مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14، ص‌ص 262-270

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای به منظور کنترل نازک‌شدگی در یک مخروط ناقص آلومینیومی

محمد جواد میرنیا[1*]، بیژن ملائی داریانی[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

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

* بابل، صندوق پستی 484، mirnia@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 خرداد 1393

پذیرش: 20 مرداد 1393

ارائه در سایت: 23 مهر 1393

کلید واژگان:

شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای

شکل‌دهی چند مرحله‌ای

نازک شدگی

استراتژی تغییر شکل

شبیه سازی

چکیده

شکل‌دهی تک نقطه‌ای یکی از ساده‌ترین انواع فرایندهای شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی است که مناسب حجم تولید اندک می‌باشد. یکی از مسائل مهم مرتبط با شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای نازک شدگی بیش از حد ورق می باشد که علاوه بر تاثیر منفی بر استحکام قطعه نهایی، کاربرد آن را در تولید قطعاتی با زاویه دیوار زیاد محدود می کند بطوری‌که تولید قطعاتی با دیواره قائم در یک مرحله امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این تحقیق شکل‌دهی تدریجی تک نقطه ای چند مرحله‌ای یک مخروط ناقص با زاویه دیوار °70 از جنس آلومینیوم با هدف بهبود نازک شدگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با ارائه یک استراتژی تغییر شکل دو مرحله‌ای جدید و بدست آوردن پارامترهای تعریف کننده آن بر اساس یک الگوریتم مناسب، نشان داده می‌شود که می‌توان نازک شدگی و زمان انجام فرایند را با طراحی درست شکل‌دهی چند مرحله‌ای بهبود داد. با استفاده از شکل‌دهی دو مرحله‌ای طراحی شده، نازک شدگی قطعه نسبت به شکل‌دهی سه مرحله‌ای بر اساس یکی از متداول‌ترین استراتژی‌های بکارگرفته شده کمتر می‌شود. همچنین توسط استراتژی طراحی شده می‌توان برآمدگی کف ظرف را که یکی از محدودیت‌های شکل‌دهی چند مرحله‌ای است به حداقل رساند.

An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet

Mohammad Javad Mirnia[1*], Bijan Mollaei Dariani[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

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

* P.O.B 484 Babol, Iran, mirnia@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 June 2014
Accepted 11 August 2014
Available Online 15 October 2014

Keywords:
Single point incremental forming
multistage forming
thinning
forming strategy
simulation

ABSTRACT

The single point incremental forming (SPIF) which is appropriate for low volume production, is one of the simplest varieties of incremental sheet metal forming (ISMF) process. One of the critical issues with SPIF is excessive thinning, which affects the strength of the part and confines the applicability of the process to produce only parts with small wall angle. In this paper, multistage SPIF of a truncated cone with 70° wall angle made from an aluminum alloy sheet is studied to alleviate excessive thinning. By proposing a new two-stage forming strategy and obtaining the corresponding parameters using an appropriate algorithm, it is shown that thinning and forming time can be improved through systematic design of multistage forming. The implementation of the designed two-stage SPIF leads to less thinning in the part when compared to either the two or three-stage SPIF based on a conventional strategy. The bulging at the bottom of the part, which is one of the drawbacks of multistage SPIF, can also be controlled by using the proposed strategy.

1- مقدمه

در فرایندهای شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی[1] (ISMF)، پولک فلزی توسط ابزار یا ابزارهایی به صورت موضعی و با روندی تدریجی مورد تغییر شکل قرار می‌گیرد تا به شکل محصول نهایی برسد. این فرایندها برای تولید اندک یا نمونه‌سازی سریع می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. اشکال پیچیده می‌توانند بدون نیاز به قالب خاص و تنها توسط یک ابزار عمومی شکل‌دهی شوند. در یکی از انواع ISMF، قسمتی از ورق که تغییر شکل پیدا می‌کند هیچ تکیه‌گاهی ندارد و چون ورق در هر لحظه تنها در یک نقطه تحت نیروی تغییر شکل قرار می‌گیرد، به آن شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای[2] (SPIF) می گویند[1]. در SPIF یک ابزار معمولا سر کروی با قطری مشخص بر روی یک مسیر ابزار تعریف شده بر اساس شکل نهایی محصول حرکت کرده تا ورق اولیه را به تدریج به شکل نهایی تبدیل نماید.

از محدودیت های موجود در SPIF می‌توان به مدت زمان به نسبت بالای

1- Incremental sheet metal forming

2- Single point incremental forming

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. J. Mirnia, B. Mollaei 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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]

انجام فرایند، نازک شدگی زیاد و دقت ابعادی پایین اشاره کرد [2،۱]. در این تحقیق نازک شدگی زیاد به دلیل تاثیر منفی بر استحکام و شکل‌پذیری ماده مورد توجه قرار می گیرد. قطر ابزار، گام عمودی (میزان نزول عمودی ابزار در مسیر شکل‌دهی) و استراتژی تغییر شکل از جمله پارامترهای موثر بر نازک شدگی در SPIF می باشند. یکی از استراتژی های تغییر شکل موثر بکارگیری شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای می باشد که خود تابعی از تعداد مراحل و شکل قطعه در هر مرحله است.

مانکو و آمبروگیو [3]، با استفاده از طراحی آزمایش اثر قطر ابزار، گام عمودی، ضخامت ورق و زاویه دیوار را بر ضخامت کمینه در شکل‌دهی تدریجی یک مخروط از جنس AA6082 بررسی کردند. بر اساس رابطه ارائه شده منتج از تحلیل نتایج تجربی، قطر ابزار تاثیر چشم‌گیری بر ضخامت کمینه ندارد. با افزایش گام عمودی ضخامت کمینه افزایش می یابد. همیلتون و جسویت [4] SPIF یک بیضی را در نرخ‌های پیشروی و سرعت‌های چرخشی بالا توسط طراحی آزمایش بررسی کردند و تاثیر پارامترهای مذکور را بر کیفیت سطح خارجی قطعه، توزیع ضخامت و میکروساختار مطالعه کردند. آنها دریافتند که توزیع ضخامت و میکروساختار مشابه حالتی است که از سرعت‌های پایین استفاده می‌شود. شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای[1] (TPIF) یک هرم با استفاده از کد تجاری آباکوس[2] به همراه المان‌های پوسته توسط چاو و همکاران [5] شبیه‌سازی شد. آنها نتیجه گرفتند که نازک شدگی ورق در مسیر ابزار مارپیچ نسبت به مسیر دایره‌ای شکل، کمتر است و افزایش شعاع ابزار سبب بهبود توزیع ضخامت و نازک شدگی می‌شود در حالی‌که گام عمودی تاثیر قابل توجهی بر ضخامت کمینه ندارد. با استفاده از آنالیز حد متوالی[3] و صحت سنجی‌های تجربی، میرنیا و همکاران [6] تاثیر قطر ابزار و گام عمودی را بر توزیع ضخامت در SPIF یک مخروط ناقص مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها بیان کردند که افزایش قطر ابزار سبب افزایش کشش و کاهش ضخامت می شود. همچنین افزایش گام عمودی تا یک میزان مشخص سبب بهبود نازک شدگی می شود. قاسمی و سلطانی [7] با بررسی تجربی SPIF یک هرم ناقص آلومینیومی دریافتند که کاهش سرعت چرخش ابزار سبب بهبود ضخامت کمینه می شود. همچنین بکارگیری مسیر ابزار حلزونی به یکنواخت تر شدن توزیع ضخامت کمک می‌کند. با استفاده از شبیه‌سازی عددی SPIF یک هرم ناقص، محمدی و همکاران [8] نشان دادند که افزایش قطر ابزار و گام عمودی منجر به نازک شدگی بیشتر می‌شود در حالی‌که ضریب اصطکاک بین ابزار و ورق تاثیری چندانی بر توزیع ضخامت ندارد.

