

تحلیل اجزای محدود و تجربی فرایند شکل دهی نموی، بررسی شکل و توزیع ضخامت ورق

شکل دهی نموی یکی از فرآیندهای نوین شکل دهی می باشد. در سال های اخیر به منظور دستیابی به کنترل و انعطاف پذیری فرایندهای شکل دهی، این فرایند به طور ویژه ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق تحلیل اجزای محدود فرایند با هدف ایجاد قطعه به صورت مخروط ناقص با بکارگیری صفحات نگهدارنده فوقانی و زیرین صورت گرفت. در تحلیل از کد $Vdisp$ جهت تعریف مسیر پیچیده ابزار استفاده شد. انجام آزمایش تجربی مطابق با تحلیل صورت گرفته و بررسی شکل نهایی و توزیع ضخامت در طول ورق نشان داد، کد فوق با دقت خوبی مسیر ابزار را مدل کرده و انطباق خوبی بین نتایج در حالت تجربی و اجزای محدود وجود دارد.

محسن نخعی^۱

کارشناسی ارشد

محمود فرزین^۲

استاد

سعید امینی^۳

کارشناسی ارشد

محسن لوح موسوی^۴

استادیار

واژه های راهنما : شکل دهی نموی، اجزای محدود، آزمایش تجربی، مخروط ناقص ، ضخامت ورق

۱- مقدمه

فرایند شکل دهی نموی یکی از فرایندهای شکل دهی ورق است که در آن یک ابزار ساده به کمک ماشین کنترل عددی ورق را شکل می دهد. اگر چه فرایند کند است ولی از آنجا که هزینه های مرتبط به پانچ و قالب را کاهش داده، در مقایسه با استمپینگ و کشش برای تولید کم، فرایندی بسیار مناسب است. با این حال این فرایند نیاز به تجزیه و تحلیل بیشتر به منظور ایجاد اطمینان مورد نیاز جهت کاربردهای صنعتی دارد. تجزیه و تحلیل فرایند بر اساس آزمون های تجربی و عددی جهت بررسی قطعات تولیدی و ایجاد درک بیشتر از فرایند مورد نیاز است. در سال (۲۰۰۲)، پارک و کیم [۱] به بررسی پارامترهای شکل دهی نموی تک نقطه ای پرداخته و نشان دادند کرنش ها تقریباً محوری هستند و درمسیری هم جهت با مسیروشکل دهی ایجاد می شوند. همچنین آنها در سال (۲۰۰۳) [۲] شکل پذیری ورق آلومینیوم را در شرایط مختلف مورد بررسی قرار دادند.

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، نجف آباد، ایران

Mohsen.n@smc.iaun.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان farzin@cc.iut.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، انستیتو مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای (مرکز مهاجر)، اصفهان saeedamini92@yahoo.com

^۴ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

در سال (۲۰۰۳)، توسط بمباچ [۳] کرنش‌های محوری برای شکل‌دهی یک هرم با لبه‌های صاف اندازه‌گیری شد. در سال (۲۰۰۴)، فراتینی [۴] یک مخروط ناقص را با مواد متفاوت به روش شکل‌دهی نموی تک نقطه‌ای شکل داد. در سال (۲۰۰۵)، جس ویت و یانگ [۵] این فرایند را بر روی شکل‌های مختلف صورت دادند. فرایند شکل‌دهی نموی در سال‌های اخیر به علت کنترل خوب فرایند و قابلیت شکل‌دهی آلیاژهای سبک مورد توجه واقع شده و اخیراً پیرامون آن تحقیقات زیادی صورت گرفته است. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیق کرو و همکارانش [۶] در سال (۲۰۰۶) اشاره کرد که به انجام فرایند بر روی ورق آلومینیومی با هدف ایجاد ظرفی کروی شکل پرداخته و نمودارهای توزیع ضخامت و شکل نهایی ظرف را ارائه دادند. او و همکارانش در این تحقیقات از نگه دارنده فوقانی و نگه دارنده زیرین استفاده نکردند. در سال (۲۰۰۸) یاماشیتا [۷] با استفاده از کد DYNA3D به شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی نموی ورق پرداخت. او از این کد که یک کد صریح بود جهت ایجاد قطعه‌ای هرمی استفاده نمود. یاماشیتا با توجه به پیچیدگی‌های حل عددی از مقیاس جرمی استفاده کرد. او و همکارانش توانستند کمترین زمان حل، بدون تاثیر اینرسی بر رفتار تغییر شکل ماده را بیابند. در سال (۲۰۱۱) اورچه و همکارانش [۸] از چند دوربین به منظور اندازه‌گیری جابجایی‌های ورق در طول انجام فرایند شکل‌دهی نموی ورق استفاده کردند. در این تحقیق دنباله‌ای از تصاویر گرفته شده در طول فرایند به کمک روش هم‌بستگی تصویر جهت بازسازی شکل جسم استفاده شد. او و همکارانش به کمک این روش توانستند شکل نهایی ظرف را مورد بررسی قرار دهند. در سال (۲۰۱۱) کدخدایان و پل [۹] توسط آزمایش تجربی به بررسی چهار پارامتر قطر ابزار، ضخامت ورق، زاویه طراحی و پیش‌روی عمودی بر روی نیروی شکل‌دهی با استفاده از یک روش آزمایشی پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های تجربی خود تنها نمودارهای نیروی شکل‌دهی را در ضخامت‌های مختلف ورق، قطرهای مختلف ابزار، سرعت‌های پیش‌روی و زاویه طراحی مختلف ارائه داده و توزیع ضخامت در ورق و شکل ظرف پس از شکل‌دهی را مورد بررسی قرار ندادند. در سال (۲۰۱۲) نیز اینگاراو و همکارانش [۱۰] نیروی شکل‌دهی و انرژی فرایند را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و نمودار نیروی شکل‌دهی را در طول فرایند بدست آوردند. در سال (۲۰۱۲) چاو و همکارانش [۱۱] ضخامت ورق و جنس ورق را به منظور ایجاد قطعه هرمی به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. او و همکارانش از قانون سینوس‌ها به منظور اعتبار سنجی نتایج خود استفاده کردند.

