

ارزیابی فرم‌پذیری ورق فلزی در فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با استفاده از تحلیل المان محدود و آزمایش‌های تجربی

در این مقاله، فرآیند نوینی با عنوان فرم‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی معرفی می‌شود که در آن حرکت ابزار فرم‌دهنده کاملاً تدریجی و کنترل شده است. بنابراین، می‌توان براساس حرکت کنترل شده‌ی ابزار، تغییر شکل‌های پیچیده را در ورق‌های فلزی ایجاد کرد. به منظور پیش‌بینی رفتار ورق فلزی در حین فرآیند و بررسی امکان فرم‌پذیری آن، شبیه‌سازی دقیق فرآیند در نرم‌افزار و بررسی نقاط بحرانی عملیات شکل‌دهی تدریجی امری ضروری است. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار *Abaqus* شبیه‌سازی و تحلیل این فرآیند خاص انجام شده است. مهم‌ترین چالش در شبیه‌سازی این فرآیند، مدل‌سازی حرکت ابزار در نرم‌افزار است. اهمیت این موضوع، زمانی افزایش می‌یابد که لازم است مسیر حرکت ابزار به صورت کاملاً دقیق (مطابق با مسیر دریافت شده از کنترلر ابزار) در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی شود. در این صورت، تعریف چندین هزار نقطه در محیط نرم‌افزار (مربوط به مسیر ابزار) ضروری است که در این مقاله، با استفاده از روشی نوین، مسیر کنترل‌شده‌ی ابزار در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. علاوه بر این، آزمایش‌های تجربی کاملی در زمینه نیروی فرآیند و نیز میزان فرم‌پذیری ورق فلزی، با هدف راستی‌آزمایی و مستندسازی نتایج تئوری انجام شده است.

فرهاد ربیعی^۱

کارشناسی ارشد

سیدمحسن صفوی^۲

دانشیار

محمود کدخدایی^۳

دانشیار

علیرضا صابری^۴

کارشناسی ارشد

واژه‌های راهنما: فرم‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی، المان محدود، محدوده‌ی فرم‌دهی، آزمایش‌های تجربی، تجهیزات مکاترونیک، اندازه‌گیری نیرو

۱- مقدمه

به منظور تولید قطعات پوسته‌ای شکل با کاربردهای گوناگون، لزوم استفاده از فرآیندی نوین در فرم‌دهی ورق‌های فلزی امری اجتناب‌ناپذیر است. فرآیند فرم‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی، عبارت است از عملیاتی که در آن با حرکت تدریجی و برنامه‌ریزی شده‌ی ابزار در یک مسیر خاص، تغییر فرم موردنظر در ورق فلزی ایجاد می‌گردد که در این فرآیند به منظور ایجاد حرکت کنترل شده‌ی ابزار، از ماشین کنترل عددی استفاده

^۱ نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان f.rabiei@me.iut.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان mosafavi@cc.iut.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان kadhodaei@cc.iut.ac.ir

^۴ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان alirezasaiberi88@hotmail.com

می‌شود. فرآیند فرم‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی، متناسب با نوع قالب استفاده شده به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌گردد. در صورت استفاده از سنبه در زیر ورق، فرآیند موردنظر فرم‌دهی مثبت نامیده می‌شود. این فرآیند، فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای^۱ نیز نامگذاری شده است. زیرا ورق فلزی از یک سو با ابزار و از سوی دیگر با سنبه در تماس است. همچنین در صورت عدم استفاده از سنبه در زیر ورق، فرآیند موردنظر را فرم‌دهی منفی (تک‌نقطه‌ای^۲) می‌نامیم. با بررسی کلیه تحقیقات انجام شده، می‌توان سه عامل مهم را به منظور سنجش کیفی محصول و بررسی میزان شکل‌پذیری ورق نام برد.

۱-۱- محدودیت شکل‌دهی ورق براساس شیب دیواره

با توجه به کاهش ضخامت ورق در این فرآیند، پژوهشگران زیادی تلاش کرده‌اند به حداکثر شیب دیواره در حین فرآیند شکل‌دهی تدریجی دست یابند. لازم به ذکر است مقدار نهایی این زاویه، به جنس ورق فلزی نیز بستگی دارد. اما به دلیل وابستگی کم این دو پارامتر، می‌توان مستقل از جنس ورق به بررسی محدوده‌ی شکل‌پذیری بر اساس شیب دیواره پرداخت. در این راستا Pohlak و همکاران [۱] در سال (۲۰۰۷) بیشترین زاویه‌ی قابل اطمینان در مورد دیواره‌ی ورق فولادی (شکل داده شده به شکل مخروط) را در حدود ۶۰ درجه بیان کرد. همچنین Hirt و همکاران [۲] ورق فولادی را تا زاویه‌ی ۶۵ درجه نیز شکل داده است. در سال (۲۰۰۷) Takano و همکاران [۳] با استفاده از روش تک‌نقطه‌ای (منفی) ورق آلومینیومی را تا زاویه‌ی ۶۵ درجه شکل داده است. اما با افزایش این زاویه به ۷۰ درجه، عملیات شکل‌دهی ورق فلزی در همان ابتدای فرآیند متوقف گردیده است.

