

بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی مقاطع U شکل با روش ترکیبی رویه پاسخ و تابع مطلوبیت

وحید مدانلو^۱، ولی‌علی میرزالو^{۲*}، محمدرضا ابراهیمی خسروشاهی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۳۰	در فرآیند شکل‌دهی غلتکی، کنترل پارامترهای ورودی برای حفظ کیفیت پروفیل نهایی ضروری است. در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی، از یک روش ترکیبی مبتنی بر شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است. نخست، فرآیند با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی شده و صحت مدل ایجادشده در مقایسه با نتایج تجربی تأیید شده است. سپس با روش طراحی مرکب مرکزی، آزمایش‌های لازم طراحی شده است. در این طراحی، قطر غلتک، فاصله ایستگاه، تعداد ایستگاه و سرعت خطی ورق به‌عنوان متغیرهای ورودی و حداکثر کرنش طولی پلاستیکی و دقت زاویه‌ای (بیانگر عکس برگشت فنری)، به‌عنوان توابع پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه با استفاده از روش رویه پاسخ و اجزای محدود، فرآیند مدل‌سازی شده، سپس مدل رویه پاسخ برای هر یک از توابع پاسخ به دست آمده است. در پایان با انجام بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش تابع مطلوبیت بر اساس مدل رویه پاسخ، نقطه بهینه پارامترهای ورودی به دست آمده و سپس نقطه بهینه موردارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد روش رویه پاسخ با دقتی مناسب تأثیر پارامترهای ورودی بر توابع پاسخ را مدل‌سازی می‌کند. طبق این مدل افزایش فاصله ایستگاه‌ها، افزایش قطر غلتک‌ها باعث کاهش کرنش طولی پلاستیکی بیشینه و افزایش سرعت خطی ورق باعث افزایش حداکثر کرنش طولی پلاستیکی می‌شود. کاهش فاصله و افزایش تعداد ایستگاه‌ها و افزایش قطر غلتک‌ها منجر به افزایش دقت زاویه‌ای و افزایش سرعت خطی ورق باعث کاهش دقت زاویه‌ای می‌شود. همچنین نتایج بهینه‌سازی بیانگر افزایش دقت زاویه‌ای و کاهش حداکثر کرنش طولی پلاستیکی است.

واژگان کلیدی:
شکل‌دهی غلتکی،
بهینه‌سازی،
روش رویه پاسخ،
اجزای محدود،
تابع مطلوبیت.

۱- مقدمه

مواد کمتر و صرف زمان پایین‌تر، به محصولاتی با همان استحکام دست یافت. همچنین باید گفت هزینه اولیه ماشین شکل‌دهی غلتکی حداقل در حال حاضر بالاتر از هزینه برای ماشین‌آلات کشش و پرس است. در این فرآیند، برخلاف بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، شکل‌دهی غلتکی به‌صورت شدید و ناگهانی نیست؛ زیرا تغییر شکل شدید می‌تواند سبب آسیب‌رساندن به غلتک‌ها و حتی بروز برخی عیوب هندسی در محصول نهایی شود. به همین دلیل، کنترل آهنگ تغییر شکل در موفقیت‌آمیز بودن فرآیند بسیار مهم است. شکل (۱) یک

در فرآیند شکل‌دهی غلتکی، نوار ورق با عبور از بین تعدادی جفت غلتک و در طی چند ایستگاه (دروازه)، به پروفیل با مقطع دل‌خواه شکل داده می‌شود. این فرآیند با توجه به سرعت بالای شکل‌دهی، در مقایسه با روش‌های کشش و پرس، یکی از کارآمدترین روش‌ها است. مزیت دیگر آن، قابلیت استفاده از ورق در طول‌های گوناگون و به‌دست‌آوردن محصولات مختلف بدون نیاز به ایجاد تغییر اساسی در ماشین است. استفاده از این روش برای تولید محصولات مختلف در صنعت، باعث می‌شود با استفاده از

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه

۳. کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه

نمونه فرآیند تولید پروفیل با استفاده از فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد را نشان می‌دهد [۱]. در بسیاری از فرآیندهای تولید محصولات فلزی، پیش‌بینی پارامترها و شرایط بهینه تولید، امری حیاتی است. روش‌های سنتی طراحی در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات معمولاً بر پایه آزمون و خطا یا دیدگاه‌های تجربی هستند. این امر علاوه بر صرف وقت زیاد، منجر به دوباره‌کاری و افزایش هزینه می‌شود. با ترکیب شیوه‌های بهینه‌سازی با شیوه‌های طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی اجزای محدود، روش‌های کارآمدی برای رسیدن به قطعه نهایی با خواص موردانتظار به دست می‌آید.

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه فرآیند شکل‌دهی غلتکی انجام شده است. این تحقیقات را می‌توان به سه دسته تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم کرد. تحقیقات اولیه در این زمینه به دهه ۱۹۸۰ برمی‌گردد. چیانگ [۲] تأثیر طول فلنج و عرض کف برای پروفیل‌های U شکل و V شکل را بر روی متوسط اوج کرنش طولی در فلنج موردبررسی قرار داد. او به این نتیجه رسید که متوسط اوج کرنش طولی با افزایش طول فلنج عمدتاً به صورت خطی افزایش می‌یابد، اما افزایش عرض کف، تأثیر قابل توجهی بر روی متوسط اوج کرنش طولی ندارد. ژو و همکارانش [۳] تأثیر طول فلنج، ضخامت مواد و کف افزایش زاویه را بر روی کرنش طولی پوسته‌ای در لبه فلنج مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش طول فلنج، ضخامت مواد و کف افزایش زاویه، کرنش طولی افزایش می‌یابد. روسی و همکارانش [۴] به شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی برای فولادهای استحکام بالا و زنگ‌نزن با الگوی رفتار مواد به صورت کرنش سخت پرداختند و با استفاده از پارامتر نسبت شعاع گوشه به ضخامت، معیاری برای استحکام محصول تعریف کردند. آن‌ها توانستند برای نسبت‌های مختلف ۰٫۲٪ استحکام پروفیل را افزایش دهند. مون و همکارانش [۵] یک روش پیش‌بینی پایه مکانیکی را برای تنش اولیه باقی‌مانده از کوئل و کرنش پلاستیکی مؤثر در شکل‌دهی غلتکی فولادها پیشنهاد دادند. آن‌ها به منظور اعتبارسنجی تنش باقی‌مانده از نتایج آزمایش عملی با هجده غلتک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد شکل‌دهی غلتکی سرد، هر دو توزیع تنش باقی‌مانده طولی و عرضی را دارد و شکل توزیع آن‌ها در طول ضخامت غیرخطی است. هانگ و همکارانش [۶] طول خط تغییرشکل ورق در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد را با استفاده از بعضی پارامترها مانند مشخصات مواد،

