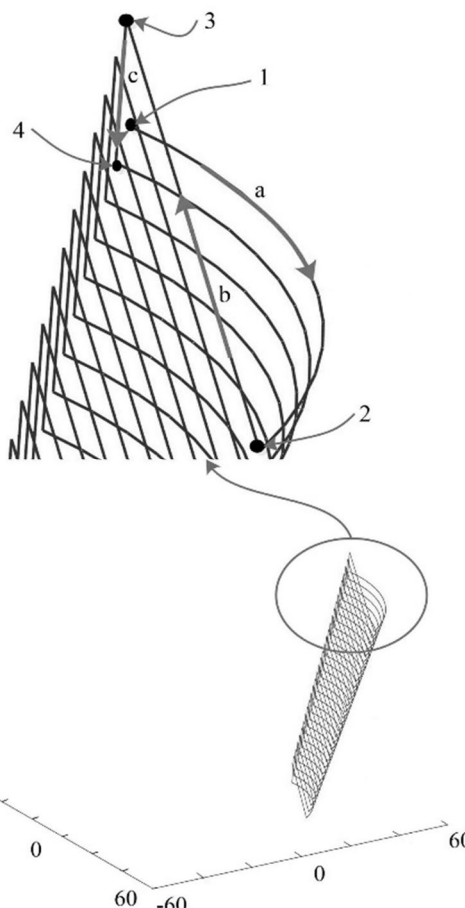


Fig. 4 toolpath in the partial model

شکل 4 مسیر حرکت ابزار در ورق جزئی

ابزار بر روی مسیر c حرکت می‌کند تا به نقطه 4 که شروع مسیر بعدی است، برسد. این فرایند تا پایان شکل‌دهی تکرار می‌شود.

## 2-2- صحه‌گذاری

برای صحه‌گذاری مدل با نتایج تجربی، با توجه به این موضوع که هدف از انجام این پژوهش بهبود توزیع ضخامت ورق در راستای شعاعی بوده است، از نمودارهای سطح مقطع مخروط و همچنین نمودار توزیع ضخامت در راستای

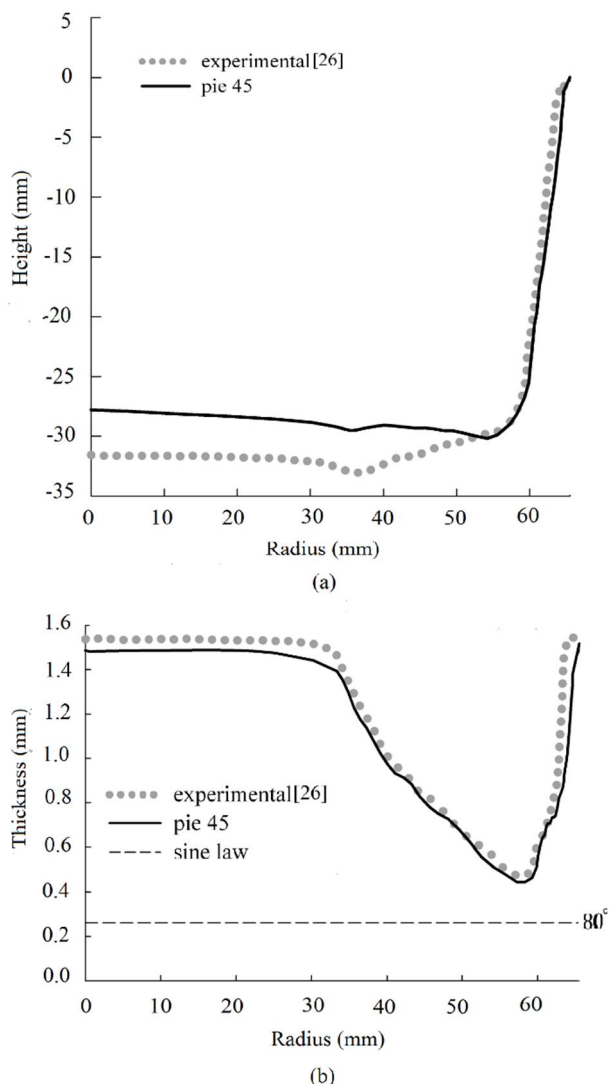


Fig. 7 (a) Shape of the cone and (b) Thickness profile of the cone after the last stage (80-degree cone)

