



## اثر پارامترهای فرایند در شکل‌دهی افزایشی ورق‌های فلزی به کمک نوسانات فراصوتی

حامد دیلمی عضدی<sup>1\*</sup>، عباس پاک<sup>1</sup>، مهدی محمودی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

\* اراک، کد پستی 41167-38181، hdazodi@arakut.ac.ir

### چکیده

### کلیدواژگان

فرایند شکل‌دهی افزایشی یکی از روش‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر است که بدون نیاز به قالب توانایی تولید قطعات با تعداد کم و صرفه اقتصادی بالا را دارد؛ از این رو تلاش‌های زیادی برای شناخت این فرایند و بهبود آن انجام گرفته است. استفاده از نوسانات مافوق صوت (آلتراسونیک) از روش‌های نوینی است که به منظور بهبود فرایند شکل‌دهی افزایشی از آن بهره گرفته شده است. در مطالعه حاضر با استفاده از روش آماری سطح پاسخ اثر پارامترهای قطر ابزار، اندازه گام و دامنه نوسان بر نیروی شکل‌دهی، عمق پارگی و میزان اثر نوسانات آلتراسونیک (درصد کاهش نیروی شکل‌دهی) در روش شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات آلتراسونیک بصورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده کاهش قطر ابزار و افزایش دامنه نوسان باعث کاهش نیروی شکل‌دهی و افزایش اثر نوسانات آلتراسونیک (درصد کاهش نیروی شکل‌دهی) در فرایند شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات آلتراسونیک می‌گردد. عمق پارگی با افزایش اندازه گام و دامنه نوسان کاهش می‌یابد. اثر تغییرات قطر ابزار بر عمق پارگی و تغییرات اندازه گام بر نیرو پیچیده است و در شرایط مختلف اثرات متفاوتی دیده می‌شود. مقایسه نیروی شکل‌دهی و عمق پارگی در حالت بدون آلتراسونیک و با آلتراسونیک نشان از کاهش چشمگیر نیرو (بین 33 تا 63 درصد) و کاهش عمق پارگی (بین 2 تا 29 درصد) دارد. همچنین شرایط بهینه پیش‌بینی شده توسط مدل بدست آمده، به‌صورت تجربی مورد آزمون قرار گرفته است که مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی شده نشان از دقت مناسب مدل دارد.

شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات

آلتراسونیک

نیروی شکل‌دهی

عمق پارگی

روش سطح پاسخ

## Effects of process parameters in ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming

Hamed Deilami Azodi<sup>\*</sup>, Abbas Pak<sup>1</sup>, Mehdi Mahmoudi

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

\* P.O.B. 41167-38181 Arak, Iran, hdazodi@arakut.ac.ir

### Keywords

Ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming  
Forming force  
Fracture depth  
Response surface method

### Abstract

Incremental sheet forming process (ISF) is a dieless forming method capable to produce small-batch of sheet metal components economically. This makes ISF attention-grabbing for research and development. Use of ultrasonic vibration is a modern approach implemented to improve ISF process. In this article, the effects of process parameters of ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming (USVAISF) such as tool diameter, pitch size and vibration amplitude on forming force, fracture depth and percent reduction of forming force is investigated experimentally through response surface method. Results indicate that decreasing tool diameter and increasing ultrasonic vibration amplitude decrease the forming force and make the ultrasonic vibration more effective (increase the percent reduction of forming force) in USVAISF process. Fracture depth decreases with increasing pitch size and vibration amplitude. The influences of tool diameter on fracture depth and pitch size on forming force are complicated and different effects are seen in various conditions. Results show 33% to 63% reduction in forming force and 2% to 29% reduction in fracture depth in ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming (USVAISF) compared with conventional ISF (without ultrasonic vibration). Eventually, optimal process parameters are predicted for ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming and validated experimentally.

### 1- مقدمه

معمولاً نیاز به تجهیزات و قالب پیچیده ندارد و توانایی تولید قطعات با تنوع زیاد، تعداد کم تولید و هزینه کم را داراست. در سال‌های اخیر به دلیل ایجاد تنوع زیاد در محصولات، نیاز به

فرایند شکل‌دهی افزایشی یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی ورق‌های فلزی است که برخلاف فرایندهای شکل‌دهی سنتی،

Please cite this article using:

H. Deilami Azodi, A. Pak, M. Mahmoudi, Effects of process parameters in ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 24-36, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مطابق پژوهش‌های انجام شده توسط ون و همکارانش [12] استفاده از نوسانات آلتراسونیک با دامنه نوسان کم (انرژی پایین) در فرایند کشش باعث افزایش شکل پذیری در اثر پدیده نرم‌شدگی می‌شود؛ ولیکن در صورت استفاده از نوسانات با دامنه زیاد به دلیل غالب شدن اثر کارسختی ماده ترد شده، شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد. در فرایند کشش عمیق در دمای اتاق نیز همین اثر دامنه نوسان مشاهده شده است [13]. موراکاوا و جین [14] توانستند با استفاده از ارتعاشات فراصوت در فرایند کشش سیم، حداکثر سرعت کشش را تا 10 برابر افزایش دهند.

در فرایند اکستروژن نیز ارتعاشات فراصوت باعث کاهش اصطکاک بین قالب و قطعه شده، موجب کاهش نیروی شکل‌دهی می‌گردد؛ که با افزایش دامنه نوسان میزان کاهش نیرو بیشتر می‌شود [15].

رسولی و همکاران [16] اعمال نوسانات طولی آلتراسونیک را بر ماندربل در فرایند چرخکاری لوله بررسی نموده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که استفاده از ارتعاشات با توان 400 وات با تغییر در نوع اصطکاک از ایستایی به جنبشی و بهبود شرایط روانکاری باعث بهبود زبری سطح می‌شود. البته این اثر در ارتعاشات با توان بالا به دلیل سوختن و از بین رفتن روانکار بین قطعه و ماندربل وجود نداشته، زبری سطح زیاد می‌گردد. استفاده از ارتعاشات با توان بالا باعث کاهش نیروهای مماسی و شعاعی و افزایش نیروی محوری فرایند می‌شود که این اثر در ارتعاشات فراصوت با توان کم (400 وات) نامحسوس است.

برخی پژوهش‌ها نیز مدل‌هایی تحلیلی جهت تحلیل تنش‌ها در فرایند شکل‌دهی افزایشی با ارتعاشات ارائه نموده‌اند. در این پژوهش‌ها روابطی تحلیلی بر اساس قطر ابزار، اندازه‌گام و ویژگی‌های ارتعاشات برای نسبت تنش عمودی به تنش برشی ایجاد شده در ورق ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از روابط تحلیلی، مشخص می‌شود تنش‌ها به‌طور محسوسی با اعمال ارتعاشات تغییر می‌کند و با افزایش فرکانس، زاویه کشش و دامنه‌نوسان نسبت تنش عمودی به تنش برشی  $(\sigma_x/\tau_0)$  افزایش می‌یابد که این اثر در فرکانس‌های بالا بیشتر است [17,18]. شبیه‌سازی عددی نیز کاهش نیروی شکل‌دهی بر اثر ارتعاشات با فرکانس 30 تا 100 هرتز را نشان می‌دهد [19]. نتایج به دست آمده در مطالعات تجربی نشانگر کاهش مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی بین 33 تا 63/5 درصد در شرایط مختلف آزمایش برای شکل‌دهی یک شبه مخروط [20] و کاهش 23/5 درصد و 26/3 درصدی مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی به

نمونه‌سازی سریع و تولید محصولات سفارشی، فرایند شکل‌دهی افزایشی مورد توجه خاصی قرار گرفته و مطالعات زیادی با هدف شناخت پارامترهای مؤثر و بهبود آن انجام شده است [2,1]. عوامل مختلفی در فرایند شکل‌دهی افزایشی مؤثر است که در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. آرنس و همکارانش [3] با بررسی اثر ضخامت ورق، زاویه کشش، قطر ابزار و اندازه گام بر نیروی شکل‌دهی رابطه‌ای عددی برای پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی بدست آورده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اثر پارامترهای ضخامت ورق، زاویه کشش و شکل قطعه بر نیروی شکل‌دهی، توزیع کرنش و ضخامت قطعه نهایی بررسی شده است [1]. دوفلو و همکارانش [4] نیز اثر اندازه گام، قطر ابزار، زاویه کشش، ضخامت ورق و وجود روانکار را بر نیروی شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی افزایشی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در جایی دیگر اثر ضخامت ورق، زاویه کشش، اندازه گام و قطر ابزار بر نیروی شکل‌دهی بررسی شده است [5] و در مطالعه‌ای جامع‌تر علاوه بر این موارد، روانکار نیز به عنوان یک پارامتر اثرگذار بر نیرو و کرنش بررسی شده است [6]. لی و همکارانش [7] در سال 2014 اثر زاویه کشش و اندازه گام را بر نیروی شکل‌دهی بررسی نموده، مدلی برای پیش‌بینی نیرو ارائه داده‌اند. همچنین در پژوهشی که به تازگی انجام شده است با استفاده از روش سطح پاسخ اثر پارامترهای ضخامت ورق، زاویه کشش، تنش سیلان، قطر ابزار، و اندازه گام بر مؤلفه‌های نیرو بررسی گردیده است [8].

