

## بررسی تجربی و عددی شکل دهی ورق های فلزی

### با استفاده از فرآیند شکل دهی چند نقطه ای

و حید ریخته گر نظامی<sup>۳</sup>

گروه مکانیک

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

عباس وفايي صفت<sup>۲</sup>

دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۱۱)

بهروز زارع<sup>۱</sup>

دانشکده مکانیک

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

#### چکیده

فرآیند شکل دهی چند نقطه ای، یک روش شکل دهی انعطاف پذیر جهت تولید انواع قطعات از ورق های فلزی است. در این مقاله روش شکل دهی چند نقطه ای به صورت تجربی و شبیه سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور تخمین پارامترهای مطلوب طراحی، ابتدا فرآیند شکل دهی به صورت دینامیکی شبیه سازی شده و سپس مجموعه قالب شکل دهی چند نقطه ای جهت انجام آزمایشات تجربی ساخته شده است. با در نظر گرفتن کاربرد گسترده آلیاژ آلومینیومی AA2024 در صنایع هوا و فضا، ورق های از جنس این آلیاژ برای انجام آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته و شکل دهی قطعات تحت شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. عیوب به وجود آمده در فرآیند شکل دهی چند نقطه ای پیش بینی شده و تأثیر پارامترهای فرآیندی از جمله قطر بین و ضخامت لایه الاستیک بر روی دقت ابعادی و توزیع ضخامت قطعات تولید شده بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که فرآیند فوق می تواند به عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی برای تولید انواع قطعات تکی موجود در زمینه های مختلف صنعتی به ویژه صنعت هوا و فضا مورد استفاده قرار گیرد، به طوری که با تنظیم مناسب پارامترهای فرآیند امکان تولید قطعات با شکل های هندسی متنوع تنها با استفاده از یک قالب وجود خواهد داشت.

**واژه های کلیدی:** شکل دهی چند نقطه ای، قطعات ورقه ای، شبیه سازی اجزای محدود، آلیاژ آلومینیومی AA2024

### Experimental and Numerical Investigation of Sheet Metal Forming Using Multi-point Forming Process

B. Zareh

Mech. Eng. Dep't.

Babol Noshirvani Univ. of  
Tech.

A. Vafaei-Sefat

Mech. Eng. Dep't.

Imam Hossein Univ.

V. Rikhtegar-Nezami

Mech. Eng. Dep't.

Islamic Azad Univ., Sci. and  
Research Branch, Tehran

(Received: 12 September, 2010; Accepted: 1 November, 2012)

#### ABSTRACT

Multi-Point forming process is a flexible technique for manufacturing of various sheet metal parts. In this paper, Multi-Point forming technique is studied using FE simulation and experiments. In order to estimate proper design parameters, the forming process was initially simulated dynamically, and then the Multi-Point forming die set was built for conducting experimental tests. By considering the widespread usage of aluminum alloys in the field of aerospace, the AA2024 aluminum alloy is used in this research and forming of sheet parts under various forming conditions is examined. The failure modes are predicted and the effect of process parameters such as pin diameter and thickness of elastic cushion on the geometry accuracy and thickness distribution of formed parts are investigated. The results obtained show that this process can be used as an effective and economic method for producing small batch production in different industrial sectors particularly aerospace industry. By proper adjustment of process parameters, the production of parts with different geometry will be possible just by using one same die set.

**Keywords:** Multi-Point Forming, Sheet Metal Parts, FE Simulation, AA2024 Aluminum Alloy

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: zareh.behrooz@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): abbas\_v@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد: v.rikhtegar@yahoo.com

## ۱- مقدمه

به کارگیری روش‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر، با مفهوم فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای<sup>۷</sup> اولین بار توسط مینگزلی<sup>۸</sup> و همکارانش [۶] مطرح شد. ایشان با طبقه‌بندی مدهای مختلف شکل‌دهی چند نقطه‌ای، استفاده از روش‌های فوق را در شکل‌دهی قطعات ورقه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. ایشان همچنین به منظور فراهم کردن امکان شکل‌دهی سطوح ورقه‌ای با ابعاد بزرگ با استفاده از قالب‌های کوچک، روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای موضعی را پیشنهاد کردند [۷ و ۸]. فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای با استفاده از ورق‌گیر و شکل‌دهی چند نقطه‌ای مرحله‌ای از دیگر روش‌های ارائه شده توسط ایشان و همکارانش می‌باشند [۹ و ۱۰].

ژانگ<sup>۹</sup> و همکاران [۱۱ و ۱۲] فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای ساندویچی را مورد بررسی قرار دادند. در این روش تنها نیمی از قالب با ماتریسی از پین‌ها جایگزین شده و نیمه دیگر آن با یک بالشتک الاستیک ضخیم جایگزین می‌شود. ایشان نشان دادند که استفاده از لایه الاستیک میانی مکانیزیم شکل‌دهی را تحت تأثیر قرار داده و حتی در صورتی که ورق قالب<sup>۱۰</sup> دچار تورفتگی شود به خوبی می‌تواند از وقوع این عیب در قطعه کار اصلی جلوگیری کند. همچنین محققان یادشده بیان داشتند که افزایش اصطکاک مابین ورق و لایه الاستیک قالب بالایی منجر به یکنواخت شدن توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده می‌شود.

تان<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۳] شکل‌دهی پرتز جمجمه انسان، از ورق تیتانیومی مشبک را با استفاده از فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. آنان داده‌های به دست آمده از اسکن CT را برای تنظیم المان‌های قالب به کار بردند و با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود نشان دادند که با استفاده هم‌زمان از ورق‌گیر، لایه الاستیک و بالشتک فلزی می‌توان پرتز جمجمه را به‌طور سالم و موفقیت آمیزی شکل‌دهی کرد.

سای<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۴] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند شکل کششی چند نقطه‌ای را در شکل‌دهی

شکل‌دهی ورق‌های فلزی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخه‌های شکل‌دهی فلزات، از جایگاه ویژه‌ای در زمینه‌های مختلف صنعتی برخوردار می‌باشند. در این فرآیندها با استفاده از مجموعه‌ای از قالب‌های یکپارچه صلب، تغییر شکل پلاستیک مطلوب در یک ماده خام اولیه ایجاد می‌شود. این قبیل قالب‌ها عموماً برای یک قطعه با مشخصات هندسی خاص طراحی و ساخته می‌شوند، به طوری که برای تولید قطعات با شکل‌های هندسی مختلف نیاز به استفاده از قالب‌های متفاوتی وجود خواهد داشت. طراحی و ساخت قالب‌های جدید مستلزم صرف زمان و هزینه بالایی می‌باشد. در نتیجه، استفاده از روش‌های فوق برای تولید قطعات تکی و قطعات دسته‌ای با تیراژ پایین غیراقتصادی خواهد بود. به‌منظور کاهش زمان انتظار<sup>۱</sup> و هزینه‌های طراحی و ساخت، توسعه روش‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مناسبی در جهت رفع محدودیت‌های فوق مطرح شود.

