



تحلیل المان محدود اثر ارتعاشات محوری بر فرایند آهنگری فلزات

مهدي جعفري وردنجاني*، يعقوب دادگر اصل

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m-jafari@nus.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۴

پذیرش: ۳۱ مرداد ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

شکل‌دهی به کمک ارتعاشات

ویسکوپلاستیسیته

تحلیل المان محدود

روابط تئوری

شکل‌دهی به کمک ارتعاشات به عنوان یکی از روش‌های نوین در صنعت فلزات، با اعمال ارتعاشات مکانیکی در حین فرایند شکل‌دهی، امکان کاهش نیروی مورد نیاز و بهبود کیفیت محصول نهایی را فراهم می‌سازد. این تکنیک بر دو مکانیسم اصلی استوار است: نخست اثر حجمی که منجر به کاهش تنش تسلیم ماده از طریق تأثیر بر حرکت نابجایی‌ها و کاهش چگالی نقص‌های بلوره‌ای می‌گردد، و دوم اثر سطحی که با ایجاد کاهش دوره‌ای در تماس سطوح، ضریب اصطکاک مؤثر را کاهش می‌دهد. در این مطالعه، با استفاده از روش تحلیلی قاچی و انجام شبیه‌سازی‌های المان محدود، تأثیر دو نوع موج ارتعاشی سینوسی و مثلثی محوری بر فرایند آهنگری در شرایط ویسکوپلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که موج مثلثی در مقایسه با موج سینوسی، کاهش بیشتری در نیروی شکل‌دهی ایجاد می‌نماید. همچنین مشخص گردید که نسبت سرعت ارتعاش به سرعت قالب نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان کاهش نیروی شکل‌دهی ایفا می‌کند. افزایش دامنه از ۱۲ به ۲۴ میکرومتر، نیروی آهنگری را ۱۸٪ کاهش داد، در حالی که افزایش فرکانس از ۴۰ به ۸۰ هرتز کاهش ۷٪ را به همراه داشت. نتایج با خطای کمتر از ۱/۲٪ نسبت به داده‌های تجربی، دقت مدل را در محدوده استانداردهای مهندسی تأیید می‌کند. این یافته‌ها می‌توانند مبنای مناسبی برای بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی شکل‌دهی فلزات با استفاده از تکنیک ارتعاش باشد.

Finite element analysis of the axial vibration effect on forging process

Mehdi Jafari Vardanjani*, Yaghoob Dadgar Asl

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: m-jafari@nus.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 12 May 2025

Accepted: 22 August 2025

Keywords:

Vibrational Forming

Visco-Plasticity

Finite Element Analysis

Theoretical Equations

Abstract

Vibration-assisted forming has emerged as an innovative technique in metalworking industries, where applied mechanical vibrations during forming processes significantly reduce required forces while improving product quality. This method operates through two fundamental mechanisms: firstly, the bulk effect, which lowers yield stress by influencing dislocation movement and reducing crystalline defect density; secondly, the surface effect that diminishes the effective friction coefficient through periodic contact reduction between surfaces. In this study, the Slice analytical method has been employed through finite element simulations to examine how sinusoidal versus triangular waveform vibrations affect viscoplastic forming conditions. The results demonstrate that triangular waveforms provide superior force reduction compared to sinusoidal vibrations. Furthermore, the vibration-to-die speed ratio was identified as a critical parameter determining the magnitude of forming force reduction. Increasing the amplitude from 12 to 24 μm reduced the forging force by 18%, while raising the frequency from 40 to 80 Hz resulted in a 7% decrease. The results, with less than 1.2% error compared to experimental data, confirm the model's accuracy within accepted engineering standards. These findings have established a robust foundation for optimizing industrial metal forming processes through vibration implementation, potentially revolutionizing energy-efficient manufacturing approaches.

Please cite this article using:

Jafari Vardanjani M, Dadgar Asl Y. Finite element analysis of the axial vibration effect on forging process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jul 23;12(5):37-46. doi: 10.22034/ijme.2025.522512.2079 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

کاربرد ارتعاش در فرایندهای شکل‌دهی فلزات در دهه‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نخستین مطالعه نظام‌مند در این زمینه در سال ۱۹۵۳ میلادی انجام شد [۱] که مبنایی برای تحقیقات بعدی گردید. از آن زمان تاکنون، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تأثیر ارتعاش بر شکل‌دهی پلاستیک مواد صورت پذیرفته است. بررسی پیشینه تحقیقات نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات انجام شده بر روی سه فرایند اصلی متمرکز بوده‌اند: آهنگری به کمک ارتعاش، اکستروژن ارتعاشی [۲] و کشش سیم با اعمال ارتعاش. در مطالعات مربوط به اکستروژن ارتعاشی مشخص گردید که در صورت پایین نگه داشتن سرعت اکستروژن از حد بحرانی مشخص، اعمال ارتعاشات فراصوت می‌تواند منجر به کاهش نیروی اکستروژن و تنش جریان ماده شود. همچنین نتایج نشان داد که نیروی اکستروژن متوسط را می‌توان از طریق کاهش سرعت اکستروژن یا افزایش دامنه ارتعاش، به میزان قابل‌توجهی کاهش داد [۲].

مطالعات تجربی [۳-۵] نشان داده‌اند که اعمال ارتعاشات فراصوت بر قالب‌های کشش لوله و سیم موجب کاهش قابل توجه نیروهای شکل‌دهی می‌شود. این تکنیک علاوه بر کاهش تنش جریان ماده و اصطکاک بین قالب و قطعه کار، منجر به بهبود کیفیت سطح محصول و افزایش دقت ابعادی فرایند می‌گردد. بر اساس این پژوهش‌های انجام شده میزان اثربخشی این روش به پارامترهای متعددی از جمله سرعت فرایند، نوع عملیات شکل‌دهی، ویژگی‌های روان کار مورد استفاده، حالت ارتعاش اعمال شده و خواص ماده اولیه بستگی دارد. نتایج حاکی از آن است که بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند سودمندی فرایند را به طور معناداری افزایش دهد [۳].