روش‌های مختلفی برای بهبود فرایند شکل‌دهی افزایشی بکار گرفته شده است. استفاده از نوسانات مافوق صوت (آلتراسونیک) یکی از روش‌های نوینی است که به تازگی با هدف بهبود فرایند شکل‌دهی در این فرایند از آن بهره گرفته شده است. اعمال نوسانات مافوق صوت می‌تواند باعث کاهش اصطکاک و نیروی شکل‌دهی، بهبود کیفیت سطح و افزایش سرعت فرایند گردد. با توجه به مطالعات انجام شده اثر ارتعاشات بر فرایندهای شکل‌دهی به دو صورت اثر سطحی و حجمی می‌باشد [9]. اثر سطحی مربوط به تأثیر ارتعاشات بر شرایط اصطکاکی بین سطوح و نیروی اصطکاک و اثر حجمی مربوط به تغییرات خواص مواد و تنش سیلان آن در اثر ارتعاشات فراصوت است. کاهش 50 درصدی نیروی اصطکاک بین آلومینیوم و فولاد با اعمال نوسانات آلتراسونیک [10] و کاهش تنش سیلان ماده در اثر نوسانات آلتراسونیک [11] نمونه‌هایی گزارش شده از اثرات سطحی و حجمی ارتعاشات مافوق صوت می‌باشند.

آلتراسونیک، نیروسنج، مولد قدرت و نمایشگر نشان داده شده است.

ابزار شکل‌دهی افزایشی به‌صورت سرکروی و از جنس فولاد تندبر بوده است. برای انجام آزمایش‌ها، از نمونه‌های ورق آلومینیومی با ابعاد  $130 \times 130$  میلی‌متر استفاده شده است. خواص مکانیکی ورق مورد استفاده که از آزمون‌های تجربی به‌دست آمده است در جدول 1 آورده شده است.

قطعه‌کار به شکل مخروط با زاویه دیواره متغیر انتخاب شده است (شکل 2). این قطعه که منحنی دیواره آن قسمتی از یک دایره است، معیاری مناسب برای بررسی حد شکل‌دهی ارائه می‌دهد. مسیر حرکت ابزار به‌صورت ماریچ پیوسته است که در شکل 2 نشان داده شده است.

برای روانکاری از روغن مقاوم 68 بهران استفاده شد و در حالت با نوسانات آلتراسونیک و بدون نوسانات آلتراسونیک به میزان یکسان استفاده گردید.

اندازه‌گیری نیروی عمودی وارد بر ابزار با استفاده از نیروسنج نوع فشاری SEWHA-SL410 با ظرفیت 50 کیلو نیوتن و سرعت انتقال اطلاعات به کامپیوتر 250 نمونه بر ثانیه که بین ورق‌گیر و میز دستگاه نصب شده است، انجام گرفته است.

در شکل 3 نمونه‌ای از نمودار نیروی اندازه‌گیری شده برای حالت‌های بدون نوسانات آلتراسونیک و با نوسانات آلتراسونیک نشان داده شده است ( $F$  نیروی شکل‌دهی است). همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیروی عمودی وارد بر ابزار ابتدا افزایش یافته و سپس ثابت می‌شود. برای مقایسه و بررسی نیروی شکل‌دهی در شرایط مختلف، میانگین محدوده ثابت نیرو که در نمودار شکل 3 نشان داده شده در نظر گرفته شده است.

عمق پارگی نمونه‌های ایجاد شده نیز در دو حالت با نوسانات آلتراسونیک و بدون نوسانات آلتراسونیک با استفاده از کولیس پایه‌دار و از محل ایجاد پارگی تا سطح نمونه اندازه‌گیری شده است.

جدول 1 خواص ورق آلومینیوم مورد استفاده

جنس	Al1100
مدول الاستیک (GPa)	70
ضریب پواسون	0/3
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	2700
رابطه تنش-کرنش	
ضخامت ورق (mm)	0/33

ترتیب در طی حرکت عمودی و افقی ابزار در آزمایش شیار مستقیم ورق آلومینیوم است [21].

در این مقاله با اعمال نوسانات آلتراسونیک به ابزار شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی افزایشی، اثر قطر ابزار، اندازه‌گام و دامنه‌نوسان بر نیروی شکل‌دهی، عمق پارگی قطعه و میزان اثر نوسانات آلتراسونیک (درصد کاهش نیروی شکل‌دهی) بررسی می‌شود؛ همچنین اثر پارامترهای قطر ابزار و اندازه‌گام بر نیروی شکل‌دهی و عمق پارگی در فرایند شکل‌دهی افزایشی معمولی (بدون نوسانات آلتراسونیک) بررسی گردیده، نتایج در دو حالت با هم مقایسه می‌گردد. اعمال نوسانات آلتراسونیک به ابزار در فرایند شکل‌دهی افزایشی با استفاده از مجموعه کلگی ساخته شده، با قابلیت نصب بر روی دستگاه فرز کنترل عددی، انجام شده است. آزمون‌های عملی بر اساس طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ<sup>1</sup> انجام گردیده است. همچنین شرایط بهینه برای داشتن کمترین نیروی شکل‌دهی، بیشترین عمق پارگی و بیشترین درصد کاهش نیرو در فرایند شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات آلتراسونیک با استفاده از مدل مورد استفاده تعیین شده، پیش‌بینی انجام شده به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## 2- آزمون تجربی

### 2-1- کلگی اعمال نوسانات آلتراسونیک

برای انجام آزمون‌های تجربی از مجموعه کلگی اعمال نوسانات آلتراسونیک با قابلیت ایجاد و انتقال نوسانات طولی به ابزار شکل‌دهی [20] که توسط نویسندگان طراحی و ساخته شده است، استفاده گردیده است. این مجموعه با نصب بر روی دستگاه فرز CNC امکان انجام فرایند شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات آلتراسونیک را فراهم می‌سازد. مبدل مورد استفاده در این کلگی از نوع پیزوالکتریک، دارای توان 3 کیلووات و فرکانس 20 کیلوهرتز می‌باشد.

### 2-2- معرفی تجهیزات و شرایط آزمایش

در آزمون‌های تجربی کلگی اعمال نوسانات آلتراسونیک به پیشانی ماشین فرز CNC سه محوره FP4MB ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز با قابلیت حرکت سه محور همزمان متصل شده، فرایند شکل‌دهی افزایشی با کمک نوسانات آلتراسونیک انجام شده است. در شکل 1 تجهیزات و وسایل استفاده شده جهت انجام آزمایش‌ها شامل قالب، کلگی اعمال نوسانات

<sup>1</sup> Response Surface Method (RSM)

