



# بررسی تأثیر پارامترهای ابزار بر شکل پذیری ورق آلومینیم 1100 در فرایند شکل دهی تدریجی ضربه‌ای

محمد صدیقی<sup>1\*</sup>، محمد ریاحی<sup>1</sup>، علی عسگری<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

\* تهران، کد پستی 16846، Sedighi@iust.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 فروردین 1393

پذیرش: 09 اردیبهشت 1393

ارائه در سایت: 23 مهر 1393

کلید واژگان:

شکل دهی تدریجی

آلومینیم 1100

قطر

فرکانس

شکل پذیری

## چکیده

یکی از روش‌های مرسوم جهت نمونه سازی سریع، استفاده از روش شکل دهی تدریجی می‌باشد. از این میان، فرایند شکل دهی تدریجی ضربه‌ای، در چند سال اخیر توسعه یافته است. در این روش، با حرکت فرکانسی یک پانچ ضربه زننده روی یک ورق کلمپ شده، یک قطعه سه بعدی بدون استفاده از قالب خاص تولید شده است. در این مقاله، تأثیر پارامترهای ابزار بر شکل پذیری ورق آلومینیم 1100 در فرایند شکل دهی تدریجی ضربه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد. جهت بررسی این موضوع، ابتدا ورق مورد نظر از طرفین کلمپ می‌گردد. سپس با در نظر گرفتن زاویه مخروط، ضربه‌ای پانچ با قطر و فرکانس معین اعمال می‌گردد تا مخروط در ارتفاع مشخصی دچار شکست شود. در نهایت با ثبت مقادیر ارتفاع و زاویه مربوطه، وابستگی آن به قطر پانچ و فرکانس ضربه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. با بررسی نتایج مشخص گردید که با کاهش قطر پانچ، کرنش ماکزیمم در راستای ضخامت در ارتفاع بیشتری از مخروط اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش قطر پانچ، میزان شکل پذیری ورق آلومینیم 1100 زیاد شده و با کاهش فرکانس ضربه نیز میزان شکل پذیری ورق افزایش می‌یابد.

## Investigation of tool parameters effects on the formability of Al-1100 in incremental sheet metal hammering process

Mohammad Sedighi<sup>1\*</sup>, Mohammad Riahi<sup>1</sup>, Ali Asgari<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16846, Tehran, Iran, Sedighi@iust.ac.ir,

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 16 April 2014  
Accepted 29 April 2014  
Available Online 15 October 2014

**Keywords:**  
Incremental forming  
Al-1100  
Diameter  
Frequency  
Formability

## ABSTRACT

New trends have been observed in recent years for rapid prototyping of sheet metal parts by Incremental Forming process, particularly in low quantity production. Recent ideas have been presented for a new type of this process known as Incremental sheet metal hammering (ISMH) method. In ISMH process, by sequence moving of a hammering punch over a clamped sheet metal, a three-dimensional work piece is produced without using a die. In this paper, the effect of tool parameter on the formability of Al-1100 will be studied. To investigate this issue, the sheet is clamped. Then by considering the cone angle, hammering is applied at a certain diameter and frequency until the failure occurs. By recording the angle and the height values at failure point, a correlation has been extracted between the diameter and the frequency. Analysis of the results shows that by decreasing the diameter of the punch, maximum strain in the direction of thickness is observed at higher height. Also, by increasing the diameter of the punch, formability of Al-1100 increases. Moreover, it is shown that by increasing the impact frequency, the formability of the sheet will be decreased.

## 1 - مقدمه

شده است. ایساکمی و کمون [2] از روش‌های تقریب خطی جهت تعیین منحنی محدوده شکل دهی در فرایند اتساع<sup>1</sup> برای مواد مختلف استفاده نمود. کیم و یانگ [3]، تکنیک شکل دهی دوگانه را جهت افزایش شکل پذیری با فرض عدم وجود تنش برشی ارائه نمودند. شیم و پارک [4] از روش شیار زدن جهت سنجش میزان شکل پذیری ورق آلومینیم آنیل شده استفاده کردند. فرایند شکل دهی تدریجی ضربه‌ای ورق‌ها در چند سال اخیر توسعه یافته

استفاده از روش‌های مرسوم شکل دهی نیاز به استفاده از قالب و پانچ با دقت ابعادی بالا دارد. به دلیل هزینه ساخت قالب و سنبه، استفاده از روش‌های مرسوم جهت تولید در حجم انبوه مقرون به صرفه می‌باشد. همچنین به دلیل تقاضا برای حجم محدود تولید، از روش‌های شکل دهی تدریجی استفاده می‌گردد [1].

