



## بررسی اثر تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر فوم پلیمری بر شکل‌دهی تدریجی ورق پلی اتیلنی

مسعود رخس خورشید<sup>1\*</sup>، سید محمد حسینی<sup>2</sup>

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/569، rakshshkorshid@birjandut.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 آبان 1400

داوری اولیه: 3 آذر 1400

پذیرش: 24 آذر 1400

## کلیدواژگان:

ورق پلیمری

شکل‌دهی تدریجی

توزیع ضخامت

تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

شکل‌دهی تدریجی فرآیندی کاربردی جهت نمونه سازی سریع و ساخت قطعات ورقی در دسته‌های کوچک است. انجام فرایند در دماهای بالا، مطالعه بر روی توزیع ضخامت و بهبود حد شکل‌دهی نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده در این حیطه است. تلاشهایی نیز به منظور بهبود دقت هندسی قطعات تولید شده به روش شکل‌دهی تدریجی انجام شده است و شکل‌دهی دو نقطه‌ای و استفاده از فوم فلزی به عنوان تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر پیشنهاد شده است. در تحقیق حاضر، استفاده از فوم پلیمری به عنوان تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر برای بهبود شرایط شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلی اتیلن سنگین با ضخامت 2 میلی‌متر پیشنهاد شده است. عیوب چروکیدگی و پارگی بوجود آمده در شرایط مختلف انجام فرایند با سرعت‌های دورانی و سرعت‌های پیشروی متفاوت با انجام آزمایش‌های تجربی بررسی و با یکدیگر مقایسه شده اند. برای این کار از قطعاتی با زاویه دیواره متغیر استفاده شد. نتایج نشان دهنده بهبود شرایط شکل‌دهی با دستیابی به قطعات بدون عیب با زاویه دیواره بزرگتر است. دقت ابعادی قطعات تولید شده به کمک اسکنر سه بعدی بررسی شد. نتایج نشان دهنده بهبود دقت ابعادی قطعات تولید شده در شرایط استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بود.

## The effect of flexible die support from polymeric foam on the incremental forming of polyethylene sheet

Masoud Rakhshkorshid\*, Seyed Mohammad Hosseini

Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

\* P.O.B. 97175/569 Birjand, Iran, rakshshkorshid@birjandut.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper

Received: 6 October 2021

First Decision: 24 November 2021

Accepted: 15 December 2021

## Keywords:

Polymeric Sheet

Incremental Forming

Thickness Distribution

Flexible Die Support

## Abstract

The Incremental forming is an applied production method in rapid prototyping and manufacturing of sheet products in small batches. Usually this process is performed in environment temperature by a computer numerical control machine or a manipulator. Conducting the process in high temperatures, studying the thickness distribution and improving the forming limit of producing parts are the main research contributions in this field. Also, some efforts have been made to increase the accuracy of manufactured parts and two point incremental forming and using of metallic foams have been proposed. In this research, the usage of polymeric foam as a flexible support is proposed to improve the incremental forming of high density polyethylene sheet with the thickness of 2 mm. Wrinkling and tearing defects for both with and without flexible support processing conditions with different spindle speeds and feed rates were investigated. For this, parts with variable wall angle were used. The results showed, the usage of polymeric foam support improves the forming condition by achieving to the parts with higher wall angle. Also, some samples produced in different working condition were selected and the accuracy of them was investigated using a 3D scanner and the improvement of the accuracy in the condition of using the flexible die support was observed.

## 1- مقدمه

ساخت قالب نیست، هزینه نمونه‌سازی کاهش می‌یابد و امکان اصلاح قطعات تولید شده به راحتی با اصلاح مسیر حرکت ابزار فراهم می‌شود [1، 2].

تاکنون مطالعات متعددی بر روی این فرآیند انجام گرفته است. مطالعه اثر پارامترهای فرآیند بر حد شکل‌دهی قطعات تولید شده به این روش، انجام فرایند در دماهای بالا، مطالعه بر روی توزیع ضخامت، افزایش دقت هندسی قطعات تولید شده و شکل‌دهی ورق‌های پلیمری نمونه‌هایی از زمینه‌های پژوهش در این حیطه است [3-8].

فرآیند شکل‌دهی تدریجی که عموماً بصورت تک نقطه‌ای انجام می‌شود، فرآیندی نو و راه حلی عملی در نمونه سازی سریع و ساخت قطعات ورقی در دسته‌های کوچک محسوب می‌شود. این فرایند معمولاً در دمای اتاق و توسط یک ماشین کنترل عددی یا بازوی مکانیکی ماهر انجام می‌شود. پولک اولیه بر روی یک تکیه‌گاه ساده ثابت می‌شود و بوسیله یک ابزار سر کروی یا نیم کروی که در بر روی مسیری از قبل تعیین شده حرکت می‌کند به تدریج شکل می‌گیرد. از آنجا که در این روش تولید نیازی به

Please cite this article using:

M. Rakhshkorshid, S. M. Hosseini, The effect of flexible die support from polymeric foam on the incremental forming of polyethylene sheet, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 10, pp. 38- 48, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کششی توسط چوبی و لی [4] ارائه شده است.

کاهش زبری سطح قطعات تولید شده به روش شکل‌دهی تدریجی نیز مورد توجه بوده است. به عنوان مثال، در مطالعه انجام شده توسط باراه و دیگران [5] اثر روانکار، گام عمودی، سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی بر قابلیت شکل‌دهی و کاهش زبری سطح در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی در سه جهت نورد، عرضی و مایل مطالعه شده است. روانکاری به‌عنوان بالاترین عامل مؤثر برای هر سه جهت و سرعت پیشروی به عنوان پایین‌ترین عامل مؤثر بر فرایند تعیین شدند. گام عمودی و سرعت دورانی به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار گرفتند.