از سوی دیگر، Minutolo و همکاران [۴] بر اساس تحلیل فرآیند تک‌نقطه‌ای (منفی) با استفاده از روش اجزای محدود، شکل‌پذیری ورق تا زاویه‌ی ۶۶ درجه را ممکن دانسته‌اند. لازم به ذکر است در فرآیند شکل‌دهی دونقطه‌ای (مثبت)، به دلیل وجود سنبه در زیر ورق و امکان حرکت ورق فلزی در راستای قائم، می‌توان محدوده‌ی شکل‌دهی ورق را افزایش داد. به این ترتیب، در فرآیند شکل‌دهی مثبت، امکان دستیابی به زاویه‌هایی در حدود ۷۰ درجه نیز فراهم می‌گردد. بنابراین، در عملیات شکل‌دهی تدریجی، شیب دیواره‌ی محصول نهایی یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار به‌منظور سنجش میزان شکل‌پذیری ورق می‌باشد. براساس تحقیقات انجام شده، حداکثر زاویه‌ی قابل دسترس در مورد دیواره‌ی ورق‌های فلزی در حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه بیان شده است. بنابراین، با استفاده از این روش، عملاً امکان شکل‌دهی ورق به شکل استوانه ($\alpha = 90\text{deg}$) وجود ندارد.

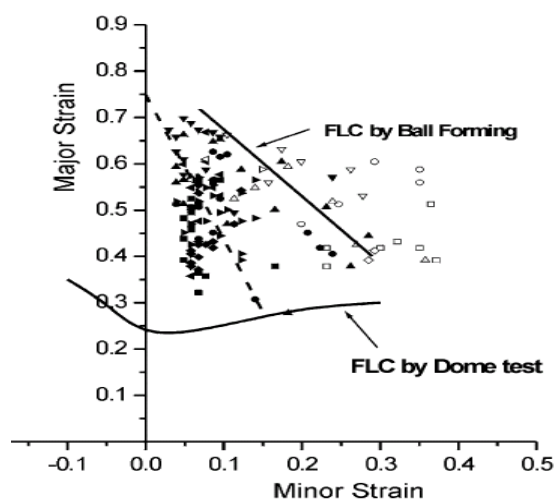
۱-۲- میزان شکل‌پذیری ورق با استفاده از نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی^۳

^۱ Two Point Incremental Forming (TPIF)

^۲ Single Point Incremental Forming (SPIF)

^۳ Forming Limit Diagram (FLD)

مهمترین معیار ارائه شده در متون علمی به منظور سنجش میزان شکل پذیری ورق های فلزی، نمودار محدوده فرم دهی می باشد. برخی از محققین (Emmens و Boogaard [۵])، به دلیل عدم برقراری شرط تنش صفحه ای^۱، استفاده از نمودار محدوده فرم دهی در این فرآیند را نامناسب می دانند. با وجود ابهامات مطرح شده در مورد استفاده از نمودار محدوده فرم دهی در این فرآیند، پژوهشگران زیادی این نمودار را به منظور سنجش مقادیر کرنش به کار برده اند. در سال (۱۹۹۳) Iseki و همکاران [۶] برای اولین بار نمودار محدوده فرم دهی را برای فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای ارائه نمود. همچنین در سال (۲۰۰۱) Shim و Park [۷] از کشور کره جنوبی به بررسی میزان شکل پذیری ورق در این فرآیند پرداختند. ایشان آزمایش های خود را بر روی یک ورق آلومینیومی (Al-1050) با ضخامت ۰/۳ میلی متر انجام دادند و با رسم نمودار محدوده فرم دهی شکل (۱) افزایش قابل توجه شکل پذیری ورق در این فرآیند نسبت به سایر عملیات شکل دهی را ادعا کردند.



شکل ۱- نمودار محدوده فرم دهی [۷]

همچنین، در سال (۲۰۰۲) Filice و همکاران [۸] با استفاده از همین نمودار، بررسی جامعی از افزایش محدوده فرم دهی شکل پذیری ورق در این فرآیند ارائه نمود. در سال (۲۰۰۷) Jeswiet و Ham [۹] از کشور کانادا و در سال (۲۰۰۵) Strano و همکاران [۱] با استفاده از این روش (نمودار محدوده فرم دهی)، میزان شکل پذیری ورق در حین فرآیند را بررسی کرده اند.

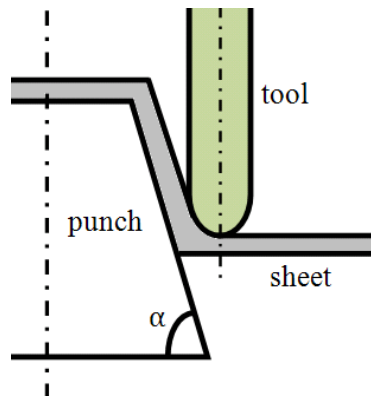
۱-۳- تغییر ضخامت ورق در حین عملیات شکل دهی

به منظور محاسبه ضخامت ورق در حین فرآیند، Matsubara [۱۰] در سال (۱۹۹۴) برای اولین بار از قانون سینوسی^۲ استفاده نمود. براساس این قانون، میزان کاهش ضخامت، متناسب با سینوس زاویه دیواره

^۱ Plane Stress

^۲ Sine Law

می‌باشد $(t = t_0 \sin(\frac{\pi}{2} - \alpha))$. در شکل (۲) نمونه‌ای از ورق فرم داده شده به شکل مخروط نشان داده شده است. براساس این تئوری، به دلیل ثابت بودن زاویه‌ی دیواره، ضخامت ورق در طول فرآیند ثابت است.



شکل ۲- ورق مخروطی

تحقیقات انجام شده توسط Jeswiet و Young [۱۱] نشان می‌دهد در صورت تغییر شکل ورقی از جنس آلومینیوم با ضخامت اولیه‌ی ۱/۲۱ میلی‌متر به شکل مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی ۶۰ درجه، در ابتدا ضخامت ورق فلزی در حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲ میلی‌متر کاهش می‌یابد و پس از آن در یک مقدار ثابت، پایدار می‌شود که این مقدار ثابت کمتر از پیش‌بینی قانون سینوسی در این مورد است.