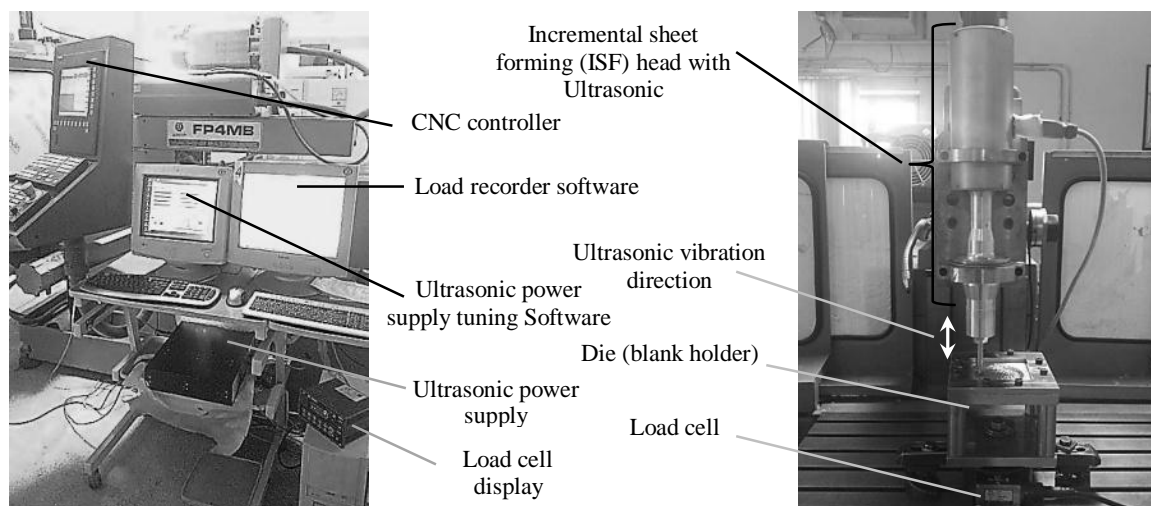


Fig. 1 Experimental set-up assembled on CNC milling machine

شکل 1 تجهیزات نصب شده بر روی ماشین فرز CNC جهت انجام آزمایش‌های تجربی

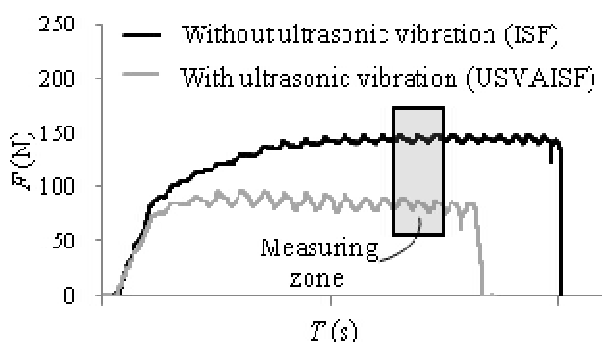


Fig. 3 Force variations during forming process

شکل 3 نمودار تغییرات نیروی شکل‌دهی در حین فرایند

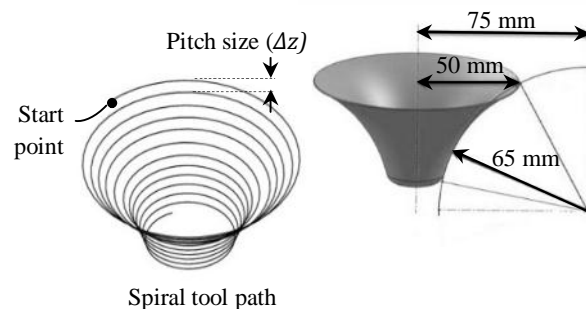


Fig. 2 Geometry and dimensions of workpiece and tool path used in experiments

شکل 2 شکل و ابعاد نمونه آزمایش و مسیر حرکت ابزار

پاسخ نیز روش باکس-بنکن<sup>3</sup> انتخاب شده است. آزمایش‌ها برای سه پارامتر و در سه سطح برای حالت با نوسانات آلتراسونیک و بدون نوسانات آلتراسونیک طراحی شده است که مقادیر متغیرهای ورودی و شرایط آزمایش‌ها در جدول 2 آورده شده است. در تمام آزمایش‌ها ابزار شکل‌دهی بدون حرکت دورانی بوده و سرعت پیشروی 1200 میلی‌متر بر دقیقه بوده است. خروجی آزمایش‌ها که به‌عنوان پاسخ طراحی آزمایش در نظر گرفته شده است به صورت زیر می‌باشد:

- مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی به منظور بررسی اثر پارامترهای ورودی بر نیروی شکل‌دهی در حالت با آلتراسونیک و بدون آلتراسونیک
- عمق پارگی به منظور بررسی اثر پارامترهای ورودی بر عمق پارگی (شکل پذیری) در حالت با آلتراسونیک و بدون آلتراسونیک

### 3- روش طراحی آزمایش، تعیین شرایط و تنظیمات انجام شده

طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert 7.0.0 انجام شده است. این نرم‌افزار روش‌های مختلف طراحی آزمایش از جمله فول فاکتوریل<sup>1</sup>، سطح پاسخ و تاگوچی<sup>2</sup> را ارائه می‌دهد. در روش فول فاکتوریل با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آزمایش، تعداد آزمایش‌ها زیاد شده که مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است. از سوی دیگر روش تاگوچی تعداد آزمایش‌ها را بسیار کاهش می‌دهد اما اثرات متقابل پارامترها را در نظر نمی‌گیرد [22]. بنابراین روش سطح پاسخ که هم اثر متقابل پارامترها را در نظر می‌گیرد و هم تعداد آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد بکار گرفته شده است. در میان روش‌های مختلف سطح

<sup>3</sup> Box-Behnken

<sup>1</sup> Full factorial

<sup>2</sup> Taguchi

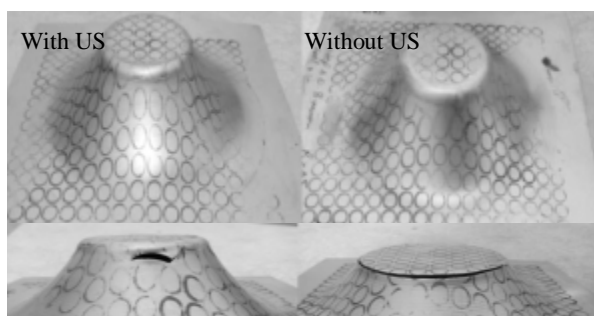


Fig. 4 Some formed specimens and tearing accrued during tests

شکل 4 نمونه قطعات شکل داده شده در آزمون تجربی و بروز پارگی در قطعات

جدول 2 نتایج تحلیل واریانس برای حالت با نوسانات آلتراسونیک

Table 3 ANOVA for USVAISF

با نوسانات آلتراسونیک			
درصد کاهش نیرو	عمق پارگی	نیروی شکل‌دهی	پاسخ
درجه دوم	درجه دوم	درجه دوم	مدل برازش
-	معکوس	معکوس	انتقال
مقدار $p$	مقدار $p$	مقدار $p$	مدل
0.0003	<0.0001	<0.0001	
<0.0001	<0.0001	<0.0001	
0.1043	<0.0001	0.1805	
0.0172	0.0190	0.0458	
0.0374	0.0037	0.0238	
-	-	0.0121	
-	-	-	
-	0.0008	0.0048	
-	0.0027	-	
-	-	0.0218	

جدول 3 نتایج تحلیل واریانس برای حالت بدون نوسانات آلتراسونیک

Table 4 ANOVA for conventional ISF

بدون نوسانات آلتراسونیک			
عمق پارگی	نیروی شکل‌دهی		پاسخ
درجه دوم	درجه دوم		مدل برازش
-	معکوس		انتقال
مقدار $p$	مقدار $p$		مدل
0.0013	<0.0001		
0.0098	<0.0001		
0.0005	<0.0001		
0.0326	0.0493		
-	0.0265		
-	-		

بر اساس نتایج این جداول علاوه بر اثر معنی‌دار پارامترهای انفرادی، در برخی موارد حاصل‌ضرب پارامترها نیز تأثیر معنی‌داری دارد که نشانگر اثر تعاملی این پارامترها بر پاسخ است. نتایج تحلیل رگرسیون در معادلات (1) تا (5) ارائه شده است. در این معادلات  $F_{USVAISF}$ ،  $d_{USVAISF}$  و  $Re$  به ترتیب نیروی شکل‌دهی بدون نوسانات آلتراسونیک، عمق پارگی در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک، نیروی شکل‌دهی با

جدول 1 مقادیر متغیرهای ورودی و شرایط انجام آزمون‌ها برای حالت بدون اعمال ارتعاشات آلتراسونیک و حالت اعمال ارتعاشات آلتراسونیک

Table 2 Test plan designed for experiments

شماره آزمایش	بدون آلتراسونیک		با آلتراسونیک		
	قطر ابزار اندازه‌گام (mm)	قطر ابزار اندازه‌گام (mm)	دامنه‌نوسان ( $\mu\text{m}$ )	قطر ابزار اندازه‌گام (mm)	
1	8	0/8	20	8	0/8
2	8	1/0	15	8	1/0
3	8	1/0	25	8	1/0
4	8	1/2	20	8	1/2
5	10	0/8	15	10	0/8
6	10	0/8	25	10	0/8
7	10	1/0	20	10	1/0
8	10	1/2	15	10	1/2
9	10	1/2	25	10	1/2
10	12	0/8	25	12	0/8
11	12	1/0	15	12	1/0
12	12	1/0	25	12	1/0
13	12	1/2	20	12	1/2

- درصد کاهش نیرو در اثر اعمال نوسانات آلتراسونیک به منظور بررسی اثر پارامترهای ورودی بر میزان اثر نوسانات آلتراسونیک (میزان کاهش نیرو) در حالت با آلتراسونیک

#### 4- نتایج و بحث

در شکل 4 نمونه‌هایی از ورق‌های شکل داده شده در آزمون‌های تجربی و بروز پارگی در عمق‌های مختلف نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش‌ها و استخراج داده‌های تجربی به منظور بررسی ارتباط پارامترها و تعیین عوامل معنی‌دار آنالیز رگرسیون و واریانس<sup>1</sup> انجام شده است. در مراحل انجام تحلیل با توجه به پیشنهاد نرم‌افزار مدل برازش درجه دوم بکار گرفته شده است. در بعضی موارد برای بهبود تحلیل رگرسیون از انتقال معکوس استفاده شده است و در مرحله بعد مؤلفه‌های بی‌معنی با استفاده از گزینه حذف گام به گام<sup>2</sup> حذف شده است. در طی تحلیل واریانس مؤلفه‌های با سطح اطمینان 95% (یا  $p \leq 0/05$ ) شاخصی برای ارزیابی معنی‌دار بودن یک پارامتر بر پاسخ است) به عنوان پارامترهای مؤثر بر پاسخ (خروجی) در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل واریانس برای دو حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک و بدون آن به ترتیب در جدول 3 و 4 آورده شده است.