در طی سال‌های اخیر نوآوری‌های بسیاری از سوی محققان مختلف در جهت افزایش انعطاف‌پذیری فرآیندهای شکل‌دهی صورت گرفته است. مفهوم قالب قابل تغییر شکل جهت ایجاد سیستم تولید انعطاف‌پذیر اولین بار توسط هاردت<sup>۲</sup> ارائه شد. ایشان و همکارانش طراحی مکانیکی یک قالب گسسته قابل تغییر شکل را برای شکل‌دهی قطعات ورقه‌ای مورد مطالعه قرار دادند [۱ و ۲].

والزیک<sup>۳</sup> و همکاران [۳] به‌منظور کاهش زمان و هزینه‌های طراحی و ساخت قالب، یک قالب گسسته قابل تغییر شکل را جهت شکل‌دهی قطعات بدنه هواپیما توسعه دادند. پاپازیان<sup>۴</sup> و همکاران [۴] یک قالب گسسته قابل تغییر شکل با سیستم کنترل مدار بسته را در مقیاس صنعتی برای شکل‌دهی کششی<sup>۵</sup> پوسته هواپیما توسعه دادند.

هاس<sup>۶</sup> و همکاران [۵] قالب انعطاف‌پذیری را جهت شکل‌دهی قطعات تکی طراحی کرده و با ساخت یک قالب اولیه، عملی بودن روش ارائه شده را بررسی کردند.

7- Multi-Point Forming

8- Li

9- Zhong

10- Die Sheet

11- Tan

12- Cai

1- Lead Time

2- Hardt

3- Walczyk

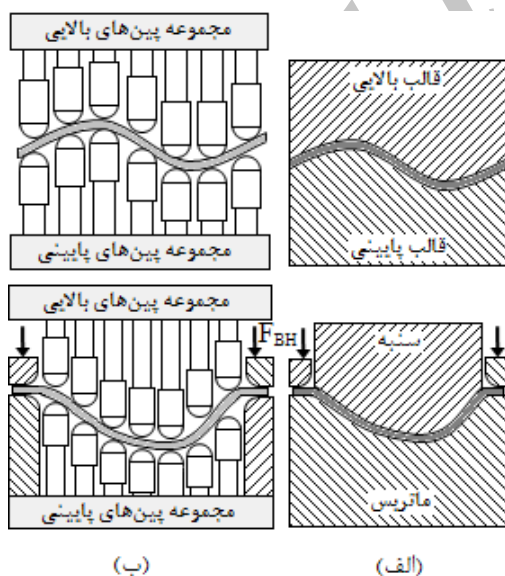
4- Papazian

5- Stretch Forming

6- Haas

## ۲- اصول فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای

ایده اصلی فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، مبتنی بر تقسیم سطوح صلب منحنی‌وار موجود در قالب‌های متداول به مجموعه‌ای از المان‌های گسسته کنار هم است. شکل ۱ شماتیک فرآیندهای شکل‌دهی سنتی و فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای را بدون استفاده و با استفاده از ورق‌گیر نشان می‌دهد. المان‌های گسسته از هم در اصطلاح پین نامیده می‌شوند. در این روش پین‌ها مستقل از هم بوده و به آسانی قابل تنظیم می‌باشند، به طوری که با کنترل ارتفاع پین‌ها می‌توان سطوح کاری پیوسته، با انحناهای متفاوتی را ایجاد کرد. بدین ترتیب با به کارگیری تکنولوژی فوق نیاز به استفاده از قالب‌های مجزا برای تولید قطعات مجزا از بین می‌رود و امکان تولید قطعات با شکل‌های هندسی متنوع تنها با استفاده از یک قالب وجود خواهد داشت که می‌تواند صرفه‌جویی اقتصادی قابل ملاحظه‌ای را در هزینه‌های تولید قطعات دسته‌ای و تکی به همراه داشته باشد. با استفاده از تکنولوژی فوق زمان انتظار برای تولید یک محصول خاص به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. علت این امر عدم نیاز به طراحی و ساخت قالب جدید و همچنین سادگی و سرعت بالای انجام اصلاحات در قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای است.



شکل (۱): فرآیندهای شکل‌دهی سنتی و فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای (الف) فرآیندهای شکل‌دهی سنتی (ب) فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای بدون استفاده و با استفاده از ورق‌گیر.

قطعات با سطوح زینی، استوانه‌ای و کروی شکل مورد بررسی قرار دادند. آنان نشان دادند که برای جلوگیری از عیب تورفتگی استفاده از لایه الاستیک امری ضروری است. همچنین هر اندازه که قطعات شکل داده شده انحنای پیچیدگی کمتری داشته باشند، دقت ابعادی بالاتر و نتایج بهتری در استفاده از این روش قابل حصول می‌باشد.

لی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۵] با به کارگیری شبیه‌سازی اجزای محدود، تأثیر پارامترهایی همچون میزان تغییر شکل پلاستیک، خواص مکانیکی ماده و ضخامت ورق را بر روی میزان برگشت فنری قطعات شکل داده شده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد بررسی قرار دادند. آنان همچنین نشان دادند که با استفاده از فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مرحله‌ای برگشت فنری به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

با وجود گسترش و نوآوری‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر در زمینه فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، اکثر تحقیقات گزارش شده محدود به استفاده از این روش در شکل‌دهی کششی سطوح ورقه‌ای می‌باشند و اطلاعات چندانی در مورد به کارگیری این فرآیند در کشش عمیق قطعات صنعتی موجود نمی‌باشد. هدف مقاله حاضر امکان‌سنجی به کارگیری روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای در کشش عمیق قطعات محفظه‌ای شکل است. برای این منظور، در ابتدا با اجرای شبیه‌سازی دینامیکی فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، یک سطح مطلوبی از پارامترهای طراحی تخمین زده شده است. در ادامه با ساخت یک قالب، شکل‌دهی یک قطعه محفظه‌ای شکل به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. عیوب به وجود آمده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای پیش‌بینی شده و راهکارهای مؤثر در شکل‌دهی قطعات سالم بحث شده است. تأثیر پارامترهای کلیدی فرآیند، از جمله قطر پین و ضخامت لایه الاستیک بر روی توزیع ضخامت و دقت ابعادی قطعات تولید شده مورد بررسی قرار گرفته و نتایج پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج به دست آمده از آزمایشات تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

نرم‌افزار ABAQUS برای انجام شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در این بخش مراحل مختلف اجرای شبیه‌سازی اجزای محدود ارائه شده است.

## ۳-۱- مدل مواد

با در نظر گرفتن کاربرد گسترده آلیاژ آلومینیومی

AA2024-O در صنایع هوا و فضا، در این پژوهش ورق‌های از جنس آلیاژ فوق با ضخامت ۱ میلی‌متر برای انجام آزمایشات و شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق، طبق استاندارد ASTM B557m نمونه‌هایی در سه راستای مختلف ( $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$ ) نسبت به جهت نورد ورق آماده‌سازی شده و آزمون کشش تک محوره در سه راستا انجام شد.