در این تحقیق ابتدا تحلیل اجزای محدود فرایند شکل‌دهی نموی ورق با هدف ایجاد قطعه‌ای به شکل مخروط ناقص مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل اجزای محدود فرایند شکل‌دهی نموی ورق در ایجاد قطعات مخروطی شکل با توجه به منحنی بودن مسیر حرکت ابزار پیچیده تر از قطعات هرمی می‌باشد. یکی از مشکلات در تحلیل اجزای محدود فرایند تعریف مسیر ابزار است، این امر سبب شده تحلیل اجزای محدود انطباق خوبی با نتایج تجربی نداشته باشد. در این تحقیق با نوشتن کد Vdisp به کمک نرم افزار فرترن، مسیر ابزار در تحلیل اجزای محدود تعریف گردید. بررسی اجزای محدود فرایند با توجه به پیچیدگی‌های موجود در فرایند نیازمند زمان زیادی است. معمولاً به منظور کاهش زمان حل از مقیاس جرمی استفاده می‌شود، مانند تحقیقات یاماشیتا و همکارانش [۷] که از مقیاس جرمی در حل استفاده نمودند.

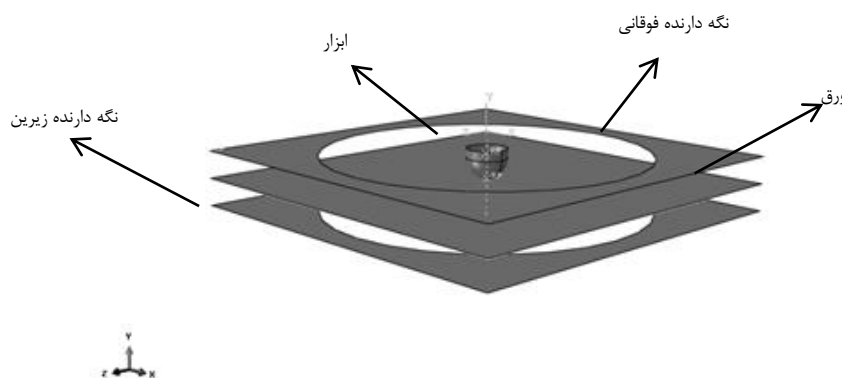
در این تحقیق با توجه به اینکه استفاده از مقیاس جرمی موجب کاهش دقت حل می‌شود، از تکنیک‌های دیگری جهت کاهش زمان حل استفاده شد. یکی از این تکنیک‌ها استفاده از الگوریتم لغزش‌های کوچک در تعریف رفتار تماسی بود. همچنین در این تحلیل علی‌رغم افزایش هزینه محاسباتی جهت افزایش دقت ابعادی قطعه نهایی از

نگهدارنده فوقانی و زیرین استفاده شد. پس از انجام تحلیل فوق، نیروی شکل‌دهی، توزیع ضخامت در ورق و شکل ظرف پس از شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به منظور اعتبارسنجی تحلیل اجزای محدود، آزمایش تجربی مطابق با تحلیل اجزای محدود صورت گرفت.

در آزمایشات تجربی ابعاد ورق مطابق با تحلیل اجزای محدود در نظر گرفته شد و در انجام فرایند از نگهدارنده فوقانی و زیرین استفاده گشت. به منظور تعریف مسیر ابزار در آزمایش‌های تجربی از G کدهایی که توسط نرم افزار CAM و مطابق با مسیر تحلیل اجزای محدود استخراج شده بود استفاده شد و برای هدایت ماشین فرز CNC مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام فرایند قطعه نهایی توسط دستگاه وایرکات بریده شد. جهت بدست آوردن توزیع ضخامت در ورق و شکل نهایی ظرف، مقطع حاصل از برش به کمک دستگاه CMM اندازه‌گیری گردید و نتایج فوق جهت اعتبارسنجی تحلیل اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفت.