مطالعات زیادی در زمینه بهبود شکل پذیری در این روش شکل دهی ارائه

1- Stretch

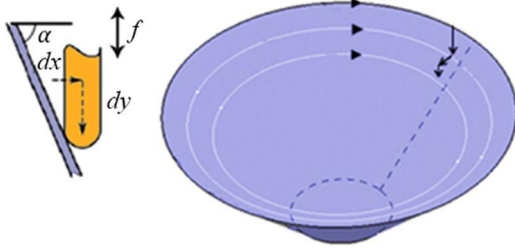
Please cite this article using:

M. Sedighi, M. Riahi, A. Asgari, Investigation of tool parameters effects on the formability of Al-1100 in incremental sheet metal hammering process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 185-189, 2015 (In Persian)

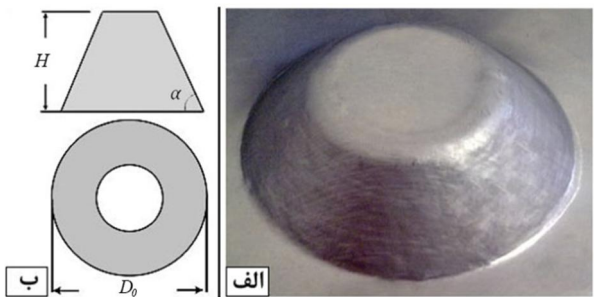
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 2 نمایی از فرایند کار تجربی، الف) ابزار ضربه زنده، ب) کلمپ ورق و نمونه فرم یافته، ج) سیستم کلمپ، د) قطره‌های مختلف پانچ.



شکل 3 استراژی شکل‌دهی.



شکل 4 نمایی از نمونه تغییر شکل یافته، الف) نمونه مورد نظر، ب) هندسه نمونه تغییر شکل یافته.

جدول 1 هندسه ابعادی مخروط ناقص مورد نظر.

$D_0$ (mm)	$\alpha$ (degree)	$h$ (mm)
54	45	15

نمونه تغییر شکل یافته و هندسه آن در شکل 4 نشان داده شده است. ابعاد دقیق پارامترهای هندسی نیز در جدول 1 نشان ارائه گردیده است.

## 2-2- مواد

ماده مورد استفاده در این تحقیق، ورق آلومینیم 1100 می‌باشد. ورق بصورت بلاتک با قطر 140 میلی‌متر و با ضخامت 0/5 جهت آزمایش فراهم می‌گردد.

## 2-3- روش بررسی شکل‌پذیری

ابتدا ورق بطور کامل از طرفین کلمپ می‌شود. سپس با اعمال ضربات پانچ با در نظر گرفتن زاویه مشخص، عملیات فرم دهی آغاز می‌شود. در صورت مشاهده اولین ترک و یا پارگی در بدنه مخروط، فرایند شکل‌دهی به اتمام رسیده و ارتفاع و زاویه مورد نظر ورق شکل داده شده ثبت می‌گردد. شکل 5 نشان دهنده پارگی در برخی از نمونه‌ها می‌باشد. اندازه‌گیری ارتفاع ترک ایجاد شده با استفاده از ابزار اندازه‌گیری عمودی با دقت 0/1 میلی‌متر انجام شده است. در نهایت نموداری برحسب عمق و زاویه حدی شکست برای نمونه مورد نظر حاصل می‌شود. در این آزمایش، ورق‌های آلومینیم 1100 با ضخامت اولیه 0/5 میلی‌متر توسط پانچ با قطرهای 3، 5 و 10 میلی‌متری و فرکانس پانچ 13، 18 و 25 ضربه بر ثانیه تحت اصابت ضربات پانچ قرار می‌گیرد.

