

مطالعه تجربی و بهینه‌سازی شکل دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای ورق آلومینیومی ۱۰۵۰ به شکل سهموی به روش پاسخ سطح

محمد هنرپیشه^۱، ایمان علی نقیان^۲، امیر رستمی^۳

۱ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه کاشان، کاشان، honarpish@kashanu.ac.ir

۲ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه کاشان، کاشان

۳ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جاسب، جاسب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۱۰

چکیده

شکل‌دهی افزایشی ورق فلزی از جمله روش‌های نوین و انعطاف‌پذیر در فناوری شکل‌دهی ورق‌های فلزی است، که برای تولید قطعات به تعداد کم و ساخت مدل نمونه اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تولید قطعات با خواص مطلوب، با بیشترین کیفیت و کمترین هزینه، تعیین میزان بهینه برای پارامترهای فرایند ضروری می‌باشد. در این تحقیق به بررسی حد شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ و تأثیر پارامترهایی چون قطر ابزار شکل‌دهی، گام عمودی، سرعت دوران ابزار و سرعت پیشروی در فرایند شکل‌دهی افزایشی به حالت گودال سهموی پرداخته شده است. به‌علاوه اینکه مدلی برای تخمین بیشینه عمق و زاویه شکست ورق در این فرایند ارائه شده است. در مراحل بعد بهینه‌سازی برای یافتن بیشترین عمق و زاویه شکست با استفاده از روش پاسخ سطح صورت گرفت. براساس آزمایشات انجام‌شده و تحلیل صورت‌گرفته با روش پاسخ سطح و آنووا، سرعت چرخشی تأثیر چندانی بر عمق و زاویه شکست ندارد و همین‌طور بیان شد که افزایش میزان فاکتورهای پیشروی و قطر ابزار میزان عمق شکست کاهش و با افزایش گام حرکتی ابزار آن افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

تغییر شکل افزایشی، بهینه‌سازی، روش پاسخ سطح، گودال سهموی، آلومینیوم ۱۰۵۰

۱. مقدمه

بسیاری قرار گرفته است و این بدان جهت است که نیازی به ساخت قالب نبوده و یک ابزار با شکل ساده به وسیله ماشین سی. ان. سی.^۱ حرکت کرده و سبب تغییر شکل پلاستیک تدریجی در ورق‌هایی که از اطراف در یک نگهدارنده ثابت شده است می‌شود. از

شکل‌دهی افزایشی فرایندی برای تولید قطعات جدارنازک متقارن و غیرمتقارن از ورق فلزی است که در آن ابزاری چرخان، با حرکت بر مسیری از پیش تعیین شده بر یک ورق فلزی شکلی خاص ایجاد می‌کند. روش شکل‌دهی افزایشی به‌تازگی مورد توجه

جمله مزایای این روش امکان ایجاد قطعات به شکل‌های پیچیده است. یکی دیگر از ویژگی‌های مطلوب این فرایند نیروی کم لازم برای شکل‌دهی است. شکل‌دهی افزایشی ورق روشی جهت تولید با تعداد کم و نمونه‌سازی مناسب می‌باشد. از محدودیت‌های این روش می‌توان به زمان زیاد برای شکل‌دهی، برگشت فتری ورق و چندمرحله بودن برای شکل‌دهی با زاویه جداره زیاد اشاره کرد. از اینرو این روش برای ساخت طرح اولیه و آزمایشگاهی مناسب می‌باشد. روش‌های قدیمی شکل‌دهی ورق‌ها برای تعداد زیاد محصولات مناسب است. این در حالی است که برای ساخت نمونه‌های اولیه مناسب نیستند؛ زیرا هزینه ساخت قالب زیاد خواهد بود و این کار به‌صرفه نخواهد بود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، این روش می‌تواند جایگزین کشش عمیق برای تعداد کم قطعات شود. مطالعات زیاد در رابطه با شکل‌دهی افزایشی صورت پذیرفته که از این میان وفایی صفت و ابراهیم [۱] در مقاله‌ای به بررسی مسیر ابزار بر ورق دولایه نوردشده در فرایند شکل‌دهی تدریجی پرداخته‌اند. نیک دوز و همکاران [۲] با هدف بهبود ضخامت کمینه ورق و مقایسه آن با حالات تک و دومرحله‌ای شکل‌دهی تدریجی آن را مورد تجزیه و تحلیل عددی و تجربی قرار دادند. بارانی شولی و همکاران نیز حد شکل‌پذیری آلیاژ تیتانیوم در شکل‌دهی تدریجی و جریان الکتریکی در آن را مورد مطالعه تجربی قرار دادند [۳]. در تحقیق دیگری صدیقی^۲ و همکاران تأثیر پارامترهای ابزار بر شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ساده در فرایند شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفت [۴]. دورانت^۳ و همکاران نیز به تأثیر چرخش ابزار بر فرایند شکل‌دهی افزایشی هرم ناقص ورق آلیاژی آلومینیوم پرداخته‌اند [۵]. در تحقیق دیگری دجاردین و همکاران به تحلیل عددی و تجربی شکل اعوجاج و آثار برگشت‌پذیری ناشی از شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای ورق آلومینیوم پرداخته شده است [۶]. در پژوهش دیگری، مطالعه و تحلیل آثار سرعت‌های پیشروی زیاد و چرخش ابزار در صافی سطح خارجی ورق، توزیع ضخامت و ساختار میکروسکوپی در فرایند شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای پرداخته شده است [۷]. جانچائو و همکاران توزیع ضخامت و طراحی فرایندهای چندمرحله‌ای به‌کمک روش المان محدود در فرایند شکل‌دهی افزایشی ورق فلزی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۸]. در مأخذ [۹]، بهینه‌سازی بر مسیر ابزار در شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای ورق آلومینیوم با استفاده از روش پاسخ سطح صورت