جدول (۱): خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیومی AA2024-O.

ناهمسان گردی (R)	ضریب استحکام (MPa)	توان کرنش سختی (n)	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	راستای ورق نسبت به جهت نورد
۰/۷۱	۳۴۴/۰۹	۰/۲۵۶۵	۶۹	۷۸	$0^\circ$
۰/۷۲	۳۳۴/۰۳	۰/۲۴۴۵	۶۹	۷۵	$45^\circ$
۰/۷۵	۳۲۸/۰۵	۰/۲۳۲۲	۶۹	۷۶	$90^\circ$

جدول (۲): نسبت‌های تنش تسلیم آلیاژ آلومینیومی AA2024-O.

ضرایب	R11	R22	R33	R12	R13	R23
مقدار	۱	۱/۰۱۵	۰/۹۳۷	۱/۰۳۹	۱	۱

خواهد داد. برای جلوگیری از وقوع پدیده فوق و تولید قطعاتی با کیفیت مناسب می‌توان از یک لایه الاستیک ما بین پین‌ها و سطح ورق استفاده کرد. خصوصیات لایه الاستیک مورد استفاده تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار شکل‌پذیری ورق فلزی دارد که می‌بایستی در شبیه‌سازی اجزای محدود لحاظ گردد. به علت مقاومت بالای پلی‌یورتان در برابر سایش و روغن، در انجام آزمایشات و شبیه‌سازی از دو لایه پلی‌یورتان با سختی SA ۸۰ استفاده شده است. جهت تعیین خواص لایه پلی‌یورتان مورد استفاده در این پژوهش، طبق استاندارد (ASTM D575-91) آزمایش فشار بر روی یک نمونه استوانه‌ای شکل انجام گرفت. شکل ۲ نمودار تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش فشار را نشان می‌دهد. مدل مونی-ریولین<sup>۱</sup> به منظور توصیف خصوصیات ماده الاستیک در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت [۱۷].

نتایج حاصل از این آزمون جهت تعیین خواص مکانیکی و رفتار ناهمسانگردی ورق فوق مورد استفاده قرار گرفت که مشخصات مکانیکی به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات مکانیکی ورق براساس داده‌های ارائه شده در جدول ۱ به نرم‌افزار معرفی شده است. در نرم‌افزار ABAQUS امکان معرفی مستقیم ضرایب ناهمسانگردی وجود ندارد [۱۶]. بنابراین برای در نظر گرفتن ناهمسانگردی ورق در شبیه‌سازی، با توجه به تابع تسلیم هیل برای یک ماده ناهمسانگرد به جای نسبت‌های فوق از نسبت تنش‌های تسلیم ناهمسانگردی ارائه شده در جدول ۲ استفاده شده است. مقادیر فوق براساس ضرایب ناهمسانگردی نشان داده شده در جدول ۱ به دست آمده‌اند.

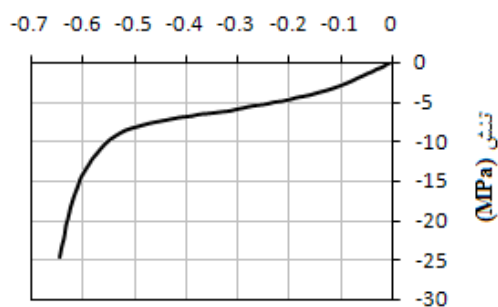
در طول فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، پین‌ها نیروهای متمرکز را به سطح ورق اعمال می‌کنند. در نتیجه در نواحی تماس پین‌ها با سطح ورق، تغییر شکل موضعی شدید رخ

1- Mooney-Rivlin

### ۲-۳- مدل شبیه‌سازی اجزای محدود

هندسه قطعه مورد آزمایش به همراه نمای انفجاری مدل اجزای محدود ایجاد شده به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

گرش



شکل (۲): نمودار تنش - گرش پلی‌یورتان با سختی SA ۸۰.

محدود شده است. تمامی درجات آزادی پین‌های ماتریس پایینی قید گذاری شده و مجموعه پین‌های ماتریس بالایی تنها می‌توانند در جهت عمودی حرکت کنند. موقعیت هندسی هر یک از پین‌های ماتریس بالایی و پایینی براساس داده‌های به دست آمده از مدل CAD قطعه کار مورد نظر تنظیم شده است. به منظور مدل کردن اصطکاک موجود در فصل مشترک سطوح ورق با سطوح اجزای قالب و لایه‌های پلی‌یورتان مدل اصطکاک کولمب مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق با مرجع [۱۸] ضریب اصطکاک مابین سطح تماس ورق با سطح قالب و ورق گیر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. این ضریب برای سطح تماس مابین ورق و لایه‌های پلی‌یورتان و لایه‌های پلی‌یورتان با سطح پین‌ها به ترتیب ۰/۱ و ۰/۲ است. نوع تماس مابین سطح ورق با سطح لایه پلی‌یورتان و سطوح قالب از نوع سطح به سطح انتخاب شده است.

### ۴- مراحل آزمایشگاهی

به منظور تعیین سطح مطلوب پارامترهای طراحی، ابتدا فرآیند شکل‌دهی چند قطعه با به کارگیری شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه براساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای ساخته شده است. پارامترهای پیش‌بینی شده حاصل از نتایج شبیه‌سازی در جدول ۳ ارائه شده است. برای اجرای آزمایشات از یک پرس هیدرولیکی دو کاره T.S.S، با ظرفیت ۲۰۰ KN استفاده شده است. شکل ۴ اجزای قالب ساخته شده، و مجموعه قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای مونتاژ شده را در حالت نصب شده بر روی دستگاه فوق نشان می‌دهد.

در ساخت قالب فوق مجموعاً از ۲۰۰ عدد پین سر نیم‌کروی استفاده شده است که هر یک از پین‌ها مستقل از هم بوده و به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ارتفاع هر یک از آنها به آسانی قابل تنظیم است. بنابراین می‌توان با تنظیم مناسب ارتفاع پین‌ها سطوح با انحنای متفاوتی را ایجاد کرد. نیروی ورق گیر مورد نیاز در حین فرآیند شکل‌دهی توسط جک پایینی دستگاه پرس تأمین می‌شود. برای انجام آزمایشات ورق‌هایی با ابعاد اولیه ۲۲۰×۲۲۰ میلی‌متر از جنس آلیاژ