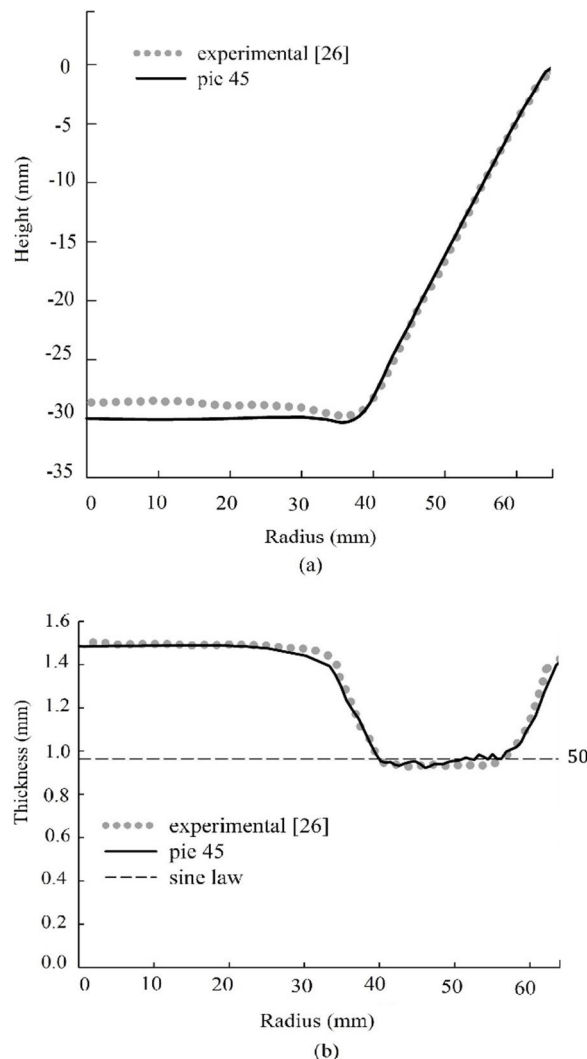


Fig. 6 (a) Shape of the cone and (b) Thickness profile of the cone after the first stage (50-degree cone)

شکل 7 (a) شکل مخروط و (b) توزیع ضخامت بعد از انجام آخرین مرحله‌ی شکل‌دهی (مخروط 80 درجه)

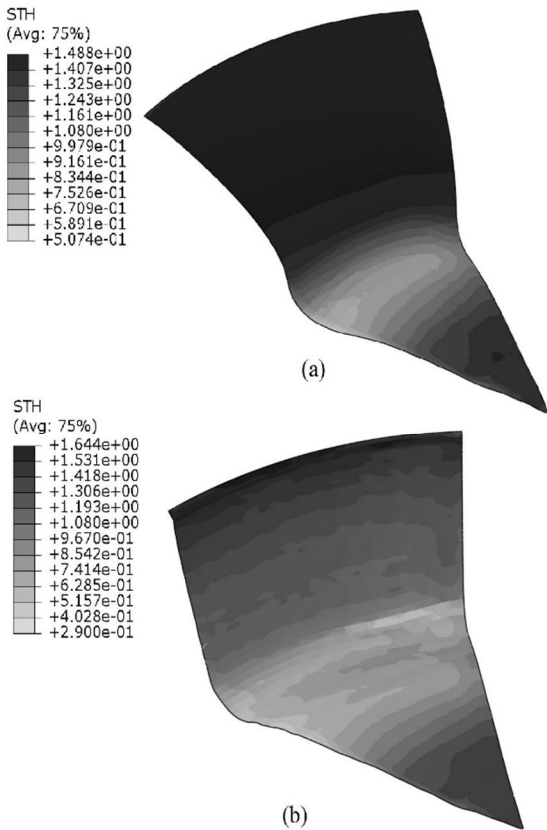
شکل 6 (a) شکل مخروط و (b) توزیع ضخامت بعد از انجام اولین مرحله‌ی شکل‌دهی (مخروط 50 درجه)

در ورق را برطرف می‌کند، اما توزیع غیریکنواخت ضخامت هنوز وجود دارد. در این بخش روشی ارائه می‌گردد که بتوان توزیع ضخامت بهتری را در قطعه نهایی به دست آورد.

