



## کشش عمیق هیدرودینامیکی به کمک ارتعاشات فراصوتی: بررسی میزان نازک‌شدگی و نیروی شکل‌دهی ورق

مهدی سهراب‌خانی<sup>۱</sup>، مهدی ظهور<sup>۲\*</sup>، شهرام اعتمادی حقیقی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،

ایران

۲. دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*نویسنده مسئول: mzohoor@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹

### چکیده

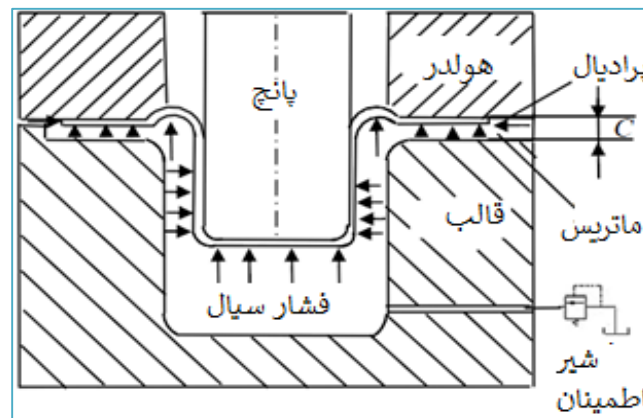
فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های شکل‌دهی فلزات در صنایع مختلف، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این راستا، پژوهشگران به دنبال بهبود این فرایند و افزایش کارایی آن هستند. یکی از رویکردهای نوین در این زمینه، بهره‌گیری از ارتعاشات فراصوتی است که در مطالعات متعدد بررسی شده و نتایج امیدبخشی را به همراه داشته است. هدف اصلی این مقاله، بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی اعمال شده به قالب بر روی فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی است. بدین منظور با استفاده از روش اجزای محدود ارتعاشات فراصوتی با فرکانس و دامنه‌های مختلف به قالب اعمال شده و نیروی سنبه و نازک‌شدگی حداکثر در دو حالت کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ناحیه شعاع گوشه سنبه بحرانی‌ترین ناحیه در فرایند شکل‌دهی است، زیرا بیشترین میزان نازک‌شدگی در این ناحیه رخ می‌دهد. همچنین اعمال ارتعاشات فراصوتی به قالب، منجر به کاهش نیروی شکل‌دهی به میزان ۷/۵ تا ۲۳٪ (با توجه به دامنه و فرکانس ارتعاش) نسبت به حالت بدون ارتعاشات فراصوتی شده است. علاوه بر این، استفاده از ارتعاشات فراصوتی باعث کاهش نوسانات ضخامت به میزان ۱۰/۲٪ شده است. همچنین نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه شعاع گوشه سنبه به میزان ۶٪ بهبود یافته و با افزایش دامنه ارتعاش تا ۱۰ میکرومتر نازک‌شدگی حداکثر به میزان ۱۱٪ کاهش یافته است با این حال افزایش بیش از حد دامنه ارتعاش منجر به افزایش مجدد نازک‌شدگی حداکثر شده است.

**کلیدواژگان:** ارتعاشات فراصوتی، کشش عمیق هیدرودینامیکی، فنجان استوانه‌ای، نیروی شکل‌دهی، نازک‌شدگی

### مقدمه

فرآیند هیدروفرمینگ ورق‌های فلزی در سال‌های اخیر به عنوان روشی کارآمد برای شکل‌دهی قطعات صنعتی مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته است. در این فرآیندها از محیط‌های سیال به روش‌های مختلفی بهره‌برداری می‌شود و در نتیجه روش‌های گوناگونی تحت عنوان هیدروفرمینگ ورق مطرح شده است که از جمله رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به کشش عمیق هیدرومکانیکی و کشش عمیق هیدرودینامیکی<sup>۱</sup> با فشار شعاعی اشاره کرد. فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی شباهت بسیاری به فرآیند کشش عمیق ساده دارد با این تفاوت که در آن یک محفظه حاوی سیال جایگزین ماتریس شده و فشار سیال به سطح زیرین ورق اعمال می‌شود. این فشار سیال منجر به بهبود کیفیت قطعه تولید شده و کاهش نازک‌شدگی آن نسبت به روش کشش عمیق معمولی می‌گردد. در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، بین قالب و ورق گیر فضایی وجود دارد که امکان نشت جزیبی سیال و ایجاد فشار شعاعی بر لبه ورق را فراهم می‌کند. این فشار شعاعی سبب افزایش نسبت کشش ورق نسبت به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی می‌شود. شکل (۱) به صورت شماتیک، فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی را نشان می‌دهد [۱].

<sup>1</sup>Hydrodynamic Deep Drawing (HDD)



شکل ۱: فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۱]

یکی از روش‌های نوین و رو به گسترش در صنایع شکل‌دهی فلزات به کمک ارتعاشات پر قدرت فراصوتی است که به دلیل مزایای قابل توجهی که به همراه دارد، مورد توجه قرار گرفته است [۲]. کاربرد ارتعاشات فراصوتی در فرآیندهای شکل‌دهی معمولاً با هدف افزایش بهره‌وری فرآیند از جمله افزایش سرعت تولید، کاهش سایش ابزار و قالب، کاهش نیروهای شکل‌دهی، بهبود کیفیت سطح و پایداری ابعادی قطعه کار انجام می‌شود [۳]. ارتعاشات فراصوتی از امواج صوتی ناشی از حرکت نوسانی ماده تشکیل شده و از طریق محیط مادی منتقل می‌شوند و انرژی را از منبع ارتعاش به محیط منتقل می‌کنند. این امواج، ارتعاشات طولی مکانیکی با فرکانس در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ کیلو هرتز هستند که توانایی عبور از مواد و انتقال انرژی را دارند به همین دلیل، از این امواج می‌توان در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات نیز بهره برد [۴]. تحقیقات در زمینه تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر رفتار پلاستیکی فلزات از دهه ۱۹۵۰ آغاز شد. اولین بررسی در این زمینه توسط بلاها و لانگنکر [۵] انجام شد که در آن کرنش نمونه‌های تک بلوری فلزی تحت تاثیر ارتعاشات فراصوتی با فرکانس‌های گسترده (تا ۸۰۰ کیلو هرتز) مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که ارتعاشات فراصوتی باعث افزایش کرنش تا لحظه شکست و همچنین افزایش استحکام کششی نهایی می‌شود. آنها نتیجه‌گیری کردند که انرژی فراصوت به دلیل جذب بهتر در نایب‌جایی‌ها نسبت به انرژی حرارتی، تاثیر بیشتری در کاهش تنش کششی دارد و در نتیجه باعث افزایش جریان پلاستیکی ماده می‌شود. پدیده کاهش تنش تسلیم با اعمال ارتعاشات فراصوتی که در فلزات مختلف مشاهده شده است به عنوان اثر بلاها یا اثر حجمی شناخته می‌شود.