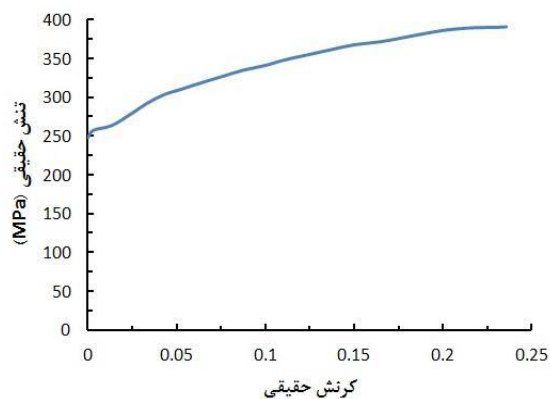
ضخامت مواد، قطر غلتک‌ها، سرعت غلتک‌ها و تغییرشکل مواد که طول شکل‌دهی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، پیش‌بینی کردند. این نتیجه به دست آمد که توان کار سختی مواد تأثیر عمده‌ای بر طول شکل‌دهی دارد. کار سختی بالا بر روی ورق، طول شکل‌دهی را کوتاه کرده، همچنین گرم کردن ورق آن را بلند می‌کند. لیندگرن [۷] تغییر اوج کرنش طولی پوسته‌ای را در لبه فلنج و طول تغییرشکل را با افزایش استحکام تسلیم در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد بررسی کرد. نتایج او نشان می‌دهد که با افزایش استحکام تسلیم، اوج کرنش طولی پوسته‌ای کاهش و طول تغییرشکل افزایش می‌یابد. پناهی‌زاده و همکارانش [۸] به بررسی عددی و تجربی اثر مدل‌های سخت‌شوندگی بر برگشت فنی در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع U شکل متقارن پرداختند. آن‌ها پارامترهایی نظیر تغییرات زاویه شکل‌دهی، جنس ورق، هندسه غلتک و ضخامت ورق را مورد بررسی قرار دادند. این محققان به این نتیجه رسیدند که مدل سخت‌شوندگی همسان‌گرد در مقایسه با مدل سینماتیک برای پیش‌بینی پدیده برگشت فنی دقیق‌تر است. محمدی و همکاران [۹] به مطالعه تولید پروفیل‌های با سطح متغیر با استفاده از روش جدید شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، چگونگی ایجاد تابیدگی کف را بررسی کردند. و به این نتیجه رسیدند که علت تابیدگی کف پروفیل، اعمال نشدن مقدار کافی کرنش طولی پلاستیکی در لبه بال پروفیل در ناحیه انتقال است. با وجود تحقیقات مختلف در زمینه شبیه‌سازی فرآیند نورد غلتکی سرد، در زمینه بهینه‌سازی این فرآیند، به‌ویژه بهینه‌سازی چندهدفه، مطالعات خیلی کمی گزارش شده است. روش رویه پاسخ، از جمله روش‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی بر اساس طراحی آزمایش‌ها و تکنیک‌های ریاضی و آماری است که تاکنون برای فرآیندهای مختلف استفاده شده است [۱۰ و ۱۱].

در مطالعه حاضر با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها، نتایج به دست آمده از تغییر چهار پارامتر قطر غلتک‌ها، سرعت خطی ورق، فاصله و تعداد ایستگاه‌ها بر روی حداکثر کرنش طولی پلاستیکی و دقت زاویه‌ای با شبیه‌سازی اجزای محدود محاسبه شده، سپس با استفاده از روش رویه پاسخ مدل‌سازی و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در پایان با انجام بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش تابع مطلوبیت

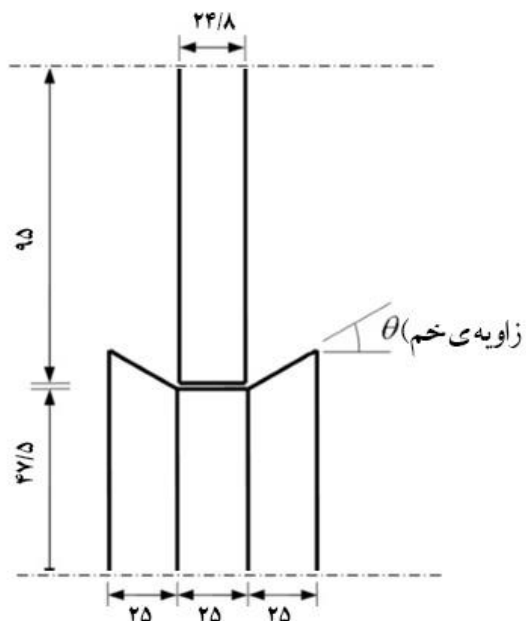
محصول تولیدی است. به علاوه طول بال باید به اندازه‌ای باشد که ورق از غلتک خارج نشود.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی ورق فولادی

مقدار	مشخصه
۲۴۸	تنش تسلیم (MPa)
۷۸۳۳	چگالی (Kg/m^3)
۱۷۰	مدول یانگ (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون



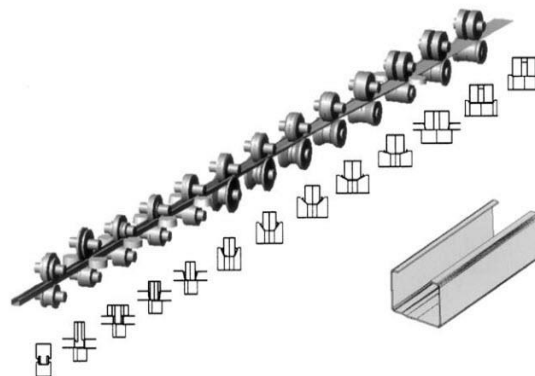
شکل ۳: کردار تنش کرنش حقیقی



شکل ۴: شماتیک کلی غلتک‌ها و زاویه خم در هر مرحله (ابعاد به میلی‌متر)

برای تحلیل فرآیند از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شد. از آنجا که قطعه به صورت متقارن است، برای کاهش زمان تحلیل، نیمی از ورق شبیه‌سازی شده است. غلتک‌ها به صورت صلب تحلیلی و نوار ورق به صورت یک رویه مسطح مستطیلی شکل‌پذیر مدل شده است.

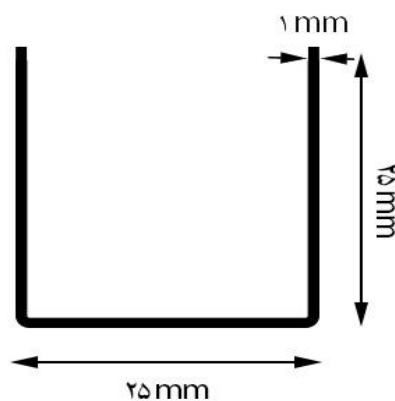
براساس مدل رویه پاسخ، پارامترهای فرآیند بهینه‌سازی می‌شود.



شکل ۱: نمایش تولید پروفیل در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد [۱]

۲- شبیه‌سازی فرآیند

ابعاد محصول تولیدی در شکل (۲) نشان داده شده است. ورق استفاده‌شده در این فرآیند از جنس فولاد St37 گالوانیزه با ضخامت یک میلی‌متر است که مشخصات رفتار مکانیکی آن با استفاده از تست کشش به دست آمد. خواص مکانیکی و کردار تنش کرنش حقیقی آن به ترتیب در جدول ۱ و شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به کردار تغییرات تنش کرنش، رفتار مکانیکی ماده به صورت الاستو پلاستیک در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: ابعاد محصول تولیدی

برای طراحی فرآیند، قطر غلتک‌ها با توجه به شکل محصول تولیدی، طراحی شده است. در این فرآیند، مطابق شکل (۴) قطر غلتک بالایی دو برابر غلتک پایینی است. در هر مرحله غلتک پایینی شکل‌دهنده اصلی ورق بوده که به اندازه شکل قطعه خروجی است. عرض ناحیه کف ورق به اندازه کف

