



## کشش عمیق هیدرودینامیکی به کمک ارتعاشات فراصوتی: مطالعه شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای

مهدی سهراب خانی<sup>۱</sup>، مهدی ظهور<sup>۲\*</sup>، شهرام اعتمادی حقیقی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
۲. گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

\* نویسنده مسئول: mzohoor@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

<https://doi.org/10.82385/jacms.2025.1202307>

### چکیده

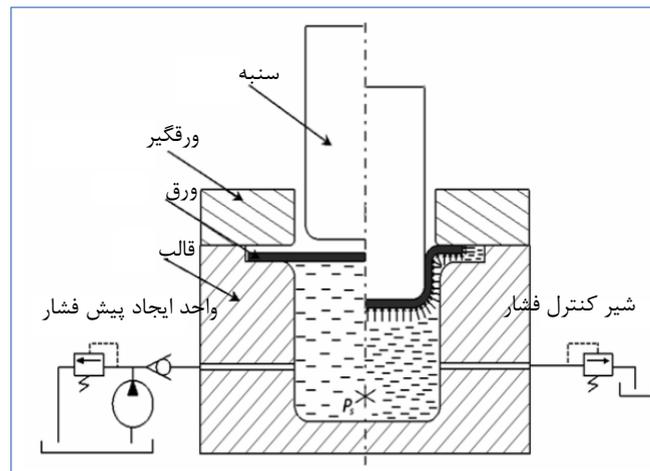
فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با کمک ارتعاشات فراصوتی، در مقایسه با روش متداول کشش عمیق هیدرودینامیکی، شیوه‌ای پیشرفته محسوب می‌شود که به بهبود چشمگیر قابلیت شکل‌پذیری و کاهش نیروی لازم برای شکل‌دهی می‌انجامد. در این فناوری نوین، ابزار شکل‌دهی تحت نوساناتی با دامنه کم و فرکانس بالا قرار می‌گیرد. هدف اصلی از پژوهش حاضر، بررسی پارامترهای مختلف موثر بر رفتار تغییر شکل قطعات استوانه‌ای نازک است که از طریق فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با ارتعاشات فراصوتی تولید می‌شوند. بدین منظور، با بهره‌گیری از روش اجزای محدود، قالب به عنوان ابزار ارتعاشی به صورت طولی و با ارتعاشات اجباری در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز و دامنه ارتعاش ۵ میکرومتر تحریک گردید. برای اطمینان از اعتبار مدل اجزای محدود مورد استفاده، مقادیر نیروی شکل‌دهی و توزیع ضخامت ورق حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شدند و تطابق قابل قبولی میان آنها مشاهده شد. در ادامه تاثیر پنج پارامتر بر روی حداکثر میزان نازک شدگی فنجان‌های استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ضریب اصطکاک میان ورق و ورق‌گیر، میزان نازک شدگی حداکثر به میزان ۱۲/۸٪ افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش شعاع گوشه سنبه و ماتریس، افزایش ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه و افزایش فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر به ترتیب با سهم‌های ۴۲/۳٪، ۴۱/۸٪، ۲۴/۴٪ و ۲۲/۵٪ موثرترین پارامترها در کاهش حداکثر نازک شدگی هستند.

**کلمات کلیدی:** ارتعاشات فراصوتی، کشش عمیق هیدرودینامیکی، فنجان استوانه‌ای، شبیه‌سازی اجزای محدود، نازک شدگی

### مقدمه

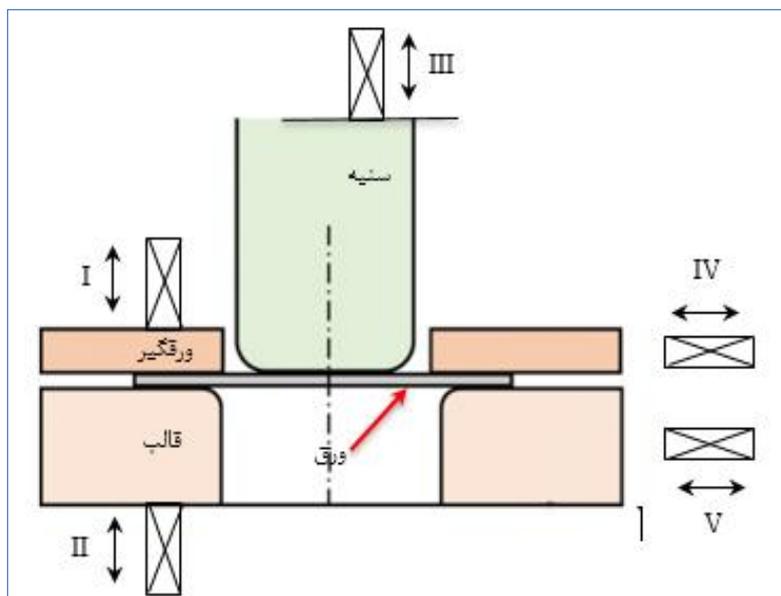
هیدروفورمینگ فرآیندی قدیمی و شناخته شده‌ای است که سالیان پیش به منظور شکل‌دهی ورق‌ها با استفاده از سیال ابداع و توسعه یافت و در دهه‌های اخیر با استقبال گسترده‌ای در صنایع خودروسازی و هواپیمایی مواجه گردید. در این فرآیند از یک سیال تحت فشار برای شکل‌دهی ورق استفاده می‌گردد؛ با حرکت رو به پایین سنبه، ورق در اثر فشار سیال در حفره قالب، به طور محکم به سطح سنبه فشرده می‌شود. این فناوری مزایای متعددی نسبت به کشش عمیق متداول دارد که از آن جمله می‌توان به کاهش نیاز به عملیات ثانویه، افزایش دقت ابعادی، قابلیت تولید قطعات با اشکال پیچیده، کاهش برگشت فنی و تقلیل هزینه‌های ابزار اشاره نمود [۱-۳]. پژوهشگران روش‌های گوناگونی را برای هیدروفورمینگ ورق پیشنهاد کرده‌اند از جمله هیدروفورمینگ با دیافراگم لاستیکی، کشش عمیق هیدرومکانیکی و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی<sup>۱</sup>. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در این روش فشار سیال به کل سطح زیرین و لبه ورق اعمال می‌گردد. پارامترهای موثر بر موفقیت و کیفیت محصول در این فرآیند عبارتند از: فشار محفظه، نیروی ورق‌گیر، اصطکاک بین ورق و سنبه، شعاع سنبه و ماتریس. این فرآیند برخی از محدودیت‌های موجود در کشش عمیق متداول را برطرف نموده و با اعمال فشار شعاعی می‌تواند قطعاتی با عمق بیشتر، یکنواختی بالاتر در ضخامت دیواره، دقت ابعادی بهتر و کیفیت سطح مطلوب‌تر تولید نماید. با این حال، با توجه به معایب هیدروفورمینگ ورق، از جمله افزایش نیروی شکل‌دهی و بروز پدیده‌هایی نظیر چروکیدگی و نازک‌شدگی ورق، می‌توان از فرآیندهای نوین به صورت ترکیبی با آن بهره گرفت.