1. ANOVA  
2. step-wise elimination

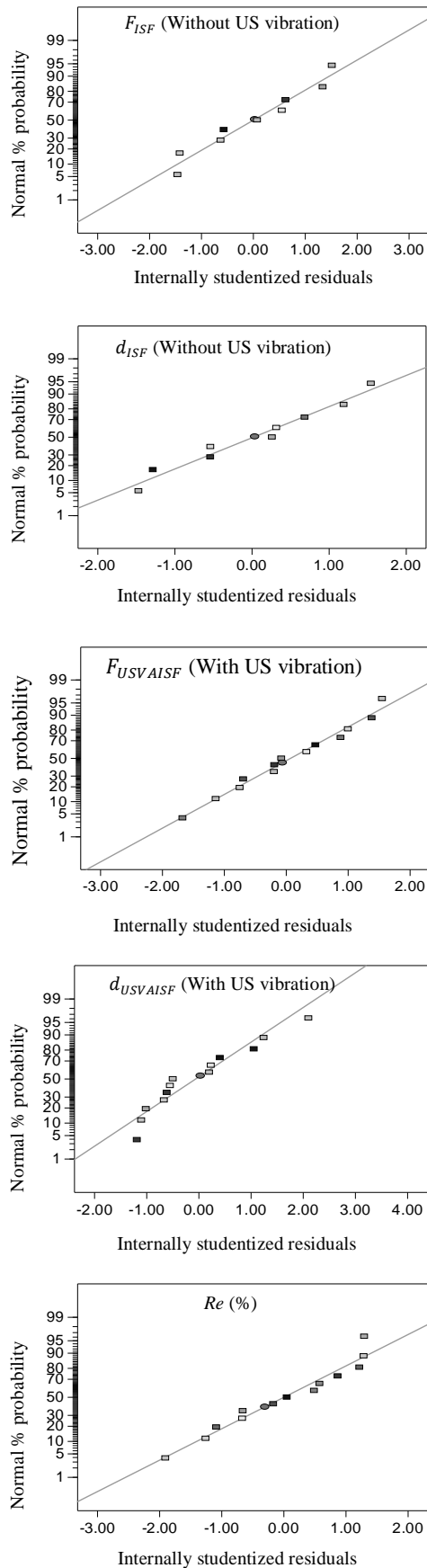


Fig. 5 Normal probability plots

شکل 5 نمودارهای توزیع باقی‌مانده‌ها

نوسانات آلتراسونیک، عمق پارگی در حالت با نوسانات آلتراسونیک و درصد کاهش نیرو است و  $D_t$ ،  $\Delta z$  و  $a$  به ترتیب قطر ابزار، اندازه گام و دامنه نوسان می‌باشد.

$$1/F_{ISF} = 0.02116 - 1.02724 \times 10^{-3} D_t - 0.01010 \Delta z + 1.50746 \times 10^{-4} D_t \Delta z + 2.38560 \times 10^{-5} D_t^2 + 2.71851 \times 10^{-3} \Delta z^2 \quad (1)$$

$$1/d_{ISF} = 0.10240 - 0.012873 D_t - 0.092472 \Delta z + 0.016633 D_t \Delta z \quad (2)$$

$$1/F_{USVAISF} = 0.082221 - 6.73794 \times 10^{-3} D_t - 0.044115 \Delta z + 2.65325 \times 10^{-4} a + 3.99306 \times 10^{-3} D_t \Delta z \quad (3)$$

$$1/d_{USVAISF} = -0.014872 + 0.025848 D_t - 0.26254 \Delta z + 0.010272 D_t \Delta z - 1.64990 \times 10^{-3} D_t^2 + 0.13051 \Delta z^2 \quad (4)$$

$$Re = 211.41608 - 19.45962 D_t - 119.82825 \Delta z + 0.90983 a + 13.37369 D_t \Delta z \quad (5)$$

کیفیت برازش مدل را می‌توان با استفاده از درصد ضریب تبیین ( $R^2$ )، درصد ضریب تبیین تعدیل یافته ( $Adj R^2$ ) و توزیع باقی‌مانده‌ها بررسی نمود. از نظر آماری مدلی مناسب است که بالاترین درصد ضریب تبیین و درصد ضریب تبیین تعدیل یافته را داشته باشد. همان‌طور که در جدول 5 نشان داده شده است، در مدل مورد مطالعه در همه موارد درصد ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل یافته بسیار بالا ( $\leq 90$ ) است؛ که نشان‌دهنده برازش خوب مدل می‌باشد. در جدول 5 شاخص دیگری بنام کیفیت دقت<sup>1</sup> ( $Ap$ ) نیز ارائه شده است که این شاخص دامنه مقادیر پیش‌بینی شده در نقاط طراحی را با میانگین خطای پیش‌بینی مقایسه می‌کند که نسبت‌های بالاتر از 4 این شاخص نشان دهنده کیفیت دقت مدل است [23]. این شاخص نیز برای مدل ارائه شده با توجه به جدول 4 برای همه موارد عددی بالاتر از 4 را نشان می‌دهد که دقت مناسب مدل در پیش‌بینی نتایج را تایید می‌کند. توزیع باقی‌مانده‌ها در یک مدل مناسب باید توزیع نرمال باشد از این رو توزیع باقی‌مانده‌ها برای مدل مورد مطالعه در شکل 5 ارائه شده است که توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها را نشان می‌دهد و بیانگر انتخاب مناسب مدل برای تحلیل داده‌ها است ( $d$  عمق پارگی است).

#### 1-4- تغییرات خروجی‌های فرایند شکل‌دهی افزایشی در حالت بدون اعمال نوسانات آلتراسونیک

##### 1-1-1- اثر پارامترهای ورودی بر نیروی شکل‌دهی

با توجه به جدول 3 قطر ابزار و اندازه گام پارامترهای تعاملی با اثر معنی‌دار بر نیروی شکل‌دهی در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک است.

<sup>1</sup> Adequate precision

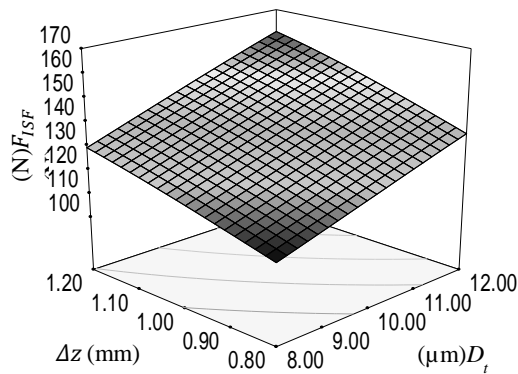


Fig. 6 Interactive effect of tool diameter and pitch size on forming force in conventional ISF (without US vibration)

شکل 6 اثر تعاملی قطر ابزار و اندازه‌گام بر نیروی شکل‌دهی در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک

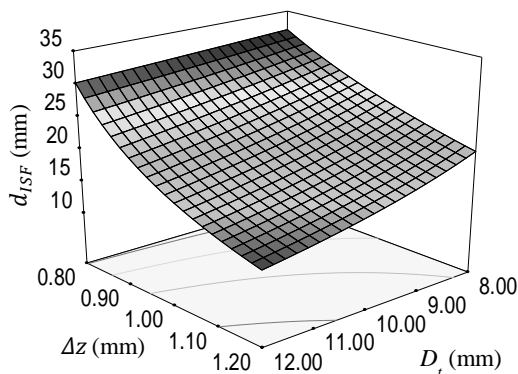


Fig. 7 Interactive effect of tool diameter and pitch size on fracture depth in conventional ISF (without US vibration)

شکل 7 اثر بر هم کنش قطر ابزار و اندازه‌گام بر عمق پارگی برای حالت بدون نوسانات آلتراسونیک

این اثر به دلیل افزایش تنش و کشش ایجاد شده در ورق در هر مرحله و نزدیک شدن به حالت کشش عمیق تک مرحله است که حد کشش کاهش می‌یابد. این اثر پیشتر نیز گزارش شده است [25].