تلاش‌هایی نیز به منظور بهبود دقت هندسی قطعات تولید شده به روش شکل‌دهی تدریجی انجام شده است و شکل‌دهی دو نقطه‌ای<sup>1</sup> پیشنهاد شده است. در این روش یک قالب (تکیه‌گاه) صلب با شکل کامل یا ناقص در زیر ورق قرار می‌گیرد و حمایت لازم را جهت افزایش دقت هندسی قطعه تولیدی فراهم می‌آورد. از آنجا که هندسه این قالب مخصوص به هندسه قطعه تولیدی بستگی دارد استفاده از این روش از انعطاف‌پذیری این روش تولیدی می‌کاهد [6]. به منظور حل این مشکل روش شکل‌دهی تدریجی دوطرفه پیشنهاد شده است که در آن از یک ابزار سرکروی به عنوان ابزار تکیه‌گاهی استفاده می‌شود. این روش همچنین به عنوان روش شکل‌دهی تدریجی دوتایی با تکیه‌گاه محلی نامگذاری می‌شود<sup>2</sup> [7]. علاوه بر این، استفاده از فوم فلزی به عنوان قالب (تکیه‌گاه) انعطاف‌پذیر توسط مین و دیگران [8] پیشنهاد شده است. آنها از بلوکی تهیه شده از فوم فلزی آلومینیومی جهت حمایت ورق از جنس فولاد نرم و جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک ناخواسته استفاده کرده‌اند.

اخیراً، علاوه بر شکل‌دهی ورق‌های فلزی از فرایند شکل‌دهی تدریجی برای شکل‌دهی ورق‌های پلیمری نیز استفاده شده است. اثر گام عمودی و سرعت دورانی ابزار بر نوع خرابی (پارگی یا چروکیدگی) و ویژگی‌های ریزساختاری پلیمر توسط داورپناه و دیگران [9] بررسی شده است. آنها نشان دادند که پس از یک گام عمودی مشخص نوع عیب از پارگی به چروکیدگی تغییر می‌کند و با افزایش سرعت دورانی ابزار تمایل به چروکیدگی قطعات تولیدی بیشتر می‌شود. افزایش گام عمودی و سرعت دورانی مقدار حفره‌ها را در ریزساختار پلیمر افزایش می‌دهد. همچنین در تحقیقی دیگر باگوداش و دیگران [10] اثر نیروی شکل‌دهی و دما را بر شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای پلی وینیل

تحقیقاتی به منظور بررسی قابلیت شکل‌دهی ورق‌های فلزی در فرایند شکل‌دهی تدریجی انجام شده است. به عنوان مثال در مطالعه انجام شده توسط پارک و کیم نمودار حد شکل‌دهی برای ورق‌های آلومینیومی تولید شده به روش شکل‌دهی تدریجی با روش‌های سنتی شکل‌دهی مقایسه شده است و نشان داده شده است که در صورت استفاده از این روش شکل‌پذیری ورق بهبود می‌یابد [1]. در این تحقیق، اثر نوع ابزار، اندازه ابزار، سرعت پیشروی، اصطکاک بین ابزار و ورق و ناهمسانگردی بر شکل‌پذیری به روش آزمایشگاهی و اجزاء محدود مطالعه شده است.

علاوه بر این، پیش‌بینی توزیع ضخامت و پیش‌بینی زاویه دیواره حداکثر نیز از چالش‌های موجود در زمینه شکل‌دهی تدریجی است. حسین و گائو [2] روشی نوین و قابل قبول جهت تعیین حد نازک شدگی در ورق‌های فلزی تولید شده به روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای (منفی) ارائه کرده‌اند. آنها نشان دادند که می‌توان از یک قطعه با زاویه دیواره متغیر به جای استفاده از چندین قطعه با زوایای دیواره مختلف برای تعیین حد نازک شدگی استفاده کرد. آنها صحت قانون کسینوس را برای پیش‌بینی قطعات تولید شده به روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای بررسی کردند. به منظور آزمایش حد نازک شدگی ورق آلومینیومی، قطعه متقارن محوری که با استفاده از کمان مولد تولید شده بود بصورت تدریجی تا لحظه وقوع ترک شکل‌دهی شد. ضخامت قطعه تولید شده در نقاط متفاوت اندازه‌گیری و با ضخامت پیش‌بینی شده بوسیله قانون کسینوس مقایسه شد و مقدار نازک شدگی حداکثر در نقطه‌ای که در آن ضخامت نمونه از قانون کسینوس پیروی می‌کند به عنوان حد نازک شدگی ورق فلزی معرفی شد.

در تحقیق انجام شده توسط کورا و ریگالا [3] شکل‌پذیری ورق‌های فولادی کشش فوق‌عمیق به کمک آزمون زاویه دیواره حداکثر هم بصورت تجربی و هم بصورت عددی بررسی شده است. در این تحقیق به منظور اجتناب از انجام آزمون بر روی قطعات مخروطی متعدد با زوایای دیواره مختلف، انجام آزمون بر روی مخروطی با زاویه دیواره متغیر انجام گردیده است. از مولدهای بیضی شکل، نمائی، سهمی و دایره‌ای برای طراحی مخروط با زاویه دیواره متغیر استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که نتایج مدل المان محدود دارای دقت بیشتری نسبت به نتایج مدل تئوری براساس قانون کسینوس برای پیش‌بینی توزیع ضخامت است. همچنین، یک مدل ریاضی به منظور پیش‌بینی توزیع ضخامت و قابلیت شکل‌دهی در روش شکل‌دهی تدریجی در ترکیب با فرم‌دهی

<sup>1</sup> Two point incremental forming

<sup>2</sup> Double point incremental forming-Local

تحقیق حاضر است. از نتیجه تحقیق حاضر می‌توان جهت ساخت قطعات پلیمری با توجه به حداکثر زاویه قابل دستیابی (تولید قطعه بدون عیب) استفاده کرد. همچنین می‌توان با توجه به حداکثر زاویه قابل دستیابی، قطعات را طراحی مجدد کرد و از مزیت امکان تولید به روش شکل‌دهی تدریجی که یک روش تولید انعطاف‌پذیر است بهره برد. استفاده از این روش تولید نیاز به ساخت قالب تزریق پلاستیک را برای بسیاری از قطعاتی که امکان تولید آن‌ها از ورق پلیمری فراهم باشد حذف می‌کند و در عمل برای تولید در دسته‌های کوچک روشی مقرون به صرفه است. در تحقیق حاضر علاوه بر نشان دادن مزیت استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر از جنس فوم پلیمری (تولید قطعاتی با زاویه دیواره بزرگتر)، شرایط بهینه فرایند شامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی مناسب نیز برای ورق پلی اتیلنی مورد مطالعه ارائه می‌شود.