گرفته است. ژن سوی و همکاران به تحلیل عددی و تجربی توزیع تنش در فرایند شکل‌دهی افزایشی پرداخته‌اند [۱۰]. در تحقیق دیگری فانگ و همکاران به بررسی تحلیلی و تجربی مکانیزم تغییر شکل و رفتار شکست با در نظر گرفتن اثر خمش و سخت شوندگی کرنش، چگونگی تنش و کرنش در ناحیه تغییرشکل یافته در فرایند مشابه پرداخته شده است [۱۱]. در مقاله شانموگاناتان و همکاران تأثیر پارامترهای شکل‌دهی (از جمله قطر ابزار، گام عمودی (عمقی)، سرعت پیشروی و سرعت ابزار) مخروط ناقص بر پاسخ‌های فرایند (اعم از ضخامت میانگین، زاویه دیواره و صافی سطح) را مورد بررسی تجربی و آماری با روش پاسخ سطح قرار گرفته شده است [۱۲]. بن آید و همکاران روش ساده‌ای برای کاهش زمان تحلیل عددی شکل‌دهی افزایشی ارائه کرده‌اند [۱۳]. داورپناه^۴ و همکاران نیز آثار افزایش عمق و چرخش ابزار در مودهای شکست و خواص میکروسازهای در شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه روی پلیمرها را به‌صورت تجربی مورد پژوهش قرار داده‌اند [۱۴]. هنرپیشه و همکاران نیز فرایند شکل‌دهی افزایشی داغ را مورد بررسی تجربی قرار داده‌اند [۱۵]. پاک و همکاران فرایند شکل‌دهی را با فرایند اولتراسونیک ترکیب کرده‌اند و به نتایج خوبی دست یافتند [۱۶]. باتوجه به عدم وجود مطالعه اختصاصی بر بهینه‌سازی و بررسی آماری این فرایند برای قطعات به شکل گودال سهموی، در این تحقیق سعی بر بررسی جامع نظریه و کاربردهای فناوری شکل‌دهی افزایشی و مطالعه حد شکل‌پذیری آلومینیوم ۱۰۵۰ در حالت گودال سهموی^۵ شده است. مرور مفصل ادبیات علمی موجود با استناد به جدیدترین مقالات منتشرشده زیربنای این کار تحقیقاتی بوده است.

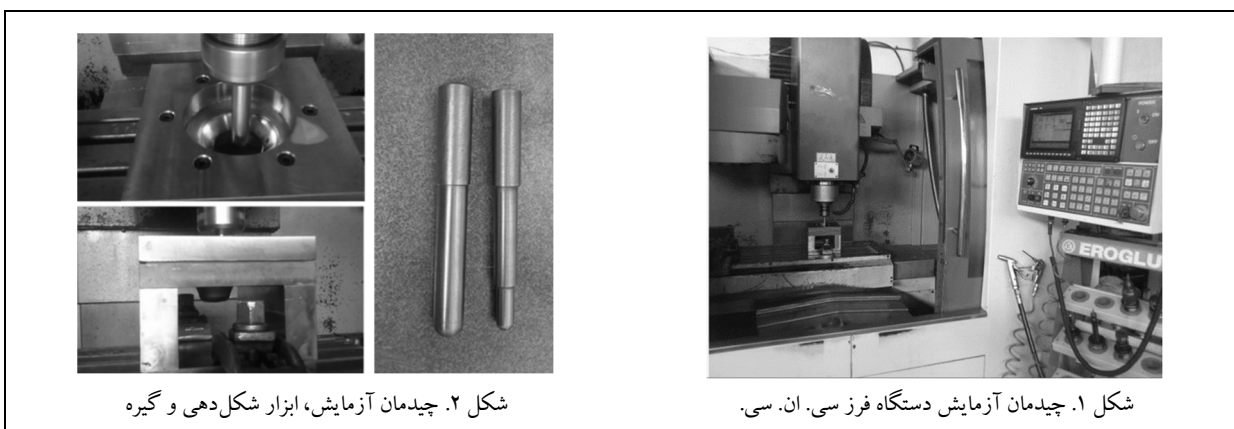
۲. چیدمان آزمایش

در این مقاله فرایند شکل‌دهی افزایشی توسط دستگاه فرز سی. ان. سی. مدل مانا سیکي ۲۰۰۹^۶ سه‌محوره با کنترلر میتسوبیسی ام ۷۰^۷ صورت گرفته است. دستگاه دارای موتور با قابلیت تولید توان ۱۵ کیلووات و سرعت اسپیندل ۸۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد و محدوده حرکت میز ماشین در جهات Z, Y, X به ترتیب ۶۰۰ × ۶۰۰ × ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. بیشتر اینکه مسیر حرکت ابزار براساس هندسه قطعه (سهموی مخروطی) توسط نرم‌افزار پاور میل^۸ استخراج شده و جی. کدها به کنترلر دستگاه فرز انتقال پیدا می‌کند. شکل ۱ نشان‌دهنده دستگاه فرز سی. ان. سی. می‌باشد.