طرح ارائه شده در این مقاله به این صورت است که یک مرحله به مراحل شکل‌دهی تدریجی اضافه می‌شود. تفاوت عمده این مرحله با سایر مراحل در این است که شکل‌دهی به صورت معکوس صورت می‌پذیرد. در شکل‌دهی متداول تدریجی برای ایجاد یک مخروط، ابزار از شعاع‌های زیاد و نزدیک به لبه‌ی ورق شروع به حرکت کرده و رفته‌رفته با افزایش عمق از شعاع آن نیز کاسته می‌شود. به همین دلیل مرکز ورق تحت تغییر شکل چندانی قرار نگرفته و تغییرات ضخامت در آن بسیار کم است. در روش جدید ارائه شده مطابق مسیر نشان داده شده شکل 8، یک مرحله پیش‌فرم به مراحل قبلی اضافه شده و در مرحله پیش‌فرم، ابزار از مرکز ورق شروع به حرکت می‌کند و رفته‌رفته با کاهش ارتفاع شعاع مسیر حرکت زیاد می‌شود. این مسیر باعث کاهش ضخامت منطقه کف قطعه گردیده و به همین دلیل از کاهش زیاد ضخامت در دیواره در مراحل بعدی جلوگیری می‌کند. پس از ایجاد این

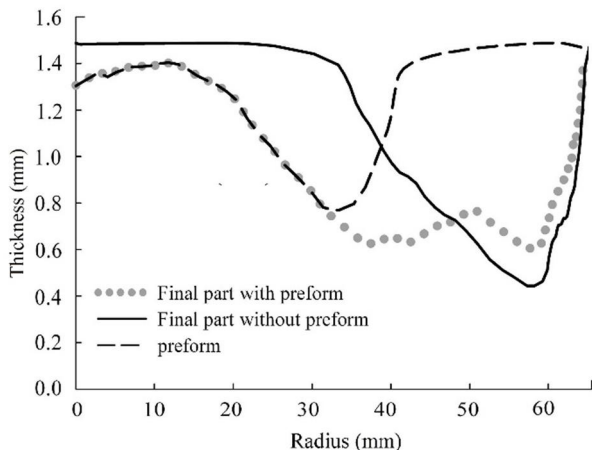
### 3- ارائه روش جدید

همان‌گونه که در شکل‌های 6 و 7 مشاهده گردید، یکی از اساسی‌ترین مشکلات در زمینه‌ی شکل‌دهی تدریجی، عدم توزیع یکنواخت ضخامت در راستای شعاعی است که در نهایت منجر به نازک‌شدگی بیش‌ازحد قسمت‌های دیواره قطعه و عدم تغییر ضخامت ورق اولیه در قسمت‌های کف قطعه می‌باشد. این مسأله می‌تواند موجب پارگی در قسمت انتهایی دیواره قطعه گردد. شکل‌دهی چندمرحله‌ای می‌تواند تا حدودی این مسأله را برطرف کند. به عنوان مثال برای ورق AA3003-O حداکثر زاویه شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی تدریجی، برای ماده، در ضخامت 1.2 mm برابر با 71 درجه و در ضخامت 2 mm برابر با 76 درجه است. با توجه به این اعداد، به صورت تقریبی می‌توان گفت که حداکثر زاویه شکل‌دهی در ضخامت 1.5 mm تقریباً برابر با 73 درجه است [8]. اما با توجه به نتایج تجربی و مدل‌سازی بخش 2-2 مشاهده می‌شود که با شکل‌دهی چندمرحله‌ای امکان شکل‌دهی این ورق تا زاویه 80 درجه نیز وجود دارد. با وجودی که شکل‌دهی چند مرحله‌ای پارگی