۲- تحلیل اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی نموی ورق

فرآیند شکل‌دهی نموی یکی از فرایندهای شکل‌دهی ورق است که در آن به کمک یک ابزار ساده و ماشین کنترل عددی، ورق شکل داده می‌شود. در این بخش تحلیل اجزای محدود فرایند با هدف ایجاد قطعه‌ای به شکل مخروط ناقص با قطر دهانه ۱۲۰ میلی‌متر، عمق ۴۰ میلی‌متر و شیب دیواره ۴۵ درجه صورت گرفت. برای این منظور ورقی با ابعاد ۱۴۰×۱۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۰۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق به منظور افزایش دقت ابعادی فرایند از نگه‌دارنده فوقانی و نگه‌دارنده زیرین استفاده گردید. این نگه‌دارنده‌ها در ابعاد ۱۴۰×۱۴۰ میلی‌متر و با ایجاد یک حفره دایره‌ای شکل به قطر ۱۲۰ میلی‌متر در وسط آن‌ها ایجاد شدند. قطر ابزار با توجه به ابعاد ورق و نتایج چند تحلیل اجزای محدود صورت گرفته و همچنین نتایج مرجع [۱۲] ۱۲ میلی‌متر انتخاب شد. در تحلیل، ابزار و نگه‌دارنده‌ها به صورت صلب تحلیلی و ورق به صورت پوسته‌ای و شکل‌پذیر مدل گردید. اجزای فرایند مطابق با آنچه گفته شد، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- اجزای مدل شده در تحلیل اجزای محدود فرایند

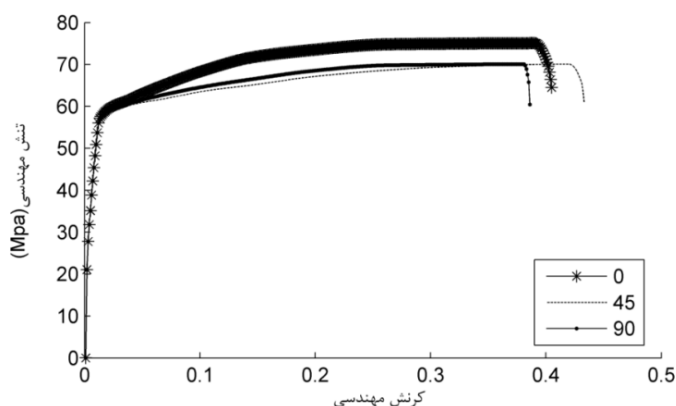
در طی انجام فرایند سرعت دورانی ابزار برابر ۵۰۰ Rpm و ضریب اصطکاک بین ورق و ابزار برابر ۰/۱ انتخاب شد. جنس ورق مورد استفاده در آزمایش‌های صورت گرفته AL 1050 بوده و خواص ناهمسان‌گردی نیز جهت انجام تحلیل اجزای محدود فرایند، در نظر گرفته شد. جهت استخراج خواص ناهمسان‌گردی، نه نمونه براساس

استاندارد ASTM [۱۳] تحت کشش قرار گرفت. سه نمونه در راستای نورد سه نمونه عمود بر راستای نورد و سه نمونه با زاویه ۴۵ درجه نسبت به راستای نورد، از ورق جدا شد. در این آزمایش پس از آماده کردن نمونه‌ها بر اساس استاندارد موجود نمونه‌ها به صورتی که در شکل (۲) مشاهده می‌شود تحت کشش قرار گرفته و کرنش عرضی و ضخامتی ورق در هر آزمایش ثبت گردید.



شکل ۲- انجام آزمون کشش بر روی نمونه‌ها

سپس نمودار تنش کرنش مهندسی برای نمونه‌ها رسم شده و با مقایسه نمودار تنش کرنش مهندسی برای سه نمونه ای که یک زاویه نسبت به راستای نورد داشتند و مشخص شدن میزان انطباق این سه منحنی آزمایش‌هایی که دچار خطا شده مشخص گردید. نمودارهای تنش و کرنش مهندسی ماده در جهات مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. در ادامه مقادیر ناهمسان‌گردی برای هر جهت توسط معادله (۱) محاسبه شد [۱۴].



شکل ۳- نمودارهای تنش و کرنش مهندسی ماده در جهات مختلف

$$R = \frac{d\varepsilon_w}{d\varepsilon_T} \quad (1)$$

در معادله فوق $d\varepsilon_w$ کرنش در راستای عرض ورق و $d\varepsilon_T$ کرنش در راستای ضخامت می باشد. به منظور اعمال ناهمسان‌گردی در تحلیل اجزای محدود از تابع هیل [۱۵] استفاده شد. معادله (۲) تابع هیل را نشان می دهد [۱۶].

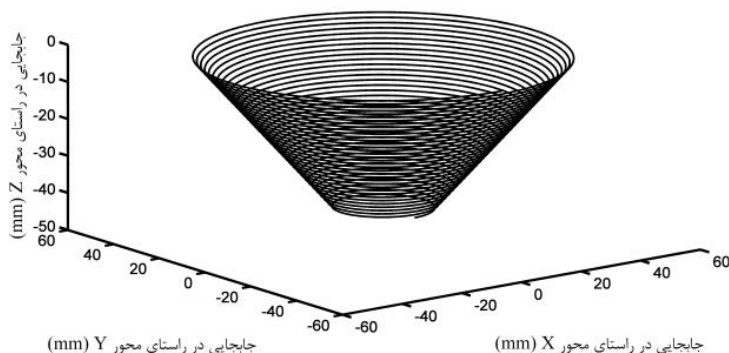
$$f(\sigma) = [F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

در تابع هیل F, G, H, L, M, N و ثوابت سطح تسلیم هستند که وابسته به خواص ماده بوده و با انجام آزمون کشش در جهات مختلف بدست می‌آیند. در تحلیل فوق خواص مکانیکی ورق مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود به صورتی که در جدول (۱) نشان داده شده است در نظر گرفته شد.