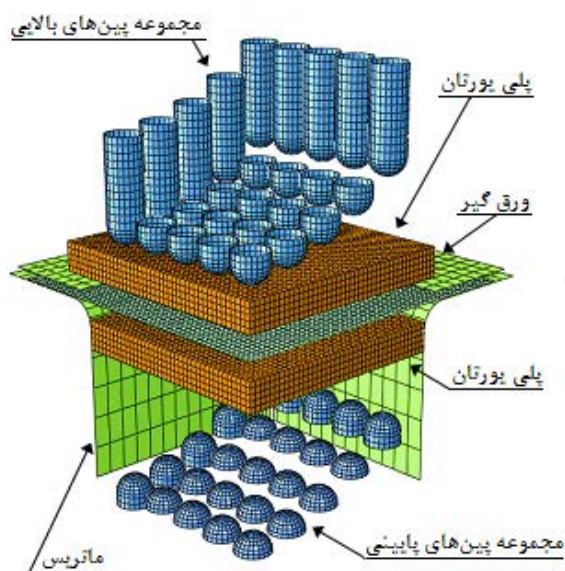
به علت تقارن قطعه مورد آزمایش و به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی فقط ۱/۴ ورق و سایر اجزای قالب مدل سازی شده است. ورق آلومینیومی به صورت پوسته‌ای تغییر شکل پذیر مدل شده و از المان‌های چهار گرهی S4R برای مش‌بندی استفاده شده است. همچنین لایه پلی‌یورتان به صورت تغییر شکل پذیر هابپر الاستیک مدل شده و داده‌های به دست آمده از نمودار شکل ۲ مستقیماً به نرم‌افزار معرفی شده است. المان ۸ گرهی C3D8R برای مش‌بندی لایه‌های پلی‌یورتان مورد استفاده قرار گرفته است. ماتریس بالایی و پایینی پین‌ها و همچنین اجزای قالب به صورت سطوح صلب پوسته‌ای مدل شده‌اند و مش‌بندی آنها با استفاده از المان‌های R3D4 انجام گرفته است.

### ۳-۳- شرایط مرزی و اصطکاک

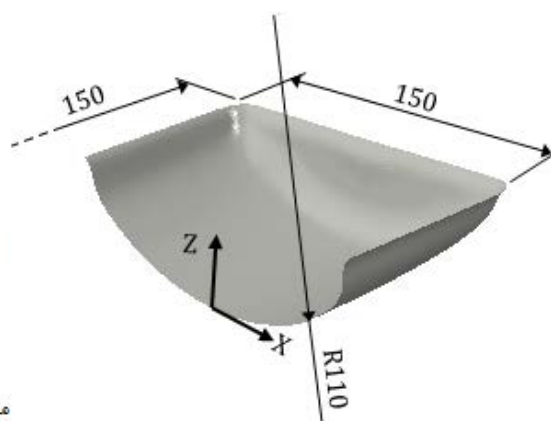
به علت دقت و سرعت بالای روش Dynamic/Explicit در حل مسائل تماسی پیچیده از روش فوق جهت تحلیل استفاده شده است. با توجه به اینکه فقط ۱/۴ ورق و اجزای قالب در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است بنابراین در راستای دو محور تقارن ورق و لایه‌های پلی‌یورتان، چرخش حول این محورها و همچنین حرکت در راستای عمود بر محورهای فوق

ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور قطعات تولیدشده، در جهت محورهای تقارن برش خورده و توزیع ضخامت در دو راستای نشان داده شده در شکل ۵ اندازه گیری شده است.

آلومینیومی AA2024-O آماده سازی شده اند. توزیع ضخامت قطعات تولید شده تحت شرایط متفاوت شکل دهی، به عنوان یکی از مهم ترین مشخصه های کیفی قطعات ورقه ای مورد



(ب)

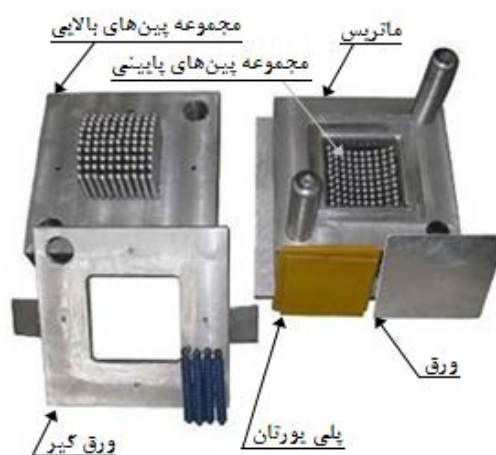


(الف)

شکل (۳): شماتیک قطعه مورد آزمایش و مدل اجزای محدود؛ (الف) نمای برش خورده قطعه مورد آزمایش، (ب) مدل اجزای محدود.

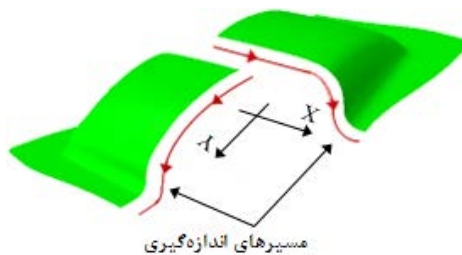


(ب)



(الف)

شکل (۴): (الف) اجزای قالب ساخته شده، (ب) قالب مونتاژ شده در حالت نصب بر روی دستگاه پرس.



شکل (۵): مسیرهای اندازه‌گیری توزیع ضخامت.

که علاوه بر تولید قطعاتی با دقت و کیفیت مناسب، از پیچیدگی و افزایش غیر ضروری هزینه‌های ساخت قالب جلوگیری شود. به منظور مطالعه تأثیر اندازه پین و انتخاب اندازه مطلوب، شکل‌دهی قطعات با استفاده از پین‌هایی با قطرهایی در اندازه‌های ۳۰، ۲۰ و ۱۲ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. به علت اینکه در استفاده از پین‌های سر نیم‌کروی سطح قالب با یکنواختی بیشتری تخمین زده شده و منجر به ایجاد شرایط تماسی بهتر مابین سطح پین‌ها و سطح ورق می‌شود، از پین‌هایی با پیشانی نیم‌کروی استفاده شده است. پروفیل قطعات شکل داده شده با استفاده از پین‌هایی با قطرهای مختلف در شکل ۶ مورد مقایسه قرار گرفته است. مطابق انتظار، با کوچک‌تر شدن قطر پین‌ها، دقت ابعادی نمونه تولید شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته و نمونه شکل داده شده دارای سطح هموارتری است. براساس نتایج نشان داده شده، در حالت استفاده از پین‌هایی با قطر ۱۲ میلی‌متر پروفیل سطح تحتانی نمونه تولید شده بر پروفیل هدف منطبق است و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از پین با قطر ۱۲ میلی‌متر منجر به تولید قطعات با دقت ابعادی مناسبی خواهد شد.

#### ۵-۲- شکل‌دهی چند نقطه‌ای قطعه مورد مطالعه

با در نظر گرفتن نتایج ارائه شده در بخش ۵، قالب شکل‌دهی چند نقطه‌ای براساس مقادیر مطلوب پارامترهای هندسی ساخته شد و در ادامه فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای به صورت تجربی نیز مورد آزمایش قرار گرفت.