در این مقاله، بر اساس آزمایش‌های تجربی و تحلیل المان محدود رفتار ورق در فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای بررسی شده است. به این منظور با استفاده از نرم‌افزار Abaqus تحلیل جامعی از فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای ارائه می‌گردد. مهمترین چالش در شبیه‌سازی این فرآیند، مدل‌سازی حرکت ابزار در نرم‌افزار است. اهمیت این موضوع زمانی افزایش می‌یابد که لازم است حرکت ابزار به صورت کاملاً دقیق (مطابق با مسیر دریافت شده از کنترلر واقعی ابزار) در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی شود. در این صورت، تعریف چندین هزار نقطه در محیط نرم‌افزار ضروری است. لازم به ذکر است در کلیه‌ی تحقیقات انجام شده، شبیه‌سازی فرآیند بدون سنبه (فرم‌دهی منفی) مورد توجه پژوهشگران بوده است. چراکه در فرم‌دهی منفی، به دلیل عدم وجود سنبه در زیر ورق و آزاد بودن فضای تحتانی آن، شبیه‌سازی دقیق حرکت ابزار لازم نیست. اما در فرآیند فرم‌دهی تدریجی مثبت که موضوع این تحقیق بوده است، در صورت ایجاد کوچکترین خطا در مسیر حرکت ابزار، ورق فلزی بین ابزار و سنبه به شدت فشرده می‌شود. بنابراین، شبیه‌سازی دقیق حرکت در فرآیند فرم‌دهی مثبت امری اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌آید. در همین راستا و با ارائه‌ی روشی نوین، حرکت ابزار براساس نقاط دریافت شده از کنترلر مدل‌سازی می‌گردد. همچنین، با تعریف معیار شکست، حداکثر میزان فرم‌پذیری ورق بر اساس شیب دیواره محاسبه می‌شود. به این منظور، سه سنبه‌ی مخروطی با زوایای ۵۰، ۶۲ و ۷۳ درجه در نرم‌افزار Abaqus شبیه‌سازی شده است. به این ترتیب، می‌توان پارگی ورق فلزی و وابستگی آن به شیب دیواره‌ی سنبه را بررسی نمود. علاوه بر موارد مذکور در این تحقیق، آزمایش‌های تجربی کاملی نیز به منظور راستی‌آزمایی و مستندسازی نتایج تئوری انجام شده است که از جهات گوناگون حائز اهمیت است. از یک سو انجام چندین آزمایش مطلوب، موفقیت‌آمیز بودن فرآیند را

تضمین می‌کند. از سوی دیگر، براساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی، می‌توان تحلیل جامعی در مورد مکانیزم فرم‌پذیری ورق و عوامل محدودکننده آن ارائه نمود. علاوه براین، در آزمایش‌های تجربی با استفاده از دو نیروسنج^۱ به همراه سایر تجهیزات مکترونیکی، نیروی ایجاد شده در حین عملیات فرم‌دهی اندازه‌گیری شده است. بنابراین مقایسه نتایج تحلیل نرم‌افزار و واقعیت فرآیند، در دو بخش نیرویی و میزان فرم‌پذیری انجام شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور تولید قطعات پوسته‌ای شکل با اشکال خاص، ابتدا سنبه‌ای به شکل موردنظر طراحی و ساخته می‌شود. در شکل (۳) سنبه‌ای به فرم مخروط (با زاویه‌ی ۶۲ درجه نسبت به محور افق) نشان داده شده است که ارتفاع این سنبه برابر با ۵ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۳- نمونه‌ای از سنبه‌ی مخروطی

در آزمایش‌های تجربی، از ورق آلومینیومی با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده که ورق انتخاب شده از نوع (AL2024-O) است. همچنین، به منظور فرم‌دهی ورق فلزی، از یک ابزار سرکروی با شعاع ۵ میلی‌متر استفاده می‌گردد. در فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای، ورق فلزی با استفاده از یک رینگ، به صفحه‌ی فوقانی قالب متصل می‌شود. در شکل (۴) رینگ فولادی مورد استفاده در این تحقیق با قطر داخلی ۱۸ سانتی‌متر و قطر خارجی ۲۰ سانتی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۴- رینگ فولادی

در شکل (۵) قالب مخصوص طراحی شده در این فرآیند نشان داده شده است که قسمت ثابت قالب (کفشک) بر روی میز CNC نصب می‌شود. فضای کاری ایجاد شده در وسط قالب در حدود ۲۰×۲۰×۳۰

^۱ Load cell

سانتی‌متر می‌باشد. با نصب قسمت متحرک قالب در داخل میل راهنماها، امکان حرکت صفحه‌ی فوقانی در راستای قائم فراهم می‌گردد.