است. این فرایند مبتنی بر اعمال ضربات متوالی پانچ به یک ورق کلمپ شده می‌باشد. عملکرد کلی آن در شکل 1 نشان داده شده است. در این خصوص فعالیت‌های تحقیقاتی محدودی در سال‌های اخیر گزارش شده است. آرنولد پازیک [5]، مطالعاتی را در زمینه طراحی و ساخت چندین ابزار ضربه زنده ارائه داده است. که در آن، مشکلات، ابعاد مختلف این فرایند، مطالعه مسیر حرکت ابزار و مزایای این فرایند را مطرح می‌نماید. تاناکا [6] نوعی از فرایند نمونه‌سازی سریع با عنوان شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای را ارائه می‌کند. همچنین با معرفی یک مکانیزم ضربه زنده دارای سرو موتور<sup>1</sup>، راه‌حلهایی را در زمینه جبران خطا در این فرایند به همراه مدلسازی آن مطرح می‌نماید. لو و همکاران [7]، سیستم جدید شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای را ارائه نمودند. در این تحقیق، مدل سازی و شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. لو و همکاران [8]، بخش دوم تحقیقات خود را در قالب ساخت یک سیستم شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای بر پایه هیدرولیک ارائه کردند. مطالعه و بررسی عددی و تجربی پارامترهای موثر بر آن نیز از جمله اهداف این تحقیق می‌باشد.

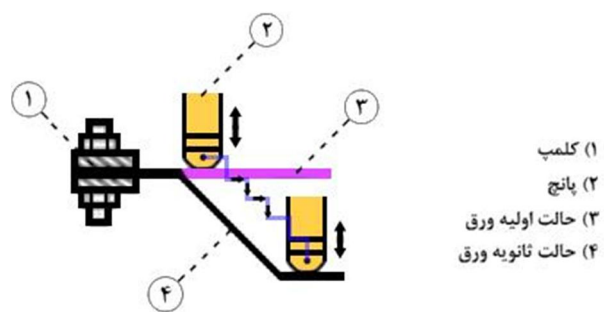
در این مقاله تأثیر قطر و فرکانس پانچ بر شکل‌پذیری ورق آلومینیم 1100 در فرایند شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا ورق از طرفین کلمپ می‌گردد سپس با قرار دادن پانچ دارای قطر مشخص روی ابزار ضربه زنده، عملیات شکل‌دهی با فرکانس مشخص انجام می‌شود. با انتخاب زاویه اولیه شکل‌دهی، مخروط مورد شکل می‌گیرد. زاویه شکل‌دهی افزایش می‌یابد تا مخروط در ارتفاع مشخصی دچار پارگی شود. سپس با اندازه‌گیری ارتفاع شکست و ثبت زاویه مربوطه، تأثیر قطر و فرکانس ضربه بر میزان شکل‌پذیری ورق آلومینیم 1100 مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

## 2- شرح فرآیند تجربی

در این قسمت، فرایند کار تجربی در قالب، روش انجام فرایند شکل‌دهی و مواد مورد استفاده در فرایند ارائه می‌گردد.

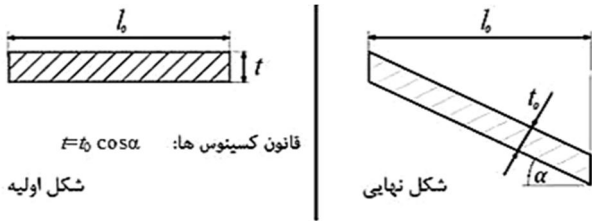
## 2-1- روش انجام فرایند شکل‌دهی

ابتدا ورق آلومینیم توسط سیستم کلمپ ثابت می‌گردد. سپس پانچ با قطر مورد نظر روی ابزار ضربه زنده قرار می‌گیرد. با اعمال ضربات پی در پی پانچ، عملیات شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای صورت گرفته و شکل مورد نظر روی ورق اعمال می‌گردد. شکل نهایی ایجاد شده بصورت مخروط ناقص می‌باشد. در شکل 2 نمایی از فرایند کار تجربی نشان داده شده است. استراژی مورد نظر جهت ایجاد تغییر شکل در ورق، شامل دو مرحله می‌باشد: (1) حرکت در راستای شعاع (2) حرکت در راستای عمود. نحوه پیشروی جهت ایجاد شکل مورد نظر توسط شکل 3 ارائه شده است.



شکل 1 نمایی از فرایند شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای.

1- Servo motor



شکل 9 شماتیک قانون کسینوس‌ها جهت تخمین ضخامت در نمونه‌های مخروطی در فرایند شکل‌دهی تدریجی.