در ادامه مجموعه از مطالعات برای بررسی تغییر شکل پلاستیک به کمک ارتعاشات فراصوتی و بررسی دقیق تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر خواص مواد انجام شد. در مقایسه با فرآیند شکل‌دهی سنتی، برهم‌نهی ارتعاش بر روی قالب یا قطعه کار می‌تواند بار شکل‌دهی ماده را کاهش دهد، انعطاف پذیری و حد شکست و بویژه خواص مکانیکی ماده را بهبود بخشد [۶ و ۷]. به طور کلی، شیوه اثرگذاری ارتعاشات فراصوتی در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: اثرات سطحی و اثرات حجمی [۸-۱۰]. اثرات سطحی شامل کاهش اصطکاک لغزشی در سطوح تماس قالب و قطعه کار [۱۱ و ۱۲]، کاهش برگشت فنری و بهبود پایداری ابعادی قطعه کار [۱۳] می‌شود. از سوی دیگر، اثرات حجمی نیز شامل تغییرات در تردی و شکل‌پذیری مواد (اثر بلاها و لانگنکر) [۵]، افزایش شکل‌پذیری [۱۱] و تغییرات در ریزساختار [۱۴] است. با توجه به نتایج امیدبخش تحقیقات پیشین، مطالعات گسترده در زمینه کاربرد ارتعاشات فراصوتی در فرآیندهای مختلف شکل‌دهی مانند اکستروژن [۱۵]، تراشکاری [۱۶]، کشش عمیق [۱۷]، کشش سیم [۱۸] و شکل‌دهی افزایشی [۱۹] انجام شده است.

هدف اصلی این پژوهش، پیش‌بینی بهبود عملکرد فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با اعمال ارتعاشات فراصوتی طولی بر روی قالب و بررسی تاثیرات آن بر شکل‌پذیری نهایی قطعه کار است. به عبارت دیگر، هدف این است که با ترکیب مزایای هر دو روش، حداکثر شکل‌پذیری در فرآیند کشش عمیق حاصل شود. برای رسیدن به این هدف، فرآیند مذکور با استفاده از نرم‌افزار

1 Ultrasonic Vibration

2 Blaha Effect



اجزای محدود آباکوس شبیه‌سازی و به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی ارایه شده توسط مدانلو و همکاران [۲۰] مقایسه شد.

### شبیه‌سازی اجزای محدود

با هدف کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان، در این پژوهش از روش اجزای محدود به عنوان جایگزینی برای آزمایش‌های تجربی استفاده شد. نرم‌افزار تجاری آباکوس به دلیل توانایی بالایی که در تحلیل فرایندهای شکل‌دهی پیچیده دارد، برای شبیه‌سازی این فرایند انتخاب گردید. کلیه اجزای سیستم شامل قالب، ورق فلزی، سنبه و ورق‌گیر با نسبت مقیاس یک به یک در محیط نرم‌افزار مدل‌سازی شدند.

### خواص ماده

در فرآیند مورد بررسی، از ورق فولادی St14 با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر و قطر اولیه ۸۰ میلی‌متر استفاده شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی این ماده بر اساس اطلاعات ارایه شده در مرجع [۲۰] در تحلیل فرآیند لحاظ گردید. مشخصات مکانیکی ورق فولادی به کار رفته و همچنین پارامترهای شبیه‌سازی از قبیل تنش تسلیم، مدول الاستیک، چگالی و ضریب پواسون در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: خواص ماده مورد آزمایش

۹۰	استحکام تسلیم (Mpa)
۲۱۰	مدول یانگ (Gpa)
۰/۳	ضریب پواسون
۶۳۸/۹۶	ضریب استحکام (Mpa)
۰/۳۵	نمای کرنش سختی
۷۸۵۰	چگالی ( $Kg/m^3$ )

### هندسه و بارگذاری

جدول (۲)، هندسه قالب شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. از حلگر دینامیکی صریح نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل عددی این مسئله استفاده شده است.

جدول ۲: ابعاد هندسی مجموعه قالب

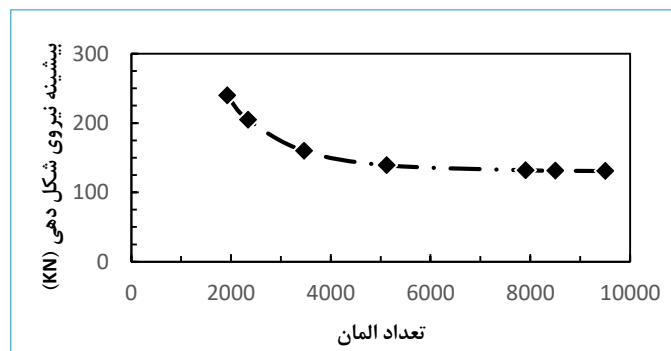
مشخصه	اندازه (mm)
قطر سنبه	۳۸/۵
شعاع گوشه سنبه	۶
قطر محفظه قالب	۴۴
شعاع گوشه محفظه قالب	۵

با توجه به ماهیت غیرخطی تحلیل و وقوع تغییر شکل‌های بزرگ از مدل رفتاری الاستوپلاستیک برای توصیف خواص مکانیکی ماده استفاده گردید. با توجه به خواص مکانیکی تعریف شده برای ماده، سرعت جابجایی سنبه یا نرخ کرنشی که در نتیجه آن ایجاد می‌شود، تاثیری بر نتایج شبیه‌سازی ندارد. دلیل این امر آن است که فرآیند شکل‌دهی سرد و خواص مکانیکی ماده و نمودار تنش-کرنش تعریف شده در محدوده مشخصی از نرخ کرنش معتبر می‌باشند [۲۱]. از آنجایی که مجموعه قالب به

<sup>1</sup>Dynamic Explicit



صورت صلب تحلیلی مدل‌سازی شده است نیازی به مش‌بندی آن نمی‌باشد. به دلیل خواص ناهمسانگرد ورق فولادی و به منظور افزایش دقت، ورق به صورت سه‌بعدی شکل‌پذیر و با المان‌های هشت‌گه‌ای حجمی مدل‌سازی و در جهت ضخامت از ۵ المان استفاده شد. با توجه به اینکه اندازه المان در شبیه‌سازی مهم بوده و نتایج حاصل به آن وابسته است. بنابراین باید اندازه بهینه برای المان تعیین شود. برای تعیین اندازه مناسب المان چندین شبیه‌سازی با المان‌هایی در اندازه‌های گوناگون انجام شد و برای تعداد المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی ورق از تکنیک همگرایی مش استفاده می‌شود. در شکل (۲) منحنی حساسیت به تعداد المان نسبت به خطای نتایج برای بیشینه نیروی لازم در شکل‌دهی نشان داده شده است. با توجه به زمان پردازش و نتایج بدست آمده افزایش تعداد المان‌ها از ۷۹۰۰ تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر دقت مسئله نخواهد داشت و این مقدار به عنوان تعداد المان‌ها برای ورق در نظر گرفته می‌شود.

