



مطالعه و تحلیل تجربی تأثیر روانکار و تحریک اولتراسونیک ابزار سرنیمکروی بر مولفه عمودی نیروی شکل‌دهی در فرآیند SPIF

علیرضا وحدتی^{۱*} و مهدی وحدتی^۲

^۱ عضو هیأت علمی، گروه مهندسی مکانیک، واحد نایین، دانشگاه آزاد اسلامی، نایین، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹

چکیده

ورق‌های آلومینیم با توجه به دارا بودن ویژگی‌های خاص، کاربرد چشمگیری در صنایع گوناگون یافته‌اند. از سوی دیگر، به دلیل قابلیت شکل‌پذیری کم، شکل‌دهی آن‌ها در دمای اتاق به آسانی صورت نمی‌پذیرد. از این‌رو، برای تسهیل شکل‌دهی، می‌توان از روش‌های شکل‌دهی گرم نیز استفاده نمود که این امر منجر به اکسیداسیون ماده می‌شود. در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای (SPIF)، ورق فلزی با حرکت موضعی ابزار سرنیمکروی، شکل‌دهی می‌شود. در این پژوهش، با اعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار، فرآیند SPIF به کمک ارتعاش اولتراسونیک (UVaSPIF) توسعه داده شد که این امر سبب بهبود قابلیت شکل‌پذیری ورق در دمای اتاق گردید. در مقاله پیش‌رو، تأثیر ارتعاش اولتراسونیک و روانکار بر رفتار نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور ابزار سرنیمکروی به قطر ۲۰ میلیمتر و با فرکانس طبیعی ۲۰/۴ کیلوهرتز، طراحی و ساخته شد. ظهور مود طولی ارتعاش و وقوع پدیده‌ی رزونانس در ابزار توسط نتایج حاصل از تحلیل مودال و تست تجربی به تأیید رسید. نتایج تجربی حاصل از آزمون شیار مستقیم بر روی ورق فلزی Al 1050-O نشان داد که در فرآیند UVaSPIF، اعمال ارتعاش بدون حضور روانکار و در فرآیند SPIF، استفاده از روانکار، بیشترین تأثیر را بر کاهش مولفه عمودی نیروی شکل‌دهی دارد.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی تدریجی؛ ارتعاش اولتراسونیک؛ تحلیل مودال؛ روانکار؛ نیروی شکل‌دهی.

Experimental Analysis the Effect of Lubricant and Ultrasonic Excitation of Hemispherical-head Tool on the Vertical Component of Forming Force in SPIF

A.R. Vahdati^{1,*}, M. Vahdati²

¹ Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Naein Branch, Islamic Azad University, Naein, Iran.

² Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

Aluminum alloys have been widely used in various industries, due to its special characteristics. On the other hand, due to its low formability, the forming of these alloys is difficult at room temperature. Therefore, in order to facilitate the forming, warm forming methods can be used, which will lead to the oxidation of the material. In Single Point Incremental Forming (SPIF), a sheet metal is formed by a progression of localized plastic deformation using a hemispherical-head tool. In this study, by applying ultrasonic vibration to the tool, Ultrasonic Vibration assisted SPIF (UVaSPIF) process was developed that improved the sheet formability at room temperature. In present paper, the effect of ultrasonic vibration and lubricant on behavior of the forming force has been investigated. Consequently, a hemispherical-head tool ($D = 20$ mm) with natural frequency of 20.4 kHz was designed and manufactured. The occurrence of longitudinal mode and resonance phenomenon has been confirmed by the results of modal analysis and experimental test. Then, Al 1050-O sheet was used as a work material. Experimental results obtained from straight groove test, indicate that in UVaSPIF, imposing of vibration without lubricant has the greatest impact on reducing the vertical component of the forming force whereas in SPIF, the lubricant has the greatest impact on reducing the vertical component of the forming force.

Keywords: Incremental Forming; Ultrasonic Vibration; Modal Analysis; Lubricant; Forming Force.

۱- مقدمه

آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل تمایل بسیار اندک به شکست ترد در دماهای پایین، عموماً در صنایع دریایی مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرند [۱]. سازه‌های دریایی به عنوان سازه‌های حساس وزنی محسوب می‌شوند که بایستی شناوری و وزن سازه در یک وضعیت تعادلی قرار گیرد. از جمله تأثیرات مثبت کاهش وزن سازه می‌توان به افزایش قابلیت ترابری، افزایش حجم موتور و افزایش عمق کاری (زیردریایی) اشاره نمود [۲]. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در حوزه طراحی، بهینه‌سازی و کاربرد آلیاژهای آلومینیم در سازه‌های دریایی انجام شده است. ربات بدون سرنشین خودکار به عنوان یکی از تجهیزات دریایی کشورهای پیشرفته می‌باشد که حدود ۹۰ درصد از بدنه آن از آلیاژهای آلومینیم ساخته شده است. مقاومت خوردگی، نسبت استحکام به وزن، قابلیت شکل‌پذیری و قابلیت جوشکاری از جمله پارامترهای فنی و مهم می‌باشند که در سازه‌های دریایی مورد توجه قرار می‌گیرند.

از این‌رو، امروزه تولید مدرن نیازمند استفاده از روش‌هایی انعطاف‌پذیر و تطبیق‌پذیر می‌باشد تا بتواند الزامات محصولات جدید را برآورده کند. یکی از جوانب مهم در رابطه با توسعه محصولات جدید، امکان تولید نمونه‌های اولیه در کمترین زمان و با حداقل هزینه می‌باشد. از این‌رو، در میان فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی، فرآیند شکل‌دهی تدریجی (ISMF)^۱ روشی مطمئن برای ساخت و تولید نمونه اولیه در حجم کوچک می‌باشد. در این فرآیند ابزاری با هندسه ساده و سرنیمکروی در مسیری معین بر روی ورق فلزی حرکت می‌کند و تغییرشکل پلاستیکی موضعی و کنترل شده‌ای اعمال می‌نماید تا هندسه نهایی ایجاد شود [۳]. استفاده از روانکار در فرآیند ISMF به منظور کاهش اصطکاک سطوح مشترک میان ابزار و ورق و همچنین بهبود کیفیت سطح، ضروری می‌باشد [۲،۴]. حضور روانکار صرفنظر از نوع آن، نقش مهمی در جلوگیری از ایجاد سایش بر روی سطوح ورق و ابزار ایفا می‌کند.

فرآیند ISMF شامل دو زیرمجموعه می‌باشد: فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای (SPIF) و فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای (TPIF) [۵]. در فرآیند SPIF، هیچ‌گونه قالبی در زیر ورق به عنوان پشتیبان استفاده نمی‌شود [۶]. در صورتی که در فرآیند TPIF، ورق فلزی توسط بخشی از یک قالب یا قالب کامل، پشتیبانی شده است [۷]. مطالعه‌ی رفتار نیروی شکل‌دهی در این فرآیند نشان می‌دهد که افزایش اندازه‌ی گام عمودی ابزار، قطر ابزار، زاویه‌ی شیب دیواره و ضخامت ورق به همراه کاربرد ورق‌های فلزی و آلیاژی سبک وزن با استحکام بالا، منجر به افزایش نیروی عملی به ابزار می‌شود [۴،۸].

از سوی دیگر، تأثیر سودمند انرژی اولتراسونیک بر روی رفتار تغییرشکل فلزات و آلیاژها به ویژه در رابطه با کاهش نیروی شکل‌دهی، توسط محققان مورد تأیید قرار گرفته است. تحقیقات انجام شده در ارتباط با تأثیر انرژی اولتراسونیک با فرکانس بالا در طی تست‌های کشش و فشار فلزات مختلف [۹-۱۱] نشان داد که به‌کارگیری انرژی اولتراسونیک در طی تغییرشکل نمونه، استحکام تسلیم ماده را کاهش می‌دهد. پدیده‌ی نرم‌شدگی جنس ماده که با عنوان "تأثیر حجمی"^۲ نیز شناخته می‌شود توسط پلاها و لانگنکر [۹] گزارش شد. این تأثیر به صورت کاهش تنش تسلیم با نرخ کرنش ثابت و یا افزایش نرخ کرنش تحت تنش ثابت در طی تغییرشکل پلاستیک تعریف شده است [۱۲-۱۴]. یافته‌های پلاها و لانگنکر نشان می‌دهد که تغییر خواص مکانیکی در حین تست کشش با تحریک اولتراسونیک به علت فعال‌سازی نابجایی‌ها می‌باشد. به‌گونه‌ای که ارتعاش اولتراسونیک ترجیحاً در مواضع نابجایی‌ها جذب می‌شود و با فعال‌سازی آن‌ها، نیروهای شکل‌دهی کاهش خواهد یافت.

در ابتدا، تصور بر این بود که فعال‌سازی نابجایی‌ها در اثر وقوع پدیده رزونانس در نابجایی‌ها، اتفاق می‌افتد. این در حالیست که فرکانس طبیعی نابجایی‌ها در حدود ۱۰۰ مگاهرتز تخمین زده شده است [۱۵] و بنابراین انتقال انرژی ارتعاشی نمی‌تواند بر اساس پدیده رزونانس نابجایی‌ها، توضیح داده شود. گروه دیگری از محققان [۱۶] دریافتند که فعال-

^۲ Single Point Incremental Forming^۳ Two Point Incremental Forming^۴ Volume Effect^۱ Incremental Sheet Metal Forming

اولتراسونیک انجام دادند. آن‌ها برای بررسی تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیند کله‌زنی گرم از شبیه‌سازی المان محدود استفاده کردند. همچنین، تأثیرات دما و نرخ کرنش در طی این فرآیند مورد بررسی قرار گرفت.