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



شکل ۱: فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۴]

در سال‌های اخیر، پژوهشگران متعددی در راستای بهبود دقت شکل‌دهی، از طریق به‌کارگیری انرژی‌های اضافی گوناگون تلاش کرده‌اند. توجه به کاربرد انرژی فراصوت در فرآیندهای مختلف شکل‌دهی فلزات، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است [۵]. تحقیقات انجام‌شده توسط پژوهشگران، نشان‌دهنده اثرات سودمندی از جمله افزایش بازده فرآیند، کاهش نیروی شکل‌دهی، بهبود کیفیت سطح، و افزایش دقت ابعادی و هندسی قطعه کار است [۶]. امواج فراصوت، امواج الاستیکی با فرکانس بالاتر از محدوده شنوایی انسان (بالاتر از ۲۰ کیلو هرتز) هستند که قادر به عبور از درون اجسام و انتقال انرژی می‌باشند و دارای دامنه کم و فرکانس نوسانات بالایی هستند [۷]. بلاها و لانگنکر [۸] پیشگامان مطالعه تجربی رفتار تغییرشکل و تغییرات ریزساختاری بر روی تک‌بلور روی، تحت آزمایش کشش با کمک امواج فراصوت بودند. در این پژوهش، مجموعه‌ای از آزمایش‌های کشش تک‌محوری بر روی تک‌بلور روی، تحت امواج فراصوت با فرکانس ۵۰ تا ۸۰ کیلو هرتز انجام شد. آنها دریافتند که تنش تسلیم ماده در شرایط فراصوت، در مقایسه با آزمایش کشش استاتیکی، به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد؛ پدیده‌ای که بعدها تحت عنوان اثر بلاها، نرم‌شوندگی آکوستیک، و اثر حجمی مورد بررسی قرار گرفت [۹]. افزون بر این، استفاده از انرژی فراصوت موجب تغییر اصطکاک در فصل مشترک ابزار و قطعه کار شده و منجر به کاهش نیروی اصطکاک می‌شود که این مزیت تحت عنوان اثر سطحی تأیید شده است [۱۰]. شکل‌دهی فلز با ارتعاشات فراصوت به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن علاوه بر بار مورد استفاده در فرآیندهای سنتی ابزار شکل‌دهی با فرکانس ارتعاش بسیار بالا تحریک می‌شود [۱۱]. در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی مطابق شکل (۲) می‌توان ارتعاشات فراصوتی را به سنبله، قالب و ورق‌گیر به صورت محوری و شعاعی اعمال کرد. سهراب‌خانی و همکاران [۱۳] با بهره‌گیری از روش اجزای محدود، تاثیر ارتعاشات فراصوتی را در چهار وضعیت ارتعاشی (ارتعاش طولی ماتریس، ارتعاش طولی ورق‌گیر، ارتعاش طولی سنبله و ارتعاش شعاعی سنبله) بر ضخامت ورق در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که اعمال ارتعاش طولی به سنبله، منجر به کمترین میزان نازک‌شدگی می‌شود، در حالی که اعمال ارتعاش طولی به ورق‌گیر، بیشترین نازک‌شدگی را به همراه دارد. در پژوهشی دیگر، سهراب‌خانی و همکاران [۱۴] به مطالعه تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر نیروی شکل‌دهی در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی پرداختند. یافته‌های ایشان حاکی از آن بود که اعمال ارتعاش طولی به سنبله، بیشترین تاثیر را بر نیروی شکل‌دهی دارد، در حالی که ارتعاش طولی ورق‌گیر، کمترین تاثیر را در این زمینه نشان می‌دهد. این گروه پژوهشی در ادامه تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که نیروی شکل‌دهی با اعمال ارتعاشات فراصوتی به قالب، در مقایسه با وضعیت بدون ارتعاشات فراصوتی، با توجه به دامنه ارتعاش، بین ۱۰ تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد [۱۵]. علاوه بر این، اعمال ارتعاشات فراصوتی به قالب، منجر به کاهش نوسانات ضخامت و میزان حداکثر نازک‌شدگی ورق شده است [۱۶].



شکل ۲: روش‌های اعمال ارتعاش فراصوتی در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی [۱۲]

فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به دلیل مزایایی از قبیل عدم نیاز به آب‌بندی، اعمال فشار شعاعی در ناحیه فلنج ورق و ایجاد مسیر فشار از طریق حرکت سنبه، مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، شناخت دقیق و صحیح اثرات پارامترها و شرایط فرآیند در بهبود کیفیت فنجان استوانه‌ای، امری ضروری تلقی می‌شود. شایان ذکر است که بررسی تاثیر پارامترهای هندسی و فرایندی در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بر کیفیت فنجان استوانه‌ای، پیش‌تر مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است.