اصلی روش طراحی آزمایش‌ها، انتخاب بهترین حالت‌های ممکن آزمایش است که با استفاده از آن بتوان فرآیند را ضمن موجه‌بودن تعداد آزمایش‌ها، به مطلوب‌ترین شکل ممکن بررسی کرد [۱۴]. معمولاً از مدل مرتبه دوم در مدل‌سازی به روش طراحی آزمایش‌ها استفاده می‌شود. طرح‌های بسیاری وجود دارند که می‌توان از آن‌ها برای برآوردن مدل مرتبه دوم استفاده کرد. یکی از این طرح‌ها، طرح مرکب مرکزی است که طراحی آزمایش در این تحقیق با استفاده از این روش و نرم‌افزار مینی‌تب انجام گرفته است. هرکدام از متغیرها، در دو سطح حداقل و حداکثر به‌عنوان عوامل ورودی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده‌اند. محدوده مقدار متغیرهای ورودی بر اساس امکانات موجود و محدودیت‌های عملی تعیین شده است. با اجرای روش طرح مرکب مرکزی، طرح آزمایش‌ها با ۳۱ آزمایش به‌صورت جدول ۳ می‌شود. مطابق شرایط هر آزمایش، فرآیند با روش اجزای محدود تحلیل و مقادیر خروجی استخراج شد. مسافت طی‌شده در لبه ورق نسبت به کف ورق بیشتر است. این مقدار بسته به طول فلنج فرق خواهد داشت و هرچه فلنج طویل‌تر باشد، میزان افزایش طول نیز افزایش خواهد داشت. از طرفی این درازشدگی وقتی وارد ناحیه پلاستیک شود، می‌تواند بر روی کیفیت محصول تولیدی تأثیر بگذارد. این درازشدگی در نزدیکی ورود ورق به داخل دروازه‌ها افزایش می‌یابد و هرچه کمتر باشد، محصول تولیدی با کیفیت‌تر خواهد بود. یکی از عواملی که باید موردبررسی قرار گیرد کرنش پلاستیکی در لبه فلنج است که در اینجا حداکثر کرنش طولی پلاستیکی به‌عنوان یکی از توابع هدف بررسی می‌شود. برای به‌دست‌آوردن حداکثر کرنش طولی پلاستیکی در هر آزمایش، ابتدا کردار کرنش طولی پلاستیکی برحسب مسافت طی‌شده استخراج شده، سپس مقدار بیشینه آن از بین کرنش‌های هر ایستگاه مشخص می‌شود. در شکل (۷) کردار کرنش طولی پلاستیکی برحسب مسافت طی‌شده برای آزمایش هشتم نشان داده شده است. با توجه به هندسه قطعه‌کار، زاویه نود درجه در محصول نهایی موردنظر است. در حالی که محصول پس از خروج و طی مسافتی مطابق با شکل (۸) به‌دلیل پدیده برگشت فنری، دارای زاویه θ کمتر از نود درجه خواهد شد. در این مقاله برای کمینه‌کردن برگشت فنری، تابع هدف دقت زاویه‌ای به‌صورت تقسیم زاویه نهایی محصول (θ) بر زاویه نود درجه و ضرب در صد، در نظر

تحلیل با استفاده از حلگر صریح دینامیکی انجام شده و برای تعریف تماس بین غلتک‌ها با ورق از الگوریتم زوج تماسی استفاده شده است. برای اعمال قیدهای تماسی روش سینماتیکی و نیز فرمول‌بندی لغزشی محدود انتخاب شده است. در شبیه‌سازی این فرآیند دو رفتار در جهت مماسی در نظر گرفته شده است. برای نحوه کنش سطوح بر هم در جهت عمودی تماس سخت و برای جهت مماسی ورق با غلتک‌های ایستگاه صفر، رفتار بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. غلتک‌های ایستگاه صفر کاملاً در جای خود ثابت هستند و فقط وظیفه نگهداری ورق را برعهده دارند. اما برای غلتک‌های ایستگاه اول به بعد، رفتار اصطکاکی با مدل کولمب و ضریب اصطکاک ثابت ۰/۲ در نظر گرفته شده است. از آنجا که غلتک‌ها به‌صورت صلب تحلیلی مدل شده‌اند نیاز به شبکه‌بندی ندارند. همچنین برای شبکه‌بندی نوار ورق از المان پوسته‌ای چهارگره‌ای استفاده شده و اندازه هر المان نیز ۲ میلی‌متر در جهت طولی و ۱ میلی‌متر در جهت عرضی انتخاب شده است. شکل (۵) یک نمونه از مدل شبیه‌سازی‌شده برای نورد هفت دروازه‌ای را نشان می‌دهد. به‌منظور تأیید نتایج شبیه‌سازی به‌دلیل هزینه بالای آزمایش تجربی از نتایج موجود استفاده شده است. بدین منظور از آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۱۲] استفاده شد که نتایج تجربی آن در دسترس است. آن‌ها در کارهای تجربی خود با انجام آزمایش‌هایی به مطالعه بر روی شکل‌دهی مقطع کانال متقارن و بررسی اثر افزایش زاویه پروفیل در ایستگاه اول بر روی کرنش طولی ناحیه بال و کف پرداختند. با تحلیل اجزای محدود فرآیند، کرنش طولی در طی فرآیند با دو زاویه ۲۰ و ۵۰ درجه، در فاصله ۱/۵ میلی‌متری از لبه بال با نتایج تجربی آزمایش باتاچاریا و اسمیت و همچنین با نتایج مرجع [۱۳] مطابق شکل (۶) مقایسه شد. مشاهده می‌شود مطابقت قابل‌قبولی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج مراجع وجود دارد.

۳- طراحی و اجرای آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های کامل به‌منظور دستیابی به کنترل مناسب فرآیند، باید تعداد زیادی آزمایش را انجام داد. اگر برای کاهش تعداد آزمایش‌ها فقط چند سطح از هر متغیر ورودی بررسی شود، تعداد آزمایش‌ها با افزایش تعداد متغیرها به‌طور نمایی افزایش خواهد یافت که اجرای این تعداد آزمایش نیز موجه نیست. از این رو یکی از اهداف

آماري رویه پاسخ استفاده شده است. این روش شامل تکنیک‌های ریاضی و استنتاج آماری است و برای تحلیل مسائلی به کار می‌رود که خروجی سیستم از تعداد زیادی از متغیرها تأثیر می‌پذیرد و هدف، بهینه‌سازی پاسخ‌های به دست آمده است [۱۴]. با به کارگیری روش‌های آماری از طرفی می‌توان تأثیرات یک یا چند پارامتر را بر روی یک پدیده بررسی کرد و از طرف دیگر، با استفاده از تحلیل‌های ویژه آماری به یک رابطه برای بیان کمی تأثیر هر پارامتر بر روی پدیده مزبور دست یافت و در نهایت مقدار بهینه پارامترهای ورودی را به دست آورد. روش رویه پاسخ دارای سه مرحله است. مرحله اول شامل کارهای اولیه است که برای تعیین پارامترهای اولیه مستقل، سطوح آن‌ها و انتخاب طرح آزمایش مناسب است؛ مرحله دوم به منظور اجرای آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها است؛ مرحله سوم تحلیل داده‌ها و استخراج رابطه مدل پیش‌بینی (رویه پاسخ) و ارزیابی آن است. اگر برای جمع‌آوری داده‌ها از طرح‌های آزمایش مناسب استفاده شود، می‌توان پارامترهای مدل را به صورت مطلوب‌تری برآورد کرد. رابطه مدل می‌تواند از مرتبه اول تا مراتب بالاتر باشد [۱۵]. در حالت کلی رابطه بین تابع پاسخ و متغیرهای مستقل به صورت رابطه (۱) است.

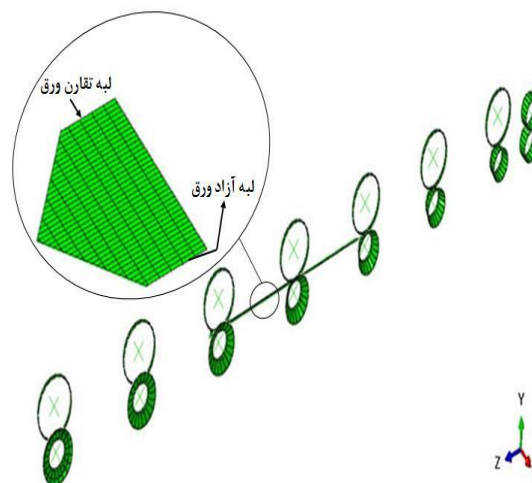
$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (1)$$

در رابطه فوق، y تابع پاسخ، x_1, x_2, \dots, x_k متغیرهای مستقل، k تعداد متغیرهای مستقل و ε خطای آماری است که مربوط به سایر منابع تغییر است که در مدل در نظر گرفته نشده‌اند. این منابع اثراتی مانند خطای اندازه‌گیری دارند. ضرایب مجهول با استفاده از روش رگرسیون به دست می‌آیند. مدل رگرسیون در فرم ماتریسی به صورت رابطه (۲) می‌شود.