لی و لانگ [۲۴] کاهش نیروی کشش و بهبود شرایط روانکاری میان سیم و قالب را در فرآیند کشش سیم به کمک اولتراسونیک گزارش کردند. موراوا و همکاران [۲۵،۲۶] مطالعات تجربی بر روی فرآیند کشش سیم با به‌کارگیری ارتعاش اولتراسونیک در هر دو جهت شعاعی و محوری، انجام دادند. آن‌ها دریافته‌اند که ارتعاش شعاعی در مقایسه با ارتعاش محوری در کاهش نیروی کشش و افزایش سرعت کشش، موثرتر می‌باشد. تأثیر انرژی اولتراسونیک بر روی فرآیند کشش سیم در مقیاس میکرو توسط سیگرت و همکاران [۲۷،۲۸] مطالعه شد. آن‌ها دریافته‌اند که با اعمال ارتعاش اولتراسونیک، زبری سطح نمونه کاهش می‌یابد و با جدایش سطوح میان قالب و نمونه، شرایط روانکاری بهبود می‌یابد. همچنین، کاهش نیروی کشش تابعی از دامنه ارتعاش می‌باشد. لوکاس و داود [۲۹] شبیه‌سازی فرآیند روزنرانی آلومینیم به کمک اولتراسونیک را با استفاده از یک مدل معمولی ماده انجام دادند. این در حالی بود که ضریب اصطکاک میان بیلت^۵ و قالب به منظور محاسبه‌ی تأثیر انرژی اولتراسونیک، در حال تغییر بود. در نهایت، نرم‌شدگی آکوستیک آلومینیم در طی فرآیند، توسط نتایج تجربی به تأیید رسید. رسولی و همکاران [۳۰] تأثیر ارتعاش طولی اولتراسونیک بر روی فرآیند اسپینینگ^۶ لوله را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجربی نشان داد که ارتعاش اولتراسونیک با توان بالا می‌تواند منتج به کاهش ۴ الی ۱۳ درصدی نیروی شعاعی شود. همچنین تحلیل تغییرات نیروهای شکل‌دهی تحت تأثیر ارتعاش اولتراسونیک نشان داد که این تغییرات غالباً ناشی از تأثیرات تماسی ارتعاش اولتراسونیک می‌باشد. عابدینی و همکاران [۳۱] در یک مقاله مروری، اصول علمی و فنی اعمال ارتعاشات اولتراسونیک به همراه چگونگی تأثیر آن بر فرآیندهای مختلف را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند.

سازی نابجایی‌ها و در نتیجه کاهش نیروهای شکل‌دهی، ناشی از برهم‌نهی تنش‌های نوسانی و استاتیکی می‌باشد.

گرین [۱۷] آزمایش‌هایی بر روی مواد مختلف به منظور مطالعه‌ی تأثیر به‌کارگیری انرژی اولتراسونیک در حین تغییر شکل، انجام داد که در طی آن، تأثیرات نرم‌شدگی صوتی^۱ جنس ماده مشاهده شد و نتیجه گرفت که کاهش استحکام تسلیم متناسب با شدت انرژی اولتراسونیک می‌باشد. از سوی دیگر، افزایش دما در طی آزمون فشار نمونه‌ی آلومینیمی توسط داود و همکاران [۱۸] اندازه‌گیری شد. آن‌ها با توجه به تغییرات اندک دمایی، نشان دادند که نرم‌شدگی ماده نمی‌تواند ناشی از افزایش ناچیز دما باشد. پتوخو و همکاران [۱۹] مطالعات تجربی بر روی فرآیند اکستروژن^۲ به کمک اولتراسونیک انجام دادند و دریافته‌اند که انرژی اولتراسونیک صرفنظر از حضور روانکارهای با ویسکوزیته‌ی بالا، نیروی اصطکاک میان بیلت^۳ و قالب را کاهش می‌دهد. جیما و همکاران [۲۰] آزمایش‌هایی بر روی فرآیندهای کشش عمیق به کمک اولتراسونیک انجام دادند و دریافته‌اند که انرژی اولتراسونیک نه تنها باعث کاهش نیروی کشش می‌شود، بلکه نسبت حد کشش (LDR)^۴ را نیز افزایش می‌دهد. مطالعات عددی و تجربی بر روی فرآیند پرس با استفاده از تحریک اولتراسونیک ماتریس توسط آشیدا و اوایاما [۲۱] به انجام رسید. آن‌ها دریافته‌اند که با استفاده از این انرژی می‌توان از وقوع چروکیدگی و ترک در نمونه‌های شکل‌دهی شده، جلوگیری به عمل آورد. نتایج نشان دادند که این امر به علت کاهش نیروی اصطکاک میان ورق فلزی و ماتریس می‌باشد. مطالعات تجربی بر روی فرآیند کشش لوله فلزی به کمک اولتراسونیک، توسط اینو [۲۲] به انجام رسید و نتیجه گرفت که هیچ‌گونه کاهش قابل ملاحظه‌ای در نیروی کشش لوله‌های ضخیم فولادی، مشاهده نمی‌شود. با این وجود، میزان تخریب نمونه در ورودی قالب کاهش می‌یابد و زبری سطح و طول عمر قالب، بهبود پیدا خواهد کرد. جی سی. هانگ و سی. هانگ [۲۳] مطالعات آزمایشگاهی بر روی فرآیند کله‌زنی گرم آلیاژهای آلومینیم به کمک ارتعاشات

^۱ Acoustic softening

^۲ Extrusion

^۳ Billet

^۴ Limiting Drawing Ratio

^۵ Billet

^۶ Spinning



شکل ۱- سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک

در این سیستم، امکان دریافت حرکت دورانی برای ترانسدیوسر و ابزارگیر از طریق تسمه و پولی فراهم شده است. جهت نصب و راه‌اندازی سیستم بر روی ماشین فرز CNC، طراحی و ساخت فیکسچر با در نظر گرفتن موضع اسپیندل (محرک) و یاتاقان‌بندی سیستم، انجام شد (شکل ۲). اتصال الکتریکی در شکل ۱، از نوع کلکتوری می‌باشد. به منظور پیشگیری از قطع این نوع اتصال که می‌تواند ناشی از کوتاه شدن ذغال‌ها و یا عدم کارایی قطعه فنی واقع در پشت ذغال‌ها باشد، اتصال الکتریکی سیستم، اصلاح و تعویض گردید. بدین منظور از قطعه‌ای با نام رینگ لغزشی^۱ حاوی جیوه برای اتصال الکتریکی سیستم با مولد و ترانسدیوسر استفاده شد. این قطعه به عنوان هادی چرخشی^۲ عمل می‌کند و قطعی مدار در این حالت وجود نخواهد داشت (شکل ۳).

^۱ Slip Ring

^۲ Rotary Conductor

همچنین در این مقاله، راهکارهای تجاری‌سازی فناوری اولتراسونیک و مزایا و محدودیت‌های آن، تشریح شد.

با توجه به این که در اولین پژوهش رسمی انجام شده در حوزه فرآیند شکل‌دهی تدریجی به کمک ارتعاشات اولتراسونیک [۳۲] که نتایج آن در سال ۲۰۱۵ میلادی منتشر شد، تأثیر ارتعاش اولتراسونیک بر مولفه عمودی نیروی شکل‌دهی، بدون حضور روانکار مورد مطالعه قرار گرفته است، از این‌رو، در پژوهش پیش‌رو، رفتار مولفه عمودی نیروی شکل‌دهی تحت تأثیر اعمال ارتعاش اولتراسونیک با در نظر گرفتن حضور یا عدم حضور روانکار و بر اساس آزمون‌های طراحی شده، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در مقاله‌ی پیش‌رو به منظور بررسی تأثیر ارتعاش اولتراسونیک و روانکار در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، طراحی و ساخت ابزار سرنیمکروی مرتعش به قطر ۲۰ میلی‌متر و با فرکانس طبیعی ۲۰/۴ کیلوهرتز انجام شد. هدف از این پژوهش، مطالعه و تفکیک اثرات ارتعاش اولتراسونیک و روانکار بر رفتار مولفه‌ی عمودی نیروی شکل‌دهی در فرآیند SPIF می‌باشد.

۲- تجهیزات اولتراسونیک

تجهیزات اولتراسونیک مورد استفاده در این پژوهش شامل سه جزء می‌باشد که عبارتند از: مولد امواج اولتراسونیک، ترانسدیوسر و سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک (ابزارگیر). مولد اولتراسونیک، توان ورودی با فرکانس ۵۰ الی ۶۰ هرتز را به توان اولتراسونیک با فرکانس بالا تبدیل می‌کند. سیگنال توان با فرکانس بالا به ترانسدیوسر وارد می‌شود تا در فرکانس اعمالی به ارتعاش درآید که بایستی دامنه‌ی آن با استفاده از یک متمرکزکننده تقویت شود. ترانسدیوسر در سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک، تعبیه شده است.

با توجه به فیزیک فرآیند SPIF و بر اساس حرکات خطی و دورانی ابزار شکل‌دهی، سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک بایستی به صورتی در نظر گرفته شود تا همزمان با انتقال ارتعاش با دامنه‌ی ماکزیمم به ابزار شکل‌دهی، حرکت چرخشی ابزار همراه با حرکات خطی آن نیز تأمین شود. بنابراین سیستم مورد نظر با طرح مشخص و مواضع معین گره و شکم ارتعاشی از طریق تأمین‌کننده، خریداری و تهیه گردید (شکل ۱).

PZD700A، فانکشن ژنراتور^۲، اسپیسکوپ و کابل‌های ارتباطی می‌باشد. مقدار فرکانس اندازه‌گیری شده توسط تجهیزات تست برابر با ۲۰/۴۸ kHz می‌باشد که صحت فرکانس درج شده بر روی ترانسدیوسر را تأیید می‌نماید (شکل ۴).