**Fig. 9** (a) Thickness distribution (mm) after preform stage for  $\psi = 30^\circ$  and  $h = 20$  mm and (b) Thickness distribution (mm) after the last stage with preform

شکل 9 (a) توزیع ضخامت (mm) در مخروط بعد از پیش‌فرم (b) توزیع ضخامت (mm) در مخروط در آخرین مرحله‌ی شکل‌دهی همراه با پیش‌فرم



**Fig. 10** Thickness profile before and after perform for  $\psi = 30^\circ$  and  $h = 20$  mm

شکل 10 توزیع ضخامت قبل و بعد از پیش‌فرم برای  $\psi = 30^\circ$  و  $h = 20$  mm

در شکل‌دهی با پیش‌فرم با عمق 20 میلی‌متر و زاویه 30 درجه، کمینه ضخامت در دیواره قطعه برابر با 0.60 میلی‌متر می‌باشد. مقایسه این حالت با حالت بدون پیش‌فرم که کمینه ضخامت 0.46 میلی‌متر بوده است، افزایش قابل توجه 30 درصدی در کمینه ضخامت قطعه نهایی را نشان می‌دهد. شکل

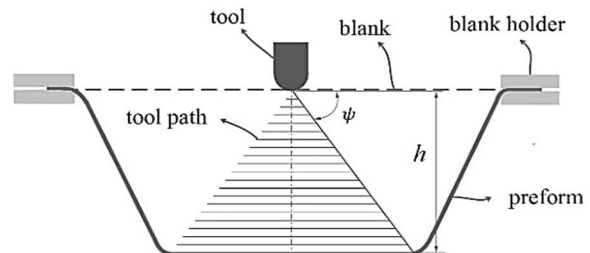
پیش‌فرم، ابزار همان مسیرهای قبل را برای مخروط 50، 60، 70 و 80 درجه طی کرده و شکل‌دهی کامل می‌شود. همان‌طور که در شکل 8 مشخص شده است، مسیر پیش‌فرم اضافه شده، نیازمند دو پارامتر ارتفاع مخروط ( $h$ ) و زاویه مخروط با سطح افقی ( $\psi$ ) می‌باشد. در تمامی حالت‌ها، گام ابزار برای مسیر بیان شده برابر با 1 mm در نظر گرفته شده است. برای کاهش زمان تحلیل، از مدل 45 درجه در مدل‌سازی‌ها استفاده شده است.

### 1-3- نتایج روش جدید

شکل a-9 توزیع ضخامت قطعه‌ی پیش‌فرم به ازای  $\psi = 30^\circ$  و  $h = 20$  mm و شکل b-9 توزیع ضخامت قطعه شکل‌دهی شده با این پیش‌فرم در آخرین مرحله‌ی شکل‌دهی (مخروط 80 درجه) را نشان می‌دهد. شکل 10 نیز نمودار تغییرات ضخامت قطعه پیش‌فرم با  $\psi = 30^\circ$  و  $h = 20$  mm و قطعه نهایی شکل داده شده با پیش‌فرم و بدون پیش‌فرم در راستای شعاع قطعه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود مرحله پیش‌فرم باعث شده تا ضخامت در مناطق مرکزی قطعه (شعاع کمتر از 40 میلی‌متر) کم شود، در حالی که ضخامت قطعه در قسمت دیواره (شعاع بزرگتر از 40 میلی‌متر) تغییرات چندانی نداشته و با ضخامت اولیه ورق (1.5mm) برابر است. به همین دلیل و به علت حجم یکسان بلنک اولیه در حالت شکل‌دهی با پیش‌فرم و بدون پیش‌فرم، بعد از اعمال مراحل بعدی شکل‌دهی، کمینه‌ی ضخامت نسبت به قطعه شکل‌دهی شده بدون پیش‌فرم در حدود 30 درصد بیشتر شده است.