مطالعات تجربی بر روی تأثیر ارتعاشات فراصوت بر رفتار خمیر مدل (پلاستیسین) در آزمایش‌های فشرده‌سازی نتایج قابل تکرار و پایداری را نشان داده است [۶]. در این پژوهش‌ها، ارتعاشات فراصوت به صورت بار استاتیکی اعمال گردید که در آن دامنه ارتعاش در ۱۰ میکرومتر و فرکانس در ۲۰ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شد. نتایج حاکی از کاهش فوری و قابل‌ملاحظه بار شکل‌دهی در اثر اعمال نوسانات فراصوت بود. اگرچه بیشتر تحقیقات در محدوده فرکانس‌های فراصوت متمرکز بوده‌اند، اما کاربردهای صنعتی این تکنیک به دلیل محدودیت‌های توان ژنراتورهای فراصوت، عموماً به فرکانس‌های پایین‌تر محدود شده است. مطالعات نشان می‌دهد آهنگری با اعمال هم‌زمان بار ارتعاشی در محدوده فرکانسی ۱۰-۴۰ هرتز می‌تواند تا ۵۰ درصد افزایش در تغییر شکل و کاهش متناظر در فشار خاص را موجب شود. همچنین این روش موجب کاهش تمایل قطعه به شکل‌گیری بشکه‌ای و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها و کرنش‌ها می‌گردد.

موسوی و همکاران [۷] به بررسی تأثیر ارتعاشات فراصوت بر فرایند اکستروژن پرداختند که تاکنون کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از تحلیل المان محدود، نشان داده شده است که ارتعاشات فراصوت در سرعت‌های پایین‌تر از حد بحرانی، نیروی اکستروژن و تنش جریان ماده را کاهش داده‌اند. همچنین، تغییر محسوسی در کرنش پلاستیک ماده ایجاد نشده است، اما کاهش سرعت اکستروژن یا افزایش دامنه ارتعاشات، کاهش بیشتری در نیروی اکستروژن داشته است. این یافته‌ها برای بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی مفید بوده‌اند.

در روش کشش سیم با ارتعاشات فراصوت [۸]، ارتعاشات به قالب کشش اعمال شده است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این روش مقاومت کشش را کاهش داده، روان کاری را بهبود بخشیده و از پارگی سیم جلوگیری کرده است. برای درک بهتر مکانیسم این بهبودها، از روش المان محدود با نرم‌افزار آباکوس استفاده شده و نیروی کشش و توزیع تنش-کرنش تحلیل شده است. نتایج این پژوهش مکانیسم کاهش نیروی کشش و سایر ویژگی‌های بهبودیافته را به صورت کمی تبیین کرده است.

در فرایند کشش سیم و لوله، اعمال ارتعاشات فراصوت به قالب‌ها موجب کاهش نیروهای کشش شده است [۹]. مطالعات نشان داده‌اند که این روش نه تنها اصطکاک بین قطعه کار و قالب را کاهش داده، بلکه محدودیت‌های فرایند شکل‌دهی را نیز گسترش داده است. پژوهش‌های انجام شده در دانشگاه اشتونگارت آلمان ثابت کرده‌اند که اثر ارتعاشات بر اصطکاک سطحی (اثر بردار اصطکاک لغزشی) از تأثیرات حجمی قابل تفکیک است. نتایج آزمایش‌ها بر روی مس و آلیاژهای تیتانیوم نشان داده است که این روش کیفیت سطح محصولات را بهبود بخشیده و بهره‌وری را افزایش داده است.

در مطالعات دیگر [۱۰، ۱۱] تأثیر ارتعاشات فراصوت بر شرایط مرزی در فرایند شکل‌دهی مواد نرم (با استفاده از پلاستیسین به عنوان مدل) مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل المان محدود و آزمایش‌های فشرده‌سازی استوانه‌ای بین دو قالب صلب با بارگذاری

ارتعاشی انجام شده‌اند که کاهش قابل توجه تنش لازم برای حفظ جریان پلاستیک تحت ارتعاشات را نشان داده‌اند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای نیروی شکل‌دهی و الگوی جریان توافق نزدیکی را نشان داده است. این مطالعه ثابت کرده است که مدل‌سازی دقیق شرایط مرزی و استفاده از ارتعاشات می‌تواند به بهینه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی مواد داغ و نرم کمک کند.

در مطالعه دیگر [۱۲]، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با کمک ارتعاشات فراصوت در اتصال ناهمسان Al/Ti منجر به کاهش سایش ابزار، بهبود جریان ماده و کاهش دمای اوج فرایند شد. ارتعاشات اولتراسونیک همچنین ریزدانه‌های ریزتر، ناحیه اختلاط گسترده‌تر و افزایش استحکام جوش تا دو برابر را به همراه داشت. شکست نمونه‌ها از فصل مشترک آغاز شده و با ویژگیهای ترکیبی حفره‌های برشی و سطوح شکست ترد همراه بود.

همچنین مطالعه انجام شده توسط لیانگ و همکاران [۱۳] تأثیر ارتعاشات مکانیکی را بر ریزساختار و رفتار خستگی حرارتی فولاد ریخته‌گری شده قالب کار گرم بررسی کرد. نتایج نشان داد که اعمال ارتعاشات باعث کاهش ۵۲ درصدی اندازه دانه‌ها در آلیاژ پایه و کاهش ۷۶ درصدی در آلیاژ اصلاح شده شد. همچنین، ارتعاشات منجر به شکستن دندریت‌ها و تشکیل ریزساختار دانه‌های هم‌محور کوچک شد. در شرایط کار متناوب گرم و سرد، آسیب به ماده قالب ناشی از خستگی حرارتی چرخه پایین غیر هم دما بود که ارتعاشات مکانیکی با بهبود ریزساختار، مقاومت به این آسیب را افزایش داد.