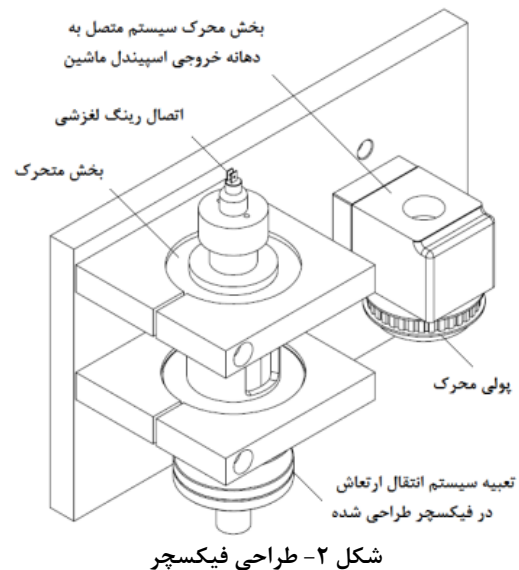
شکل ۴- تجهیزات تست و تنظیم فرکانس

۳- ابزار شکل‌دهی مرتعش (متمرکزکننده)

در این مرحله بایستی طراحی ابزار شکل‌دهی به صورت سرنیمکروی و با قابلیت انتقال ارتعاش طولی به ورق فلزی همراه با تقویت دامنه‌ی آن صورت پذیرد. به بیان دیگر ابزار شکل‌دهی یک متمرکزکننده^۳ انرژی می‌باشد که همزمان دو وظیفه بر عهده دارد: اجرای فرآیند شکل‌دهی تدریجی و انتقال و تقویت دامنه‌ی ارتعاش. ابزار شکل‌دهی بایستی در مود طولی از ارتعاش و در یک فرکانس عملیاتی از مولد امواج و ترانسدیوسر، طراحی و تنظیم شود. بنابراین جنس ابزار، هندسه و ابعاد آن باید به گونه‌ای تعیین شود که در فرکانس عملیاتی مورد نظر به کار گرفته شود. به منظور عملکرد صحیح ابزار در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی به کمک ارتعاش اولتراسونیک (UVaSPIF)، طراحی و ساخت آن بر اساس الزامات مشخصی صورت گرفت که در ادامه به تشریح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱- فرکانس تحریک

به منظور ساخت ابزار برای سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک، فرکانس طبیعی ابزار بایستی منطبق بر فرکانس مولد اولتراسونیک یا فرکانس تحریک ترانسدیوسر باشد تا



شکل ۲- طراحی فیکسچر



شکل ۳- مونتاژ رینگ لغزشی بر روی سیستم

فرکانس تحریک ترانسدیوسر تعبیه شده در سیستم، مطابق مشخصات درج شده توسط کارخانه سازنده برابر با ۲۰/۵ kHz می‌باشد. جهت حصول اطمینان از فرکانس طبیعی ترانسدیوسر، تجهیزات مورد نظر جهت اجرای تست، فراهم و تنظیم گردید. این تجهیزات شامل پیزودرایور^۱ مدل

^۲Function Generator

^۳Concentrator

^۱ Piezo Driver

جدول ۲- خواص فیزیکی فولاد زنگ‌نزن گرید ۳۱۶ [۳۴]

عنوان	مقدار
دانسیته (ρ)	8000 kg/m^3
مدول یانگ (E)	۱۹۳ گیگاپاسکال
ضریب پواسون	۰/۲۸

$$\omega = 2\pi f = 125663.71 \text{ s}^{-1} \quad (۲)$$

با استفاده از مقادیر فوق و رابطه‌ی ۳، طول موج محاسبه خواهد شد:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 245.59 \text{ mm} \quad (۳)$$

۳-۴- تعیین هندسه و ابعاد ابزار

در ابتدا بایستی قیود هندسی، ابعادی و ارتعاشی ابزار شکل-دهی را تعیین نمود تا بر اساس آن، فرآیند طراحی ابزار مرتعش، تدوین گردد. از این رو، قیود شش‌گانه مورد نظر بر اساس اولویت، عبارتند از:

(الف) قطر پایه ابزار شکل‌دهی: جهت نصب و مونتاژ ابزار شکل‌دهی بر روی پیشانی ابزارگیر سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک، بایستی قطر پایه ابزار شکل‌دهی دقیقاً برابر با قطر پیشانی ابزارگیر ($D = 31 \text{ mm}$) باشد تا انتقال انرژی ارتعاشی به ابزار، بدون اتلاف و به طور موثر، انجام شود.

(ب) فرم سرنیمکروی ابزار شکل‌دهی: با توجه به هندسه سرنیمکروی ابزار شکل‌دهی در فرآیند SPIF و اندازه قطرهای معمول ابزار شکل‌دهی در این فرآیند، هندسه‌ی دماغه‌ی ابزار به صورت سرنیمکروی و با اندازه قطر ($D = 20 \text{ mm}$) تعیین خواهد شد.

(ج) فرکانس طبیعی ابزار شکل‌دهی: فرکانس طبیعی ابزار شکل‌دهی بایستی در محدوده‌ی فرکانس تولیدی مولد (kHz) و یا محدوده‌ی فرکانس تحریک ترانسدیوسر تعبیه شده در سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک ($20/5 \text{ kHz}$) باشد.

(د) شکل مود^۲ ارتعاش ابزار شکل‌دهی: شکل مود مورد انتظار برای ابزار شکل‌دهی حاصل از تحلیل مودال، مود ارتعاش طولی می‌باشد.

منجر به وقوع پدیده‌ی تشدید (رزونانس)^۱ شود. در این پژوهش، تک فرکانس تولیدی مولد برابر با 20 kHz می‌باشد.

۳-۲- انتخاب جنس ابزار

مقاومت خستگی بالا و افت آکوستیکی پایین (جذب پایین انرژی ارتعاشی) به عنوان الزامات عمومی برای ابزار مرتعش محسوب می‌شوند. از سوی دیگر و با توجه به کاربرد و هندسه‌ی ابزار در فرآیند SPIF، ویژگی‌هایی همچون: صلبیت، مقاومت در برابر دمای بالا و قابلیت ماشینکاری از جمله عوامل موثر در انتخاب جنس ماده می‌باشند. از این رو، فولاد زنگ‌نزن غیرمغناطیسی گرید ۳۱۶ به عنوان جنس ابزار، انتخاب و تهیه گردید (جدول ۱).

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن گرید ۳۱۶ [۳۴]

عنوان	مقدار
استحکام کششی	۵۱۵ مگاپاسکال
استحکام تسلیم	۲۰۵ مگاپاسکال
سختی	۲۱۷ برینل

۳-۳- محاسبه‌ی طول موج

ارتعاش ابزار شکل‌دهی، ایستا و سینوسی می‌باشد. از این رو، برای تشکیل امواج ایستا و موقعیت‌دهی مناسب گره و شکم ارتعاشی، طول ابزار بایستی مضرب صحیحی از نصف طول موج باشد [۳۳]. در این پژوهش، طول ابزار به صورت نیم‌موج در نظر گرفته شده است ($l = \lambda/2$). بنابراین، طول موج ابزار شکل‌دهی بایستی محاسبه شود. جدول ۲، خواص فیزیکی جنس ماده‌ی مورد استفاده برای محاسبه‌ی سرعت انتشار موج طولی در ابزار را نشان می‌دهد. سرعت انتشار موج الاستیک طولی در هورن استوانه‌ای برابر است با:

$$c = \sqrt{E/\rho} = 4911.72 \text{ m/s} \quad (۱)$$

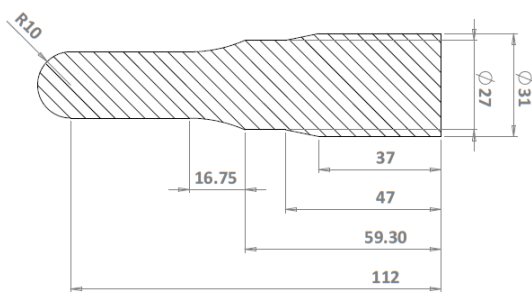
با توجه به این که تک فرکانس تولیدی مولد برابر 20 kHz می‌باشد، فرکانس زاویه‌ای برابر است با:

^۲ Mode Shape

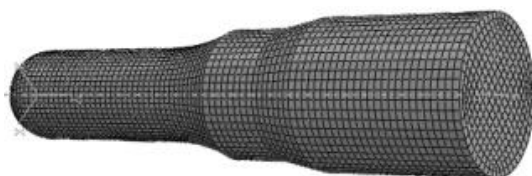
^۱ Resonance

سازی ابزار، خواص فیزیکی و مکانیکی جنس ماده به صورت آیزوتروپیک تعریف شد. روش لانکوز^۳ به عنوان روش استخراج مقادیر ویژه در محدوده فرکانسی ۱۵-۲۲ kHz انتخاب گردید. شکل ۶، مدل مش‌بندی شده‌ی ابزار را نشان می‌دهد.

شکل ۷، نتیجه‌ی حاصل از تحلیل مودال ابزار طراحی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مود طولی از ارتعاش ابزار با فرکانس طبیعی ۲۰/۷ kHz ظاهر شده است که مناسب‌ترین گزینه برای ارتعاش طولی ابزار شکل‌دهی می‌باشد.



شکل ۵- طراحی ابزار سرنیمکروی مرتعش به قطر ۲۰ میلی‌متر



شکل ۶- مش‌بندی مدل ابزار

۳-۶- ساخت، تست و تنظیم فرکانس ابزار

در این مرحله، ابزار مورد نظر مطابق با هندسه و ابعاد تعیین شده، ساخته شد (شکل ۸). به منظور دستیابی به ماکزیمم دامنه‌ی ارتعاش در دماغه‌ی ابزار شکل‌دهی (انتهای متمرکزکننده)، بایستی اتصال مابین سیستم انتقال ارتعاش و قطر پایه‌ی ابزار به خوبی انجام شود. بنابراین ابزار بر روی پیشانی ابزارگیر و با استفاده از واشر مایلار، نصب و مونتاژ گردید (شکل ۹).