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود

$$F=0.45 \quad G=0.66 \quad H=0.34 \quad N=1.09 \quad E=7.0 \text{ Gpa} \quad \nu=0.33 \quad \rho=2700 \text{ Kg/m}^3$$

به منظور تعریف مسیر ابزار توابع مختلف به کمک نرم افزار مطلب مورد بررسی قرار گرفت تا تابعی که بتواند شرایط کاری را ارضاء کند یافت شود. تابعی که در این تحلیل به منظور تعریف مسیر ابزار برای تولید قطعه‌ای به شکل مخلوط ناقص با قطر دهانه ۱۲۰ میلی‌متر، زاویه دیواره ۴۵ درجه و عمق ۴۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت به صورت سه بعدی در شکل (۴) نشان داده شده است. گام حرکت در مسیر فوق برابر ۰/۵ میلی‌متر انتخاب شد.

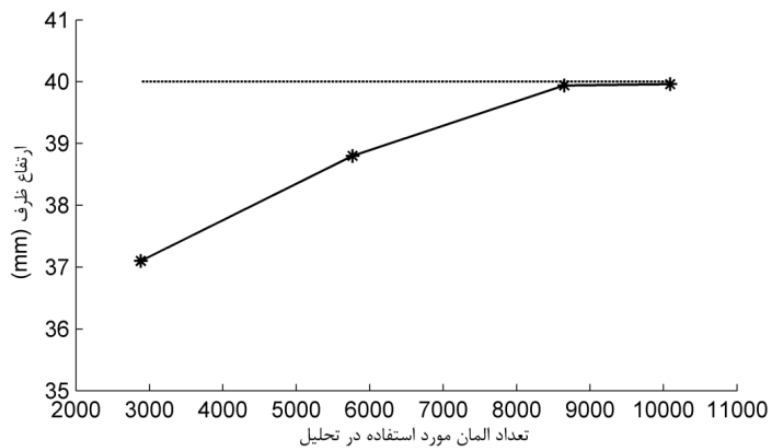


شکل ۴- تابع مسیر حرکت ابزار

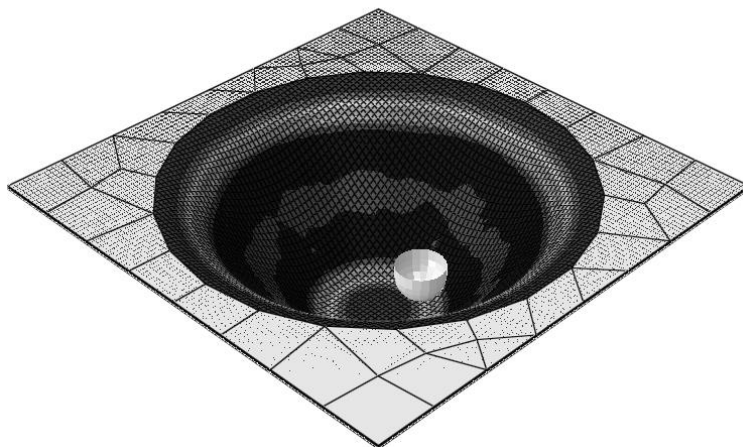
پس از مشخص شدن تابع مسیر ابزار باید این تابع در حین حل به نرم افزار آباکوس که فرایند به کمک آن تحلیل می‌شود ارائه شود. برای این منظور از زیر برنامه‌ی ویدیسپ استفاده شد. این کد به کمک نرم افزار فترن نوشته شد و در حین حل، در هر نمو، موقعیت ابزار توسط کد فوق به نرم افزار آباکوس ارائه گشت.

در تحلیل اجزای محدود شرایط مرزی به گونه‌ای است که ورق از چهار طرف گرفته شده و نقاط مرجع نگهدارنده‌ها کاملاً مقید و شش درجه آزادی آن‌ها بسته شده است. در تعریف رفتار تماسی بین ورق و نگهدارنده‌ها از الگوریتم لغزش کوچک استفاده شد که با توجه به جابجایی نسبی کم بین ورق و نگهدارنده‌ها استفاده از این الگوریتم آباکوس به منظور کاهش زمان محاسباتی صورت گرفت.