شکل ۵- قالب و تجهیزات وابسته

با نصب سنبه، ورق و ورق‌گیر بر روی کفشک قالب، مجموعه‌ی تجهیزات لازم برای آغاز فرآیند مهیا می‌شود. با توجه به منابع موجود و نیز تجربیات اولیه در آزمایش‌ها، در این فرآیند سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه برای حرکت دورانی ابزار و سرعت ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه برای پیشروی آن استفاده گردید. همچنین، میزان پیشروی ابزار در راستای قائم، برابر با ۱ میلی‌متر می‌باشد. با ترسیم مدل سه‌بعدی سنبه در نرم‌افزار Master CAM امکان استخراج مسیر دقیق ابزار فراهم می‌گردد. با ارسال مختصات نقاط به کنترلر دستگاه و با حرکت ابزار بر روی ورق، به تدریج فرم موردنظر در ورق فلزی ایجاد می‌شود. همچنین، به منظور اندازه‌گیری نیروی عمودی اعمال شده به قالب از دو لودسل استفاده شده است. این نوع خاص از حسگرها دارای ظرفیت‌های نیرویی متفاوت می‌باشند. در این فرآیند، لودسل‌هایی با ظرفیت ۴۰۰۰ نیوتن و دقت اندازه‌گیری یک نیوتن تهیه شده است. لودسل‌های استفاده شده در این فرآیند به شکل حرف K بوده و مانند تیر یک سر درگیر عمل می‌کند تصویر (ج) در شکل (۶). به منظور حفظ تعادل و تقارن قالب بر روی میز CNC دو عدد لودسل در زیر قالب قرار گرفته است. ولتاژ خروجی لودسل‌ها که بیان‌کننده نیروی ایجاد شده در حین عملیات فرم‌دهی می‌باشد، با استفاده از کارت اکتساب داده^۱ به کامپیوتر منتقل می‌شود تصویر (الف) در شکل (۶). ولتاژ ایجاد شده توسط لودسل‌ها بسیار کوچک است. بنابراین، به منظور مشاهده اولیه نتایج و تقویت ولتاژ خروجی لودسل‌ها از دو نمایشگر^۲ استفاده می‌گردد تصویر (ب) در شکل (۶).



(ج)

(ب)

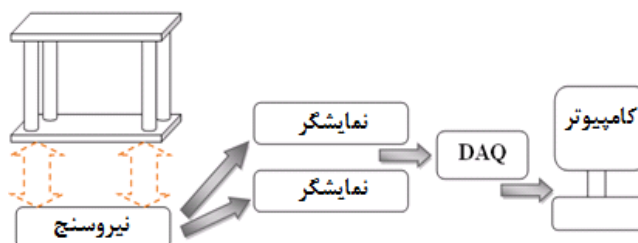
(الف)

^۱ Data Acquisition Card (DAQ)

^۲ Indicator

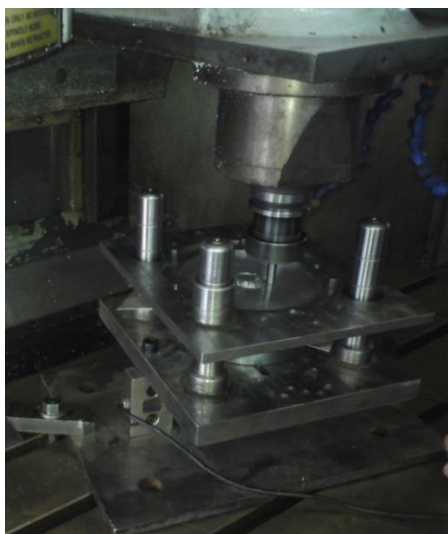
شکل ۶- (الف) کارت اکتساب داده (ب) نمایشگر (ج) لودسل

در شکل (۷) مدار مکاترونیکی استفاده شده در فرآیند به فرم شماتیک نشان داده شده است. با حرکت ابزار بر روی ورق، لودسل‌ها فشرده شده و ولتاژ متناسب با نیروی اعمال شده به ورق فلزی تولید می‌شود. ولتاژ خروجی لودسل‌ها با عبور از دو نمایشگر، توسط کارت اکتساب داده وارد کامپیوتر می‌شود.



شکل ۷- تجهیزات مکاترونیکی

اکنون، با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار لَب‌ویو^۱ امکان بازخوانی داده‌ها در کامپیوتر فراهم می‌گردد. در شکل (۸) تجهیزات کامل مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۸- تجهیزات آزمایشگاهی (CNC، قالب، ورق، ابزار، لودسل و ...)

از آنجایی که هدف مهم‌تر در این مقاله ارائه نتایج المان محدود این فرآیند و مستندسازی آن براساس نتایج آزمایشات بوده است، از ذکر جزئیات بیشتر در مورد فضای تجربی تست‌ها و برنامه‌نویسی انجام شده در نرم‌افزار لَب‌ویو خودداری شده است.