(ه) طول ابزار شکل‌دهی: به منظور موقعیت‌دهی مناسب گره و شکم ارتعاشی، طول ابزار بایستی برابر با نصف طول موج محاسبه شده (رابطه ۳) باشد. نکته‌ی مهمی که بایستی بدان توجه نمود، در نظر گرفتن مقدار مجاز تیونینگ^۱ می‌باشد که از طریق لحاظ‌کردن طول اضافه برای ابزار (در حد چند میلیمتر)، فراهم می‌شود. از این رو، می‌توان پس از فرآیند تیونینگ، اقدام به ماشینکاری ابزار نمود و در نتیجه، اصلاح فرکانس طبیعی ابزار را مطابق قید (ج) به انجام رساند. (و) سطح مقطع ابزار شکل‌دهی: سطح مقاطع متنوعی برای متمرکزکننده (ابزار شکل‌دهی) به صورت پله‌ای، مخروطی، نمایی و یا ترکیبی از آن‌ها، به منظور انتقال و تقویت دامنه‌ی ارتعاش در منطقه اجرای فرآیند، پیشنهاد شده است [۳۵].

به منظور طراحی ابزار شکل‌دهی مرتعش، طرح اولیه‌ی نزدیک به مشخصات هندسی و ابعادی ابزار و مطابق با الزامات شش‌گانه در نرم‌افزار المان محدود، مدل‌سازی گردید. سپس، تحلیل مودال مقدماتی در محدوده فرکانس مورد نظر، به انجام رسید و مشخصات ارتعاشی ابزار شکل‌دهی همچون فرکانس طبیعی و شکل مود، استخراج گردید (بخش ۳-۵). جهت دستیابی به مشخصات مطلوب ارتعاشی ابزار، ایجاد تغییرات هندسی و ابعادی در طرح اولیه، اجتناب ناپذیر می‌باشد. نکته‌ای که بایستی در حین تغییرات طرح ابزار به آن توجه شود، قابلیت و امکان ساخت طرح ابزار می‌باشد. بنابراین با توجه به الزامات طراحی، محاسبات تئوری و تحلیل نرم‌افزاری انجام شده و بر اساس روش آزمون و خطا، طرح ابزار به صورت سرنیمکروی و ترکیبی از سه مقطع پله‌ای، مخروطی و نمایی به قطر ۲۰ میلی‌متر و به طول ۱۲۲ میلی‌متر، نهایی گردید (شکل ۵).

۳-۵- تحلیل مودال

تحلیل مودال به منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش ابزار و شکل‌های مود متناظر با آن، استفاده می‌شود. از این رو، نرم افزار المان محدود آباکوس نسخه ۶،۱۲ [۳۶] به منظور تحلیل مودال ابزار، مورد استفاده قرار گرفت. پس از مدل-

^۱ Tuning Allowance

^۲ Trial and Error

^۳ Lanczos

فرآیند تست و تنظیم فرکانس رزونانس ابزار در دو حالت استاتیکی (بدون دوران) و دینامیکی (با دوران) و مطابق با تنظیمات تجهیزات و روش تشریح شده در بخش ۲، انجام شد. جدول ۳، نتایج تست و مونتورینگ فرکانس طبیعی ابزار را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج تست فرکانس طبیعی ابزار توسط پیزودرایور مدل PZD700A

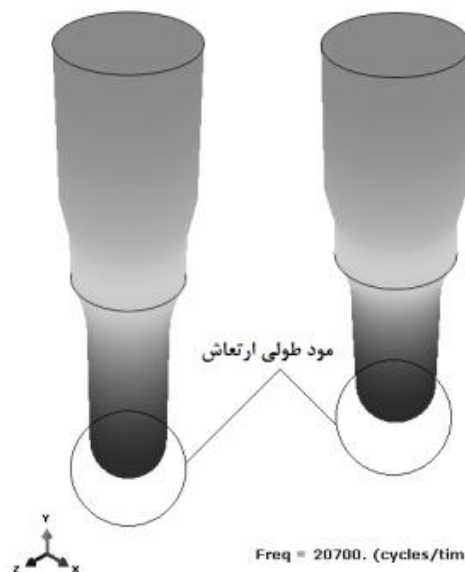
وضعیت ابزار	فرکانس طبیعی (kHz)
استاتیکی (بدون دوران)	۲۰/۴
دینامیکی (با دوران)	۲۰/۴

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، فرکانس طبیعی ابزار در دو وضعیت استاتیکی و دینامیکی، یکسان و برابر با ۲۰/۴ کیلوهرتز می‌باشد. به منظور ارزیابی عملکرد صحیح مجموعه، می‌توان با استفاده از حس لامسه و تماس انگشتان دست، سطح لیز و بدون اصطکاک را در دماغه‌ی ابزار حس نمود که مؤید وجود ارتعاش در دماغه‌ی ابزار شکل‌دهی می‌باشد.

۴- آزمایش تجربی

۴-۱- تجهیزات آزمایش

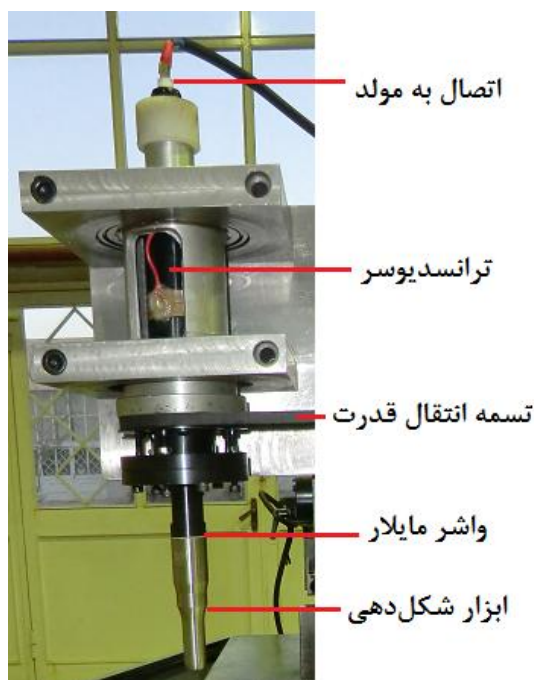
به منظور اعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی، از مولد KING با توان ۱۰۰۰ وات و فرکانس عملیاتی ۲۰ کیلوهرتز، استفاده شد. تحریک اولتراسونیک ابزار توسط این مولد، انتقال و اعمال پیوسته ارتعاش را میسر می‌سازد. دامنه‌ی ارتعاش ابزار شکل‌دهی برابر با ۷/۵ میکرون اندازه‌گیری شد. جنس ورق تحت آزمایش، آلیاژ آلومینیم Al 1050-O می‌باشد که به عنوان گرید عمومی و آنیل شده‌ی آلومینیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور ثبت مولفه‌ی عمودی نیروی عملیاتی به ابزار شکل‌دهی مرتعش (F_z)، از دینامومتر KISTLER استفاده شد. فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی در این پژوهش از نوع تک نقطه‌ای (SPIF) می‌باشد. شکل ۱۰، اجزای فرآیند را نشان می‌دهد. ورق فلزی مابین صفحه کلمپینگ و صفحه پشتبند، قرار می‌گیرد. شکل ۱۱، طرح کلی از چیدمان تجهیزات فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی به کمک ارتعاش اولتراسونیک (UVaSPIF) را نشان می‌دهد.



شکل ۷- مود طولی ارتعاش ابزار شکل‌دهی با فرکانس طبیعی ۲۰/۷ کیلوهرتز



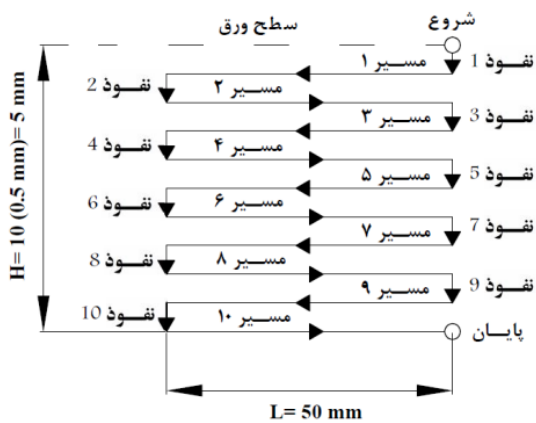
شکل ۸- ساخت ابزار شکل‌دهی مرتعش به قطر ۲۰ میلی‌متر



شکل ۹- نصب و مونتاز ابزار بر روی سیستم انتقال ارتعاش

۲-۴- اجرای آزمایش

هندسه‌ی نمونه به صورت شیار مستقیم^۱ و به طول ۵۰ میلی‌متر می‌باشد که بر اساس توالی حرکات عمودی و افقی ابزار شکل‌دهی بر روی ورق کلمپ شده، ایجاد خواهد شد. مسیر طی شده توسط ابزار شکل‌دهی شامل ۱۰ نفوذ به اندازه‌ی گام عمودی ۰/۵ میلی‌متر و ۱۰ مسیر خطی به طول ۵۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱۲).



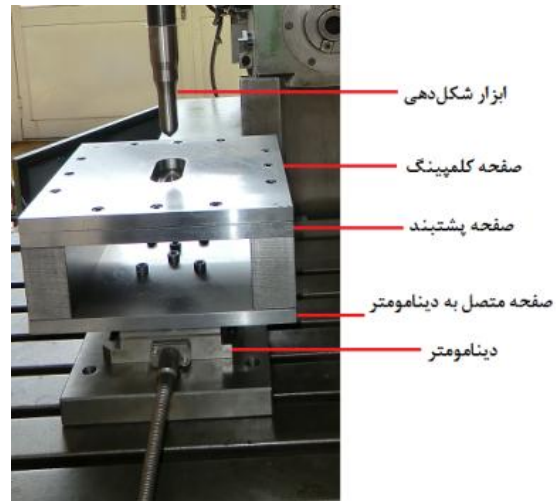
شکل ۱۲- استراتژی مسیر ابزار شکل‌دهی

جدول ۴، ترکیب پارامتری فرآیند SPIF را به منظور مطالعه و بررسی رفتار نیروی شکل‌دهی در چهار وضعیت از آزمون‌های طراحی شده (جدول ۵) نشان می‌دهد. عمق شکل‌دهی نمونه‌ها برابر ۵ میلی‌متر می‌باشد.