یانگ و کیم [9] بصورت ساده و با فرض تغییر شکل برشی در SPIF و با استفاده از المان‌های مثلثی، توزیع ضخامت را برای اشکال غیرمتقارن محوری محاسبه کردند. سپس یک فرایند دو مرحله‌ای را معرفی نمودند که در آن مناطقی که در مرحله دوم کمتر تغییر شکل پیدا می‌کنند در مرحله اول دچار تغییر شکل زیاد می‌شوند و بالعکس. آنها نشان دادند که با فرایند دو مرحله‌ای به جای یک مرحله توزیع ضخامت بهبود پیدا می‌کند و سبب افزایش شکل پذیری ورق می‌شود. یانگ و جسویت [10] بصورت تجربی SPIF دو مرحله‌ای یک مخروط را بررسی کردند. با انجام فرایند بصورت دو مرحله‌ای شکل پذیری با تاخیر انداختن شکل‌گیری مناطق با نازک شدگی بیش از حد

$$\sigma = 138(0.02 + \varepsilon)^{0.25} \quad \text{(MPa)} \qquad (1)$$

افزایش پیدا کرد، اما سبب کمتر شدن نازک شدگی نشد و تنها محل نازک شدگی را در یک مخروط $70°$ تغییر داد. SPIF یک ظرف سیلندری شکل با استفاده از پنج مرحله بصورت تجربی توسط دوفلو و همکاران [11] بررسی شد. آنها شکل های میانی را بصورت افزایش زاویه دیوار به میزان $10°$ در هر مرحله در نظر گرفتند. آنها استفاده از چند مرحله شکل دادن در مقایسه با شکل‌دهی تدریجی یک مرحله‌ای را بعنوان راهکاری برای به تاخیر انداختن نازک شدگی زود هنگام معرفی کردند. یکی از عیوب این استراتژی برآمدگی کف ظرف می باشد. اسکجودت و همکاران [12] بصورت تجربی و عددی تاثیر جهت حرکت ابزار بین مراحل متوالی در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه ای را بر توزیع کرنش و توزیع ضخامت محصول نهایی بررسی کردند. آنها ساخت یک ظرف استوانه ای در پنج مرحله را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که جهت حرکت ابزار پارامتر تاثیر گذاری می باشد. با توجه به این مطلب که استراتژی تغییر شکل در SPIF می تواند یک پارامتر بهینه سازی باشد، سه استراتژی تغییر شکل سه مرحله‌ای برای تولید مخروط های ناقص با زوایای دیواره $60°$ و $70°$ توسط مانکو و همکاران [13] بررسی شد. در بهترین حالت توسط یکی از استراتژی های بیان شده، نازک شدگی از 75% در شکل‌دهی تک مرحله‌ای یک مخروط $70°$ به 65% در شکل‌دهی سه مرحله‌ای کاهش یافت. ولی استراتژی مذکور تاثیر مناسبی بر دقت ابعادی قطعه مورد نظر ندارد. ژانگ و همکاران [14] براساس شبیه‌سازی عددی فرایند هیدرو بالجینگ یک نیمکره، یک استراتژی چند مرحله‌ای برای SPIF ارائه و توزیع ضخامت را مورد بررسی قرار دادند. در استراتژی بیان شده، شکل‌های میانی همان شکل‌های بدست آمده توسط فرایند هیدروبالجینگ در زمان‌های متفاوت می باشد. میرنیا و همکاران [2] با ارائه یک استراتژی تغییر شکل سه مرحله‌ای جدید برای SPIF یک مخروط آلومینیومی با زاویه دیوار $70°$، نازک شدگی را از مقدار 74% در حالت تک مرحله‌ای به 51% در حالت سه مرحله‌ای کاهش دادند که نسبت به استراتژی‌های قبلی مقایسه شده، کمترین مقدار نازک شدگی می باشد.

از آنجا که شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای می‌تواند بطور موثر نازک شدگی را کنترل نماید، در این تحقیق SPIF چند مرحله‌ای یک مخروط ناقص آلومینیومی با زاویه دیوار $70°$ با هدف کنترل نازک شدگی مورد توجه می‌باشد. در همین راستا، یک شکل‌دهی دو مرحله‌ای جدید براساس استراتژی سه مرحله‌ای بیان شده در [2] به نحوی طراحی می‌شود که میزان نازک شدگی و برآمدگی کف ظرف حداقل گردد. سپس بهبود نازک شدگی توسط استراتژی مذکور با استراتژی‌های بکار گرفته شده قبلی مقایسه می شود. شایان ذکر است که برخلاف [2]، در این پژوهش برای طراحی استراتژی تغییر شکل چند مرحله‌ای یک الگوریتم مناسب ارائه می شود.

2- آزمون تجربی

در پژوهش حاضر، شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای یک مخروط ناقص از جنس AA1050 با قطر بزرگ 129 mm، ارتفاع 30 mm و زاویه دیوار $70°$ مطابق شکل 1 مورد توجه می‌باشد. با استفاده از تست کشش تک محوری بر روی نمونه‌ای از ورق در جهت نورد براساس استاندارد ASTM E8M-04 [15] و با انطباق رابطه کرنش سختی سوئیفت با نمودار تنش- کرنش حقیقی بدست آمده براساس روش انطباق حداقل مجموع مربعات، رابطه کرنش سختی ورق AA1050 بصورت رابطه 1 بیان می‌شود:

که در آن ε کرنش پلاستیک می باشد.

در ابتدا پولک‌های فلزی با ابعاد 225 mm× 225 mm از ورق‌های اولیه با ضخامت 1/5 mmجدا می‌شوند. پولک فلزی سپس توسط ورق گیرهای

1- Two point incremental forming
2- Abaqus
3- Sequential limit analysis (SLA)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]

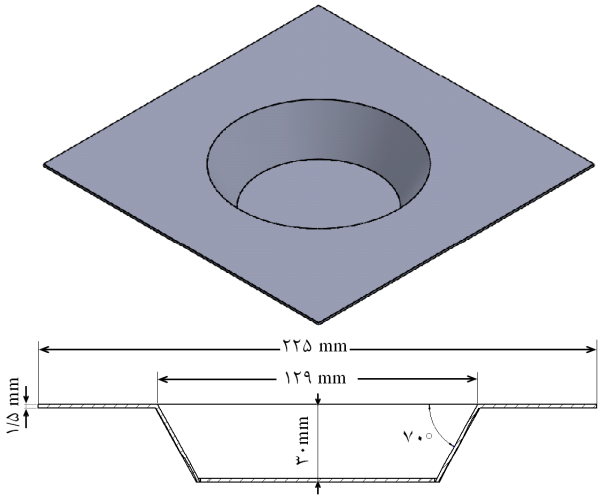
مناسب بر روی صفحه پشتیبان بصورت کاملا محکم فشرده می‌شود، بطوری‌که در حین شکل‌دهی به ورق اجازه حرکت داده نشود. صفحه پشتیبان دارای یک روزنه دایره‌ای شکل به قطر 131 mm می باشد. مجموعه ورق و صفحه پشتیبان بر روی یک تکیه‌گاه مناسب که بر روی بستر دستگاه فرز CNC نصب شده است قرار می‌گیرد. ابزار شکل‌دهی میله‌ای به قطر 10 mm از جنس فولاد ابزار سرد کار می‌باشد که انتهای آن بصورت نیم کروی است. برای افزایش مقاومت به ساییدگی قسمت نیم کروی توسط نیترایدتیتانیم (TiN) پوشش سطحی می‌شود. برای کاهش اصطکاک از روغن هیدرولیک که توسط سیستم خنک‌کاری ماشین بصورت پیوسته به محل تماس سر ابزار و ورق تغذیه می شود، استفاده می‌شود. مجموعه بیان شده در بالا در شکل 2 نشان داده شده است. دستگاه فرز CNC مورد استفاده سه محوره می باشد. برای شکل‌دهی تدریجی از مسیر ابزار Z ثابت[1] استفاده می شود. در این مسیر، ابزار هر بار یک مسیر دایره‌ای شکل را با نرخ پیشروی 2000 mm/min طی می‌کند و سپس به مقدار گام عمودی که برابر است با 1 mm به سمت ورق نزول می‌کند.