در این پژوهش، فرآیند شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، به منظور تعیین تاثیر پارامترهای فرآیند بر توزیع ضخامت شبیه‌سازی گردید. در ادامه، جهت اطمینان از صحت نتایج عددی، از آزمایش‌های تجربی بهره گرفته شد. نتایج حاصله نشان داد که توزیع ضخامت ورق و نیروی سنبه، تطابق قابل قبولی بین روش‌های عددی و تجربی دارند. همچنین، اثرات پارامترهای فرآیند، از جمله فشار سیال، ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه، ورق و ورق‌گیر، شعاع گوشه سنبه و ماتریس و فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر، بر میزان حداکثر نازک‌شدگی قطعه نهایی در شرایط فشار مطلوب، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی از پژوهش حاضر، تحلیل تاثیر پارامترهای هندسی و فرایندی بر شکل‌پذیری نهایی قطعه کار در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، از طریق اعمال ارتعاشات فراصوتی طولی به قالب است. به عبارت دیگر، این مطالعه بر آن است تا با بهره‌گیری توأمان از مزایای کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و اعمال ارتعاشات فراصوتی، به پارامترهای بهینه‌ای دست یابد که منجر به حداکثر شکل‌پذیری در فرآیند مذکور گردد.

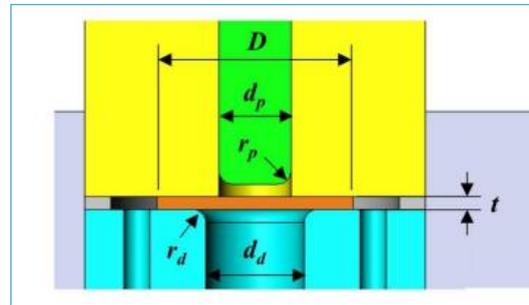
### مدل سازی عددی

به منظور کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان، از روش اجزای محدود به عنوان جایگزینی برای آزمایش‌های تجربی استفاده گردید. نرم‌افزار تجاری آباکوس به دلیل قابلیت بالای آن در تحلیل فرآیندهای شکل‌دهی پیچیده، برای شبیه‌سازی این فرآیند انتخاب شد. کلیه اجزای سیستم شامل قالب، ورق فلزی، سنبه و ورق‌گیر با نسبت مقیاس یک به یک در محیط نرم‌افزار مدل‌سازی شدند. در فرآیند مورد بررسی، از ورق فولادی St14 استفاده شد که خواص فیزیکی و مکانیکی آن، مطابق با اطلاعات ارائه شده در مرجع [۱۷] لحاظ گردیده است. جدول (۱) هندسه قالب شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



جدول ۱: ابعاد هندسی مجموعه قالب

اندازه (mm)			مشخصه
۲/۵			t : ضخامت ورق
۸۰			D : قطر اولیه ورق
۳۸/۵			$d_p$ : قطر سنبله
۴۴			$d_d$ : قطر ماتریس
۱۰	۸	۶	$r_p$ : شعاع گوشه سنبله
۹	۷	۵	$r_d$ : شعاع گوشه ماتریس
۲/۸	۲/۷	۲/۶	فاصله بین ورق گیر و ماتریس



شکل (۳): پارامترهای مجموعه قالب [۱۸]

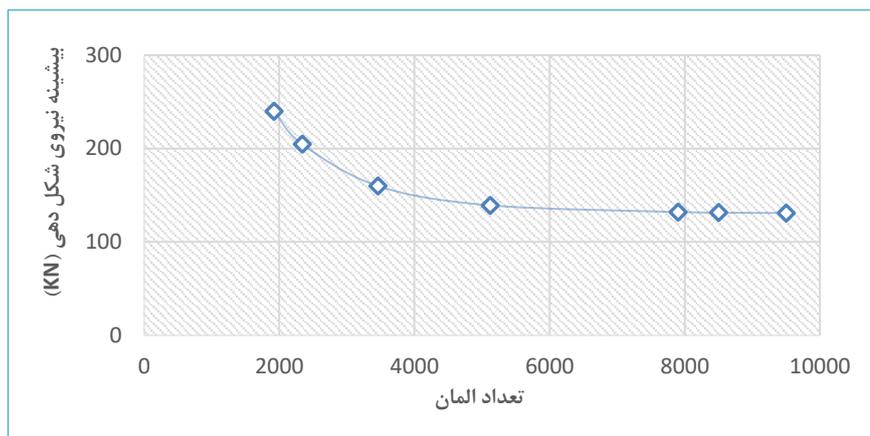
با توجه به ماهیت غیرخطی تحلیل و وقوع تغییر شکل‌های بزرگ از مدل رفتاری الاستوپلاستیک برای توصیف خواص مکانیکی ماده استفاده گردید. نظر به خواص مکانیکی تعریف شده برای ماده، سرعت جابجایی سنبله یا نرخ کرنش حاصل از آن، تأثیری بر نتایج شبیه‌سازی ندارد. دلیل این امر آن است که فرآیند شکل‌دهی سرد و خواص مکانیکی ماده و نمودار تنش-کرنش تعریف شده در محدوده مشخصی از نرخ کرنش معتبر می‌باشند [۱۹]. برای تحلیل عددی این مسئله، از حل گر دینامیکی صریح<sup>۱</sup> نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. الگوریتم تماسی که در شبیه‌سازی شکل‌دهی در نظر گرفته شده است، از نوع سطح به سطح می‌باشد که برای تعریف اصطکاک بین سنبله - ورق، ورق - ماتریس و ورق - ورق گیر به کار می‌رود. کشیده شدن ورق به داخل ماتریس توسط سطوح سنبله، باعث ایجاد نیروی اصطکاک لغزشی می‌گردد. از مدل اصطکاک کولمب برای تعریف تماس سطوح ورق و اجزای قالب استفاده شد و مقدار ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: مقادیر ضریب اصطکاک بین سطوح

اندازه (میلی‌متر)			مشخصه
۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۴	ضریب اصطکاک بین ورق با سنبله
۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	ضریب اصطکاک بین ورق با ورق‌گیر
۰/۰۴			ضریب اصطکاک سایر سطوح

جهت اعمال شرایط مرزی، یک گره مرجع<sup>۲</sup> برای هر یک از اجزای صلب تعریف گردید. از آنجا که مجموعه قالب به صورت صلب تحلیلی<sup>۳</sup> مدل‌سازی شده است، مش‌بندی آن ضرورت ندارد. به دلیل خواص ناهمسانگرد ورق فولادی و به منظور افزایش دقت، ورق به صورت سه‌بعدی شکل پذیر<sup>۴</sup> و با المان‌های هشت‌گه‌ای حجمی<sup>۵</sup> مدل‌سازی شد و در جهت ضخامت از ۵ المان استفاده گردید. با توجه به اهمیت اندازه المان در شبیه‌سازی و وابستگی نتایج به آن، تعیین اندازه بهینه برای المان ضروری است. برای تعیین اندازه مناسب المان چندین شبیه‌سازی با المان‌هایی در اندازه‌های گوناگون انجام شد و برای تعیین تعداد المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی ورق، از تکنیک همگرایی مش استفاده گردید. در شکل (۴) 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 به دست آمده افزایش تعداد المان‌ها از ۷۹۰۰ عدد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دقت مسئله نخواهد داشت و این مقدار به عنوان تعداد المان‌ها برای ورق در نظر گرفته می‌شود.