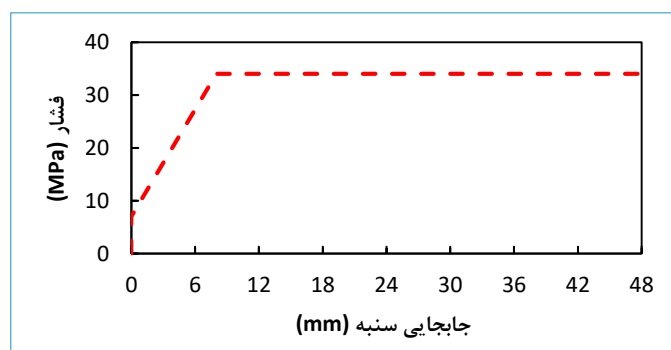


شکل ۲: تاثیر تعداد المان بر بیشینه نیروی شکل‌دهی

ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی برای سطح تماس سنبه با ورق ۰/۱۴ و برای سطوح دیگر برابر با ۰/۰۴ در نظر گرفته شد [۲۲]. همچنین برای هر یک از اجزای صلب یک گره مرجع تعریف گردید تا از این نقطه برای اعمال شرایط مرزی استفاده شود.

### توزیع فشار

همان‌گونه که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، مسیر تغییرات فشار در شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است. فشار اولیه برابر با ۱۰ مگاپاسکال است که به عنوان فشار اولیه تحذب شناخته می‌شود. پیش از آغاز حرکت پانچ این فشار توسط یک پمپ هیدرولیکی به سطح زیرین ورق اعمال می‌گردد. پس از آنکه پانچ به صورت عمودی به درون قالب حرکت کرده و فرآیند کشش ورق آغاز شد، فشار درون محفظه قالب به صورت افزایشی تا رسیدن به مقدار تنظیم شده ۳۵ مگاپاسکال بر روی شیر کنترل فشار افزایش می‌یابد.



شکل ۳: توزیع فشار اعمال شده در مدل‌های شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی [۲۱]

<sup>1</sup>Analytical Rigid

<sup>2</sup> Deformable



## ارتعاش فراصوتی

چنانچه ذره‌ای از یک ماده مرتعش شود سبب پیدایش تنش الاستیک در ذرات مجاور خود در آن ماده می‌گردد [۲۳]. به همین ترتیب، ذرات مجاور نیز این تنش را به ذرات مجاور منتقل می‌کنند و به عبارت دیگر، ارتعاش در ماده منتشر می‌شود و انتشار این ارتعاش در قالب موج صورت می‌پذیرد. معادله موج<sup>۱</sup> معادله‌ای خطی و کلاسیک از نوع معادلات دیفرانسیل جزئی هذلولوی است. معادله (۱) بیانگر معادله موج درجه دوم در حالت یک‌بعدی می‌باشد.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} ; \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

به‌طوریکه  $u$  جابجایی ذره،  $x$  فاصله ذره از نقطه شروع و  $t$  زمان را نشان می‌دهد.  $c$  سرعت انتشار موج است که با توجه به مدول یانگ ( $E$ ) و چگالی ماده ( $\rho$ ) محاسبه می‌شود. یکی از پاسخ‌های معادله (۱) به شکل معادله (۲) است [۲۴].

$$u(x,t) = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (2)$$

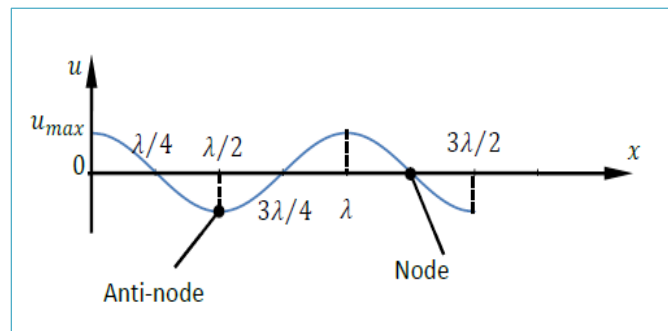
در این معادله،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $A$  دامنه نوسان است. تابع  $u$  در این رابطه بر حسب مکان و زمان بیان شده است. روابط موج را می‌توان با استفاده از فرکانس ( $f$ )، طول موج ( $\lambda$ )، دوره تناوب ( $T$ ) و سرعت انتشار موج ( $c$ ) نیز بیان نمود. معادله (۳) ارتباط بین این متغیرها را نشان می‌دهد.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} ; \quad \lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

با استفاده از این متغیرها معادله (۲) را می‌توان به شکل معادله (۴) بازنویسی کرد.

$$u(x,t) = A \cos \omega \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) \quad (4)$$

بر اساس معادله (۴) میزان جابجایی ذرات یک ماده در حین انتشار موج در شکل (۴) نشان داده شده است.

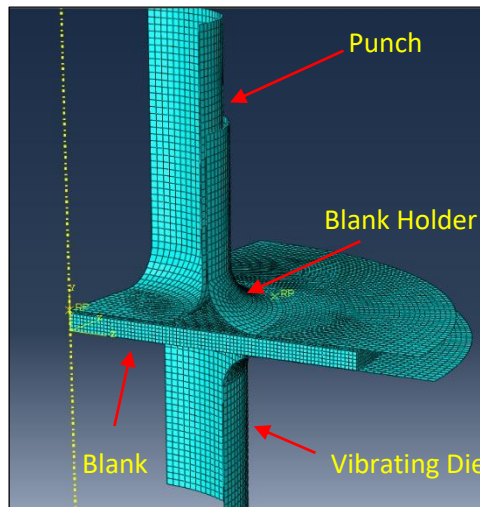


شکل ۴: حرکت ذرات تشکیل‌دهنده ماده در جریان فرایند انتشار [۲۵]

همان‌گونه که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، در نقاطی که مقدار  $x$  برابر صفر یا مضربی صحیح از  $\lambda/2$  باشد، دامنه ارتعاش به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این نقاط حداکثر ارتعاش، شکم نامیده می‌شوند. از سوی دیگر، در نقاطی که مقدار  $x$  برابر  $(2n + 1)\lambda/4$  باشد (مانند  $\lambda/4$ ،  $3\lambda/4$  و...) جابجایی در هر لحظه صفر است و این نقاط، گره نامیده می‌شوند. مفاهیم گره و شکم در طراحی سیستم‌های فراصوتی از اهمیت بالایی برخوردارند. ابعاد اجزای این سیستم‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که ناحیه تغییر شکل در ناحیه شکم قرار گیرد تا دامنه ارتعاش ابزار فراصوتی به بیشترین مقدار خود برسد [۲۵]. همچنین مناطق ثابت سیستم باید در نقاط گره‌ای امواج قرار گیرند. در شبیه‌سازی انجام شده به منظور اعمال ارتعاشات فراصوتی به قالب، یک جابجایی با دامنه کم و فرکانس ۲۰ کیلو هرتز مطابق با رابطه (۵) به سیستم اضافه شد.