۲-۱. مواد و ابزار

شکل بدنه استوانه‌ای و نوک نیمه‌کروی ساخته شده‌اند و همچنین قطر ابزارها ۱۰ و ۱۶ میلی‌متر می‌باشد تا ورق را به شکل مخروط سهموی در بیاورند. گیره ورق ابتدا به صورت کامپیوتری طراحی شده و در نهایت توسط ماشینکاری ساخته شده و همانند شکل ۲ روی میز دستگاه فرز بسته می‌شود. از روغن مایع^۹ برای روغنکاری و کاهش اصطکاک بین ابزار و ورق استفاده می‌شود. این روش روغنکاری مزیت دیگری دارد که در هنگام ایجاد ترک در قطعه کار با نشت روغن اوپراتور باخبر شده و دستگاه فرز سی. ان. سی. به‌منظور خواندن مختصات ابزار متوقف می‌شود.

ورق آلومینیوم به‌سبب خواص ویژه اعم از شکل‌پذیری خوب، سبکی و مقاومت به خوردگی بالا، مورد توجه صنعتگران و محققان قرار گرفته است. از اینرو در این تحقیق از ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. ورق‌ها به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر توسط وایرکات بریده شده و شش سوراخ به‌صورت دایره‌ای روی آنها اعمال می‌شود. براساس جدول طراحی تجربی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، نیاز به ۱۲ تست یا به‌عبارتی ۱۲ ورق آلومینیوم خواهد شد. بیشتر اینکه از دو نوع ابزار با ابعاد متفاوت استفاده که هر دوی آنها از فولاد اس. پی. کا. و



شکل ۲. چیدمان آزمایش، ابزار شکل‌دهی و گیره

شکل ۱. چیدمان آزمایش دستگاه فرز سی. ان. سی.

محققان و مهندسان در تحلیل صحیح تأثیر فاکتورهای ورودی بر پاسخ‌ها کمک می‌کند و همچنین تعداد آزمایشاتی که باید انجام شود را مشخص می‌کند. طراحی تجربی به‌طور قابل توجهی در هزینه‌ها و دقت نتایج آزمایشات تأثیرگذار است. در این تحقیق از روش طراحی مرکب مرکزی^{۱۱} به‌کار گرفته شده تا به بررسی تأثیر قطر ابزار (TD)، گام (SD)، سرعت چرخشی ابزار (RS) و نرخ پیشروی (FR) روی عمق شکست (FD) و زاویه شکست (FA) پرداخته شود. در نهایت طراحی به‌دست آمده به‌صورت ۱۲ عدد آزمایش در آمده که این خود هزینه انجام آزمایش را کاهش می‌دهد. هر فاکتور ورودی همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود دارای دو مرحله است.

۲-۴. انجام آزمایش و اندازه‌گیری عمق شکست و زاویه شکست

براساس جدول طراحی و مقادیر ذکر شده برای پارامترهای ورودی فرایند شکل‌دهی افزایشی بر ورق آلومینیومی صورت می‌گیرد. در

۲-۲. مشخصات قطعه

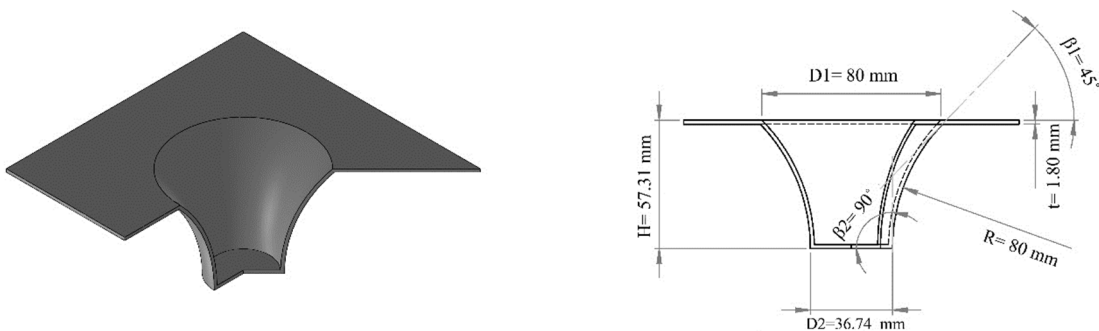
در این مقاله ورق به شکل گودال سهموی درمی‌آید. در این بخش به مشخصات شکل نهایی ورق پرداخته می‌شود. در شکل ۳ مشخصات و ابعاد نهایی قطعه نشان داده شده است. پارامترهای طراحی در این فرایند عبارت‌اند از: زاویه دیواره در نقطه ابتدایی (β_1) نقطه نهایی (β_2) عمق کشش (H)، قطر بزرگ (D_1) و قطر کوچک (D_2) که این پارامترها از مقاله حسین و همکاران [۱۷] به‌دست آمده است. در شکل ۳ نیز مدل سه‌بعدی برش‌خورده قطعه نشان داده شده که مسیر ابزار براساس سطح داخلی آن توسط نرم‌افزار پاور میل به‌دست آمده و مختصات به کنترلر دستگاه فرز انتقال داده می‌شود. در شکل ۴ و معادلات ۱ تا ۴ می‌توان مشخصات هندسی و روابط آنها را مشاهده کرد. این روابط برای رابطه بین عمق گودال و زاویه بدنه استفاده می‌شود.