این عملکرد ناشی از حرکت عمودی پانچ روی سطح می‌باشد که باعث ایجاد تنش کششی در جهت محور مخروط شکل یافته می‌گردد. نمایی از ایجاد ترک در این فرایند در شکل 6 نشان داده شده است. جهت بدست آوردن زاویه مجاز شکل‌دهی و ارتفاع مورد نظر، الگوریتم تعیین زاویه حدی ارائه شده است. این الگوریتم در شکل 7 نشان داده شده است.

#### 4-2- روش بررسی ضخامت

همانطور که مطرح شد، نمونه‌های تغییر شکل یافته بصورت مخروط ناقص می‌باشند. با بریدن نمونه‌ها و عکس‌برداری از مقطع عرضی نمونه‌ها و در نهایت با پردازش تصویر، نتایج حاصل از تغییرات ضخامت در یک نمونه تغییر شکل یافته برحسب قطر پانچ مختلف ارائه می‌گردد. شکل 8 نشان دهنده تغییرات ضخامت در نقاط مختلف مقطع نمونه بریده شده می‌باشد. لازم به ذکر است خطای ناشی از برش برابر  $0/01 \pm$  می‌باشد.

جهت پیش بینی تغییرات ضخامت در نمونه‌های به فرم مخروطی، از قانون کسینوس‌ها می‌توان بهره گرفت. این قانون مبتنی بر رابطه ساده هندسی می‌باشد که در شکل 9 نشان داده شده است.

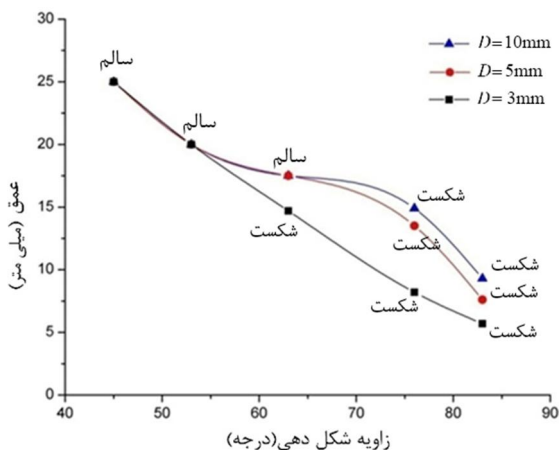
که در رابطه  $t = t_0 \cos \alpha$ ، زاویه مخروط،  $t_0$  ضخامت اولیه و  $t$  ضخامت نهایی ورق می‌باشد.

#### 3- نتایج و بحث

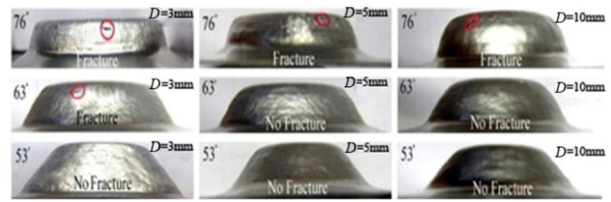
در این قسمت نتایج حاصل شده از بررسی شکل‌پذیری و ضخامت ارائه می‌گردد. تحلیل و بررسی نتایج نیز در این بخش مطرح می‌گردد.

#### 3-1- بررسی شکل‌پذیری

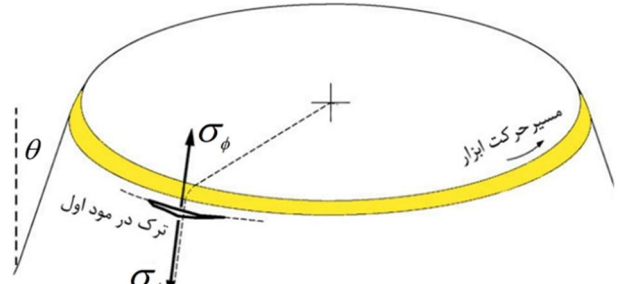
با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط کولیس ارتفاع سنج و همچنین محاسبه زاویه شکل‌دهی که از پردازش تصویر توسط نرم افزار استفاده شده است، نتایج زیر در قالب نمودارهای شکل 10الی 12 ارائه می‌گردد:



