مجله‌مهندسی مکانیک مدرس،فروردین ۱۳۹۲، دوره ۱۴،شماره ۱، ص‌ص ۸۹-۹۶

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی پارامترهای مؤثر بر نیروی شکل‌دهی، دقت ابعادی و توزیع ضخامت در فرایند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای

حسین قاسمی[۱]، بهزاد سلطانی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

* کاشان، کد پستی ۸۷۳۱۷۵۱۱۶۷، bsoltani@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۳مرداد۱۳۹۲

پذیرش: ۳۱ شهریور۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۱ بهمن ۱۳۹۲

کلید واژگان:

شکل‌دهی نموی

پیش‌روی

چرخش ابزار

نیروی شکل‌دهی

دقت ابعادی

چکیده

شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای یک فرآیند شکل‌دهی ورق است که قابلیت انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به دیگر روش‌های شکل‌دهی دارد. در این روش نیازی به ساخت قالب برای فرآیند نیست و می‌توان با استفاده از یک ابزار ساده و ماشین CNC، شکل‌دهی را به اشکال گوناگون انجام داد.در این مقاله، تأثیر برخی پارامترها بر نیروو دقت ابعادی و توزیع ضخامت در فرایند شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای بررسی شده است. این پارامترها شامل سرعت پیش‌روی، چرخش ابزار، گام عمودی، استراتژی حرکت ابزار و روان‌کار می‌باشد. ابتدا، با طراحی و ساخت ابزار و ورق‌گیر و بستن آن بر روی دیناموتر، آماده‌سازی فرایند بر روی دستگاه فرز CNCانجام گردید. سپس آزمایش‌ها بر روی ورق از جنس آلومینیوم (Al-1200) با ایجاد یک هرم ناقص انجام شد و پس از اندازه‌گیری نیرو در جهات مختلف، تأثیر پارامترها بر نیروی شکل‌دهی بررسی شد. همچنین نمونه‌های شکل‌دهی شده با دستگاه CMM اندازه گیری و با هم مقایسه شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش سرعت پیش‌روی ابزار، نیروی عمودی را کاهش می‌دهد و با افزایش سرعت چرخش، نیروی افقی کاهش می‌یابد. استفاده از روان‌کار، در بهبود فرایند تأثیرگذار است.

Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming

HosseinGhasemi, BehzadSoltani*

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
*P.O.B. 8731751167 Kashan, Iran, bsoltani@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14August2013
Accepted 22September2013
Available Online 21 January 2014

Keywords:
Incremental Forming
Feed
Tool Rotation
Forming Force
Dimensional Accuracy

ABSTRACT

Single point incremental forming is a sheet metal forming process that has more flexibility than another methods. This process don't require to die and could formed various shape white use the simple tool and CNC machine. In this paper the influence of process parameters on the forces and dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming is investigated. These parameters include the feed rate, tool rotation, vertical step, movement strategy of tool and lubrication. Beginning with the design and construction of the fixture and clamping it on the dynamometer and create of tool (tungsten carbide), the preparation process was done on a CNC milling machine. Then, the experimental tests were carried out on Aluminum alloy sheets (Al-1200) with creation of pyramid frustum; after the measuring of force in different directions, the influence of parameters on the forming force was investigated. Also parts were measured with CMM devices and compared. The results showed that with increasing the feed rate, the vertical force decreases and with increasing tool rotation speed, horizontal force decreases. The use of lubricant, is effective on the improvement of process.

۱- مقدمه

از آنجایی که برای تولید قطعات کوچک و ساخت سریع نمونه اولیه قطعات روش‌های معمول شکل‌دهی که عموماً نیاز به قالب دارند به صرفه نیستند، استفاده از روش‌های جدید اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. امروزه استفاده از کامپیوتر در فرایندهای تولید گسترش روش‌های جدید را ممکن ساخته است. روش‌های جدید شکل‌دهی به سوی کاهش هزینه و افزایش انعطاف‌پذیری فرایند تمایل دارند. یکی از روش‌های شکل‌دهی، که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، شکل‌دهی نموی است. در این فرایند، نیازی به ساخت قالب نبوده ویک ابزار با شکل ساده به‌وسیله ماشین CNC حرکت کرده و باعث ایجاد تدریجی تغییر شکل پلاستیک در ورقی که از اطراف در یک نگه‌دارنده ثابت شده است، می‌شود. یکی از مزیت‌های این روش امکان ایجاد قطعات به شکل‌های پیچیده است. جسویت و همکاران[۱] نمونه‌هایی از قابلیت‌ها و

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Ghasemi, B. Soltani, Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 89-96, 2014(In Persian)

کاربردهای این فرایند را ذکر کردند. یکی دیگر از ویژگی‌های مطلوب این فرایند نیروی کم لازم برای شکل‌دهی است. همچنین، این روش برای تولید با تعداد کم مناسب می‌باشد. شکل‌دهی نموی، محدودیت‌های بیشتری نسبت به دیگر فرایندهای معمول دارد، که از آن جمله می‌توان به زمان زیاد برای شکل‌دهی، برگشت فنری ورق و چند مرحله‌ای بودن برای شکل‌دهی با زاویه جداره زیاد اشاره کرد[۲].

پارامترهای اصلی که در این فرایندتأثیرگذارند عبارت است از: پیش‌روی، گام عمودی، سرعت چرخش ابزار، ضخامت ورق، قطر ابزار، مسیر حرکت ابزار و شرایط روان‌کاری بین ابزار و سطح ورق. نتایج برخی از مطالعات انجام شده را می‌توان این‌گونه خلاصه نمود:

جسویت (۲۰۰۱)[۳]، فرآیند شکل‌دهی نموی را با دو روش، با حرکت ابزار شکل‌دهی بر روی ورق و با استفاده از یک ابزار پشتیبان در زیر ورق همراه با حرکت ابزار شکل‌دهی بر روی ورق، مطالعه کرد. فراتینی و همکاران[۴] شکل‌پذیری مواد مختلف را در شکل‌دهی نموی بررسی کردند. ماکزیمم کرنش شکست در شرایط کرنش صفحه‌ای برای مواد مختلف تعیین شد. همچنین، دیاگرام حد شکل‌دهی FLD ترسیم شده و تأثیر پارامترهای مربوط به ویژگی‌های مکانیکی ماده بر حد شکل‌دهی بررسی شدند. آن‌ها نشان دادند که با ضریب سخت‌شوندگی کرنشی و درصد کشش بیشتر، قابلیت شکل‌پذیری ورق بیشتر خواهد بود.