در این الگوریتم برخلاف الگوریتم لغزش محدود دیگر موقعیت گره‌ها بررسی نمی‌شود و رفتار تماسی فقط بین یک سری صفحات در نظر گرفته می‌شود. استفاده از این الگوریتم زمان محاسباتی را به طور چشمگیری کاهش داد. در تحلیل اجزای محدود پس از انجام آزمون همگرایی مش به صورتی که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، از ۸۶۴۹ المان S4R به منظور مش‌بندی ورق استفاده شد. نوع حل دینامیک صریح با زمان یک ثانیه در نظر گرفته شد. پس از انجام تحلیل اجزای محدود شکل (۶)، شکل ظرف و نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۵- آزمون همگرایی مش



شکل ۶- تحلیل اجزای محدود فرایند

۳- انجام تجربی فرایند شکل دهی نموی ورق

فرایند شکل دهی نموی با توجه به عدم نیاز به قالب در شکل دهی، بخصوص برای تولید قطعات به صورت دسته‌ای و تکی بسیار مناسب و اقتصادی است. تجهیزات مورد نیاز انجام فرایند، فیکسچر نگهدارنده ورق، ابزار، صفحات نگه‌دارنده زیرین و فوقانی می‌باشد. در این بخش پس از انجام تحلیل‌های اجزای محدود، آزمایش تجربی جهت اعتبار سنجی نتایج صورت گرفت.

انجام تحلیل‌های اجزای محدود نشان داد که بیشترین نیروی شکل دهی حدود ۴۰۰ نیوتن بوده که در راستای عمود بر ورق اعمال می‌شود و نیروی جانبی وارد بر ورق حدود ۱۵۰ نیوتن می‌باشد. با توجه به اینکه نیروها از طریق فیکسچر به بدنه ماشین منتقل می‌شود، فیکسچر باید به گونه‌ای طراحی شود که بتواند این نیروها را تحمل کند و با توجه به ابعاد ورق ساخته شود. ابزار مورد استفاده در این آزمایش‌ها با توجه به نیروهای شکل دهی از جنس CK45 انتخاب شد.

صفحات نگهدارنده زیرین و فوقانی درست به ابعاد ورق بریده شده و با ایجاد یک سوراخ به قطر دهانه ظرف (۱۲۰ میلی-متر) در وسط آن‌ها ایجاد شدند. فیکسچر، ورق و نگه‌دارنده‌ها به صورتی که در تحلیل عددی مدل گردید، روی ماشین فرز CNC سوار شدند. در شکل (۷) تجهیزات فرایند را که بر روی ماشین فرز CNC بسته شده است مشاهده می‌شود.



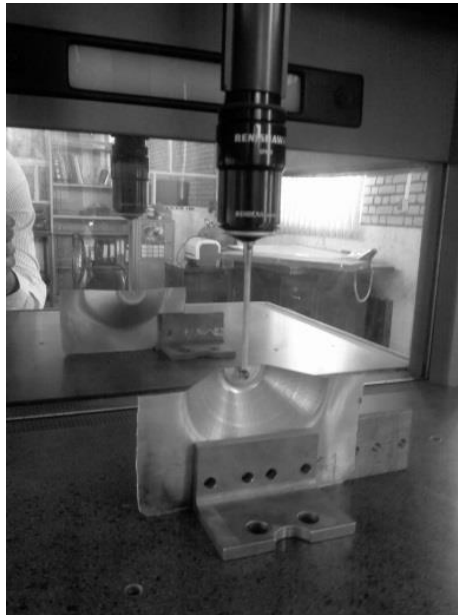
شکل ۷- تجهیزات مورد استفاده در فرایند

در آزمایش‌های تجربی برای تعریف مسیر ابزار مطابق با تحلیل اجزای محدود صورت گرفته، از G کد استفاده شد. به کمک نرم افزار پاورمیل G کدهای مسیر ابزار، استخراج گردید. مطابق با مسیر استفاده شده در تحلیل‌های اجزای محدود G کدها به صورت DNC در اختیار ماشین فرز CNC قرار گرفت. در طی فرایند ابزار علاوه بر حرکت انتقالی با سرعت به دور خود می‌چرخد که این امر باعث اصطکاک زیادی می‌شود برای کنترل ضریب اصطکاک در محدوده مورد نظر از گریس به عنوان روان کار استفاده شد.

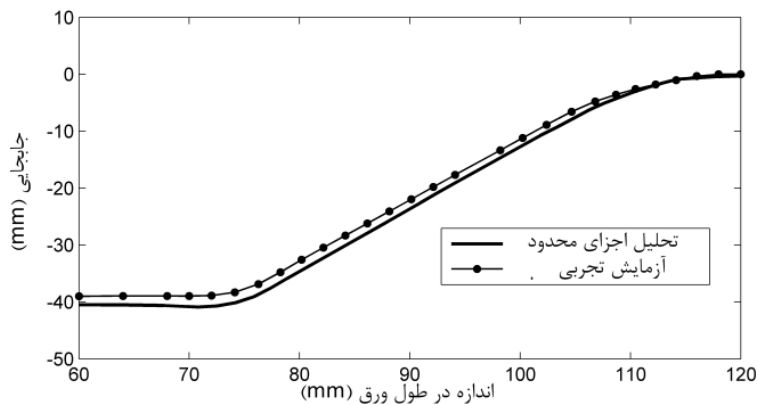
۴- بحث و تحلیل نتایج

در این تحقیق فرایند شکل‌دهی نموی ورق A11050 با هدف تولید قطعه‌ای به شکل مخلوط ناقص و با قطر دهانه ۱۲۰ میلی‌متر و زاویه دیواره ۴۵ درجه و عمق ۴۰ میلی‌متر صورت گرفت. با توجه به مخروطی بودن ظرف و پیچیدگی‌های مسیر در تحلیل اجزای محدود، جهت اعتبارسنجی کد نوشته شده، در ابتدا شکل نهایی ظرف و ارتفاع کشش مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور قطعه نهایی توسط دستگاه وایرکات برش خورد تا مقطعی از قطعه بدست آید. مقطع حاصل از برش توسط دستگاه CMM اندازه‌گیری شد. در شکل (۸) مقطع برش خورده جسم در حال اندازه‌گیری توسط دستگاه CMM نشان داده شده است.

