

استخراج محدوده بهینه پارامترهای فرآیند شکل‌دهی غلتکی با کمینه‌سازی کرنش طولی و برگشت فنری با نمودارهای کانتوری

ولی علی میرزآلو*

محمدرضا ابراهیمی خسروشاهی

وحید مدانلو

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

دانشجوی دکتری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

چکیده

در این تحقیق فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع U شکل با روش اجزا محدود تحلیل شده است و تاثیر پارامترهای فرآیند بر کرنش طولی و برگشت فنری با استفاده از مدل رویه پاسخ بررسی شده است. سپس با استفاده از نمودارهای کانتوری، محدوده بهینه پارامترها استخراج شده است. مدل اجزای محدود با استفاده از نتایج تجربی مورد تایید قرار گرفته است. آزمایش‌های لازم با استفاده از طرح مرکب مرکزی طراحی شده است. قطر غلتک، سرعت خطی ورق، فاصله و تعداد ایستگاه‌ها به عنوان متغیرهای ورودی و برگشت فنری و کرنش طولی پلاستیکی میانگین، به عنوان توابع پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش رویه پاسخ با دقت قابل قبولی تاثیر پارامترهای ورودی بر توابع پاسخ را مدل‌سازی می‌کند. مطابق با مدل بدست آمده، افزایش تعداد ایستگاه‌ها و قطر غلتک‌ها منجر به افزایش دقت زاویه‌ای یا کاهش برگشت فنری و افزایش سرعت خطی ورق باعث افزایش برگشت فنری می‌شود. افزایش فاصله ایستگاه‌ها و قطر غلتک‌ها باعث کاهش کرنش طولی پلاستیکی میانگین و افزایش سرعت خطی ورق باعث افزایش کرنش طولی پلاستیکی میانگین می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی شکل‌دهی غلتکی سرد، شبیه‌سازی، طراحی آزمایش، رویه پاسخ، نمودارهای کانتوری.

Extraction of the Optimal Range of Roll Forming Process Parameters Via Minimizing of the Longitudinal Strain and Spring Back Using Contour Plots

V. Alimirzaloo

M. R. E. Khosroshahi

V. Modanloo

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Young Researchers and Elite Club, Islamic Azad University, Urmia, Iran

Abstract

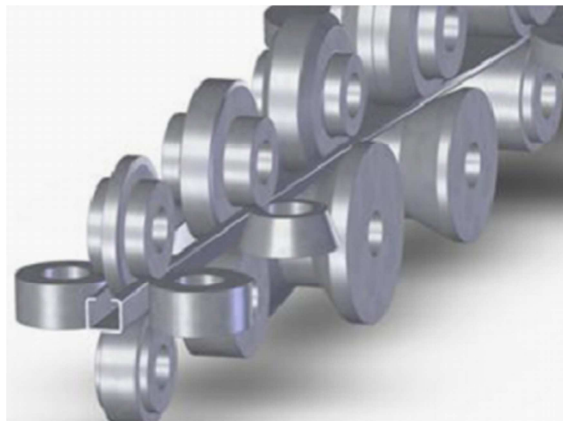
In this study, U section cold roll forming process has been analyzed by finite element (FE) method and the effect of the process parameters on the longitudinal strain and spring back has been investigated using response surface method (RSM). Then optimized range of the parameters have been determined using the contour plots. The FE model has been verified using the experimental results. Required experiments have been designed using central composite design. In this design roll diameter, linear velocity of the blank and distance and number of stands are considered as input variables and spring back and maximum plastic longitudinal strain are considered as response functions. Results show that the RSM models the effect of input parameters on the response functions with acceptable precision. According to obtained model, increasing distance the stands and rolls diameters cause to decrease of the spring back or increase the angular precision and increasing of the linear velocity of the sheet leads to increasing the spring back. Increasing stands distance and roll diameter, lead to decreasing the average plastic longitudinal strain and increasing the linear velocity the sheet leads to increasing the average plastic longitudinal strain. Also optimization results represent decreasing of the spring back and maximum plastic longitudinal strain.

Keywords: Optimization of the cold roll forming, Simulation, Design of experiment, Response surface, Contour plots.