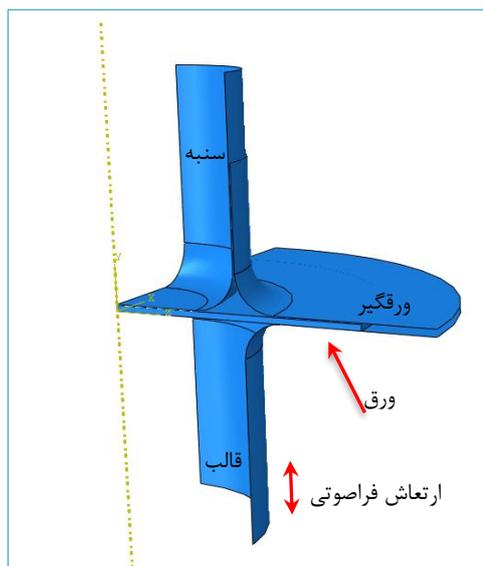
<sup>1</sup> Dynamic Explicit<sup>2</sup> Reference Point<sup>3</sup> Analytical Rigid<sup>4</sup> Deformable<sup>5</sup> C3D8R



شکل ۴: تاثیر تعداد المان بر بیشینه نیروی شکل دهی [۱۶]

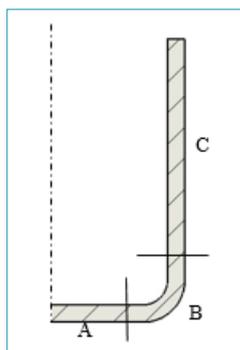
برای اعمال ارتعاشات فراصوتی، یک جابجایی طولی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۵ میکرومتر مطابق با رابطه (۱) به قالب اعمال گردید.

$$u = A \sin(\omega t) , \quad \omega = 2\pi f \quad (1)$$



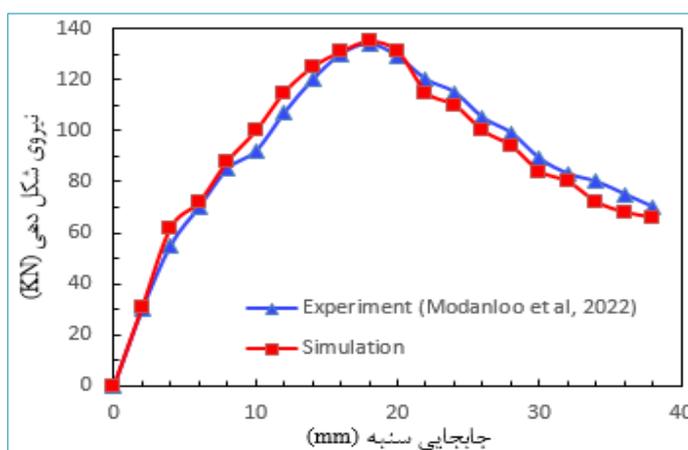
شکل ۵: مدل اجزای محدود مجموعه قالب

اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی از ارکان اساسی پژوهش‌های علمی به شمار می‌رود. در حوزه مسائل اجزای محدود اعتبارسنجی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا یک شبیه‌سازی قابل اطمینان می‌تواند به عنوان مبنایی معتبر برای بررسی سایر پارامترهای مورد مطالعه مورد استفاده قرارگیرد. در این پژوهش ابتدا نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی اعتبارسنجی گردید و در مرحله بعد به بررسی پارامترهای موثر بر شکل‌پذیری ورق پرداخته شد. به منظور اعتبارسنجی مدل اجزای محدود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی ارایه شده در مرجع [۱۷] مقایسه گردید. برای تحلیل تغییرات ضخامت ورق قطعه مورد نظر مطابق شکل (۶) به سه ناحیه کف قطعه کار (A)، شعاع گوشه سنبله (B) و دیواره (C) تقسیم بندی شد.

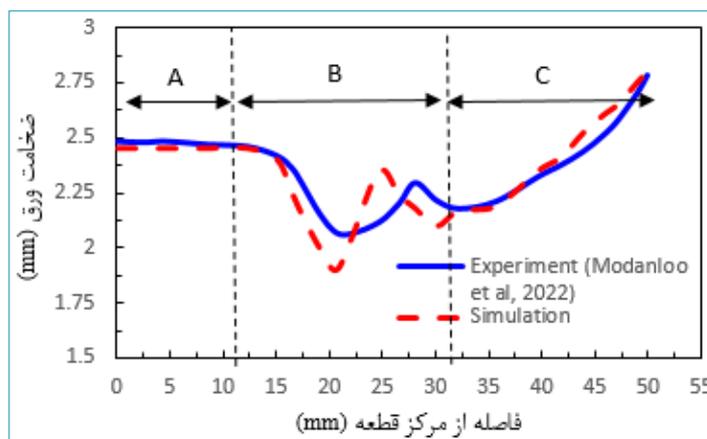


شکل ۶: ناحیه‌های مختلف مورد مطالعه در فنجان استوانه‌ای

برای اعتبار سنجی مدل مذکور، از نیروی شکل‌دهی و ضخامت ورق فنجان‌های حاصل از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی استفاده گردید. مقادیر نیروی شکل‌دهی و توزیع ضخامت به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) ارائه و با یکدیگر مقایسه شدند. بر اساس نمودارهای ارائه شده، روند کلی پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی و توزیع ضخامت در شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌ها یکسان بوده و همانطور که در این شکل قابل مشاهده است تطابق قابل توجهی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۷: تطابق بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی [۱۶]