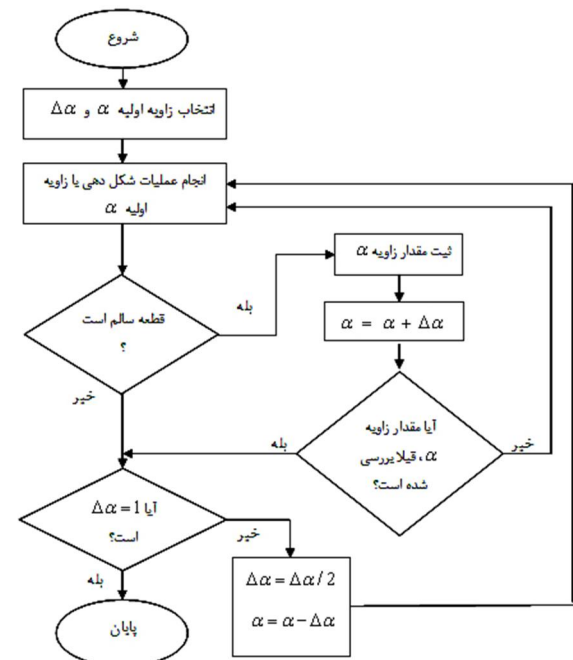
شکل 10 نمودار زاویه حدی شکست بر حسب عمق با فرکانس 13 ضربه بر ثانیه.



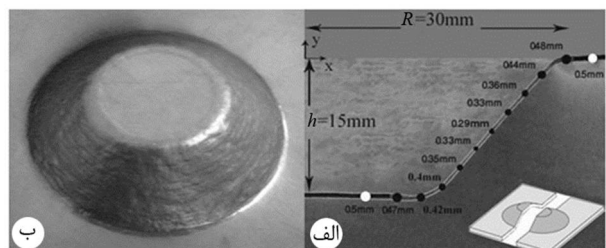
شکل 5 نمونه‌های ورق با زاویه شکل‌دهی مختلف که دچار شکست و عدم شکست شده‌اند.



شکل 6 نمایی از ایجاد ترک در فرایند شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای.



شکل 7 مراحل بدست آوردن مقادیر زاویه حدی شکست در فرایند شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای



شکل 8 تغییرات ضخامت در نمونه مورد نظر، (الف) اندازه‌گیری ضخامت در مقطع عرضی نمونه، (ب) نمونه تغییر شکل یافته.

همانطور که از شکل 5 مشخص است، بدلیل ناچیز بودن مقدار اصطکاک در مقایسه با فرایند شکل‌دهی تدریجی مرسوم، ترک در مود<sup>1</sup> اول اتفاق می‌افتد.

تغییرات فرکانس ضربه بر شکل‌پذیری ورق خواهد داشت. برای بررسی و مقایسه تأثیر هر کدام از پارامترهای قطر و فرکانس ضربه، ابتدا یک پارامتر ثابت (بطور مثال قطر پانچ) به بررسی تأثیر فرکانس بر شکل‌پذیری پرداخته شده است و همچنین در فرکانس ثابت، تأثیر فرکانس ضربه مورد مطالعه قرار گرفته است بطوریکه در زاویه 77 درجه در فرکانس 13 ضربه بر ثانیه، با تغییر قطر پانچ از 3 به 10 میلی‌متر ماکزیمم ارتفاع مخروط در شکل‌دهی بدون ایجاد شکست حدود 56% بهبود خواهد یافت.

با توجه به مطالب مطرح شده، در این فرایند ترک ایجاد شده در مود اول می‌باشد که نشان دهنده ناچیز بودن مقدار اصطکاک در مقایسه با شکل‌دهی تدریجی مرسوم می‌باشد و این عامل باعث جلوگیری از تغییر شکل‌های اضافی (پیچش ورق) و افزایش شکل‌پذیری ورق در مقایسه با فرایند شکل‌دهی تدریجی مرسوم می‌گردد [9].