۲-۳. طراحی تجربی و پارامترهای فرایند

در ابتدای بیشتر عملیات تجربی نیاز به جدول طراحی برای بهبود بخشیدن توزیع مقادیر ورودی است. تکنیک طراحی تجربی^{۱۰} به

شکست می‌توان زاویه شکست را از روابط هندسی پیدا کرد. در شکل ۴ و روابط ۱ تا ۴ رابطه هندسی بین زاویه و عمق قطعه نشان داده شده است.

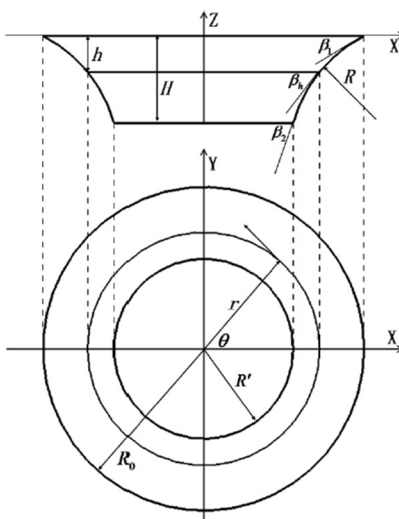
حین فرایند زمانی که ورق ترک بردارد روغن مایع از میان ترک نشت می‌کند و این سبب آگاه‌شدن اپراتور می‌شود در این حین دستگاه فرز متوقف شده و عمق شکست از مختصات نوک ابزار از روی کنترلر خوانده می‌شود. به علاوه اینکه با داشتن عمق



شکل ۳. شکل نهایی قطعه کار، هندسه، ابعاد و نمای سه‌بعدی آن

جدول ۱. جدول طراحی پارامترهای ورودی و مقادیرشان

شماره آزمایش	قطر ابزار (میلی‌متر)	گام (میلی‌متر)	سرعت چرخشی (دور بر دقیقه)	میزان پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)
۱	۱۶	۰/۲۵	۱۰۰۰	۸۰۰
۲	۱۶	۰/۷۵	۶۰۰	۸۰۰
۳	۱۰	۰/۲۵	۶۰۰	۱۲۰۰
۴	۱۶	۰/۲۵	۱۰۰۰	۱۲۰۰
۵	۱۰	۰/۲۵	۱۰۰۰	۸۰۰
۶	۱۶	۰/۷۵	۱۰۰۰	۸۰۰
۷	۱۶	۰/۷۵	۶۰۰	۱۲۰۰
۸	۱۰	۰/۲۵	۶۰۰	۸۰۰
۹	۱۰	۰/۷۵	۱۰۰۰	۱۲۰۰
۱۰	۱۶	۰/۲۵	۶۰۰	۱۲۰۰
۱۱	۱۰	۰/۷۵	۶۰۰	۱۲۰۰
۱۲	۱۰	۰/۷۵	۱۰۰۰	۸۰۰



شکل ۴. پارامترهای هندسی شکل گودال سهموی

۳. روش پاسخ سطح و بهینه‌سازی

۳-۱. برازش تابع به کمک پاسخ سطح

روش پاسخ سطح^{۱۲} کمک می‌کند تا رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک مسئله با یک آزمایش پیدا شود. در مطالعه حال حاضر از مدل ریاضی پاسخ سطح استفاده شده تا بتوان عمق شکست که خروجی اصلی این مقاله است را پیش‌بینی کرد. شکل کلی معادله برازش پاسخ سطح را می‌توان به صورت رابطه ۵ نوشت [۱۸-۱۹].