کیم و پارک (۲۰۰۲)[۵]تأثیر پارامترهای فرایند همچون نوع ابزار، اندازه ابزار، اصطکاک در میان سطوح ابزار و ورق و ناهمگنی سطحی ورق را بر روی قابلیت شکل‌پذیری توسط آزمایش‌های تجربی و آنالیزهای المان محدود بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اصطکاک کمتر بین ابزار و ورق به شکل‌دهی بهتر کمک می‌کند. پارک و کیم (۲۰۰۳)[۶] قابلیت شکل‌پذیری یک ورق آلومینیم تحت شرایط مختلف شکل‌دهی را ارزیابی و اشکال پیچیده هندسی را با این تکنیک تولید کردند. با استفاده از دانش و تجربه کسب شده در این تحقیق، امکان تولید بسیاری از سطوح وجود دارد. آمبراجیو و همکاران (۲۰۰۴)[۷] بر روی قابلیت شکل‌پذیری ماده در فرایند شکل‌دهی نموی و خصوصاً ارزیابی و جبران برگشت فنری الاستیک، به منظور بهبود دقت هندسی، با استفاده از آنالیز المان محدود متمرکز شدند. آتاناسیو و همکاران (۲۰۰۶)[۸] نشان دادند که برای رسیدن به نتایج مطلوب در کیفیت سطح و دقت هندسی، استفاده از مسیر ابزار با گام مناسب با توجه به هندسه قطعه مهم است. کارینو و همکاران (۲۰۰۶)[۹]تأثیر قطر ابزار را بر این فرایند مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش قطر ابزار، تولید قطعات با هندسه پیچیده، مشکل و نیروی شکل‌دهی بیشتر خواهد شد. آمبراجیو و همکاران (۲۰۰۶)و فیلیک و همکاران (۲۰۰۶)[۱۱،۱۰] تاکید کردند که بررسی بارهای شکل‌دهی مهم بوده و مانیتورینگ نیروها می‌تواند ابزار مناسبی برای پیش‌گیری از شکست باشد.

آمبراجیو و همکاران (۲۰۰۷)[۱۲] از یک تحلیل آماری برای تأثیر پارامترهای مختلف بر دقت شکل‌دهی استفاده کردند. جکسون و آلوود (۲۰۰۹)[۱۳] توزیع کرنش در ضخامت ورق مس را در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که مکانیزم شکل‌دهی نموی به صورت برش وکشش درصفحه عمود بر راستای ابزار و همچنین برش در صفحه موازی با راستای ابزار می‌باشد. آرنس و همکاران (۲۰۰۹)[۱۴] یک فرمول تجربی برای پیش‌بینی نیرو، که تأثیر هر یک از عوامل (زاویه، گام عمودی، ضخامت و قطر ابزار) در آن درنظر گرفته شده است، به‌دست آوردند. همیلتون و جسویت (۲۰۱۰)[۱۵] به بررسی فرآیند شکل‌دهی نموی با سرعت‌های پیشروی بالا پرداخته‌اند. آزمایش‌ها روی ورق Al3003 با حداکثر سرعت پیشروی ۸۸۹۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. محدوده افزایش سرعت پیشروی براساس شرایط کاری ماشین CNC انتخاب شده است. آنها نتایج آزمایش‌هایشان را با فاکتور سرعت (kS/F نسبت سرعت چرخش به پیشروی که در آن k ضریب تبدیل واحد متریک و برابر ۲۵/۴ است) تحلیل کرده‌اند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت پیشروی تا ۸۸۹۰ میلی‌متر بر دقیقه تأثیر چندانی بر توزیع ضخامت ندارد. بررسی زبری سطوح نشان داد که زبری سطح وابستگی شدیدی به گام عمودی دارد. در عین حال، هرچه نسبت سرعت چرخش به پیشروی ابزار بیشتر باشد، زبری سطح و پدیده پوست پرتقالی شدن کمتر خواهد بود. آزمایش‌ها نشان داده است که افزایش نسبت سرعت چرخش به پیشروی بیش از عدد ۵ ($kS/F>5$) سودی نخواهد داشت و سبب افزایش گرما در سطوح تماسی ابزار و ورق می‌شود.فان و همکاران (۲۰۰۹)[۱۶] از گرم کردن الکتریکی برای بالا بردن قابلیت شکل‌دهی ورق تیتانیوم استفاده کردند. در کار آن‌ها،درجه حرارت مناسب برای جلوگیری از اکسیداسیون ۵۰۰-۶۰۰ و ماکزیمم زاویه شکل‌دهی ۷۲ درجه به‌دست آمد. فیوروتو و همکاران (۲۰۱۰)[۱۷] امکان شکل‌دهی ورق کامپوزیت را با استفاده از روش نموی بررسی کردند.

در سال‌های اخیر، تلاش‌های مفیدی برای بهینه‌سازی فرایند و همچنین گسترش کاربرد آن برای گستره وسیع‌تری از مواد مانند پلیمرها و مواد سبک با شکل‌پذیری پایین صورت گرفته است[۱۹،۱۸]. با وجود مطالعات انجام شده،تحقیقات بیشتری به منظور مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف روی این فرایند و تلاش برای بهبود قابلیت‌های صنعتی آن نیاز است. کنترل این پارامترها برای بهبود شرایط انجام فرایند و کیفیت محصول نهایی لازم است.

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروی شکل‌دهی یکی از موارد مهمی است که به آن باید توجه شود. در پژوهش حاضر، به برخی از پارامترهایی که در تحقیقات قبلی کمتر به آن توجه شده پرداخته شده است. در این مقاله، از پنج استراتژی مختلف برای حرکت ابزار استفاده شده است.همچنین، تأثیر سرعت پیش‌روی و چرخش ابزار و گام عمودی، بر نیروهای شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای، مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از طراحی روند انجام آزمایش، فرایند شکل‌دهی، برای تولید یک هرم ناقص از جنس آلومینیوم (Al-1200)به‌ازای تغییر پارامترهای مورد نظر، انجام گرفت و نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی حین فرایند اندازه‌گیری شده و سپس تجزیه و تحلیل بر روی نتایج انجام شد. یکی دیگر از موارد مورد مطالعه در این مقاله دقت هندسی نمونه‌ها و توزیع ضخامت ورق و بررسی تأثیر پارامترهای ذکر شده بر آن است. بدین منظور ابعاد نمونه‌های تولید شده به‌وسیله دستگاه CMM و ضخامت آنها با میکرومتر اندازه‌گیری شد.

۲- آماده‌سازی فرایند

برای انجام آزمایش‌ها، تجهیزات مختلفی مورد نیاز است؛ این تجهیزات و روند آماده‌سازی فرایند در زیر شرح داده شده است:

قسمت نگه‌دارنده بخشی از تجهیزات آزمایش است که ورق در آن ثابت می‌شود و شکل‌دهی صورت می‌پذیرد. این نگه‌دارنده شامل قسمت‌هایی مثل صفحه پایینی، پایه، صفحه پشتی، صفحه نگه‌دارنده ورق و پیچ و مهره‌هاست، که نمای کلی آن در شکل ۱ آمده است. صفحه نگه‌دارنده و صفحه پشتی ورق دارای یک حفره به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر هستند و هرم ناقص با

قاعده ۷۰×۷۰ میلی‌متر و عمق ۱۰ میلی‌متر از ورق آلومینیوم Al-1200به ضخامت ۱/۲ میلی‌متر شکل‌دهی شده است.

در این آزمایش ابزار به شکل استوانه با سر نیم‌کره به قطر ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است. از آنجا که عامل اصطکاک و در نتیجه سایش مهم‌ترین عامل وارد بر ابزار در این فرایند شکل‌دهی می‌باشد، ابزار از جنس تنگستن کاربایدساخته شده که استحکام سایشی بسیار بالایی دارد.

به منظور اندازه‌گیری نیرو از دینامومتر کیستلر مدل 9257Bاستفاده شده است. دینامومتر زیر نگه‌دارنده قرار داده شده و مجموعه نگه‌دارنده و ورق و دینامومتر، مطابق شکل ۲-الف، روی میز ماشین CNC (ماشین سنتر CNCاتامیل، مدل VL1000) بسته شدند.