۱-مقدمه

در مقایسه با ماشین‌آلات کشش سنتی، درازشدگی طولی و نیز پدیده برگشت فنری می‌باشد. در شکل ۱ طرحواره فرآیند شکل‌دهی غلتکی نشان داده شده است [۲]. توسعه روزافزون صنعت شکل‌دهی و نیز هزینه‌های قابل توجه طراحی و آزمایش قطعات، طراحان را بر آن داشته که هزینه‌های جاری را کاهش داده و طراحی‌هایی با قابلیت اطمینان بالاتر ارائه دهند. با ترکیب نمودن شیوه‌های بهینه‌سازی، با شیوه‌های طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی اجزای محدود، روش‌های کارآمدی برای رسیدن به قطعه نهایی با خواص مورد انتظار بدست خواهد آمد.

فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد، روشی است که در آن ورق با عبور از بین چند جفت غلتک و در طی چند ایستگاه به شکل محصول نهایی با مقطع مورد نظر تبدیل می‌شود. از جمله مزایای این فرآیند می‌توان به پیوستگی در تولید، سرعت تولید بالا، نیروی شکل‌دهی کم و نیز استفاده از ورق در طول‌های مختلف و بدست آوردن محصولات مختلف بدون نیاز به ایجاد تغییر اساسی در ماشین اشاره نمود [۱]. اما از جمله معایب این فرآیند، هزینه اولیه بالاتر ماشین شکل‌دهی غلتکی



شکل ۱- طرحواره فرآیند شکل دهی غلتکی [۲]

۲- شبیه سازی فرآیند

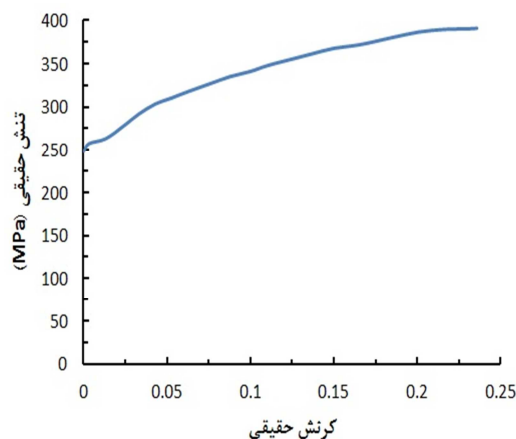
در این بخش مشخصات قطعه کار و چگونگی مدل سازی فرآیند به روش اجزای محدود ارائه شده است.

۲-۱- مشخصات هندسی و مکانیکی قطعه کار

ورق استفاده شده در این فرآیند از جنس فولاد St37 گالوانیزه با ضخامت یک میلی متر می باشد که مشخصات رفتار مکانیکی این ماده با استفاده از تست کشش بدست آمد. همچنین نمودار تنش کرنش حقیقی و خواص مکانیکی آن به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. مدل مکانیکی ماده به صورت الاستیک-کرنش سخت در نظر گرفته شده است. همچنین شکل ۳ ابعاد محصول نهایی را نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی ورق فولادی

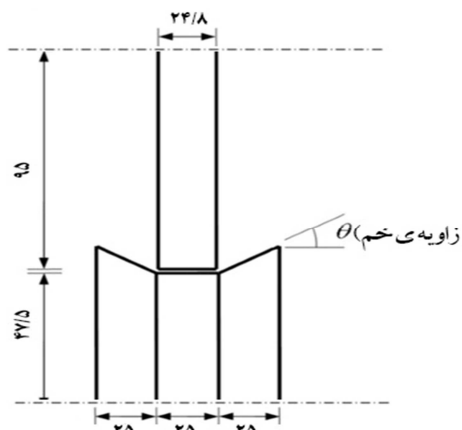
مقدار	مشخصه
۲۴۸	تنش تسلیم (MPa)
۱۷۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۷۸۳۳	چگالی (kg/m^3)
۰/۳	ضریب پواسون