#### ۵-۲-۱- عیب تورفتگی

با وجود انعطاف‌پذیری بالایی که در استفاده از فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای فراهم می‌شود استفاده از این تکنولوژی دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که منجر به وجود آمدن عیوب جدیدی نسبت به روش‌های شکل‌دهی سنتی می‌شود. یکی از متداول‌ترین عیوبی که می‌تواند در قطعات تولید شده با استفاده از این روش ایجاد شود، عیب تورفتگی است که وابسته به طبیعت خود فرآیند بوده و در اثر تماس مستقیم پین‌ها با سطح ورق ایجاد می‌شود. همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد، در این روش سطوح صلب پیوسته قالب‌های سنتی با مجموعه از المان‌های گسسته کنار هم

جدول (۳): مشخصات ابعادی اجزای قالب ساخته شده.

پارامتر	اندازه (mm)
قطر پین	۱۲
شعاع ورودی قالب	۷
ابعاد حفره ماتریس	۱۵۰×۱۵۰
ابعاد اولیه ورق	۲۲۰×۲۲۰
ضخامت لایه پلی‌یورتان	۱۰

#### ۵- نتایج و بحث

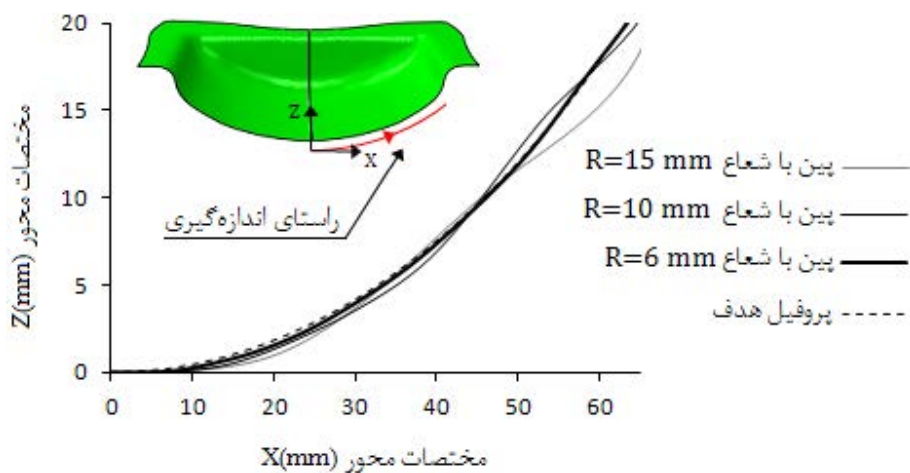
در این بخش نتایج به دست آمده از آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

#### ۵-۱- تأثیر شکل و ابعاد هندسی پین

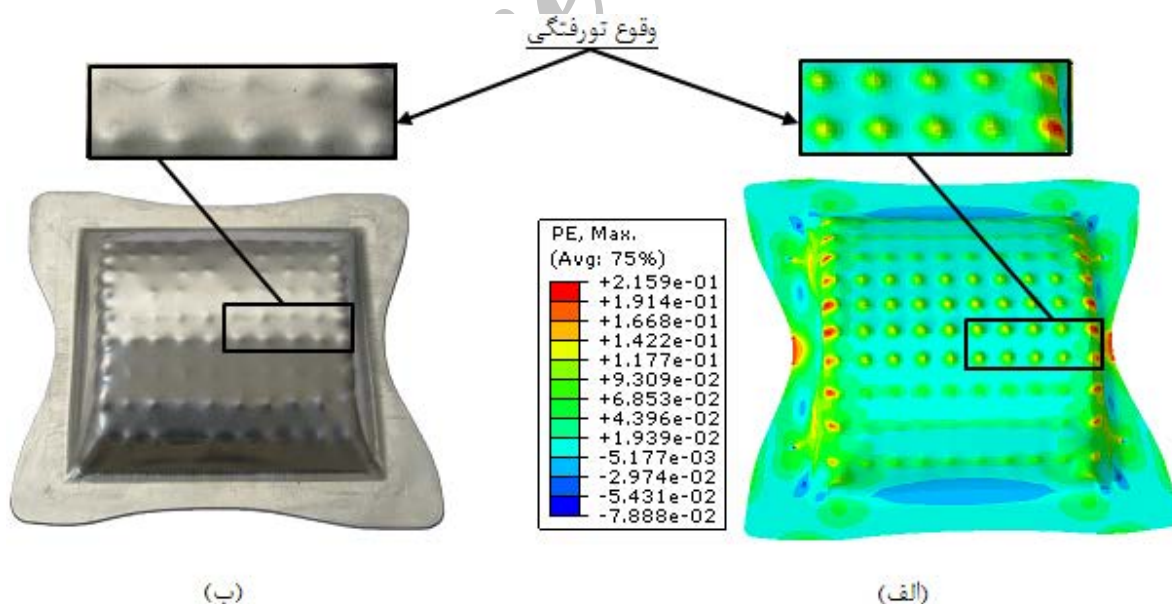
در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای سطح قالب با مجموعه‌ای از پین‌های قابل تنظیم کنار هم تخمین زده می‌شود، بنابراین شکل و اندازه پین‌ها تأثیر بسیار بالایی بر روی دقت سطح انحنای تخمین زده شده قالب خواهد داشت که در نهایت می‌تواند دقت ابعادی قطعه نهایی تولید شده را تحت تأثیر قرار دهد. هر چقدر پین‌های مورد استفاده دارای ابعاد کوچک‌تری باشند سطح با پیوستگی و با دقت بالاتری تخمین زده شده و بنابراین منجر به تولید قطعه با دقت ابعادی بالاتری خواهد شد. از طرف دیگر با کوچک‌تر شدن بیش از حد اندازه پین و در نتیجه بیشتر شدن تعداد پین‌های مورد استفاده در یک واحد سطح مشابه، هزینه‌های ساخت قالب افزایش یافته و همچنین منجر به پیچیدگی بیشتر قالب ساخته شده خواهد شد. بنابراین اندازه پین‌ها می‌بایستی به گونه‌ای انتخاب شود

سطح پین‌ها استفاده می‌شود. به‌منظور بررسی دقیق‌تر عیب تورفتگی، شکل‌دهی قطعه‌کار در دو حالت استفاده از لایه الاستیک و عدم استفاده از لایه الاستیک به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه شکل داده شده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی، در حالت عدم استفاده از لایه الاستیک در شکل ۷ نشان داده شده است.

جایگزین می‌شود. در حین عملیات شکل‌دهی هر یک از المان‌ها یک نیروی متمرکز را به سطح ورق اعمال می‌کنند که منجر به موضعی شدن تغییر شکل در نقاط تماس المان‌ها با ورق می‌شود که این امر می‌تواند باعث ایجاد عیوب تورفتگی در سطح قطعه‌کار می‌شود. برای جلوگیری از ایجاد عیب تورفتگی از یک ماده انعطاف‌پذیر مابین سطح ورق و



شکل (۶): پروفیل قطعات تولیدشده با استفاده از پین‌هایی با قطرهای متفاوت.