$$u = A \sin(\omega t) , \quad \omega = 2\pi f \quad (5)$$

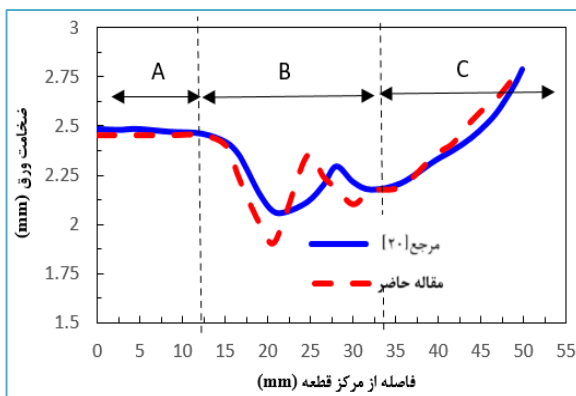
<sup>1</sup>Wave Equation



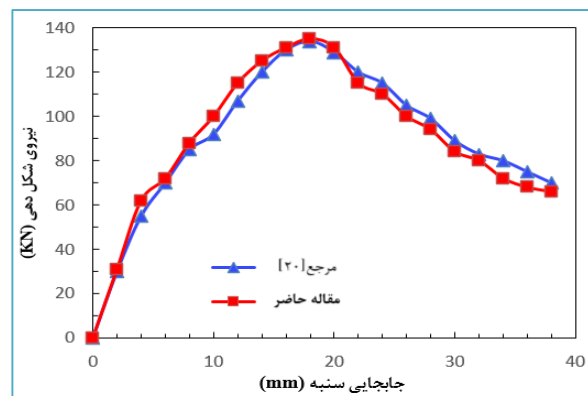
شکل ۵: شبیه‌سازی عددی مجموعه قالب

### اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

به منظور اعتبارسنجی مدل اجزای محدود نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی ارایه شده در مرجع [۲۰] مقایسه گردید. اعتبارسنجی مدل مذکور بر اساس نیروی شکل‌دهی و ضخامت ورق فنجان‌های کشش عمیق هیدرودینامیکی صورت پذیرفت. نیروی شکل‌دهی و توزیع ضخامت بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. بر اساس نمودارهای ارایه شده، روند کلی پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی و توزیع ضخامت در شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌ها یکسان بوده و همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌گردد.



(ب)



(الف)

شکل ۶: تطابق بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی

### نتایج و بحث

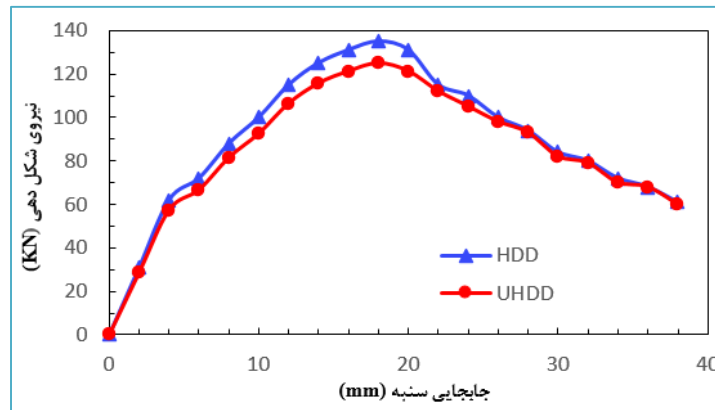
#### نیروی شکل‌دهی

به منظور بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر نیروی شکل‌دهی، شبیه‌سازی برای دو حالت مختلف انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، به صورت نمودار نیروی شکل‌دهی بر حسب جابه‌جایی سنبه در شکل (۷) ارایه شده است. در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی دامنه ارتعاشات برابر با ۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد، نمودار نیروی شکل‌دهی نسبت به جابه‌جایی سنبه برای هر دو فرایند مورد آزمایش رسم شده است. نتایج

<sup>1</sup> Ultrasonic vibration assistance Hydrodynamic Deep Drawing (UHDD)

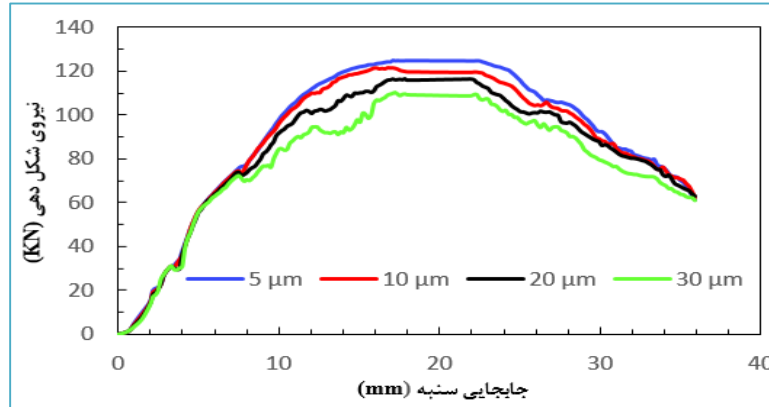


نشان می‌دهند که بیشینه نیروی اعمال شده توسط سنبه در فرایندهای کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی به ترتیب ۱۳۵ کیلو نیوتن و ۱۲۵ کیلو نیوتن می‌باشد، که نشان‌دهنده اختلاف تقریبی ۷/۵ درصدی بین این دو فرایند است.



شکل ۷: بررسی تأثیر اعمال ارتعاشات فراصوتی بر نیروی سنبه

به منظور بررسی تأثیر دامنه ارتعاش بر نیروی شکل‌دهی در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی شبیه‌سازی‌هایی در چهار دامنه ارتعاشی متفاوت که در شکل (۸) نمایش داده شدند، انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش دامنه ارتعاش به دلیل ایجاد فاصله بسیار کوچک آبین ورق و قالب و همچنین ورق‌گیر، منجر به کاهش اصطکاک، بهبود جریان مواد و در نهایت کاهش نیروی سنبه می‌شود. به طوری که افزایش دامنه ارتعاش تا ۳۰ میکرومتر نیروی سنبه را ۲۳ درصد کاهش می‌دهد.