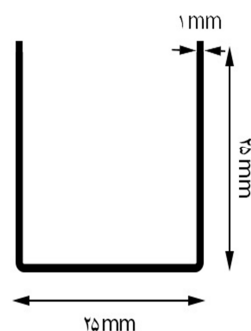
شکل ۲- تنش کرنش حقیقی

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه فرآیند شکل دهی غلتکی سرد به سه صورت تجربی، تحلیلی و عددی انجام شده است. باتاچاریا و همکارانش [۳] کرنش طولی پوسته های را در فرآیند شکل دهی غلتکی برای زمانی که از یک یا چند ایستگاه غلتک استفاده می شود، بررسی کردند. نتیجه بررسی های آنها به این صورت بود که مقدار اوج کرنش به مقدار افزایش زاویه خم وابسته است و افزایش زاویه خم تقریباً به صورت خطی باعث افزایش میزان کرنش می شود. آنها در بررسی های خود به معادله ای دست یافتند که مقدار طول تغییر شکل را مشخص می کند. هیشلیتز و همکارانش [۴] تغییر شکل هندسی و توزیع کرنش را با استفاده از روش شبیه سازی المان محدود پیش بینی نموده و نتایج را با آزمایش های تجربی قبلی مقایسه کردند. مطالعه آنها عمدتاً بر روی شبیه سازی فرآیند شکل دهی غلتکی با استفاده از روش المان محدود و استفاده از آنها برای طراحی فرآیند شکل دهی غلتکی سرد متمرکز شد. کرنش طولی پیش بینی شده و با نتایج تجربی برای سه نقطه از فلنج مقایسه شد و پروفیل نهایی بعد از تغییر شکل پیش بینی شد. هانگ و همکارانش [۵] طول خط تغییر شکل ورق در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد را با استفاده از بعضی پارامترها مانند مشخصات و ضخامت مواد، قطر و سرعت غلتک ها و تغییر شکل مواد که طول شکل دهی را تحت تاثیر قرار می دهند، پیش بینی نمودند. آنها دریافتند که توان کار سختی مواد تاثیر عمده ای بر روی طول شکل دهی دارد. کار سختی بالا بر روی ورق، طول شکل دهی را کوتاه کرده و گرم کردن ورق آن را بلند می کند. پانتون و همکارانش [۶] گزارش داده اند که اوج کرنش طولی هنگام اولین برخورد ورق و غلتک رخ می دهد. همچنین اوج کرنش طولی نباید وارد ناحیه پلاستیک شود، به دلیل اینکه کرنش طولی پلاستیک باعث ایجاد تنش باقیمانده شده که آن هم باعث ایجاد نقص در پروفیل مانند موج لبه و انحنای طولی می شود. ژو و همکارانش [۷] تاثیر طول فلنج، ضخامت مواد و حداقل افزایش زاویه را بر روی کرنش طولی پوسته ای در لبه فلنج مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول فلنج، ضخامت مواد و حداقل افزایش زاویه، کرنش طولی افزایش می یابد. پناهی زاده و همکارانش [۸] به بررسی عددی و تجربی اثر مدل های سخت شوندگی روی برگشت فنری در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد مقاطع U شکل متقارن پرداختند. آنها پارامترهایی نظیر تغییرات زاویه شکل دهی، جنس ورق، هندسه غلتک و ضخامت ورق را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که مدل سخت شوندگی همسانگرد در مقایسه با مدل سینماتیک برای پیش بینی پدیده برگشت فنری دقیق تر است.

با وجود تحقیقات متعدد در زمینه شبیه سازی شکل دهی غلتکی سرد، در زمینه بهینه سازی این فرآیند مطالعات اندکی گزارش شده است. در این مقاله با استفاده از روش طراحی آزمایش ها، نتایج حاصل از تغییر پارامترهای ورودی فرآیند بر روی دقت زاویه ای یا برگشت فنری و کرنش طولی پلاستیکی میانگین با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود محاسبه شده و سپس به کمک مدل رویه پاسخ مورد تحلیل قرار می گیرند. در پایان محدوده بهینه پارامترهای فرآیند به روش نمودارهای کانتوری براساس مدل رویه پاسخ، مشخص می شود.



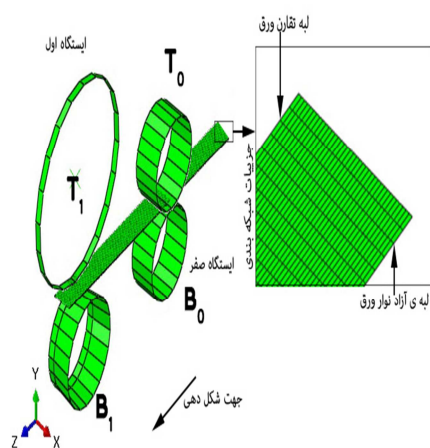
شکل ۴- طرحواره غلتک‌ها و زاویه خم در هر مرحله (ابعاد به میلی-متر)