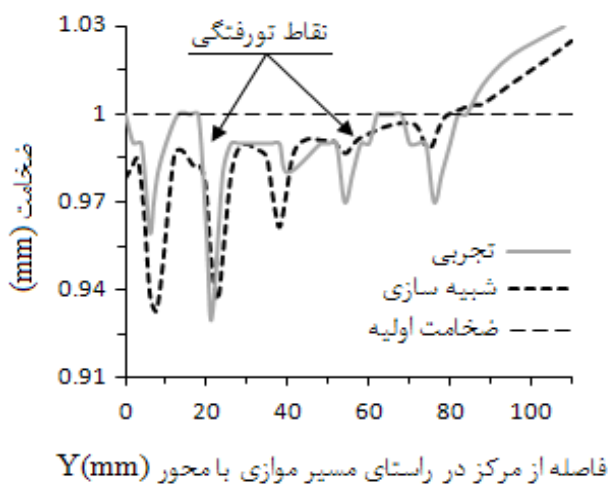


شکل (۷): وقوع عیب تورفتگی در نمونه شکل داده‌شده بدون استفاده از لایه الاستیک؛ (الف) شبیه‌سازی، (ب) تجربی.

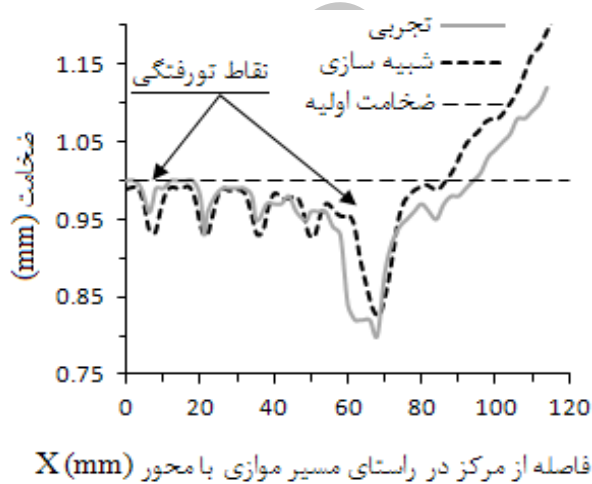


کیفیت سطحی نامناسب، توزیع ضخامت قطعه تولید شده را نیز می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار دهد. به‌منظور بررسی اثر این عیب، توزیع ضخامت قطعات تولید شده در دو راستای نشان داده شده در شکل ۵ اندازه‌گیری شده و با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل ۸ منحنی‌های توزیع ضخامت نمونه شکل داده شده بدون استفاده از لایه الاستیک را نشان می‌دهد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نقاط تماس پین‌ها با سطح ورق تغییر شکل به‌صورت موضعی رخ داده و در نتیجه وقوع عیوب تورفتگی قطعه تولید شده از کیفیت سطحی بسیار نامناسبی برخوردار است. همچنین از شکل فوق می‌توان مشاهده کرد که یک توزیع کرنش غیر یکنواختی در نمونه شکل داده شده رخ داده است که مقدار بالای کرنش در نقاط تماس پین‌ها با سطح ورق در اثر موضعی شدن تغییر شکل در این نقاط است. وقوع عیب تورفتگی علاوه بر ایجاد



(ب)



(الف)

شکل ۸(ا): منحنی‌های توزیع ضخامت نمونه شکل داده شده بدون استفاده از لایه پلی‌یورتان در راستای (الف) مسیر موازی محور X، (ب) مسیر موازی محور Y.

#### ۵-۲-۲- تأثیر ضخامت لایه الاستیک

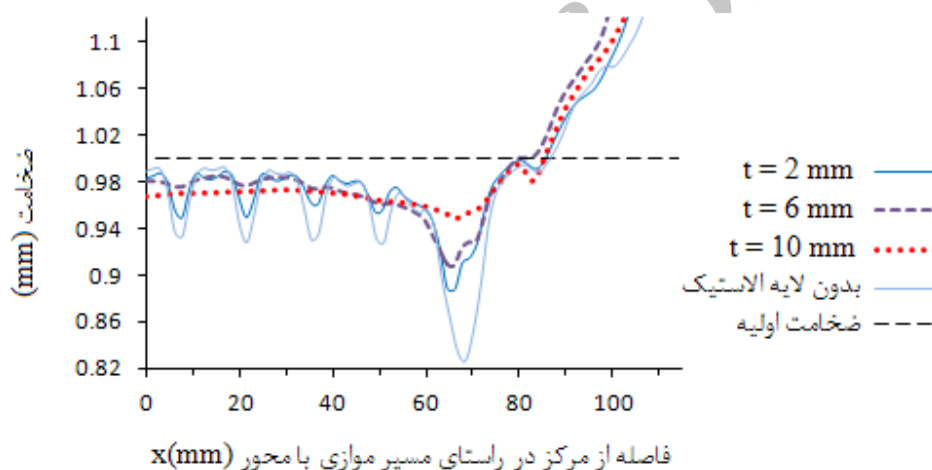
برای جلوگیری از ایجاد عیب تورفتگی می‌بایستی نیروهای وارد شده از طرف پین‌ها به‌گونه‌ای برکل سطح ورق توزیع شود. به‌کارگیری دو لایه الاستیک مابین سطح پین‌ها و سطح ورق می‌تواند با جلوگیری از تماس مستقیم پین‌ها با سطح ورق و بهبود شرایط تماسی از وقوع تورفتگی در قطعات تولید شده پیشگیری کند. در این پژوهش، دو لایه پلی‌یورتان با سختی SA 80 در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از پارامترهای مهمی که در به‌کارگیری لایه الاستیک باید مد نظر قرار گیرد، ضخامت لایه الاستیک است. استفاده از لایه پلی‌یورتان با ضخامت بیش از حد علاوه بر افزایش هزینه‌ها می‌تواند دقت ابعادی قطعه تولید شده را

مطابق شکل، نمونه در راستای هر دو مسیر اندازه‌گیری دارای توزیع ضخامت کاملاً غیر یکنواختی است، به‌طوری‌که هر یک از ناحیه‌های تورفتگی بر روی منحنی‌های توزیع ضخامت متناظر با یک عیب تورفتگی ایجاد شده در سطح قطعه کار است. پدیده فوق در هر دو نتایج به‌دست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی قابل مشاهده و نشان‌دهنده این است که در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای در صورت عدم استفاده از لایه الاستیک، در حین عملیات شکل‌دهی، هر یک از پین‌ها یک نیروی متمرکز را به سطح ورق اعمال کرده و در نتیجه موضعی شدن تغییر شکل در نقاط تماس پین‌ها با سطح ورق، کاهش ضخامت بسیار شدیدی در این نواحی به‌وجود خواهد آمد.