## 2- مواد و آزمایشات

در تحقیق حاضر شکل‌دهی تدریجی بر روی ورق‌های پلی اتیلنی با چگالی بالا با ضخامت 2 میلی‌متر انجام شده است. با هدف بررسی زاویه دیواره حداکثر قابل دستیابی در شرایط مختلف انجام فرایند و کاهش تعداد آزمایشات، قطعه‌ای با زاویه دیواره متغیر طراحی شد. همان‌طور که در مرجع [2] شرح داده شده است می‌توان از مولد دایره‌ای برای ایجاد چنین قطعه‌ای استفاده کرد (شکل 1).

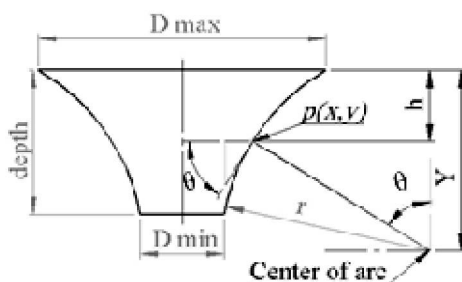


Fig. 1 The usage of circular generator to produce a taper part with variable wall angle [2]

شکل 1 استفاده از مولد دایره‌ای برای ایجاد قطعه مخروطی با زاویه دیواره متغیر [2]

مطابق شکل 1، اگر نقطه  $p(x, y)$  نقطه‌ای دلخواه بر روی کمان دایره و  $\theta$  شیب دیواره در این نقطه باشد، با توجه به قانون کسینوس در شکل‌دهی تدریجی [2] و هندسه قطعه می‌توان رابطه (1) را نوشت:

$$t_f = t_0 \cos \theta = t_0 \frac{y_p}{r} \quad (1)$$

کلراید بررسی کرده‌اند. در مطالعه انجام شده توسط ژا و دیگران [11] شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلی پروپیلنی مطالعه شده است و عیب چروکیدگی، عیب اصلی این فرایند تشخیص داده شده است. آنها شرح داده‌اند که مواد پلیمری بر خلاف فلزات به دما حساس هستند و به علت گرمای ایجاد شده در نتیجه گرمای اصطکاک بین ابزار و ورق نرم شده و در نهایت دچار چروکیدگی می‌شوند. دورانته و دیگران [12] اثر نوع ابزار و استراتژی حرکت ابزار را بر مد شکست ایجاد شده در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلی کربنات بررسی کرده‌اند. بدین منظور دو نوع ابزار یکی با هندسه سرکروی ثابت و دیگری با ابزار ساچمه‌ای استفاده شده است. آنها نشان دادند که در شرایط حرکت مارپیچ ابزار مد شکست نوع III برای هر دو نوع ابزار اتفاق می‌افتد و شرایط مد شکست نوع II در شرایط حرکت غیر مارپیچ (پله‌ای با گام ثابت) به همراه ابزار سرکروی ثابت روی می‌دهد. اخیراً مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلیمری توسط حسن و همکاران [13] انجام شده است که در آن علاوه بر پژوهش‌های تجربی به پژوهش‌های متکی به تحلیل شکل‌دهی نظیر تحقیق انجام شده توسط یانگ و چن [14] نیز پرداخته شده است. در تحقیق انجام شده توسط یانگ و چن [14] سازوکار پیچش در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلیمری گرم‌انرم که منجر به عیب هندسی چروکیدگی در این فرایند می‌شود شرح داده شده است و وقوع این پدیده در کاربرد صنعتی فرایند ساخت استخوان مصنوعی توسط شکل‌دهی تدریجی نشان داده شده است. همچنین، یک مدل تحلیلی جدید برای محاسبه زاویه پیچش بر اساس قانون بقای انرژی پیشنهاد شده است و استفاده از مسیر ابزار مارپیچ اصلاح شده بر مبنای مدل تحلیلی ارائه شده به جای مسیر مارپیچی معمولی (که با توجه به هندسه قطعه طراحی می‌شود) پیشنهاد شده است. موفقیت روش پیشنهادی با ساخت قطعاتی به شکل هرم ناقص نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر، برای اولین بار امکان استفاده از فوم پلیمری به عنوان تکیه‌گاه جهت بهبود دقت هندسی قطعات ورق پلی اتیلنی تولید شده به روش شکل‌دهی تدریجی بررسی می‌شود. با توجه به مرور منابع تاکنون این موضوع توسط سایر محققان بررسی نشده است؛ گرچه، استفاده از فوم فلزی آلومینیومی جهت شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی فولاد نرم آخرین دستاورد مشابه است [8]. در تحقیق حاضر آزمون بر روی قطعاتی با زاویه دیواره متغیر انجام می‌شود. ارائه شرایط مناسب انجام شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلی اتیلنی دستاورد

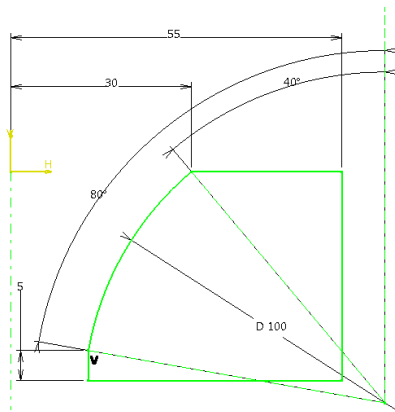


Fig. 2 The designed taper part with circular generator with the diameter of 100 mm

شکل 2 قطعه مخروطی طراحی شده در تحقیق حاضر با استفاده از مولد دایره‌ای به قطر 100 میلی‌متر

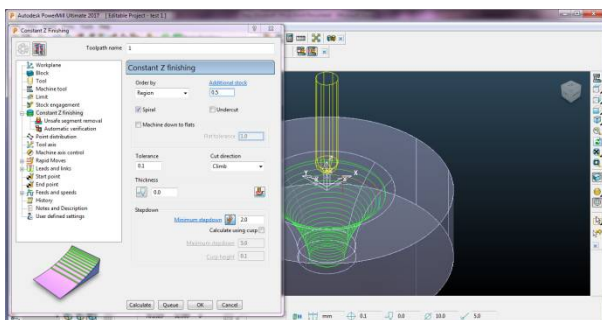


Fig. 3 Tool path and the settings applied by "Power Mill" software  
شکل 3 مسیر ابزار و تنظیمات اعمال شده توسط نرم‌افزار پاورمیل