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (5)$$

در اینجا y می‌تواند پاسخ FD یا FA باشد. چون رابطه هندسی میان این دو پاسخ وجود دارد در نتیجه با تخمین یکی از آنها دیگری به دست می‌آید. در این مقاله، چون ابتدا FD را می‌توان اندازه‌گیری کرد، لذا آن را با مدل فوق تخمین زده و زاویه شکست را از طریق رابطه هندسی ۴ درمی‌یابیم. در معادله ۵ X ها ورودی‌ها با اندیس‌ها مشخص‌کننده شماره پارامتر (در اینجا ۱ تا ۴ پارامتر) و b ضرایب تخمین می‌باشد که از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$b = (x^T x)^{-1} x^T y \quad (6)$$

در معادله ۶ T نشان‌دهنده ترنسپوز ماتریس x است. به منظور سهولت، کار محاسبات توسط نرم‌افزار مینی‌تب^{۱۳} صورت گرفته و قسمت درجه دو معادله ۵ برای سادگی معادله تخمین در نظر گرفته نشده است. در نهایت پس از انجام مدلسازی توسط نرم‌افزار مذکور معادله عمق شکست (FD) به صورت معادله ۷ درمی‌آید و همچنین زاویه شکست را می‌توان از معادله بازنویسی شده ۸ به دست آورد.

$$FD = 67.0 - 0.0185 FR - 0.0064 RS + 6.5 SD - 1.27 TD - 0.000004 FR.RS + 0.00998 FR.SD + 0.001036 FR.TD + 0.00190 RS.SD + 0.000567 RS.TD - 0.867 SD.TD \quad (7)$$

$$FA = \cos^{-1} \left(\frac{R \sin \beta_1 - FD}{R} \right) \quad (8)$$

برای ارزیابی دقت معادله ۷ نمودار پسماند با مقادیر پاسخ، شکل ۶ ترسیم شده که نشان‌دهنده فاصله کم نقاط با خط مرکزی است که این خود نشان‌دهنده دقت معادله مذکور است. پسماند یا خطا معمولاً به اختلاف مقادیر مشاهده شده و مقادیر تخمین زده شده اطلاق می‌شود. با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که

$$H = R(\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad (1)$$

$$R' = R_0 + R(\sin \beta_1 - \sin \beta_2) \quad (2)$$

$$r = R_0 + R \sin \beta_1 + \sqrt{R^2 - (R \cos \beta_1 - h)^2} \quad (3)$$

$$\beta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{R \sin \beta_1 - h}{R} \right) \quad (4)$$

۲-۵. نتایج آزمایش

در نهایت پس از انجام فرایند شکل‌دهی افزایشی با مشخصات ذکر شده عمق شکست اندازه‌گیری شد و در کنار آن با استفاده از روابط مثلثاتی زاویه شکست پیدا می‌شود. جدول ۲ مقادیر به دست آمده برای عمق و زاویه شکست در هر آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین نمونه‌های تغییر شکل یافته در ۱۲ حالت مختلف در شکل ۵ قابل مشاهده است.

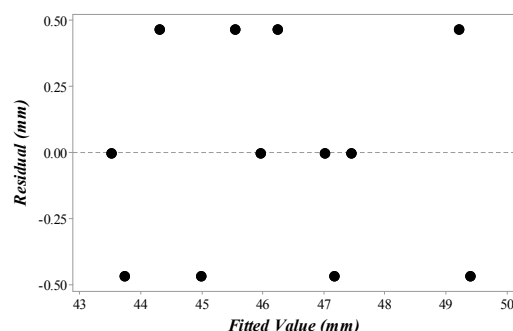
جدول ۲. طراحی پارامترهای ورودی و مقادیرشان

شماره آزمایش	عمق شکست (میلی‌متر)	زاویه شکست (میلی‌متر)
۱	۴۴/۵۲۱	۸۱/۳۳۸
۲	۴۵/۹۶۹	۸۲/۳۸۶
۳	۴۳/۳۷۵	۸۰/۴۳۴
۴	۴۳/۵۲۴	۸۰/۶۱۵
۵	۴۶/۰۱۷	۸۲/۴۲۰
۶	۴۶/۷۱۲	۸۲/۹۲۲
۷	۴۶/۷۱۲	۸۲/۹۲۲
۸	۴۷/۰۱۴	۸۳/۱۴۰
۹	۴۴/۴۵۵	۸۳/۴۵۸
۱۰	۴۴/۷۷۲	۸۱/۵۲۰
۱۱	۴۹/۶۸۴	۸۵/۰۶۳
۱۲	۴۸/۹۴۱	۸۴/۵۲۸



شکل ۵. نشن روغن در هنگام شکست و نمونه‌های تغییر شکل یافته در ۱۲ حالت مختلف

بیشینه پسماند یا خطا $0/5$ میلی‌متر و همین‌طور اطمینان درونی^{۱۴} برای معادله $95/95$ درصد می‌باشد که اینها نشان‌دهنده دقت خوب معادلات ۷ و ۸ می‌باشد.