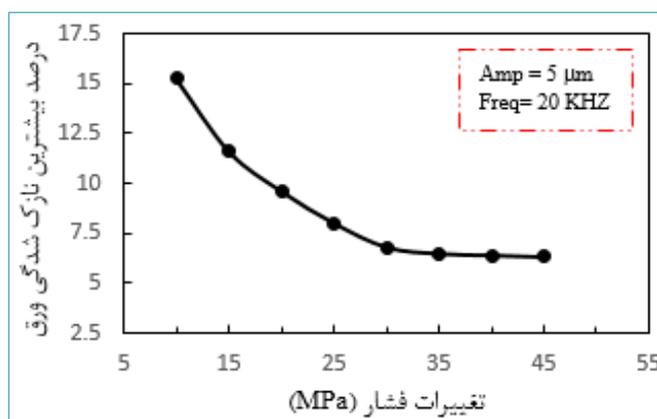


## بحث و بررسی نتایج

به‌طور کلی، پارامترهای موثر بر شکل‌پذیری ورق در فرایند هیدروفورمینگ به سه دسته پارامترهای هندسی، پارامترهای مواد و پارامترهای فرایندی تقسیم می‌شوند. برای یک ماده مشخص، پارامترهای مربوط به خواص مواد از قبیل توان کرنش‌سختی، نسبت تنش اسمی و نسبت ناهمسانگردی در مقایسه با پارامترهای هندسی و فرایندی، تاثیر به مراتب کمتری بر شکل‌پذیری ورق دارند [۲۰ و ۲۱]. علاوه بر این، در اغلب موارد برای یک قطعه کار معین، امکان ایجاد تغییرات در پارامترهای ماده بسیار محدود است. از این رو در پژوهش حاضر، مطالعه پارامترهای هندسی و فرایندی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله پارامترهای فرایندی و هندسی که بر فرایند هیدروفورمینگ ورق تاثیرگذار هستند، می‌توان به فشار محفظه سیال، شرایط اصطکاکی بین ورق و اجزای مختلف قالب، شعاع گوشه سنبه، شعاع ورودی قالب و فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس اشاره نمود که در این مقاله به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. سطوح انتخابی پارامترهای مورد بررسی با بهره‌گیری از شرایط پایه فرایند، به گونه‌ای تعیین شده‌اند که قطعات شکل‌دهی شده عاری از هرگونه عیب مانند چروکیدگی و پارگی باشند. به عنوان مثال، سطح اولیه انتخاب شده برای پارامتر فشار، حداقل فشار نهایی لازم برای شکل‌دهی بدون عیب قطعه کار است.

## اثر فشار سیال

با توجه به اهمیت فشار نهایی در بروز پارگی و تاثیر آن بر توزیع ضخامت قطعات تولید شده، به‌منظور بررسی تاثیر این پارامتر بر کیفیت نهایی قطعه شکل‌داده شده، فشارهای نهایی متفاوت مورد مطالعه قرار گرفتند. کاهش سطح فشار نهایی، فرآیند را به کشش عمیق معمولی تغییر می‌دهد و به دلیل افزایش بیش از حد تنش کششی، منجر به بروز پارگی در ناحیه شعاع نوک سنبه (ناحیه B) می‌شود. با افزایش فشار، اصطکاک بین سنبه و ورق افزایش یافته و لغزش ورق بر روی سنبه کاهش می‌یابد در نتیجه حداکثر نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. به منظور تعیین میزان بهینه فشار برای دستیابی به قطعه‌ای با بهترین توزیع ضخامت، منحنی‌های تغییرات کاهش ضخامت ناحیه B در فشارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. شکل (۸) منحنی تغییرات کاهش ضخامت قطعه شکل‌داده شده را در این ناحیه بر حسب فشار نهایی سیال نشان می‌دهد. مطابق شکل، بیشترین میزان کاهش ضخامت در فشار نهایی ۱۰ مگاپاسکال مشاهده می‌شود. همان‌طور که از نمودار مشهود است، با افزایش فشار تا حدود ۳۴ مگاپاسکال نرخ کاهش ضخامت به شدت افزایش می‌یابد؛ اما پس از این مقدار فشار، شیب نمودار تقریباً افقی می‌شود بنابراین می‌توان استنباط کرد که افزایش فشار از ۱۰ تا ۳۴ مگاپاسکال تاثیر قابل توجهی در جلوگیری از کاهش ضخامت در نقاط مختلف قطعه، به ویژه در این ناحیه بحرانی دارد. با این حال، افزایش فشار بیش از ۳۴ مگاپاسکال تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضخامت ناحیه بحرانی نخواهد داشت.