بعد از انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی به منظور اندازه گیری شکل سه بعدی قطعه، قطعات بر روی دستگاه CMM مجهز به اسکنر خطی لیزری قرار می گیرند. با اسکن کردن سطح جلو و پشت قطعه شکل دیجیتال قطعه توسط نرم افزار فوکس اینسپکشن[2] ساخته می‌شود. شکل 3- الف و ب ابر نقاط[3] و شکل دیجیتال مربوطه را برای یک قطعه نشان می‌دهد. در نهایت با محاسبه انحراف سطح رویی و پشتی قطعه‌کار، توزیع ضخامت مطابق شکل 3- ج بدست می‌آید. در نهایت توسط یک کد نوشته شده در نرم افزار متلب[4]، میانگین ضخامت و نازک شدگی در محیط ظرف محاسبه شده و نمودار نازک شدگی به شعاع ظرف (شعاع نسبت به محور تقارن قطعه) ترسیم می‌شود.

نازک‌شدگی بصورت رابطه 2 تعریف می‌شود:

$$Th = \frac{t_0 - t}{t_0} \times 100 \qquad (2)$$

که t_0 و t به ترتیب ضخامت اولیه و فعلی مکان مورد نظر بر روی قطعه کار می‌باشند. برای هندسه قطعه کار نیز از روند مشابهی استفاده می‌شود. دقت



شکل 1 ابعاد ظرف مخروطی ناقص مورد نظر در پژوهش حاضر

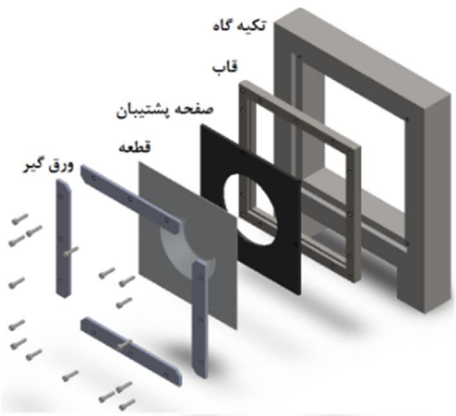
اسکنر لیزری مذکور برابر با ±15 μm است.

1- Z-Constant
2- Focus Inspection 9.3
3- Point cloud
4- MATLAB

3- شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای

بکارگیری مناسب شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای می‌تواند بطور موثر نازک شدگی را کاهش دهد. در این راستا استراتژی تغییر شکل که خود شامل تعداد مراحل شکل‌دهی و هندسه قطعه در هر مرحله می باشد، دارای اهمیت زیادی است. یکی از استراتژی‌های متداول برای شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای یک مخروط که توسط دوفلو و همکاران [11] ارائه شد، در شکل 4 نشان داده شده است. شکل 4 تنها تغییر شکل سه مرحله‌ای را نشان می‌دهد، در صورتی‌که قابل تعمیم به حالت دو مرحله‌ای و بیشتر نیز می باشد. با توجه به مرور انجام شده توسط میرنیا [16]، استراتژی مذکور در میان استراتژی‌های ارائه شده تا کنون، یکی از کارآمدترین استراتژی‌ها به منظور بهبود نازک شدگی می‌باشد. در این استراتژی که از این پس به آن "استراتژی متداول" اتلاق می‌شود، در مراحل میانی مخروط‌هایی با زاویه دیواری کمتر از مخروط نهایی شکل می‌گیرند در حالی‌که قطر ($2R$) و ارتفاع (h) آنها مساوی مخروط نهایی است. دوفلو و همکاران [11] بیان داشتند که برای جلوگیری از چین خوردن دیوار ظرف در حین شکل‌دهی میزان افزایش دیوار ظرف در هر مرحله برابر با °10 در نظر گرفته شود. یکی از معایب اصلی استراتژی متداول، برآمدگی کف ظرف و پله‌ای شدن آن می باشد. شکل5 برآمدگی کف ظرف مخروطی را در شکل‌دهی چهار مرحله‌ای نشان می‌دهد.

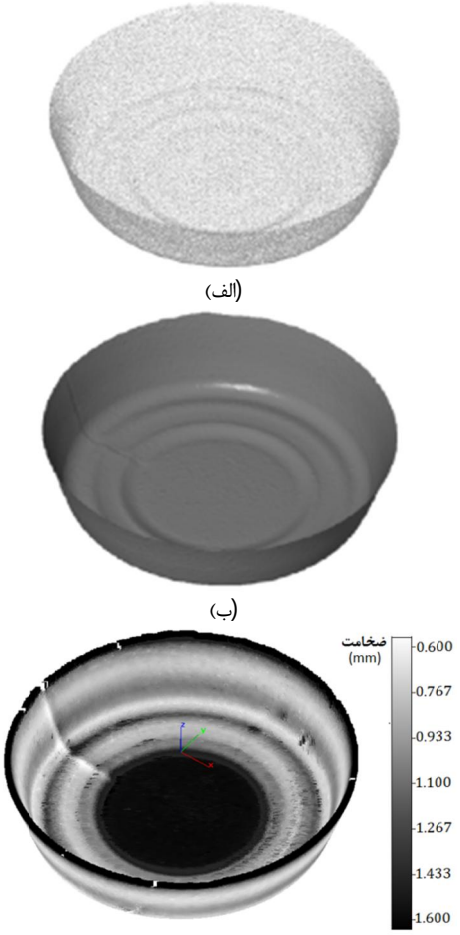
(الف)



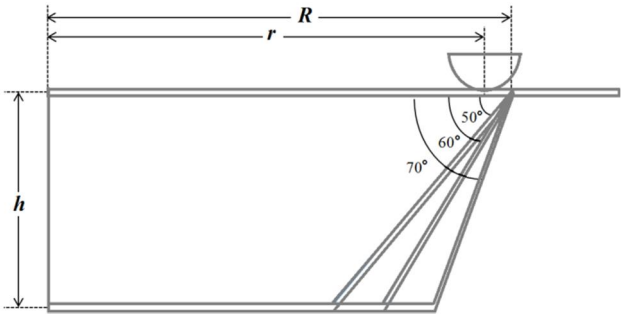
(ب)

شکل 2 الف) نمایی از تجهیزات تجربی بر روی دستگاه فرز CNC و ب) نقشه انفجاری تجهیزات

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]



شکل 3 الف) ابر نقاط، ب) شکل دیجیتال و ج) توزیع ضخامت بدست آمده از اسکن کردن لیزری یک مخروط °70



شکل 4 شکل‌دهی تدریجی تک نقطه ای سه مرحله‌ای بر اساس "استراتژی متداول"

دلیل اصلی ایجاد یک چنین برآمدگی در کف ظرف، شکل‌دهی مخروط‌های میانی با ارتفاع یکسان با مخروط نهایی است. بطوری‌که در هر مرحله، کف ظرف مخروطی به دلیل حرکت صلب، مقداری پایین‌تر از حالت قبل قرار می گیرد.

با در نظر گرفتن مخروط‌های میانی با ارتفاعی کمتر از مخروط مرحله بعد به میزان مناسب، می‌توان برآمدگی مذکور را حتی الامکان کاهش داد. از طرفی به منظور گسترش هر چه بیشتر منطقه تغییر شکل به قسمت‌هایی از ورق فلزی که در شکل‌دهی تک مرحله‌ای تحت تغییر شکل قرار نمی‌گیرند، می‌توان از مخروط‌های میانی با قطر بزرگی کوچکتر از مخروط مرحله بعد استفاده کرد. بر این اساس می‌توان یک استراتژی جدید تغییر شکل مطابق شکل 6 ارائه داد که از این پس به آن "استراتژی بهبود یافته" اتلاق می شود.