شکل ۶. نمودار مقادیر پسماند و فیت عمق شکست

۲-۳. نقطه بهینه

بهینه‌سازی تک‌هدفه براساس شایستگی هدف به‌منظور جستجوی نقطه بهینه صورت گرفت. این بهینه‌سازی به‌گونه‌ای صورت گرفت که عمق شکست بیشترین مقدار ممکن را در فرایند شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه پیدا کند. نوار ابزار بهینه‌سازی در

نرم‌افزار مینی‌تب این امکان را به محققان می‌دهد تا نقاط بهینه فرایندهای تجربی را دریابند. نکات زیر را می‌توان در مورد بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار می‌توان دریافت [۲۰]:

۱. یافتن شایستگی ویژه برای هر پاسخ به‌صورت جداگانه
۲. ترکیب آنها به‌منظور ارزیابی شایستگی ترکیبی
۳. جستجو برای بیشترین شایستگی ترکیبی و ورودی مربوطه

جدول ۳ نشان‌دهنده پارامترهای ورودی و خروجی و محدوده‌های‌شان است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، هدف بهینه‌سازی بیشینه‌کردن عمق شکست و همین‌طور زاویه شکست است. در نهایت، نقطه بهینه برای این فرایند با ویژگی‌های مذکور به‌صورت جدول ۴ درمی‌آید. با توجه به جدول می‌توان دریافت که با مقادیر ورودی ذکرشده می‌توان به عمق شکست $50/49$ میلی‌متر و زاویه شکست $85/64$ درجه رسید که این به مهندسان و سازندگان کمک می‌کند تا به بالاترین حد شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی دست یابند.

جدول ۳. محدوده‌های تعریف‌شده

اسم	هدف	حد پایین	حد بالا
قطر ابزار (میلی‌متر)	-	۱۰	۱۶
گام (میلی‌متر)	-	$0/25$	$0/75$
سرعت چرخشی (دور بر دقیقه)	-	۶۰۰	۱۰۰۰
میزان پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	-	۸۰۰	۱۲۰۰
عمق شکست (میلی‌متر) و زاویه شکست (درجه)	بیشینه	-	-

جدول ۴. نقطه بهینه و مقادیر توابع هدف

قطر ابزار میلی‌متر	گام میلی‌متر	سرعت چرخشی دور بر دقیقه	میزان پیشروی میلی‌متر بر دقیقه	عمق شکست میلی‌متر	زاویه شکست درجه
۱۰	$0/75$	۶۰۰	۸۰۰	$50/49$	$85/64$

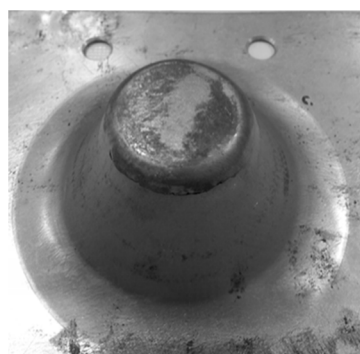
صحت بهینه‌سازی را می‌رساند شکل ۷ نشان‌دهنده نمونه پس از انجام تست اعتبارسنجی می‌باشد.

۴. بحث و بررسی

در قسمت‌های قبل به معرفی مدلی برای پیش‌بینی عمق شکست و زاویه شکست در فرایند شکل‌دهی افزایشی پرداخته شد و یک بهینه‌سازی برای یافتن بیشترین عمق شکست و یا زاویه شکست ممکن صورت گرفت. در این بخش به تحلیل و بررسی فرایند

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، چون عمق و زاویه شکست با هم به‌صورت هندسی رابطه مستقیم دارند و هر دو باید بیشترین مقدار خود را دارا باشند؛ بنابراین بهینه‌سازی تک‌هدفه تنها برای عمق شکست انجام شده و در نهایت زاویه شکست بهینه از طریق جایگذاری عمق شکست بهینه در رابطه ۸ به‌دست آمده است. به‌منظور اعتبارسنجی بهینه‌سازی یک آزمایش براساس پارامترهای ورودی بهینه انجام گرفت. در این آزمایش به عمق شکست $50/12$ و زاویه شکست $85/37$ دست یافته شد که این خود

به منظور درک بیشتری از آن پرداخته می‌شود. تأثیر پارامترهای ورودی بر پاسخ مسئله چه به صورت دو به دویی و چه به صورت اختصاصی را می‌توان از طریق تحلیل آنووا^{۱۵} در نرم افزار مینی تب مورد بررسی قرار داد. شکل ۸ نشان دهنده تأثیر دو به دویی توسط نمودار کانتور^{۱۶} بر عمق شکست می‌باشد و به علاوه اینکه هر تأثیری که پارامترهای ورودی بر عمق شکست دارند دقیقاً همان تأثیر را بر زاویه شکست دارند. با توجه به شکل (قسمت‌های ۱، ۳ و ۵) می‌توان دریافت که به ترتیب سرعت چرخشی - میزان پیشروی، قطر ابزار - میزان پیشروی و قطر ابزار - سرعت چرخشی همه زمانی که پایین ترین مقدار خود را دارا هستند، بیشترین مقدار ممکن را برای عمق و زاویه شکست را نتیجه می‌دهند. برای قسمت ۲، ۴ و ۶ می‌توان نوشت کمترین مقادیر میزان پیشروی، سرعت چرخشی و قطر ابزار در مقابل با بیشتری مقادیر گام ابزار بیشترین مقادیر پاسخ‌ها را نتیجه می‌دهد.