^۱ LabVIEW

۳- مدل سازی المان محدود

در این مقاله، به منظور تحلیل فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای در نرم‌افزار Abaqus از تحلیل صریح^۱ دینامیکی استفاده می‌شود. در این تحقیق سه سنبه‌ی مخروطی در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. زاویه‌ی دیواره‌ی هر یک از سنبه‌ها با محور افق به ترتیب برابر با ۵۰، ۶۲ و ۷۳ درجه می‌باشد. همچنین، ورق فلزی به عنوان یک جسم فرم‌پذیر مدل‌سازی می‌گردد. به دلیل تغییر ضخامت ورق در حین فرآیند و اهمیت آن در ایجاد جریان ماده، ورق فلزی به شکل یک جسم جامد سه بعدی^۲ شبیه‌سازی شده است. ورق فلزی با ابعاد (۱×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر) به المان‌هایی با ابعاد بسیار کوچک (۱×۱/۵×۱/۵ میلی‌متر) تقسیم‌بندی می‌شود. چگالی ورق آلومینیومی برابر با ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسون آن برابر با ۰/۳۳۴ در نظر گرفته شده است. همچنین، ضریب یانگ^۳ ورق آلومینیومی برابر با ۷۰ گیگاپاسکال می‌باشد. در این فرآیند، تنش تسلیم ورق فلزی از مقدار اولیه‌ی ۵۰ مگاپاسکال به مقدار نهایی ۲۰۸ مگاپاسکال (در کرنش ۰/۰۸) افزایش می‌یابد. با توجه به تعداد زیاد نقاط دریافت شده از کنترلر ابزار (Master CAM)، وارد کردن مختصات این نقاط (چندین هزار نقطه) در نرم‌افزار Abaqus به صورت متعارف عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین، لازم بوده است روش نوینی به منظور ایجاد حرکت دلخواه در نرم‌افزار Abaqus ارائه گردد. در این مقاله، عملیات جایگذاری مختصات مسیر ابزار در مکان مناسب فایل ورودی، با استفاده از نرم‌افزار Matlab انجام شده است. به این منظور، با استفاده از دستور (fprintf) مختصات هر یک از نقاط در جایگاه مناسب خود در هر گام نوشته می‌شود. با تکرار عملیات فوق در مورد کلیه‌ی نقاط (با استفاده از حلقه‌ی for) عبارت مربوط به هر گام، متناسب با فرمت موردنیاز در فایل ورودی نرم‌افزار Abaqus ایجاد می‌گردد. در این مقاله، به منظور بررسی پارگی ورق فلزی در انتهای فرآیند از معیار شکست در نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی استفاده شده است. Iseki [۶] به منظور بررسی محدوده‌ی فرم‌پذیری ورق در این فرآیند، پارامتر اسکالر ($\epsilon_{major} + \epsilon_{minor} = q$) را مطرح نمود. بر اساس این معیار، پس از محاسبه‌ی پارامتر q یک خط مستقیم با شیب (-۱) در نمودار FFLD ترسیم می‌گردد.

در این مقاله، با در نظر گرفتن مقادیر کرنش در آزمایش‌های تجربی و با توجه به مقادیر عددی ارائه شده در تحقیقات مشابه [۴] مقدار پارامتر q برابر با ۱/۱۵ در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که نقاط محاسبه شده در نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی (مربوط به مقادیر کرنش‌های اصلی در سطح ورق) پایین‌تر از خط فوق قرار گیرد، آسیب جدی در ورق فلزی ایجاد نمی‌شود.

۴- نتایج

لازم به یادآوری است که در تحلیل فرآیند شکل‌دهی تدریجی با استفاده از سنبه‌های مخروطی، دو هدف عمده مورد نظر می‌باشد. از یک سو، با توجه به ثابت بودن شیب دیواره‌ی سنبه، تغییر ضخامت ورق فلزی و صحت قانون سینوسی بررسی می‌گردد. از سوی دیگر، با توجه به وابستگی شکل‌پذیری ورق فلزی به زاویه‌ی

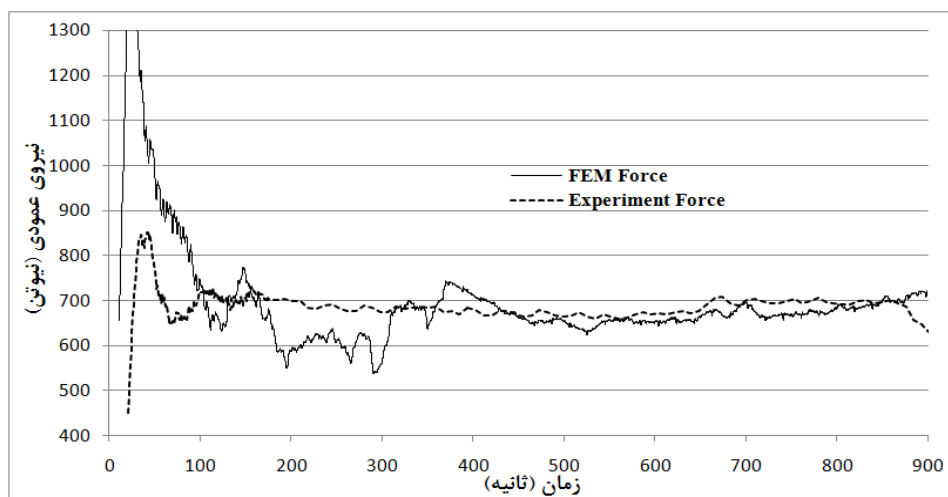
¹ Explicit

² Solid

³ Young Module

دیواره‌ی سنبه، نمودار محدود‌دهی فرم‌دهی ترسیم می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر این عامل، با تعریف معیار شکست در سنبه‌های مخروطی، می‌توان پارگی ورق فلزی و وابستگی آن به شیب دیواره‌ی سنبه را بررسی نمود. در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی و نیز تحلیل نرم‌افزاری فرآیند آورده شده است. نکته‌ی قابل توجه در این نتایج این است که بررسی صحت نتایج المان محدود، به کمک نتایج آزمایش‌ها و کمیت‌هایی مانند نیروی فرآیند و حداکثر عمق قابل دسترسی در ورق بررسی شده است.

به دلیل ماهیت فرم‌دهی فرآیند، در ابتدا به بررسی نیروی فرآیند پرداخته می‌شود. همان‌گونه که در ابتدا بیان گردید و با توجه به چیدمان لودسل‌ها در زیر قالب، این نیرو در راستای عمود بر ورق اندازه‌گیری شده است. در شکل (۹) نمودار نیروی عمودی ایجاد شده در مورد سنبه مخروطی ۵۰ درجه به عنوان نمونه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نمودار دقیق (نقطه به نقطه) هر یک از نیروهای مذکور (تحلیل و آزمایش) دارای پرش‌ها و نوسانات زیادی است که به دلیل ماهیت فرآیند و تدریجی بودن آن و نیز برخورد مداوم ابزار با ورق در مقیاس ۰/۰۱ میلی‌متر، این نوسان‌ها بدیهی به نظر می‌رسد. لذا به منظور مقایسه‌ی بهتر نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری و نیز نیروهای اندازه‌گیری شده توسط لودسل‌ها، نمودارها متوسط‌گیری شده و در یک دستگاه رسم شده‌اند.