برای تعیین مسیر ابزار، ابتدا مدل هندسی هرم ناقص با ابعاد مورد نظر در نرم‌افزار سالید ورکس شبیه‌سازی شد. سپس مدل ساخته شده به نرم‌افزار پاور میل انتقال داده شده و مسیر حرکت ابزار و نقطه شروع حرکت ابزار، روی نمونه مدل‌سازی شده، مشخص شد. فایل خروجی نرم‌افزار، توسط ماشین CNC، خوانده شده و حرکت دستگاه و در نتیجه شکل‌دهی، مطابق برنامه، انجام شد.

۳- انجام آزمایش‌ها و نتایج

همان‌طور که اشاره شد، هندسه قطعه نهایی، یک هرم ناقص با قاعده مربعی به ضلع ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر درنظر گرفته شده است (شکل ۲-ب). خصوصیات هندسی مدلو پارامترهای فرایند در جدول ۱ آمده است. در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی انجام شده در مرجع [۲۰]، روی همین ماده و با ابعاد و هندسه مشابه، مشاهده شده است که نیروی شکل‌دهی در عمق بیشتر از ۱۰ میلی‌متر تغییرات چندانی نداشته و تقریباً به مقداری ثابت می‌رسد، تا اینکه پارگی و شکست در ورق رخ می‌دهد. از آنجا که هدف این تحقیق بررسی شکست قطعه نبوده و مقایسه نیروی لازم برای شکل‌دهی به‌ازای تغییر پارامترهای ذکر شده بوده است، ادامه دادن فرآیند تا عمق بیش از ۱۰ میلی‌متر لزومی نداشته و بنابراین در تمام آزمایش‌ها از این عمق برای شکل‌دهی استفاده شده است؛ حال آنکه در عمق بیشتر نیز روند تغییر نیرو تفاوت چندانی نخواهد داشت.

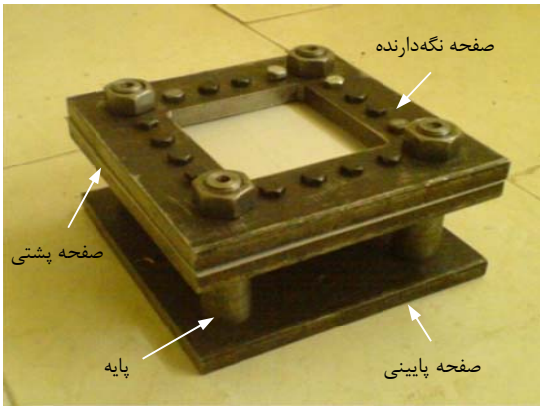
برای بررسی هر یک از پارامترهای مورد نظر، چند آزمایش انجام شده و روند تغییرات نیرو، که با دینامومتر اندازه‌گیری شده است، با هم مقایسه شده‌اند.

نیروی شکل‌دهی به دو مؤلفه افقی و عمودی تقسیم شده است. نیروی افقی از برایند نیروها در راستای x و y و از رابطه $F_h=\sqrt{F_x^2+F_y^2}$ به‌دست آمده است.

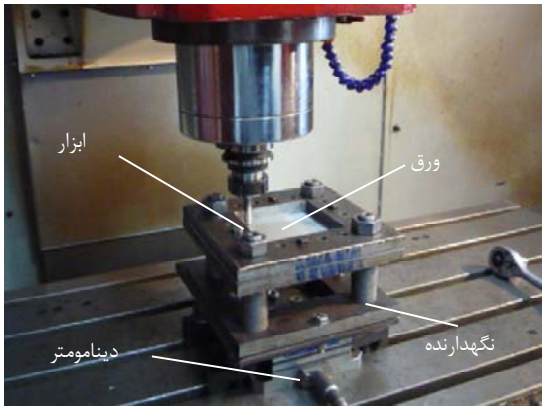
شکل ۳ نمودار نیروها را در جهات افقی و عمودی، برای پیش‌روی ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، در طول بازه زمانی یک گام حرکت ابزار در مسیر حلزونی، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طول حرکت ابزار، به‌دلیل ایجاد سختی کرنشی، مقاومت ورق افزایش و در نتیجه نمودار نیروها روند افزایشی را طی می‌کنند. در حین فرایند، ابزار به طور متوالی روی دیواره هرم حرکت می‌کند. نمودار شکل ۳ نشان می‌دهد که در گوشه‌های مسیر مقادیر نیرو به طور نسبی ماکزیمم است. در این نواحی سطح تماس ابزار با ورق بیشتر بوده؛ ضمن اینکه در گوشه‌ها محدودیت بیشتری از سوی نگه‌دارنده به ورق اعمال می‌شود.مدهای اصلی تغییر شکل ورق در شکل‌دهی نموی به‌صورت کرنش صفحه‌ای و کشش در سطوح صاف و کشش دومحوری در گوشه‌هاست. تنش اصطکاکی بین ابزار و ورق شامل دو قسمت می‌شود: تنش نصف‌النهاری (در راستای ضخامت) و تنش محیطی[۲۱].

جدول ۱ پارامترهای فرایند

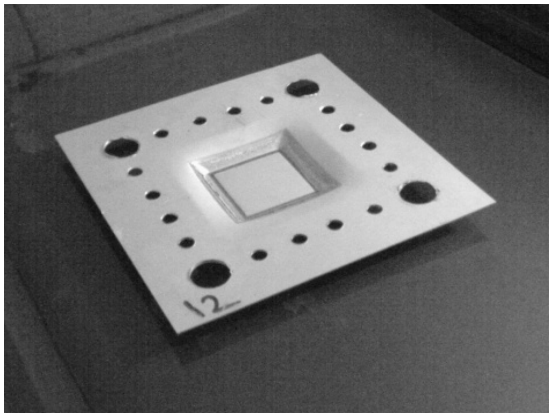
پارامتر	مقدار
ضخامت ورق (mm)	۱/۲
ابعاد مقطع هرم (mm)	۷۰×۷۰
ارتفاع (mm)	۱۰
زاویه دیواره (درجه)	۴۵
گام حرکت ابزار (mm)	۱
پیشروی (mm/min)	۸۰۰-۵۰۰-۲۰۰
چرخش ابزار (rpm)	۴۰۰-۱۰۰-۵۰



شکل ۱ نگه‌دارنده ورق



(الف)



(ب)

شکل ۲ الف- تجهیزات آزمایش ب- نمونه‌ای از ورق شکل‌دهی شده

تنش محیطی در طول مسیر حرکت ابزار تغییر چندانی ندارد، اما تنش در راستای ضخامت ورق، در گوشه‌های مسیر مربع‌شکل، تقریباً دوبرابر سطوح صاف است. بنابراین، با حرکت ابزار به سمت گوشه‌های مسیر، تنش اصطکاکی

و در نتیجه نیرو افزایش خواهد یافت. هرچه ابزار از گوشه‌ها فاصله می‌گیرد، نیرو کاهش می‌یابد.