شکل ۸: تأثیر دامنه نوسان بر نیروی سنبه

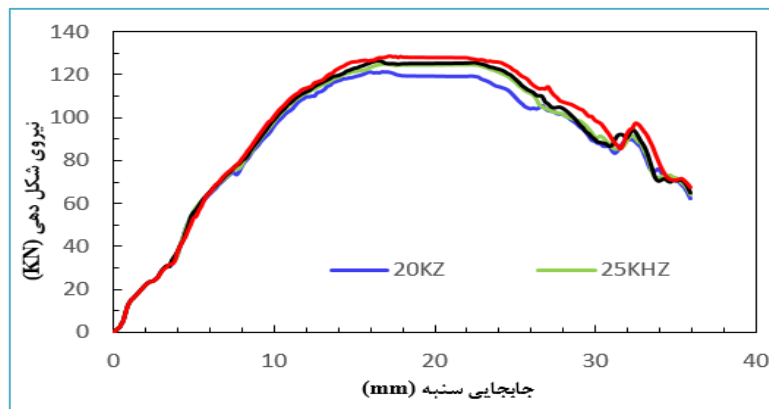
شکل (۹) تأثیر یکی دیگر از پارامترهای ارتعاش فراصوتی، فرکانس ارتعاش بر نیروی سنبه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود یک مقدار بهینه برای فرکانس ارتعاش فراصوتی وجود دارد که منجر به کاهش نیروی سنبه می‌گردد و با افزایش بیشتر فرکانس نیروی سنبه افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این پدیده، کاهش زمان بازگشت قالب به حالت اولیه و جداسدن آن از ورق با افزایش فرکانس ارتعاش می‌باشد. از سوی دیگر، در لحظه جداسدن بین سطح لبه قطعه کار و سطح کار قالب، یک بازگشت ارتجاعی رخ می‌دهد.

<sup>1</sup>Vibration amplitude

<sup>2</sup>Micro-gap

<sup>3</sup>Microgap state

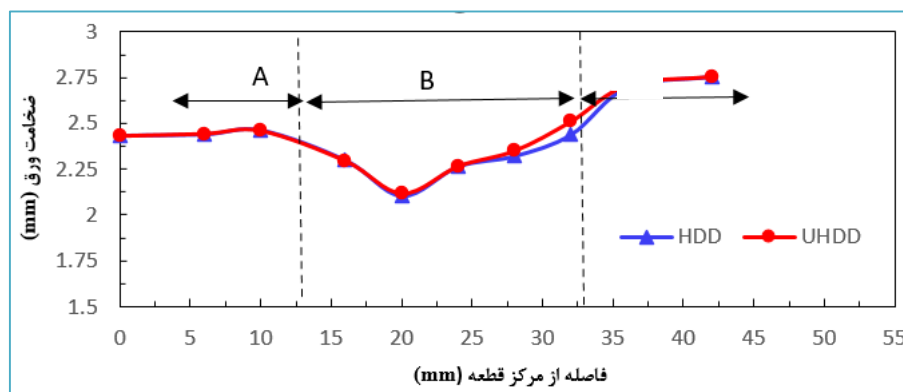
<sup>4</sup>Rebound



شکل ۹: تاثیر فرکانس ارتعاش بر نیروی سنبه

## توزیع ضخامت

به منظور مقایسه توزیع ضخامت در دو مرحله آزمایش، ضخامت در مقاطع عرضی مختلف اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، در ناحیه A (کف سنبه)، کاهش ضخامت جزئی مشاهده می‌گردد، که کمترین ضخامت ورق در فرایندهای کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی به ترتیب ۲/۴۳ میلی‌متر و ۲/۴۴ میلی‌متر است و تقریباً ۲/۵ درصد کاهش ضخامت را در هر دو فرایند نشان می‌دهد. این کاهش ضخامت ناشی از تنش‌های کششی حاکم بر این ناحیه می‌باشد. بیشترین میزان کاهش ضخامت در ناحیه B (شعاع گوشه سنبه) رخ می‌دهد که این می‌تواند به دلیل تاثیرات خمشی ایجاد شده در این ناحیه باشد [۲۶]. کاهش ضخامت در فرایندهای کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی به ترتیب ۱۵/۸ درصد (با کمترین ضخامت ۲/۱ میلی‌متر) و ۶ درصد (با کمترین ضخامت ۲/۳۵ میلی‌متر) برای نمونه‌ها حاصل شد. در ناحیه C (دیواره قطعات استوانه‌ای) به دلیل وجود تنش‌های فشاری، افزایش ضخامت مشاهده گردید، ضخامت ورق در فرایندهای کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی به ترتیب ۲/۷۵ میلی‌متر و ۲/۷۳ میلی‌متر است که تقریباً معادل ۱۰ درصد افزایش ضخامت در هر دو فرایند است.



شکل ۱۰: بررسی تاثیر اعمال ارتعاشات فراصوتی بر تغییرات ضخامت ورق

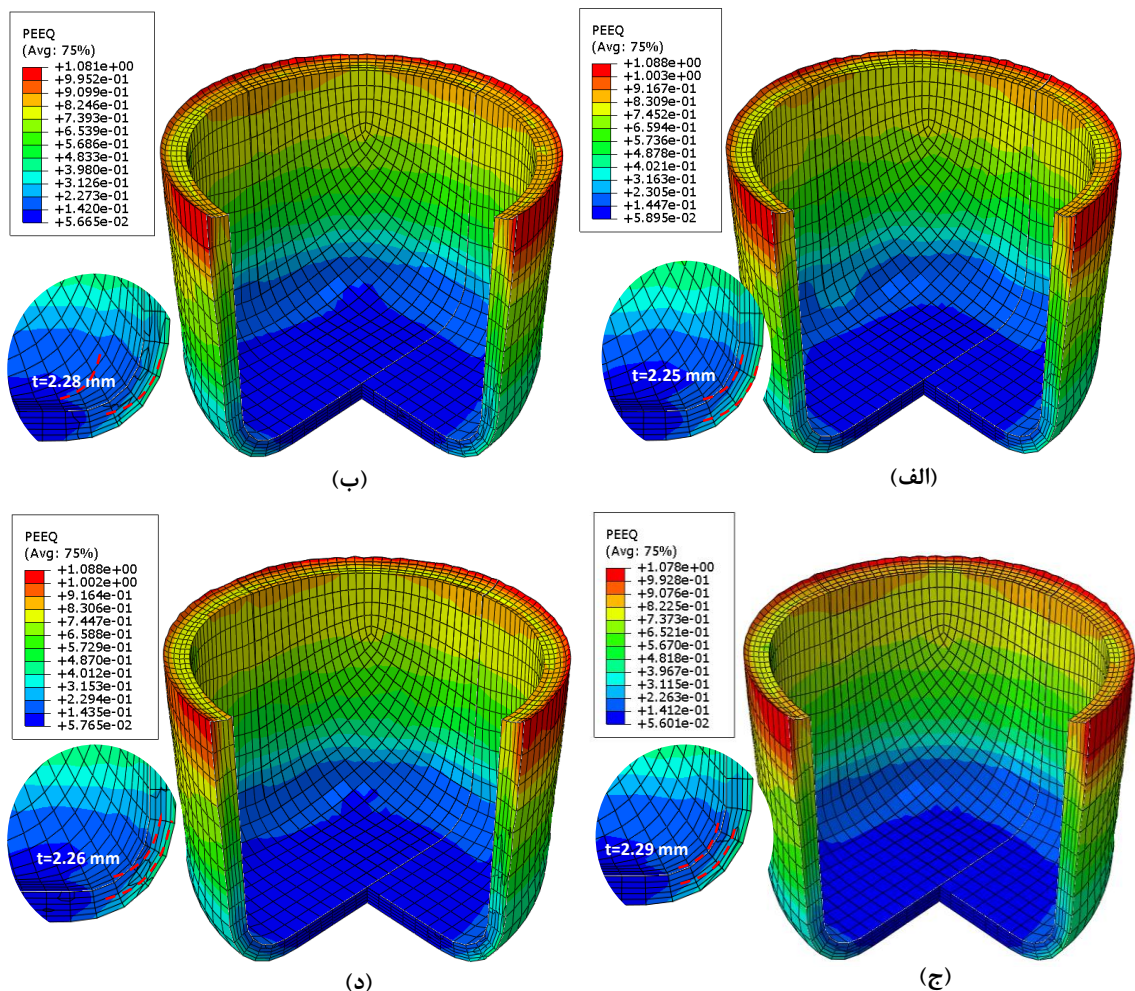
همچنین بر اساس معادله (۶) بیشترین نوسانات ضخامت به ترتیب در فرایندهای کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با ۲۶/۲ درصد و کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی با ۱۶ درصد برای نمونه‌های مورد بررسی مشاهده شده است.