Fig. 4 The experimental set up

شکل 4 تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده



Fig. 5 The rigid support with the thickness of 2 mm

شکل 5 تکیه‌گاه صلب به ضخامت 2 میلی‌متر و با سوراخی با قطر داخلی 80 میلی‌متر

که در رابطه فوق  $t_0$  ضخامت اولیه ورق و  $t_f$  ضخامت نهایی ورق است. در نتیجه با توجه به شکل 1:

$$\theta p = \cos^{-1} \frac{y_p}{r} = \cos^{-1} \left( \frac{(Y-h)}{r} \right) \quad (2)$$

که در رابطه فوق، مقدار  $Y$  عدد ثابت و به اندازه اختلاف ارتفاع سطح بالای ورق و مرکز کمان مولد است.  $y_p$  مؤلفه عمودی نقطه روی قطعه مخروطی و  $h$  عمق این نقطه و  $r$  شعاع کمان مولد شکل مورد نظر می‌باشند. با توجه به رابطه (2) می‌توان مقدار زاویه دیواره را با توجه به عمق شکل‌دهی محاسبه کرد و ضخامت ورق شکل‌دهی شده را می‌توان از رابطه (1) تخمین زد که البته ممکن است با نتایج تجربی اختلافی هم داشته باشد.

در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن قاعده بالایی قطعه مخروطی و شعاع کمان مولد به ترتیب برابر 30 و 50 میلی‌متر در نظر گرفته شدند. سپس، مقدار  $Y$  با توجه به رابطه (3) به گونه‌ای تعیین گردید که شیب اولیه قطعه مخروطی برابر 40 درجه باشد. با در نظر گرفتن شیب نهایی قطعه برابر 80 درجه عمق نهایی قطعه برابر 29/62 میلی‌متر بدست آمد. هندسه قطعه طراحی شده در شکل 2 نشان داده شده است. مدل صلب حاصل از اسکچ نشان داده شده در شکل 2 وارد نرم‌افزار پاورمیل شد. در شکل 3 استراتژی حرکت ابزار و تنظیمات مربوطه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود به منظور حرکت ابزار روی دیواره قطعه کار و تولید محصول نهایی شکل‌دهی تدریجی از استراتژی پرداخت با جهت ماشین‌کاری موافق استفاده شده است و گام عمودی در تمامی شرایط انجام آزمایش ثابت و برابر ضخامت ورق مورد مطالعه (2 میلی‌متر) در نظر گرفته شده است. همچنین، ابزار پس از انجام یک دور شکل‌دهی در عمق 2 میلی‌متری بصورت مارپیچ حرکت کرده است و در هر دور به اندازه 2 میلی‌متر شکل‌دهی را انجام می‌دهد. در شکل 4 تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده است ورق پلی اتیلین توسط یک حلقه نگهدارنده نگهداری می‌شود و فرایند شکل‌دهی تدریجی با ابزاری سر کروی به قطر 10 میلی‌متر انجام می‌شود. در تمامی شرایط آزمایش در زیر قطعه پلی اتیلنی از یک تکیه‌گاه صلب به ضخامت 2 میلی‌متر و با سوراخی با قطر داخلی 80 میلی‌متر استفاده شده است (شکل 5).

لازم به ذکر است که آزمایش‌ها بر روی ماشین کنترل عددی بریچپورت VMC800 با کنترل‌هایدین‌هاین و حداکثر سرعت دورانی ابزار 6000 دور بر دقیقه و قدرت اسپیندل 19 کیلووات انجام شده است.

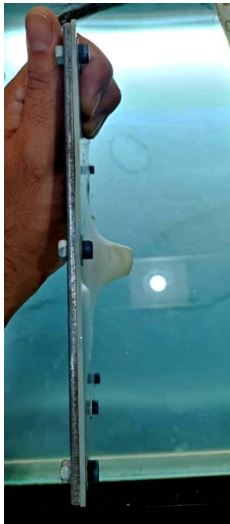


Fig. 6 The flexible polystyrene support

شکل 6 تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر پلی استایرنی با سوراخی به قطر 22 و عمق 30 میلی‌متر

در شکل 6 چگونگی استفاده از فوم پلی استایرن به عنوان تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 6 مشخص است در وسط فوم سوراخی به عمق 30 میلی‌متر و قطر اولیه 22 میلی‌متر ایجاد شده است تا فشردگی نسبتاً یکنواختی حاصل شود. البته ایجاد یک تکیه‌گاه صلب با شکل هندسی دقیق منظور این تحقیق نبوده است که از آن اجتناب شده است.

به منظور بررسی اثر وجود تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر پلی استایرنی آزمایشات با گام عمودی ثابت 2 میلی‌متر و سرعت پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت‌های دورانی 500، 1000، 2000 و 3000 دور بر دقیقه در شرایط با و بدون استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر انجام شد. در پایان به منظور بررسی و مقایسه دقت ابعادی نمونه‌ها از اسکنر سه بعدی استفاده شد. اسکنر مورد استفاده در تحقیق حاضر OPTIMSCAN-3M با صحت حجمی 0/1 میلی‌متر بر متر است.

### 3- نتایج و بحث

در این بخش عیوب چروکیدگی و پارگی بوجود آمده در شرایط مختلف انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی قطعات پلی اتیلنی با سرعت‌های دورانی و سرعت‌های پیشروی متفاوت با انجام آزمایش‌های تجربی بررسی و در شرایط با و بدون استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در پایان نمونه‌هایی در دو شرایط با و بدون استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر انتخاب و دقت ابعادی قطعات تولید شده به کمک اسکنر سه بعدی با یکدیگر مقایسه شدند.

#### 3-1- بررسی عیوب و حداکثر عمق و زاویه قابل دستیابی

شکل‌ها، در این بخش ابتدا نتایج حاصل از انجام آزمایشات به شکل عیوب ظاهری ارائه می‌گردد. همان‌طور که در تحقیق انجام شده توسط داورپناه و دیگران [9] بیان شده است، پارگی و چروکیدگی عیوبی هستند که در تولید قطعات پلیمری به روش شکل‌دهی تدریجی روی می‌دهند. آنها اثر گام عمودی و سرعت دورانی ابزار بر نوع عیوب (پارگی یا چروکیدگی) را بررسی و نشان دادند که پس از یک گام عمودی مشخص نوع عیب از پارگی به چروکیدگی تغییر می‌کند و با افزایش سرعت دورانی ابزار تمایل به چروکیدگی قطعات تولیدی بیشتر می‌شود.