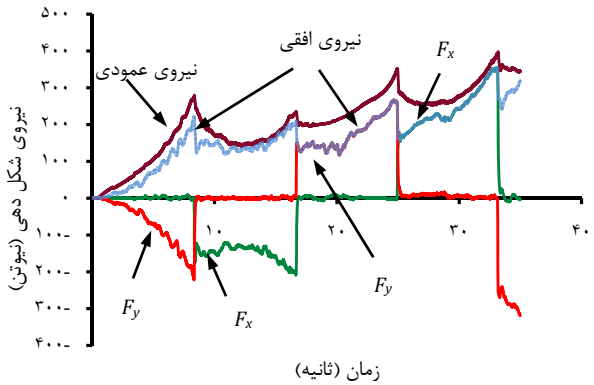
بهبود دقت هندسی و قابلیت شکل‌پذیری از موارد مهم تحقیقات هستند. مطالعات زیادی برای حل این مشکل انجام شده است. از آن جمله می‌توان به ایجاد یک الگوریتم برای اصلاح مسیر حرکت ابزار و یا استراتژی شکل‌دهی چندمرحله‌ای اشاره کرد[۲۳،۲۲]. این روش‌ها زمان انجام فرایند را افزایش می‌دهند. یک روش دیگر استفاده از مسیر جدید است که اثر کمتری بر زمان دارد. در این مقاله مسیرهای جدیدی بررسی شده‌اند که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

۳-۱- تأثیر پارامترهای آزمایش بر نیروی شکل‌دهی

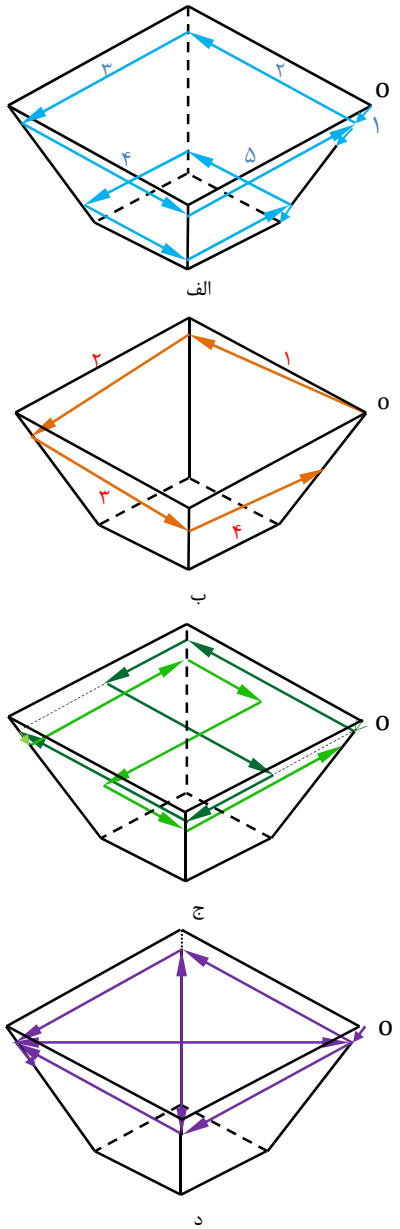
۳-۱-۱- مسیر حرکت ابزار

در فرایند شکل‌دهی نموی، شکل‌دهی به‌وسیله حرکت ابزار و به‌صورت تدریجی انجام می‌گیرد. بدین منظور مسیر حرکت ابزار براساس هندسه نهایی قطعه‌ای که مدنظر بوده است (در اینجا هرم ناقص با زاویه دیواره ۴۵ درجه) تعیین می‌شود تا در پایان فرآیند شکل مورد نظر به‌دست آید. در این پژوهش، از بیشترین مسیرهای ممکن و مرسوم استفاده شده است. مسیرهای ممکن به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- مسیرهایی که در آن‌ها ابزار فقط روی دیواره هرم و در راستای اضلاع سطح مقطع حرکت می‌کند (مسیر اول و دوم)؛ ۲- مسیرهایی که در آن‌ها ابزار، علاوه بر دیواره هرم، روی سطح مقطع نیز حرکت کرده و شکل‌دهی انجام می‌شود (مسیر سوم تا پنجم). روند شکل‌دهی در هر یک از این استراتژی‌های حرکت در زیر شرح داده شده‌اند.

در استراتژی نخست، ابزار ابتدا یک گام عمودی به اندازه ۰/۵ میلی‌متر پایین می‌رود و سپس در یک مسیر مربع در طول اضلاع هرم حرکت می‌کند. سپس یک گام دیگر پایین رفته و مسیر افقی بعدی را طی می‌کند و این روند تا رسیدن به عمق ۱۰ میلی‌متر ادامه می‌یابد (شکل ۴-الف). در استراتژی دوم، حرکت به‌صورت حلزونی با گام ۰/۵ میلی‌متر است (شکل ۴-ب). در استراتژی سوم، ابزار در مرحله نخست یک حرکت عمودی به اندازه ۰/۵ میلی‌متر داشته و در مرحله دوم، در صفحه افق در مسیر رفت و برگشتی نشان داده شده در شکل ۴-ج، حرکت می‌کند. در ادامه همین روند ۲۰ مرتبه تکرار شده تا به عمق مورد نظر برسد. استراتژی چهارم مانند روند قبلی بوده با این تفاوت که در آن هر دوگام حرکت قبلی با هم ادغام شده و به یک گام تبدیل شده‌اند. در استراتژی پنجم، ابزار در هر گام حرکت، به‌صورت ضربدری در صفحه افقی x-y حرکت می‌کند (شکل ۴-د).



شکل ۳ نیروها در یک گام حرکت ابزار



شکل ۴ استراتژی‌های حرکت ابزار

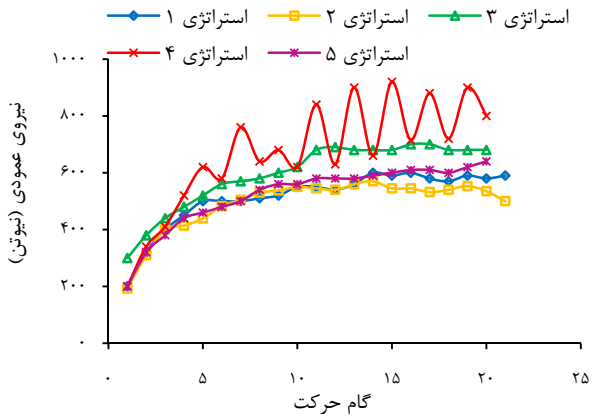
شکل ۵ نمودار مقادیر ماکزیمم نیروی عمودی در هر گام حرکت را برای هر پنج نوع استراتژی شکل‌دهی نشان می‌دهد. نکته‌ای که در ابتدا قابل توجه است افزایش نیرو با افزایش عمق هندسه شکل‌دهی در نتیجهٔ افزایش مقاومت ورق در برابر کرنش است. پس از آن روند تغییرات نیرو ثابت می‌شود که این به‌علت ایجاد تعادل بین افزایش نیرو به‌دلیل پدیده سخت‌شوندگی کرنشی و کاهش نیرو ضمن نازک شدن ورق است. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که حرکت حلزونی با گام ۰/۵ مقدار نیروی کمتری برای شکل‌دهی نیاز دارد. ضمن اینکه روند تغییرات نیرو یکنواخت‌تر و زمان انجام فرایند کمتر است.