در شکل 11 توزیع ضخامت در ورق، در راستای شعاعی و در انتهای مراحل شکل‌دهی با پیش‌فرمی با ارتفاع  $h = 20$  mm و سه زاویه پیش‌فرم 30، 45 و 60 نشان داده شده و با حالت شکل‌دهی بدون پیش‌فرم مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضخامت به دست آمده با هر کدام از سه پیش‌فرم جدید در قسمت‌های میانی که در کف ظرف قرار دارند نسبت به مدل بدون پیش‌فرم که در بخش قبلی برای صحه‌گذاری مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت، کاهش یافته است که با توجه به حجم ثابت ورق اولیه منجر به افزایش کمینه ضخامت در قسمت‌های دیواره مخروط نهایی گردیده است.

با توجه به شکل 11، در شکل‌دهی با پیش‌فرم معرفی شده، کاهش ضخامت در دو نقطه رخ می‌دهد که یکی در منطقه کف قطعه مخروطی و دیگری در منطقه دیواره قطعه مخروطی نهایی می‌باشد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه پیش‌فرم اولیه، موقعیت محل کاهش ضخامت در کف قطعه به تدریج به مرکز قطعه نزدیک و از دیواره دورتر می‌گردد، به گونه‌ای که در پیش‌فرم اولیه با زاویه  $\psi = 30^\circ$  این دو منطقه کاهش ضخامت، در دو موقعیت مجاور یکدیگر قرار گرفته‌اند. همچنین شکل 11 نشان می‌دهد که با کاهش زاویه پیش‌فرم  $\psi$  از 60 به 30، کمینه ضخامت قطعه افزایش یافته و نیز توزیع ضخامت یکنواخت‌تری نیز حاصل می‌گردد.



**Fig. 8** the new Suggested toolpath

شکل 8 مسیر حرکت پیشنهادی جدید

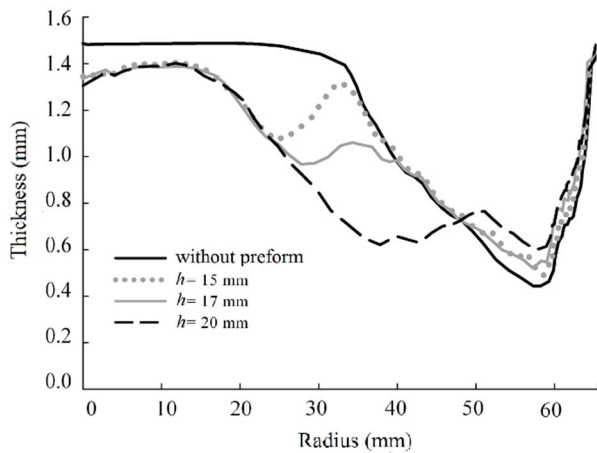


Fig. 12 Thickness profile of the cone after the last stage (80-degree cone) for  $\psi = 30^\circ$

شکل 12 توزیع ضخامت در آخرین گام برای  $\psi = 30^\circ$

جدول 4 پارامترهای طراحی آزمایش

Table 4 design of experiments parameters

فاکتورهای کنترلی	سطح 1	سطح 2	سطح 3
ارتفاع $h$	15 mm	17mm	20 mm
$\psi$	30°	45°	60°

جدول 5 آرایه‌های متعامد تاگوچی  $L9(3^2)$

Table 5 taguchi orthogonal array  $L9(3^2)$

شماره آزمایش	ارتفاع $h$	$\psi$
1	15 mm	30°
2	15 mm	45°
3	15 mm	60°
4	17 mm	30°
5	17 mm	45°
6	17 mm	60°
7	20 mm	30°
8	20 mm	45°
9	20 mm	60°

جدول 6 کمینه ضخامت در دیواره با زاویه‌های مختلف

Table 6 minimum of thickness of the cone

شماره آزمایش	ضخامت در 50 مخروط درجه mm	ضخامت در 60 مخروط درجه mm	ضخامت در 70 مخروط درجه mm	ضخامت در 80 مخروط درجه mm
1	0.962	0.757	0.623	0.489
2	0.958	0.746	0.573	0.461
3	0.951	0.732	0.586	0.458
4	0.961	0.759	0.630	0.520
5	0.967	0.754	0.598	0.468
6	0.948	0.738	0.579	0.447
7	0.631	0.619	0.619	0.602
8	0.779	0.779	0.610	0.483
9	0.710	0.710	0.605	0.472

یعنی 20 mm قرار گیرد، بیشترین بهبود در افزایش کمینه ضخامت حاصل می‌گردد. از شکل 14 نیز این موضوع حاصل می‌شود که در صورتی که پارامتر  $\psi$  بر روی اولین سطح خود، یعنی 30 درجه قرار گیرد، بیشترین میزان بهبود حاصل می‌شود.