در یک مطالعه دیگر [۱۴] دو فرایند پیشرفته تولیدی می‌پردازد. در بخش اول، تأثیر ارتعاشات فراصوت بر فرایند مته‌کاری اصطکاکی مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج نشان می‌دهد اعمال این ارتعاشات با شدت ۹۶ وات بر سانتیمتر مربع موجب افزایش ۱۳ درصدی سختی میکرو و بهبود ۵۷ درصدی مقاومت به خوردگی در فولاد St37 شده است، همچنین باعث کاهش اندازه دانه‌ها و حفره‌های سطحی می‌گردد. در پژوهش دیگر [۱۵]، فرایند تنش‌زدایی ارتعاشی بر روی اتصال جوش T شکل با استفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده است که مشخص گردید اعمال ارتعاش با ۹۵ درصد فرکانس طبیعی نمونه و ۲۰ درصد نیروی تسلیم می‌تواند تنش‌های پسماند طولی و عرضی را به ترتیب تا ۵۵ و ۷۰ درصد کاهش دهد. نتایج حاصل از هر دو بخش پژوهش نشانگر دقت قابل قبول مدل‌های عددی با اختلاف حداکثر ۱۷ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی است. این مطالعه به خوبی نشان می‌دهد که چگونه به‌کارگیری فناوری ارتعاشات می‌تواند منجر به بهبود کیفیت سطح و خواص مکانیکی در فرایندهای مته‌کاری و همچنین کاهش مؤثر تنش‌های پسماند در اتصالات جوشی شود [۱۶]. یافته‌های این تحقیق گامی مهم در جهت بهینه‌سازی فرایندهای تولیدی محسوب می‌شود.

در این پژوهش، ابتدا مدل‌های تحلیلی برای فرایند آهنگری به کمک ارتعاش توسعه داده شد. این مدل‌ها بر اساس روش قاچی^۱ طراحی گردیدند تا میزان کاهش نیروی آهنگری را برای دو شکل موج ارتعاشی سینوسی و مثلثی محاسبه کنند. در مرحله بعد، شبیه‌سازی‌های اجزای محدود (FEM) برای تحلیل فرایند آهنگری ارتعاشی انجام گرفت و نتایج آن ارزیابی شد. همچنین مقایسه تجربی با مطالعات قبلی در این زمینه صورت پذیرفت که نشان دهنده تطابق مناسب مدل‌های ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی بود. در نهایت، مطالعه پارامترهای الاستو-ویسکوپلاستیک در فرایندهای آهنگری و اکستروژن به کمک ارتعاش انجام شد و تأثیر پارامترهای ارتعاشی بر رفتار مواد مورد تحلیل قرار گرفت.

۲- روش کار

در این بخش روش‌های تئوری و تحلیل عددی مورد استفاده به تفکیک مورد اشاره قرار گرفته است.

۲-۱- تحلیل تئوری: روش برش لایه‌ای

در این پژوهش، از روش کلاسیک برش لایه‌ای^۲ به منظور پیش‌بینی نیروی مورد نیاز در فرایند آهنگری استفاده شده است. این روش تحلیلی قابلیت اعمال بر هر دو حالت آهنگری معمولی و آهنگری با اعمال ارتعاش را دارا است. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به سادگی پیاده‌سازی و کاربری آسان آن اشاره نمود. با این وجود، این روش قادر به مدل‌سازی اثرات اصطکاک بین قطعه کار و سطح قالب نیز است. فرضیات زیر در این تحلیل لحاظ شده است:

¹ Slice Method

² Slice/Slab

• فرضیات هندسی

- هندسه قطعه کار در طول فرایند تغییر نمی‌کند.
- اشکال استوانه‌ای همواره به صورت استوانه کامل باقی می‌مانند.
- سطوح موازی، موازی باقی می‌مانند و تغییر زاویه ندارند.

• فرضیات حرارتی

- اثرات حرارتی و تغییرات دمایی در نظر گرفته نمی‌شود.
- تبادل حرارت بین قطعه کار و قالب محاسبه نمی‌گردد.
- خواص ماده مستقل از دما در نظر گرفته می‌شود.

• محدوده کاربردی روش

- روش تنها برای مواد ویسکوپلاستیک قابل اعمال است.
- برای مواد الاستیک یا الاستوپلاستیک مناسب نیست.
- محدود به ناحیه تغییر شکل پلاستیک بزرگ است.

نیروی آهنگری مورد نیاز برای کاهش ارتفاع قطعه کار استوانه‌ای با استفاده از روش تحلیلی برش به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌گردد [۱۷]:

$$F = \frac{\pi D^2 \sigma_0}{2A} \left[\frac{1}{A} (e^A - 1) - 1 \right] \quad (1)$$

نیروی آهنگری مورد نیاز برای کاهش ارتفاع قطعه کار استوانه‌ای با استفاده از روش تحلیلی برش و با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش و تغییرات ارتفاع محاسبه شده است (رابطه ۲). با تعریف $A = \bar{m} \cdot \frac{D}{h}$ که در آن \bar{m} ضریب اصطکاک ترسکا D قطر قطعه کار و h ارتفاع آن است، و با استفاده از قانون نورتون-هوف برای تنش جریان ($\sigma_0 = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$) که K ضریب سازگاری ماده، ε کرنش واقعی، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش، و n و m ضرایب ماده می‌باشند، نیروی آهنگری به صورت تابعی از ارتفاع $\Phi(h(t))$ که با زمان تغییر می‌کند، به صورت زیر بیان گردیده است. رابطه ۲ با در نظر گرفتن تغییرات هندسی قطعه کار با فرض حجم ثابت $D(t) = D^0 \cdot \sqrt{h_0/h(t)}$ و حل معادله دیفرانسیل حاکم بر سیستم، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار دینامیکی فرایند را فراهم می‌آورد. این روش تحلیلی با وجود سادگی نسبی، دقت قابل قبولی برای برآورد نیروی آهنگری در شرایط مختلف عملیاتی ارائه می‌دهد و مبنای مناسبی برای طراحی و بهینه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی فلزات محسوب می‌شود:

$$F = \Phi(h(t)) \varepsilon^n(t) \dot{\varepsilon}^m(t) \quad (2)$$

تغییرات ارتفاع قطعه کار استوانه‌ای تحت فرایند آهنگری ارتعاشی به صورت دینامیکی مدل‌سازی شده است. با تعریف تابع ارتفاع $h(t) = h_1 + v_0 t + v_1(t)$ و مشتق زمانی آن $\dot{h}(t) = v_0 + \dot{v}_1(t)$ (که در آن h_0 ارتفاع اولیه، v_0 سرعت متوسط قالب و $v_1(t)$ مؤلفه ارتعاشی سرعت است) روابط کامل تغییر شکل ارائه گردیده است (رابطه ۳):

$$\varepsilon(t) = \frac{h_0}{h(t)} - 1 \quad (3)$$

برای نرخ تغییر شکل، به صورت رابطه ۴ وجود دارد:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{h_0 \dot{h}(t)}{h^2(t)} \quad (4)$$