$$Deviation = \frac{t_{Max} - t_{Min}}{t_{Initial}}, \quad t = \text{thickness} \quad (6)$$



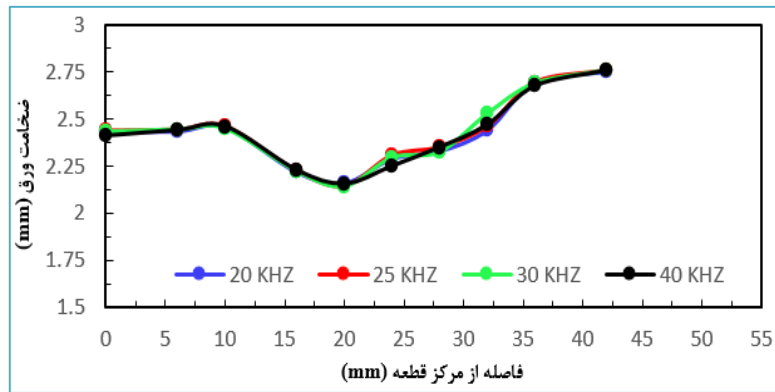


نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ارتعاشات فراصوتی تاثیر مثبتی بر فرایند کشش عمیق هیدروپنماییکی دارد و منجر به بهبود ۹/۸ درصدی در حداکثر کاهش ضخامت قطعه کار می‌شود. با این حال اهمیت اصلی این پژوهش در تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر یکنواختی ضخامت قطعه کار است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال ارتعاشات فراصوتی منجر به کاهش ۱۰/۲ درصد در نوسانات ضخامت می‌شود. به عبارت دیگر ترکیب فرایند کشش عمیق هیدروپنماییکی با ارتعاشات فراصوتی منجر به توزیع یکنواخت‌تر ضخامت در قطعه کار می‌شود. شکل (۱۱) توزیع ضخامت قطعه کار را در فرکانس‌های مختلف ارتعاش نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد کمترین ضخامت در قسمت شعاع کف فنجان قرار دارد و بهترین توزیع ضخامت در فرکانس ۳۰ کیلو هرتز حاصل می‌شود. با افزایش فرکانس از ۳۰ کیلو هرتز، به دلیل پدیده بازگشت ارتجاعی در فرایند فراصوتی کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. این پدیده به دلیل کاهش زمان جدایش قالب و قطعه کار رخ می‌دهد. بنابراین افزایش فرکانس فراتر از ۳۰ کیلو هرتز علی‌رغم افزایش نیرو منجر به افزایش کاهش ضخامت نیز می‌شود. شکل (۱۲) تاثیر فرکانس ارتعاش بر حداکثر کاهش ضخامت قطعه کار را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش فرکانس تا یک مقدار بهینه منجر به کاهش نازک‌شدگی می‌شود. با این حال با افزایش بیشتر فرکانس روند کاهش ضخامت معکوس شده و نازک‌شدگی افزایش می‌یابد علت اصلی این پدیده همانطور که پیش‌تر اشاره شد کاهش زمان جدایش قطعه کار و قالب است.