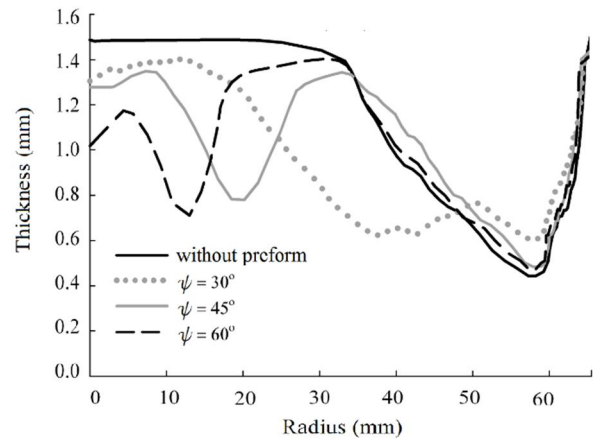


Fig. 11 Thickness profile of the cone after the last stage (80-degree cone) for  $h = 20$  mm

شکل 11 توزیع ضخامت در آخرین گام برای  $h = 20$  mm

12 توزیع ضخامت ورق، در راستای شعاعی و در انتهای مراحل شکل‌دهی با سه پیش‌فرم با زاویه ثابت  $\psi = 30^\circ$  و عمق‌های متفاوت 15، 17 و 20 را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، برای یک زاویه  $\psi$  ثابت، با افزایش میزان  $h$  از 15 به 20 کمینه ضخامت افزایش می‌یابد و توزیع ضخامت نیز بهبود می‌یابد. بنابراین با توجه به بررسی نتایج شکل 11 و 12 می‌توان نتیجه گرفت که زاویه پیش‌فرم و عمق پیش‌فرم هر دو بر روی توزیع ضخامت قطعه نهایی تأثیرگذار می‌باشند.

با توجه به اثر هم‌زمان زاویه و عمق پیش‌فرم بر روی توزیع ضخامت قطعه نهایی، برای بررسی دقیق‌تر اثر مسیر حرکت جدید ارائه شده و پارامترهای آن بر روی توزیع ضخامت، از روش طراحی آزمایش به کمک آرایه‌های متعامد تاگوچی استفاده شد. سه سطح متفاوت 15mm، 17mm و 20mm برای  $h$  و سه سطح 30، 45 و 60 درجه برای پارامتر  $\psi$  در نظر گرفته شد. در جدول 4 مقادیر در نظر گرفته شده برای هر کدام از این سطوح بیان شده است.

طبق آرایه‌های متعامد  $L9(3^2)$  تاگوچی، 9 آزمایش مختلف باید انجام شود. پارامترهای این 9 آزمایش در جدول 5 بیان شده است. خروجی مدل نیز کمینه‌ی ضخامت در چهار مخروط 50 تا 80 درجه در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، با مدل‌سازی این 9 حالت، کمینه ضخامت قطعه نهایی برای پیش‌فرم‌های مختلف به دست آمد که در جدول 6 مقادیر آن‌ها گزارش شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هندسه‌های پیش‌فرم با زوایای 45 و 60 درجه بهبود قابل‌توجهی در کمینه ضخامت قطعه نهایی نداشته‌اند و حتی بعضی از هندسه‌های پیش‌فرم باعث کاهش بیشتر کمینه ضخامت قطعه نیز گردیده‌اند. اما برای هندسه پیش‌فرم با زاویه برابر با 30 درجه افزایش کمینه ضخامت در تمامی ارتفاع‌های پیش‌فرم اولیه قابل‌توجه است.