#### 2-4- تغییرات خروجی‌های فرایند شکل‌دهی افزایشی در حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک

##### 1-2-4- بررسی اثر پارامترهای ورودی بر نیروی شکل‌دهی

با توجه به جدول 3 دو پارامتر تعاملی معنی‌دار برای نیروی شکل‌دهی در حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک وجود دارد که سطح پاسخ برای این دو پارامتر تعاملی در شکل 8 آورده شده است. در این نمودارها محور عمودی نیروی شکل‌دهی و محورهای افقی پارامترهای اثرگذار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در قسمت (a) و (b) از شکل 8 مشاهده می‌شود نیروی شکل‌دهی با اعمال نوسانات آلتراسونیک نیز مانند حالت معمولی

جدول 4 شاخص‌های آماری کیفیت مدل

Table 5 The correctness statistical indicator of models

با نوسانات آلتراسونیک		بدون نوسانات آلتراسونیک		پاسخ
عمق درصد کاهش نیرو	شکل‌دهی پارگی	عمق	نیروی شکل‌دهی پارگی	
%93	%99/5	%92	%99/9	ضریب تبیین ( $R^2$ )
%90/1	%99	%90	99/8	ضریب تبیین تعدیل شده ( $Adj R^2$ )
14/37	40/37	14	93	کفایت دقت ( $A_p$ )

نمودار سطح پاسخ نشان داده شده در شکل 6 اثر تعاملی این دو پارامتر بر نیروی شکل‌دهی در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک را نشان می‌دهد. در این نمودار محور عمودی بیانگر نیروی شکل‌دهی و محورهای افقی قطر ابزار و اندازه‌گام را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است نیروی شکل‌دهی با افزایش قطر ابزار و اندازه‌گام افزایش می‌یابد که این اثرات پیش از این نیز مشاهده شده است [3-6]. این افزایش نیرو را می‌توان به دلیل افزایش کشش ایجاد شده در ورق، افزایش نیروی خمکاری و نیروی اصطکاک و افزایش سطح تماس بین ابزار و ورق دانست.

#### 2-1-4- اثر پارامترهای ورودی بر عمق پارگی نمونه‌های شکل داده شده

شکل نمونه مورد آزمون به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که با افزایش عمق نمونه زاویه دیواره نیز افزایش می‌یابد و در این صورت می‌توان عمق پارگی را شاخصی از شکل‌پذیری ورق در شرایط آزمون دانست [24].

طبق نتایج جدول 3 اندازه‌گام و قطر ابزار پارامترهای تعاملی اثرگذار بر عمق پارگی است. از این رو در شکل 7 اثر بر هم کنش قطر ابزار و اندازه‌گام بر عمق پارگی در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک نشان داده شده است. در این نمودار اثر اندازه‌گام و قطر ابزار بر عمق پارگی به وضوح دیده می‌شود.

مطابق این نمودار با افزایش قطر ابزار عمق قطعه در هنگام بروز پارگی کاهش می‌یابد که این اثر می‌تواند به دلیل افزایش نیرو و تنش ایجاد شده در ورق باشد. در مطالعه‌ای دیگر نیز مشخص شده است با افزایش قطر ابزار، ماکزیمم زاویه کشش (به دلیل شکل خاص نمونه مورد آزمون عمق پارگی رابطه مستقیمی با ماکزیمم زاویه کشش دیواره دارد) کاهش می‌یابد [25].

شکل 7 همچنین نشان دهنده کاهش عمق پارگی با افزایش اندازه‌گام است.

3. کاهش نیروی اصطکاک به دلیل تغییر مکانیزم تماس ابزار و ورق و منقطع شدن تماس و نهایتاً کاهش نیروی شکل‌دهی [26,10].

4. سوختن و بخار شدن مایع روانکار و نرسیدن روانکار به محل تماس ابزار و ورق در اثر نوسانات آلتراسونیک که نتیجه آن افزایش نیروی شکل‌دهی است [16].

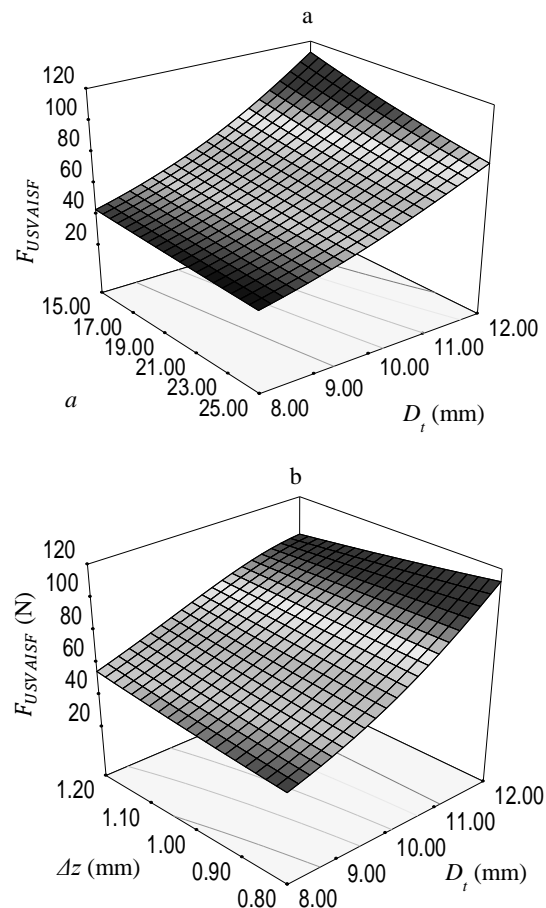
از عوامل بیان شده سه عامل اول با افزایش دامنه نوسان باعث کاهش نیروی شکل‌دهی شده و عامل چهارم با افزایش دامنه نوسان باعث افزایش نیروی شکل‌دهی می‌گردد. حال با توجه به اثر عوامل فوق هنگامی که قطر ابزار زیاد است سه عامل کاهش دهنده نیروی شکل‌دهی زیاد بوده و عامل چهارم (که افزایش دهنده نیروی شکل‌دهی خواهد بود) اثر کمی دارد و در نهایت با افزایش دامنه نوسان نیروی شکل‌دهی کاهش چشمگیری می‌یابد. اما برای قطر ابزار کم با افزایش دامنه نوسان اثر عامل چهارم که باعث افزایش نیروی می‌گردد بیشتر شده، اثر سه عامل کاهنده نیرو را جبران نموده، در نتیجه نیروی شکل‌دهی با افزایش دامنه نوسان کاهش ناچیزی می‌یابد.

در حالت اعمال نوسانات آلتراسونیک اثر تغییر اندازه گام بر نیروی شکل‌دهی نسبت به حالت معمولی پیچیده و متفاوت است. در نمودار قسمت (b) شکل 8 برای ابزار با قطر کم (8 میلی‌متر) با افزایش اندازه گام نیروی شکل‌دهی کمی افزایش یافته که مانند حالت بدون نوسانات آلتراسونیک است. ولی برای ابزار با قطر زیاد (12 میلی‌متر) اثر اندازه گام عکس بوده و با افزایش اندازه گام نیروی شکل‌دهی کاهش یافته است. این رفتار را می‌توان مرتبط با اثر سوختن و بخار شدن روانکار بین ابزار و ورق دانست که با توجه به اینکه قطر ابزار زیاد (12 میلی‌متر) بوده است با افزایش اندازه گام سطح تماس بین ابزار و ورق زیاد شده، تمرکز انرژی کاهش یافته است و پدیده سوختن و بخار شدن روانکار با افزایش اندازه گام کمتر شده و در نتیجه نیروی شکل‌دهی نیز با افزایش اندازه گام کاهش یافته است.

#### 4-2-2- اثر پارامترهای مختلف بر عمق پارگی نمونه‌های شکل داده شده

نمودار (a) شکل 9 اثر بر هم کنش قطر ابزار و اندازه گام بر عمق پارگی نمونه‌های شکل داده شده در حالت با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک را نشان می‌دهند. مطابق این شکل با افزایش اندازه گام همانند حالت بدون نوسانات آلتراسونیک، عمق پارگی کاهش می‌یابد که این اثر می‌تواند به دلیل افزایش نیروی شکل‌دهی و افزایش تنش ایجاد شده در ورق باشد.

(بدون نوسانات آلتراسونیک) با افزایش قطر ابزار افزایش می‌یابد که علت این افزایش را همان دلایل بیان شده برای حالت بدون آلتراسونیک می‌توان دانست.



**Fig. 8** Interactive effect of a) tool diameter and vibration amplitude, b) tool diameter and pitch size, on forming force ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming (USVAISF)

شکل 8 اثر تعاملی (a) قطر ابزار و دامنه نوسان، (b) قطر ابزار و اندازه گام، بر نیروی شکل‌دهی در حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک

با توجه به قسمت (a) از شکل 8 می‌توان اثر دامنه نوسان بر نیروی شکل‌دهی را مشاهده نمود. مطابق شکل با افزایش دامنه نوسان نیروی شکل‌دهی کاهش یافته که البته این کاهش نیرو برای قطر ابزار کم (8 میلی‌متر) ناچیز می‌باشد. برای یافتن علت این پدیده باید به اثرات نوسانات آلتراسونیک توجه داشت که در زیر بیان می‌گردد.