شکل ۳- ابعاد محصول تولیدی

۲-۲- طراحی و تحلیل فرآیند

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 قطر غلتک پایینی می‌باشد. در هر مرحله غلتک پایینی شکل‌دهنده اصلی ورق می‌باشد که به اندازه شکل قطعه خروجی است. عرض ناحیه کف ورق به اندازه کف محصول تولیدی می‌باشد. طول بال باید به اندازه‌ای باشد که ورق از غلتک خارج نشود. شبیه‌سازی‌های این پژوهش به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شده است. از آنجا که قطعه به صورت متقارن می‌باشد، به منظور کاهش زمان تحلیل، نیمی از ورق شبیه‌سازی شده است. ورق به صورت یک رویه مسطح مستطیلی شکل‌پذیر مدل شده است. تحلیل مساله با استفاده از حل‌گر صریح دینامیکی انجام شده است. 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 بوده و فقط وظیفه نگهداری ورق را بر عهده دارند. اما برای غلتک‌های ایستگاه اول به بعد، رفتار اصطکاکی با مدل کولمب و ضریب اصطکاک ۰/۲ در نظر گرفته شده است [۹]. غلتک‌ها به صورت صلب تحلیلی مدل شده‌اند و نیاز به شبکه‌بندی ندارند. برای شبکه‌بندی ورق از المان پوسته‌ای چهار گره‌ای (S4R) استفاده شده و نیز از یک شبکه منظم با ۱۵۰ المان در جهت طولی و ۲۰ المان در جهت عرضی استفاده شده است. در شکل ۵ یک نمونه از مدل شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل شبیه‌سازی اجزای محدود

۳-۲- درستی آزمایی نتایج شبیه‌سازی

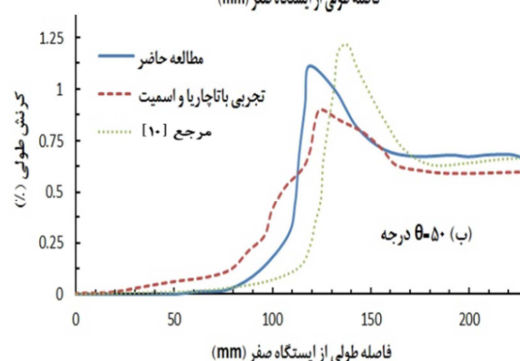
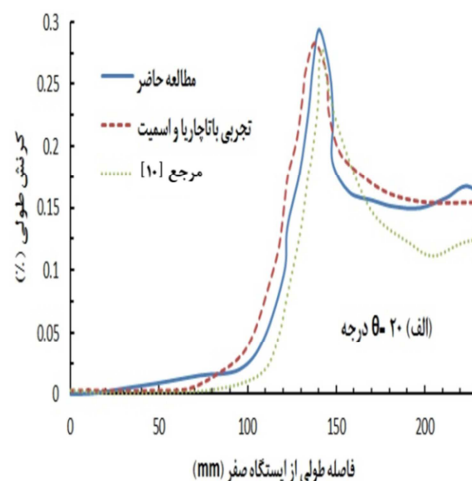
جهت تایید نمودن نتایج شبیه‌سازی و همچنین به دلیل هزینه بالای آزمایش تجربی، از نتایج موجود استفاده شده است. بدین منظور از آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۳] که نتایج تجربی آن در دسترس می‌باشد استفاده شد. آنها در کارهای تجربی خود با انجام آزمایش‌هایی به مطالعه بر روی شکل‌دهی مقطع کانال متقارن و بررسی اثر افزایش زاویه پروفیل در ایستگاه اول بر روی کرنش طولی ناحیه بال و کف پرداختند. با تحلیل اجزا 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 [۱۰] مطابق شکل ۶ مقایسه شد. مشاهده می‌شود که مطابقت قابل قبولی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی مراجع وجود دارد.

جدول ۲- محدوده عوامل ورودی

پارامتر	قطر غلتک (mm)	سرعت خطی ورق (mm/s)	فاصله ایستگاه (mm)	تعداد ایستگاه
نماد	D	V	Di	N
سطوح	۷۰	۳۳۳/۳۳	۳۵۰	۵
	۹۵	۱۶۶/۶۶	۴۰۰	۷
	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۹
	۱۴۵	۶۶۶/۶۶	۵۰۰	۱۱
	۱۷۰	۸۳۳/۳۳	۵۵۰	۱۳