استراتژی بهبود یافته تنها برای حالات دو مرحله‌ای نشان داده شده است که موضوع مورد بحث مقاله حاضر می‌باشد. استراتژی بهبود یافته می تواند برای تعداد مراحل بیشتر نیز بکار گرفته شود[2]. در استراتژی بهبود یافته مانند استراتژی متداول، افزایش دیوار ظرف مخروط‌های میانی برابر با °10 در نظر گرفته می‌شود. در شکل 6 به جای نشان دادن شعاع بزرگ مخروط‌ها، شعاع مربوط به محل اولیه سر ابزار برای شکل دادن یک مخروط نشان داده شده است. ارتباط بین شعاع بزرگ یک مخروط R و شعاع مکان اولیه سر ابزار r توسط رابطه هندسی 3 برای یک مخروط با زاویه دیوار a بیان می گردد:

$$R = r + \frac{d_t}{2}\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

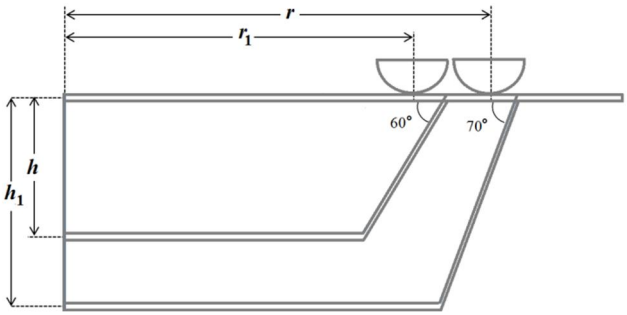
که در آن dt قطر ابزار می‌باشد.

برخلاف استراتژی متداول، استراتژی بهبود یافته دارای متغیرهای تصمیم گیری می‌باشد که باید با هدف کمینه‌سازی نازک شدگی ظرف مخروطی بدست آیند. متغیرهای مذکور شامل مکان اولیه سر ابزار در مراحل میانی (r_i) و ارتفاع مخروط‌های میانی (h_i) می‌باشند. با توجه به شکل‌های 4 و 6 می توان مشاهده نمود که استراتژی متداول یک حالت خاصی از استراتژی بهبود یافته می‌باشد.

4- مدل‌سازی شکل‌دهی تدریجی

برای کمینه‌سازی نازک شدگی در شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای یک مخروط با استفاده از استراتژی بهبود یافته (شکل 6) نیاز به یک مدل مناسب از فرایند جهت پیشگویی توزیع ضخامت و نازک شدگی در قطعه می‌باشد. به خاطر ماهیت تغییر شکل تدریجی و موضعی ورق در SPIF، استفاده از کدهای تجاری المان محدود نیازمند صرف زمان زیاد می‌باشد. به همین منظور مدل ها و روش‌هایی به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی ارائه شده است[6]. در این میان میرنیا و همکاران [16،6،2] برای پیش‌بینی توزیع ضخامت در قطعات مخروطی شکل داده شده توسط SPIF از آنالیز حد متوالی[1] (SLA) بهره گرفتند. آنها با مقایسه نتایج حاصل از مدل SLA با نتایج بدست آمده از مدل معادل و مشابه ایجاد شده در کد تجاری المان محدود آباکوس و آزمون

شکل 5 برآمدگی کف ظرف در شکل‌دهی تدریجی چهار مرحله‌ای بر اساس استراتژی متداول



شکل 6 "استراتژی بهبود یافته" برای شکل‌دهی تدریجی تک نقطه ای دو مرحله‌ای

1- Sequential limit analysis (SLA)

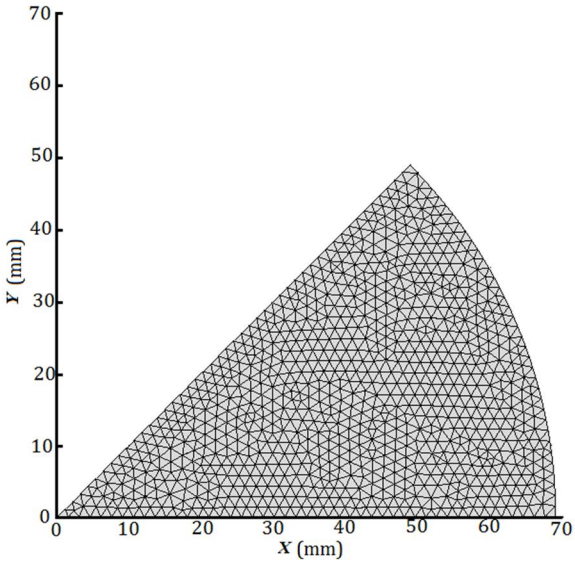
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]

تجربی نشان دادند که مدل SLA با صرف زمان کمتر و دقت بیشتری می‌تواند نازک شدگی و توزیع ضخامت را پیش‌بینی نماید. به همین جهت در این تحقیق از مدل SLA توسعه داده شده توسط نویسندگان حاضر که بصورت یک کد خانگی در نرم افزار متلب نوشته و بطور کامل در [16] شرح داده شده است استفاده می شود. شایان ذکر است که در مدل SLA مذکور یک قطاع °45 از ورق برای شبیه سازی SPIF یک مخروط ناقص بکار گرفته می شود. از آنجا که در شکل‌دهی تدریجی، ابزار بصورت موضعی ورق اولیه را به هندسه نهایی تغیر شکل می‌دهد، ورق فلزی و فرایند باید بطور کامل مدل-سازی شوند. اما در شکل‌دهی یک مخروط ناقص، که یک قطعه متقارن محور می‌باشد، می‌توان به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی قسمتی از ورق را به جای کل ورق با دقت مناسبی مدل‌سازی کرد [18،17]. شکل 7 مدل °45 از ورق فلزی که توسط 1722 المان پوسته مثلثی مش‌بندی شده است و توسط آنالیز حد متوالی بکارگرفته می‌شود را در محیط نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد. برای مشاهده جزئیات مدل SLA به منظور شبیه‌سازی فرایند SPIF تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای و نیز صحت سنجی نتایج حاصل به [۲،6] رجوع شود.

5- استراتژی تغییر شکل بهبود یافته

با استفاده از مدل بیان شده در بخش قبل می‌توان متغیرهای تصمیم‌گیری موجود در استراتژی بهبود یافته را طوری یافت تا نازک شدگی در ظرف مخروطی با هندسه بیان شده در قسمت 2 کمینه شود. با توجه به اینکه h_i ها باید طوری بدست آیند تا برآمدگی در کف ظرف مخروطی حتی الامکان کاهش یابد، تنها پارامترهای شرکت کننده در کمینه سازی نازک شدگی، r_i ها می باشند. در ادامه طراحی شکل‌دهی دو مرحله‌ای بهبود یافته شرح داده می شود.

در شکل‌دهی دو مرحله‌ای با استفاده از استراتژی بهبود یافته (شکل 6-الف)، لازم است که در ابتدا پارامتر h_1 بازای هر مقدار مورد بررسی از r_1 طوری بدست آید که برآمدگی کف ظرف حداقل شود. برآمدگی کف ظرف در شکل‌دهی دو مرحله‌ای در شکل 8 نشان داده شده است. در این شکل منظور از شعاع، فاصله از محور تقارن قطعه کار مخروطی می باشد. برای کمی سازی

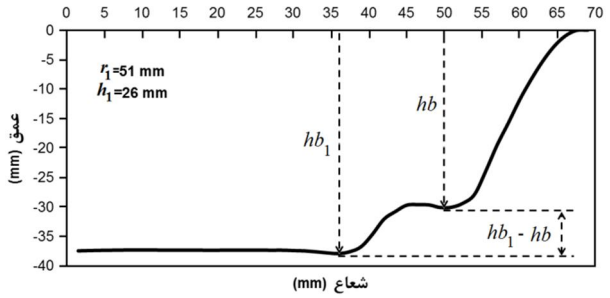


شکل 7 مدل °45 شبکه‌بندی شده توسط 1722 المان مثلثی مورد استفاده در آنالیز حد متوالی