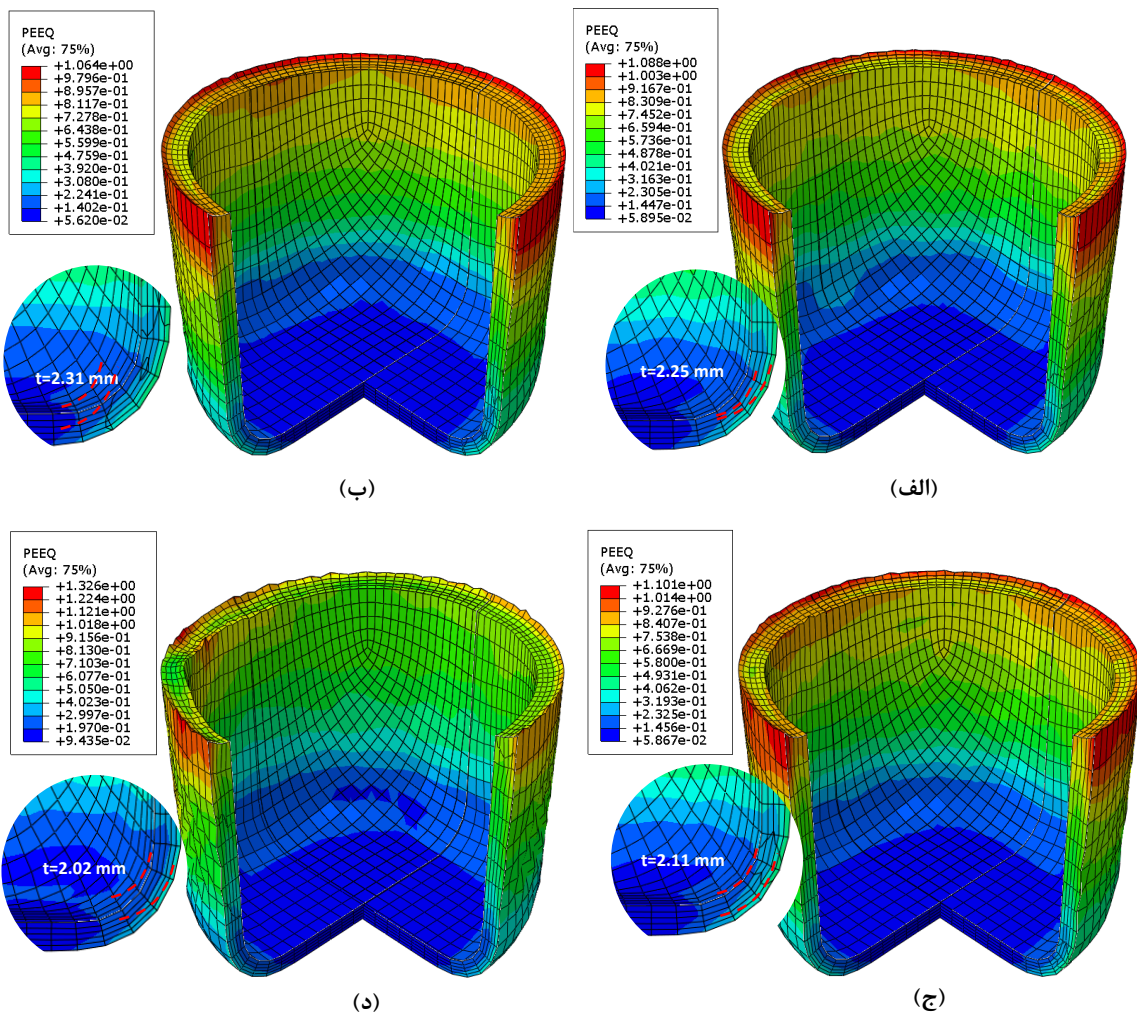
شکل ۱۱: بررسی اثر فرکانس ارتعاش بر توزیع کرنش پلاستیک و مقدار حداقل ضخامت ورق در ناحیه بحرانی

الف - ۲۰ KHZ - ب - ۲۵ KHZ - ج - ۳۰ KHZ - د - ۴۰ KHZ



شکل ۱۲: بررسی اثر فرکانس ارتعاش بر تغییرات ضخامت ورق

شکل (۱۳) تاثیر دامنه ارتعاش بر توزیع ضخامت قطعه کار را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها در فرکانس ثابت ۲۰ کیلو هرتز و با چهار دامنه ارتعاشی مختلف انجام شدند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از دامنه ارتعاش ۱۰ میکرومتر توزیع ضخامت بهینه‌ای را ارائه می‌دهد. با این حال افزایش دامنه ارتعاش بیش از این مقدار، نازک‌شدگی در شعاع کف فنجان را افزایش می‌دهد این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که دامنه ارتعاش به ۳۰ میکرومتر برسد (شکل ۱۴).

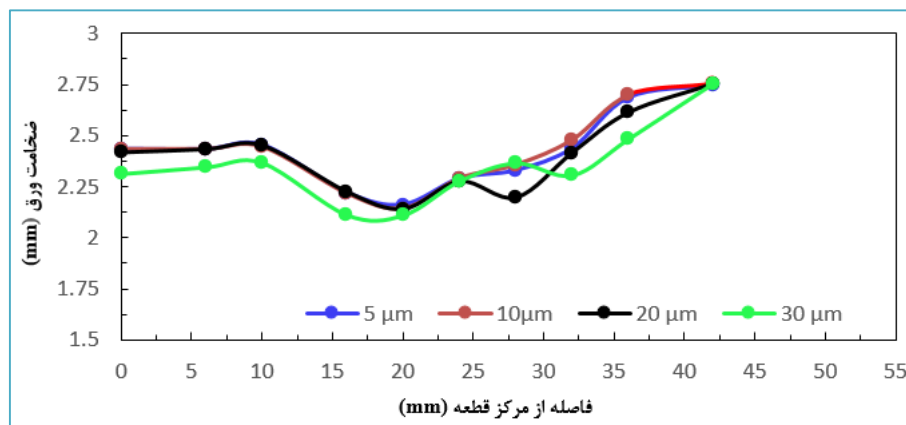


شکل ۱۳: بررسی اثر دامنه ارتعاش بر توزیع کرنش پلاستیک و مقدار حداقل ضخامت ورق در ناحیه بحرانی

الف- ۵  $\mu\text{m}$  - ب- ۱۰  $\mu\text{m}$  - ج- ۲۰  $\mu\text{m}$  - د- ۳۰  $\mu\text{m}$



نتایج شبیه‌سازی ارایه شده در شکل (۱۴) نشان می‌دهد که با افزایش دامنه ارتعاش تا ۱۰ میکرومتر توزیع ضخامت قطعه کار بهبود می‌یابد. ولی افزایش بیش از حد دامنه ارتعاش منجر به کاهش ضخامت موضعی در برخی نقاط قطعه کار می‌شود. علت اصلی این پدیده رفتار چکش کاری میکروسکوپی در لبه ورق تحت ارتعاشات با دامنه بالا است. اعمال ارتعاشات فراصوتی با دامنه زیاد نیروی مورد نیاز برای انجام عملیات کشش عمیق را کاهش می‌دهد اما این کاهش نیرو، لزوماً به بهبود توزیع ضخامت منجر نمی‌شود. انتخاب نامناسب دامنه ارتعاش در فرایند می‌تواند منجر به کاهش بیش از حد ضخامت در برخی نواحی شود که یک عیب محسوب می‌شود از این رو انتخاب بهینه دامنه و فرکانس ارتعاش بهبود فرایند را به دنبال دارد. انجام یک مطالعه پارامتری فرایند برای بررسی دقیق‌تر تاثیر دامنه و فرکانس ارتعاش ضروری است.



