



## بهینه‌یابی عوامل موثر بر متمرکزکننده‌های فراصوت در فرایند اکستروژن برشی ساده با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی

مصطفی بلالی<sup>۱</sup>، سیدمحمدحسین سیدکاشی<sup>۲\*</sup>، علی حسن‌آبادی<sup>۲</sup>، حمید گرجی<sup>۳</sup>، حمید باصری<sup>۳</sup>، محمد خسروی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۴- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: seyedkashi@birjand.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۷ اسفند ۱۴۰۲

پذیرش: ۵ خرداد ۱۴۰۳

#### کلیدواژگان:

اکستروژن برشی ساده

ارتعاشات فراصوت

شبیه‌سازی اجزای محدود

تحلیل مودال

طراحی آزمایش تاگوچی

متمرکزکننده فراصوت

در تحقیق حاضر به بررسی عوامل موثر بر متمرکزکننده‌های فراصوت در روش اکستروژن برشی ساده به کمک ارتعاشات فراصوت و انتخاب بهترین عملکرد پرداخته شده است. در ابتدا، عوامل اصلی ورودی (نوع، جنس و ابعاد متمرکزکننده) برای طراحی آزمایش مشخص شدند. سپس طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای عوامل ورودی با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب صورت گرفت. خروجی نیروی شکل‌دهی برای هر سطح با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس صریح به‌دست آمد. بهینه‌یابی مقادیر ورودی با توجه به معیار "هرچه کمتر، بهتر" در نسبت سیگنال به نویز بررسی شد. بهترین سطح متغیرهای ورودی متمرکزکننده برای رسیدن به مقدار کمینه نیروی شکل‌دهی در فرایند اکستروژن برشی ساده انتخاب گردید. پس از اتمام مراحل طراحی آزمایش و شبیه‌سازی اجزای محدود، متمرکزکننده ارتعاش به‌منظور انجام فرایند تجربی با توجه به مقادیر ورودی بهینه ساخته شد و به قالب اکستروژن برشی ساده متصل گردید. با اعمال ارتعاشات فراصوت، کاهش ۱۱ درصدی نیروی شکل‌دهی نسبت به فرایند بدون ارتعاشات فراصوت گزارش گردید. مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی در روش اکستروژن برشی ساده با اعمال ارتعاشات فراصوت، مقدار خطای ۹٪ را نشان داد که صحت شبیه‌سازی عددی را تایید می‌کند.

## Optimization of effective parameters on ultrasonic horns in simple shear extrusion process using taguchi design of experiments

Mostafa Balali<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi<sup>2\*</sup>, Ali Hasanabadi<sup>2</sup>, Hamid Gorji<sup>3</sup>, Hamid Baseri<sup>3</sup>, Mohammad Khosravi<sup>4</sup>

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Faculty Member, Mechanical Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

4- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

\* Corresponding Author's Email: seyedkashi@birjand.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 26 February 2024

Accepted: 25 May 2024

#### Keywords:

Simple Shear Extrusion

Ultrasonic Vibration

Finite Element Simulation

Modal Analysis

Taguchi Design of Experiments

Ultrasonic Horn

### Abstract

In the present research, the effective parameters of ultrasonic horns in the ultrasonic-assisted simple shear extrusion process and the selection of the best choice are discussed. At first, the main input parameters (horn type, material, and dimensions) were determined to be used in the design of the experiments. Then, the experiments for input parameters were designed using the Taguchi method in Minitab software. The output results of the forming force for each level were obtained using finite element simulation in Abaqus/Explicit software. The optimization of the input values was investigated based on the lower-the-better condition of the signal-to-noise (S/N) ratio. The optimal levels of the horn input variables were determined to achieve the minimum forming force during the ultrasonic-assisted simple shear extrusion process. After the design of experiments and the finite element simulations, the proposed horn was manufactured according to the optimal input values and then it was connected to the simple shear extrusion die. In the presence of ultrasonic vibrations, an 11% reduction in forming force was reported compared to the process without ultrasonic vibrations. A comparison of experimental and simulation results in the ultrasonic-assisted simple shear extrusion process showed a 9% error, which validated the numerical simulation.

### Please cite this article using:

Balali M, Seyedkashi SMH, Hasanabadi A, Gorji H, Baseri H, Khosravi M. Optimization of effective parameters on ultrasonic horns in simple shear extrusion process using taguchi design of experiments. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 May 21;11(3):1-12. doi: 10.22034/IJME.2024.445721.1933 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

روش‌های مختلفی از قبیل رسوب دادن الکترولیتی، متراکم کردن پودرهای نانوساختار و آلیاژسازی مکانیکی برای افزایش استحکام، سختی و ریزساختار وجود دارد. این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی از جمله تخلخل، آلودگی خارجی و کم بودن کرنش اعمالی به فلزات می‌باشند. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای رسیدن به خواص مکانیکی و ریزساختاری مطلوب، بدون محدودیت‌های بیان شده می‌باشند [۱]. در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، کرنش‌های شدیدی به نمونه‌ها وارد می‌شود تا چگالی بالایی از نابعی‌ها را تولید کند. در هر مرحله از این فرایندها، این قابلیت وجود دارد که کرنش بیشتری به نمونه‌ها وارد گردد که موجب بهبود در ریزساختار ماده می‌شود [۲]. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به انواع اکستروژن کانال‌های همسان زاویه‌دار، اکستروژن پیچشی، نورد تجمعی، پیچش فشار بالا و غیره تقسیم می‌شوند که کاربرد قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری دارند [۳-۵]. در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، گزارش خواص مکانیکی و ریزساختاری با توجه به ارتباط بین عوامل میکروسختی و اندازه دانه، میکروسختی و چگالی نابعی، مرزخانه‌ها و چگالی نابعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که توسط محققین مختلفی بررسی گردیده است [۶-۷]. عوامل دما و تعداد پاس‌های اکستروژن تأثیر مستقیمی در خواص مکانیکی و ریزساختاری روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید دارند؛ به‌طوری‌که با کاهش دمای نمونه و افزایش تعداد پاس‌های اکستروژن، بهبود قابل توجهی در ریزساختار و خواص مکانیکی حاصل می‌شود [۸]. اکستروژن برشی ساده یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که نخستین بار توسط پردیس و همکاران [۹] مطرح گردید. ایشان آلومینیوم تجاری را با روش اکستروژن برشی ساده<sup>۱</sup> (SSE) دچار تغییر شکل پلاستیک شدید کردند و نتایج را به صورت اعمال کرنش بالا در هر تکرار فرایند و تولید مواد فوق ریزدانه گزارش دادند. باقرپور و همکاران [۱۰] مسیرهای مختلف اکستروژن در فرایند اکستروژن برشی ساده را به منظور اندازه‌گیری میکروسختی در سطح مقطع نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند. ترک و همکاران [۱۱] تغییر شکل آلیاژ منیزیم با استفاده از این روش را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که این روش به دلیل اعمال کرنش‌های یکنواخت در سطح مقطع نمونه‌ها از کارایی قابل قبولی نسبت به سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برخوردار است. صباغیان و همکاران [۱۲] با اکستروژن آلیاژ منیزیم توسط دو روش اکستروژن کانال‌های همسان زاویه‌دار و اکستروژن برشی ساده، نتایج را به‌صورت کاهش بیشتر ریزساختار در روش ECAP<sup>۲</sup> نسبت به روش SSE بیان کردند که علت آن در اعمال کرنش‌های بالاتر به نمونه منیزیم می‌باشد. باقرپور و همکاران [۱۳] ریزدانه شدن مس خالص تجاری با روش اکستروژن برشی ساده را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که افزایش استحکام و سختی تنها تا پاس دوازدهم ادامه دارد و بعد از آن درشت شدن دانه‌ها اتفاق می‌افتد. اعمال روش اکستروژن برشی ساده موجب بهبود در خواص مکانیکی و ریزساختاری می‌شود و با افزایش تعداد پاس‌های اکستروژن، نابعی‌های بیشتری تولید می‌گردد [۱۴]. افزایش تعداد پاس‌های اکستروژن تأثیر مستقیمی در توزیع یکنواخت ریزساختار در فرایند اکستروژن برشی دارد به‌طوری‌که تأثیر آن در آلیاژ منیزیم نیز بهبود فرایند را نشان می‌دهد [۱۵]. روش اکستروژن برشی ساده و سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید با محدودیت‌هایی از قبیل افزایش نیروی شکل‌دهی، کرنش غیر یکنواخت در پاس‌های پایین اکستروژن و ضریب اصطکاک بالا روبه‌رو هستند. بخشی از معایب بیان شده با اعمال ارتعاشات فراصوت (التراسونیک) قابل رفع است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