در ادامه نتایج بررسی عیوب برای قطعات تولید شده در برخی شرایط انجام آزمایش در شکل‌های 7 تا 10 نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای این کار از یک دوربین دیجیتال با تفکیک پذیری 16 مگاپاسکال با موقعیت ثابت استفاده شده است.



(الف)



(ب)

Fig. 7 The produced part with rotational speed of 500 rpm and feed rate of 100 mm/min A) without flexible support, B) with flexible support.

شکل 7 قطعه تولید شده در سرعت دورانی 500 rpm و سرعت پیشروی 100 mm/min (الف) بدون تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، (ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

در ادامه نتایج حاصل از انجام آزمایشات به منظور بررسی



(ب)

**Fig. 9** The produced part with rotational speed of 2000 rpm and feed rate of 100 mm/min A) without flexible support, B) with flexible support.

شکل 9 قطعه تولید شده در سرعت دورانی 2000 rpm و سرعت پیشروی 100 mm/min (الف) بدون تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، (ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

حداکثر عمق یا به عبارت دیگر حداکثر زاویه قابل دستیابی بررسی شد. لازم به ذکر است عیوب ظاهر شده در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلیمری به شکل چروکیدگی و پارگی اتفاق می‌افتند [9] که در این بخش از مقاله از حرف "W" برای نشان دادن عیب چروکیدگی و از حرف "T" برای نشان دادن عیب پارگی استفاده شده است.



(الف)



(ب)

**Fig. 8** The produced part with rotational speed of 1000 rpm and feed rate of 400 mm/min A) without flexible support, B) with flexible support.

شکل 8 قطعه تولید شده در سرعت دورانی 1000 rpm و سرعت پیشروی 400 mm/min (الف) بدون تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، (ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر



(الف)



(ب)

**Fig. 10** The produced part with rotational speed of 3000 rpm and feed rate of 200 mm/min A) without flexible support, B) with flexible support.

شکل 10 قطعه تولید شده در سرعت دورانی 3000 rpm و سرعت پیشروی 200 mm/min (الف) بدون تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، (ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

در شکل 11 حداکثر عمق قابل دستیابی (یا به عبارت دیگر



(الف)



حداکثر زاویه قابل دستیابی) برای تولید یک قطعه بدون عیب برای قطعات تولید شده با سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه در شرایط انجام آزمایش با و بدون استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود در سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه در شرایط بدون استفاده از تکیه‌گاه افزایش سرعت پیشروی تا سرعت 300 میلی‌متر بر دقیقه منجر به دستیابی به قطعاتی با عمق حداکثر بالاتر می‌شود و پس از آن بهبودی در نتایج حاصل نمی‌شود. البته در شرایط بدون استفاده از تکیه‌گاه مقدار بهینه در بیشترین سرعت پیشروی بدست می‌آید. بطور کلی در سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه نقش تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر برای جلوگیری از چروکیدگی ناشی از حرکت ابزار بر روی ورق هنگام تولید قطعه مشخص است. به عبارت دیگر وجود تکیه‌گاه با ایجاد اصطکاک در پشت قطعه کار می‌تواند از چروکیدگی ناشی از حرکت ابزار بر روی ورق هنگام تولید قطعه بکاهد.

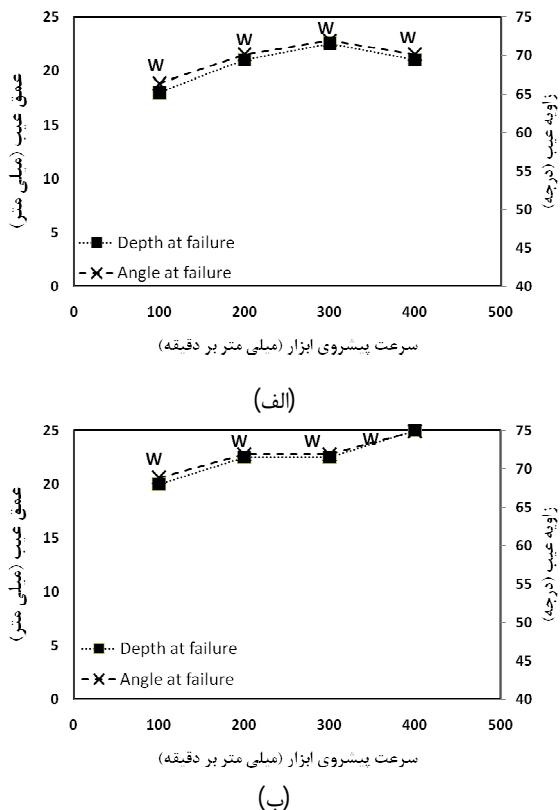


Fig. 12 Maximum achievable depth at the rotational speed of 1000 rpm with different feed rates of 100, 200, 300 and 400 mm/min, A) without the support B) with support

شکل 12 حداکثر عمق قابل دستیابی (یا به عبارت دیگر حداکثر زاویه قابل دستیابی) برای تولید یک قطعه بدون عیب برای قطعات تولید شده با سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه (الف) بدون تکیه‌گاه (ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

حداکثر زاویه قابل دستیابی) برای تولید یک قطعه بدون عیب برای قطعات تولید شده با سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه در شرایط انجام آزمایش با و بدون استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود در سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه برای سرعت پیشروی بالاتر از 200 میلی‌متر بر دقیقه سرعت پیشروی تاثیر چندانی بر حداکثر زاویه دیواره قابل دستیابی ندارد. البته در شرایط بدون استفاده از تکیه‌گاه مقدار بهینه در کمترین سرعت پیشروی و در شرایط با استفاده از تکیه‌گاه در بیشترین سرعت پیشروی بدست آمده است. به عبارت دیگر وجود تکیه‌گاه با ایجاد اصطکاک در پشت قطعه کار می‌تواند از چروکیدگی ناشی از حرکت ابزار بر روی ورق هنگام تولید قطعه بکاهد.