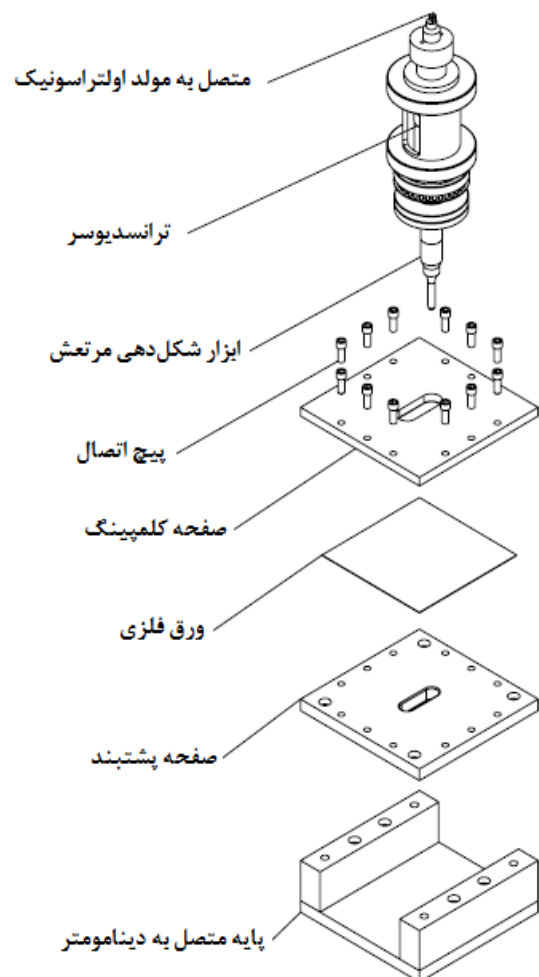
جدول ۴- ترکیب پارامتری فرآیند SPIF

مقدار	عنوان
۰/۷ میلی‌متر	ضخامت ورق Al 1050-O
۰/۵ میلی‌متر	اندازه‌ی گام عمودی ابزار
۲۰ میلی‌متر	قطر ابزار
۱۲۵ rpm	سرعت دورانی ابزار
۲۰۰۰ mm/min	نرخ پیشروی ابزار
۷/۵ میکرون	دامنه‌ی ارتعاش دماغه‌ی ابزار
۱۰۰۰ وات	توان مولد

^۱ Straight Groove



شکل ۱۰- اجزای فرآیند شکل‌دهی تدریجی



شکل ۱۱- چیدمان تجهیزات فرآیند UVaSPIF

جدول ۵- آزمون‌های طراحی شده

شماره آزمون	ترکیب آزمون	نماد آزمون
۱	با ارتعاش اولتراسونیک و بدون روانکار	(+US-LU)
۲	بدون ارتعاش اولتراسونیک و با روانکار	(-US+LU)
۳	با ارتعاش اولتراسونیک و با روانکار	(+US+LU)
۴	بدون ارتعاش اولتراسونیک و بدون روانکار	(-US-LU)

US: Ultrasonic → اولتراسونیک LU: Lubricant → روانکار



شکل ۱۳- نمونه‌های شکل‌دهی شده

روانکار مورد استفاده، روغن هیدرولیک HLP68 محصول شرکت نفت بهران و با نام تجاری "بهران هیدرولیک 68H" [۳۷] می‌باشد. شکل ۱۳ نمونه‌های شکل‌دهی شده از ورق AI 1050-O را در چهار آزمون طراحی شده، نشان می‌دهد.

۳-۴- نتایج

با توجه به این که هدف از پژوهش پیش‌رو، بررسی تأثیر ارتعاش اولتراسونیک و روانکار بر رفتار نیروی اعمالی به محور ابزار شکل‌دهی می‌باشد، بدین منظور، مقادیر مولفه عمودی نیرو (در راستای محور ابزار) در چهار وضعیت از آزمون‌های طراحی شده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مولفه‌ی عمودی نیروی اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر با نماد F_z نشان داده می‌شود و به عنوان نیروی اعمالی به محور ابزار شکل‌دهی می‌باشد. شکل ۱۴، رفتار نیروی F_z را در چهار آزمون طراحی شده در طی فرآیند شکل‌دهی نسبت به زمان نشان می‌دهد. به منظور بررسی و تحلیل دقیق‌تر مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی نیروی F_z ، مقایسه‌ی چهار وضعیت مذکور در دو مرحله‌ی "حرکت عمودی ابزار (نفوذ)" و "حرکت افقی ابزار (مسیر)" به صورت مجزا، انجام خواهد شد. شکل ۱۵، نمودار مقایسه‌ای میانگین نیروی F_z را در چهار آزمون طراحی شده برای مراحل ده‌گانه‌ی نفوذ ابزار شکل‌دهی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مراحل ده‌گانه‌ی نفوذ ابزار، ماکزیمم نیروی میانگین F_z متعلق به آزمون (-US-LU) و مینیمم نیروی میانگین F_z متعلق به آزمون (+US-LU) می‌باشد که در هر دو آزمون، شرایط عدم استفاده از روانکار (-LU) برقرار می‌باشد.

جدول ۶، نتایج حاصل از مقایسه‌ی میزان کاهش نیروی میانگین F_z را در مراحل ده‌گانه‌ی نفوذ ابزار برای هر یک از جفت آزمون‌های منتخب، نشان می‌دهد.

جدول ۷، نتایج حاصل از مقایسه‌ی میزان کاهش نیروی میانگین F_z را در مسیرهای ده‌گانه‌ی حرکت افقی ابزار برای هر یک از جفت آزمون‌های منتخب، نشان می‌دهد.

جدول ۶- مقایسه‌ی میزان کاهش نیروی میانگین F_z در مراحل ده‌گانه‌ی نفوذ ابزار

ردیف	آزمون‌های مقایسه شده	آزمون با مینیمم نیروی F_z	درصد کاهش نیرو
۱	(+US-LU) و (-US-LU)	(+US-LU)	-۵۴/۱۵
۲	(+US+LU) و (+US-LU)	(+US-LU)	-۳۸/۹۶
۳	(-US-LU) و (-US+LU)	(-US+LU)	-۱۴/۹
۴	(-US+LU) و (+US+LU)	(+US+LU)	-۱۳/۸۴
۵	(-US-LU) و (+US+LU)	(+US+LU)	-۲۷

جدول ۷- مقایسه‌ی میزان کاهش میانگین نیروی F_z در مسیرهای ده‌گانه‌ی حرکت افقی ابزار

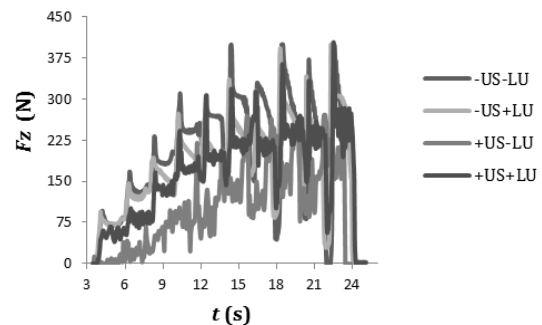
ردیف	آزمون‌های مقایسه شده	آزمون با مینیمم نیروی F_z	درصد کاهش نیرو
۱	(+US-LU) و (-US-LU)	(+US-LU)	-۵۴/۶۳
۲	(+US+LU) و (+US-LU)	(+US-LU)	-۴۶/۶۳
۳	(-US-LU) و (-US+LU)	(-US+LU)	-۹/۰۴
۴	(-US+LU) و (+US+LU)	(+US+LU)	-۱۰/۱۰
۵	(-US-LU) و (+US+LU)	(+US+LU)	-۱۸/۴

بر اساس داده‌های جداول ۶ و ۷، می‌توان نتایج زیر را استنباط نمود:

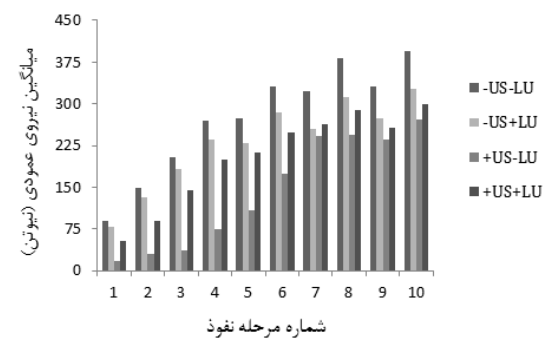
۱. در شرایط مشابه از عدم حضور روانکار، اعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی در مقایسه با فرآیند SPIF، موجب کاهش مقدار نیروی میانگین F_z به میزان ۵۴/۱۵٪ و ۵۴/۶۳٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار می‌شود. این نتیجه، تأثیر به‌کارگیری ابزار مرتعش بر کاهش نیروی میانگین F_z را تأیید می‌کند.

۲. در شرایط مشابه از اعمال ارتعاش اولتراسونیک، اجرای فرآیند بدون استفاده از روانکار در مقایسه با اجرای فرآیند با استفاده از روانکار، موجب کاهش مقدار نیروی میانگین F_z به

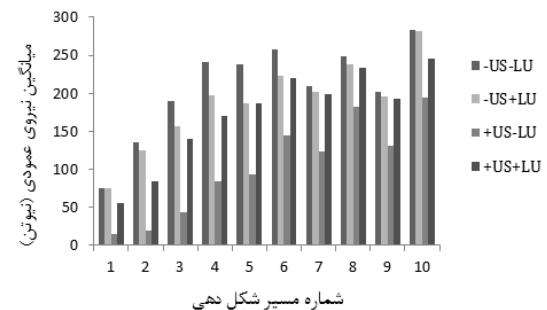
شکل ۱۶، نمودار مقایسه‌ای میانگین نیروی F_z را در چهار آزمون طراحی شده برای مسیرهای ده‌گانه‌ی حرکت افقی ابزار شکل‌دهی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مسیرهای ده‌گانه‌ی حرکت افقی ابزار، ماکزیمم نیروی میانگین F_z متعلق به آزمون (-US-LU) و مینیمم نیروی میانگین F_z متعلق به آزمون (+US-LU) می‌باشد که در هر دو آزمون، شرایط عدم استفاده از روانکار (-LU) برقرار می‌باشد.