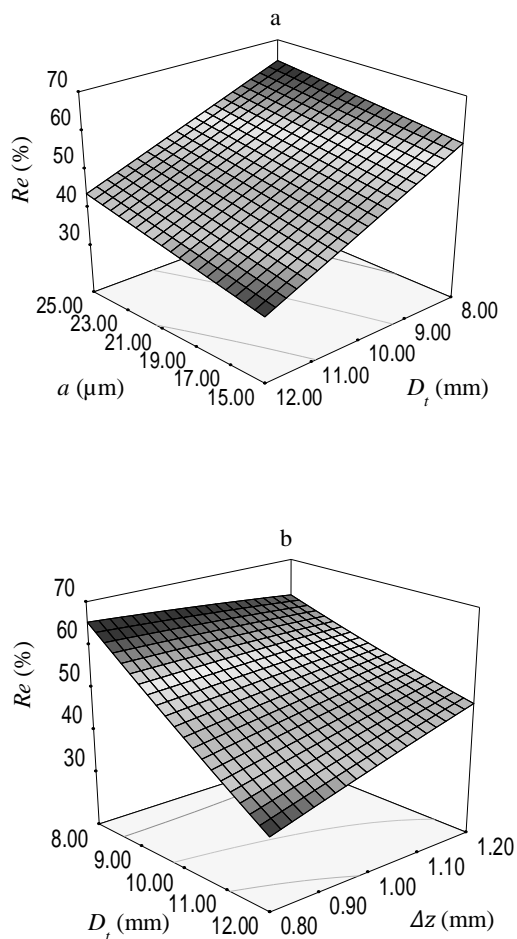
1. کاهش تنش تسلیم ماده در اثر امواج آلتراسونیک که نتیجه آن کاهش نیروی شکل‌دهی است [11].
2. کاهش تنش تسلیم ماده در اثر افزایش دمای ورق در محل تماس با ابزار به دلیل نوسانات آلتراسونیک و در نتیجه کاهش نیروی شکل‌دهی [20].



شکل 9 قابل مشاهده است. این نمودار نشان می‌دهد با افزایش دامنه‌نوسان عمق پارگی کاهش اندکی یافته است که علت آن را می‌توان ناشی از افزایش اثر کارسختی و افزایش تردی ماده در اثر افزایش دامنه نوسان دانست که در فرایندهای کشش و کشش عمیق نیز مشاهده شده است [12,13].

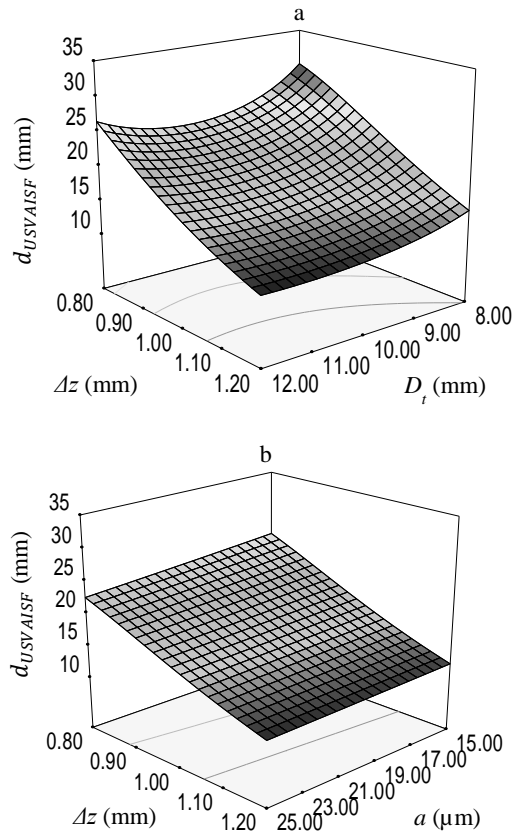
#### 4-2-3- بررسی اثر پارامترهای ورودی بر اثر نوسانات آلتراسونیک (درصد کاهش نیروی شکل‌دهی)

برای بررسی میزان اثر نوسانات آلتراسونیک معیار درصد کاهش نیروی شکل‌دهی در اثر این نوسانات تعریف شده است که از مقایسه نیرو در حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک و حالت بدون ارتعاشات آلتراسونیک به‌دست می‌آید. در شکل 10 می‌توان اثر پارامترهای دامنه نوسان، قطر ابزار و اندازه گام بر میزان اثرگذاری نوسانات آلتراسونیک (درصد کاهش نیروی شکل‌دهی در اثر اعمال نوسانات آلتراسونیک) را مشاهده کرد.



**Fig. 10** Interactive effect of a) tool diameter and vibration amplitude, b) pitch size and tool diameter, on percent reduction of forming force in ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming (USVAISF)

شکل 10 اثر تعاملی (a) قطر ابزار و دامنه نوسان، (b) اندازه گام و قطر ابزار، بر درصد کاهش نیروی شکل‌دهی در اثر اعمال نوسانات آلتراسونیک.



**Fig. 9** Interactive effect of a) tool diameter and pitch size, b) vibration amplitude and pitch size, on fracture depth in ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming (USVAISF)

شکل 9 اثر تعاملی (a) قطر ابزار و اندازه گام، (b) دامنه نوسان و اندازه گام، بر عمق پارگی در حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک.

همچنین زمانی که اندازه گام زیاد است ( $1/2$  میلی‌متر)، همانند فرایند در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک، با افزایش قطر ابزار عمق پارگی اندکی کاهش می‌یابد که این پدیده به دلیل افزایش کشش ایجاد شده در ورق در اثر افزایش قطر ابزار است که پارگی در عمق کمتری را در پی دارد. اما هنگامی که اندازه گام کم است ( $0/8$  میلی‌متر) با افزایش قطر ابزار عمق پارگی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. علت این اتفاق را بدین صورت می‌توان بیان داشت که در ابتدا مانند حالت بدون آلتراسونیک افزایش قطر ابزار باعث افزایش نیرو و تنش ایجاد شده در ورق گردیده، موجب می‌گردد ورق زودتر پاره شود. اما در ادامه با افزایش قطر ابزار به دلیل افزایش سطح تماس بین ابزار و ورق و کاهش تمرکز انرژی، پدیده سوختن و بخار شدن روانکار کمتر شده، در نتیجه شرایط روانکاری بهبود یافته نیروی شکل‌دهی و نیروی اصطکاک کاهش می‌یابد که این مسأله باعث تأخیر در پارگی ورق و افزایش عمق پارگی می‌شود.

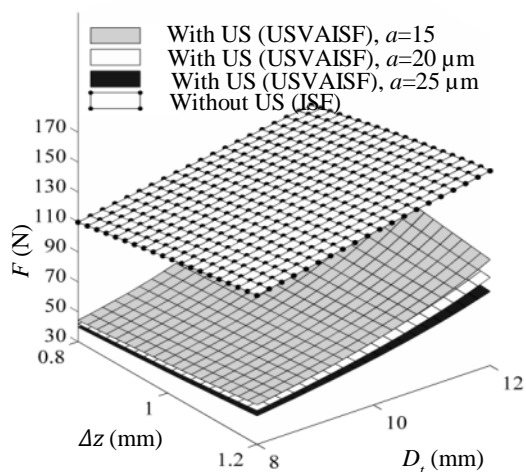
اثر تغییر دامنه نوسانات بر عمق پارگی در نمودار قسمت (b)

**4-3-1- بررسی و مقایسه نیروی شکل‌دهی در دو حالت با****اعمال نوسانات آلتراسونیک و بدون نوسانات آلتراسونیک**

در شکل 11 نیروی شکل‌دهی در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک و حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک با دامنه‌های مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی شرایط آزمایش نیروی شکل‌دهی در حالت اعمال نوسانات آلتراسونیک نسبت به حالت بدون ارتعاشات آلتراسونیک کاهش یافته است.

با توجه به جدول 6 این کاهش نیرو بین 33.3 تا 63.5 درصد بوده است. این اثر پیشتر نیز در آزمون شیار مستقیم در شکل‌دهی افزایشی و دیگر فرایندهای شکل‌دهی مثل چرخکاری، کشش سیم و اکستروژن مشاهده شده است [21,16,15]. دلایل کاهش نیرو در هنگام اعمال نوسان آلتراسونیک را می‌توان به صورت ذیل بیان کرد:

1. کاهش ضریب اصطکاک و نیروی اصطکاک بین ابزار و ورق به دلیل نوسانات آلتراسونیک و تماس غیر مداوم بین ابزار و ورق و تغییر مکانیزم تماس بین ابزار و ورق از حالت پیوسته به حالت ضربه‌ای [15]
2. کاهش تنش تسلیم ماده در اثر نوسانات آلتراسونیک [11]
3. افزایش دمای ناشی از اعمال نوسانات آلتراسونیک و کاهش تنش سیلان ماده



**Fig. 11** Comparison of forming forces for conventional ISF and ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming (USVAISF) with various vibration amplitudes

شکل 11 مقایسه نیروی شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی افزایشی در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک و حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک با دامنه‌های مختلف

با توجه به قسمت (a) افزایش دامنه نوسان و کاهش قطر ابزار هر یک به صورت جداگانه موجب افزایش درصد کاهش نیرو می‌گردد. اما مطابق بخش (b) اثر تغییرات اندازه گام در شرایط مختلف متفاوت است. افزایش اندازه گام در قطر ابزار کم (8 میلی‌متر) باعث کاهش درصد کاهش نیرو و در قطر ابزار زیاد (12 میلی‌متر) موجب افزایش درصد کاهش نیرو شده است.