۳-۱-۲- پیشروی

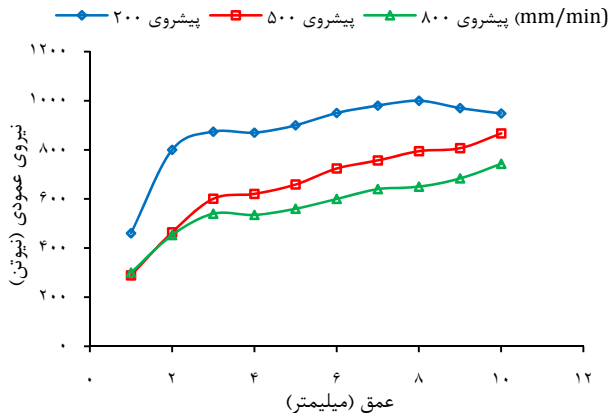
در پژوهش‌هایی که تاکنون روی فرآیند شکل‌دهی نموی انجام شده، عموماً اثر سرعت پیشروی نادیده گرفته شده است. در این مقاله، به بررسی این پارامتر پرداخته شد. آزمایش‌ها با سه پیش‌روی ۲۰۰ و ۵۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و بدون چرخش ابزار انجام شده است. مسیر حرکت ابزار به‌شکل

حلزونی بوده است. افزایش سرعت پیشروی تا حد معینی مطلوب است، اما بیشتر از آن منجر به تغییر شکل ناخواسته ورق، چروکیدگی یا نازک‌شدگی موضعی می‌شود.همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، همیلتون و همکاران[۱۵] حدی را برای نسبت سرعت چرخش به پیشروی پیشنهاد کرده‌اند. در آزمایش‌های انجام شده در این مقاله، از حداکثر سرعت پیشروی ۸۰۰میلی-متر بر دقیقه استفاده شد تا از ایجاد اثرات ناخواسته، مانند گرم شدن بیش از حد ابزار و چروکیدگی، جلوگیری شود.

شکل‌های ۶ و ۷ نمودار ماکزیمم نیروهای عمودی و افقی را حین فرایند شکل‌دهی و در هر گام حرکت ابزار نشان می‌دهند. مطابق شکل‌های ۶ و ۷، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیش‌روی، نیروی عمودی کاهش می‌یابد و نیروی افقی تغییر چندانی ندارد. در این نمودارها، میزان اثر روان‌کار بر نیرو نیز مشهود است. کاهشی که در روند نیروی افقی برای پیش‌روی ۲۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود به‌دلیل استفاده از روان‌کار حین شکل‌دهی است. در پیشروی ۵۰۰ از روان‌کار استفاده نشد و به همین دلیل این اتفاق برای حالت ۵۰۰ رخ نداده است. توضیحات بیشتر در مورد اثر روان‌کار بر فرآیند در بخش ۳-۱-۴ آمده است. باید توجه داشت که سرعت پیش‌روی تأثیر زیادی روی زمان انجام فرایند دارد. لذا می‌توان، ضمن درنظر داشتن مقایسه نیروها، به مقدار بهینه‌ای به‌منظور حداقل کردن هر دو پارامتر نیرو و زمان شکل‌دهی دست یافت. مقادیر حداکثر نیروی لازم برای شکل‌دهی با پیش‌روی‌های مختلف در جدول ۲ آمده است. این مقادیر، قله‌های نمودارهای شکل‌های ۶ و ۷ را نشان می‌دهند.



شکل ۵ روند تغییرات نیروی عمودی در استراتژی‌های مختلف شکل‌دهی



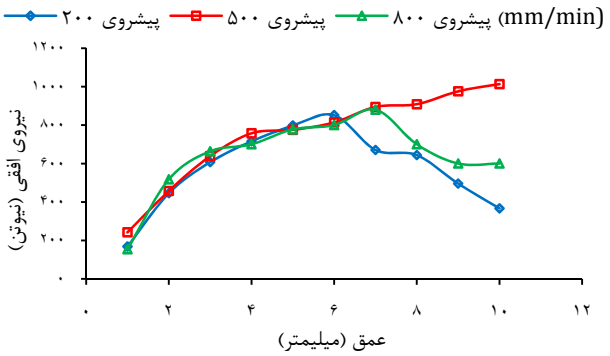
شکل ۶ نیروی عمودی به‌ازای سرعت پیش‌روی‌های مختلف

جدول ۲ مقادیر ماکزیمم نیرو برای پیش‌روی‌های مختلف

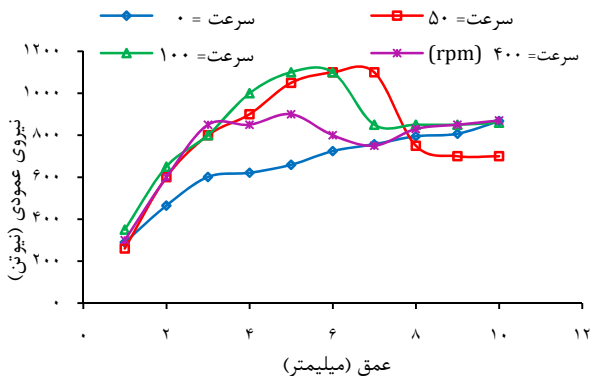
پیشروی (mm/min)	۲۰۰	۵۰۰	۸۰۰
نیروی افقی (N)	۸۵۱/۵۴	۸۱۳/۸۵	۸۰۰/۴۸
نیروی عمودی (N)	۱۰۲۵	۸۶۶/۹۸	۷۴۳/۳۵

۳-۱-۳- چرخش ابزار

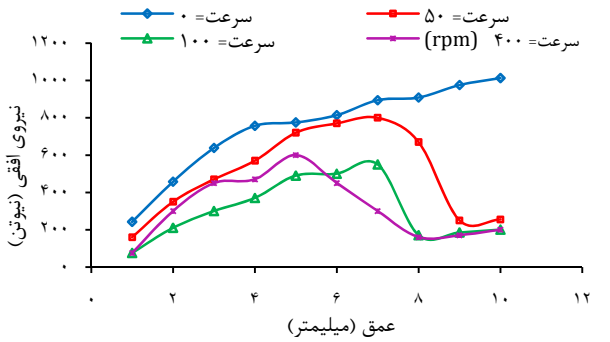
روند تغییر حداکثر نیروی عمودی و افقی حین فرایند شکل‌دهی برای سه سرعت چرخش ابزار (۵۰ و ۱۰۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه و ساعتگرد) و بدون چرخش، در شکل‌های ۸ و ۹، نشان داده شده است. چرخش ابزار بر نیروهای فرایند مؤثر بوده، به‌طوری که با افزایش سرعت چرخش ابزار، نیروی افقی کاهش یافته است. البته، با بالاتر رفتن سرعت، این روند کاهشی کم‌رنگ‌تر خواهد شد. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، سرعت چرخش ابزار تأثیر چندانی بر نیروی عمودی ندارد. اما، در حالت بدون چرخش، نیروی عمودی کمتر است. تغییراتی که در روند نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود به‌دلیل استفاده از روان‌کار در سطح ورق از عمق ۶ میلی‌متر به بعد است.



شکل ۷ نیروی افقی به‌ازای سرعت‌پیش‌روی‌های مختلف



شکل ۸تأثیر سرعت چرخش ابزار بر نیروی عمودی



شکل ۹تأثیر سرعت چرخش ابزار بر نیروی افقی

از آنجا که نیروی افقی به‌طور مستقیم وابسته به اصطکاک است، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که افزایش سرعت چرخش ابزار باعث کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و سطح ورق شده و نیروی افقی را کاهش می‌دهد. مقادیر حداکثر نیروی افقی و عمودی در جدول ۳ آمده است.