شکل ۱۴- رفتار نیروی F_z نسبت به زمان



شکل ۱۵- مقایسه‌ی مقادیر میانگین نیروی F_z در مراحل ده‌گانه‌ی نفوذ ابزار



شکل ۱۶- مقایسه‌ی مقادیر میانگین نیروی F_z در مسیرهای ده‌گانه‌ی حرکت افقی ابزار

میزان ۳۸/۹۶٪ و ۴۶/۶۳٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار می‌شود.

۳. در شرایط مشابه از عدم اعمال ارتعاش اولتراسونیک (فرآیند SPIF)، اجرای فرآیند با استفاده از روانکار در مقایسه با اجرای فرآیند بدون استفاده از روانکار، موجب کاهش مقدار نیروی میانگین F_z به میزان ۱۴/۹٪ و ۹/۰۴٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار می‌شود.

۴. در شرایط مشابه از حضور روانکار، اعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی در مقایسه با فرآیند SPIF، مقدار نیروی میانگین F_z را به میزان ۱۳/۸۴٪ و ۱۰/۱۰٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار کاهش می‌دهد. این نتیجه، تأثیر به‌کارگیری ابزار مرتعش بر کاهش نیروی میانگین F_z را تأیید می‌کند.

۵. به‌کارگیری همزمان روانکار و ارتعاش اولتراسونیک در مقایسه با عدم حضور همزمان روانکار و ارتعاش اولتراسونیک، موجب کاهش مقدار نیروی میانگین F_z به میزان ۲۷٪ و ۱۸/۴٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار می‌شود.

۶. بر اساس نتایج بندهای (۱) و (۴) می‌توان دریافت که تأثیر ارتعاش اولتراسونیک در کاهش مقدار نیروی میانگین F_z در طی حرکات عمودی و افقی ابزار، در صورت عدم استفاده از روانکار، موثرتر خواهد بود.

۵- تحلیل نتایج

همان‌طور که در بخش ۴-۳ (نتایج) مشاهده شد، در مراحل ده‌گانه‌ی نفوذ ابزار، ماکزیمم نیروی میانگین F_z متعلق به آزمون (-US-LU) و مینیمم نیروی میانگین F_z متعلق به آزمون (+US-LU) می‌باشد. همچنین، در مسیرهای ده‌گانه‌ی حرکت افقی ابزار نیز، ماکزیمم نیروی میانگین F_z متعلق به آزمون (-US-LU) و مینیمم نیروی میانگین F_z متعلق به آزمون (+US-LU) می‌باشد.

بنابراین، در هر دو آزمون و در هر دو مسیر فوق‌الذکر، کاهش موثر نیروی اعمالی به محور ابزار، تحت شرایط اعمال ارتعاش اولتراسونیک و عدم استفاده از روانکار، محقق شده است. به بیان دیگر، حضور روانکار تأثیر چندانی بر کاهش موثر مولفه عمودی نیروی شکل‌دهی نداشته است. از این‌رو، می‌توان گفت که ارتعاشات اولتراسونیک با کاهش مقاومت

برشی روانکار، کارایی روانکار را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار داده است. زیرا بازدهی روغن بر اساس توان چسبندگی و خواص استحکامی آن، تعیین می‌شود. همچنین، با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک، امکان شکست زنجیره‌های طولانی مولکول‌های پلیمری روانکار، وجود دارد. در نتیجه، ویسکوزیته و ظرفیت جذب سطحی روانکار، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، به‌کارگیری ارتعاشات اولتراسونیک منجر به تولید حرارت و افزایش دما در طی فرآیند می‌شود. بنابراین، روانکار ممکن است، تجزیه شود و ظرفیت روانکاری، کاهش یابد. از سوی دیگر، روانکار ممکن است تحت نوسان مکانیکی ارتعاش دماغه ابزار از سطح تماس ابزار و ورق، تخلیه شود. از این‌رو، تأثیر اندک روانکار و یا عدم تأثیر روانکار بر کاهش موثر مولفه عمودی نیروی شکل‌دهی بدین صورت قابل توجیه می‌باشد.

از سوی دیگر، اعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی، بیشترین تأثیر را بر کاهش نیروی اعمالی به محور ابزار سرنیمکروی داشته است. از این‌رو، در ادامه به تحلیل چگونگی تأثیر ارتعاش اولتراسونیک بر کاهش موثر مولفه عمودی نیروی شکل‌دهی، پرداخته می‌شود.

ایسکی [۳۸]، تقریب مناسبی از نیروی کشش بر حسب کرنش ایجاد شده در راستای محور طولی ورق (ϵ_x) در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، ارائه نمود. با فرض آنکه رفتار مومسان ورق فلزی از قانون سخت‌شوندگی توانی^۱ به صورت $\sigma = K \cdot \epsilon^n$ پیروی کند، در این صورت نیروی کشش اعمالی به ورق (T_i) از رابطه ارائه شده توسط ایسکی تعیین می‌شود:

$$T_i = B_i \cdot t_i \cdot \sigma_i = B_i \cdot t_i \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} K \cdot \epsilon_{x_i}^n \quad (۴)$$

در این رابطه، B_i : طول تماس جانبی ورق با ابزار، t_i : ضخامت ورق تغییرشکل‌یافته، σ_i : تنش کششی اعمال شده به ورق، ϵ_{x_i} : کرنش ایجاد شده در راستای طول ورق، K : ضریب استحکام و n : توان کرنش‌سختی ماده می‌باشد. با توجه به شکل (۱۷) و برقراری روابط هندسی، طول تماس جانبی ورق با ابزار در مرحله‌ی i ام (B_i) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$B_i = 2 \sqrt{R_b^2 - (R_b - i \cdot \Delta Z)^2} = 2 \sqrt{i \cdot \Delta Z (2R_b - i \cdot \Delta Z)} \quad (۵)$$

در این رابطه، R_b : شعاع ابزار و ΔZ : اندازه گام عمودی ابزار می‌باشد. با توجه به این که ضخامت ورق تغییرشکل‌یافته با

^۱ Power Hardening Law

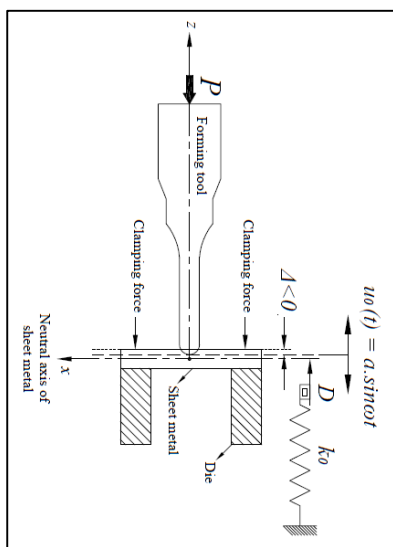
با برقراری روابط تعادل نیرو، مولفه‌های افقی و عمودی نیروی شکل‌دهی از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_{x_i} = T_i (1 - \cos \varphi_i) \quad (۸)$$

$$F_{z_i} = T_i \cdot \sin \varphi_i \quad (۹)$$

در این روابط، F_{z_i} و F_{x_i} به ترتیب عبارتند از مولفه‌های افقی و عمودی نیروی شکل‌دهی در مرحله i ام از نفوذ عمودی ابزار، T_i : نیروی کشش اعمالی به ورق و φ_i : زاویه کشش می‌باشد. در این پژوهش، مولفه عمودی نیروی شکل‌دهی (F_{z_i}) به عنوان نیروی اعمالی به محور ابزار شناخته می‌شود. از این رو، به منظور بررسی تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیند SPIF، رفتار این مولفه (F_{z_i}) در تحلیل تجربی مورد مطالعه و مقایسه قرار می‌گیرد.

شکل ۱۹، مدل‌سازی اجزای فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به کمک ارتعاشات اولتراسونیک (UVaSPIF)^۲ را نشان می‌دهد.