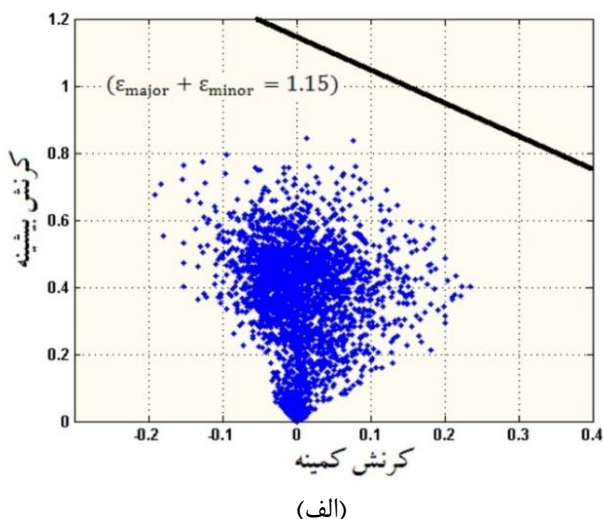
شکل ۹- نیروی عمودی فرآیند فرم‌دهی (مخروط ۵۰ درجه)

همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شده است؛ پس از آغاز فرآیند و قرار گرفتن ابزار در مسیر اصلی خود (مماس بر دیواره‌ی سنبه) که حدود یک دقیقه طول می‌کشد، متوسط نیرو در مقدار ثابتی پایدار می‌ماند که این مقدار با توجه به عدم تغییر شیب دیواره‌ی سنبه تا انتهای فرآیند ثابت است. در آزمایش‌های تجربی این مقدار ثابت در حدود ۶۸۰ نیوتن است.

در تحلیل المان محدود نیز پس از افزایش نیرو در ابتدای فرآیند، مقدار نیروی اعمال شده به قالب در حدود ۶۵۰ نیوتن ثابت می‌ماند. بنابراین، با در نظر گرفتن نمودارهای ارائه شده در شکل (۹) و با صرف نظر از نتایج المان محدود در گام‌های اولیه که ابزار در حال پایدار شدن در مسیر خود می‌باشد، روند تغییرات نیرویی بسیار مناسبی در نتایج نرم‌افزاری در مقایسه با آزمایش‌های تجربی بدست آمده است. نکته‌ی قابل توجه در

این نمودارها پایین تر بودن نیروی حاصل از تحلیل FEM نسبت به نیروی واقعی است که این امر را می‌توان به دلیل وجود شرایطی دانست که پیش‌بینی و مدل‌سازی دقیق آن در نرم‌افزار امکان پذیر نبوده است. در مورد فرآیند فرم‌دهی مخروط ۶۲ درجه ذکر این نکته الزامی است که نمودارهای نیرویی آن نسبت به شکل (۹) یکسان بوده در حالی که، مقدار میانگین نیرو در حدود ۸۰۰ نیوتن می‌باشد، لذا از تکرار مجدد آن خودداری شده است. همچنین در عملیات فرم‌دهی مخروط ۷۳ درجه نیز به دلیل پارگی ورق در ثانیه‌های آغازین و توقف فرآیند، نموداری از نیروی فرم‌دهی نیز وجود نداشته است که این امر در تحلیل نرم‌افزاری نیز تکرار شده و علت آن در ادامه بیان می‌گردد.

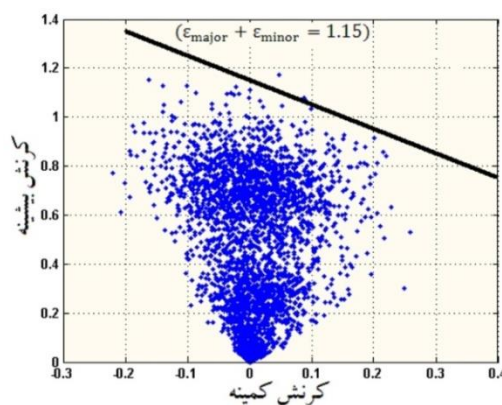
در گام بعد، میزان فرم‌پذیری ورق بررسی شده است. بنابراین با تعریف معیار شکست، حداکثر میزان فرم‌پذیری ورق براساس شیب دیواره محاسبه می‌شود. همان‌گونه که بیان گردید، با در نظر گرفتن مقادیر کرنش در آزمایش‌های تجربی و با توجه به مقادیر عددی ارائه شده در تحقیقات مشابه [۴] مقدار پارامتر q (مجموع کرنش ماکزیمم و مینیمم) برابر با $1/15$ در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۰) نمودار کرنش ماکزیمم بر حسب کرنش مینیمم در فرم‌دهی مخروط ۵۰ درجه به همراه ورق فرم داده شده رسم شده است. نقاط موجود در این نمودار، مربوط به کلیه‌ی المان‌های ورق (۱۰۰۰۰ المان) می‌باشد.