۳-۱-۴- اثر روان‌کار

در آزمایش‌هایی که با سرعت‌های چرخش مختلف ابزار انجام شده تأثیرروان‌کار نیز بر فرایند و نیروها بررسی شده است. برای این منظور، پس از رسیدن نمودار نیروها به روندی تقریباً یکنواخت، از روغن با SAE 40به‌عنوان روان‌کار در مسیر حرکت ابزار استفاده شد.

شکل ۱۰ نمودار نیرو را برای یک نمونه شکل‌دهی شده با پیشروی ۵۰۰ و با سرعت چرخش ابزار۵۰rpm نشان می‌دهد. برای بررسی بهتر اثر روان‌کار بر نیرو، پس از اینکه مقدار نیرو تقریبا به مقدار ثابتی رسید (در اینجا از ۲۳۰ ثانیه به بعد)، از روغن در سطح ورق استفاده شد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰، کاهش قابل توجه در مقادیر نیروی افقی پس از استفاده از روغن کاملاً مشهود می‌باشد، اما در روند نیروی عمودی تغییر چندانی ایجاد نمی‌شود. این نتایج قابل توجیح هستند، زیرا روغن‌کاری موجب کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و سطح ورق شده و نیروی افقی را کاهش می‌دهد. ضمناً روغن‌کاری، زبری سطح را کاهش می‌دهد؛ پس استفاده از روان‌کار در فرایند شکل‌دهی نموی از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود.

۳-۱-۵- گام عمودی

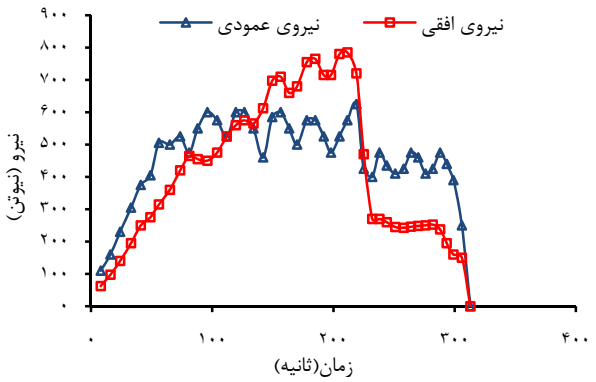
شکل‌دهی یک هرم، با ابعادی که ذکر شد، با سه گام ۰/۵ و۰/۷ و ۱ میلی‌متر صورت گرفته است. در این آزمایش‌ها از استراتژی حرکت پله‌ای استفاده شده است. چون تغییرات نیرو در جهت عمودی بیشتر و مشهودتر از نیروی افقی است، در اینجا فقط تأثیر این پارامتر، بر نیروی عمودی بررسی شده است. شکل ۱۱ تأثیر گام عمودی ابزار بر نیرو را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش گام عمودی، نیرو افزایش یافته است. زیرا هرچه گام بیشتر باشد، ابزار کرنش بیشتری را به‌صورت محلی بر ورق اعمال می‌کند. ضمناً این نکته نیز قابل توجه است که اگر شکل‌دهی با گام عمودی ۰/۵ میلی‌متر انجام شود، برای رسیدن به عمق ۱۰ میلی‌متر، ابزار باید ۲۰ گام را طی کند، اما در شکل‌دهی با گام عمودی ۱ میلی‌متر، ابزار پس از طی کردن ۱۰ گام، به عمق مورد نظر خواهد رسید. پس گام حرکت بر زمان انجام فرایند مؤثر خواهد بود و با افزایش گام عمودی، زمان شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

۳-۲- دقت ابعادی

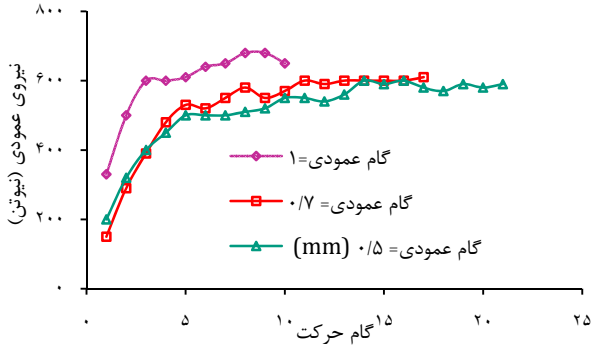
برای بررسی دقت ابعادی نمونه‌های شکل‌دهی شده، از دستگاه CMM با دقت ۲/۷µm استفاده شده است (شکل ۱۲). ابتدا مختصات نقاط واقع بر خط تقارن قطعه که از وسط دو ضلع هرم عبور می‌کند، اندازه گیری شد؛ سپس با استفاده از نقاط استخراج شده، پروفیل هندسی هرم شکل‌دهی شده ترسیم شده است. در ادامه با استفاده از این پروفیل‌های دوبعدی، دقت هندسی نمونه‌های تولید شده با یکدیگر مقایسه شدند.

جدول ۳ مقادیر ماکزیمم نیرو برای سرعت چرخش‌های مختلف

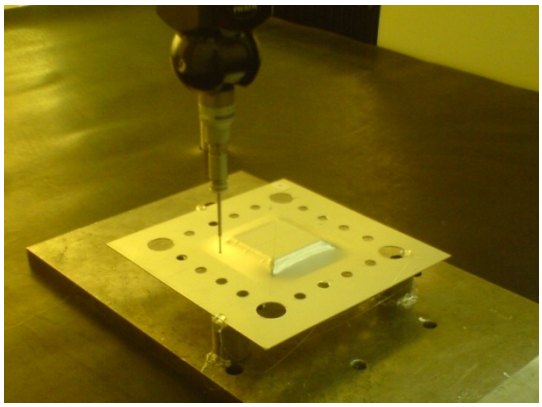
سرعت چرخش	بدون چرخش	۵۰ (rpm)	۱۰۰ (rpm)	۴۰۰ (rpm)
نیروی افقی (N)	۹۵۵/۹	۸۰۰/۵۴	۵۵۰/۳۴۲	۶۰۰
نیروی عمودی (N)	۸۶۶/۹۸	۱۱۰۰/۰۶	۱۱۰۰	۹۰۰/۲۸



شکل ۱۰ اثر روان‌کار بر نیروی شکل‌دهی (از ۲۳۰ ثانیه به بعد از روغن در سطح تماس ابزار و ورق استفاده شده است.)