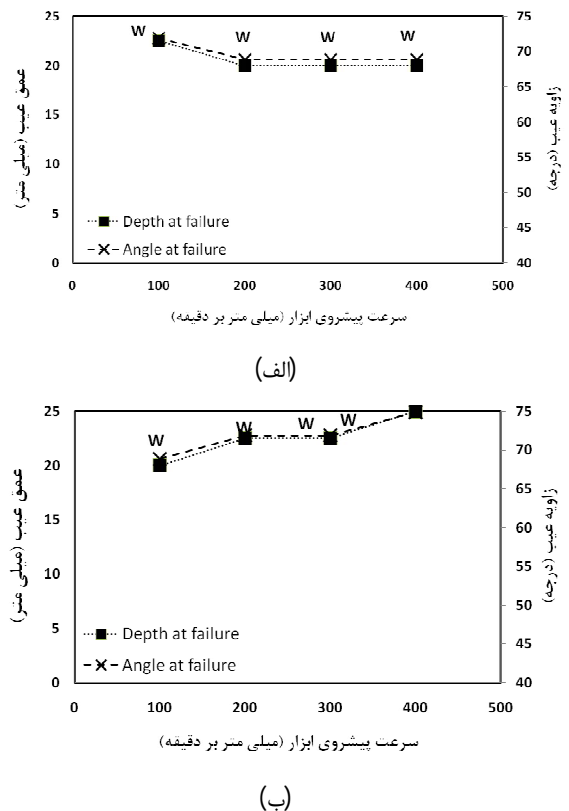


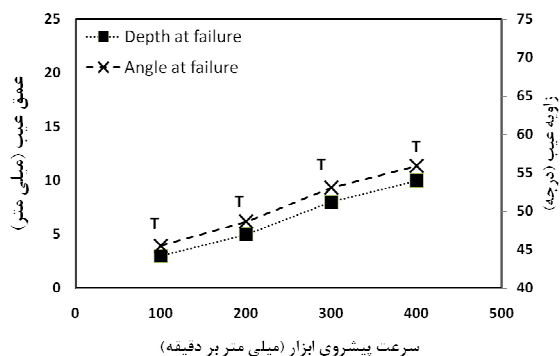
Fig. 11 Maximum achievable depth at the rotational speed of 500 rpm with different feed rates of 100, 200, 300 and 400 mm/min, A) without the support B) with support

شکل 11 حداکثر عمق قابل دستیابی (یا به عبارت دیگر حداکثر زاویه قابل دستیابی) برای تولید یک قطعه بدون عیب برای قطعات تولید شده با سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه (الف) بدون تکیه‌گاه (ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

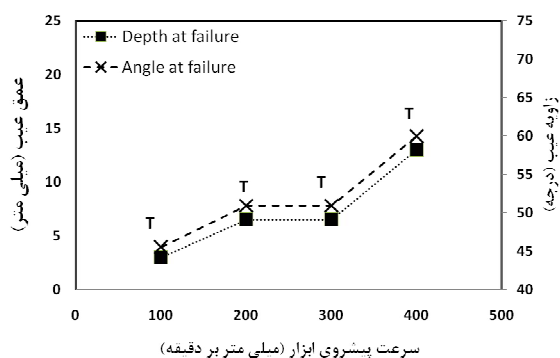
در شکل 12 حداکثر عمق قابل دستیابی (یا به عبارت دیگر

در شکل 14 حدکثر عمق قابل دستیابی (یا به عبارت دیگر حداکثر زاویه قابل دستیابی) برای تولید یک قطعه بدون عیب برای قطعات تولید شده با سرعت دورانی 3000 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه در شرایط انجام آزمایش با و بدون استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل 14 مشاهده می‌شود در سرعت دورانی 3000 دور بر دقیقه در شرایط با و بدون استفاده از تکیه‌گاه در تمامی سرعت‌های پیشروی عیب پارگی وجود می‌آید. البته مقایسه نتایج نشان داده شده بیانگر بهبود شرایط شکل‌دهی در صورت استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر است. بطور کلی نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت دورانی در شرایط انجام آزمایش منجر به پارگی قطعه می‌شود.



الف



ب

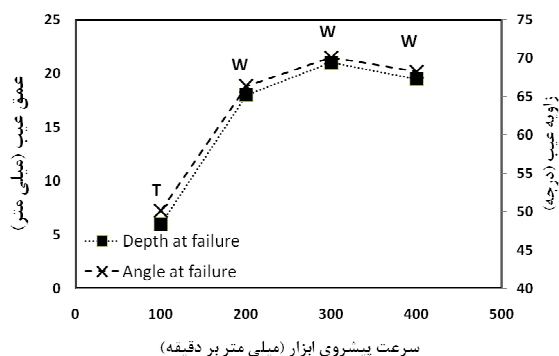
Fig. 14 Maximum achievable depth at the rotational speed of 3000 rpm with different feed rates of 100, 200, 300 and 400 mm/min, A) without the support B) with support

شکل 14 حدکثر عمق قابل دستیابی (یا به عبارت دیگر حداکثر زاویه قابل دستیابی) برای تولید یک قطعه بدون عیب برای قطعات تولید شده با سرعت دورانی 3000 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه الف) بدون تکیه‌گاه ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

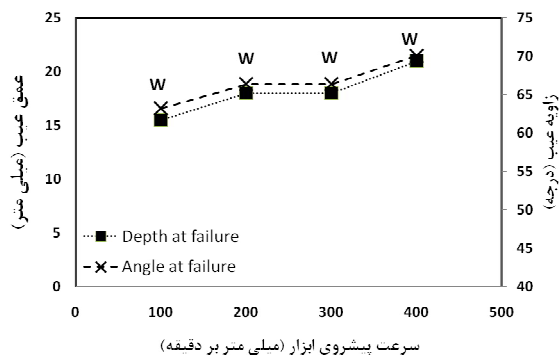
علاوه بر این استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بطور مشخص

در شکل 13 حدکثر عمق قابل دستیابی (یا به عبارت دیگر حداکثر زاویه قابل دستیابی) برای تولید یک قطعه بدون عیب برای قطعات تولید شده با سرعت دورانی 2000 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه در شرایط انجام آزمایش با و بدون استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود در سرعت دورانی 2000 دور بر دقیقه در شرایط بدون استفاده از تکیه‌گاه در سرعت پیشروی 100 میلی‌متر بر دقیقه اتفاق می‌افتد. البته همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در صورت استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر دیگر این عیب مشاهده نمی‌شود. با افزایش سرعت پیشروی نوع عیب ایجاد شده به چروکیدگی تغییر می‌یابد. شرایط بهینه برای این سرعت دورانی در شرایط بدون و با استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، به ترتیب در سرعت‌های پیشروی 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه رخ می‌دهد.