با هدف پیشینه کردن میزان کمینه‌ضخامت در مرحله‌ی نهایی شکل‌دهی (مخروط 80 درجه)، نمودار نسبت سیگنال به نویز<sup>1</sup> ( $S/N$ ) در سطوح مختلف  $h$  و  $\psi$  با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تیب<sup>2</sup> محاسبه شد که نتایج حاصله در شکل‌های 13 و 14 نشان داده شده است. مقادیر بزرگ‌تر در  $S/N$  نشان‌دهنده‌ی بهبود و در نتیجه افزایش بیشتر کمینه‌ی ضخامت است. بر این اساس با توجه به شکل 13 در صورتی که پارامتر  $h$  در سومین سطح خود

<sup>1</sup> Signal-to-noise ratio

<sup>2</sup> Minitab



ضخامت کمتری رخ می‌دهد، به گونه‌ای که ضخامت قطعه در آخرین مرحله شکل‌دهی بیشتر از ضخامت در حالت بدون پیش‌فرم می‌گردد.

### 5- مراجع

- [1] W. C. Emmens, G. Sebastiani, H. Van Den Boogaard, The technology of incremental sheet forming-A brief review of the history, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 8, pp. 981–997, 2010.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] M. B. Silva, M. Skjoedt, P. a F. Martins, N. Bay, Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 1, pp. 73–83, 2008.
- [5] 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.
- [6] M. Ham, J. Jeswiet, Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 241–244, 2006.
- [7] P. a F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, M. B. Silva, Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 247–252, 2008.
- [8] J. R. Dufflou, J. Verbert, B. Belkassam, J. Gu, H. Sol, C. Henrard, A. M. Habraken, Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 253–256, 2008.
- [9] X. Ziran, L. Gao, G. Hussain, Z. Cui, The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 9–12, pp. 1113–1118, 2010.
- [10] K. Hamilton, J. Jeswiet, Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 311–314, 2010.
- [11] M. Skjoedt, M. H. Hancock, N. Bay, Creating helical tool paths for single point incremental forming, *Key Engineering Materials*, Vol. 344, pp. 583–590, 2007.
- [12] A. N. Bramley, J. Jeswiet, F. Micari, J. Dufflou, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 88–114, 2005.
- [13] F. De Engenharia, *Single Point Incremental Forming and Multi-Stage Incremental Forming on Aluminium Alloy 1050*, PhD thesis, Thammasat University, Thailand, 2013.
- [14] J. M. Allwood, N. E. Houghton, K. P. Jackson, The design of an incremental sheet forming machine, Vol. 6, No. 8, pp. 471–478, 2005.
- [15] G. Ambrogio, L. Filice, G. L. Manco, Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 257–260, 2008.
- [16] J. R. Dufflou, B. Callebaut, J. Verbert, H. De Baerdemaeker, Laser assisted incremental forming: Formability and accuracy improvement, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 2, pp. 273–276, 2007.
- [17] G. Fan, L. Gao, G. Hussain, Z. Wu, Electric hot incremental forming: A novel technique, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, No. 15, pp. 1688–1692, 2008.
- [18] G. Fan, L. Gao, Numerical simulation and experimental investigation to improve the dimensional accuracy in electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 72, , No. 5, pp. 1133–1141, 2014.
- [19] A. Barani, S. Saeed, A. Nahjaf abadi, M. Farzin, Experimental formability investigation of titanium alloy in hot incremental sheet forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 107–114, 2015. (in Persian فارسی)