در حالت عدم وجود ارتعاش $v_1 = 0$ نیروی آهنگری نهایی از رابطه ۲ به صورت ساده‌شده رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$F_0 = \Phi(h(t)) \left[\frac{h_0}{h(t)} - 1 \right]^n \left[-\frac{h_0 v_0}{h^2(t)} \right]^m \quad (5)$$

۲-۱-۱-۱-۱-۱ ارتعاشات سینوسی

اگر ارتعاشات سینوسی اعمال شود، $v_1(t) = v_1 \cdot \cos(2ft\pi)$ با دامنه $a = \frac{v_1}{2f\pi}$ و سرعت زاویه‌ای $\omega = 2f\pi$ که در آن f فرکانس بر حسب Hz است. برای ارتعاشات سینوسی، نیروی آهنگری را می‌توان به صورت رابطه ۶ به دست آورد:

$$F_S = \Phi(h(t)) \left[\frac{h_0}{h(t)} - 1 \right]^n \left[-\frac{h_0(v_0 + v_1 \cos(2\pi ft))}{h^2(t)} \right]^m \quad (6)$$

فرض بر این است که تابع $\Phi(h(t))$ به ارتعاش سینوسی وابسته است. سپس نسبت $G = \frac{F_S}{F_0}$ به صورت رابطه ۷ قابل محاسبه است:

$$G(t) = \left[\frac{v_0 + v_1 \cos(2\pi ft)}{v_0} \right]^m = [1 + R \cos(\omega t)]^m \quad (7)$$

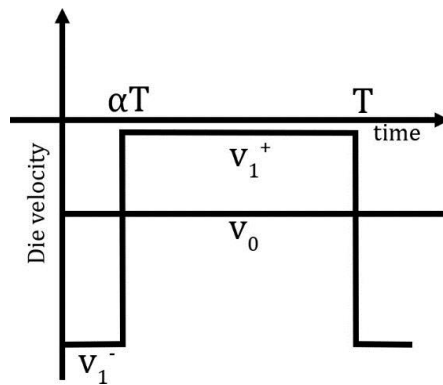
رابطه ۷ کاهش نیروی آهنگری با $R = \frac{v_1}{v_0}$ که نسبت سرعت است. در یک مورد خاص از $R = 1$ راه حل نهایی به صورت رابطه ۸ به دست آمده است:

$$\bar{G} = -\frac{2^m \Gamma(m + 0.5)}{\sqrt{\pi} \Gamma(m + 1)} \quad (8)$$

رابطه ۸ نشان می‌دهد که افزایش در کاهش نیروی آهنگری در صورت ثبات نسبت R تنها تابعی از حساسیت نرخ کرنش (m) است.

۲-۱-۲- لرزش مثلثی

می‌توان از موج مثلثی نیز به جای موج سینوسی استفاده نمود. تمام روابط قبلی به دست آمده با تغییرات جزئی برای عبارت سرعت (v_1) به همراه ارتعاش معتبر است. برای موج مثلثی، دو عبارت سرعت v_1^+ و v_1^- به ترتیب به معنای سرعت بالارونده و پائین رونده را می‌توان در شکل ۱ تعریف نمود. در اینجا α سیکل کاری بوده، نماینده زمان افزایش و کاهش است. سرعت متوسط را می‌توان به صورت رابطه ۹ تعریف نمود:



شکل ۱ مشخصات سرعت برای شکل موج مثلثی

$$v_0 = \frac{1}{T} \int_T v(t) dt = \alpha v_1^- + (1 - \alpha) v_1^+ \quad (9)$$

دامنه موج مربعی $A = v_1^+ - v_1^-$ است، سپس v_0 به صورت رابطه ۱۰ خواهد بود:

$$v_0 = \frac{1}{T} \int_T v(t) dt = v_1^- + (1 - \alpha) A \quad (10)$$

با بررسی مورد خاص $v_1^+ = 0$ و سپس $v_1^- = -A$ به شکل رابطه ۱۱ در خواهد آمد:

$$v_0 = \alpha A \quad (11)$$

برای شکل موج مثلثی، بهره کلی در کاهش نیروی آهنگری با رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

$$\bar{G} = \frac{1}{T} \int_0^T (G(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{v_1(t)}{v_0} \right)^m dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} \left(\frac{v_1^+}{v_0} \right)^m dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T \left(\frac{v_1^-}{v_0} \right)^m dt \quad (12)$$

بنابراین رابطه ۱۲ به صورت رابطه ۱۳ به دست خواهد آمد:

$$\bar{G} = \left(\frac{v_1^+}{v_0} \right)^m \alpha + \left(\frac{v_1^-}{v_0} \right)^m (1 - \alpha) \quad (13)$$

با قرار دادن مقدار v_0 از رابطه ۱۱، رابطه ۱۴ به دست می‌آید:

$$\bar{G} = \alpha^{1-m} \quad (14)$$

رابطه ۱۴ نشان می‌دهد که بهره به m وابسته است، به شرطی که نسبت سیکل کاری نگه‌داشته شود.