جدول ۳- طرح آزمایش‌ها و مقادیر خروجی

آزمایش	D	V	Di	N	دقت زاویه‌ای (%)	کرنش طولی میانگین
۱	۹۵	۳۳۳/۳۳	۴۰۰	۷	۹۶/۶۵	۱/۶۴۹
۲	۱۴۵	۳۳۳/۳۳	۴۰۰	۷	۹۷/۲۴	۲/۱۵۰
۳	۹۵	۳۳۳/۳۳	۵۰۰	۷	۹۶/۲۷	۲/۱۸۹
۴	۱۴۵	۳۳۳/۳۳	۵۰۰	۷	۹۷/۱۸	۱/۱۸۰
۵	۹۵	۳۳۳/۳۳	۴۰۰	۱۱	۹۸/۴۸	۱/۶۴۹
۶	۱۴۵	۳۳۳/۳۳	۴۰۰	۱۱	۹۸/۷۱	۱/۱۵۹
۷	۹۵	۳۳۳/۳۳	۵۰۰	۱۱	۹۸/۴۸	۱/۳۰۴
۸	۱۴۵	۳۳۳/۳۳	۵۰۰	۱۱	۹۸/۷۷	۰/۸۴۶
۹	۹۵	۶۶۶/۶۶	۴۰۰	۷	۹۶/۰۲	۲/۵۴۲
۱۰	۱۴۵	۶۶۶/۶۶	۴۰۰	۷	۹۶/۵۲	۲/۱۹۹
۱۱	۹۵	۶۶۶/۶۶	۵۰۰	۷	۹۵/۸۵	۲/۱۸۰
۱۲	۱۴۵	۶۶۶/۶۶	۵۰۰	۷	۹۶/۰۶	۲/۰۹۰
۱۳	۹۵	۶۶۶/۶۶	۴۰۰	۱۱	۹۸/۵۵	۱/۷۱۹
۱۴	۱۴۵	۶۶۶/۶۶	۴۰۰	۱۱	۹۸/۷۱	۱/۴۴۶
۱۵	۹۵	۶۶۶/۶۶	۵۰۰	۱۱	۹۸/۵۲	۱/۵۱۱
۱۶	۱۴۵	۶۶۶/۶۶	۵۰۰	۱۱	۹۸/۶۲	۱/۱۷۳
۱۷	۷۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۶/۵۳	۱/۶۱۷
۱۸	۱۷۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۷/۰۶	۱/۲۰۰
۱۹	۱۲۰	۵۰۰	۳۵۰	۹	۹۷/۱۳	۱/۵۰۵
۲۰	۱۲۰	۵۰۰	۵۵۰	۹	۹۶/۴۲	۱/۳۵۴
۲۱	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۵	۹۶/۶۳	۴/۳۴۷
۲۲	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۱۳	۹۸/۲۲	۰/۸۱۱
۲۳	۱۲۰	۱۶۶/۶۶	۴۵۰	۹	۹۷/۴۷	۱/۲۶۴
۲۴	۱۲۰	۸۳۳/۳۳	۴۵۰	۹	۹۶/۸۱	۱/۴۹۰
۲۵	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۷/۳۳	۱/۳۲۵
۲۶	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۷/۳۳	۱/۳۲۵
۲۷	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۷/۳۳	۱/۳۲۵
۲۸	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۷/۳۳	۱/۳۲۵
۲۹	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۷/۳۳	۱/۳۲۵
۳۰	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۷/۳۳	۱/۳۲۵
۳۱	۱۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۹	۹۷/۳۳	۱/۳۲۵

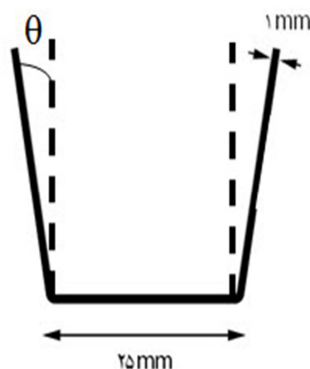


شکل ۵- کرنش طولی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی باتاجاریا و اسمیت و تحلیل مشابه در مرجع [۱۰] (الف) ۲۰ درجه (ب) ۵۰ درجه