شکل ۷. نمونه تغییر شکل یافته برای اعتبارسنجی نتایج بهینه سازی

حال برای بررسی تأثیر فاکتورهای ورودی به صورت اختصاصی بر عمق شکست را می‌توان با کمک شکل ۹ نشان داد. از این شکل دریافت می‌شد که با افزایش میزان فاکتورهای پیشروی و قطر ابزار میزان عمق شکست کاهش پیدا می‌کند و با افزایش گام ابزار به سمت پایین عمق شکست افزایش می‌یابد. بیشتر اینکه سرعت چرخشی تأثیر چندانی روی عمق شکست ندارد. گفتنی است همان طور که پیشتر گفته شد دقیقاً همین استدلال را برای تأثیر اختصاصی فاکتورها را برای زاویه شکست می‌توان داشت.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، آزمایشی تجربی به منظور بررسی حد شکل پذیری (عمق و زاویه شکست) بر ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ در فرایند

شکل دهی افزایش تک نقطه صورت گرفت. این آزمایش در ۱۲ مرحله با مقادیر مختلف فاکتورهای ورودی (میزان پیشروی، سرعت چرخشی ابزار، گام ابزار و قطر ابزار) صورت گرفت. در نتیجه برای یافتن بیشترین مقدار ممکن برای پاسخ‌ها (عمق و زاویه شکست) بهینه سازی با روش پاسخ سطح صورت گرفت و در نهایت برای بررسی تأثیر ورودی‌ها بر ورودی‌ها از روش آنوا استفاده شد. با تکیه بر دلایل و نتایج ذکر شده می‌توان استنتاج‌های زیر را برداشت کرد:

مدل ریاضی با عنوان برازش به روش پاسخ سطح به منظور پیداکردن رابطه بین فاکتورهای ورودی شکل دهی و پاسخ‌ها با اطمینان درونی تقریباً ۹۶ درصد ارائه شد.

در یک بهینه سازی تک هدفه، مقدار بهینه برای هر دو پاسخ، عمق و زاویه شکست برابر با قطر ابزار ۱۰ میلی متر، گام ابزار ۰/۷۵ سرعت چرخشی ابزار ۶۰۰ دور بر دقیقه و میزان پیشروی ۸۰۰ میلی متر بر دقیقه بوده که عمق ۵۰/۴۹ میلی متر و زاویه ۸۵/۶۴ درجه در زمان شکست را نتیجه داده‌اند.

تأثیر دو به دویی فاکتورهای ورودی بر عمق شکست توسط نمودار کانتور نشان داده شد و مقادیری که آنها می‌توانند با هدف افزایش عمق شکست در بر بگیرند، بیان شد.

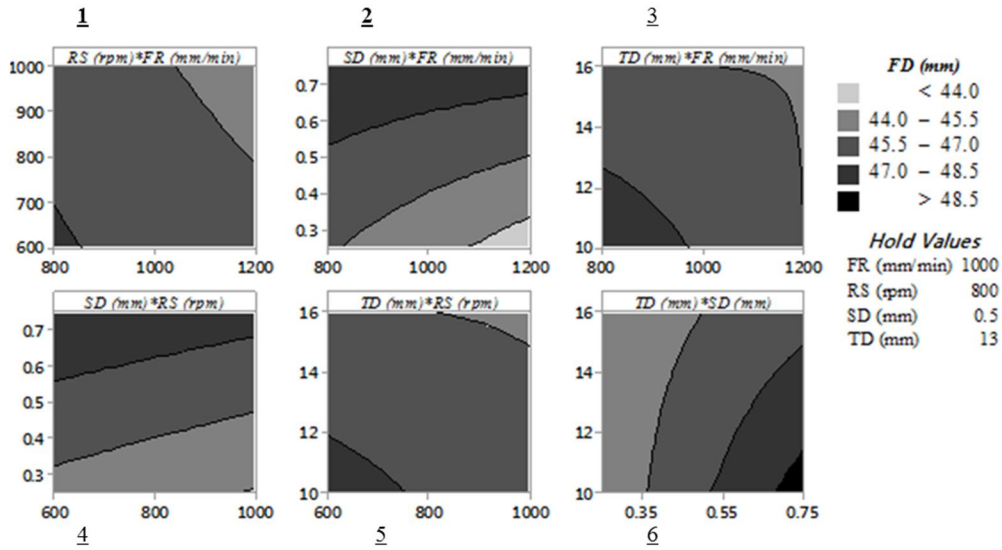
تأثیر اختصاصی هر فاکتور به صورت جداگانه نیز نشان داده شد و این استنتاج شد که سرعت چرخشی تأثیر چندانی بر پاسخ ندارد و همین طور بیان شد که افزایش میزان فاکتورهای پیشروی و قطر ابزار میزان عمق شکست کاهش و با افزایش گام حرکتی ابزار آن افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