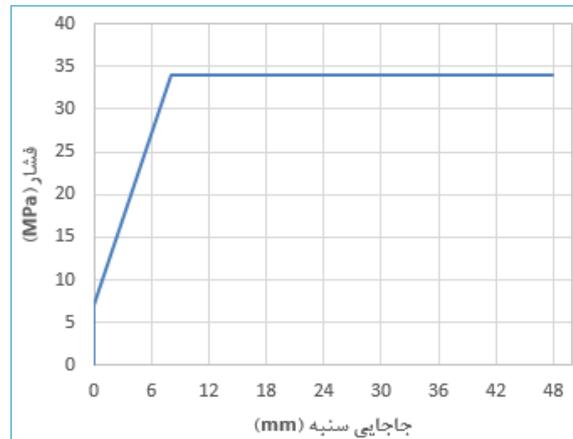


شکل ۸: منحنی بیشترین نازک‌شدگی ورق در فشارهای مختلف

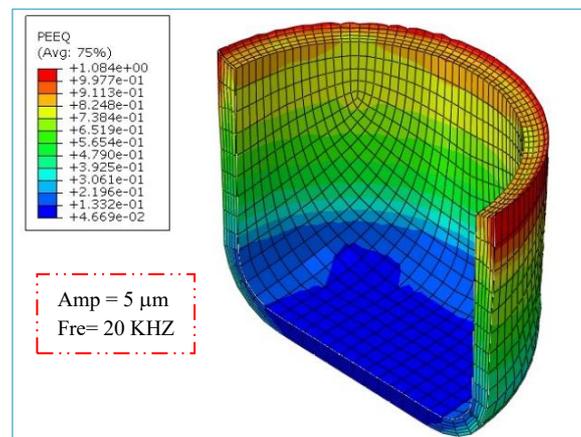
همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، افزایش فشار به کاهش میزان نازک‌شدگی منجر می‌شود. با این حال، افزایش فشار به طور قابل توجهی نیروی شکل‌دهی را نیز افزایش می‌دهد. از این رو، ضروری است که مقدار فشار به گونه‌ای انتخاب شود که ضمن کاهش نازک‌شدگی، از افزایش بیش از حد نیروی اعمالی نیز ممانعت به‌عمل آید. بر اساس نتایج حاصل از این بخش، مسیر فشار بهینه در



شرایط مورد بررسی، مسیری با حداکثر فشار ۳۴ مگاپاسکل تعیین گردید. این مسیر فشار مبنای انجام شبیه‌سازی‌های بعدی به منظور بررسی تاثیر سایر پارامترها بر ضخامت فنجان استوانه‌ای شکل قرار گرفت. مسیر تغییرات فشار در شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی در شکل (۹) نشان داده شده است. فشار اولیه که به عنوان فشار اولیه تحذب شناخته می‌شود، قبل از آغاز حرکت سنبه توسط یک پمپ هیدرولیکی به سطح زیرین ورق اعمال می‌گردد. پس از آنکه سنبه به صورت عمودی به درون قالب حرکت کرده و فرآیند کشش ورق آغاز گردید، فشار درون محفظه قالب به صورت تدریجی تا رسیدن به مقدار تنظیم‌شده ۳۴ مگاپاسکل بر روی شیر کنترل فشار افزایش می‌یابد (شکل ۱۰).



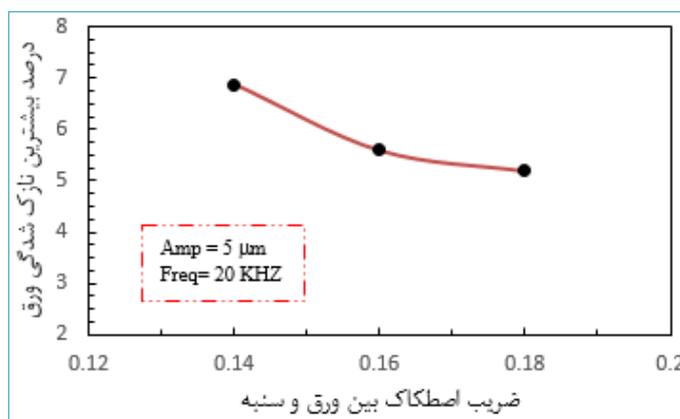
شکل ۹: توزیع فشار اعمال شده در مدل‌های شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی [۱۷]



شکل ۱۰: قطعه شکل داده شده با فشار نهایی ۳۴ مگاپاسکل

#### اثر ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه

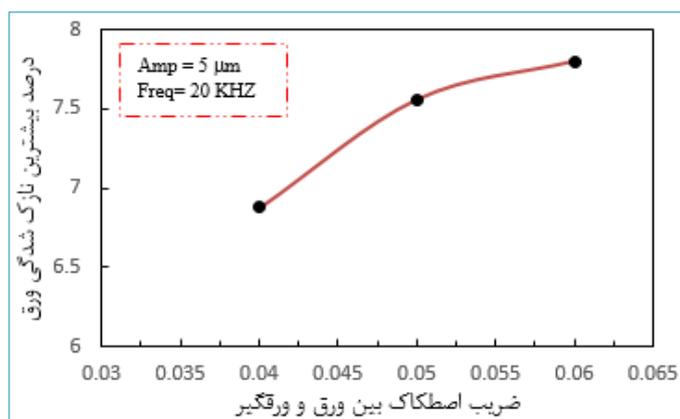
نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در شکل (۱۱) ارائه شده است. بررسی نمودار نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق از ۰/۱۴ به ۰/۱۶ حداکثر نازک شدگی در ناحیه شعاع گوشه سنبه از ۶/۸۸٪ به ۵/۲٪ کاهش می‌یابد. این امر بدان سبب است که با افزایش اصطکاک، ورق به سطح سنبه چسبیده و هم‌زمان با حرکت سنبه به سمت محفظه قالب، جریان ورق با سرعت کمتری رخ می‌دهد؛ در نتیجه میزان کاهش ضخامت کمتر می‌شود.



شکل ۱۱: منحنی نازک‌شدگی بر حسب ضریب اصطکاک ورق با سنبه

### اثر ضریب اصطکاک بین ورق و ورق‌گیر

شبیه‌سازی‌ها با اعمال ضرایب اصطکاک متفاوت نشان می‌دهند که با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق و ورق‌گیر از ۰/۰۴ به ۰/۰۶ حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه شعاع گوشه از ۶/۸٪ به ۷/۸٪ افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل آن است که با بالا رفتن اصطکاک، ورق به ورق‌گیر چسبیده و هم‌زمان با حرکت سنبه، میزان کشش در ورق افزایش می‌یابد و در نتیجه نازک‌شدگی بیشتری در ورق رخ می‌دهد. در شکل (۱۲) نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۱۲: منحنی نازک‌شدگی بر حسب ضریب اصطکاک ورق با ورق‌گیر