می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ضخامت لایه الاستیک، وضعیت توزیع ضخامت نمونه‌ها بهبود یافته و به تدریج از عمق نواحی تورفتگی موجود بر روی منحنی کاسته می‌شود. به طوری که استفاده از لایه پلی‌یورتان با ضخامت ۱۰ میلی‌متر منجر به شکل‌گیری نمونه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت شده و هیچ‌گونه ناحیه نازک شدگی موضعی بر روی منحنی توزیع ضخامت آن مشاهده نمی‌شود. این امر نشان‌دهنده عدم وقوع عیب تورفتگی در حالت استفاده از لایه پلی‌یورتان با ضخامت ۱۰ میلی‌متر دارد. برای بررسی صحت نتایج پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی، شکل‌دهی قطعه با استفاده از لایه پلی‌یورتان با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به صورت تجربی نیز مورد آزمایش قرار گرفت.

تحت تأثیر قرار دهد. از طرفی، استفاده از لایه پلی‌یورتان با ضخامت کم منجر به عدم تولید قطعه با کیفیت سطحی مناسب و همچنین خرابی و پارگی زودرس لایه پلی‌یورتان خواهد شد. بنابراین، می‌بایست یک مقدار مطلوبی برای ضخامت لایه الاستیک مورد استفاده انتخاب شود. برای این منظور، تأثیر استفاده از لایه‌های پلی‌یورتان با ضخامت‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته، و جهت تعیین مقدار ضخامت مطلوب، منحنی توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده مورد مقایسه قرار گرفت.

شکل ۹ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی را با استفاده از لایه‌های پلی‌یورتان با ضخامت ۲، ۶ و ۱۰ میلی‌متر نشان



شکل (۹): منحنی توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده شده با استفاده از لایه‌های پلی‌یورتان با ضخامت‌های مختلف در راستای مسیر موازی محور X.

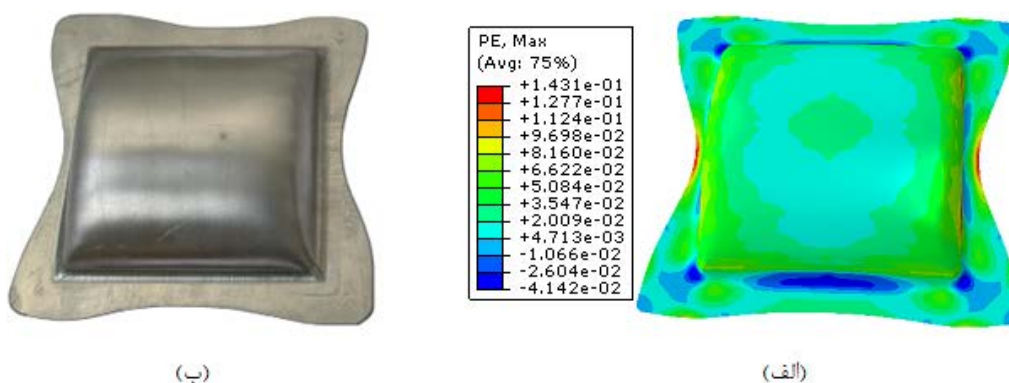
توزیع کرنش یکنواختی در نمونه شکل داده شده، ایجاد گردیده است. در شکل ۱۱ منحنی‌های توزیع ضخامت نمونه تجربی شکل داده شده تحت شرایط فوق، با منحنی توزیع ضخامت پیش‌بینی شده از نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود مطابقت قابل قبولی مابین نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی برقرار است و قطعه شکل داده شده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در راستای هر دو مسیر اندازه‌گیری دارای توزیع ضخامت تقریباً

شکل ۱۰ نمونه شکل داده شده در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی را با استفاده از لایه پلی‌یورتان با ضخامت ۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمونه شکل داده شده دارای کیفیت سطحی بسیار مطلوبی بوده و هیچ‌گونه عیب تورفتگی در نمونه شکل داده شده در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی قابل مشاهده نمی‌باشد. همچنین مطابق شکل فوق، در مقایسه با نمونه شکل داده شده بدون استفاده از لایه پلی‌یورتان میزان کرنش‌های به وجود آمده کمتر بوده و یک

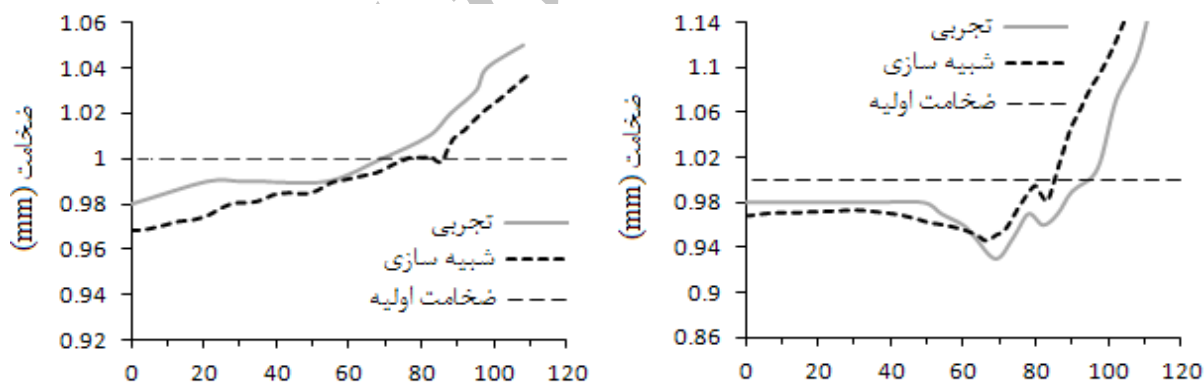
ملاحظه می‌شود با وجود اینکه قالب ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی بوده و تنها با هدف انجام کارهای تحقیقاتی ساخته شده است، به‌خوبی می‌تواند برای تولید قطعات مختلف مورد استفاده قرار گیرد. با تنظیم مناسب ارتفاع هر یک از پین‌ها براساس داده‌های به‌دست آمده از نقشه CAD قطعه مورد نظر، می‌توان قطعات با شکل‌های هندسی متفاوتی را تنها با استفاده از یک قالب تولید کرد.

یکنواختی است که نشان از عدم وقوع پدیده تورفتگی در حضور لایه پلی‌یورتان با ضخامت ۱۰ میلی‌متر دارد.

علاوه بر شکل‌دهی قطعه نشان داده شده در شکل ۳- الف، شکل‌دهی چندین قطعه دیگر با شکل‌های هندسی متفاوت نیز با استفاده از قالب چند نقطه‌ای ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌هایی از دیگر قطعات شکل داده شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که



شکل (۱۰): نمونه شکل داده با استفاده از دو لایه پلی‌یورتان با سختی SA 80 با ضخامت ۱۰ میلی‌متر؛ (الف) شبیه‌سازی، (ب) تجربی.