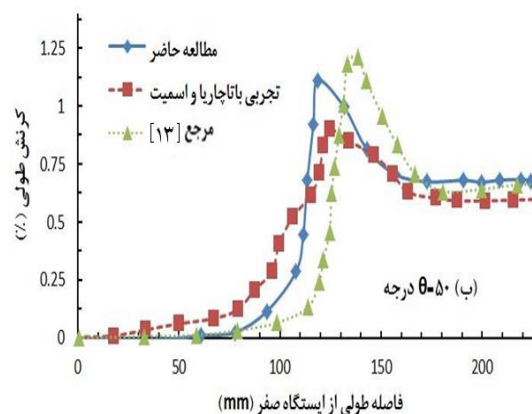
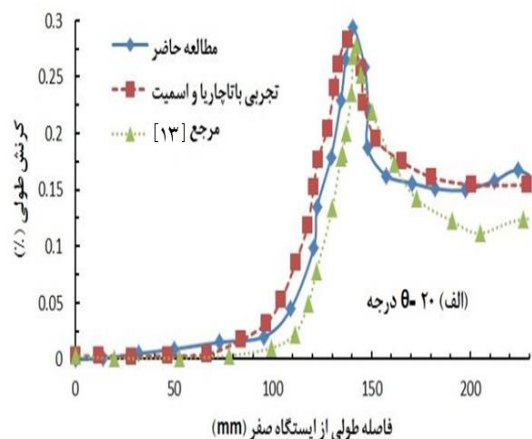
جدول ۲: محدوده عوامل ورودی

عوامل ورودی	سطح حداقل	سطح حداکثر
(D_i) قطر غلتک (mm)	۹۵	۱۴۵
(D) فاصله ایستگاه (mm)	۴۰۰	۵۰۰
(N) تعداد ایستگاه	۷	۱۱
(V) سرعت خطی ورق (mm/s)	۳۳۳/۳۳	۶۶۶/۶۶

گرفته شده است. برای هر یک از آزمایش‌ها توابع هدف، یعنی حداکثر کرنش طولی پلاستیکی و دقت زاویه‌ای مطابق جدول ۳ استخراج شد.



شکل ۵: نورد هفت دروازه‌ای



شکل ۶: مقایسه کرنش طولی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی باتاچاریا-اسمیت و تحلیل مشابه در مرجع [۱۳] (الف) ۲۰ درجه، (ب) ۵۰ درجه

۴- مدل‌سازی به روش رویه پاسخ

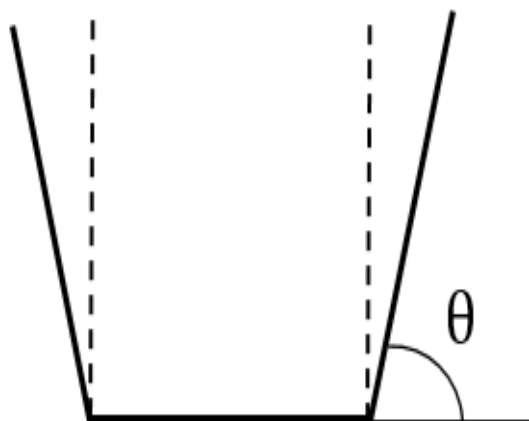
در این پژوهش برای مدل‌سازی پاسخ‌های آزمایش، از روش

جدول ۳: طرح آزمایش‌ها به روش مرکب مرکزی و مقادیر خروجی

آزمایش	D_i (mm)	D (mm)	N	V (mm/s)	کرنش طولی بیشینه	دقت زاویه‌ای (%)
۱	۹۵	۴۰۰	۷	۳۳۳/۳۳	۳/۹۸	۹۶/۶۵
۲	۱۴۵	۴۰۰	۷	۳۳۳/۳۳	۳/۱۲۲	۹۷/۲۴
۳	۹۵	۵۰۰	۷	۳۳۳/۳۳	۲/۷۷۹	۹۶/۲۷
۴	۱۴۵	۵۰۰	۷	۳۳۳/۳۳	۲/۲۸۵	۹۷/۱۸
۵	۹۵	۴۰۰	۱۱	۳۳۳/۳۳	۳/۶۹۹	۹۸/۴۸
۶	۱۴۵	۴۰۰	۱۱	۳۳۳/۳۳	۳/۵۲۰	۹۸/۷۱
۷	۹۵	۵۰۰	۱۱	۳۳۳/۳۳	۳/۲۲۰	۹۸/۴۸
۸	۱۴۵	۵۰۰	۱۱	۳۳۳/۳۳	۱/۸۴۷	۹۸/۷۷
۹	۹۵	۴۰۰	۷	۶۶۶/۶۶	۴/۰۶۶	۹۶/۰۲
۱۰	۱۴۵	۴۰۰	۷	۶۶۶/۶۶	۲/۸۷۷	۹۶/۵۲
۱۱	۹۵	۵۰۰	۷	۶۶۶/۶۶	۳/۱۲۲	۹۵/۸۵
۱۲	۱۴۵	۵۰۰	۷	۶۶۶/۶۶	۲/۶۸	۹۶/۰۶
۱۳	۹۵	۴۰۰	۱۱	۶۶۶/۶۶	۳/۸۰۶	۹۸/۵۵
۱۴	۱۴۵	۴۰۰	۱۱	۶۶۶/۶۶	۳/۶۸۰	۹۸/۷۱
۱۵	۹۵	۵۰۰	۱۱	۶۶۶/۶۶	۳/۳۲۷	۹۸/۵۲
۱۶	۱۴۵	۵۰۰	۱۱	۶۶۶/۶۶	۲/۲۹۹	۹۸/۶۲
۱۷	۷۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۳/۲۲۸	۹۶/۵۳
۱۸	۱۷۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۱/۹۷۰	۹۷/۰۶
۱۹	۱۲۰	۳۵۰	۹	۵۰۰	۲/۲۹۷	۹۷/۱۳
۲۰	۱۲۰	۵۵۰	۹	۵۰۰	۲/۲۹۷	۹۶/۴۲
۲۱	۱۲۰	۴۵۰	۵	۵۰۰	۵/۵۲۳	۹۶/۶۳
۲۲	۱۲۰	۴۵۰	۱۳	۵۰۰	۱/۵۳۷	۹۸/۲۲
۲۳	۱۲۰	۴۵۰	۹	۱۶۶/۶۶	۲/۳۳۲	۹۷/۴۷
۲۴	۱۲۰	۴۵۰	۹	۸۳۳/۳۳	۳/۰۶۹	۹۶/۸۱
۲۵	۱۲۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۲/۸۷۵	۹۷/۳۳
۲۶	۱۲۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۲/۸۷۵	۹۷/۳۳
۲۷	۱۲۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۲/۸۷۵	۹۷/۳۳
۲۸	۱۲۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۲/۸۷۵	۹۷/۳۳
۲۹	۱۲۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۲/۸۷۵	۹۷/۳۳
۳۰	۱۲۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۲/۸۷۵	۹۷/۳۳
۳۱	۱۲۰	۴۵۰	۹	۵۰۰	۲/۸۷۵	۹۷/۳۳

از مدل مرتبه دوم استفاده شده است. این مدل به صورت رابطه (۴) است.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k (\beta_i x_i) + \sum_{i=1}^k (\beta_{ii} x_i^2) + \sum_i \sum_j (\beta_{ij} x_i x_j) + \varepsilon \quad (4)$$



شکل ۸: اثر برگشت فنری در محصول خروجی

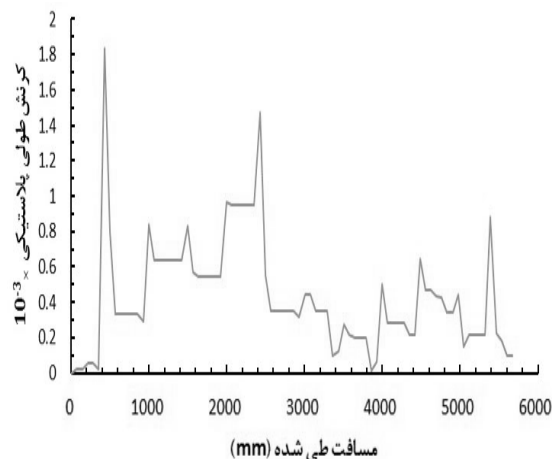
۵- بهینه‌سازی چندهدفه به روش تابع مطلوبیت