### اثر شعاع گوشه سنبه

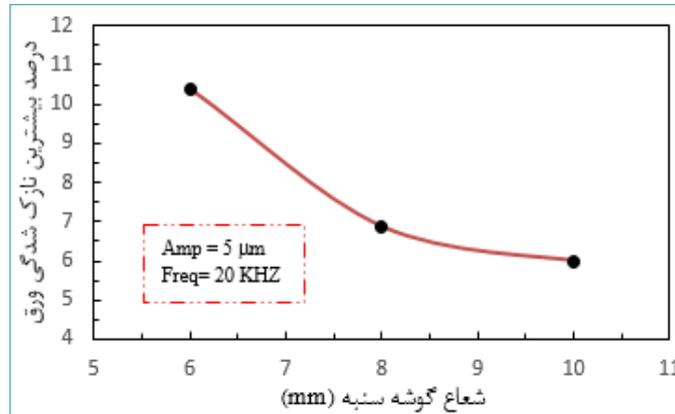
هندسه سنبه نقش بسزایی در توزیع ضخامت و میزان نازک‌شدگی ورق ایفا می‌کند. لبه‌های تیز سنبه تنش موضعی بالایی را در ناحیه تماس ایجاد می‌کند که می‌تواند منجر به پارگی و گسیختگی ورق شود. از سوی دیگر، افزایش بیش از حد شعاع لبه سنبه، احتمال چروکیدگی ورق را افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تأثیر شعاع گوشه سنبه بر میزان حداکثر نازک‌شدگی ورق در شکل (۱۳) ارائه شده است. همانطور که از شکل مشخص است، با افزایش شعاع گوشه سنبه از ۶ به ۱۰ میلی‌متر تغییرات ضخامت در این ناحیه از ۱۰/۴٪ به ۶٪ کاهش می‌یابد و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌گردد.

### اثر شعاع گوشه ماتریس

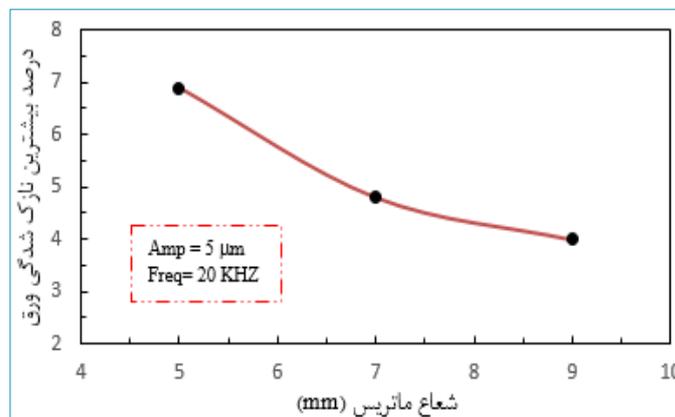
همان‌گونه که در شکل (۱۴) مشخص است، با افزایش شعاع ورودی ماتریس از ۵ به ۹ میلی‌متر حداکثر میزان نازک‌شدگی ورق از ۶/۸۸٪ به ۴٪ کاهش می‌یابد. افزایش شعاع گوشه ماتریس، حرکت ورق بر روی سطح قالب را تسهیل نموده و در نتیجه، جریان



ورق روان تر شده و میزان نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، شعاع کوچک گوشه ماتریس، مشابه سنبه منجر به نازک‌شدگی بیش از حد دیواره‌های ورق و در نهایت پارگی آن می‌گردد.



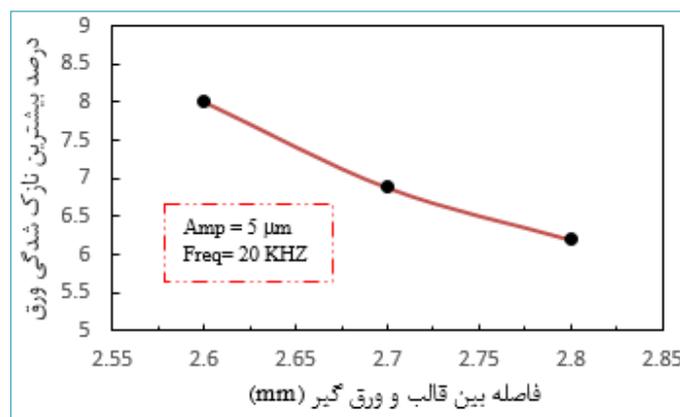
شکل ۱۳: منحنی نازک‌شدگی بر حسب شعاع گوشه سنبه



شکل ۱۴: منحنی نازک‌شدگی بر حسب شعاع گوشه ماتریس

#### اثر فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس

در فرآیند کشش عمیق هیدروپلاستیکی، به منظور اعمال فشار شعاعی به لبه‌های ورق، فاصله‌ای میان ورق‌گیر و ماتریس تعبیه می‌شود. این فاصله به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که اندکی از ضخامت ورق بیشتر باشد. در پژوهش حاضر، جهت بررسی تاثیر این فاصله، شبیه‌سازی فرآیند در سه فاصله متفاوت، مطابق با اطلاعات مندرج در جدول (۱) صورت پذیرفت. در مراحل اولیه فرآیند شکل‌دهی، با اعمال فشار، ورق به سمت بالا حرکت نموده و وارد حفره ورق‌گیر می‌گردد. با توجه به ارتفاع پله، که بیش از ضخامت ورق است، سیال به سمت بیرون جریان یافته و به دیواره پله برخورد می‌کند. در نتیجه، با کاهش قطر ورق در حین فرآیند، سیال به لبه‌های ورق فشار وارد کرده و آن را به سمت داخل هدایت می‌کند. این پدیده موجب تسهیل جریان ورق به سمت داخل حفره ماتریس می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش فاصله میان ماتریس و ورق‌گیر، میزان حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه شعاع گوشه سنبه از ۸٪ به ۶/۲٪ کاهش می‌یابد. افزایش این فاصله منجر به افزایش میزان نشست سیال و در نتیجه کاهش فشار شعاعی می‌گردد. بنابراین، تعیین مقدار بهینه فاصله میان ماتریس و ورق‌گیر امری ضروری است؛ زیرا افزایش بیش از حد این فاصله، عملکرد مثبت فشار شعاعی را در بهبود توزیع ضخامت کاهش می‌دهد. نمودار درصد حداکثر نازک‌شدگی بر حسب فاصله میان ورق‌گیر و ماتریس در شکل (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل ۱۵: منحنی نازک شدگی برحسب فاصله بین ورق گیر و ماتریس

### نتیجه گیری

در این مقاله، فرآیند شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای از جنس فولاد St14 به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با اعمال فشار شعاعی و ارتعاشات فراصوتی با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. پس از تحلیل تاثیر پارامترهای هندسی و فرایندی بر میزان حداکثر نازک شدگی ورق نتایج زیر حاصل گردید:

➤ افزایش فشار حداکثر منجر به کاهش میزان نازک‌شدگی می‌شود. در واقع، با افزایش فشار حداکثر، فشار سیال نقش پشتیبان را برای ورق ایفا کرده و سبب چسبندگی ورق به سطح سنبه می‌گردد که در نتیجه آن، نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. جهت تعیین فشار بهینه، مسیرهای مختلف فشار مورد مطالعه قرار گرفت و مشاهده شد که در فشارهای کمتر از ۱۰ مگاپاسکال، به دلیل ایجاد تنش‌های بالا در ناحیه تماس نوک سنبه با ورق، میزان نازک‌شدگی ورق قابل توجه است. نتایج حاکی از آن است که در فشار ۳۴ مگاپاسکال کیفیت قطعه مطلوب بوده و افزایش بیشتر فشار، بهبود قابل ملاحظه‌ای در توزیع ضخامت قطعه ایجاد نمی‌کند.

➤ افزایش ضریب اصطکاک در سطح تماس سنبه و ورق، کاهش حداکثر نازک‌شدگی را به میزان ۲۴/۱۴ درصد به دنبال دارد.

➤ افزایش ضریب اصطکاک بین ورق و ورق‌گیر، حداکثر نازک‌شدگی را به میزان ۱۲/۸٪ افزایش می‌دهد.

➤ با افزایش شعاع گوشه سنبه، تغییرات ضخامت در این ناحیه به میزان ۴۲/۳٪ کاهش یافته و توزیع ضخامت ورق یکنواخت‌تر می‌گردد.

➤ با افزایش شعاع گوشه ماتریس، میزان حداکثر نازک‌شدگی ورق ۴۱/۸٪ کاهش یافته و جریان ورق در دهانه ورودی قالب تسهیل می‌گردد.

➤ افزایش فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس، حداکثر نازک‌شدگی را به میزان ۲۲/۵٪ کاهش می‌دهد.

### مراجع

- [1] Zhang, S. H., Wang, Z. R., Xu, Y., Wang, Z. T., Zhou, L. X., (2004). Recent developments in sheet hydroforming technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3), pp 237-241.
- [2] Oh, S. I., Jeon, B. H., Kim, H. Y., Yang, J. B., (2006). Applications of hydroforming processes to automobile parts. *Journal of materials processing technology*, 174(1-3), pp 42-55.
- [3] Hossein Seyedkashi, S. M., Panahizadeh R, V., Xu, H., Kim, S., Moon, Y. H., (2013). Process analysis of two-layered tube hydroforming with analytical and experimental verification. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27, pp 169-175.
- [4] Modanloo, V., Gorji, A., Bakhshi-Jooybari, M., (2016). Effects of forming media on hydrodynamic deep drawing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, pp 2237-2242.



- [5] 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.
- [6] Abramov, O. V. (2019). High-intensity ultrasonics: theory and industrial applications. CRC Press.
- [7] Abedini, R., Abdullah, A., Alizadeh, Y., Fartashvand, V., (2017). A Roadmap for application of high-power ultrasonic vibrations in metal forming. Modares Mechanical Engineering, 16(10), pp 323-334.
- [8] Blaha, F., Langenecker, B., (1955). Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration. Naturwissenschaften, 42(556), pp 1-10.
- [9] Rasoli, M. A., Abdullah, A., Farzin, M., Tehrani, A. F., Taherizadeh, A., (2012). Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process. Journal of Materials Processing Technology, 212(6), pp 1443-1452.
- [10] Dong, S., Dapino, M. J., (2014). Elastic-plastic cube model for ultrasonic friction reduction via Poisson's effect. Ultrasonics, 54(1), pp 343-350.
- [11] Ning, F., Cong, W., (2020). Ultrasonic vibration-assisted (UV-A) manufacturing processes: State of the art and future perspectives. Journal of Manufacturing Processes, 51, pp174-190.
- [12] Jimma, T., Kasuga, Y., Iwaki, N., Miyazawa, O., Mori, E., Ito, K., Hatano, H., (1998). An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process. Journal of Materials Processing Technology, 80, pp 406-412.
- [13] Sohrabkhani, M., Zohoor, M., Etemadi Haghighi., (2024). An Investigation on Forming Force of Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Ultrasonic Vibration. 3th international conference of electrical engineering, computer, mechanics and new technologies related to artificial intelligence, Mashhad.
- [14] Sohrabkhani, M., Zohoor, M., Etemadi Haghighi., (2024). Effect of ultrasonic vibration on forming force in the hydrodynamic deep drawing process. The first international conference on information technology engineering, mechanics, electricity and engineering sciences, Birmingham.
- [15] Sohrabkhani, M., Zohoor, M., Etemadi Haghighi., (2024). Ultrasonic Vibration Assisted Hydrodynamic Deep Drawing: An Investigation into Sheet Thinning. The first international conference on electricity, mechanics, information technology and aerospace in engineering sciences, Lisbon.
- [16] Sohrabkhani, M., Zohoor, M., Etemadi Haghighi., (2024). Ultrasonic Vibration- Assisted Hydrodynamic Deep Drawing: An Investigation into Sheet Thinning and Forming Force. Journal of New Applied and Computational Findinigs in Mechanical Systems, 4 (4), pp 1-13.
- [17] Modanloo, V., Akhoundi, B., Mashayekhi, A., Talebi-Ghadikolae, 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.
- [18] Kimura, S., & Furushima, T. (2023). New small-scale hydromechanical deep-drawing process using die-integrated active high-pressure generation system. International Journal of Material Forming, 16(5), 46.
- [19] Kalpakjian, S., (2017). Manufacturing processes for engineering materials: Addison Wesley Longman, India.
- [20] Li, B., Nye, T. J., Metzger, D. R. (2006). Multi-objective optimization of forming parameters for tube hydroforming process based on the Taguchi method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28, pp 23-30.
- [21] Sharma, A. K., Rout, D. K. (2009). Finite element analysis of sheet hydromechanical forming of circular cup. Journal of Materials Processing Technology, 209(3), pp 1445-1453.