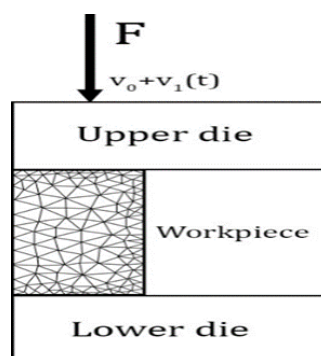
۲-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند آهنگری با ارتعاش

شبیه‌سازی‌های مبتنی بر روش المان محدود به‌منظور تحلیل فرایند آهنگری با اعمال ارتعاش انجام شده است. ارتعاشات موردنظر به صورت برنامه‌نویسی شده در هسته محاسباتی نرم‌افزار پیاده‌سازی شده‌اند. هدف اصلی این شبیه‌سازی اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی ارائه شده است. برای ارزیابی تأثیر فرضیات سینماتیکی در مدل‌سازی، از یک ماده کاملاً ویسکوپلاستیک با دو نوع موج ارتعاشی سینوسی و مثلثی استفاده شده است. پارامترهای نورتون-هاف شامل ثابت قوام ماده (K) و ضریب سخت شدگی (n) ثابت در نظر گرفته شده‌اند، درحالی‌که حساسیت نرخ کرنش (m) در بازه $0/1$ تا $0/9$ برای مقایسه با نتایج مدل تحلیلی تغییر داده شده است. اثرات حرارتی در این شبیه‌سازی‌ها حذف شده، مدل‌سازی اصطکاک با استفاده از مدل ترسکا و ضریب اصطکاک $0/8$ انجام پذیرفته است. جدول ۱ به‌طور خلاصه پارامترهای مورد استفاده در این شبیه‌سازی‌ها را ارائه می‌نماید.

جدول ۱ پارامترهای تعریف شده در مدل شبیه‌سازی

مقدار	پارامتر
$K = 161.9, n = 0.2, 0.1 \leq m \leq 0.9$	پارامترهای جنس قطعه کار
$\bar{m} = 0.8$	ضریب اصطکاک ترسکا
40 mm	قطر قطعه کار
40 mm	ارتفاع اولیه قطعه کار
15 mm	ارتفاع نهایی قطعه کار
متقارن محوری	مدل شبیه‌سازی
غیرقابل تغییر شکل (صلب)	قالب
مثلثی	مش بندی قطعه کار
0.25 ms	مرحله زمانی (با ارتعاش)
25 ms	مرحله زمانی (بدون ارتعاش)

شکل ۲ هندسه مدل تحلیل المان محدود را نشان می‌دهد، که در آن ارتعاش سینوسی یا مثلثی اعمال شده است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، سرعت قالب بالایی (v_0) به مقدار ثابت ۳ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شده است. برای پیاده‌سازی عبارت سرعت (v_1) از کد برنامه‌نویسی استفاده شده است. در مواردی که ارتعاش سینوسی اعمال می‌شود، دامنه نوسان (a) به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که حاصل ضرب آن در فرکانس زاویه‌ای (ω) برابر با سرعت پایه قالب ($v_0 = a \cdot \omega$) باشد. این شرط تضمین می‌کند که دامنه ارتعاشات متناسب با سرعت پایه فرایند حفظ می‌شود.



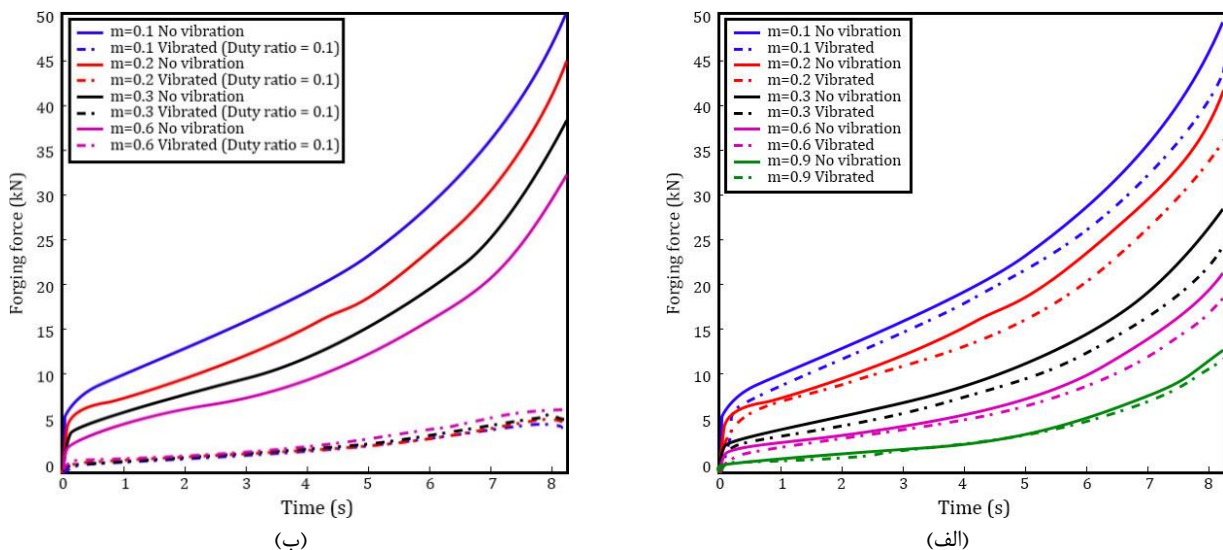
شکل ۲ مدل‌سازی آهنگری برای شبیه‌سازی عملیات کله زنی با اعمال ارتعاش

۳- نتایج و بحث

شکل ۳-الف تغییرات نیروی آهنگری را بر حسب زمان برای حالت‌های با ارتعاش و بدون ارتعاش با مقادیر مختلف ضریب حساسیت نرخ کرنش (m) نشان می‌دهد. در این تحلیل، شکل موج سینوسی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به وضوح کاهش نیروی آهنگری را در اثر اعمال ارتعاشات تأیید می‌کنند. در شکل ۳-ب، مقایسه‌ای بین نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی شده برای هر دو نوع شکل موج مثلثی و سینوسی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی قابل‌توجهی بین مدل تحلیلی و نتایج شبیه‌سازی وجود دارد، به‌ویژه برای شکل موج مثلثی که تطابق عالی را نشان می‌دهد. در مورد شکل موج سینوسی، نتایج شبیه‌سازی حتی بهتر از پیش‌بینی‌های تحلیلی عمل کرده‌اند. لازم به ذکر است که اگرچه در اینجا نمایش داده نشده‌اند، شبیه‌سازی‌های تکمیلی شامل اثرات دمایی و تغییرات ضریب اصطکاک ترسکا نیز انجام شده‌اند.