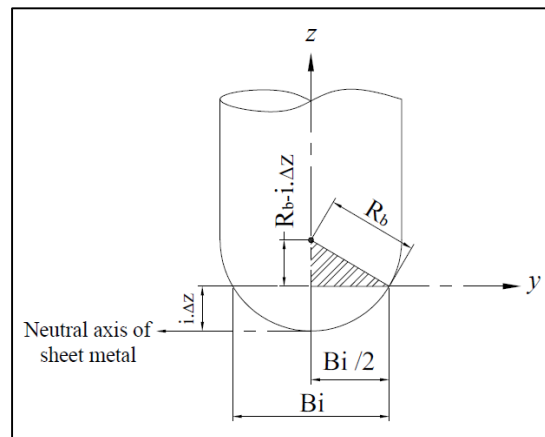
شکل ۱۹- مدل‌سازی رفتار ماده تحت بارگذاری ارتعاشی در فرآیند UVaSPIF

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نیروی P و تا زمانی که نیرو کمتر از حد تسلیم D باشد، اجزای اصطکاکی حرکت نمی‌کنند. در این وضعیت ($P < D$)، المان فنری

استفاده از قانون کسینوس^۱ [۳۹] قابل محاسبه می‌باشد، بنابراین رابطه (۴) به صورت زیر اصلاح و بازنویسی می‌شود:

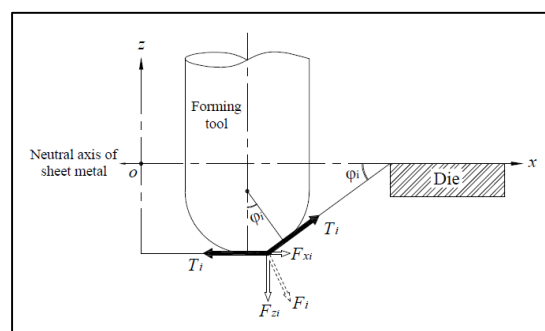
$$t_i = t_0 \cdot \cos \varphi_i \quad (۶)$$

$$T_i = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} K \cdot \varepsilon_{x_i}^n \cdot B_i \cdot t_0 \cdot \cos \varphi_i \quad (۷)$$



شکل ۱۷- نمای جانبی فرآیند SPIF (عمود بر مسیر شکل‌دهی)

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نیروی کشش اعمال‌شده به ورق در طی فرآیند SPIF، به خواص مکانیکی ماده، ضخامت اولیه ورق، زاویه کشش، کرنش طولی و مشخصات هندسی منطقه تماس میان ابزار و ورق، بستگی دارد. شکل (۱۸)، وضعیت تعادل ورق تغییرشکل‌یافته را تحت اثر نیروی کشش (T_i) نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- وضعیت تعادل ورق شکل‌دهی‌شده

^۲ Ultrasonic Vibration assisted SPIF

^۱ Cosine's Law

T_i به جای D در رابطه‌ی (۱۰)، نیروی کشش‌دهی به ورق در حضور ارتعاشات اولتراسونیک در مرحله‌ی i ام از فرآیند UVaSPIF (T_{ul_i}) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$T_{ul_i} = \frac{k_0 \cdot a}{2\pi} \left[2\pi \left(\frac{T_i}{k_0 \cdot a} - 1 + \frac{\pi v}{a\omega} \right) - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2\pi v}{a\omega} \right)^2} + \left(1 - \frac{2\pi v}{a\omega} \right) \cdot \cos^{-1} \left(1 - \frac{2\pi v}{a\omega} \right) \right]; \quad (11)$$

$$\frac{T_i}{k_0} \geq 2a$$

با توجه به اینکه زمان لازم برای شکل‌دهی ورق بیشتر از مدت زمان یک دوره‌ی تناوب می‌باشد، بنابراین سرعت متوسط تغییرشکل ورق معمولاً بسیار کوچکتر از ماکزیمم سرعت ارتعاشات اولتراسونیک می‌باشد ($v \ll a\omega$). با فرض $v \ll a\omega$ ، رابطه‌ی فوق به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$T_{ul_i} = T_i \left(1 - \frac{k_0 \cdot a}{T_i} \right) = T_i - k_0 \cdot a; \quad \frac{T_i}{k_0} \geq 2a \quad (12)$$

در این رابطه، k_0 : سفتی استاتیک ماده، a : دامنه‌ی ارتعاش و T_i : نیروی کشش در مرحله‌ی i ام از فرآیند SPIF می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تحریک اولتراسونیک ابزار شکل‌دهی، موجب کاهش نیروی کشش‌دهی به ورق خواهد شد. به عبارت دیگر، حد تسلیم جنس ورق که پیش از این مساوی نیروی کشش در فرآیند SPIF فرض شده بود، به میزان $k_0 \cdot a$ در فرآیند UVaSPIF کاهش یافته است. بنابراین دامنه‌ی ارتعاش ابزار شکل‌دهی (a) و سفتی استاتیک ماده (k_0) به عنوان پارامترهای موثر بر کاهش نیروی کشش در فرآیند UVaSPIF شناخته می‌شوند.

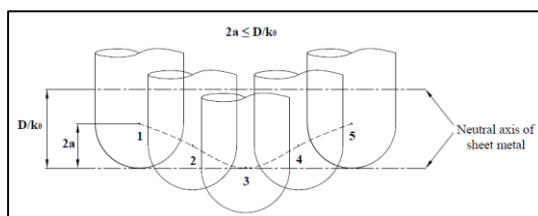
در نتیجه، دامنه‌ی ارتعاش ابزار به همراه پارامترهای موثر بر سفتی استاتیک ماده همچون: خواص مکانیکی ماده، مشخصات هندسی منطقه‌ی موضعی شکل‌دهی و ضخامت اولیه‌ی ورق به عنوان عوامل موثر بر کاهش نیروی کشش در فرآیند UVaSPIF معرفی می‌شوند. بنابراین، تحت شرایط یکسان از ویژگی‌های مکانیکی، هندسی و ابعادی ماده، کاهش نیروی کشش و کاهش مولفه‌های نیروی شکل‌دهی متناسب با دامنه‌ی ارتعاش می‌باشد. این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیقات نویل-پراتزن [۱۶] مطابقت دارد. آن‌ها دریافتند که مقدار کاهش تنش تسلیم وابسته به دامنه‌ی ارتعاش و مستقل از فرکانس اولتراسونیک می‌باشد.

متصل به اجزای اصطکاکی، حرکت کرده و فشرده می‌شود. مود ارتعاش ابزار شکل‌دهی از نوع طولی^۱ می‌باشد و ورق فلزی با اعمال بارگذاری ابزار مرتعش، شکل‌دهی می‌شود. با استفاده از تئوری ضربه^۲، مقدار نیروی استاتیکی اعمال شده از سوی ابزار مرتعش (P) در یک سیکل بارگذاری به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴۰]:

$$P = \frac{k_0 \cdot \omega}{2\pi} \left[\frac{a}{\omega} (\cos \omega t_1 - \cos \omega t_2 + \cos \omega t_3 - \cos \omega t_4) + \frac{v}{2} (t_2^2 - t_1^2 + t_4^2 - t_3^2) \right] \quad (10)$$

در این رابطه، k_0 : سفتی استاتیک ماده، ω : فرکانس زاویه‌ای ارتعاش، Δ : فاصله‌ی میان مرکز ارتعاش ابزار و سطح افقی ورق کلمپ‌شده، D : حد تسلیم ماده، u_m : ماکزیمم جابجایی ابزار مرتعش، a : دامنه‌ی ارتعاش، v : سرعت متوسط تغییرشکل ورق و t_1, t_2, t_3, t_4 زمان‌های تغییر وضعیت بارگذاری می‌باشند.

از سوی دیگر، در طی فرآیند UVaSPIF، وقوع پدیده‌ی برگشت‌فتری در ورق شکل‌دهی شده، اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بنابراین تماس ابزار مرتعش با ورق فلزی قطع نمی‌شود (شکل ۲۰). از این‌رو، در یک سیکل بارگذاری، نیروی P به صورت پیوسته و با حالت نوسانی به ورق فلزی اعمال می‌شود.



شکل ۲۰- اتصال پیوسته و دائم ابزار مرتعش با ورق فلزی

بنابراین رابطه‌ی $\left(\frac{D}{k_0} \geq 2a \right)$ برقرار می‌باشد و رژیم بارگذاری ابزار مرتعش به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود. با توجه به محاسبه‌ی نیروی کشش‌دهی به ورق در فرآیند SPIF (T_i)، می‌توان فرض نمود که حد تسلیم جنس ورق (D) برابر نیروی کشش می‌باشد. از این‌رو، با جایگذاری

¹ Longitudinal Mode

² Theorem of Momentum

نیروی F_z را به میزان ۱۳/۸۴٪ و ۱۰/۱۰٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار، کاهش می‌دهد. بنابراین تأثیر به‌کارگیری ابزار مرتعش بر کاهش نیروی میانگین F_z ، تأیید می‌شود. همچنین تأثیر ارتعاش اولتراسونیک در کاهش مقدار نیروی میانگین F_z ، در صورت عدم استفاده از روانکار، موثرتر می‌باشد.

(ج) در شرایط مشابه از اعمال ارتعاش اولتراسونیک، اجرای فرآیند بدون استفاده از روانکار در مقایسه با اجرای فرآیند با استفاده از روانکار، موجب کاهش مقدار نیروی میانگین F_z به میزان ۳۸/۹۶٪ و ۴۶/۶۳٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار می‌شود. از سوی دیگر، در شرایط مشابه از عدم اعمال ارتعاش اولتراسونیک، اجرای فرآیند با استفاده از روانکار در مقایسه با اجرای فرآیند بدون استفاده از روانکار، موجب کاهش مقدار نیروی میانگین F_z به میزان ۱۴/۹٪ و ۹/۰۴٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار می‌شود. بنابراین در فرآیند UVaSPIF، عدم حضور روانکار و در فرآیند SPIF، حضور روانکار در کاهش مقدار نیروی میانگین F_z موثرتر می‌باشد.

(د) به‌کارگیری همزمان روانکار و ارتعاش اولتراسونیک در مقایسه با عدم حضور همزمان روانکار و ارتعاش اولتراسونیک، موجب کاهش مقدار نیروی میانگین F_z به میزان ۲۷٪ و ۱۸/۴٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار می‌شود.

(ه) ارتعاشات اولتراسونیک با کاهش مقاومت برشی روانکار، کارایی روانکار را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، با اعمال ارتعاشات اولتراسونیک، امکان شکست زنجیره‌های طولانی مولکول‌های پلیمری روانکار، وجود دارد. در نتیجه، ویسکوزیته و ظرفیت جذب سطحی روانکار، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، به‌کارگیری ارتعاشات اولتراسونیک منجر به تولید حرارت و افزایش دما در طی فرآیند می‌شود. بنابراین، روانکار ممکن است، تجزیه شود و ظرفیت روانکاری، کاهش یابد. از سوی دیگر، روانکار ممکن است تحت نوسان مکانیکی ارتعاش دماغه ابزار از سطح تماس ابزار و ورق، تخلیه شود.