طراحی آزمایش یکی از راهکارهای مناسب به‌منظور شناسایی اثرات متقابل پاسخ‌ها و دستیابی به یک فرایند بهینه است. بلالی و همکاران [۱۶] با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM<sup>۳</sup>) تأثیر پارامترهای ورودی فرایند اکستروژن برشی ساده از قبیل زاویه قالب، سرعت سنبه و طول کانال قالب را بر نیروی شکل‌دهی و کرنش پلاستیک مورد بررسی قرار دادند. مقادیر بهینه به صورت زاویه قالب ۴۵ درجه، طول کانال ۹۰ میلی‌متر و سرعت سنبه ۰/۳ میلی‌متر بر ثانیه حاصل شد. احمدی و همکاران [۱۷] اعمال ارتعاشات فراصوت را به منظور بهبود فرایند اکستروژن کانال‌های همسان زاویه‌دار مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایند اکستروژن کانال‌های همسان زاویه‌دار استحکام کششی، میکروسختی و خواص ریزساختاری نسبت به حالت بدون ارتعاشات فراصوت بهبود می‌یابد. لوکاس و داود [۱۸] تأثیر ارتعاشات فراصوت در فرایند اکستروژن را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که کاهش ضریب اصطکاک در فرایند اکستروژن، موجب کم شدن دامنه ارتعاشات می‌شود. سینر و همکاران [۱۹] تأثیر

<sup>1</sup> Simple Shear Extrusion

<sup>2</sup> Equal Channel Angular Pressing

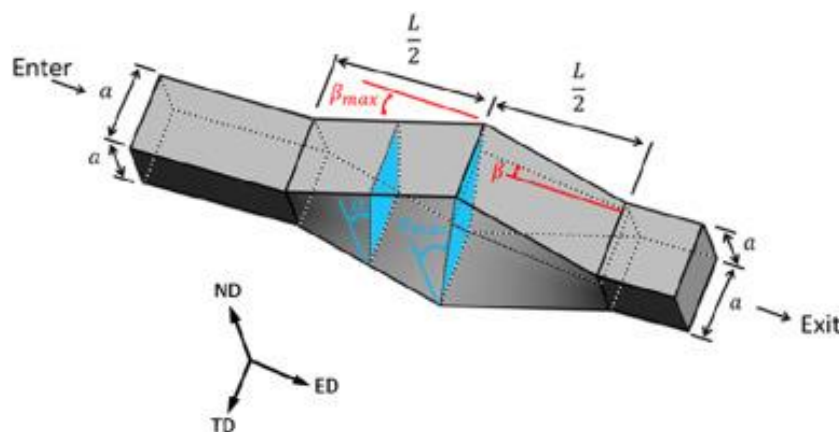
<sup>3</sup> Response Surface Method

ارتعاشات فراصوت در فرایند اکستروژن کانال‌های همسان زاویه‌دار را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج به صورت رفتار کاملاً همسانگرد<sup>۱</sup> در نمونه مسی به دست آمد. چاهار و اینامدار [۲۰] بهینه‌سازی فرایند اکستروژن آلومینیوم را با روش تاگوچی مورد مطالعه قرار دادند. عوامل بهینه به صورت دمای پیش گرم نمونه ۵۰۰ درجه سانتیگراد، دمای قالب ۴۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت سنبه ۰/۶ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد.

در پژوهش حاضر، برای اولین بار، اعمال ارتعاشات فراصوت در حین فرایند اکستروژن برشی ساده برای کم کردن نیروی شکل‌دهی پیشنهاد شده است که با عنوان فرایند "اکستروژن برشی ساده به کمک ارتعاشات فراصوت (USSE)" نام‌گذاری شد. همچنین در فرایند اکستروژن برشی ساده به کمک ارتعاشات التراسونیک، مراحل طراحی آزمایش به همراه شبیه‌سازی المان محدود و فرایند تجربی به طور مجزا انجام پذیرفت. بدین صورت که ابتدا مقادیر بهینه متمرکزکننده‌های ارتعاشات فراصوت (هورن<sup>۲</sup>) با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و شبیه‌سازی اجزای محدود استخراج گردید. در نهایت به منظور انجام فرایند آزمایشگاهی با استفاده از مقادیر بهینه متمرکزکننده، ساخت آن برای انتقال ارتعاشات فراصوت در روش اکستروژن برشی ساده صورت پذیرفت. در نهایت، مقادیر تجربی نیروی شکل‌دهی در دو فرایند اکستروژن برشی ساده و اکستروژن برشی ساده به کمک ارتعاشات فراصوت با یکدیگر مقایسه شدند.

## ۲- مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش بر روی فرایند USSE نیاز به بررسی عوامل ورودی متمرکزکننده‌های فراصوت شامل نوع، جنس و ابعاد می‌باشد. به دست آوردن مقادیر بهینه متمرکزکننده‌ها موجب انتقال و تمرکز بهتر ارتعاشات فراصوت به سطح مورد نظر می‌شود. از این رو در این پژوهش، ابتدا طراحی آزمایش به روش تاگوچی به همراه شبیه‌سازی اجزای محدود صورت پذیرفت و در نهایت ساخت متمرکزکننده‌های فراصوت به منظور استفاده در فرایند اکستروژن برشی ساده مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱ طرح‌واره فرایند اکستروژن برشی ساده نشان داده شده است.