برای پی بردن به علت اثرات فوق لازم است به سه پدیده مرتبط با دامنه نوسان که در زیر بیان می‌شود، توجه داشت.

1. کاهش تنش تسلیم ماده در اثر افزایش دمای ورق در محل تماس با ابزار به دلیل نوسانات آلتراسونیک و در نتیجه کاهش نیروی شکل‌دهی [20].
2. کاهش نیروی اصطکاک [26,10].
3. سوختن و بخار شدن مایع روانکار در اثر نوسانات آلتراسونیک و افزایش نیروی شکل‌دهی [16]

افزایش دامنه نوسان باعث ازدیاد همه اثرات بیان شده می‌گردد، اما غلبه اثرات 1 و 2 (که باعث افزایش درصد کاهش نیرو می‌شود) بر اثر 3 (که باعث کاهش درصد کاهش نیرو می‌شود) منجر به افزایش درصد کاهش نیرو با افزایش دامنه نوسان می‌شود. در اثر کاهش قطر ابزار سطح تماس بین ابزار و ورق کاهش یافته، تمرکز انرژی زیاد می‌شود و در نتیجه دمای ورق افزایش می‌یابد که این پدیده باعث افزایش اثرات 1 و 3 می‌شود اما به دلیل بیشتر بودن اثر کاهش تنش تسلیم (اثر 1)، درصد کاهش نیرو با کاهش قطر ابزار افزایش می‌یابد. کاهش اندازه گام نیز مانند اثر قطر ابزار باعث کاهش سطح تماس، افزایش تمرکز انرژی و افزایش دمای ورق در محل تماس با ابزار می‌شود. افزایش دما باعث افزایش اثرات 1 و 3 می‌شود که در قطر ابزار کم (8 میلی‌متر) اثر 1 از 3 بیشتر بوده، درصد کاهش نیرو با کاهش اندازه گام افزایش می‌یابد؛ اما در قطر ابزار زیاد (12 میلی‌متر) اثر 3 بر 1 غلبه نموده که در نتیجه با کاهش اندازه گام درصد کاهش نیرو کاهش می‌یابد.

**4-3- بررسی اثر نوسانات آلتراسونیک**

برای مقایسه پاسخ در دو حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک و بدون آن و بررسی اثر نوسانات آلتراسونیک بر سطح پاسخ، تابع رگرسیون برای دو حالت بدون نوسانات آلتراسونیک و با نوسانات آلتراسونیک در یک نمودار با استفاده از نرم‌افزار متلب 1 رسم شده است.

1. Matlab

جدول 6 نتایج حاصل از آزمون‌ها برای حالت با نوسانات آلتراسونیک و بدون نوسانات آلتراسونیک در شرایط مختلف طراحی آزمایش

Table 6 The results of experiments for ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming (USVAISF) and conventional ISF

درصد تغییر	درصد کاهش نیروی عمق پارگی در اثر نوسانات آلتراسونیک (%)	بدون آلتراسونیک				با آلتراسونیک				شماره آزمایش	
		عمق پارگی (mm)	نیروی شکل‌دهی (N)	اندازه گام (mm)	قطر ابزار (mm)	عمق پارگی (mm)	نیروی شکل‌دهی (N)	دامنه نوسان (μm)	اندازه گام (mm)		قطر ابزار (mm)
-2/5	63/5	31/6	110	0/8	8	30/8	40	20	0/8	8	1
-11/6	62/5	25	120	1/0	8	22/1	48	15	1/0	8	2
-12/8	60	25	120	1/0	8	21/8	45	25	1/0	8	3
-24	61/5	20/4	130	1/2	8	15/41	50	20	1/2	8	4
-15/8	39	30	123	0/8	10	25/25	75	15	0/8	10	5
-27/5	55/2	30	123	0/8	10	21/75	55	25	0/8	10	6
-15/1	51/8	21/1	135	1/0	10	17/9	65	20	1/0	10	7
-24/2	41/3	16/5	145	1/2	10	12/5	86	15	1/2	10	8
-29/6	58/6	16/5	145	1/2	10	11/6	60	25	1/2	10	9
-2	33/3	26/8	135	0/8	12	26/25	90	20	0/8	12	10
-14/6	36/6	21/2	150	1/0	12	18/1	95	15	1/0	12	11
-1/8	38	21/2	150	1/0	12	17/2	93	25	1/0	12	12
-6/5	50	12/3	160	1/2	12	11/5	80	20	1/2	12	13

اعمال نوسانات آلتراسونیک بین 2 تا 29/6 درصد نسبت به شرایط مشابه فرایند بدون نوسانات آلتراسونیک کاهش یافته است که نتایج آن در جدول 6 آورده شده است. کاهش عمق پارگی در حالت اعمال ارتعاشات آلتراسونیک نسبت به حالت معمولی را می‌توان به علت افزایش اثر کار سختی و افزایش تردی ماده در اثر نوسانات آلتراسونیک دانست [13,12].

### 5- بهینه‌سازی

به دست آوردن شرایط بهینه فرایند به منظور صرفه جویی انرژی، به حداقل رساندن نیروی (که می‌تواند بر دقت قطعه تولید شده نیز مؤثر باشد)، دستیابی به بیشترین درصد کاهش نیروی شکل‌دهی در اثر اعمال نوسانات آلتراسونیک و بیشترین عمق قابل دستیابی در این حالت، مهم و ضروری می‌نماید. از این رو با استفاده از مدل مورد مطالعه شرایط بهینه که منجر به کمترین نیروی شکل‌دهی، بیشترین درصد کاهش نیرو و بیشترین عمق پارگی قابل دستیابی می‌گردد در قطر ابزار 8 میلی‌متر، اندازه گام 0/8 میلی‌متر و دامنه نوسان 25 میکرون پیش‌بینی شده است. جهت ارزیابی شرایط بهینه پیش‌بینی شده، آزمایش تجربی تحت شرایط به دست آمده، انجام گرفت، که نتایج پیش‌بینی شده و نتایج به دست آمده از آزمایش در جدول 7 نشان داده شده است.

4-3-2- بررسی و مقایسه عمق پارگی در دو حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک و بدون نوسانات آلتراسونیک نمودار عمق پارگی برای دو حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک و بدون آن در شکل 12 نشان داده شده است.

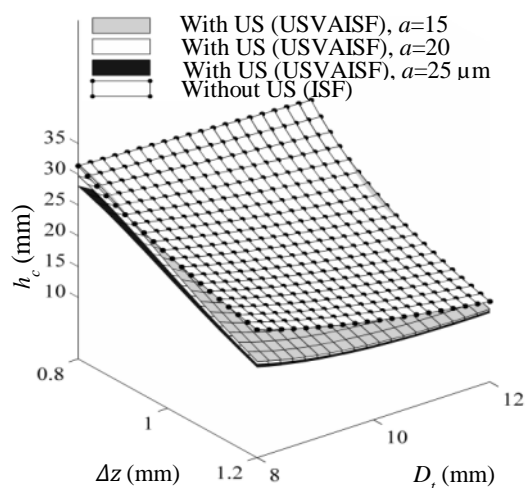


Fig. 12 Comparison of fracture depths for conventional ISF and ultrasonic vibration assisted incremental sheet forming (USVAISF) with various vibration amplitudes

شکل 12 مقایسه عمق پارگی در فرایند شکل‌دهی افزایشی در حالت بدون نوسانات آلتراسونیک و حالت با اعمال نوسانات آلتراسونیک با دامنه‌های مختلف

با توجه به این شکل مشاهده می‌شود، عمق پارگی در حالت

جدول 7 نتایج بهینه‌سازی مدل و مقایسه با نتایج تجربی در شرایط بهینه

پاسخ	پیش‌بینی	آزمون تجربی	خطا (%)
$F_{USVAISF}$ (N)	39/82	37	+7/6
$d_{USVAISF}$ (mm)	28/15	29/1	-3/2
Re (%)	68/21	66/3	+2/8

همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای پیش‌بینی مدل در حد مطلوبی ( $\geq 8\%$ ) است که بیانگر مناسب بودن مدل انتخابی است.