الف

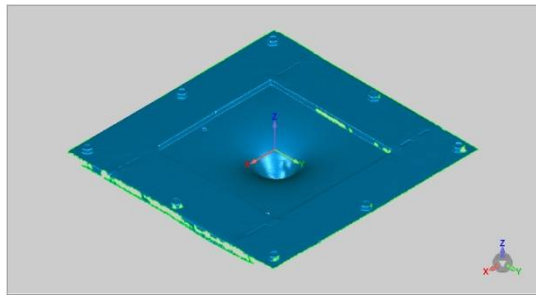


ب

Fig. 13 Maximum achievable depth at the rotational speed of 2000 rpm with different feed rates of 100, 200, 300 and 400 mm/min, A) without the support B) with support

شکل 13 حدکثر عمق قابل دستیابی (یا به عبارت دیگر حداکثر زاویه قابل دستیابی) برای تولید یک قطعه بدون عیب برای قطعات تولید شده با سرعت دورانی 2000 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه الف) بدون تکیه‌گاه ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر



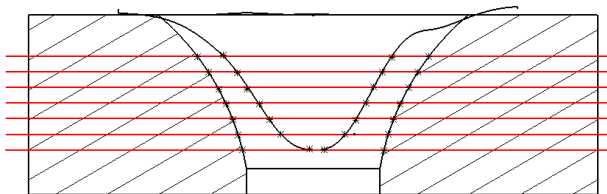


(ب)

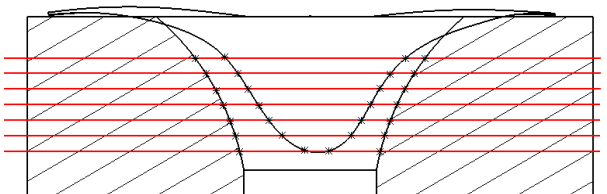
**Fig. 16** 3D scanning of the parts produced at the rotational speed of 500 rpm and the feed rate of 200 mm/min, A) without support B) with support

شکل 16 نتایج اسکن سه بعدی برای قطعه تولید شده در سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 200 میلی‌متر بر دقیقه الف) بدون تکیه‌گاه ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

به منظور بررسی کمی نتایج اسکن سه بعدی برای قطعات تولید شده در شرایط انتخابی با سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 200 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 400 میلی‌متر بر دقیقه در شرایط با و بدون تکیه‌گاه برش زده شدند و با رسم خطوطی با فواصل سه میلی‌متری از انتهای شکل ایده ال انحراف از اندازه اصلی پیری شد. نتایج در شکل‌های 17 و 18 ارائه شده است. انحراف میانگین اندازه گیری شده برای قطعات مورد بررسی در جدول 1 خلاصه شده است.



الف



ب

**Fig. 17** The cut view of the parts produced at the rotational speed of 500 rpm and the feed rate of 200 mm/min, A) without support B) with support

شکل 17 برش قطعه تولید شده با سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه با سرعت پیشروی 200 میلی‌متر بر دقیقه الف) بدون تکیه‌گاه ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

شرایط انجام آزمایش را بهبود می‌دهد و امکان تولید قطعات بدون عیب با عمق بیشتر که برای قطعات مورد آزمایش در تحقیق حاضر به معنی دستیابی به قطعاتی با زاویه دیواره بزرگتر است را فراهم می‌آورد. بهترین شرایط انجام فرایند در سرعت دورانی 500 rpm سرعت پیشروی 400 mm/min بدست آمد.

### 3-2- بررسی دقت ابعادی قطعات تولید شده توسط اسکن سه بعدی

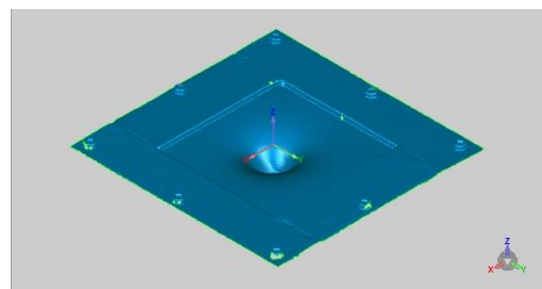
برای بررسی دقت ابعادی قطعات تولید شده از اسکن سه بعدی استفاده شد که بدین منظور ابتدا قطعات در یک فیکسچر قرار گرفته تا انحنای موجود که ناشی از جدا کردن ورق‌های اولیه از رول می‌باشد حذف گردد. فیکسچر ساخته در شکل 15 شده نشان داده شده است.

بعد اطمینان از ثابت شدن قطعات، قطعات تولید شده در شرایط سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 200 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 400 میلی‌متر بر دقیقه در شرایط با و بدون تکیه‌گاه (در مجموع 4 قطعه) توسط اسکن سه بعدی -OPTIMSCAN- 3M اسکن شدند. نتایج اسکن سه بعدی برای قطعه تولید شده در سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 200 میلی‌متر بر دقیقه در شرایط بدون و با استفاده از تکیه‌گاه به ترتیب در شکل‌های 16- الف و ب نشان داده شده‌اند.



**Fig. 15** The manufactured fixture to remove the curvature of produced parts

شکل 15 فیکسچر ساخته شده جهت حذف انحنای قطعات تولیدی



(الف)

در دو شرایط با و بدون استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر انتخاب و به کمک اسکنر سه بعدی دقت ابعادی قطعات تولید شده مقایسه شد. نتایج تحقیق حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- نتایج نشان داد که افزایش سرعت دورانی در شرایط انجام آزمایش منجر به پارگی قطعه می‌شود. در سرعت دورانی 3000 دور بر دقیقه در تمامی سرعت‌های پیشروی مورد مطالعه در شرایط بدون استفاده از تکیه‌گاه عیب پارگی روی داد.

- استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بطور مشخص شرایط انجام آزمایش را بهبود می‌دهد و امکان تولید قطعات بدون عیب با عمق بیشتر که برای قطعات مورد آزمایش در تحقیق حاضر به معنی دستیابی به قطعاتی با زاویه دیواره بزرگتر است را فراهم می‌آورد.

- بهترین شرایط انجام فرایند در سرعت دورانی 500 rpm و سرعت پیشروی 400 mm/min، در شرایط استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بدست آمد. حداکثر زاویه قابل دستیابی در این شرایط 75 درجه بود.

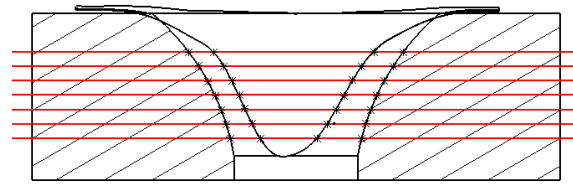
- نتایج اسکن سه بعدی نشان دهنده بهبود دقت ابعادی قطعات تولید شده در شرایط استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بود. - انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلیمری در شرایط دمایی ثابت و کنترل شده پیشنهاد می‌گردد.

### 5- فهرست علائم

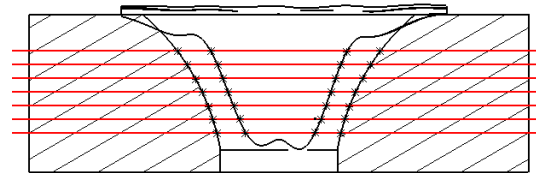
$t_0$	ضخامت اولیه ورق (mm)
$t_f$	ضخامت نهایی ورق (mm)
$\theta$	شیب دیواره قطعه (درجه)
$Y$	فاصله عمودی مرکز دایره مولد (mm)
$r$	شعاع کمان مولد (mm)
$y_p$	مؤلفه عمودی (mm)
$h$	عمق (mm)

### 6- مراجع

- [1] Y. H. Kim, J. J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of materials processing technology*, Vol. 130, pp. 42-46, 2002.
- [2] 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.
- [3] S. Kurra, S. P. Regalla, Experimental and numerical



الف



ب

**Fig. 18** The cut view of the parts produced at the rotational speed of 500 rpm and the feed rate of 200 mm/min, A) without support B) with support

شکل 18 برش قطعه تولید شده با سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه با سرعت پیشروی 400 میلی‌متر بر دقیقه (الف) بدون تکیه‌گاه (ب) با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

جدول 1 بررسی انحراف از مدل ایده آل

**Table 2** Investigation of the deviation from the ideal model

مقدار انحراف (mm)	وضعیت تکیه‌گاه	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)
7/53	بدون تکیه‌گاه	200	500
6/78	با تکیه‌گاه	200	500
6/25	بدون تکیه‌گاه	400	1000
6/04	با تکیه‌گاه	400	1000

از نتایج کمی ارائه شده در جدول 1 و بررسی‌های بصری انجام شده روی سایر قطعات تولید شده می‌توان دریافت که در صورت استفاده از تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر دقت ابعادی قطعات تولید شده بهبود می‌یابد.

### 4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر استفاده از فوم پلیمری پلی استایرنی به عنوان تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر برای بهبود شرایط شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلیمری پیشنهاد شده است. تحقیق بر روی ورق پلی اتیلنی سنگین با ضخامت 2 میلی‌متر انجام شد. عیوب چروکیدگی و پارگی و حداکثر زاویه قابل دستیابی بوجود آمده در شرایط مختلف انجام فرایند با سرعت‌های دورانی متفاوت 500، 1000، 2000 و 3000 میلی‌متر بر دور و سرعت‌های پیشروی 100، 200، 300 و 400 میلی‌متر بر دقیقه در دو شرایط با و بدون استفاده از فوم پلیمری بررسی شد. نمونه‌هایی

- Malhotra, S. Pilla, Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers, *Journal of materials processing technology*, Vol. 222, pp. 287-300, 2015.
- [10] I. Bagudanch, M. L. Garcia-Romeu, G. Centeno, A. Elías-Zúñiga, J. Ciurana, Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride, *Journal of materials processing technology*, Vol. 219, pp. 221-229, 2015.
- [11] G.C. Zha, X. Zhou, C.K. Lu, W. Zhao, S. Sun, A.X. Yan, Z.K. Li, Experimental study on the limit test method of polypropylene sheet incremental forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, No. 5, pp. 2369-2374, 2017.
- [12] M. Durante, A. Formisano, F. Lambiase, Incremental forming of polycarbonate sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 253, pp. 57-63, 2018.
- [13] M. Hassan, G. Hussain, H. Wei, A. Qadeer, M. AlKahtani, Progress on single-point incremental forming of polymers, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-26, 2021.
- [14] Z. Yang, F. Chen, Mechanism of twist in incremental sheet forming of thermoplastic polymer, *Materials & Design*, No. 195, p. 108997, 2020.
- studies on formability of extra-deep drawing steel in incremental sheet metal forming, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 158-171, 2014.
- [4] H. Choi, C. Lee, A mathematical model to predict thickness distribution and formability of incremental forming combined with stretch forming, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 55, pp. 164-172, 2019.
- [5] A. Baruah, C. Pandivelan, A. K. Jeevanantham, Optimization of AA5052 in incremental sheet forming using grey relational analysis, *Measurement*, Vol. 106, pp. 95-100, 2017.
- [6] M. B. Silva, P. A. F. Martins, Two-point incremental forming with partial die: theory and experimentation, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 22, No. 4, pp. 1018-1027, 2013.
- [7] N. Moser, Z. Zhang, H. Ren, H. Zhang, Y. Shi, E. E. Ndip-Agbor., B. Lu, J. Chen, K.F. Ehmman, Effective forming strategy for double-sided incremental forming considering in-plane curvature and tool direction, *CIRP Annals*, Vol. 65, No. 1, pp. 265-268, 2016.
- [8] J. Min, B. Kuhlenkötter, C. Shu, D. Störkle, L. Thyssen, Experimental and numerical investigation on incremental sheet forming with flexible die-support from metallic foam, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 31, pp. 605-612, 2018.
- [9] M. A. Davarpanah, A. Mirkouei, X. Yu, R.