### 3-2- بررسی ضخامت

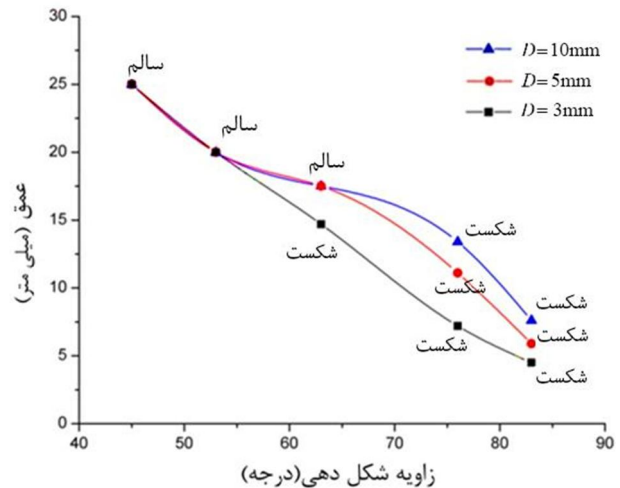
با توجه به نتایج حاصل شده از پردازش تصویر و مقایسه با قانون کسینوس‌ها، می‌توان میزان اعتبار این قانون را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. نتایج در قالب شکل 13 ارائه شده است.

همانطور که از شکل 13 مشخص است، استفاده از قانون کسینوس‌ها تخمین مناسبی از تغییرات ضخامت ورق را برای نمونه با هندسه مخروطی، پس از تغییر شکل ارائه می‌دهد. همچنین با کاهش قطر پانچ، کمترین ضخامت به سمت نواحی عمیق‌تر مخروط ناقص میل می‌کند. که این موضوع نشان دهنده جابجایی کرنش ماکزیمم ایجاد شده در راستای ضخامت، به سمت نواحی عمیق‌تر مخروط ناقص می‌باشد. همچنین با کاهش قطر پانچ، کرنش در راستای ضخامت افزایش می‌یابد که در حالت بحرانی آن باعث ایجاد پارگی در ورق می‌گردد.

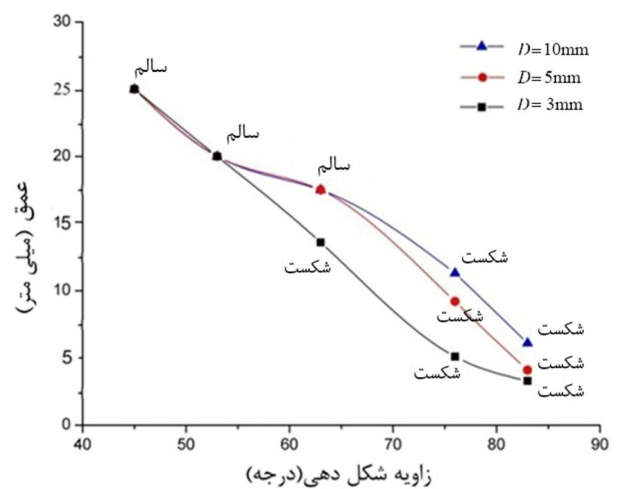
### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر قطر و فرکانس پانچ ضربه زننده بر شکل‌پذیری ورق در فرایند شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به مطالب مطرح شده نتایج زیر قابل استنباط می‌باشد:

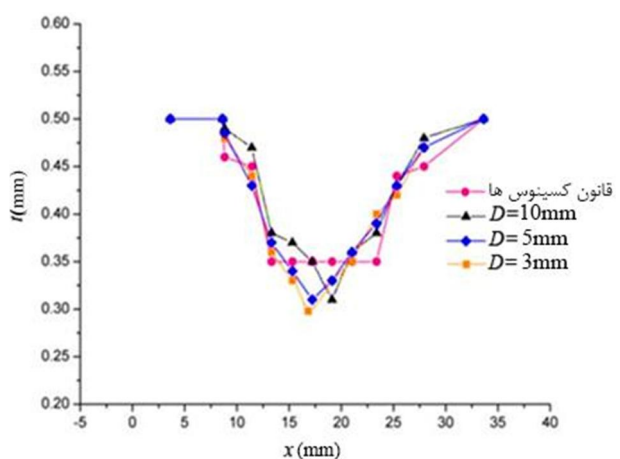
- با افزایش قطر پانچ، شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد بطوریکه در بیشترین مقدار خود در فرکانس‌های 13، 18 و 25 هرترز به ترتیب 42.3% و 55% بهبود می‌یابد.
- با افزایش فرکانس پانچ، شکل‌پذیری ورق کاهش یافته و تمایل به پارگی ورق افزایش می‌یابد بطوریکه در بیشینه خود در قطر پانچ 3 میلی‌متر باعث کاهش حدود 30% شکل‌پذیری ورق می‌گردد.
- با کاهش قطر پانچ، کرنش ماکزیمم در راستای ضخامت افزایش می‌یابد و این عامل احتمال پارگی ورق را افزایش می‌دهد.
- رابطه کسینوس‌ها پیش‌بینی مناسبی از تغییرات ضخامت ارائه می‌کند. طبق این رابطه با افزایش زاویه شکل‌دهی، ضخامت ورق تغییر شکل یافته کاهش می‌یابد که عاملی جهت کاهش عمق هندسی مخروط تغییر شکل یافته می‌باشد.
- تغییرات قطر پانچ تأثیر بیشتری در مقایسه با تغییرات فرکانس ضربه بر شکل‌پذیری ورق دارد که در ماکزیمم حالت در فرکانس 13 هرترز، با تغییر قطر پانچ از 3 به 10 میلی‌متر شکل‌پذیری حدود 56% بهبود یافته است.
- به دلیل ناچیز بودن اصطکاک در مقایسه با فرایند شکل‌دهی تدریجی مرسوم و جلوگیری از تغییر شکل‌های زاید، شکل‌پذیری ورق نسبت به شکل‌دهی تدریجی مرسوم افزایش می‌یابد.