شکل ۱ طرح‌واره فرایند اکستروژن برشی ساده [۴]

## ۲-۱- پارامترهای ورودی متمرکزکننده‌ها

اجزای مختلفی از قبیل مولد برق<sup>۳</sup>، مبدل<sup>۴</sup> و متمرکزکننده در اعمال ارتعاشات فراصوت به جسم مورد نظر وجود دارد. متمرکزکننده وظیفه انتقال و تمرکز ارتعاشات فراصوت به قطعه مورد نظر را بر عهده دارد. تنش‌های اعمالی به متمرکزکننده‌ها نباید از استحکام تسلیم جنس انتخابی بیشتر باشد. تنش اعمالی متمرکزکننده‌های پله‌ای و نمایی نسبت به متمرکزکننده‌های استوانه‌ای و مخروطی

<sup>1</sup> Isotropic

<sup>2</sup> Ultrasonic-assisted Simple Shear Extrusion

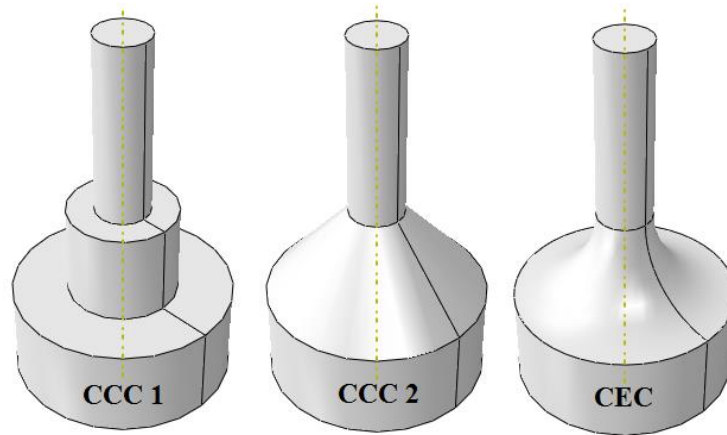
<sup>3</sup> Horn

<sup>4</sup> Generator

<sup>5</sup> Transducer

بیشتر است [۲۱]. گویمن و همکاران [۲۲] رویکرد جدیدی از طراحی متمرکزکننده ارتعاش را با استفاده از تحلیل مودال و داده‌های تجربی ارائه دادند. نتایج آن‌ها تطابق خوب و قابل قبول مقادیر عددی و تجربی را نشان می‌داد. ناصری و همکاران [۲۳] طراحی متمرکزکننده ارتعاش در فرایند اکستروژن کانال‌های همسان زاویه‌دار را بررسی کردند. در فرایند اکستروژن کانال‌های همسان زاویه‌دار با اعمال ارتعاشات فراصوت، ۹٪ کاهش نیروی شکل‌دهی گزارش داده شد.

در این مقاله، به منظور بررسی مناسب اثر نوع متمرکزکننده در فرایند SSE از سه متمرکزکننده سه‌جزئی استوانه‌ای-استوانه‌ای-استوانه‌ای (CCC<sup>۱</sup>)، استوانه‌ای-نمایی-استوانه‌ای (CEC<sup>۲</sup>)، استوانه‌ای-مخروطی-استوانه‌ای (CCC<sup>۲</sup>) استفاده گردید که در شکل ۲ مشخص شده است. طراحی انواع متمرکزکننده با استفاده از تحلیل مودال در نرم‌افزار آباکوس صریح صورت گرفت.



شکل ۲ طرحواره متمرکزکننده‌های سه‌جزئی

جنس متمرکزکننده به کار گرفته شده جهت انتقال ارتعاشات فراصوت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در انتخاب جنس متمرکزکننده باید به دو عامل خواص مکانیکی (تحمل تنش تسلیم، مقاومت به خستگی بالا) و خواص صوتی<sup>۴</sup> (انتقال خوب ارتعاش، اتلاف کم انرژی) توجه شود [۲۴]. جنس متمرکزکننده باید به‌گونه‌ای باشد که کمترین اختلاف ضریب مقاومت در مقابل جریان متناوب<sup>۵</sup> را نسبت به مبدل داشته باشد [۲۵]. معمولاً آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰، فولاد و تیتانیوم از کاربرد بیشتری برای طراحی و ساخت متمرکزکننده برخوردار هستند. در این پژوهش، از سه فولاد H13، VCN و SPK برای ساخت متمرکزکننده‌ها استفاده شده است. عوامل موثر جنس متمرکزکننده در تحلیل مودال با توجه به خواص الاستیک و چگالی فولادها بیان می‌شود که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی متمرکزکننده

جنس متمرکزکننده	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
فولاد H13	7800	210	0.3
فولاد VCN	7850	190	0.25
فولاد SPK	7850	200	0.3

محاسبه مقادیر ابعادی متمرکزکننده در تحلیل مودال نقش قابل توجهی دارد. کاهش یا افزایش قطر و طول متمرکزکننده موجب تغییر در فرکانس تشدید حالت طولی می‌شود. برای محاسبه قطر حداکثر و طول متمرکزکننده از روابط ۱ الی ۳ استفاده می‌شود.

<sup>1</sup> Cylindrical-Cylindrical-Cylindrical

<sup>2</sup> Cylindrical-Exponential-Cylindrical

<sup>3</sup> Cylindrical-Conical-Cylindrical

<sup>4</sup> Acoustic

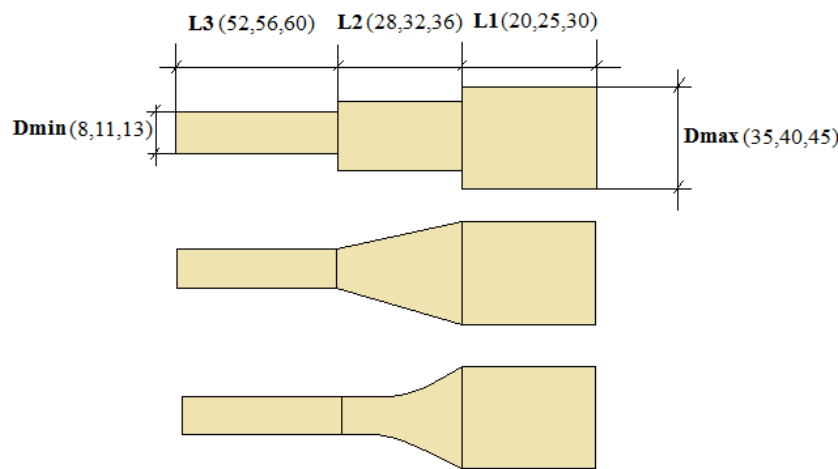
<sup>5</sup> Impedance coefficient

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (1)$$

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

$$D_{\max} = \frac{\lambda}{4} \quad (3)$$

که  $\lambda$  طول موج،  $n$  ضریب (نیم موج و تمام موج)،  $C$  سرعت صوت و  $f$  فرکانس تشدید می‌باشد [۲۶]. با به دست آوردن تقریبی از قطر و طول متمرکزکننده می‌توان مقادیر بازه تغییرات را به صورت شکل ۳ بیان کرد. این مقادیر ابعادی به صورت پارامترهای ورودی در محیط پارت نرم‌افزار آباکوس صریح وارد شد. مقادیر ابعادی قطر بزرگ  $D_{\max}$ ، قطر کوچک  $D_{\min}$ ، طول ناحیه اتصال به ترانسدیوسر  $L_1$ ، طول ناحیه میانی متمرکزکننده  $L_2$  و طول ناحیه ارتعاش  $L_3$  به صورت سه عدد تقریبی بر حسب میلی‌متر استخراج گردید. این مقادیر ابعادی به‌عنوان عوامل ورودی در طراحی آزمایش به روش تاگوچی به کار گرفته می‌شود.