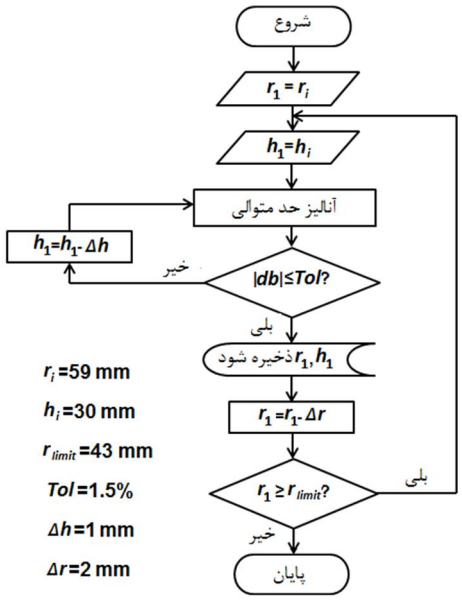
مقدار برآمدگی، پارامتر db توسط رابطه (4) تعریف می شود:

$$db = \frac{hb_1 - hb}{hb} \times 100 \qquad (4)$$

که hb و hb_1 به ترتیب بیشترین ارتفاع ظرف در مکان نهایی ابزار در مرحله دوم و اول شکل‌دهی می‌باشند که در شکل 8 نشان داده شده است. hb با توجه به ارتفاع ظرف در مرحله دوم (h) حدودا برابر با 30 mm می باشد، در حالی‌که مقدار hb_1 به ارتفاع ظرف در مرحله اول (h_1) و مقدار حرکت صلب کف ظرف در مرحله دوم بستگی دارد. در این پژوهش براساس تجربه بدست آمده از شبیه‌سازی‌های متعدد توسط مدل SLA، برآمدگی مناسب بصورت $|db| \leq 1.5\%$ انتخاب می شود. به منظور یافتن h_1 مناسب بازای یک مقدار r_1، از الگوریتم نشان داده شده در شکل 9 استفاده می‌شود. مقادیر r_1 در بازه $43 \leq r_1 \leq 59$ مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای هر r_1 مقدار h_1 در ابتدا برابر با 30 mm (ارتفاع ظرف نهایی) در نظر گرفته می شود. سپس بعد از انجام شبیه سازی توسط مدل SLA، مقدار db ارزیابی می‌شود. در صورتی که $|db| \geq 1.5\%$ باشد، شبیه‌سازی با مقادیر کمتری از h_1 دوباره انجام می شود (مقدار کاهش h_1 در هر سعی برابر است با Δh=1mm) تا زمانی‌که $|db| \leq 1.5\%$ شود. لازم به ذکر است که مقادیر کمتر از h_1 بدست آمده توسط الگوریتم ذکر شده نیز می‌توانند سبب $|db| \leq 1.5\%$ شود، ولی از آنجا که کاهش بیشتر ارتفاع ظرف در مرحله اول (h_1) می‌تواند تاثیر منفی بر نازک شدگی ظرف داشته باشد، از آنها استفاده نمی‌شود.



شکل 8 برآمدگی کف ظرف مخروطی در شکل‌دهی دو مرحله‌ای با بکارگیری h_1 نامناسب در یک مقدار از r_1 پیش بینی شده توسط SLA



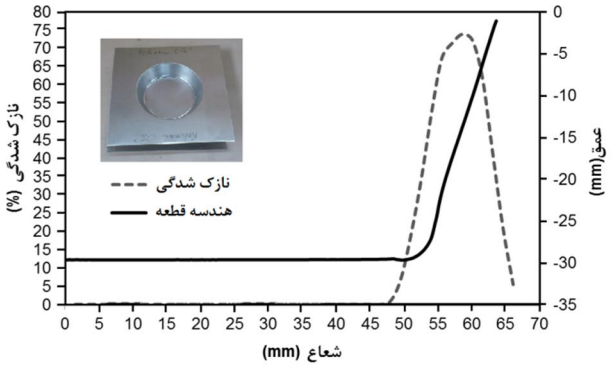
شکل 9 الگوریتم روش بدست آوردن h_1 مناسب برای r_1 های مورد بررسی به منظور حداقل کردن برآمدگی db

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]

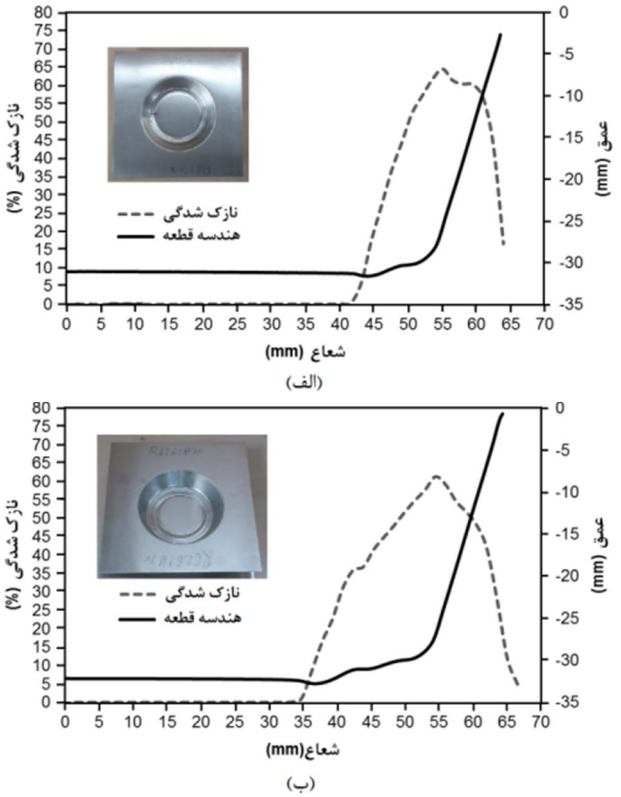
6- نتایج و بحث

شکل 10 هندسه و توزیع نازک شدگی تجربی یک مخروط با زاویه دیوار °70 و مشخصات هندسی و فرایندی بیان شده در قسمت 2 را که بصورت تک مرحله‌ای شکل داده شده است نشان می‌دهد. در این شکل فاصله شعاعی نسبت به محور تقارن قطعه کار می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می شود بیشترین میزان نازک شدگی مربوط به شعاع 58/6 mm بر روی دیوار ظرف است و برابر با 74% می‌باشد. از آنجا که در SPIF تک مرحله‌ای یک مخروط، ابزار تنها بخشی کوچکی از ورق را تحت تغییر شکل قرار می دهد (دیوار ظرف شعاع بین 50mm تا 65mm) و مابقی قسمت‌ها (کف ظرف شعاع کمتر از 50mm) تنها حرکت صلب داشته، نازک شدگی بسیار زیاد می باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در قسمت کف ظرف نازک شدگی صفر است. شکل 11 نتایج تجربی مربوط به هندسه قطعه و توزیع نازک شدگی برای شکل‌دهی های دو و سه مرحله‌ای با استفاده از استراتژی متداول را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 11 می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد مراحل شکل‌دهی درصد بیشتری از ورق فلزی در ناحیه کف ظرف دچار تغییر شکل می شود. این مطلب از نازک شدگی ناحیه‌ای از کف ظرف که در تعداد مراحل کمتر برابر با صفر بود، استنباط می‌شود. در نتیجه با افزایش تعداد مراحل شکل‌دهی از حالت تک مرحله‌ای و گسترده‌تر شدن منطقه تغییر شکل به ناحیه کف ظرف میزان نازک شدگی بیشینه از 74% به 65% در حالت دو مرحله‌ای متداول و به 61% در حالت سه مرحله‌ای متداول کاهش می یابد. با مقایسه هندسه نشان داده شده از قطعه در شکل‌های 10 و 11 می‌توان برآمدگی کف ظرف را در حالت چند مرحله‌ای متداول مشاهده نمود. همان‌طور که بیان شد یکی از ویژگی‌های استراتژی بهبود یافته کنترل برآمدگی کف ظرف می‌باشد. شکل 12 براساس نتایج حاصل از مدل SLA تاثیر ارتفاع ظرف در مرحله اول شکل‌دهی دو مرحله‌ای (h_1) را بر برآمدگی نهایی کف قطعه نشان می‌دهد. با انتخاب مناسب ارتفاع مخروط میانی می توان برآمدگی را برای هر مقدار از r_1 حداقل کرد. برای مثال شکل 13 مقدار برآمدگی پیش بینی شده توسط مدل SLA در یک ظرف مخروطی قبل و بعد از بکارگیری الگوریتم بیان شده در شکل 9 را نشان می دهد.