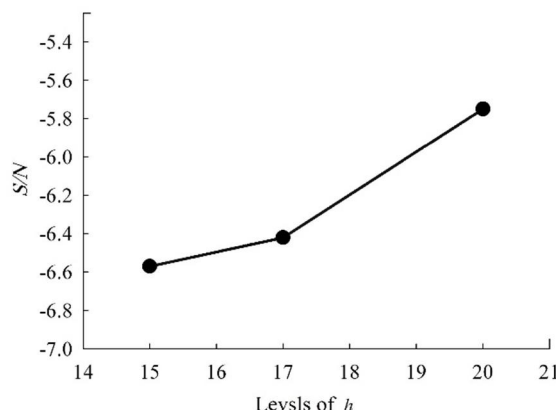


Fig. 13 S/N ratio for levels of  $h$

شکل 13 نسبت سیگنال به نویز برای سطوح مختلف  $h$

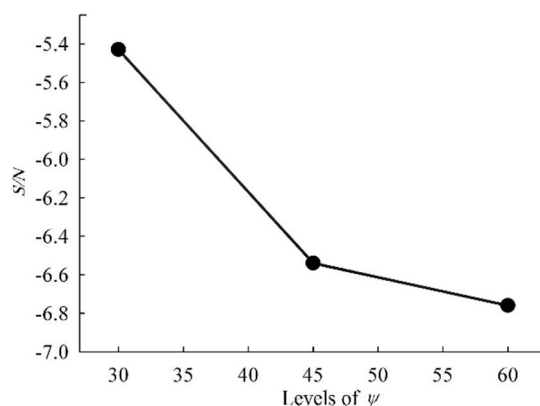


Fig. 14 S/N ratio for levels of  $\psi$

شکل 14 نسبت سیگنال به نویز برای سطوح مختلف  $\psi$

### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرایند شکل‌دهی تدریجی چندمرحله‌ای با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی گردید و با نتایج تجربی صحت‌گذاری گردید. پس از صحت‌گذاری نتایج مدل‌سازی، روش جدیدی برای مسیر ابزار پیشنهاد گردید که ضخامت قطعه نهایی را بهبود می‌دهد. در مسیر پیشنهادی یک مرحله به مراحل شکل‌دهی اضافه شد که در آن، ابزار از مرکز ورق و شعاع مسیر صفر شروع به حرکت می‌کند و رفته‌رفته با افزایش عمق، شعاع مسیر نیز افزایش می‌یابد. سپس با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثر پارامترهای روش جدید ارائه شده، بر روی توزیع ضخامت قطعه نهایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است.

- استفاده از پیش‌فرم مخروطی ارائه شده باعث بهبود توزیع ضخامت قطعه نهایی می‌گردد.

- عمق و زاویه پیش‌فرم ارائه شده تأثیر قابل‌توجهی در توزیع ضخامت قطعه نهایی دارند و با انتخاب بهینه این دو پارامتر می‌توان توزیع ضخامت را یکنواخت‌تر و بهینه‌تر نمود، به گونه‌ای که در نمونه‌های مدل‌سازی شده، افزایش 30 درصدی کمینه ضخامت قطعه نهایی نیز مشاهده گردید.

- در شکل‌دهی چندمرحله‌ای بدون پیش‌فرم، کمینه ضخامت در هر مرحله شکل‌دهی نسبت به مرحله قبلی شکل‌دهی کاهش می‌یابد. اما در شکل‌دهی با پیش‌فرم، با وجود این‌که در مرحله اول شکل‌دهی، کمینه ضخامت کمتر از مرحله بدون پیش‌فرم است، اما در مراحل بعدی کاهش

- 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 فارسی)
- [24] M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, H. Vanhove, J. R. Dufloy, Thickness improvement in single point incremental forming deduced by sequential limit analysis, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 9–12, pp. 2029–2041, 2014.
- [25] M. J. Mirnia, B. M. Dariani, An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 262–270, 2015. (in Persian فارسی)
- [26] C. Henrard, *Numerical simulations of the single point incremental forming process*, PhD thesis, University of Liège, Belgium, 2008.
- [20] M. Vahdati, R. Mahdavinejad, S. Amini, A. Abdullah, K. Abrinia, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop 'ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming' process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 68–76, 2014. (in Persian فارسی)
- [21] A. Zahedi, B. Mollaei-dariani, M. R. Morovvati, Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 1–8, 2015. (in Persian فارسی)
- [22] M. S. H. Mohammadi Najafabadi, A. A. Atai, Numerical and experimental investigation of incremental sheet metal forming parameters and multi-objective optimization using neural genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 167–174, 2014. (in Persian فارسی)
- [23] B. Soltani H. Ghasemi, Experimental investigation on the effective