شکل ۱۱تأثیر گام عمودی حرکت ابزار بر نیروی عمودی



شکل ۱۲ اندازه‌گیری ابعادی قطعات به‌وسیله دستگاه CMM

۳-۲-۱- تأثیر استراتژی شکل‌دهی بر دقت ابعادی

نمونه‌های شکل‌دهی شده تحت چهار استراتژی نشان داده شده در شکل ۴ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در استراتژی‌هایی که ابزار روی مقطع هرم حرکت می‌کند، پروفیل هندسی مناسب نیست و در سطح مقطع هرم ناهمگونی ایجاد شده است. بین دو استراتژی پله‌ای و حلزونی، هندسه نهایی در مسیر حلزونی (استراتژی ۲) به هندسه هدف نزدیک‌تر است. این به‌دلیل یکنواخت‌تر بودن تغییر شکل و کاهش برگشت فنری در مسیر حلزونی است. شکل ۱۳ نتایج اندازه‌گیری ابعادی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۲-۲- تأثیر پیشروی بر دقت ابعادی

شکل ۱۴ پروفیل حاصل از اندازه‌گیری ابعادی هرم شکل‌دهی شده را برای پیش‌روی‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ماکزیمم عمق شکل‌دهی از عمق مورد نظر، که ۱۰ میلی‌متر بوده است، کمتر است که

این به‌دلیل پدیده برگشت فنری ورق می‌باشد.

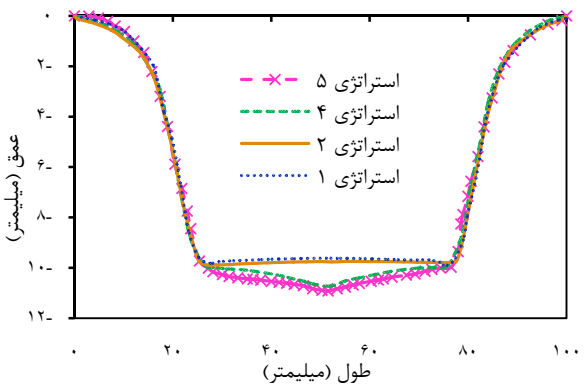
مشاهده می‌شود که سرعت پیش‌روی تأثیر چندانی روی دقت هندسی نداشته است.

۳-۲-۳- تأثیر چرخش ابزار بر دقت ابعادی

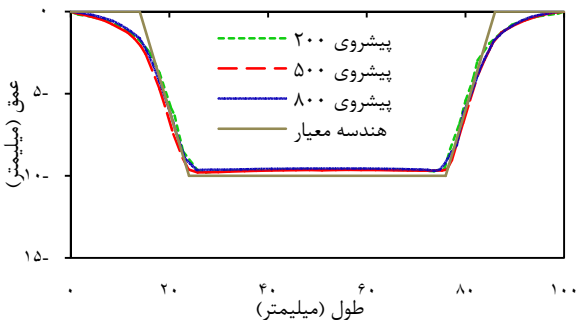
برای بررسی اثر چرخش ابزار بر دقت ابعادی، نمونه‌های شکل‌دهی شده، بدون چرخش ابزار و با سرعت چرخش ۱۰۰ rpm، با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، نمونه شکل‌دهی شده بدون چرخش ابزار دارای دقت هندسی مطلوب‌تری بوده و پروفیل نهایی به هندسه هدف نزدیک‌تر است.

۳-۲-۴- تأثیر گام عمودی بر دقت ابعادی

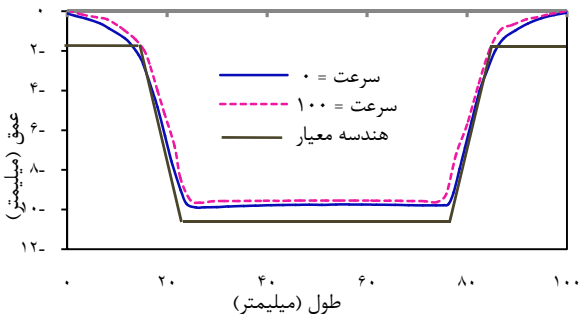
با توجه به اینکه در کارهای قبل به اثر گام عمودی بر دقت ابعادی پرداخته شده است، در این مقاله از بررسی این پارامتر صرف‌نظر کرده و فقط به نتایج پژوهش انجام شده اشاره خواهد شد. عبدالهی[۲۰] به بررسی پارامتر گام عمودی با مقادیر ۰/۳mm، ۰/۵mm و ۰/۷mm پرداخته است (نمونه‌های شکل‌دهی شده، هرم با ابعاد ۹×۵۰×۵۰ میلی‌متر بود).



شکل ۱۳ مقایسه دقت ابعادی استراتژی‌های مختلف



شکل ۱۴ اثر سرعت پیشروی بر دقت ابعادی

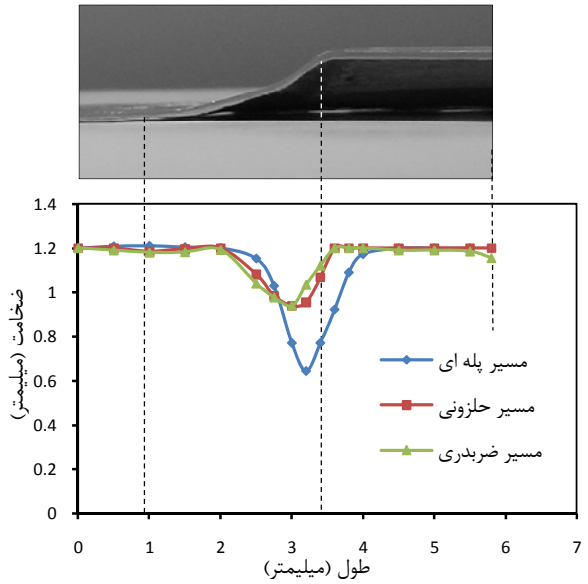


شکل ۱۵ اثر چرخش ابزار بر دقت ابعادی

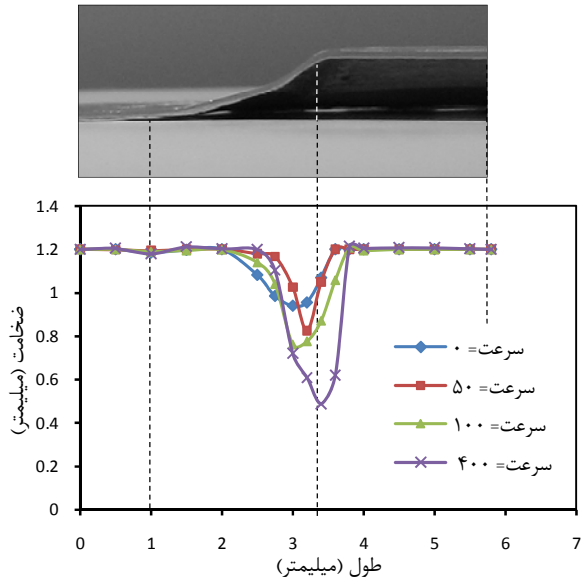
مطابق آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی انجام شده، مشاهده شد که عمق هرم، با افزایش گام عمودی، کاهش یافته و از عمق هدف دور شده است. می‌توان نتیجه گرفت هرچه گام عمودی بیشتر باشد، ورق سخت‌تر شده و برگشت فنری افزایش می‌یابد.

۳-۳- توزیع ضخامت

برای مقایسه توزیع ضخامت در استراتژی‌های مختلف، مسیر حرکت ضربدری (به‌عنوان یکی از مسیرهایی که در آن ابزار حین شکل‌دهی، علاوه بر دیواره هرم، روی سطح مقطع نیز حرکت می‌کند) و مسیر پله‌ای و حلزونی انتخاب شده‌اند (استراتژی‌های نشان داده شده در شکل ۴- الف، ۴- ب و ۴- د). ضخامت ورق روی خطی که از وسط دو ضلع هرم می‌گذرد با استفاده از میکرومتر در نقاط مشخص اندازه‌گیری شد. شکل ۱۶ نتایج اندازه‌گیری ضخامت ورق به‌وسیله میکرومتر را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که ضخامت ورق در مسیر ابزار حلزونی کاهش کمتری داشته است. بنابراین، مسیر ابزار حلزونی به‌علت حرکت یکنواخت ابزار، توزیع ضخامت یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند.