شکل 11 نمودار زاویه حدی شکست بر حسب عمق با فرکانس 18 ضربه بر ثانیه.



شکل 12 نمودار زاویه حدی شکست بر حسب عمق با فرکانس 25 ضربه بر ثانیه.



شکل 13 نمودار مقایسه تغییرات ضخامت در حالت تجربی و قانون کسینوس‌ها برای پانچ با قطر متفاوت.

همانطور که از شکل 10 الی 12 مشخص است، هرچه زاویه شکل‌دهی افزایش می‌یابد عمق مخروط ناقص شکل گرفته کاهش یافته و در نتیجه شکل‌پذیری ورق کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فرکانس ضربه نیز احتمال پارگی ورق افزایش می‌یابد و این عامل باعث می‌گردد که ایجاد مخروط با ارتفاع مشخص دچار محدودیت گردد. همچنین با مقایسه شکل‌های مطرح شده مشخص گردید که تغییرات قطر پانچ تأثیر بیشتری در مقایسه با

- [3] T.J. Kim, D.Y. Yang, Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, p.p.1271-1286, 2000.
- [4] M.S. Shim, J.J. Park, Deformation characteristics in sheet metal forming with small ball, *Journal of Japan Society Technology and processing*, Vol. 113, p.p.654-659, 2001.
- [5] A. Puzik, Incremental Sheet Forming with a Robot System for an Industrial Application, in the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2008.
- [6] H. Tanaka, M. Hirao, Forming Type Rapid Prototyping Development-Error Compensation with Shape Measurement, *Journal of Automation Technology*, Vol. 2, pp. 462-467, 2008.
- [7] Y. Luo, K. He, R. Du, A new sheet metal forming system based on the incremental Punching, part 1: modeling and simulation, *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, Vol. 51, pp. 481-491, 2010.
- [8] Y. Luo, K. He, R. Du, A new sheet metal forming system based on the incremental Punching, part 1: machine building and experiment results, *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, Vol. 51, pp. 493-506, 2010.
- [9] V. Franzen, L. Kwiatkowski, P.A.F. Martins and A.E. Tekkaya, Single point incremental forming of PVC, *journal of materials processing technology*, Vol. 209, pp. 462-469, 2009.

## 5- فهرست علائم

$f$	فرکانس (هرتز)
$D$	قطر پانچ (میلی‌متر)
$dx$	پیشروی شعاعی (میلی‌متر)
$dy$	پیشروی قائم (میلی‌متر)
$D_0$	قطر بزرگ مخروط (میلی‌متر)
$\alpha$	زاویه مخروط (درجه)
$h$	ارتفاع مخروط (میلی‌متر)

## 6- مراجع

- [1] H. Iseki, An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller, *Journal of Material Process and Technology*, Vol. 150, p.p.150-154, 2001.
- [2] H. Iseki, H. Kumon, Forming limit of incremental sheet metal stretch forming using spherical rollers, *Journal of Japan Society Technology and processing*, Vol. 36, p.p.1336-1343, 1994.