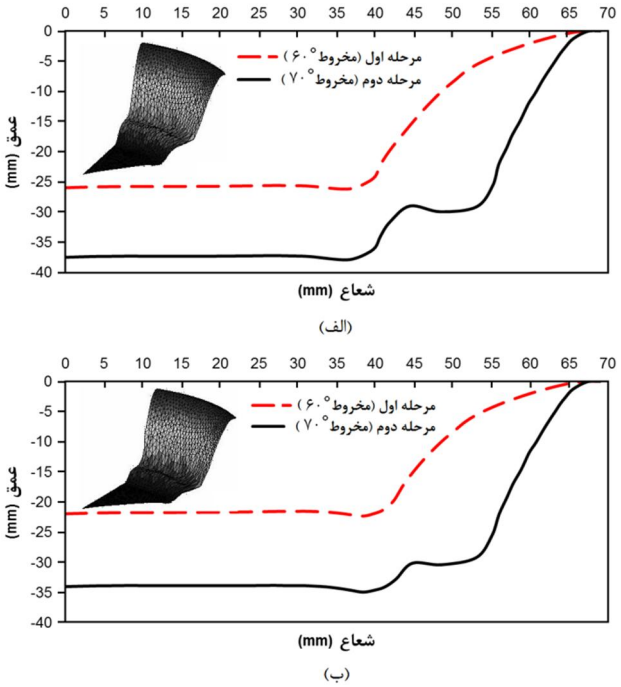
حال با داشتن r_1 ها و h_1 ها هندسه مخروط‌های میانی در شکل‌دهی دو مرحله بهبود یافته مشخص می‌باشد. با مقایسه بیشترین مقدار نازک شدگی برای مقادیر مختلف r_1، مقدار r_1 مناسبی را می‌توان یافت که با استفاده از آن نازک شدگی در ظرف مخروطی کمینه شود. شکل 14 نازک شدگی بیشینه را برای مقادیر مختلف r_1 نشان می‌دهد. برای ارزیابی نتایج حاصل از SLA، مقادیر بدست آمده از آزمون‌های تجربی نیز در شکل 14 نشان داده شده است.



شکل 10 هندسه و نازک شدگی تجربی یک مخروط °70 در SPIF تک مرحله‌ای



شکل 11 هندسه و نازک شدگی تجربی یک مخروط °70 در SPIF الف) دو مرحله ای و ب) سه مرحله ای بر اساس استراتژی متداول



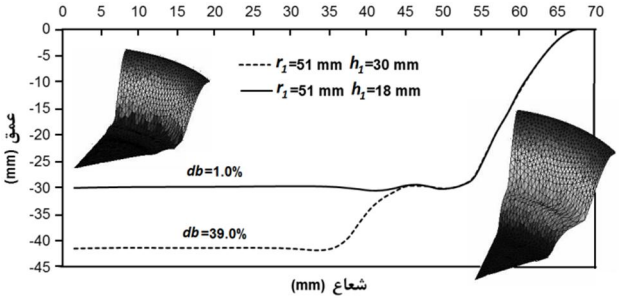
شکل 12 برآمدگی کف ظرف برای r_1=51 mm در شکل‌دهی دو مرحله ای بهبود یافته پیش بینی شده توسط مدل SLA: الف) h_1=26 mm ب) h_1=22 mm

با توجه به شکل 14 می‌توان ملاحظه کرد که با تغییر r_1 میزان نازک شدگی بیشینه در ظرف مخروطی °70 تغییر می‌یابد. آنالیز حد متوالی با دقت مناسبی روند تغییرات تجربی را پیش‌بینی می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود آنالیز حد متوالی مقداری از r_1 که بازای آن نازک شدگی کمینه

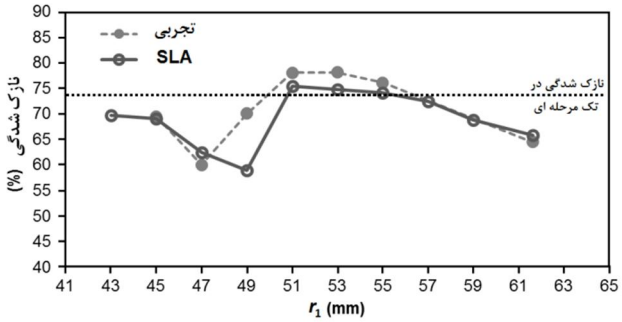
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]

جدول 1 مقادیر تعیین کننده هندسه مراحل اول و نهایی شکل‌دهی دو مرحله ای بهبود یافته

ردیف	مرحله اول (مخروط ۶۰°)		مرحله دوم (مخروط ۷۰°)		نازک شدگی بیشینه	
	r_1 (mm)	h_1 (mm)	r (mm)	h (mm)	Exp.(%)	SLA (%)
۱	۴۳	۱۰	۶۱	۳۰	–	۶۹/۷۵
۲	۴۵	۱۲	۶۱	۳۰	۶۹/۴۷	۶۹/۱۰
۳	۴۷	۱۴	۶۱	۳۰	۶۰/۰۰	۶۲/۴۰
۴	۴۹	۱۶	۶۱	۳۰	۷۰/۰۷	۵۸/۹۵
۵	۵۱	۱۸	۶۱	۳۰	۷۸/۰۷	۷۵/۳۶
۶	۵۳	۲۰	۶۱	۳۰	۷۸/۱۳	۷۴/۸۰
۷	۵۵	۲۲	۶۱	۳۰	۷۶/۰۷	۷۴/۰۸
۸	۵۷	۲۴	۶۱	۳۰	–	۷۲/۴۳
۹	۵۹	۲۷	۶۱	۳۰	–	۶۸/۷۵
۱۰	۶۱/۶۱	۳۰	۶۱	۳۰	۶۴/۹۷	۶۵/۷۶



شکل 13 میزان برآمدگی (db) قبل (h_1=30 mm) و بعد (h_1=18 mm) از بکارگیری الگوریتم بیان شده برای r_1=51 mm

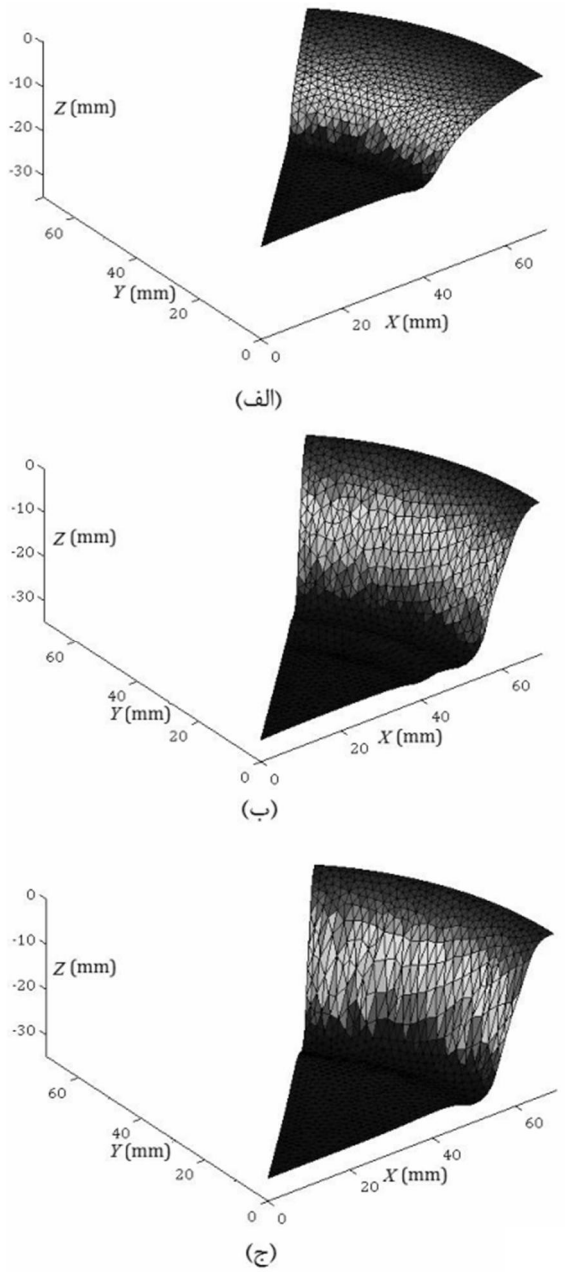


شکل 14 تغییرات نازک شدگی بیشینه در شکل‌دهی دو مرحله‌ای با r_1 (خط چین نازک شدگی بیشینه در حالت تک مرحله‌ای را نشان می‌دهد)