شکل ۳ متغیرهای ابعادی ورودی در هر سه نوع متمرکزکننده

## ۲-۲- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

در این پژوهش، طراحی آزمایش عوامل مؤثر بر متمرکزکننده‌ها (نوع، جنس و ابعاد) با روش تاگوچی صورت پذیرفت و سپس با استفاده از اجزای محدود شبیه‌سازی گردید. هدف از این طراحی آزمایش و شبیه‌سازی اجزای محدود به دست آوردن عوامل بهینه متمرکزکننده برای کاهش نیروی شکل‌دهی در فرایند اکستروژن برشی ساده به کمک ارتعاشات فراصوت می‌باشد. جدول ۲ بازه تغییرات عوامل ورودی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ عوامل فرایند و سطوح آنها

مقادیر ابعادی متمرکزکننده					جنس متمرکزکننده	نوع متمرکزکننده	سطوح فرایند
$D_{\min}$ (mm)	$L_3$ (mm)	$L_2$ (mm)	$L_1$ (mm)	$D_{\max}$ (mm)			
۸	۵۲	۲۸	۲۰	۳۵	فولاد H13	CCC1	سطح ۱
۱۱	۵۶	۳۲	۲۵	۴۰	فولاد VCN	CCC2	سطح ۲
۱۳	۶۰	۳۶	۳۰	۴۵	فولاد SPK	CEC	سطح ۳

با توجه به تعداد و بازه تغییرات عوامل، طراحی آزمایش به روش تاگوچی با آرایه‌های متعامد  $L_{27}$  انجام پذیرفت و بر این اساس ۲۷ آزمایش طرح‌ریزی و اجرا گردید.

در طراحی آزمایش به روش تاگوچی از یک تابع زیان برای محاسبه تغییرات موجود بین نتایج و مقدار مورد نظر (متغیر خروجی) استفاده می‌شود. این تابع باتوجه به شرایط مسئله به سه حالت ۱- هرچه کمتر بهتر، ۲- هرچه بیشتر بهتر، و ۳- اندازه اسمی بهتر تقسیم می‌شود. در این مسئله بازه‌ای از مقادیر حداکثر و حداقل در روش تاگوچی و نرم‌افزار مینی‌تب ارائه می‌شود و باید یک مقدار مشخص را به عنوان پاسخ از تحلیل آزمایش استخراج نمود. هدف اصلی این پژوهش کاهش نیروی شکل‌دهی در فرایند اکستروژن برشی ساده می‌باشد، لذا از فرمول "هرچه کمتر، بهتر" استفاده گردید. پس از محاسبه مقدار تابع زیان برای هر خروجی مقدار سیگنال به نویز کل محاسبه می‌شود که در رابطه ۴ بیان شده است.

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (6)$$

که n تعداد تکرار و y خروجی اندازه‌گیری شده است.

## ۲-۳- شبیه‌سازی فرایند USSE

برای مدل‌سازی فرایند USSE از چهار قسمت مجزای قالب، سنبه، متمرکزکننده و قطعه‌کار استفاده گردید. کانال قالب، سنبه و متمرکزکننده به صورت صلب گسسته<sup>۱</sup> با المان R3D4 مدل‌سازی شدند. با توجه به شکل‌پذیری نمونه مس تجاری در منطقه تغییر شکل پلاستیک کانال قالب، مدل به صورت تغییرشکل‌پذیر<sup>۲</sup> و با المان C3D8R صورت پذیرفت. ابعاد قطعه کار به صورت ۱۴×۱۴×۶۰ (میلی متر مکعب) در نظر گرفته شد. خواص الاستیک قطعه کار با توجه به جدول ۳ که مشخصات مکانیکی آلیاژ مس تجاری را بیان می‌کند ارائه گردید. خواص پلاستیک قطعه نیز بر اساس منحنی تنش-کرنش حقیقی نمونه که از آزمون کشش استخراج شده در نرم افزار آباکوس وارد شد. همچنین رفتار سخت‌شوندگی نمونه در ناحیه پلاستیک به صورت همسانگرد (ایزوتروپ) تعریف گردید. در تعریف خواص ماده، از نرم‌شوندگی صوتی (آکوستیک) به دلیل عدم نیروی مقاوم در برابر ارتعاش صرف‌نظر گردید. سپس تمامی اجزا در نرم‌افزار آباکوس مونتاژ و شرایط مرزی و بارگذاری برای آن‌ها لحاظ شد. در این شبیه‌سازی، کانال قالب در تمامی جهات مقید شده و جابجایی تنها به سنبه و در راستای محور X اعمال شد. تحلیل مساله با استفاده از حل گر صریح دینامیکی<sup>۳</sup> صورت پذیرفت. ضریب اصطکاک تجربی بین نمونه و کانال قالب (منطقه تغییر شکل پلاستیک) با استفاده از تست فشار مقدار  $m = 0.3$  بدست آمد [۲۷]. برای اعمال ضریب اصطکاک تجربی در شبیه‌سازی از رابطه ۷ استفاده گردید [۲۸] و مقدار ضریب اصطکاک شبیه‌سازی به مقدار  $\mu = 0.1$  تغییر پیدا کرد.

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{27(1 - m^2)}} \quad (7)$$

پیشروی سنبه با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در راستای محور کانال قالب تعیین شد. نوع ارتعاشات فراصوت نیز با توجه به طراحی آزمایش متمرکزکننده‌ها و به وجود آوردن فرکانس تشدید متفاوت صورت پذیرفت. در ابتدا برای انتقال ارتعاشات التراسونیک به سطح نمونه مسی، قالب و سنبه به صورت صلب در نظر گرفته شدند. سپس با تعریف یک قید مرزی در ابتدای منطقه تغییر شکل پلاستیک (ناحیه قرارگیری متمرکزکننده) و جابجایی آن به صورت حرکت سینوسی  $U = A \cdot \sin(\omega t)$  اثر ارتعاشات به ناحیه کانال قالب منتقل شد. مقادیر دامنه نوسانی (a) و فرکانس تشدید (f) در تمامی مراحل شبیه‌سازی المان محدود به ترتیب  $10 \mu\text{m}$  و  $20 \text{ kHz}$  در نظر گرفته شد. در نهایت نمونه‌ها با سطح متمرکزکننده ارتعاش در تماس قرار گرفته و مراحل اکستروژن به اتمام می‌رسد. طرح‌واره کلی شبیه‌سازی فرایند USSE با اعمال ارتعاشات در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از شبیه‌سازی فرایند بر اساس مقادیر استخراج شده از روش تاگوچی، مقادیر خروجی نیروی شکل‌دهی اندازه‌گیری شد.