پس از اندازه‌گیری تعداد زیادی از نقاط روی سطح مقطع قطعه نهایی توسط دستگاه CMM، شکل مقطع جسم بدست آمد. مقطع جسم در دو حالت آزمایش تجربی و اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۹) شکل نهایی ظرف را در دو حالت تجربی و اجزای محدود نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقطع بریده شده از قطعه در حال اندازه‌گیری توسط دستگاه CMM

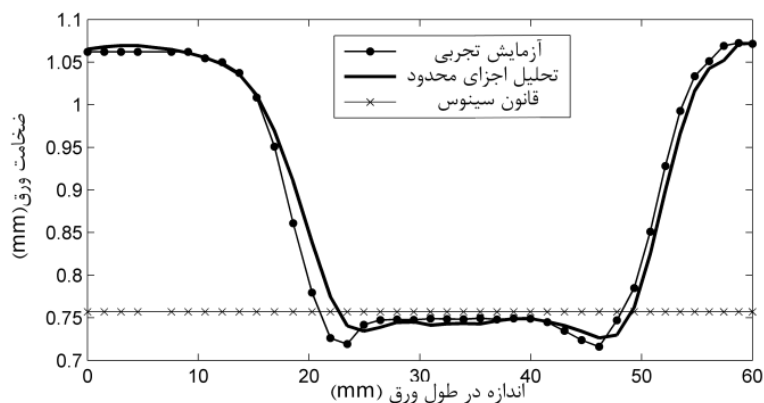


شکل ۹- شکل ظرف پس از شکل‌دهی در دو حالت آزمایش تجربی و تحلیل اجزای محدود

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود دو نمودار انطباق خوبی دارند و مقدار اختلاف موجود به علت خطا در اندازه‌گیری و ایجاد پدیده برگشت فنی در آزمایش تجربی است. انطباق حاصل نشان دهنده صحت عملکرد کد نوشته شده در تعیین مسیر حرکت ابزار است که با توجه به مخروط بودن ظرف و پیچیده بودن مسیر قابل توجه می‌باشد. معمولاً جهت اعتبار سنجی ضخامت ورق از قانون سینوس استفاده می‌شود. این قانون برای اولین بار توسط ماتسوبارا در سال (۱۹۹۴) در شکل‌دهی نموی مورد استفاده قرار گرفت (معادله (۳)) [۱۷].

$$T_f = T_i \sin \alpha \quad (3)$$

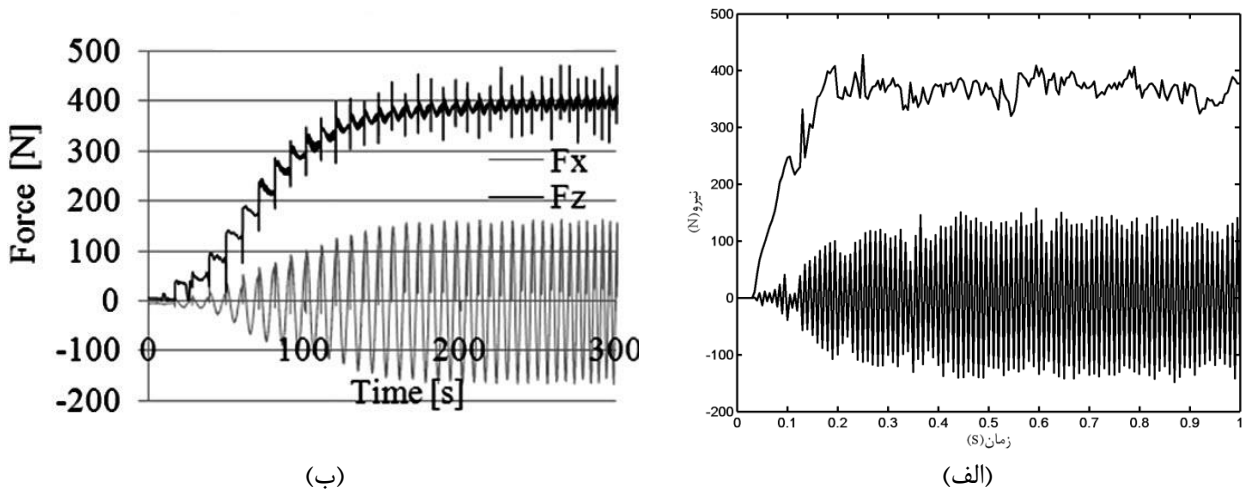
در رابطه فوق α زاویه دیواره ظرف بر حسب درجه، T_f ضخامت نهایی دیواره ظرف و T_i ضخامت اولیه ورق می‌باشد. قانون سینوس هیچ وابستگی به جنس ورق و شرایط تماسی نداشته و تنها کمترین ضخامت در ورق را نشان می‌دهد. در این تحقیق جهت بررسی دقیق‌تر توزیع ضخامت علاوه بر قانون سینوس از نتایج تجربی نیز استفاده شد. ضخامت ورق در تعداد زیادی از نقاط روی طول ورق توسط دستگاه CMM، اندازه‌گیری شد تا نمودار توزیع ضخامت ترسیم شود. شکل (۱۰) توزیع ضخامت در طول ورق را در دو حالت تجربی و اجزای محدود نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- توزیع ضخامت در ورق پس از شکل‌دهی در دو حالت آزمایش تجربی و تحلیل اجزای محدود