۳-۱- دامنه ویسکوپلاستیک

شکل ۳-الف به وضوح اثر مورد انتظار کاهش نیروی آهنگری با اعمال ارتعاشات را نشان می‌دهد. در مورد شکل موج مثلثی، شکل موج به گونه‌ای انتخاب شده است که میانگین سرعت ۳ میلی‌متر بر ثانیه و $v^+ = 0$ باشد. برای این منظور، دامنه به گونه‌ای محاسبه شده است که مربوط به فرکانس ۴۰ هرتز و نسبت کاری ۰/۱ باشد. مقدار دامنه ۶۷/۵ میکرومتر به دست آمده است. شکل ۳-ب منحنی‌های نیروی آهنگری را در مقابل زمان برای شکل موج مثلثی نشان می‌دهد.



شکل ۳ اثر m روی فرایند آهنگری: (الف) با ارتعاش سینوسی $v = 3 \frac{mm}{s}$ ، $f = 40 \text{ Hz}$ و $a = 12 \mu m$ (ب) با ارتعاش مثلثی $v = 3 \frac{mm}{s}$ ، $f = 40 \text{ Hz}$ و $a = 67.6 \mu m$

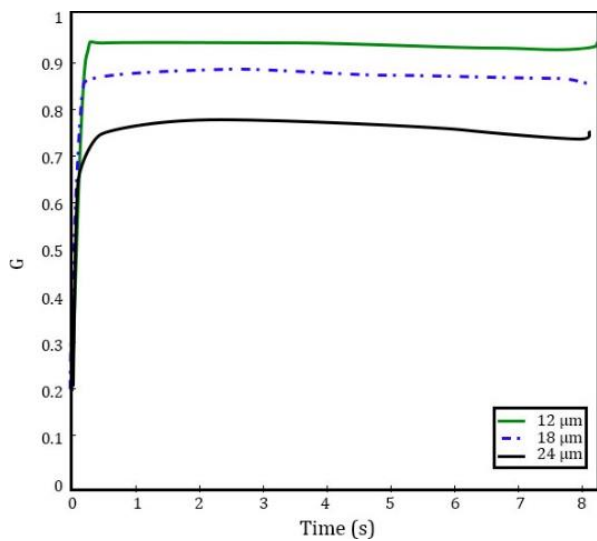
۳-۲- دامنه الاستو ویسکوپلاستیک

در بحث فرایندهای صنعتی، واقع‌بینانه‌تر آن است که رفتار الاستیک را نیز در نظر بگیریم. در این صورت، ممکن است نتایج قبلی قابل‌تعمیم نباشند، زیرا الاستیسیته سیستم می‌تواند مزایای ناشی از اعمال ارتعاش را کاهش دهد. بنابراین، در این بخش (بدون ارائه مدل‌سازی نظری) تأثیر پارامترهای مختلف فرایند از طریق مطالعات شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرکانس‌ها و دامنه‌های ارتعاشی بهینه برای بهبود فرایند آهنگری در این مطالعه تعیین شده‌اند. جدول ۲ خلاصه‌ای از پارامترهای مورد استفاده در این شبیه‌سازی را ارائه می‌دهد که شامل ضرایب مواد و اصطکاک نیز هست. این پارامترها در طول تمام شبیه‌سازی‌ها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که این مطالعه صرفاً به ارتعاشات سینوسی محدود شده است و ماده مورد بررسی، آلومینیوم بوده است.

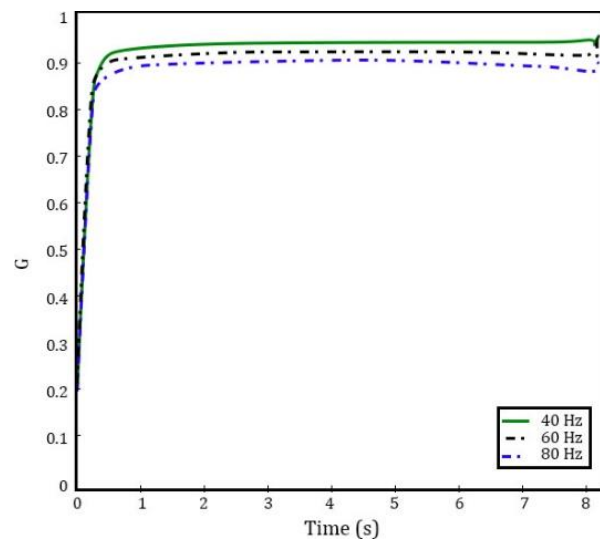
شکل ۴-الف و شکل ۴-ب نسبت کاهش نیروی آهنگری حاصل از شبیه‌سازی‌ها را برای فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف نشان می‌دهند. کلیه منحنی‌ها پس از اعمال فیلتر (با استفاده از فیلتر یکسان در ۱۰ دوره تناوب) و نرمال‌سازی نسبت به نیروی آهنگری حالت بدون ارتعاش محاسبه شده‌اند. لازم به ذکر است که فرایند فیلترکردن باعث ظهور برخی نوسانات گذرا در بخش‌های ابتدایی و انتهای منحنی‌ها شده که به وضوح قابل مشاهده است.

جدول ۲ پارامتر برای فرایند آهنگری

مقدار	پارامتر
$f = 40 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}$	فرکانس
$a = 12 \text{ }\mu\text{m}, 18 \text{ }\mu\text{m}, 24 \text{ }\mu\text{m}$	دامنه
$v_0 = 3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	سرعت
$k = 161.9$	سختی مواد
$m = 0.3$	حساسیت نرخ کرنش
$n = 0.2$	حساسیت سخت شدگی
$\mu = 0.5, \bar{m} = 0.1$	اصطکاک



(ب)

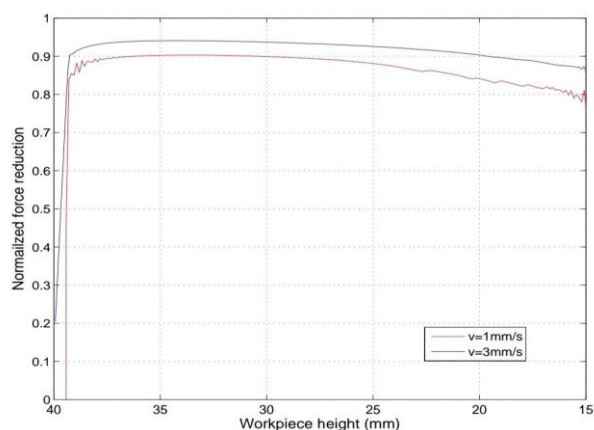


(الف)