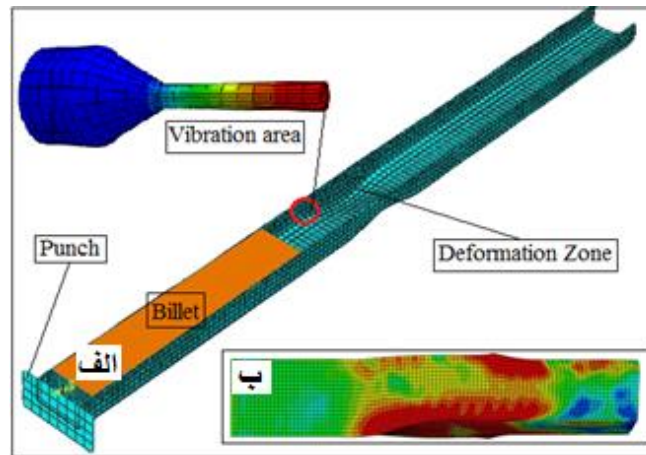
جدول ۳ خواص مکانیکی آلیاژ مس تجاری

جنس نمونه	مدول الاستیک (GPa)	مقاومت تسلیم (MPa)	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	ضریب پواسون
مس خالص تجاری	117	204	9.40	0.34

<sup>1</sup> Discrete Rigid

<sup>2</sup> Deformable

<sup>3</sup> Dynamic Explicit



شکل ۴ الف) طرح‌واره شبیه‌سازی فرایند اکستروژن برشی ساده با اعمال ارتعاشات فراصوت (USSE)، ب) نمونه شبیه‌سازی شده

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بهینه‌یابی

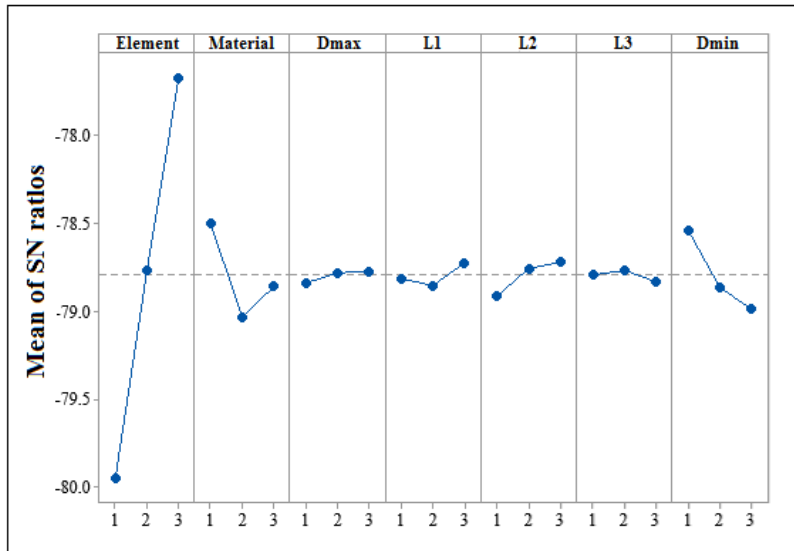
مقادیر خروجی (نیروی شکل‌دهی) حاصل از شبیه‌سازی المان محدود، مقادیر نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup>  $S/N$  (معیار هرچه کمتر بهتر) و مقادیر پیش‌بینی شده برای هر یک از آزمایش‌ها در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴ نتایج طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی

مقادیر خروجی			عوامل آزمایش							شماره آزمایش
پیش‌بینی شده	نسبت $S/N$	نیروی شکل‌دهی (N)	$D_{min}$ (mm)	$L_3$ (mm)	$L_2$ (mm)	$L_1$ (mm)	$D_{max}$ (mm)	جنس متمرکزکننده	نوع متمرکزکننده	
9513.22	0.013918	9429	8	52	28	20	35	H13	CCC1	1
9666.89	0.011202	9654	11	56	32	20	35	H13	CCC1	2
9844.89	0.009185	9942	13	60	36	20	35	H13	CCC1	3
10102.6	0.096386	10197	8	52	28	25	40	VCN	CCC1	4
10256.2	0.036281	10209	11	56	32	25	40	VCN	CCC1	5
10434.2	0.021311	10387	13	60	36	25	40	VCN	CCC1	6
9741.22	0.010242	9731	8	52	28	30	45	SPK	CCC1	7
9894.89	0.008692	9955	11	56	32	30	45	SPK	CCC1	8
10072.9	0.125589	10023	13	60	36	30	45	SPK	CCC1	9
8587.67	0.011763	8434	13	56	28	30	40	H13	CCC2	10
8038.67	0.065327	8109	8	60	32	30	40	H13	CCC2	11
8280.67	0.021317	8364	11	52	36	30	40	H13	CCC2	12
9195.33	0.028843	9267	13	56	28	20	45	VCN	CCC2	13
8646.33	0.010682	8612	8	60	32	20	45	VCN	CCC2	14
8888.33	0.007986	8851	11	52	36	20	45	VCN	CCC2	15
9127	0.038201	9209	13	56	28	25	35	SPK	CCC2	16
8578	0.011763	8542	8	60	32	25	35	SPK	CCC2	17
8820	0.008575	8774	11	52	36	25	35	SPK	CCC2	18
7617.22	0.012287	7397	11	60	28	25	45	H13	CEC	19
7544.89	0.013937	7620	13	52	32	25	45	H13	CEC	20
7099.89	0.184211	7245	8	56	36	25	45	H13	CEC	21
8033.56	0.080662	8118	11	60	28	30	35	VCN	CEC	22
7961.22	0.346667	7954	13	52	32	30	35	VCN	CEC	23
7516.22	0.015045	7439	8	56	36	30	35	VCN	CEC	24
7907.22	0.008063	8043	11	60	28	20	40	SPK	CEC	25
7834.89	0.008741	7767	13	52	32	20	40	SPK	CEC	26
7389.89	0.020805	7322	8	56	36	20	40	SPK	CEC	27

<sup>1</sup> Signal to Noise

روش نسبت سیگنال به نویز نشان‌دهنده حساسیت مشخصه‌های کیفی برای متغیرهای خروجی اثرگذار می‌باشد. این روش امکان تعیین سطوح بهینه و میزان تاثیرگذاری هر عامل را دارد. در نمودار تحلیل سیگنال به نویز، سطحی با بالاترین مقدار، به عنوان مقدار بهینه سطح برای فاکتور مورد نظر می‌باشد. سطوح بهینه هر عامل با توجه به کاهش نیروی شکل‌دهی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ نمایان است برای کاهش نیروی شکل‌دهی، پارامترهای (نوع متمرکزکننده، جنس هورن،  $D_{max}$ ،  $L_1$ ،  $L_2$ ،  $D_{min}$ ) در سطح بالای خود تنظیم می‌شوند. با توجه به مقادیر بهینه نمودار S/N می‌توان به این نتیجه دست یافت که نوع، جنس و قطر کوچک متمرکزکننده ( $D_{min}$ ) بیشترین تاثیر را در کاهش نیروی شکل‌دهی فرایند اکستروژن برشی ساده با اعمال ارتعاشات فراصوت دارند. جدول ۵ مقادیر سطوح بهینه عوامل را نشان می‌دهد.