شکل (۱۱): منحنی توزیع ضخامت نمونه شکل داده با استفاده از لایه پلی‌یورتان در راستای (الف) مسیر موازی محور X (ب) مسیر موازی محور Y.

(الف) فاصله از مرکز در راستای مسیر موازی با محور X (mm)، (ب) فاصله از مرکز در راستای مسیر موازی با محور Y (mm)



(ب)



(الف)

شکل (۱۲): نمونه‌ای از دیگر قطعات شکل داده شده با استفاده از قالب شکل دهی چند نقطه‌ای ساخته شده (الف) قطعه مربعی، (ب) قطعه با سطح استوانه‌ای با شعاع ۱۰۰ میلی‌متر.

نشان‌دهنده عملی بودن این روش است. بنابراین، این فرآیند می‌تواند به‌عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی برای تولید انواع قطعات تکی موجود در زمینه‌های مختلف صنعتی به‌ویژه صنعت هوا و فضا مطرح گردد. با تنظیم مناسب پارامترهای فرآیند امکان تولید قطعات با شکل‌های هندسی متنوع تنها با استفاده از یک قالب وجود خواهد داشت. مقایسه نتایج تجربی با نتایج پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که شبیه‌سازی اجزای محدود می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پیش‌گویانه مناسب برای مطالعه و تعیین پارامترهای مطلوب فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

#### مراجع

1. Hardt, D.E. and Webb, R.D. "Sheet Metal Die Forming Using Closed Loop Shape Control", *Annals of the CIRP*, Vol. 31, No. 1, pp. 165-169, 1982.
2. Walczyk, D.F. and Hardt, D.E. "Design and Analysis of Reconfigurable Discrete Dies for Sheet Metal Forming", *J. Manufacturing Sys.*, Vol. 17, No. 6, pp. 436-454, 1998.
3. Walczyk, D.F., Lakshminathan, J., and Kirt, D.R. "Development of a Reconfigurable Tool for Forming Aircraft Body Panels", *J. Manufacturing Sys.*, Vol. 17, No. 4, pp. 287-296, 1998.
4. Papazian, J.M. "reconfigurable Forming Dies raise the Efficiency of Small-lot Production", *The American Society of Mech. Eng.*, Vol. 124, No. 2, pp. 52-55, 2002.
5. Haas, E., Schwarz, C.R., and Papazian, J.M. "Design and Test of a Reconfigurable Forming

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، چگونگی شکل‌دهی یک قطعه ورقه‌ای از جنس آلایژ آلومینیومی AA2024-O با استفاده فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا قبل از ساخت قالب با به‌کارگیری شبیه‌سازی اجزای محدود پارامترهای مطلوب هندسی و ابعادی قالب پیش‌بینی شده و در ادامه با ساخت قالب، شکل‌دهی قطعات تحت شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که شکل هندسی و قطر پین‌های مورد استفاده تأثیر بسیار بالایی بر دقت ابعادی و کیفیت سطحی قطعات تولید شده دارد. با استفاده از پین‌هایی با پیشانی نیم‌کروی و قطر ۱۲ میلی‌متر به‌علت انحنای سطحی مطلوب و وفق‌پذیری بالای سطح نیم‌کروی پین‌ها، قطعات با سطح هموار و دقت ابعادی بالایی تولید شد. با مطالعه شکل‌دهی قطعات در دو حالت استفاده و عدم استفاده از لایه پلی‌یورتان نشان داده شد که در حالت عدم استفاده از لایه الاستیک، عیب تورفتگی در سطح قطعه‌کار پدیدار می‌شود. با مقایسه توزیع ضخامت قطعات تولیدشده با استفاده از پلی‌یورتان با ضخامت‌های مختلف، مقدار ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان مناسب‌ترین ضخامت انتخاب شد، به‌طوری‌که قطعه تولیدشده با استفاده از لایه پلی‌یورتان با ضخامت ۱۰ میلی‌متر از کیفیت سطحی بسیار مطلوبی برخوردار بوده و دارای توزیع ضخامت یکنواختی در راستای هر دو مسیر اندازه‌گیری است. نتایج حاصل از این پژوهش

12. Zhang, Q., Wang, Z.R., and Dean, T.A. "Multi-point Sandwich Forming of a Spherical Sector with Tool-shape Compensation", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 194, No. 1-3, pp. 74–80, 2007.
13. Tan, F.X., Li, M.Z., and Cai, Z.Y. "Research on the Process of Multi-point Forming for the Customized Titanium Alloy Cranial Prosthesis", *J. Materials P. Tech.*, Vol's. 187–188, No. 1, pp. 453–457, 2007.
14. Cai, Z.Y., Wang, S.H., Xu, X.D., and Li, M.Z. "Numerical Simulation for the Multi-point Stretch Forming Process of Sheet Metal", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 209, No. 1, pp. 396–407, 2009.
15. Li, L., Seo, Y.H., Heo, S.C., Kang, B.S., and Kim, J. "Numerical Simulations on Reducing the Unloading Springback with Multi-step Multi-point Forming Technology", *J. Advance Manufacturing Tech.*, Vol. 48, No. 1-4, pp. 45–61, 2010.
16. ABAQUS 6.9-PR11. Documentation, User's Manual, 2009.
17. ABAQUS 6.9-PR11. Documentation, Abaqus Theory Manual, 2009.
18. Wang, Sh., Cai, Zh., and Li, M. "Numerical Investigation of the Influence of Punch Element in Multi-point Stretch Forming Process" *J. Advance Manufacturing Tech.*, Vol. 49, No. 5-8, pp. 475–483, 2010.
- Die", *J. Manufacturing proc.*, Vol. 4, No. 1, pp. 77–85, 2002.
6. Li, M.Z., Liu, Y., Su, Sh., and Li, G. "Multi-point Forming: A Flexible Manufacturing Method for a 3-d Surface Sheet", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 87, No. 1-3, pp. 277–280, 1999.
7. Li, M.Z., Cai, Z.Y., Sui, Z., and Yan, Q.G. "Multi-point Forming Technology for Sheet Metal", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 129, No. 1-3, pp. 333–338, 2002.
8. Chen, J.J., Li, M.Z., Liu, W., and Wang, C.T. "Sectional Multipoint Forming Technology for Large-size Sheet Metal", *J. Advance Manufacturing Tech.*, Vol. 25, No. 9-10, pp. 935–939, 2005.
9. Sun, G., Li, M.Z., Yan, X.P., and Zhong, P.P. "Study of Blank-holder Technology on Multi-point forming of Thin Sheet Metal", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol's. 187-188, No. 1, pp. 517–520, 2007.
10. Qian, Z.R., Li, M.Z., and Tan, F.X. "The Analyse on the Process of Multi-point Forming for Dish Head", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol's. 187-188, No. 1, pp.471–475, 2007.
11. Zhang, Q., Dean, T.A., and Wang, Z.R. "Numerical Simulation of Deformation in Multi-point Sandwich Forming", *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 7-8, pp. 699-707, 2006.

Archive