پس از مقایسه مشخص شد نمودارهای توزیع ضخامت در طول ورق در حالت اجزای محدود و آزمایش تجربی انطباق نسبتاً خوبی داشته و روند تغییرات مشابهی را دنبال می‌کنند. در هر دو نمودار کاهش ضخامت در دیواره ظرف اتفاق افتاده که با توجه به عمق کشش، ناحیه ابتدایی و انتهایی در دیواره ضخامت کمتری پیدا کرده است. همانطور که در شکل (۱۰) مشخص است، نتایج عددی کمترین ضخامت ورق را 0.723 میلی‌متر و قانون سینوس کمترین ضخامت در ورق را 0.757 میلی‌متر پیش‌بینی می‌کند. انجام آزمایش تجربی نشان داد کمترین ضخامت در ورق پس از شکل‌دهی 0.713 میلی‌متر است. با مقایسه مقادیر حاصل از تحلیل اجزای محدود و قانون سینوس با نتایج تجربی مشخص شد تحلیل اجزای محدود پیش‌بینی دقیق‌تری از توزیع ضخامت در ورق نسبت به قانون سینوس‌ها ارائه می‌دهد. انجام چند تحلیل اجزای محدود و همچنین مقایسه نتایج تحقیق فوق با تحقیق چاو و همکارانش [۱۱]، که توزیع ضخامت در ظرف هرمی را به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند، نشان داد قانون سینوس با توجه به عدم وابستگی به جنس ورق و شرایط تماسی، مقادیر ضخامت بیشتری نسبت به تحلیل اجزای محدود و آزمایش

تجربی پیش‌بینی می‌کند. تحلیل اجزای محدود این امکان را فراهم کرد که نیروی شکل‌دهی در طی انجام فرایند مورد بررسی قرار گیرد. در شکل (۱۱) نیروی شکل‌دهی جانبی و عمودی حاصل از تحلیل اجزای محدود صورت گرفته با تحقیقات تجربی اینگاراو [۱۰] مقایسه شد.



شکل ۱۱- مقایسه نیروی شکل‌دهی: تحلیل اجزای محدود صورت گرفته (الف) و آزمایش تجربی اینگاراو [۱۰] (ب)

این مقایسه نشان می‌دهد، نمودار نیروی شکل‌دهی حاصل از تحلیل اجزای محدود روند مشابهی را مطابق با نتایج تحقیقات تجربی اینگاراو دنبال می‌کند. در ابتدای فرایند که سطح تماس ابزار با ورق در حال افزایش است نیروی شکل‌دهی نیز افزایش می‌یابد. با حرکت عمودی ابزار به اندازه شعاع خود، سطح تماس به شکل مقطع ابزار در آمده و ثابت می‌ماند در نتیجه نیروی شکل‌دهی نیز به صورت پایدار باقی می‌ماند.

۵ - نتیجه‌گیری

مقایسه تحلیل اجزای محدود صورت گرفته با آزمایش‌های تجربی انجام شده نشان داد نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد. در این تحقیق قطعه تولیدی مخروط ناقص بوده که با توجه به پیچیده بودن مسیر، عمق کشش، استفاده از نگه‌دارنده فوقانی و زیرین در این تحلیل و پیچیدگی‌های تعریف سطوح تماس انطباق نتایج اجزای محدود با نتایج تجربی قابل توجه است. مقایسه شکل نهایی ظرف در دو حالت تجربی و اجزای محدود نشان داد کد نوشته شده برای تعریف مسیر ابزار، آن را با دقت خوبی مطابق با آزمایش تجربی مدل کرده است. همچنین تکنیک‌های استفاده شده در تحلیل اجزای محدود مانند الگوریتم لغزش‌های کوچک در محل تماس ورق با نگه‌دارنده‌ها، حجم محاسبات را کم کرده به گونه‌ای که امکان حل بدون نیاز به مقیاس جرمی فراهم شد. عدم استفاده از مقیاس جرمی موجب افزایش دقت تحلیل شده که انطباق نتایج نیز نشان دهنده این موضوع می‌باشد.