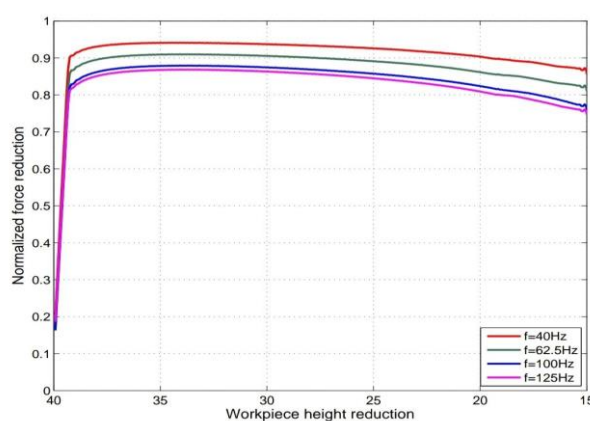
شکل ۴ نسبت کاهش نیروی آهنگری؛ الف) برای فرکانس‌های مختلف در $v = 3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ و $a = 12 \mu\text{m}$ ، ب) برای دامنه‌های مختلف در $f = 40 \text{ Hz}$ و $v = 3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

در شکل ۵-الف نتایج شبیه‌سازی را برای نسبت نرمال کاهش نیروی آهنگری نشان می‌شود. نکته قابل توجه این است که علی‌رغم رفتار الاستیک، کاهش نیروی آهنگری همچنان وجود دارد و با افزایش فرکانس (و در نتیجه افزایش نسبت سرعت) این کاهش بیشتر می‌شود، اگرچه این رابطه به صورت خطی ثابت نیست. این پدیده ممکن است ناشی از عدم تقارن در انتقال الاستوپلاستیک طی بارگذاری و باربرداری باشد که بر نیروهای اصطکاک نیز تأثیر می‌گذارد، هرچند این فرضیات نیاز به بررسی بیشتری دارند. از سوی دیگر، با افزایش دامنه ارتعاش نیز کاهش نیروی آهنگری مشاهده می‌شود و از آنجا که حاصل ضرب $v_1 = a\omega$ با افزایش فرکانس یا دامنه افزایش می‌یابد، تأثیر این دو پارامتر مشابه است. شکل ۵-ب نیز نتایج مشابهی را هنگام ثابت نگه‌داشتن مشخصه‌های ارتعاش نشان می‌دهد، به طوری که برای نسبت‌های سرعت یکسان که با تغییر سرعت v_0 به دست آمده‌اند، کاهش نیرو در هر دو مدل ویسکوپلاستیک و الاستو-ویسکوپلاستیک برای $v = 3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ تقریباً یکسان است. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه مکانیسم‌های فیزیکی در این دو مدل متفاوت هستند، اما وابستگی به نسبت سرعت در هر دو مورد مشترک است.

شکل ۶ نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی شده کاهش نیرو را برای شکل موج‌های سینوسی و مثلثی مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی آشکاری بین نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی شده به‌ویژه برای شکل موج مثلثی وجود دارد. در مورد شکل موج سینوسی، نتایج شبیه‌سازی منظم‌تر از پیش‌بینی‌های تحلیلی عمل کرده‌اند. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای متعددی از جمله اثرات دما و تغییرات ضریب اصطکاک انجام شده‌اند، اما این عوامل تأثیر قابل توجهی بر نتایج نهایی نداشته‌اند. این موضوع نشان‌دهنده پایایی و دقت مدل‌سازی‌های انجام‌شده در این مطالعه است.

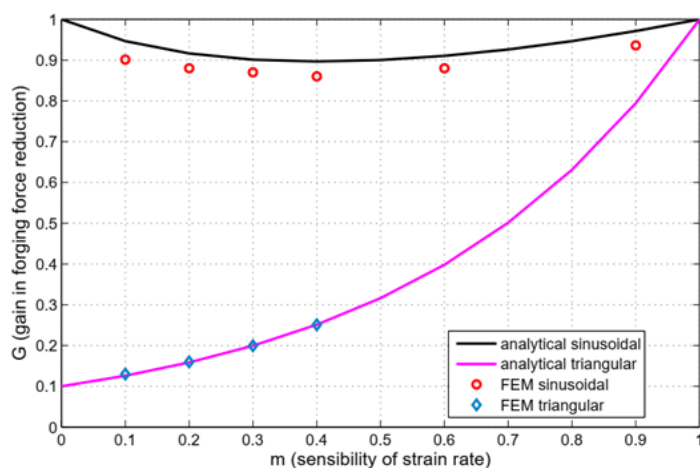


(ب)



(الف)

شکل ۵ نسبت نرمال کاهش نیروی آهنگری در دامنه ارتعاشی $18 \mu\text{m}$ ؛ الف) برای فرکانس‌های مختلف ($v = 3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$)؛ ب) سرعت‌های مختلف قالب بالایی ($f = 40 \text{ Hz}$)



شکل ۶ مقایسه مدل‌های تئوری و تحلیلی در حوزه ویسکوپلاستیک برای فرایند آهنگری به کمک ارتعاش

نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات تجربی مشابه [۱۸، ۱۹] مورد ارزیابی تطبیقی قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده همخوانی مطلوب بین داده‌های نظری، شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی است. در این راستا، تأثیر پارامتر m (نسبت سرعت) بر کاهش نیروی شکل‌دهی در فرایند آهنگری عملی به‌طور ویژه مورد تحلیل قرار گرفته است. بررسی‌های مقایسه‌ای حاکی از آن است که میزان اختلاف بین نتایج نظری و آزمایشگاهی $1/2$ درصد و بین داده‌های شبیه‌سازی و تجربی $0/8$ درصد است که این مقادیر در محدوده خطای قابل‌قبول برای مطالعات مهندسی قرار دارند. این تطابق بالا، هم اعتبار روش‌های تحلیلی به‌کاررفته شده و هم دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده را تأیید می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با ارائه دو مدل تحلیلی نوین بر پایه مدل برش و قانون نوردون-هاف، چارچوبی نظری برای تحلیل رفتار مواد ویسکوپلاستیک تحت ارتعاشات ارائه کرد و پارامترهای کلیدی نسبت سرعت ($m = v_0/v_1$) و نسبت سیکل کاری (α) را به عنوان عوامل تعیین‌کننده در کاهش نیروی آهنگری شناسایی نمود. نتایج نشان داد افزایش دامنه ارتعاش از ۱۲ به ۲۴ میکرومتر موجب کاهش ۱۸ درصدی و افزایش فرکانس از ۴۰ به ۸۰ هرتز باعث کاهش ۷ درصدی نیروی آهنگری می‌شود، ضمن آنکه تطابق بالای نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی (با خطای تنها ۰/۸ درصد) صحت مدل‌ها را تأیید می‌کند. این پژوهش اثبات می‌نماید که به‌کارگیری ارتعاشات کنترل‌شده با پارامترهای بهینه می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش نیروی مورد نیاز در فرایندهای آهنگری صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

References

- [1] Ni Y, Sun J, Zhang J, Tong Z, Zhou Z, Xu X. Accurate buckling analysis of magneto-electro-elastic cylindrical shells subject to hygro-thermal environments. *Applied Mathematical Modelling*. 2023 Jun 1;118:798-817. doi: [10.1016/j.apm.2023.02.015](https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.02.015)
- [2] Campocasso S, Chalvin M, Bourgon U, Hugel V, Museau M. Manufacturing of a Schwarz-P pattern by multi-axis WAAM. *CIRP Annals*. 2023 Jan 1;72(1):377-80. doi: [10.1016/j.cirp.2023.04.058](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2023.04.058)
- [3] Buj-Corral I, Vivancos-Calvet J. Improvement of the manufacturing process of abrasive stones for honing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013 Oct;68(9):2517-23. doi: [10.1007/s00170-013-4854-8](https://doi.org/10.1007/s00170-013-4854-8)
- [4] Chen T. An effective dispatching rule for bi-objective job scheduling in a wafer fabrication factory—considering the average cycle time and the maximum lateness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013 Jul;67(5):1281-95. doi: [10.1007/s00170-012-4565-6](https://doi.org/10.1007/s00170-012-4565-6)
- [5] Jiménez A, Bidare P, Hassanin H, Tarlochan F, Dimov S, Essa K. Powder-based laser hybrid additive manufacturing of metals: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021 May;114(1):63-96. doi: [10.1007/s00170-021-06855-4](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06855-4)
- [6] Diniz AE, de Oliveira AJ. Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004 Aug 1;44(10):1061-7. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2004.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.03.001)
- [7] Mousavi SA, Feizi H, Madoliat R. Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process. *Journal of materials processing technology*. 2007 Jun 12;187:657-61. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2006.11.168](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.168)
- [8] Hayashi M, Jin M, Thipprakmas S, Murakawa M, Hung JC, Tsai YC, Hung CH. Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method (FEM). *Journal of Materials Processing Technology*. 2003 Sep 22;140(1-3):30-5. doi: [10.1016/S0924-0136\(03\)00699-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00699-X)
- [9] Siegert K, Ulmer J. Superimposing ultrasonic waves on the dies in tube and wire drawing. *J. Eng. Mater. Technol.* 2001 Oct 1;123(4):517-23. doi: [10.1115/1.1397779](https://doi.org/10.1115/1.1397779)
- [10] Polyakov NV, Mikhailov NV. A study of vibration-assisted deformation of metals. *Soviet materials science: a transl. of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov/Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*. 1967 Jul;2(4):346-7. doi: [10.1007/BF00716957](https://doi.org/10.1007/BF00716957)
- [11] Huang Z, Lucas M, Adams MJ. Influence of ultrasonics on upsetting of a model paste. *Ultrasonics*. 2002 May 1;40(1-8):43-8. doi: [10.1016/S0041-624X\(02\)00245-7](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00245-7)
- [12] Yu M, Zhao H, Xu F, Chen T, Zhou L, Song X, Ma N. Influence of ultrasonic vibrations on the microstructure and mechanical properties of Al/Ti friction stir lap welds. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020 Aug 1;282:116676. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2020.116676](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116676)
- [13] Liang YH, Zhao YG, Qin QD, Shang EY, Jiang QC. Effect of mechanical vibration on the microstructure and thermal fatigue behavior of cast hot work die steel. *Journal of materials science*. 2006 Apr 15;41(8). doi: [10.1007/s10853-006-5312-x](https://doi.org/10.1007/s10853-006-5312-x)
- [14] Abedini R, Abdullah A, Alizadeh Y, Fartashvand V. Effect of ultrasonic on hot compaction of AA1100 and Ti-6Al-4V powders. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2017;3(3):1-12. [In Persian]
- [15] Shalvandi M, Aghaei A. Investigation of the effect of ultrasonic vibration on the microstructure and mechanical properties of carbon steel in friction drilling process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021;8(7):1-9. [In Persian]
- [16] Shahfaragh P, Farahani M, Safarabadi Farahani M, Farhang M. Experimental and numerical investigation of the vibration stress relief process on a T-shape welded joint. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Mar 21;9(1):43-53. doi: [10.22034/ijme.2022.155985](https://doi.org/10.22034/ijme.2022.155985) [In Persian]
- [17] Kalpakjian S. *Manufacturing engineering and technology*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education; 2001.
- [18] Nema RA, Sadoon MH, Tawfik MA. Investigation of the Axial Forming Force during Low Frequency Vibration Assisted SPIF. In *Journal of Physics: Conference Series* 2021 Aug 1 (Vol. 1973, No. 1, p. 012050). IOP Publishing. doi: [10.1088/1742-6596/1973/1/012050](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012050)
- [19] Meng DA, Zhu C, Zhao X, Zhao S. Applying low-frequency vibration for the experimental investigation of clutch hub forming. *Materials*. 2018 May 30;11(6):928. doi: [10.3390/ma11060928](https://doi.org/10.3390/ma11060928)