شکل ۵ نمودار تحلیل S/N برای نیروی شکل‌دهی

جدول ۵ مقادیر سطوح بهینه پیشنهاد شده

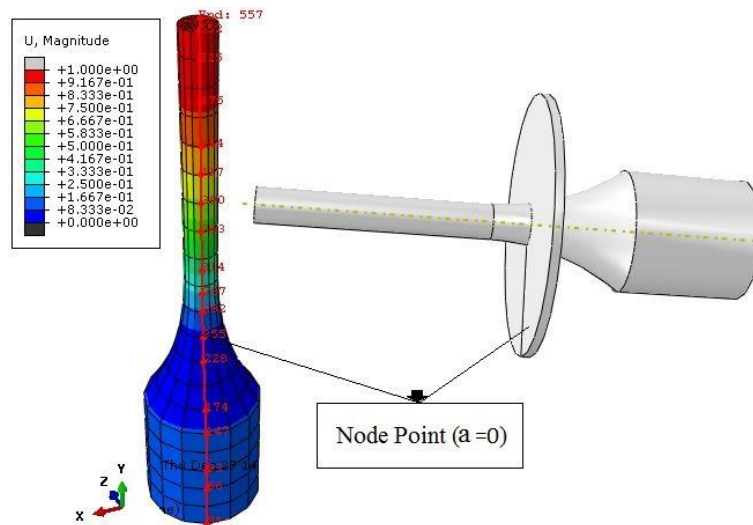
عوامل آزمایش	مقادیر بهینه
نوع متمرکزکننده	CEC
جنس متمرکزکننده	فولاد H13
$D_{max}$	45 mm
$L_1$	30 mm
$L_2$	36 mm
$L_3$	56 mm
$D_{min}$	8 mm

به منظور انتقال ارتعاشات التراسونیک به سطح مورد نظر، طراحی و ساخت متمرکزکننده ارتعاش از اهمیت خاصی برخوردار است. پارامترهای اصلی طراحی متمرکزکننده از سه قسمت (نوع، جنس و ابعاد) تشکیل شده است. با طراحی آزمایش و شبیه‌سازی المان محدود، مقادیر بهینه متمرکزکننده‌ها استخراج گردید. نتایج نشان داد که به منظور انتقال و تمرکز مناسب ارتعاشات التراسونیک در فرایند USSE می‌بایست نوع متمرکزکننده از سه جزء استوانه‌ای-نمایی-استوانه‌ای (CEC)، جنس متمرکزکننده از فولاد H13 و از نظر مقادیر ابعادی به صورت قطر بزرگ ( $D_{max}$ ) ۴۵ میلی‌متر، قطر کوچک ( $D_{min}$ ) ۸ میلی‌متر، طول ناحیه اتصال به مبدل ( $L_1$ ) ۳۰ میلی‌متر، طول ناحیه میانی ( $L_2$ ) ۳۶ میلی‌متر، طول ناحیه ارتعاش ( $L_3$ ) ۵۶ میلی‌متر در نظر گرفته شود.

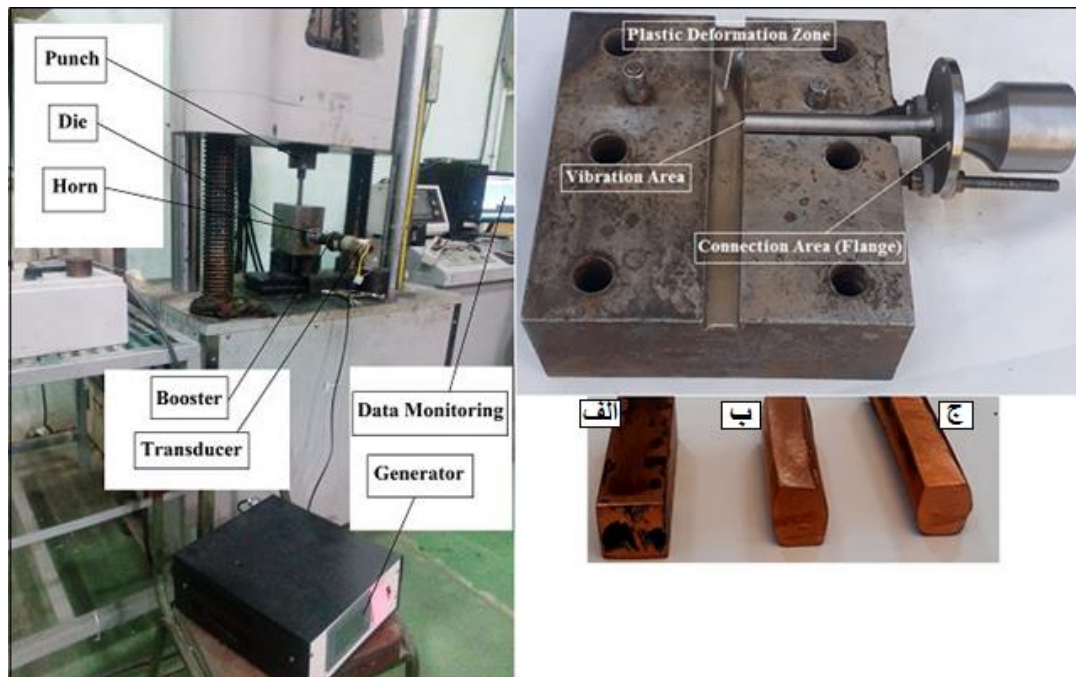
### ۳-۲- صحت‌سنجی تجربی

پس از به دست آوردن مقادیر بهینه متمرکزکننده مرتعش (نوع متمرکزکننده به صورت استوانه‌ای-نمایی-استوانه‌ای (CEC)، جنس متمرکزکننده از فولاد H13، قطر بزرگ ( $D_{max}$ ) ۴۵ میلی‌متر، قطر کوچک ( $D_{min}$ ) ۸ میلی‌متر، طول ناحیه اتصال به مبدل ( $L_1$ ) ۳۰

میلی‌متر، طول ناحیه میانی ( $L_2$ ) ۳۶ میلی‌متر، طول ناحیه ارتعاش ( $L_3$ ) ۵۶ میلی‌متر) توسط روش طراحی آزمایش تاگوچی و شبیه‌سازی اجزای محدود، متمرکزکننده برای اتصال به قالب USSE ساخته شد. اتصال مستقیم متمرکزکننده به قالب اکستروژن برشی ساده مشکلاتی را از قبیل عدم انتقال و تمرکز ارتعاشات فراصوت در محدوده فرکانس تشدید مبدل (۲۰ کیلوهرتز) به وجود می‌آورد. از این رو یک ناحیه از متمرکزکننده فراصوت که دامنه ارتعاشی در آن صفر است، مطابق شکل ۶ به عنوان منطقه گره مشخص شد. با توجه به تحلیل مودال، در ناحیه گره متمرکزکننده ( $a=0$ ) یک پله توسط دستگاه تراش به‌عنوان منطقه فلنج<sup>۱</sup> به وجود آمد که متمرکزکننده به واسطه آن با لقی ۰/۲ میلی‌متر به قالب متصل شد. در روش اکستروژن برشی ساده با اعمال ارتعاشات فراصوت، نمونه‌های مسی آنیل شده با ابعاد  $14 \times 14 \times 60$  (میلی‌متر مکعب) پس از عبور از کانال قالب به سطح مرتعش متمرکزکننده برخورد کرده و هم‌زمان از ناحیه تغییر شکل پلاستیک قالب عبور داده می‌شوند. در شکل ۷ مراحل اکستروژن نمونه‌ها در قالب اکستروژن برشی ساده به همراه متمرکزکننده ارتعاش و نمونه‌های تولید شده نشان داده شده است.