می‌شود را با اختلاف 2mm (4% خطا) نسبت به مقدار تجربی پیش‌بینی می‌کند. همچنین میزان نازک شدگی کمینه پیش‌بینی شده توسط آنالیز حد متوالی و بدست آمده توسط آزمون تجربی با استفاده از شکل‌دهی دو مرحله‌ای بهبود یافته به ترتیب برابر با 59% و 60% است. در نتیجه با استفاده از مدل SLA می‌توان ابتدا محدوده مقدار بهینه برای r_1 را پیش‌بینی کرده و سپس با انجام چند آزمون تجربی مقدار دقیق را بدست آورد.

این امر از سعی و خطای تجربی که زمان بر و پر هزینه است تا حدود زیادی می‌کاهد. براساس نتایج تجربی شکل 14 و جدول 1 مقادیر مناسب برای r_1 و h_1 که بازای آنها نازک شدگی در شکل‌دهی دو مرحله‌ای کمینه میشود به ترتیب برابر با 47mm و 14mm است.

هندسه بدست آمده از مدل SLA برای مخروط‌های میانی و نهایی شکل‌دهی دو مرحله‌ای براساس r_1 و h_1 محاسبه شده از کمینه‌سازی نازک شدگی و نیز



شکل 15 هندسه تغییرشکل پیش‌بینی شده توسط مدل SLA: الف) مرحله اول و ب) مرحله دوم از استراتژی دو مرحله‌ای بهبود یافته و ج) شکل‌دهی تک مرحله‌ای

برای حالت تک مرحله‌ای در شکل 15 نشان داده می‌شود. با مقایسه المان‌ها در شکل‌دهی دو مرحله‌ای با شکل‌دهی تک مرحله‌ای، می توان دریافت که المان‌ها در حالت تک مرحله‌ای به دلیل تمرکز تغییر شکل بر روی دیوار ظرف تحت تغییر شکل‌های شدید قرار می‌گیرند. حال آنکه با بکارگیری استراتژی تغییر شکل دو مرحله‌ای بهبود یافته و مشارکت بیشتر ناحیه کف ظرف در تغییر شکل، از اعوجاج شدید المان‌ها جلوگیری می‌شود.

شکل 16 هندسه مخروط و توزیع نازک شدگی بدست آمده از آزمون تجربی در مرحله اول و دوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین نازک شدگی با استفاده از شکل‌دهی دو مرحله‌ای بهبود یافته برابر با 60 % است. در مرحله اول شکل‌دهی به دلیل فاصله نسبتا زیاد ابزار از صفحه پشتیبان، ورق در شعاع های بیشتر از 47mm (شکل 16-الف) بیشتر دچار خمش شده و در این محدوده ابزار و ورق هیچ‌گونه تماسی ندارند. لازم به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]

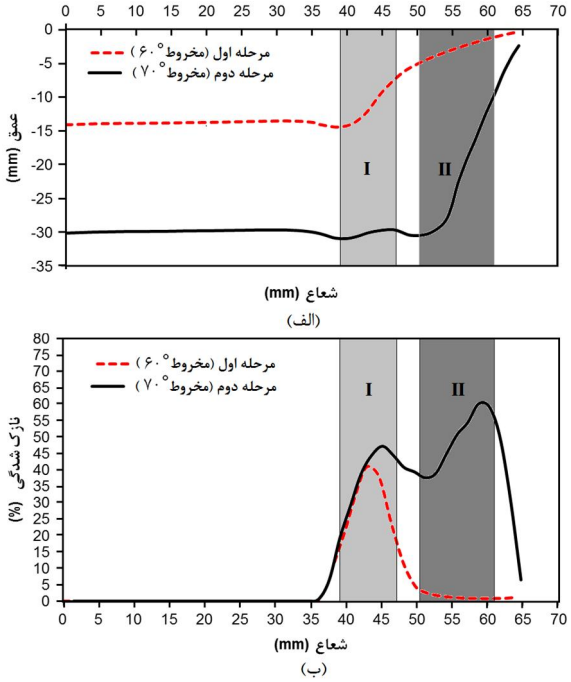
یادآوری می باشد که در مرحله اول فاصله شعاعی مرکز ابزار از محور تقارن مخروط r_1 برابر با 47mm است. به همین جهت میزان نازک شدگی در شعاعهای بیشتر از 47mm با توجه به شکل 16-ب ناچیز است. در شکل 16 منطقه تحت تماس مستقیم ابزار در مرحله اول با (I) نشان داده شده است.

در مرحله نهایی شکل‌دهی، ابزار تنها منطقه تحت خمش در مرحله قبل را مورد تغییر شکل قرار داده و به شکل نهایی یعنی مخروط °70 تبدیل می کند که در شکل با (II) نشان داده شده است. این امر سبب نازک شدگی کمتر دیوار ظرف نسبت به حالت دو و سه مرحله‌ای متداول می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود منطقه تحت تماس مستقیم ابزار در مرحله اول در مرحله دوم با ابزار تماس ندارد. در شکل 16 تنها منطقه‌ای که مسیر سر ابزار پوشش می‌دهد نشان داده شده است. شکل 17 توزیع نازک شدگی تجربی در مراحل میانی و انتهایی شکل‌دهی دو و سه مرحله‌ای متداول را نشان می دهد. در استراتژی‌های مذکور (شکل 4) برخلاف استراتژی بهبود یافته به دلیل حرکت ابزار بر روی قسمتی از ورق که در مرحله قبلی نیز تحت تغییر شکل قرار گرفته و دچار نازک شدگی شده است، میزان نازک شدگی نهایی بیشتر از استراتژی متداول می‌باشد. همان‌طور که از مقایسه نازک شدگی مربوط به کف ظرف در شکل‌های 16 و 17 ملاحظه می‌شود، در شکل‌دهی دو مرحله‌ای بهبود یافته نسبت به حالت تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای متداول درصد بیشتری از ورق تحت تغییر شکل قرار گرفته است در حالی‌که نسبت به حالت سه مرحله متداول مقداری کمتر دچار تغییر شکل شده است. بر اساس مقایسه انجام شده در شکل 18 میزان نازک شدگی در حالت دو مرحله‌ای بهبود یافته کمتر از سه استراتژی تغییر شکل دیگر می‌باشد. میزان گسترش منطقه تغییر شکل به کف ظرف در استراتژی های تغییر شکل متفاوت از اثر ابزار بر روی کف قطعه کار در نمونه های تجربی نشان داده شده در شکل 18 مشهود می باشد. همچنین شکل 18 مدت زمان نسبی شکل‌دهی استراتژی های متفاوت را نسبت به حالت تک مرحله‌ای مقایسه می کند. بر همین اساس مدت زمان نسبی شکل‌دهی تک مرحله‌ای یک است. از آنجا که در شکل‌دهی بهبود یافته مخروط‌های میانی کوچکتر با قطر و ارتفاع کمتر از مخروط نهایی شکل‌دهی می‌شود، مدت زمان نسبی فرایند از حالت دو مرحله‌ای متداول کمتر می باشد.