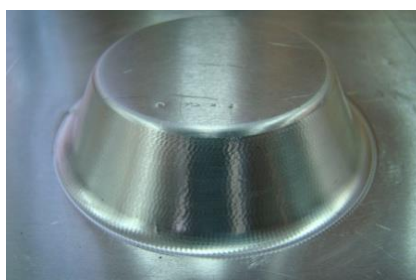
شکل ۱۰- نمودار محدوده فرم‌دهی مربوط به سنبه مخروطی با زاویه ۵۰ درجه (الف)

مخروط ۵۰ درجه فرم‌داده شده در آزمایش‌های تجربی (ب)

همانطور که ملاحظه می‌گردد نقاط نمودار شکل (۱۰- الف) در داخل محدوده‌ی ایمن قرار دارند. در آزمایش‌های تجربی نیز، ورق آلومینیوم به راحتی تا عمق ۵۰ میلی‌متر (حداکثر ارتفاع قالب) شکل داده شده است شکل (۱۰)-ب. همچنین در شکل (۱۱) نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی مربوط به سنبه‌ی مخروطی با زاویه‌ی ۶۲ درجه نشان داده شده است. همانگونه که قابل درک است، میزان فرم‌پذیری ورق و در نتیجه عمق شکل‌پذیری آن به نسبت کاهش یافته است.



(الف)

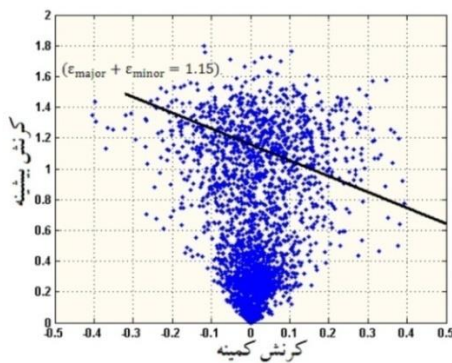


(ب)

شکل ۱۱- نمودار محدوده فرم‌دهی مربوط به سنبه مخروطی با زاویه ۶۲ درجه (الف)

مخروط ۶۲ درجه فرم‌داده شده در آزمایشات تجربی (ب)

در این شرایط مشاهده می‌شود که نقاط نمودار شکل (۱۱- الف) نزدیک به مرز محدوده‌ی ایمن قرار دارند. در واقع براساس نتیجه تحلیل FEM میزان فرم‌پذیری ورق دارای محدودیت است که این امر به طور کامل در آزمایش‌ها نیز اثبات شده است. چرا که در این حالت، ورق آلومینیوم حداکثر تا عمق ۴۲ میلی‌متر شکل داده شده است شکل (۱۱)-ب. در شکل (۱۲) نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی مربوط به سنبه‌ی مخروطی با زاویه‌ی ۷۳ درجه آورده شده است که نشان دهنده کاهش چشمگیر فرم‌پذیری در این شرایط است.



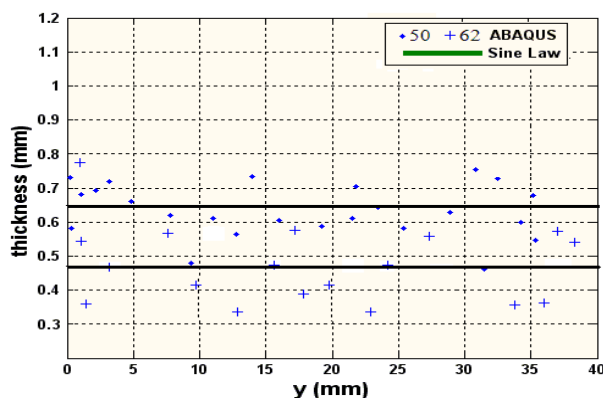
(الف)



(ب)

شکل ۱۲- نمودار محدوده فرم‌دهی مربوط به سنبه مخروطی با زاویه ۷۳ درجه (الف)
مخروط ۷۳ درجه فرم‌داده شده در آزمایش‌های تجربی (ب)

همانگونه که در تصاویر (الف) در شکل (۱۲) نشان داده شده است، با افزایش زاویه تا ۷۳ درجه، نقاط نمودار FLD فرآیند از ناحیه‌ی ایمن خارج شده و بر اساس آزمایش‌ها نیز ورق در شروع فرآیند دچار پارگی شده و عملیات در همان ابتدا متوقف می‌گردد شکل (۱۲)-ب. در نهایت، به عنوان نتیجه‌ای دیگر از این تحقیق، در تحلیل‌های اول (۵۰درجه) و دوم (۶۰درجه)، ضخامت ورق فلزی در انتهای فرآیند نیز محاسبه گردید. در شکل (۱۳) ضخامت محاسبه شده توسط نرم‌افزار با مقادیر پیش‌بینی شده توسط قانون سینوسی [۱۰] مقایسه شده است. خطوط افقی ترسیم شده در این نمودار، مقادیر ثابت پیش‌بینی شده توسط قانون سینوسی را نشان می‌دهد که محور افقی آن (Y) میزان پیشروی ابزار در راستای قائم است. همان‌گونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد با استفاده از قانون سینوسی می‌توان تخمین قابل قبولی از تغییر ضخامت ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای ارائه نمود.