بهینه‌یابی، یافتن یک یا چند جواب موجه است که مربوط به مقادیر بحرانی یک یا چند تابع هدف باشد. منظور از یافتن چنین جواب‌های بهینه‌ای در یک مسئله، اغلب طرح یک جواب جهت حداقل‌سازی هزینه ممکن تولید یا حداکثر ساختن قابلیت اطمینان ممکن است. به دلیل چنین ویژگی‌های بسیار مهم جواب‌های بهینه، روش‌های بهینه‌یابی اهمیت زیادی در عمل، به‌ویژه در طراحی‌های مهندسی، آزمایش‌های عملی و تصمیم‌گیری‌های تجاری دارند [۱۶]. هنگامی که یک مسئله بهینه‌یابی شامل بیش از یک تابع هدف باشد، یافتن یک یا چند جواب بهینه، بهینه‌یابی چندهدفه نامیده می‌شود. از جمله روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه روش تابع مطلوبیت است که در این تحقیق از آن استفاده شده است. برای بهینه‌سازی به روش تابع مطلوبیت، ابتدا باید درجه مطلوبیت انفرادی برای هر پاسخ محاسبه شود. اگر هدف کمینه‌کردن یک پاسخ باشد، درجه مطلوبیت از رابطه (۵) حاصل خواهد شد. همچنین جهت بیشینه‌کردن یک پاسخ، درجه مطلوبیت با استفاده از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$d_i = 0, y_i > U_i$$

$$d_i = \left[\frac{(U_i - y_i)}{(U_i - T_i)} \right]^{F_i}, T_i \leq y_i \leq U_i \quad (5)$$

$$d_i = 1, y_i < T_i$$



شکل ۷: کردار کرنش طولی پلاستیکی بر حسب مسافت طی‌شده آزمایش هشتم

در رابطه (۲) X ماتریس داده‌ها و β بردار ضرایب است. به کمک روش حداقل مربعات معادلات فوق حل می‌شوند. در این روش فرض می‌شود خطاهای رندوم به صورت مستقل از هم و به‌طور یکنواخت با میانگین صفر و واریانس نامعلوم توزیع شده‌اند. چنانچه X معرف ماتریس متغیرها و Y معرف مجموعه پاسخ‌ها باشد، بردار ضرایب مطابق با رابطه (۳) به دست می‌آید. پس از تعیین ضرایب مجهول پاسخ سیستم با استفاده از سطح برازش بر داده‌های حاصل، به صورت تقریبی مدل می‌شود.

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3)$$

برای تابع پاسخ معمولاً یک چندجمله‌ای مرتبه پایین در بخشی از ناحیه متغیرهای مستقل مناسب است. چنانچه سیستم دارای انحنا باشد، باید از مدل‌های بالاتر از مرتبه اول استفاده کرد. این مدل به علت انعطاف‌پذیر بودن، به‌طور گسترده استفاده می‌شود. مدل مرتبه دوم یک مدل کاملاً مفید و با اغلب طرح‌های تجربی سازگار است. در این پژوهش برای پردازش بین متغیرهای مستقل و تابع پاسخ،

جدول ۴: نتایج آنالیز واریانس برای حداکثر کرنش طولی

Source	DF	SS	MS	F	P
رگرسیون	۱۴	۱۳/۹۰۰۱	۰/۹۹۲۸۶	۱۵/۵۷	۰/۰۰۰
خطی	۴	۶/۰۶۲۸	۱/۵۱۵۷۱	۲۳/۷۷	۰/۰۰۰
D	۱	۲/۶۷۰۰	۲/۶۷۰۰	۴۱/۸۷	۰/۰۰۰
Di	۱	۳/۰۹۳۷	۳/۰۹۳۷	۴۸/۵۱	۰/۰۰۰
N	۱	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۹	۰/۲۰	۰/۶۶۰
V	۱	۰/۲۹۹۰	۰/۲۹۹۰	۴/۶۹	۰/۰۴۸
درجه دو	۴	۸/۱۶۸۵	۲/۰۴۲۱۲	۳۲/۰۲	۰/۰۰۰
D×D	۱	۰/۰۹۶۱	۰/۰۹۶۱	۱/۵۱	۰/۲۴۰
Di×Di	۱	۱/۷۵۸۱	۱/۷۵۸۱	۲۷/۵۷	۰/۰۰۰
N×N	۱	۷/۳۹۰۷	۷/۳۹۰۷	۱۱۵/۸۹	۰/۰۰۰
V×V	۱	۰/۰۳۱۵	۰/۰۳۱۵	۰/۴۹	۰/۴۹۳
اثر متقابل	۶	۰/۱۷۹۶	۰/۰۲۹۹۳	۰/۴۷	۰/۸۲۰
D×Di	۱	۰/۰۳۸۵	۰/۰۳۸۵	۰/۶۰	۰/۴۵۰
D×N	۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱	۰/۹۴۰
D×V	۱	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۵۰۱	۰/۹۳۷
Di×N	۱	۰/۶۶۷	۰/۶۶۷	۱/۰۵	۰/۳۲۴
Di×V	۱	۰/۰۶۱۱	۰/۰۶۱۱	۰/۹۶	۰/۳۴۴
N×V	۱	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۲۵	۰/۲۰	۰/۶۶۵
Error	۱۴	۰/۰۸۹۲۹	۰/۰۶۳۷۸		
Total	۲۸	۱۴/۷۹۲۹			

DF: درجه آزادی SS: مجموع مربعات MS: میانگین مربعات
F: عدد فیشر P: مقدار احتمال

جدول ۵: نتایج آنالیز واریانس برای دقت زاویه‌ای

Source	DF	SS	MS	F	P
رگرسیون	۱۴	۲۰/۱۲۱۶	۱/۴۳۷۳	۵/۹۱	۰/۰۰۱
خطی	۴	۱۸/۷۵۹۲	۴/۶۸۹۸	۱۹/۳۰	۰/۰۰۰
D	۱	۰/۶۸۳۴	۰/۶۸۳۴	۲/۸۱	۰/۱۱۳
Di	۱	۰/۲۷۰۹	۰/۲۷۰۹	۱/۱۱	۰/۳۰۷
N	۱	۱۷/۰۵۲۲	۱۷/۰۵۲۲	۷۰/۱۶	۰/۰۰۰
V	۱	۰/۷۵۲۶	۰/۷۵۲۶	۳/۱۰	۰/۰۹۸
درجه دو	۴	۰/۵۸۵۷	۰/۱۴۶۴	۰/۶۰	۰/۶۶۶
D×D	۱	۰/۰۷۰۰	۰/۰۷۰۰	۰/۲۹	۰/۵۹۹
Di×Di	۱	۰/۰۸۴۹	۰/۰۸۴۹	۰/۳۵	۰/۵۶۳

(ادامه جدول ۵)

Source	DF	SS	MS	F	P
N×N	۱	۰/۳۳۳۷	۰/۳۳۳۷	۱/۳۷	۰/۲۵۸
V×V	۱	۰/۰۳۸۷	۰/۰۳۸۷	۰/۱۶	۰/۶۹۵
اثر متقابل	۶	۰/۷۷۶۷	۰/۱۲۹۵	۰/۵۳	۰/۷۷۶
D×Di	۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰	۰/۹۸۸
D×N	۱	۰/۱۲۷۸	۰/۱۲۷۸	۰/۵۳	۰/۴۷۹
D×V	۱	۰/۰۶۸۹	۰/۰۶۸۹	۰/۲۸	۰/۶۰۲
Di×N	۱	۰/۰۶۳۸	۰/۰۶۳۸	۰/۲۶	۰/۶۱۶
Di×V	۱	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۸۶	۰/۰۴	۰/۸۵۴
N×V	۱	۰/۵۰۷۷	۰/۵۰۷۷	۲/۰۹	۰/۱۶۸
Error	۱۶	۳/۸۸۸۶	۰/۳۸۸۹		
Total	۳۰	۲۴/۰۱۰۲			

DF: درجه آزادی SS: مجموع مربعات MS: میانگین مربعات
F: عدد فیشر P: مقدار احتمال

i ام و W مجموع وزن‌ها است. اساس استفاده از روش تابع مطلوبیت بدین صورت است که باید محدوده‌ای را برای به‌دست‌آوردن نقطه بهینه مشخص کرد. برای حداکثر کرنش طولی پلاستیکی که باید به حداقل ممکن برسد، ابتدا باید کمترین مقدار و سپس مقدار قابل قبول را تعیین کرد. برای این موضوع هدف موردنظر، رسیدن حداکثر مقدار کرنش طولی به صفر است و برای بیشترین مقدار مورد قبول نیز مقدار ۲ انتخاب شده است. همچنین برای دقت زاویه‌ای، هدف رسیدن به ۱۰۰ درصد است؛ یعنی قطعه بدون برگشت فنری باشد. کمترین مقدار برای دقت زاویه‌ای نیز ۹۷ درصد تعیین شده است.