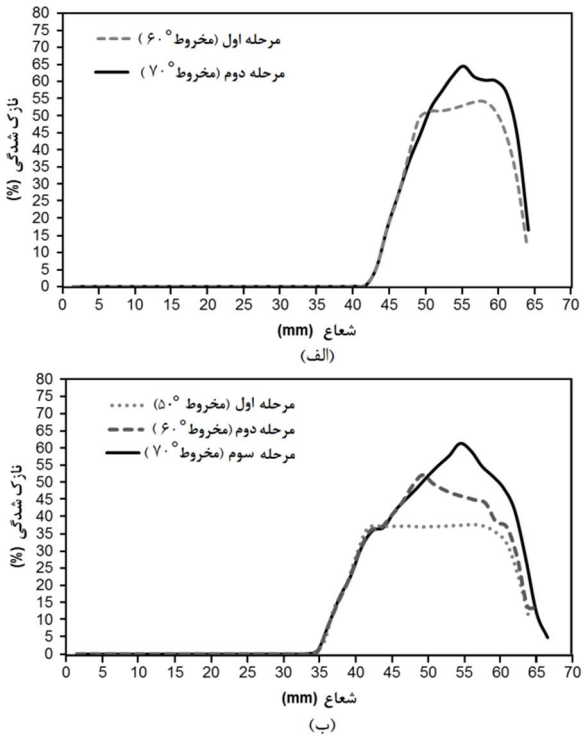
با توجه به شکل 14 نازک شدگی برای مقادیر 51 mm، 53 mm و 55 mm از r_1 بیشتر از شکل‌دهی تک مرحله‌ای (خط چین) می باشد. این مطلب اهمیت انتخاب درست استراتژی تغییر شکل چند مرحله‌ای را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر استفاده از شکل‌دهی چند مرحله‌ای (در اینجا دو مرحله‌ای) لزوما منجر به کاهش نازک شدگی نمی‌شود مگر اینکه به درستی طراحی شود.

7- نتیجه گیری

براساس مطالعه انجام شده در تحقیق حاضر بر روی شکل‌دهی‌های تدریجی چند مرحله‌ای متفاوت، یکی از راه‌های جلوگیری از نازک شدگی زیاد در شکل‌دهی یک مخروط، گسترش منطقه تغییر شکل به کف ظرف مخروطی و جابجایی مواد از کف ظرف به دیوار ظرف توسط شکل‌دهی چند مرحله‌ای می باشد. تبدیل یکباره ورق فلزی به شکل نهایی سبب افزایش تغییر شکل‌ها و کشش در ورق می‌شود که می‌تواند منجر به نازک شدگی شدید شود. به همین جهت تغییر شکل مرحله‌ای ورق به شکل نهایی سبب کاهش کشش در ورق و در نهایت کاهش نازک شدگی می‌شود. میزان گسترش منطقه تغییر شکل به کف ظرف و کاهش کشش در ورق توسط مسیر تغییر شکل (استراتژی شکل‌دهی) و تعداد مراحل تغییر شکل تعیین می شود. بر همین اساس در این تحقیق با بکارگیری یک استراتژی تغییر شکل چند مرحله‌ای جدید که پارامترهای تعریف کننده آن توسط یک مدل مناسب از فرایند پیشگویی می شود، نازک شدگی از میزان 74% در حالت تک مرحله‌ای به 60% در حالت دو مرحله‌ای بهبود یافته کاهش پیدا نمود که نسبت به استراتژی متداول در حالت های دو و سه مرحله‌ای دارای بهبود است. این بهبود در نازک شدگی با مقایسه توزیع نازک شدگی در قطعات میانی و

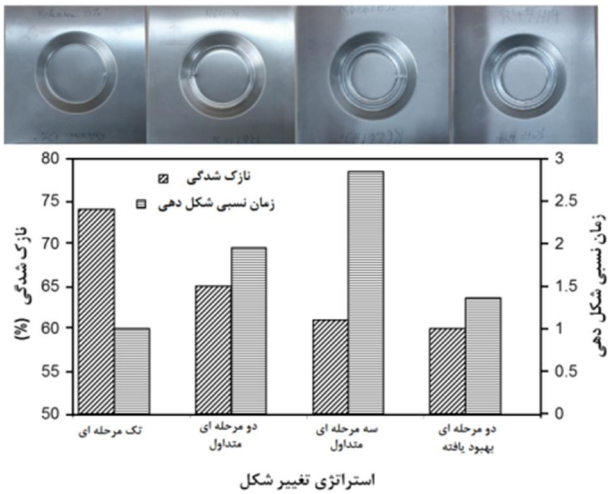


شکل 16 الف) هندسه و ب) نازک شدگی در مرحله اول و دوم استراتژی بهبود یافته حاصل از آزمون تجربی



شکل 17 نازک شدگی در مراحل میانی و انتهایی شکل‌دهی الف) دو و ب) سه مرحله ای متداول حاصل از آزمون تجربی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]



شکل 18 مقایسه میزان نازک شدگی بیشینه و زمان نسبی شکل‌دهی در استراتژی‌های تغییر شکل متفاوت به همراه نمونه های تجربی شکل داده شده

انتهایی حاصل از استراتژی های متفاوت مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین توسط استراتژی دو مرحله‌ای بکار گرفته شده برآمدگی کف ظرف تحت کنترل بوده و کاهش می یابد و زمان انجام فرایند نسبت به استراتژی متداول نیز کمتر می شود.

برای ادامه کار پیشنهاد می‌شود که میزان بهبود نازک شدگی توسط بکارگیری استراتژی تغییر شکل دو مرحله‌ای بهبود یافته برای نسبت های مختلفی از قطر به ارتفاع ظرف مخروطی مورد ارزیابی قرار گیرد.

8- مراجع

[1] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 54, No. 2, pp. 88-114, 2005.

[2] M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, H. Vanhove, J. R. Duflou, 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.

[3] G. L. Manco, G. Ambrogio, Influence of thickness on formability in 6082-T6, *International Journal of Material Forming,* Vol. 3, Suppl. 1, pp. 983– 986, 2010.

[4] 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.

[5] L. Jun-chao, L. Chong, Z. Tong-gui, Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* Vol. 22, Suppl. 1, pp. s54-s60, 2012.

[6] M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, H. Vanhove, J. R. Duflou, An Investigation into Thickness Distribution in Single Point Incremental Forming Using Sequential Limit Analysis, *International Journal of Material Forming,* DOI: 10.1007/s12289-013-1143-x, 2013.

[7] H. Ghasemi, B. Soltani, 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).

[8] H. Mohammadi Najafabadi, A. A. Ataee, M. Sharififar, 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).

[9] T. J. Kim, D. Y. Yang, Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, *International Journal of Mechanical Sciences,* Vol. 42, No. 7, pp. 1271-1286, 2000.

[10] D. Young, J. Jeswiet, Wall thickness variations in single-point incremental forming, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 218, No. 11, pp. 1453-1459, 2004.

[11] J. R. Duflou, J. Verbert, B. Belkassem, 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.

[12] M. Skjoedt, M. B. Silva, P. A. F. Martins, N. Bay, Strategies and limits in multi-stage single-point incremental forming, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design,* Vol. 45, No. 1, pp. 33-44, 2010.

[13] L. Manco, L. Filice, G. Ambrogio, Analysis of the thickness distribution varying tool trajectory in single-point incremental forming, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 225, No. 3, pp. 348-356, 2011.

[14] C. Zhang, H. F. Xiao, D. H. Yu, Incremental forming path-generated method based on the intermediate models of bulging simulation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 67, No. 9-12, pp. 2837-2844, 2013.

[15] ASTM Standard E8M, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

[16] M. J. Mirnia, *Analysis of axisymmetric incremental forming of aluminum sheet using upper-bound and numerical approaches and study of process parameters to control thickness distribution,* Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, 2014 (In Persian).

[17] L. W. Ma, J. H. Mo, Three-dimensional finite element method simulation of sheet metal single-point incremental forming and the deformation pattern analysis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 222, No. 3, pp. 373-380, 2008.

[18] P. Eyckens, B. Belkassem, C. Henrard, J. Gu, H. Sol, A. M. Habraken, J. R. Duflou, A. Van Bael, P. Van Houtte, Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction, *International Journal of Material Forming,* Vol. 4, No. 1, pp. 55-71, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7]