شکل ۱۳- تغییر ضخامت ورق در سنبه‌های مخروطی

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق با بررسی فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای در فضای ثنوری و تجربی، مدل‌سازی کاملی در نرم‌افزار Abaqus انجام گردید. در فرآیند فرم‌دهی تدریجی، به منظور تعیین معیار شکست، از یک خط مستقیم با شیب منفی استفاده می‌شود. انتخاب محدوده‌ی شکست در این فرآیند، بر اساس جنس و ضخامت ورق تعیین می‌گردد. به‌گونه‌ای که با افزایش ضخامت ورق فلزی و کاهش سختی ماده، مقدار ضریب q افزایش می‌یابد که در این مقاله با توجه به ضخامت ورق آلومینیومی از معیار $(\varepsilon_{major} + \varepsilon_{minor} = 1.15)$ استفاده شده است. بنابراین، با استفاده از نتایج المان محدود و با ترسیم نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی، می‌توان تصمیم‌گیری جامعی در مورد موفقیت‌آمیز بودن فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای ارائه نمود. همچنین در صورت نزدیکی مقادیر کرنش به محدوده‌ی شکست، چند راهکار عمده وجود دارد. از یک سو، با افزایش ضخامت ورق و افزایش شعاع لبه‌های سنبه، می‌توان از پارگی سریع ورق فلزی جلوگیری نمود که در صورت عدم رفع مشکل و عبور مجدد مقادیر کرنش از محدوده‌ی شکست، با کاهش زاویه‌ی دیواره احتمال پارگی ورق فلزی تا حد زیادی کاهش می‌یابد. به این ترتیب، با تحلیل فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای در نرم‌افزار Abaqus و بدون صرف هزینه‌های مربوط به آزمایش‌های سعی و خطا در این فرآیند، می‌توان انتخاب بهینه‌ای از پارامترهای مؤثر ارائه نمود که این امر سبب تولید محصولی با کیفیت قابل قبول می‌گردد.

مراجع

- [1] Pohlak, M., Majak, J., and Kuttner, R., "Manufacturability and Limitation in Incremental Sheet Forming", Proc. Estonian Acad., University of Tech., Tallinn, Vol. 13, No. 2, pp. 129-139, (2007).
- [2] Hirt, G., Bambach, M., Chouvalova, I., and Junk, S., "Process Limits and Material Behavior in Incremental Sheet Forming with CNC Tools", Material Science Forum, Vol. 426, pp. 3825-3830, Saarland, Germany, (2003).
- [3] Takano, H., Kitazawa, K., and Goto, T., "Incremental Forming of Nonuniform Sheet Metal: Possibility of Cold Recycling Process of Sheet Metal Waste", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, pp. 477-482, Shinshu, Japan, (2008).
- [4] Minutolo, F.C., Durante, M., Formisano, A., and Langella, A., "Evaluation of the Maximum Slope Angle of Simple Geometries Carried out by Incremental Forming Process", Journal of Materials Processing Tech, Vol. 101, No. 194, pp. 145-150, Naples, Italy, (2007).
- [5] Emmens, W.C., and Boogaard, A.H., "An Overview of Stabilizing Deformation Mechanisms in Incremental Sheet Forming", Journal of Materials Processing Technology, No. 209, pp. 3688-3695, Twente, Netherlands, (2009).
- [6] Iseki, H., Kato, K., and Sakamoto, S., "Forming Limit of Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging with a Spherical Roller", Proceedings of International Conference on Technology of Plasticity, pp. 125-132, Tokyo, Japan, (1993).

- [7] Shim, M.S., and Park, J.J., “The Formability of Aluminum Sheet in Incremental Forming”, *Journal of Materials Processing Tech.*, No. 113, pp. 654-658, Seoul, South Korea, (2001).
- [8] Filice, L., Fratini, L., and Micari, F., “Analysis of Material Formability in Incremental Forming”, *CIRP Annals-manufac. Tech.*, No. 51, pp. 199-202, Palermo, Italy, (2002).
- [9] Ham, M., and Jeswiet, J., “Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming”, *CIRP Annals-manufacturing Tech.*, No. 56, pp. 277-280, Kingston, Canada, (2007).
- [10] Matsubara, S., “Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Head Tool”, *Plastic Process*, Vol. 35, pp. 1311–1321, (1994).
- [11] Jeswiet, J., and Young, D., “Wall Thickness Variations in Single Point Incremental Forming”, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, No. 11, pp. 1453-1459, Ontario, Canada, (2004).

Abstract

Necessity of using types of metals in many kinds and shapes in human different activities, has always obliged him by invention of new ways, plods in forming and transfiguration of metal parts field. In this article, Two Point Incremental Forming (TPIF) as a new process is introduced by means of which shell parts can be produced with a variety of applications. Incremental sheet metal forming has demonstrated its great potential to form complex three dimensional parts without using a matching die. The process locally deforms sheet metal using a moving tool head achieving higher forming limits than those of conventional sheet metal stamping process. Potential application areas include aerospace industries, customized products in biomedical applications and prototyping in the automotive industry. In this special kind of forming operation, in order to decrease the force during of process and increase formability of sheet metal is used a spherical tool with small dimension. In this process, sheet metal is inserted on a punch with special shape and produced required deformation by incremental movement of tool. In this article, behavior of sheet metal is examined through using experimental and theoretical analysis in Two Point Incremental Forming. Finite element analysis of Incremental Sheet Metal Forming is one of the important issues in this article. The importance of this issue, increases when movement of tool in an accurate path (in accordance to received path from the tool controller), is simulated in the software. In this case, it seems necessary definition of several thousand points of movement (related to the tool path) in software. In this thesis, by using a new method, the controlled movement of tool is modeled in ABAQUS software based on received points from the controller. According to the results obtained from finite element simulation, is provided the possibility of increasing formability of sheet metal and effective parameters in incremental forming. Moreover, in this research force as important and influential parameter in a forming process is measured. According to results of experimental tests and theoretical analysis, is presented comprehension decision about the forming mechanism in this process. It should be noted that, in this effort the measurement and online observation of process force, has been implemented by two loadcell sensors and LabVIEW software that is new and innovative method.