۶- نتایج و بحث

در این تحقیق پس از اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها به روش مرکب مرکزی با چهار پارامتر مشخص (قطر غلتک، تعداد ایستگاه، فاصله ایستگاه و سرعت خطی ورق)، آزمایش‌ها به روش اجزای محدود اجرا شدند و مقدار توابع هدف حداکثر کرنش طولی پلاستیکی

$$d_i = 0, y_i < L_i$$

$$d_i = \left[\frac{(y_i - L_i)^{\Gamma_i}}{(T_i - L_i)^{\Gamma_i}} \right], L_i \leq y_i \leq T_i \quad (۶)$$

$$d_i = 1, y_i > T_i$$

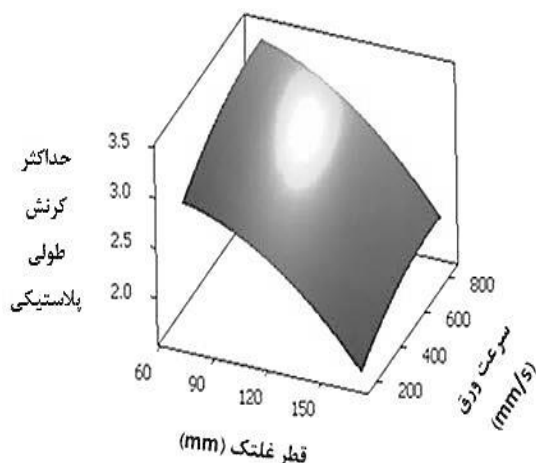
در روابط (۵) و (۶) d_i درجه مطلوبیت انفرادی، y_i مقدار پیش‌بینی شده، T_i مقدار مطلوب، U_i بیشترین مقدار قابل قبول، L_i کمترین مقدار قابل قبول و Γ_i وزن تابع مطلوبیت برای پاسخ i ام است. از طرفی باید یکی از پاسخ‌ها (حداکثر کرنش طولی پلاستیکی) در کمترین مقدار ممکن قرار بگیرد و از طرف دیگر باید پاسخ دیگر (دقت زاویه‌ای در محصول خروجی) به بیشترین مقدار خود برسد. بعد از محاسبه درجه مطلوبیت انفرادی برای هر پاسخ، به‌منظور استفاده از آن‌ها برای ترکیب همه پاسخ‌ها و پیدا کردن شرایط مطلوب کلی، درجه مطلوبیت ترکیبی با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$D = \left(\prod (d_i^{w_i}) \right)^{\frac{1}{W}} \quad (۷)$$

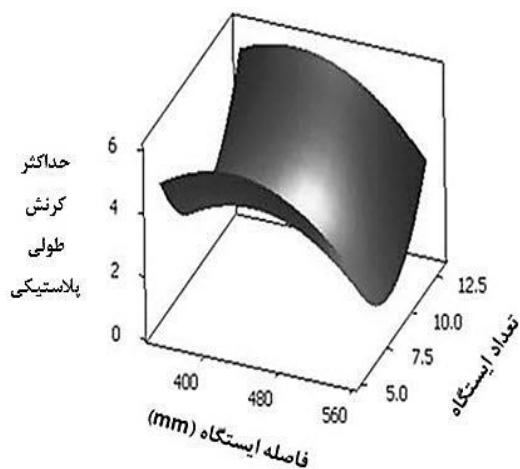
در رابطه (۷) D درجه مطلوبیت ترکیبی، w_i اهمیت پاسخ

پارامتر R^2 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این پارامتر مطابق با رابطه (۹) تعریف می‌شود که در آن y_i مقدار حاصل از شبیه‌سازی، \hat{y}_i مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و \bar{y}_i مقدار میانگین است.

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (9)$$



شکل ۱۰: رویه حداکثر کرنش طولی پلاستیکی بر حسب قطر غلتک و سرعت ورق



شکل ۱۱: رویه حداکثر کرنش طولی پلاستیکی بر حسب فاصله و تعداد ایستگاه

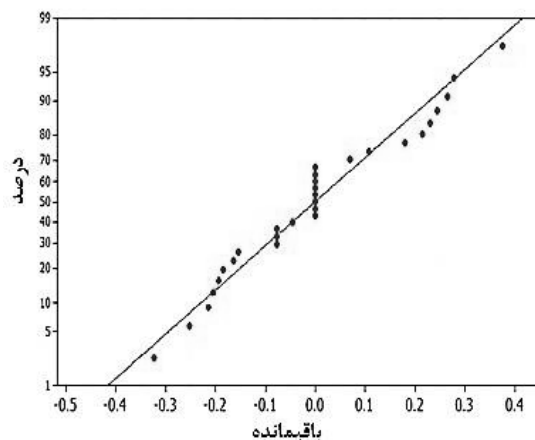
درصد کفایت مدل برای تابع پاسخ حداکثر کرنش ۹۶/۹۳٪ به دست آمد. شکل (۱۰) رویه حداکثر کرنش طولی بر حسب قطر غلتک و سرعت ورق را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۱۱) رویه حداکثر کرنش طولی بر حسب فاصله و تعداد ایستگاه‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۰)، مشاهده می‌شود کاهش سرعت و افزایش قطر باعث کاهش حداکثر کرنش پلاستیکی شده، افزایش سرعت و کاهش قطر، منجر به افزایش حداکثر کرنش پلاستیکی خواهد شد. همچنین مطابق با شکل (۱۱) افزایش فاصله

کل فرآیند و دقت زاویه‌ای استخراج شد. در ادامه تأثیر پارامترهای ورودی بر روی توابع هدف به روش رویه پاسخ مدل‌سازی شد و در نهایت با روش تابع مطلوبیت نقطه بهینه به دست آمد. بعد از به دست آمدن نقطه بهینه به منظور مقایسه نقطه بهینه با حالت معمولی، شبیه‌سازی شده هر دو مورد انجام و نتایج مربوط، با یکدیگر مقایسه شدند.

۱-۶- مدل‌سازی تابع پاسخ حداکثر کرنش طولی پلاستیکی

در شکل (۹) کردار احتمال توزیع نرمال حداکثر کرنش طولی پلاستیکی نشان داده شده است که پراکندگی نقاط اطراف خط مورب نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع داده‌ها است. همچنین در جدول ۴، نتایج آنالیز واریانس برای تابع پاسخ حداکثر کرنش طولی پلاستیکی آمده است. با استفاده از نتایج آنالیز واریانس حاصل از روش رویه پاسخ مدل تابع پاسخ برای حداکثر کرنش طولی پلاستیکی بر حسب پارامترهای ورودی قطر غلتک (D_i)، فاصله ایستگاه‌ها (D)، تعداد ایستگاه‌ها (N) و سرعت ورق (V) به صورت رابطه (۸) به دست می‌آید.