(و) دامنه‌ی ارتعاش ابزار به همراه پارامترهای موثر بر سفتی استاتیک ماده همچون: خواص مکانیکی ماده، مشخصات هندسی منطقه‌ی موضعی شکل‌دهی و ضخامت

با برقراری روابط تعادل نیرو (شکل ۱۸)، مولفه‌های افقی و عمودی نیروی شکل‌دهی در حضور ارتعاشات اولتراسونیک از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_{x_{ul_i}} = T_{ul_i} (1 - \cos \varphi_i) \quad (13)$$

$$F_{z_{ul_i}} = T_{ul_i} \cdot \sin \varphi_i \quad (14)$$

در این روابط، $F_{x_{ul_i}}$ و $F_{z_{ul_i}}$ به ترتیب عبارتند از مولفه‌های افقی و عمودی نیروی شکل‌دهی در حضور ارتعاشات اولتراسونیک در مرحله‌ی i ام از نفوذ عمودی ابزار، T_{ul_i} : نیروی کشش اعمالی به ورق در حضور ارتعاشات اولتراسونیک و φ_i : زاویه‌ی کشش می‌باشد. بنابراین با کاهش نیروی کشش در فرآیند UVaSPIF، مولفه‌ی عمودی نیروی شکل‌دهی (نیروی اعمالی به محور ابزار مرتعش) در مقایسه با فرآیند SPIF، کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بررسی تأثیر ارتعاش اولتراسونیک و روانکار در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، طراحی و ساخت ابزار سرنیمکروی مرتعش به قطر ۲۰ میلی‌متر و با فرکانس طبیعی ۲۰/۴ کیلوهرتز انجام شد. هدف از این پژوهش، مطالعه و تفکیک اثرات ارتعاش اولتراسونیک و روانکار بر رفتار مولفه‌ی عمودی نیروی شکل‌دهی در فرآیند SPIF می‌باشد. نتایج مهم حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود:

(الف) ظهور مود طولی ارتعاش و وقوع پدیده‌ی رزونانس در ابزار مرتعش در دو وضعیت استاتیکی (بدون دوران) و دینامیکی (با دوران) توسط نتایج حاصل از تحلیل عددی ($f = 20.17 \text{ kHz}$) و تست تجربی فرکانس طبیعی ابزار شکل‌دهی ($f = 20.14 \text{ kHz}$) به تأیید رسید. بنابراین عملکرد ارتعاشی ابزار شکل‌دهی به قطر ۲۰ میلی‌متر به منظور نصب و مونتاژ بر روی سیستم انتقال ارتعاش اولتراسونیک و اجرای فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی به کمک ارتعاش اولتراسونیک (UVaSPIF) مورد تأیید قرار گرفت.

(ب) در شرایط مشابه از عدم حضور روانکار، اعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار شکل‌دهی در مقایسه با فرآیند SPIF موجب کاهش مقدار نیروی F_z به میزان ۵۴/۱۵٪ و ۵۴/۶۳٪ به ترتیب در طی حرکات عمودی و افقی ابزار می‌شود. از سوی دیگر، در شرایط مشابه از حضور روانکار، به‌کارگیری ابزار مرتعش در مقایسه با ابزار غیرمرتعش، مقدار

incremental forming of sheet metal. Ann CIRP 54(2): 623-649.

[6] Thibaud S, Ben Hmida R, Richard F, Malécot P (2012) A fully parametric toolbox for the simulation of single point incremental sheet forming process: Numerical feasibility and experimental validation. Simul Model Pract Th 29: 32-43.

[7] Attanasio A, Ceretti E, Giardini C (2006) Optimization of tool path in two points incremental forming. J Mater Process Technol 177: 409-412.

[8] Ambrogio G, Filice L, Micari F (2006) A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming. J Mater Process Technol 177: 413-416.

[9] Blaha F, Langenecker B (1955) Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration. Naturwissenschaften 42(20): 556-556.

[10] Langenecker B (1961) Work-softening of metal crystals by alternating the rate of glide strain. Acta Metal 9: 937-940.

[11] Langenecker B (1966) Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals. IEEE Trans Sonics Ultrason 13: 1-8.

[12] Lucas M, Gachagan A, Cardoni A (2009) Research applications and opportunities in power ultrasonics. Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci 223(12): 2949-2965.

[13] Winsper CE, Sansome E (1967) A review of the application of oscillatory energy to metals deforming plasticity. 8th International MTDR Conference, Manchester 1359-1360.

[14] Malygin GA (2000) Acoustoplastic effect and the stress superimposition mechanism. Phys Solid State 42: 72-78.

[15] Pohlman R, Lehfeldt E (1966) Influence of ultrasonic vibration on metallic friction. Ultrasonics 4: 178-185.

[16] Nevill GE, Brotzen FR (1957) Effect of vibration on the yield strength of a low-carbon steel. in First Technical Report, The Rice Institute, Solid Science Division, Air Force Office of Scientific Research, ARDC, Washington.

[17] Green RE (1975) Non-linear effects of high-power ultrasonics in crystalline solids. Ultrasonics 13: 117-127.

[18] Daud Y, Lucas M, Huang Z (2007) Modelling the effects of superimposed ultrasonic vibrations on tension and compression tests of aluminium. J Mater Process Technol 186(1-3): 179-190.

[19] Petukhov VI, Abramov OV, Zubko AM, Manegin YV (1973) Extrusion of aluminium in an ultrasonic field. Light Met Age 31: 6-8.

[20] Jimma T, Kasuga Y, Iwaki N, Miyazawa O, Mori E, Katsuhiko K, Hatano H (1998) An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process. J Mater Process Technol 80-81: 406-412.

اولیه‌ی ورق به عنوان عوامل موثر بر کاهش نیروی کشش در فرآیند UVaSPIF معرفی شدند. بنابراین، تحت شرایط یکسان از ویژگی‌های مکانیکی، هندسی و ابعادی ماده، کاهش نیروی کشش و کاهش مولفه‌های نیروی شکل‌دهی متناسب با دامنه‌ی ارتعاش می‌باشد.

۷- سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی با عنوان "مطالعه و بررسی تجربی فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی به کمک ارتعاشات اولتراسونیک" و با حمایت مادی و معنوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نایین انجام پذیرفته است.

۸- فهرست علائم

سرعت انتشار موج (m/s)	c
مدول یانگ (Pa)	E
فرکانس (Hz)	f
مولفه‌ی عمودی نیروی وارد بر ابزار (N)	F_z
زمان (s)	t
ضخامت ورق (mm)	t

علائم یونانی

دانسیته (kg/m^3)	ρ
فرکانس زاویه‌ای (rad/s)	ω
طول موج (mm)	λ

زیرنویس

راستای عمود بر صفحه $x-y$	z
---------------------------	-----

۹- مراجع

[1] Harper C (2001) Handbook of materials for product design. McGraw-Hill.

[2] Smith CS (1991) Design of submersible pressure hulls in composite materials. Marine Structures. 4(2): 141-182.

[3] Petek A, Jurisevic B, Kuzman K, Junkar M (2009) Comparison of alternative approaches of single point incremental forming processes. J Mater Process Technol 209: 1810-1815.

[4] Dufloy J, Tunckol Y, Szekeres A, Vanherck P (2007) Experimental study on force measurements for single point incremental forming. J Mater Process Technol 189: 65-72.

[5] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley A, Dufloy J, Allwood J (2005) Asymmetric single point

- [31] Abedini R, Abdullah A, Alizadeh Y, Fartashvand V (2016) A Roadmap for application of high power ultrasonic vibrations in metal forming. *Modares Mechanical Engineering* 16(10): 323-334. (in Persian)
- [32] Vahdati M, Mahdavejad R, Amini S (2015) Investigation of the ultrasonic vibration effect in incremental sheet metal forming process. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 1-12.
- [33] Ensminger D, Bond LJ (2012) *Ultrasonics fundamentals, technologies, and applications*. 3rd edn. CRC press.
- [34] <http://www.atlassteels.com.au>
- [35] Young MJR, Winsper CE, Sansome DH (1970) The effect of tool attachment on the resonant characteristics of ultrasonic waveguides. *Appl Acoust* 3: 217-224.
- [36] <http://www.3DS.com/simulia>
- [37] DIN 51524, Part 2.
- [38] Iseki H (2001) An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller. *J Mater Process Technol* 111: 150-154.
- [39] Hussain G, Gao L (2007) A novel method to test the thinning limits of sheet-metals in negative incremental forming. *Int J Mach Tools Manuf* 47: 419-435.
- [40] Astashev VK, Babitsky VI (2007) *Ultrasonic processes and machines: Dynamics, control and applications*. Springer Science & Business Media, Berlin.
- [21] Ashida Y, Aoyama H (2007) Press forming using ultrasonic vibration. *J Mater Process Technol* 187-188: 118-122.
- [22] Inoue M (1984) Studies on ultrasonic metal tube drawing. *Mem Sagami Inst Technol* 19: 1-7.
- [23] Hung JC, Hung C (2005) The influence of ultrasonic vibration on hot upsetting of aluminum alloy. *Ultrasonics* 43: 692-698.
- [24] Li L, Lang X (1994) Wire drawing with ultrasonic vibration. *Wire Ind* 61: 721-721.
- [25] Murakawa M, Jin M, Kaewtatip P (1999) Utility of ultrasonic vibration applied to metal-forming processes. *Adv Technol Plast* 19-24.
- [26] Murakawa M, Jin M (2001) The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process. *J Mater Process Technol* 113: 81-86.
- [27] Siegert K, Mock A (1996) Wire drawing ultrasonically oscillating dies. *J Mater Process Technol* 60: 657-660.
- [28] Siegert K, Ulmer J (2001) Superimposing ultrasonic waves on the dies in tube and wire drawing. *J Eng Mater Technol Trans ASME* 123: 517-523.
- [29] Lucas M, Daud Y (2009) A finite element model of ultrasonic extrusion. 7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, pp. 181, IOP Publishing Ltd,.
- [30] Rasoli MA, Abdullah A, Farzin M, Fadaei Tehrani A, Taherizadeh A (2012) Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process. *J Mater Process Technol* 212: 1443-1452.