شکل ۱۶ مقایسه توزیع ضخامت برای مسیر حرکت ابزار



شکل ۱۷ مقایسه توزیع ضخامت برای چرخش ابزار

شکل ۱۷ اثر سرعت چرخش ابزار را بر توزیع ضخامت نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش سرعت چرخش، ضخامت ورق در ناحیه شکل‌دهی شده کاهش بیشتری داشته و کاهش سرعت چرخش موجب یکنواخت‌تر شدن ضخامت در طول ورق شده است.

در مورد اثر گام عمودی، با توجه به نتایج پژوهش‌های قبل، مشاهده شده است که ضخامت ورق با افزایش گام عمودی، کاهش بیشتری خواهد داشت[۲۰]. سرعت پیشروی، تأثیر چندانی بر توزیع ضخامت ندارد[۱۵].

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی تأثیر چهار پارامتر سرعت پیش‌روی و چرخش ابزار، گام عمودی و مسیر حرکت ابزار در فرایند شکل‌دهی نموی پرداخته شد. شکل‌دهی روی ورق از جنس آلومینیوم و به شکل یک هرم انجام شد. با تغییر پارامترهای ذکرشده و انجام آزمایش‌های مربوطه، نیروها در جهات افقی و عمودی اندازه‌گیری شدند و دقت ابعادی نمونه‌ها و توزیع ضخامت نیز بررسی شد. نتایج زیر حاصل گردید.

در استراتژی حرکت حلزونی، به‌دلیل یکنواخت‌تر بودن حرکت ابزار و تغییر شکل ورق، حداکثر نیروی لازم برای شکل‌دهی کمتر است. عمق هرم شکل‌دهی شده به عمق هدف نزدیک‌تر و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر است.

افزایش سرعت پیش‌روی ابزار، نیروی عمودی را کاهش می‌دهد؛ ضمن اینکه در کاهش زمان فرایند شکل‌دهی نیز مؤثر است. تغییر سرعت پیشروی بین ۲۰۰mm/min و ۵۰۰ و ۸۰۰ تأثیر چندانی بر دقت ابعادی نداشت.

با افزایش سرعت چرخش ابزار، ضریب اصطکاک بین ابزار و سطح ورق، کاهش می‌یابد. از آنجا که نیروی افقی ماهیت اصطکاکی دارد، نیروی افقی کاهش می‌یابد، اما نیروی عمودی تغییر چندانی ندارد. در حالت بدون چرخش ابزار، هندسه نهایی به هندسه هدف نزدیک‌تر است. با کاهش سرعت چرخش، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر خواهد بود.

با استفاده از روغن به‌عنوان روان‌کار، اصطکاک بین ابزار و سطح ورق و در نتیجه نیروی افقی کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد.

با افزایش گام عمودی، سخت‌شوندگی حاصل از کرنش اعمال شده بر ورق بیشتر شده و در نتیجه نیروی لازم برای شکل‌دهی افزایش می‌یابد. با افزایش گام عمودی، برگشت فنری افزایش یافته و عمق نهایی نمونه شکل‌دهی شده، از عمق هدف دورتر خواهد شد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگانااین مقالهازمعاونت پژوهشی دانشگاه کاشان به‌خاطر حمایت مالی از این پژوهش و همچنین جناب آقای احمد احمدی،به‌خاطرزحماتشان در فراهم کردن امکان انجام آزمایش‌های لازمدر این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۶- مراجع

[1] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetricsingle point incrementalforminof sheet metal, *Annals of the CIRP,* Vol. 54, pp. 623-650, 2005.

[2] J. Allwood, M. Shouler, A. E. Tekkaya, The increased forming limits of incremental sheet forming processes, *Key Engineering Materials*, Vol. 344, pp. 621-628, 2007.

[3] J. Jeswit, G. Ambrogio, L. Filice, F. Micari, A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology,*Vol. 177, pp. 413–416, 2006.

[4] L. Fratini, G. Ambrogio, R. Di Lorenzo, L. Filice, F. Micari, Influence of mechanical properties of thesheet material on formability in single point incremental forming,*CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 53, pp. 207-210, 2004.

[5] Y. H. Kim, J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130, pp. 42-46, 2002.

[6] J. Park, Y. H. Kim, Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 140, pp.447-453, 2003.

[7] G. Amborgio, I. Costantino, L. Napoli, L. Filice, M. Muzzupappa, Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153, pp. 501- 507, 2004.

[8] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, Optimization of tool path in two points incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology,*Vol. 177, pp. 409-412,2006.

[9] L. Carrino, G. Giuliano, M. Strano, The effect of the punch radius in dieless incremental forming, *Proceedings of the 2nd IPROMS Virtual International Conference*, Cardiff, UK, pp. 204-209, 2006.

[10] G. Ambrogio, L. Filice, F. Micari, A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 413-416, 2006.

[11] L. Filice, G. Ambrogio, F. Micari, On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring, *CIRP Annal-Manufacturing Technology*, Vol. 55, pp. 245-248, 2006.

[12] G. Ambrogio, V. Cozz, L. Filice, F. Micari, An analytical model for improving precision in single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology* , Vol. 191, pp. 92-95, 2007.

[13] K. P. Jackson, J. M. Allwood, The mechanics of incremental sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 158-174, 2009.

[14] R. Aerens, P. Eyckens, A. Van Bael, J. R. Duflou, Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations,*Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 46, pp. 969-982, 2010.

[15] K. Hamilton, J. Jeswiet, Single point incremental forming at high feed rates and rotational speed: Surface and structural consequences, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, pp. 311-314, 2010.

[16] G. Fan, F. Sun, X. Meng, L. Gao, G. Tong, Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet,*International Journal Adv Manuf Technol,* Vol. 49, pp. 941-947, 2010.

[17] M. Fiorotto, M. Sorgente, G. Lucchetta, Preliminary studies on single point incremental forming for composite materials*, International Journal Mater Form,* Vol. 3, Suppl 1, pp. 951-954, 2010.

[18] M. B. Silva, L. M. Alves, P. A. F. Martins, Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 29, pp. 557-566, 2010.

[19] G. Palumbo, M. Brandizzi, Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high toolrotation speed, *Materials and Design,* Vol. 40. pp. 43-51, 2012.

[20] A. Abdollahi, *Simulation of Incremental Forming in Sheet Metal,* Msc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, 2012. (In Persian)

[21] P. A. F. Martin, N. Bay, M. Skjoedt, M. B. Silva, Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 57, pp. 247-252, 2008.

[22] G. Hirt, J. Ames, M. Bambach, R. Kopp, Forming strategiesand process modelling for CNC incremental sheet forming, *AnnalsCIRP-Manufacturing Technology,* Vol. 53, No. 1, pp. 203-206, 2004.

[23] M. Rauch, J. Y. Hascoet, J. Hamann, Y. Plenel, Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications, *Computer-Aided Design,*Vol. 41, pp. 877-885, 2009.