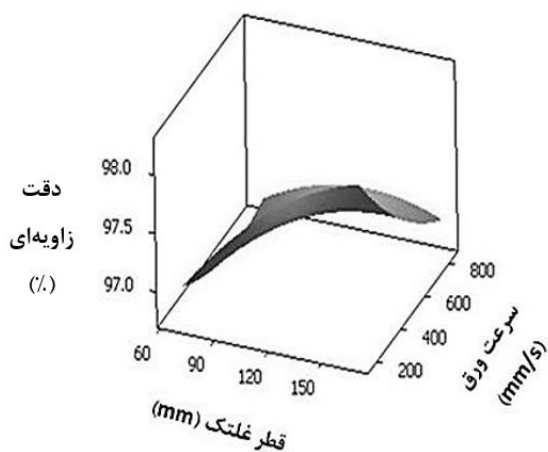
$$\begin{aligned} \text{Max Strain} = & 0.026 D + 0.12 D_i - 2.87 N - \\ & 0.002 V + (-9.5 \times 10^{-5}) D^2 + (1.35 \times 10^{-4}) D_i^2 \\ & + 0.173 N^2 + (-1.224 \times 10^{-4}) V^2 + (-3.92 \times 10^{-5}) \\ & D \times D_i + (9.62 \times 10^{-5}) D \times N + (-1.21 \times 10^{-6}) \\ & D \times V + (-6.45 \times 10^{-4}) D_i \times N + (7.41 \times 10^{-6}) \\ & D_i \times V + (8.38 \times 10^{-5}) N \times V \end{aligned} \quad (8)$$



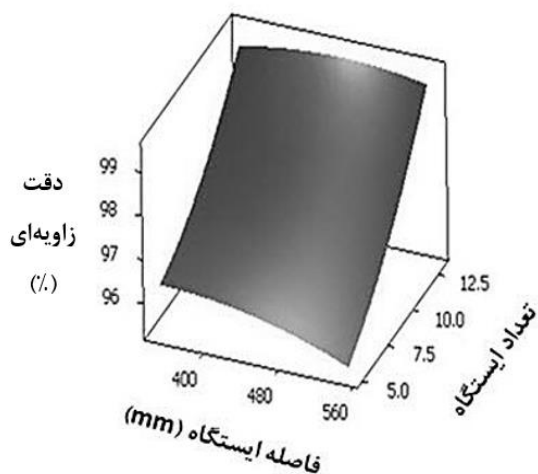
شکل ۹: کردار احتمال نرمال برای حداکثر کرنش طولی پلاستیکی

شایان ذکر است مقدار کفایت مدل رویه پاسخ با استفاده از

افزایش قطر منجر به افزایش دقت زاویه‌ای می‌شود. در نتیجه با بیشترین سرعت و کمترین قطر، کمترین میزان دقت زاویه‌ای حاصل می‌شود. همچنین افزایش تعداد ایستگاه باعث افزایش دقت زاویه‌ای و افزایش فاصله نیز باعث کاهش دقت زاویه‌ای به مقدار کمی خواهد شد. با توجه به این کردار، کمترین دقت زاویه‌ای در کمترین تعداد ایستگاه‌ها و بیشترین فاصله ایستگاه‌ها رخ می‌دهد.



شکل ۱۳: رویه دقت زاویه‌ای بر حسب قطر غلتک و سرعت ورق

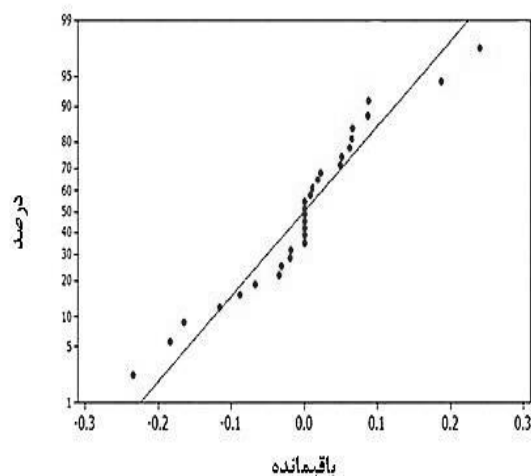


شکل ۱۴: رویه دقت زاویه‌ای بر حسب فاصله و تعداد ایستگاه

۳-۶- نتایج بهینه‌سازی

یکی از عوامل مهم در بهینه‌سازی بر اساس روش تابع مطلوبیت، نسبت‌دادن درجه اهمیت به پاسخ‌ها است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود پارامترهای بررسی‌شده تأثیر زیادی بر روی برگشت فنری ندارند و باید آن را از روش‌های دیگر جبران کرد. به‌عنوان مثال می‌توان زاویه آخرین قالب را بیشتر از نود درجه قرار داد تا بعد از برگشت فنری، زاویه قطعه به اندازه نود درجه برسد. اما

ایستگاه‌ها باعث کاهش حداکثر مقدار کرنش پلاستیکی می‌شود و با افزایش تعداد ایستگاه‌ها، حداکثر مقدار کرنش پلاستیکی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲: کردار احتمال نرمال برای دقت زاویه‌ای

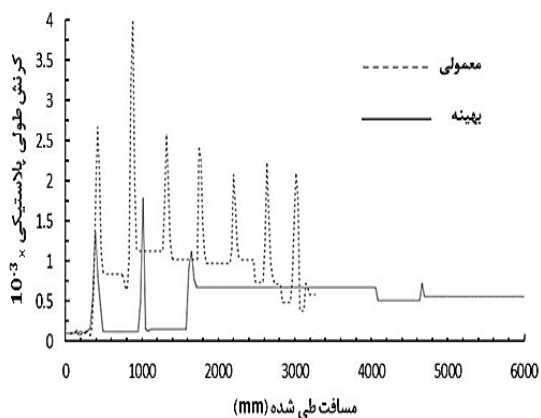
۲-۶- مدل‌سازی تابع پاسخ دقت زاویه‌ای

شکل (۱۲) کردار احتمال توزیع نرمال دقت زاویه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به کردار، پراکندگی نقاط اطراف خط مورب نشان می‌دهد که توزیع نرمال است. در جدول ۵، نتایج آنالیز واریانس برای تابع پاسخ دقت زاویه‌ای آمده است. با استفاده از نتایج آنالیز واریانس حاصل از روش رویه پاسخ، مدل تابع پاسخ برای دقت زاویه‌ای برحسب پارامترهای ورودی قطر غلتک (D_1)، فاصله ایستگاه‌ها (D)، تعداد ایستگاه‌ها (N) و سرعت ورق (V) به‌صورت رابطه (۱۰) به دست خواهد شد. مقدار کفایت مدل نیز 98.84% به دست آمد که حاکی از مطلوب بودن مدل است.

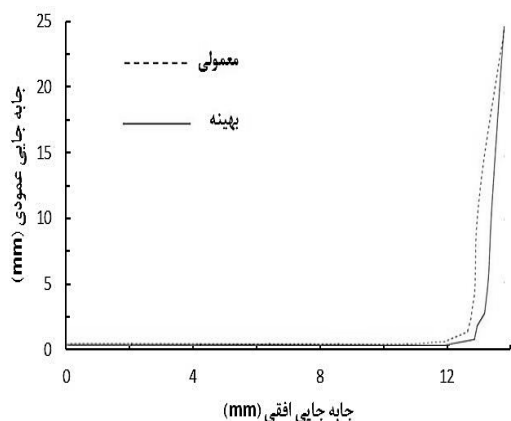
$$\begin{aligned} \text{Angle Precession} = & 0.04 D - 0.013 D_1 - 0.4 N \\ & - 0.004 V + (-7.91 \times 10^{-5}) D^2 + (-2.17 \times 10^{-5}) D_1^2 \\ & + 0.027 N^2 + (1.32 \times 10^{-6}) V^2 + (1.5 \times 10^{-6}) D \times D_1 \\ & + (-0.0017) D \times N + (-1.57 \times 10^{-5}) D \times V + \\ & 0.00063 D_1 \times N + (-2.77 \times 10^{-6}) D_1 \times V \\ & + (0.00053 \times 10^{-5}) N \times V \end{aligned} \quad (10)$$

در شکل (۱۳) رویه دقت زاویه‌ای برحسب قطر غلتک و سرعت ورق نشان داده شده است. همچنین شکل (۱۴) رویه دقت زاویه‌ای برحسب فاصله و تعداد ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. طبق شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌شود که افزایش سرعت، دقت زاویه‌ای را کاهش داده،

به‌منظور بررسی نقطه بهینه، نتایج این نقطه با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی حالت معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است. در حالت معمولی از هفت دروازه استفاده شده است. در شکل (۱۶) مقایسه کرنش طولی پلاستیکی به‌دست‌آمده از حالت معمولی با نتیجه بهینه نشان داده شده است. طبق شکل مشخص است که مقدار کرنش‌های طولی پلاستیکی در نتیجه بهینه‌سازی، کاهش چشمگیری یافته است. شکل (۱۷) نیز نشان‌دهنده مقایسه ابعاد قطعه کار برای حالت معمولی و نقطه بهینه است. جدول ۷ نیز به مقایسه بیشترین کرنش و دقت زاویه‌ای قطعه کار برای نقطه بهینه و حالت معمولی پرداخته است که بیانگر بهبود نسبی میزان کرنش و دقت زاویه‌ای در نقطه بهینه نسبت به حالت معمولی است.