شکل ۱۴: بررسی اثر دامنه ارتعاش بر تغییرات ضخامت ورق

## نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر کشش عمیق هیدرودینامیکی فنجان‌های استوانه‌ای ساخته شده از ورق فولادی St14 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور دو حالت مختلف (کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی) تعریف و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که:

- ۱- با اعمال ارتعاشات فراصوتی نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی قطعه بین ۷/۵ تا ۲۳ درصد با توجه به دامنه ارتعاشات اعمال شده، نسبت به حالت بدون استفاده از ارتعاشات فراصوتی کاهش یافته است.
- ۲- افزایش دامنه ارتعاشات فراصوتی تاثیر مستقیم و معناداری بر کاهش نیروی مورد نیاز در فرایند شکل‌دهی دارد. به گونه‌ای که با افزایش دامنه ارتعاش تا ۳۰ میکرومتر نیروی وارده بر سنبه ۲۳ درصد کاهش یافته است.
- ۳- بیشترین نوسانات ضخامت در فرایندهای کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی به ترتیب ۲۶/۲ درصد و ۱۶ درصد است لذا استفاده از ارتعاشات فراصوتی منجر به کاهش این نوسانات به میزان ۱۰/۲ درصد شده است.
- ۴- تحلیل منحنی توزیع ضخامت قطعه کار نشان می‌دهد که بیشترین میزان نازک‌شدگی (۶ درصد) در ناحیه شعاع گوشه سنبه اتفاق می‌افتد. با این حال اعمال ارتعاشات فراصوتی منجر به کاهش قابل توجه این نازک‌شدگی و بهبود حدود ۹/۸ درصدی در کیفیت قطعه کار شده است.
- ۵- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دامنه ارتعاش تا ۱۰ میکرومتر میزان نازک‌شدگی حداکثر ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. با این وجود افزایش بیش از حد دامنه ارتعاش می‌تواند منجر به افزایش مجدد نازک‌شدگی حداکثر شود.
- ۶- بررسی همزمان منحنی‌های نیروی سنبه و میزان نازک‌شدگی حداکثر حاکی از تاثیر قابل توجه هر دو پارامتر دامنه و فرکانس ارتعاش بر فرایند شکل‌دهی است. به طور کلی افزایش دامنه و فرکانس ارتعاش منجر به بهبود فرایند شکل‌دهی می‌شود. اما اعمال ارتعاش با دامنه بالا می‌تواند باعث ایجاد کرنش‌های پلاستیکی قابل توجه و در نتیجه



کاهش ضخامت در ورق شود. از سوی دیگر افزایش فرکانس ارتعاش به دلیل پدیده بازگشت ارتعاشی، منجر به کاهش اندکی در نیروی شکل‌دهی و افزایش جزیی در میزان نازک‌شدگی ورق می‌شود. بنابراین، بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی مستلزم تعیین دقیق مقادیر بهینه برای دامنه و فرکانس ارتعاشات فراصوتی است.

#### مراجع

- [1] Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K. B., (2005). Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure: Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters. *Journal of materials processing technology*, 166(1), pp 150-161.
- [2] Lucas, M., Gachagan, A., Cardoni, A., (2009). Research applications and opportunities in power ultrasonics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(12), pp 2949-2965.
- [3] Abramov, O. V., (2019). *High-intensity ultrasonics: theory and industrial applications*: CRC Press. Taylor & Francis Group, London, pp 15-21.
- [4] Ensminger, D., Bond, L., (2011). *Ultrasonics: Fundamentals. Technology and Applications*, Markel Decker Inc, New York.
- [5] Blaha, F., Langenecker, B., (1955). Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration. *Natuwissenschaften* 42: 556. In.
- [6] Wen, T., Wei, L., Chen, X., Pei, C. L., (2011). Effects of ultrasonic vibration on plastic deformation of AZ31 during the tensile process. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 18(1), pp 70-76.
- [7] Hung, J. C., Hung, C., (2005). The influence of ultrasonic-vibration on hot upsetting of aluminum alloy. *Ultrasonics*, 43(8), pp 692-698.
- [8] Dong, S., Dapino, M. J., (2014). Elastic-plastic cube model for ultrasonic friction reduction via Poisson's effect. *Ultrasonics*, 54(1), pp 343-350.
- [9] Hu, J., Shimizu, T., Yang, M., (2018). Investigation on dynamic impact effect of ultrasonic-assisted compression test. In *Materials Science Forum*, 920, pp 102-107.
- [10] Fartashvand, V., Abdullah, A., Vanini, S. S., (2017). Investigation of Ti-6Al-4V alloy acoustic. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, pp 744-749.
- [11] Kumar, V., Hutchings, I., (2004). Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration. *Tribology International*, 37(10), pp 833-840.
- [12] Dong, S., Dapino, M. J., (2014). Elastic-plastic cube model for ultrasonic friction reduction via Poisson's effect. *Ultrasonics*, 54(1), pp 343-350.
- [13] Shahri, S. E., Boroughani, S. A., Khalili, K., Kang, B., (2015). Ultrasonic tube hydroforming, a new method to improve formability. *Procedia Technology*, 19, pp 90-97.
- [14] Dutta, R., Petrov, R., Delhez, R., Hermans, M., Richardson, I., Böttger, A., (2013). The effect of tensile deformation by in situ ultrasonic treatment on the microstructure of low-carbon steel. *Acta Materialia*, 61(5), pp 1592-1602.
- [15] Hung, J. C., Chiang, M. C., (2009). The influence of ultrasonic-vibration on double backward-extrusion of aluminum alloy. Paper presented at the *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2, pp 1-13.
- [16] Liu, X., Wu, D., Zhang, J., Hu, X., Cui, P., (2019). Analysis of surface texturing in radial ultrasonic vibration-assisted turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 267, pp 186-195.
- [17] Wu, L., Zhao, C., Cao, M., Han, X., (2021). Effect of ultrasonic and low frequency vibrations on friction coefficient at die radius in deep drawing process. *Journal of Manufacturing Processes*, 71, pp 56-69.
- [18] Liu, S., Xie, T., Han, J., Shan, X., (2022). Stress superposition effect in ultrasonic drawing of titanium wires: An experimental study. *Ultrasonics*, 125, p 106775.
- [19] Sedaghat, H., Xu, W., Zhang, L., (2019). Ultrasonic vibration-assisted metal forming: Constitutive modelling of acoustoplasticity and applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 265, pp 122-129.





- [20] Modanloo, V., Akhoundi, B., Mashayekhi, A., Talebi-Ghadikolaee, H., Zeinolabedin Beygi, A., (2022). The study of forming of steel cups using hydrodynamic deep drawing process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 9(8), pp 56-64.
- [21] Kalpakjian, S., (2017). *Manufacturing processes for engineering materials*: Addison Wesley Longman, India.
- [22] Xiaojing, L., Yongchao, X., Shijian, Y., (2008). Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation. *Journal of Materials Sciences and Technology*, 24(03), pp 395-399.
- [23] Rose, J., (2014). *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*: Cambridge University Press.
- [24] Eftekhari Shahri, S. E., Lakhi, M., Taheridoustabad, I., (2023). Numerical and experimental investigation of the ultrasonic vibration effects on the tube hydroforming process in a die with a square cross-section. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(1), pp 197-207.
- [25] Malekipour, E., Heidary, H., Majd, N. S., Mazdak, S., Sharifi, E., (2020). Effect of resonant frequency variation on the ultrasonically assisted deep drawing process: numerical and experimental study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, pp 2243-2264.
- [26] Gorji, A., Alavi-Hashemi, H., Bakhshi-Jooybari, M., Nourouzi, S., Hosseinipour, S. J., (2011). Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, pp 915-927.