## 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با ساخت و اتصال کنگی شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات آلتراسونیک به دستگاه فرز CNC، و با بهره‌گیری از مدل آماری سطح پاسخ اثرات پارامترهای ورودی فرایند شامل قطر ابزار، اندازه گام و دامنه نوسان بر نیروی شکل‌دهی، عمق پارگی و درصد کاهش نیرو در اثر اعمال نوسانات آلتراسونیک در فرایند شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات آلتراسونیک و همچنین اثر پارامترهای قطر ابزار و اندازه گام بر نیروی شکل‌دهی و عمق پارگی در فرایند شکل‌دهی افزایشی بدون نوسانات آلتراسونیک بررسی شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتایج کلی این تحقیق را بصورت زیر بیان کرد:

- در فرایند شکل‌دهی افزایشی بدون نوسانات آلتراسونیک افزایش قطر ابزار و اندازه گام هر یک به صورت جداگانه باعث افزایش نیروی شکل‌دهی شده است.

- در فرایند شکل‌دهی افزایشی بدون نوسانات آلتراسونیک کاهش هر یک از عوامل قطر ابزار و اندازه گام باعث افزایش عمق پارگی شده است.

- افزایش قطر ابزار در حالت اعمال نوسانات آلتراسونیک مانند حالت معمول باعث افزایش نیروی شکل‌دهی شده است.

- در فرایند شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات آلتراسونیک مشاهده شد برای قطر ابزار کم (8 میلی‌متر) با افزایش اندازه گام نیروی شکل‌دهی افزایش یافته، اما برای قطر ابزار بزرگ (12 میلی‌متر) با افزایش اندازه گام نیروی شکل‌دهی کاهش یافته است.

- افزایش دامنه نوسان، در فرایند شکل‌دهی افزایشی با اعمال نوسانات آلتراسونیک باعث کاهش نیروی شکل‌دهی گردید. البته کاهش نیرو در اندازه‌های قطر ابزار کم (8 میلی‌متر) ناچیز بوده است.

- در حالت با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک افزایش هر یک از

عوامل اندازه گام و دامنه نوسان باعث کاهش عمق پارگی شده است. در اندازه گام زیاد (1/2 میلی‌متر) افزایش قطر ابزار باعث کاهش عمق پارگی شده است در حالیکه در اندازه گام کم (0/8 میلی‌متر) با افزایش قطر ابزار، عمق پارگی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است.

- درصد کاهش نیرو در اثر نوسانات آلتراسونیک با افزایش دامنه نوسان و کاهش قطر ابزار افزایش یافته است. همچنین برای قطر ابزار کم (8 میلی‌متر) با افزایش اندازه گام درصد کاهش نیرو کم شده اما برای قطر ابزار بزرگ (12 میلی‌متر) با افزایش اندازه گام درصد کاهش نیرو افزایش یافته است.

- با مقایسه نتایج در حالت‌های با اعمال نوسانات آلتراسونیک و بدون آن مشخص شد در اثر اعمال نوسانات آلتراسونیک در شرایط مختلف نیروی شکل‌دهی بین 33/3 تا 63/3 درصد و عمق پارگی (شکل پذیر ورق) بین 2 تا 29/6 درصد کاهش یافته است.

- بر اساس مدل مورد استفاده در حالت اعمال نوسانات آلتراسونیک شرایط بهینه برای داشتن کمترین میزان نیروی شکل‌دهی، بیشترین عمق پارگی و بیشترین درصد کاهش نیرو برای ابزار با قطر 8 میلی‌متر، اندازه گام 0/8 میلی‌متر و دامنه نوسان 25 میکرون بیش‌بینی شد که با انجام آزمون تجربی مشخص شد نتایج پیش‌بینی شده برای نیروی شکل‌دهی، عمق پارگی و درصد کاهش نیرو خطایی کمتر از 8 درصد داشته است.

## 7- فهرست علائم

$a$	دامنه نوسان ( $\mu\text{m}$ )
$D_t$	قطر ابزار (mm)
$d$	عمق پارگی
$d_{ISF}$	عمق پارگی در حالت بدون آلتراسونیک (mm)
$d_{USVAISF}$	عمق پارگی در حالت با آلتراسونیک (mm)
$F$	نیروی شکل‌دهی
$F_{ISF}$	مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی در حالت بدون
$F_{USVAISF}$	مؤلفه عمودی نیروی شکل‌دهی در حالت با آلتراسونیک
Re	درصد کاهش نیرو (%)

علائم یونانی

$\Delta z$  اندازه گام (mm)

$\sigma_x$  تنش نرمال (Mpa)

$\tau_0$  تنش برشی (Mpa)

$\sigma$  تنش (Mpa)

$\varepsilon$  کرنش

## 8- مراجع

- Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 18, No. 1, pp. 70-76, 2011/02/01, 2011. English
- [13] T. Wen, R. Gao, X. Chen, Influence of high frequency vibration on deep drawing process of AZ31 sheet at room temperature, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, Vol. 17, No. 4, pp. 456-460, 2012/08/01, 2012. English
- [14] M. Murakawa, M. Jin, The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1, pp. 81-86, 2001.
- [15] A. A. Mousavi, H. Feizi, Simulation of ultrasonic vibration extrusion using the finite element method, 2005.
- [16] M. Rasoli, A. Abdullah, M. Farzin, A. F. Tehrani, A. Taherizadeh, Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 6, pp. 1443-1452, 2012.
- [17] G. P. Cai, N. Y. Zhu, N. Wen, Stress analysis of sheet metal vibration incremental forming, *Advanced Materials Research*, Vol. 154, pp. 166-170, 2011.
- [18] Z. H. Jiang, Y. T. Gong, Z. K. Zhang, Analysis of Sheet Metal Vibration Incremental Forming Mechanism, *Advanced Materials Research*, Vol. 154, pp. 1526-1529, 2011.
- [19] G. P. Cai, C. W. Xing, Z. H. Jiang, Z. K. Zhang, Sheet Single Point Vibration Incremental Forming Process Simulation and Analysis of Process Parameters, *Advanced Materials Research*, Vol. 430, pp. 74-78, 2012.
- [20] A. Pak, H. Deilami Azodi, M. Mahmoudi, Investigation of Ultrasonic assisted incremental sheet metal forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, 2015. (In Persian)
- [21] M. Vahdati, R. Mahdavejad, S. Amini, A. Abdullah, K. Abrinia, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop "ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming" process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, 2015. (In Persian)
- [22] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*: John Wiley & Sons, 2008.
- [23] R. H. Myers, D. C. Montgomery, C. M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*: John Wiley & Sons, 2009.
- [24] G. Hussain, L. Gao, N. Hayat, X. Ziran, A new formability indicator in single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4237-4242, 2009.
- [25] M. Ham, J. Jeswiet, Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 277-280, 2007.
- [26] V. C. Kumar, I. M. Hutchings, Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration, *Tribology International*, Vol. 37, No. 10, pp. 833-840, 2004.
- [1] H. Arfa, R. Bahloul, H. BelHadjSalah, Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts, *International Journal of Material Forming*, 2012.
- [2] J. R. Duflou, J. Verbert, B. Belkassen, 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.
- [3] R. Aereens, P. Eyckens, A. Bael, J. R. Duflou, Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 9-12, pp. 969-982, 2009.
- [4] J. Duflou, Y. Tunçkol, A. Szekeres, P. Vanherck, Experimental study on force measurements for single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, No. 1-3, pp. 65-72, 2007.
- [5] L. Filice, G. Ambrogio, F. Micari, On-Line Control of Single Point Incremental Forming Operations through Punch Force Monitoring, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 245-248, 2006.
- [6] A. Petek, K. Kuzman, J. Kopač, Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming, *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 35-42, 2009.
- [7] Y. Li, Z. Liu, H. Lu, W. B. Daniel, S. Liu, P. A. Meehan, Efficient force prediction for incremental sheet forming and experimental validation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-17, 2014.
- [8] K. Al-Ghamdi, G. Hussain, Forming forces in incremental forming of a geometry with corner feature: investigation into the effect of forming parameters using response surface approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 9-12, pp. 2185-2197, 2015/02/01, 2015. English
- [9] C. Winsper, G. Dawson, D. Sansome, Introduction to the mechanics of oscillatory metalworking, *Metals Materials*, Vol. 4, No. 4, pp. 158-162, 1970.
- [10] D. S. Ghahfarokhi, M. Salimi, Modeling of sliding friction with superimposed ultrasonic oscillation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, 2015.
- [11] F. Blaha, B. Langenecker, Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung, *Naturwissenschaften*, Vol. 42, No. 20, pp. 556-556, 1955/01/01, 1955. German
- [12] T. Wen, L. Wei, X. Chen, C.-I. Pei, Effects of ultrasonic vibration on plastic deformation of AZ31 during the tensile process, *International Journal of*