شکل ۱۶: مقایسه کرنش طولی پلاستیکی حالت معمولی و نقطه بهینه

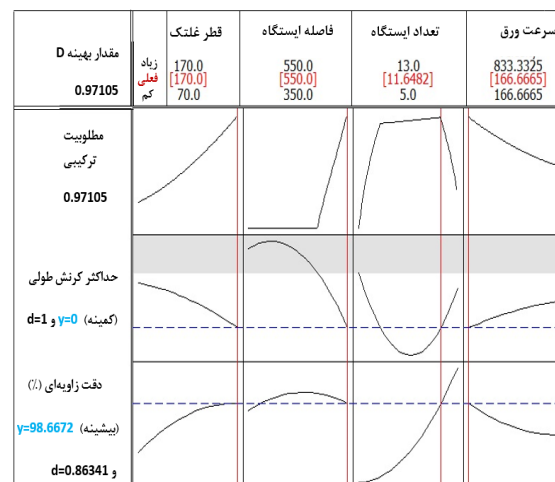


شکل ۱۷: مقایسه ابعاد قطعه کار برای حالت معمولی و نقطه بهینه

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر چهار پارامتر قطر غلتک، فاصله ایستگاه، تعداد ایستگاه و سرعت خطی ورق بر روی حداکثر

حداکثر مقدار کرنش طولی پلاستیکی با استفاده از پارامترهای بررسی‌شده، تأثیرپذیری خوبی داشته است. بنابراین می‌توان درجه اهمیت را برای حداکثر مقدار کرنش ۱ و برای دقت زاویه‌ای ۰/۵ در نظر گرفت. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از این اطلاعات، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مطابق با شکل مشخص است که درجه مطلوبیت نقطه به‌دست‌آمده ۰/۹۰۶ است که با توجه به اینکه این مقدار بالاتر از ۰/۹ است، می‌توان نقطه بهینه را به‌عنوان نقطه مورد قبول انتخاب کرد. جدول ۶ نشان‌دهنده مقادیر نقطه بهینه است.



شکل ۱۵: نتایج بهینه‌سازی به روش تابع مطلوبیت

جدول ۶: مقادیر نقطه بهینه به‌دست‌آمده به روش تابع مطلوبیت

مقدار بهینه	پارامتر
۱۷۰	قطر غلتک (mm)
۵۵۰	فاصله ایستگاه (mm)
۱۲	تعداد ایستگاه
۱۶۶/۵	سرعت خطی ورق (mm/s)
۰	حداکثر کرنش طولی پلاستیکی
۹۸/۶۶۷۲	دقت زاویه‌ای (%)

جدول ۷: مقایسه حداکثر کرنش طولی و دقت زاویه‌ای نقطه بهینه و حالت معمولی

آزمایش	حداکثر کرنش طولی	دقت زاویه‌ای (%)
نقطه بهینه	۱/۷۳	۹۸/۶۰
حالت معمولی	۳/۹۸	۹۶/۶۵

به‌منظور ارزیابی نقطه بهینه نیاز است تا این نقطه به روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده، نتایج آن استخراج شود.

رویه برگشت فنری نیز نشان داد افزایش تعداد ایستگاه بر روی دقت زاویه‌ای تأثیر مثبت داشته، افزایش سرعت ورق بر روی دقت زاویه‌ای تأثیر منفی دارد. کاهش فاصله نیز تا حدودی تأثیر مثبت بر روی دقت زاویه‌ای خواهد گذاشت. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد روش رویه پاسخ با دقت مناسبی تأثیر پارامترهای ورودی بر توابع پاسخ را برآزش می‌کند. همچنین بهینه‌سازی فرآیند با روش تابع مطلوبیت باعث کاهش حداکثر کرنش طولی پلاستیکی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای و افزایش دقت زاویه‌ای به مقدار کمی نسبت به حالت معمولی می‌شود.

کرنش طولی پلاستیکی ورق و دقت زاویه‌ای در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مدل‌سازی و بهینه‌سازی شد. پس از طراحی آزمایش‌ها به روش طرح مرکب مرکزی و اجرای آنها با روش اجزای محدود، مدل رویه پاسخ توابع استخراج شد. سپس بهینه‌سازی چندهدفه پاسخ‌ها به‌منظور کمینه‌کردن حداکثر کرنش طولی پلاستیکی و برگشت فنری با استفاده از روش تابع مطلوبیت صورت گرفت. بررسی رویه حداکثر کرنش طولی نشان می‌دهد افزایش قطر غلتک و فاصله ایستگاه‌ها، حداکثر کرنش طولی پلاستیکی ورق را کاهش داده، همچنین افزایش سرعت ورق، باعث افزایش حداکثر کرنش طولی می‌شود. بررسی

۸- مراجع

- [1] Halmos, G.T., Roll Forming Handbook, Published by Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] Chiang, K.F., "Cold roll forming", ME thesis. University of Auckland, 1984.
- [3] Zhu, S. D., Panton, S.M., "The effects of geometric variables in roll forming a channel section", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 210, No. 2, 1996, pp. 127-134.
- [4] Rossi, Barbara, B., Degee, H., Boman, R., "Numerical simulation of the roll forming of thin-walled sections and evaluation of corner strength enhancement", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 72, 2013, pp. 13-20.
- [5] Moen, C.D., Igusa, T., Schafer, B.W., "Prediction of the residual stresses and strains in cold-formed steel members", Thin-walled Structures, Vol. 46, No. 11, 2008, pp. 1274-1289.
- [6] Hong, S., Lee, S., Kim, N., "A parametric study on forming length in roll forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, No. 1-3, 2001, pp. 774-778.
- [7] Lindgren, M., "Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 186, 2007, pp. 77-81.
- [۸] و. پناهی‌زاده رحیم‌لو، ح. مسلمی نائینی، غ.ح. لیاقت و م. سلمانی تهرانی، «بررسی عددی و تجربی اثر مدل‌های سخت‌شوندگی روی پدیده برگشت فنری در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع U شکل متقارن»، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۶، ۱۳۹۲، ص ۷۴-۸۲.
- [۹] م. محمدی، ح. مسلمی نائینی، م.م. کسائی و دیگران، «بررسی عیب تابیدگی کف پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر در فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر»، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۶، ۱۳۹۳، ص ۷۲-۸۰.
- [۱۰] س.ا. افتخاری شهری، خ. خلیلی و س.ی. احمدی بروغنی، «بهینه‌سازی منحنی فشار جابه‌جایی در فرآیند هیدروفورمینگ لوله با استفاده از روش رویه پاسخ چندمرحله‌ای»، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۱۳- فوق‌العاده، ۱۳۹۲، ص ۱۷۶-۱۸۷.
- [۱۱] ا.ح. لطفی و س. نوروزی، «بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۶ T-7075 در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با به‌کارگیری طراحی آزمایش به شیوه ترکیب مرکزی»، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۳، ۱۳۹۳، ص ۱۷-۲۶.
- [12] Bhattacharyya, D., Smith, P., Yee, C. H., Collins, I.F., "The development of longitudinal strain in cold roll forming and its influence on product straightness", First international conf. on tech. of plasticity, Tokyo, The Japan Soc. For Tech of plasticity, 1, 1984, 422-427.
- [13] McClure, C.K., Li, H., "Roll forming simulation using finite element analysis", Manufacturing review, Vol. 8, No. 2, 1995, pp. 114-122.
- [14] Montgomery, D.C., Design and analysis of experiments, 4th edition, Wiley, 1997.
- [15] Alimirzaloo, V., "Optimization of the Final Forging Process of the Compressor Blade of an Aerial Motor",

- Ph.D. thesis, Amirkabir University of Technology, 2011.
- [16] Deb, K., Multi-objective optimization using Evolutionary Algorithms, Wiley, 2001.