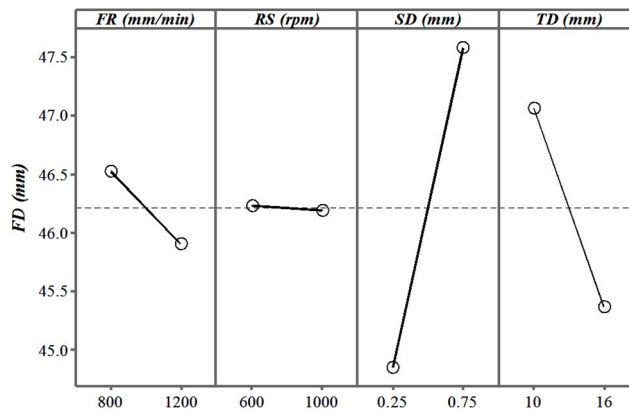
D_1	قطر بزرگ (mm)
D_2	قطر کوچک (mm)
FA	زاویه شکست (°)
FD	عمق شکست (mm)
FR	نرخ پیشروی (mm/min)
H	عمق نهایی گودال (mm)
R	شعاع دیوار سهموی
RS	سرعت چرخشی ابزار (rpm)
SD	گام (mm)
t	ضخامت ورق (mm)
TD	قطر ابزار (mm)

زاویه دیواره در نقطه ابتدایی ($^{\circ}$) β_1

زاویه دیواره در نقطه انتهایی ($^{\circ}$) β_2



شکل ۸. نمودار کانتور تأثیر فاکتورهای ورود به صورت دو به دویی، بر عمق شکست



شکل ۹. نمودار تأثیر اختصاصی فاکتورهای ورودی بر عمق شکست

۶. مآخذ

- [1] A. Vafaeseifat, A. Ebrahim, The Influence of Tool Path in Incremental Forming of Double-Layers Sheet, *Aerospace Mechanics*, Vol. 11, No. 3, pp. 47-58, 2014. (in Persian فارسی).
- [2] A. H. Nikdooz, M. J. Mirnia, H. Baseri, Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 210-220, 2016. (in Persian فارسی).
- [3] A. B. Shooli, S. Amini Nahjafabadi, M. Farzin, Experimental Formability Investigation of Titanium Alloy in Hot Incremental Sheet Forming Process, *Modares Mechanical Engineering Structures*, Vol. 15, No. 6, pp. 107-114, 2015. (in Persian فارسی).
- [4] M. Sedighi, M. Riahi, A. Asgari, Investigation of tool parameters effects on the formability of Al-1100 in incremental sheet metal hammering process, *Modares Mechanical Engineering Structures*, Vol. 14, No. 14, pp. 185-189, 2014. (in Persian فارسی).
- [5] M. Durante, A. Formisano, A. Langella, F. M. Capece Minutolo, The influence of tool rotation on an incremental forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4621-4626, 2009.

- [6] S. Dejardin, S. Thibaud, J. C. Gelin, G. Michel, Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 2, pp. 363-369, 2010.
- [7] K. Hamilton, J. Jeswiet, Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 311-314, 2010.
- [8] J. Li, J. Hu, J. Pan, P. Geng, Thickness distribution and design of a multi-stage process for sheet metal incremental forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 9-12, pp. 981-988, 2012.
- [9] M. Azaouzi, N. Lebaal, Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 24, pp. 49-58, 2012.
- [10] Z. Cui, Z. Cedric Xia, F. Ren, V. Kiridena, L. Gao, Modeling and validation of deformation process for incremental sheet forming, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 2, pp. 236-241, 2013.
- [11] Y. Fang, B. Lu, J. Chen, D. K. Xu, H. Ou, Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 8, pp. 1503-1515, 2014.
- [12] S. P. Shanmuganatan, V. S. Senthil Kumar, Modeling of incremental forming process parameters of Al 3003 (O) by response surface methodology, *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 346-356, 2014.
- [13] L. Ben Ayed, C. Robert, A. Delamézière, M. Nouari, J. L. Batoz, Simplified numerical approach for incremental sheet metal forming process, *Engineering Structures*, Vol. 62-63, pp. 75-86, 2014.
- [14] M. A. Davarpanah, A. Mirkouei, X. Yu, R. Malhotra, S. Pilla, Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 222, pp. 287-300, 2015.
- [15] M. Honarpisheh, M. J. Abdolhoseini, S. Amini, Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti-6Al-4V sheet using electrical current, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 9-12, pp. 2027-2037, 2015.
- [16] A. Pak, H. Deilami Azodi, M. Mahmoudi, Investigation of Ultrasonic assisted incremental sheet metal forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 106-114, 2014. (in Persian فارسی).
- [17] G. Hussain, L. Gao, A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 3-4, pp. 419-435, 2007.
- [18] W. G. Cochran, G. M. Cox, *Experimental designs*, Wiley, 1992.
- [19] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, 2008.
- [20] I. Minitab, Meet M INITAB Release 14, 2003.

پی نوشت

-
- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1. CNC | 9. Sae-40 |
| 2. Sedighi | 10. DOE |
| 3. Durante | 11. CCD |
| 4. Davarpanah | 12. Rsm |
| 5. Parabolic hollow | 13. Minitab 17 |
| 6. Mana seiki 2009 | 14. Confidence of intervals |
| 7. Mitsubishi-m70 | 15. Anova |
| 8. Power mill | 16. Contour |