شکل ۶ تصویر متمرکزکننده سه‌جزئی CEC تحلیل مودال شده و ناحیه فلنج

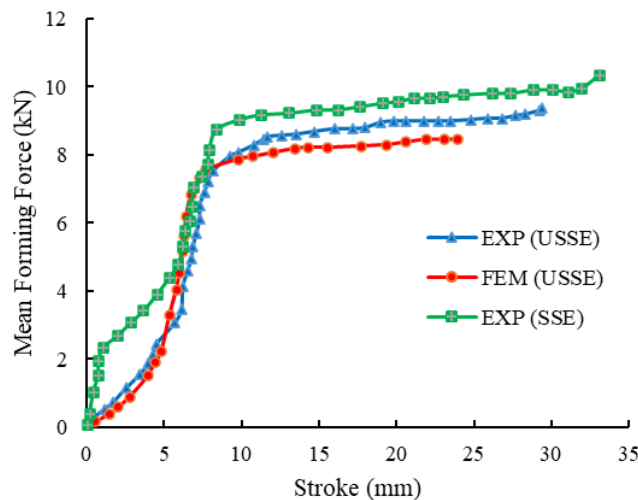


شکل ۷ مراحل اکستروژن قالب اکستروژن برشی ساده با اعمال ارتعاشات فراصوت و نمونه‌های الف) آنیل شده، ب) SSE و ج) USSE

<sup>1</sup> Flange

#### ۴- نیروی شکل‌دهی در فرایندهای USSE و SSE

اعمال نیروی شکل‌دهی با دستگاه پرس ۱۰۰ تنی با سرعت سنبه ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه صورت پذیرفت. در شکل ۸، نیروی شکل‌دهی تجربی در روش اکستروژن برشی ساده SSE و روش اکستروژن برشی ساده با اعمال ارتعاشات فراصوت USSE با یکدیگر مقایسه گردیده است. همچنین نیروهای شکل‌دهی حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی در فرایند اکستروژن برشی ساده به کمک ارتعاشات التراسونیک، به ترتیب به صورت EXP (USSE) و FEM (USSE) ارائه شده‌اند. مقایسه مقادیر نیروی شکل‌دهی در حالت تجربی و شبیه‌سازی فرایند USSE، مقدار خطای ۹٪ را گزارش داد که تطابق قابل قبول فرایند USSE را تایید می‌کند. با توجه به مقادیر حداکثر نیروی شکل‌دهی تجربی در دو حالت بدون حضور ارتعاشات فراصوت EXP (SSE) و همراه ارتعاشات فراصوت USSE می‌توان نتیجه گرفت که نیروی شکل‌دهی تحت تاثیر ارتعاشات فراصوت، به میزان ۱۱٪ کاهش پیدا کرده است. کاهش نیروی شکل‌دهی در روش USSE به دلیل تماس ارتعاشات فراصوت با نمونه مسی و کم شدن ضریب اصطکاک بین قطعه کار و کانال قالب اکستروژن برشی ساده (منطقه تغییر شکل پلاستیک) می‌باشد. همچنین نرم‌شوندگی صوتی و کاهش تنش‌های اصطکاکی در اثر به کار بردن ارتعاشات فراصوت از دیگر دلایل این امر است. دلیل دیگر کاهش نیروی شکل‌دهی در فرایند USSE را می‌توان به جذب انرژی ناجایی‌ها نیز نسبت داد [۲۹-۳۱]. لذا می‌توان فرض کرد که با استفاده از فرایند USSE می‌توان نمونه‌هایی با استحکام بالا همچون تیتانیوم و منیزیم را نیز بدلیل کاهش چشم‌گیر نیروی شکل‌دهی اکستروژن نمود. بررسی و اثبات این فرضیه در تحقیقات بعدی مد نظر است.



شکل ۸ نتایج نیروی شکل‌دهی تجربی و شبیه‌سازی در فرایندهای USSE و SSE

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عوامل موثر بر عملکرد متمرکزکننده‌های فراصوت شامل نوع، جنس و ابعاد در فرایند اکستروژن برشی ساده مورد بررسی قرار گرفت که منجر به پیشنهاد روش جدیدی با نام "اکستروژن برشی ساده به کمک ارتعاشات فراصوت" (USSE) گردید. در فرایند USSE تمامی مراحل شبیه‌سازی و تجربی به صورت مجزا انجام پذیرفت؛ بدین صورت که ابتدا بازه مقادیر عوامل ورودی شناسایی و سپس آزمایش‌ها با طراحی آزمایش به روش تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تب طراحی شد. مقادیر پاسخ خروجی (نیروی شکل‌دهی) با استفاده از تحلیل مودال در شبیه‌سازی به روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس به دست آمد. نتایج سطوح بهینه متمرکزکننده با هدف کمینه کردن نیروی شکل‌دهی در فرایند اکستروژن برشی ساده استخراج گردید. همچنین متمرکزکننده ارتعاشات فراصوت با توجه به مقادیر بهینه ساخته شد و به صورت تجربی در روش اکستروژن برشی ساده به کمک ارتعاشات فراصوت به کار گرفته شد که نتایج آن به شرح زیر ارائه می‌شود:

- نوع متمرکزکننده سه‌جزئی استوانه‌ای-نمایی-استوانه‌ای (CEC) کارایی قابل قبولی در فرایند اکستروژن برشی ساده دارد. نتایج تحلیل مودال، افزایش بازدهی انتقال ارتعاشات فراصوت در متمرکزکننده CEC را با مقادیر ۷۹٪ و ۸۳٪ نسبت به دو متمرکزکننده استوانه‌ای-مخروطی-استوانه‌ای (CCC2) و استوانه‌ای-پله‌ای-استوانه‌ای (CCC1) نشان داد.

- جنس متمرکزکننده با فولاد H13 تاثیر خوبی در انتقال، تمرکز و جلوگیری از اتلاف انرژی ارتعاشات در روش اکستروژن برشی به کمک ارتعاشات التراسونیک (USSE) دارد. همچنین، مقادیر بهینه استخراج شده از نمودار S/N، نشان‌دهنده آن است که فولاد H13 بازدهی ۷۸ و ۸۰ درصدی نسبت به دو متمرکزکننده فولادی VCN و SPK دارد.
- در ابعاد متمرکزکننده ارتعاشات فراصوت، بیشترین تاثیر در انتقال ارتعاشات و افزایش فرکانس تشدید حالت طولی را قطر کوچک و طول ناحیه ارتعاش دارند. کم و زیاد کردن مقادیر ابعادی  $D_{min}$  و  $L_3$  موجب تغییرات قابل توجهی در مقدار فرکانس تشدید می‌شود. در مقادیر بهینه قطر کوچک، اندازه ابعادی ۸ میلی‌متر با بازدهی ۷۸٪ و ۷۷٪ نسبت به دو قطر ۱۱ و ۱۳ میلی‌متر گزارش داده شد.
- مقادیر بهینه به منظور کاهش نیروی شکل‌دهی به صورت زیر انتخاب گردید: (نوع متمرکزکننده به صورت استوانه‌ای-نمایی- استوانه‌ای (GEC)، جنس متمرکزکننده از فولاد H13، قطر بزرگ ( $D_{max}$ ) ۴۵ میلی‌متر، قطر کوچک ( $D_{min}$ ) ۸ میلی‌متر، طول ناحیه اتصال به مبدل ( $L_1$ ) ۳۰ میلی‌متر، طول ناحیه میانی ( $L_2$ ) ۳۶ میلی‌متر، طول ناحیه ارتعاش ( $L_3$ ) ۵۶ میلی‌متر)
- روش USSE در حالت تجربی و با توجه به مقادیر بهینه، نیروی شکل‌دهی را به میزان ۱۱٪ نسبت به روش تجربی SSE کاهش داد.