نمودار توزیع ضخامت ورق در حالت عددی، قانون سینوس و آزمایش تجربی نشان داد، نتایج تحلیل اجزای محدود دقت بیشتری نسبت به قانون سینوس داشته و قانون سینوس با توجه به عدم وابستگی به جنس و شرایط تماسی ضخامت بیشتری را پیش‌بینی می‌کند. همچنین بررسی نیروی شکل‌دهی نشان داد میزان تماس ورق با ابزار می‌تواند بر نیروی شکل‌دهی اثر بگذارد، در نتیجه در طی انجام فرایند با افزایش سطح تماس بین ابزار و ورق نیروی شکل‌دهی

افزایش می‌یابد. به طور کلی در این فرایند در ابتدای فرایند تماس به صورت نقطه‌ای می‌باشد در نتیجه نیروی شکل‌دهی کم است با حرکت ابزار در گام اول و دوم مسیر خود، سطح تماس از یک نقطه به شکل سطح مقطع ابزار تغییر کرده و سپس ثابت می‌ماند. در نتیجه تحت این تغییر سطح تماس، نیرو نیز افزایش می‌یابد تا به مقدار ثابتی می‌رسد به عبارت دیگر، شرایط پایدار نیرویی در عمقی برابر با شعاع ابزار ایجاد شده که در نمودارهای تجربی نیز این موضوع را بیان می‌کنند.

مراجع

- [1] Kim, H. Y., and Park, J. J., "Effect of Process Parameters on Formability in Incremental Forming of Sheet Metal", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130, pp. 52-46, (2002).
- [2] Park, J. J., and Kim, Y. H., " Fundamental Studies on the Incremental Sheet Metal Forming Technique", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 447-453,(2003).
- [3] Bambach, M., Hirt, G., and Junk, S., "Modelling and Experimental Evaluation of the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process", Presented at the 7th International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, Spain, (2003).
- [4] Fratini, L., Ambrogio, G., Di Lorenzo, R., Filice, L., and Micari, F., "Influence of Mechanical Properties of the Sheet Material on Formability in Single Point Incremental Forming", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 53, pp. 207-210, (2004).
- [5] Jeswiet, J., and Young, D., "Forming Limit Diagrams for Single-point Incremental Forming of Aluminum Sheet", *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. Part-B-219, pp. 1-6, (2005).
- [6] Cerro, I., Maidagan, E., Arana, J., Riveroa, A., and Rodríguez, P. P., "Theoretical and Experimental Analysis of the Dieless Incremental Sheet Forming Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 117, pp. 404-408, (2006).
- [7] Yamashita, M., Gotoh, M., and Atsumi, S. Y., "Numerical Simulation of Incremental Forming of Sheet Metal", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, pp. 163-172, (2008).
- [8] Orteu, J. J., Bugarin, F., Harvent, J., Robert, L., and Velay, V., "Multiple-camera Instrumentation of a Single Point Incremental Forming Process Pilot for Shape and 3D Displacement Measurements: Methodology and Results", *Experimental Mechanics*, Vol. 51, pp. 625-639, (2011).
- [9] Kadkhodayan, M., and Paul, A., "Experimental Investigation of Forces in Single Point Incremental Sheet Metal Forming Process", Presented at the 19th International Conference of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, (2011). (In Persian)
- [10] Ingarao, G., Ambrogio, G., Gagliardi, F., and Di Lorenzo, R., "A Sustainability Point of View on Sheet Metal Forming Operations: Material Wasting and Energy Consumption in Incremental Forming and Stamping Processes", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 29-30, pp. 255-268, (2012).

- [11] Jun-chao, L., Chong, L., and Zhou, T. g., "Thickness Distribution and Mechanical Property of Sheet Metal Incremental Forming Based on Numerical Simulation", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 22, pp. s54-s60, (2012).
- [12] Ambrogio, G., Filice, L., and Gagliardi, F., "Formability of Lightweight Alloys by Hot Incremental Sheet Forming", Materials and Design, Vol. 34, pp. 501-508, (2012).
- [13] ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ed, (2009).
- [14] Banabic, D., "Sheet Metal Forming Processes", Springer-verlag Berlin Heidelberg, (2009).
- [15] Hill, R., "A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals", Proceedings of the Royal Society of London, Series A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 193, pp. 281-297, (1948).
- [16] "Abaqus Analysis User's Manual", Vol. 6-11, (2011).
- [17] Jackson, K., and Allwood, J., "The Mechanics of Incremental Sheet Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 1158–1174, (2009).

فهرست نمادهای انگلیسی

$d\varepsilon_T$: کرنش در راستای ضخامت ورق

$d\varepsilon_w$: کرنش در راستای عرض ورق

T_f : ضخامت نهایی دیواره ظرف

T_i : ضخامت اولیه ورق می باشد.

نمادهای یونانی

σ_{mn} : تنش در جهات مختلف

α : زاویه دیواره ظرف بر حسب درجه

Abstract

Incremental sheet forming is a novel process. In recent years considerable attention has been paid to perform this process more flexibly and controllably. For producing of parts by traditional forming processes tool and die are required and Construction of this equipment is a costly and time-consuming process, so does not need any die is one of advantages of this process. In incremental sheet forming there are many parameters that have significant impacts on the quality of final product. In this study, the FEM analysis of incremental sheet forming to achieve cone frustum by using clamp and rig was done. In this analysis, due to the complex tool path a Vdisp code was used. Experimental tests have been done in accordance with the analysis. By investigating the final shape and the thickness distribution along the sheet, it was shown that the code had modeled the tool path with a good accuracy and there was a good agreement between the FEM and experimental test results.