## References

- [1] Eslami AH, Balali M, Seyedkashi SM. Study and comparison of simple shear extrusion and accumulative roll bonding processes in improving the mechanical and structural properties of copper. *Metallurgical Engineering*. 2018 Jun 22;21(2):118-28. doi: 10.22076/ME.2018.82259.1174 [In Persian]
- [2] Bohluli H, Khalili K, Seyedkashi SM. An investigation on twist extrusion followed by forward extrusion in production of aluminum-copper bimetallic bar. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021 May 1;33:52-62. doi: 10.1016/j.cirpj.2021.02.010
- [3] Shalchi E, Jafarzadeh H, Hashemi G. Numerical and experimented study of UFG pure copper with high strength processed by Accumulative compound extrusion (ACE). *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 May 21;7(3):42-51. [In Persian]
- [4] Akbarzadeh B, Gorji H, Bakhshi M, Jamaati R, Mirnia MJ. Development of a new process for the severe plastic deformation of AA 1050 to improve the mechanical properties. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jun 21;7(4):19-29. [In Persian]
- [5] Eftekhari M, Faraji G, Bahrami M, Baniassadi M. Effects of hydrostatic tube cyclic extrusion compression process on the properties of 5052 aluminum alloy. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Nov 6;8(8):38-51. [In Persian]
- [6] Sato YS, Urata M, Kokawa H, Ikeda K. Hall-Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2003 Aug 15;354(1-2):298-305. doi: 10.22076/ME.2018.82259.1174
- [7] Najafzadeh M, Zhang D, Maldar A, Bozorg M, Liang J. Microstructure and mechanical properties of a high-strength Ti-4Al-2Fe-3Cu alloy fabricated by sintering and hot extrusion. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2022 Jun;53(6):1955-68. doi: 10.1007/s11661-022-06668-4
- [8] Zhou X, Xiao S, Li M, Wang Y, Lu X, Chen Z, Guo Z, Xiao H, Guo J. Effect of rotational-die ECAP parameters on microstructure and mechanical properties of Mg97Y2Zn alloys. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024 Mar 1;29:3832-41. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.02.109
- [9] Pardis N, Ebrahimi R. Deformation behavior in Simple Shear Extrusion (SSE) as a new severe plastic deformation technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2009 Dec 15;527(1-2):355-60. doi: 10.1016/j.msea.2009.08.051
- [10] Bagherpour E, Qods F, Ebrahimi R, Miyamoto H. Nanostructured pure copper fabricated by simple shear extrusion (SSE): A correlation between microstructure and tensile properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 Jan 2;679:465-75. doi: 10.1016/j.msea.2016.10.068
- [11] Tork NB, Pardis N, Ebrahimi R. Investigation on the feasibility of room temperature plastic deformation of pure magnesium by simple shear extrusion process. *Materials Science and Engineering: A*. 2013 Jan 10;560:34-9. doi: 10.1016/j.msea.2012.08.085
- [12] Sabbaghian M, Mahmudi R, Shin KS. A comparative study on the microstructural features and mechanical properties of an Mg-Zn alloy processed by ECAP and SSE. *Materials Science and Engineering: A*. 2022 Jun 15;845:143218. doi: 10.1016/j.msea.2022.143218
- [13] Bagherpour E, Ebrahimi R, Qods F. An analytical approach for simple shear extrusion process with a linear die profile. *Materials & Design*. 2015 Oct 15;83:368-76. doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.023

- [14] Balali M, Beynaghi M, Khosravi M. Investigation of simple shear extrusion steel mold and mechanical properties of nanostructured extruded samples of Al6061. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*. 2021 Mar 21;18(1):106-12. doi: 10.22034/IJSSSI.2021.540568.1211
- [15] Rezaei A, Mahmudi R, Logé RE. Microstructural and hardness homogeneity in an Mg-Gd- Y-Ag alloy processed by simple shear extrusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2023 Jun 15;876:145159. doi: 10.1016/j.msea.2023.145159
- [16] Balali M, Limouei MB, Balali M. Study on optimization of parameters affecting simple shear extrusion of pure copper to fabricate fine grain structure. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018 Mar;71(3):605-16. doi: 10.1007/s12666-017-1193-8
- [17] Ahmadi F, Farzin M, Meratian M, Loeian SM, Forouzan MR. Improvement of ECAP process by imposing ultrasonic vibrations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015 Jul;79:503-12. doi: 10.1007/s00170-015-6848-1
- [18] Lucas M, Daud Y. A finite element model of ultrasonic extrusion. In *Journal of Physics: Conference Series* 2009 Aug 1 (Vol. 181, No. 1, p. 012027). IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/181/1/012027
- [19] Seiner H, Bodnárová L, Sedlák P, Janeček M, Srba O, Král R, Landa M. Application of ultrasonic methods to determine elastic anisotropy of polycrystalline copper processed by equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*. 2010 Jan 1;58(1):235-47. doi: 10.1016/j.actamat.2009.08.071
- [20] Chahare AS, Inamdar KH. Optimization of Aluminium extrusion process using Taguchi method. *IOSR J. Mech. Civ. Eng.* 2017 Mar;17(01):61-5. doi: 10.9790/1684-17010016165
- [21] Amin SG, Ahmed MH, Youssef HA. Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995 Dec 1;55(3-4):254-60. doi: 10.1016/0924-0136(95)02015-2
- [22] Guiman MV, Roşca IC. A new approach on vibrating horns design. *Shock and Vibration*. 2017;2017(1):8532021. doi: 10.1155/2017/8532021
- [23] Naseri R, Koohkan K, Ebrahimi M, Djavanroodi F, Ahmadian H. Horn design for ultrasonic vibration-aided equal channel angular pressing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017 May;90:1727-34. doi: 10.1007/s00170-016-9517-0
- [24] Zhao J, Su H, Wu C. The effect of ultrasonic vibration on stress-strain relations during compression tests of aluminum alloys. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020 Nov 1;9(6):14895-906. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.10.094
- [25] Abdullah A, Shahini M, Pak A. An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer. *Journal of Electroceramics*. 2009 Jun;22:369-82. doi: 10.1007/s10832-007-9408-8
- [26] Frederick JR, *Ultrasonic engineering*. London: Wiley, 1965. doi: 10.1088/0031-9112/17/5/012
- [27] Ebrahimi R, Najafizadeh A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004 Oct 20;152(2):136-43. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.03.029
- [28] Bay N. Friction stress and normal stress in bulk metal-forming processes. *Journal of mechanical working Technology*. 1987 Mar 1;14(2):203-23. doi: 10.1016/0378-3804(87)90061-1
- [29] García-Infanta JM, Swaminathan S, Carreño F, Ruano OA, McNelley TR. Grain shape and microstructural evolution during equal channel angular pressing. *Scripta Materialia*. 2008 Jan 1;58(1):17-20. doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.09.007
- [30] Rusinko A. Analytical description of ultrasonic hardening and softening. *Ultrasonics*. 2011 Aug 1;51(6):709-14. doi: 10.1016/j.ultras.2011.02.003
- [31] Bagherzadeh S, Abrinia K, Han Q. Analysis of plastic deformation behavior of ultrafine-grained aluminum processed by the newly developed ultrasonic vibration enhanced ECAP: Simulation and experiments. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Feb 1;50:485-97. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.01.010