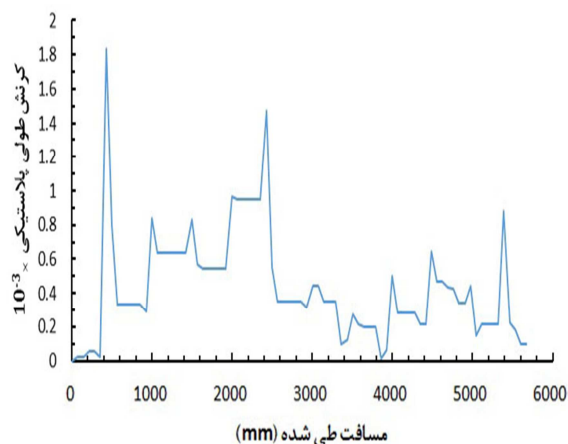
۳- طراحی و اجرای آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های کامل به منظور 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 به طور نمایی افزایش خواهد یافت که اجرای این تعداد آزمایش نیز موجه نیست. از این رو یکی از اهداف اصلی روش طراحی آزمایش‌ها، انتخاب بهترین حالت‌های ممکن آزمایش است که با استفاده از آن بتوان فرآیند را ضمن توجیه پذیر بودن تعداد آزمایش‌ها، به مطلوب‌ترین شکل ممکن بررسی نمود [۱۱]. 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 نمود که از جمله این طرح‌ها، طرح مرکب مرکزی می‌باشد. سطوح متغیرها مطابق طرح مرکب مرکزی با ۵ سطح برای هر پارامتر، مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده‌اند. برای طراحی آزمایش از نرم‌افزار Mini Tab [۱۲] استفاده شده است. در این فرآیند قطر غلتک‌های بالا دو برابر قطر غلتک‌های پایین است و منظور از قطر غلتک در طراحی آزمایش، قطر غلتک‌های پایین می‌باشد. محدوده متغیرهای ورودی طبق امکانات موجود و محدودیت‌های عملی تعیین شده است. با اجرای روش طرح مرکب مرکزی، طرح آزمایشات با ۳۱ آزمایش بصورت جدول ۳ می‌شود.

بدست می‌آید. سپس کرنش طولی پلاستیکی میانگین، به صورت متوسط این کرنش‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای هریک از آزمایش‌ها توابع هدف یعنی دقت زاویه‌ای و کرنش طولی پلاستیکی میانگین مطابق جدول ۳ استخراج گردید.



شکل ۷- برگشت فنری محصول نهایی بعد از خروج



شکل ۸- کرنش طولی پلاستیکی بر حسب مسافت طی شده آزمایش هشتم

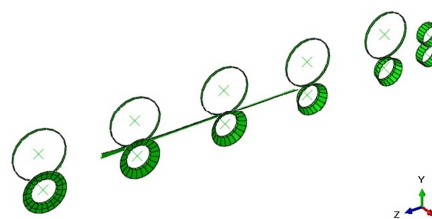
۴-مدل‌سازی به روش رویه پاسخ

در این تحقیق برای مدل‌سازی پاسخ‌های آزمایش، از روش رویه پاسخ استفاده شده است. این روش شامل تکنیک‌های ریاضی و استنتاج آماری بوده و برای تحلیل مسائلی به کار می‌رود که پاسخ سیستم از تعداد زیادی از متغیرها تأثیر می‌پذیرد و هدف، بهینه‌سازی پاسخ‌های بدست آمده می‌باشد [۱۱]. با به کارگیری روش‌های آماری از طرفی می‌توان تأثیرات یک یا چند پارامتر را بر روی یک پدیده مورد بررسی قرار داد و از طرف دیگر می‌توان 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 بدست آورد. روش رویه پاسخ دارای سه مرحله می‌باشد. مرحله اول شامل کارهای اولیه بوده که برای تعیین پارامترهای اولیه مستقل، سطوح آنها و انتخاب طرح آزمایش مناسب است. مرحله دوم به منظور اجرای آزمایش‌ها و جمع آوری داده‌ها می‌باشد. مرحله سوم این روش شامل تحلیل داده‌ها و استخراج رابطه مدل پیش‌بینی (رویه پاسخ) و ارزیابی آن است. اگر

با توجه به تعداد ایستگاه‌ها در هر آزمایش زاویه غلتکها مشخص می‌شود با توجه به اینکه زاویه فلنج‌ها در محصول نهایی ۹۰ درجه است این زاویه به تعداد ایستگاه‌ها تقسیم می‌شود. به عنوان مثال در آزمایش شماره ۲۱ که عملیات در ۵ ایستگاه انجام شود زاویه غلتک‌ها در هر ایستگاه مطابق با جدول ۴ خواهد شد. در این قالب‌ها، زاویه قالب با توجه به تعداد دروازه از صفر شروع شده و در نهایت به ۹۰ درجه می‌رسد. مدل اجزا محدود نورد ۵ ایستگاهی در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۴- زاویه غلتک‌های نورد پنج دروازه‌ای

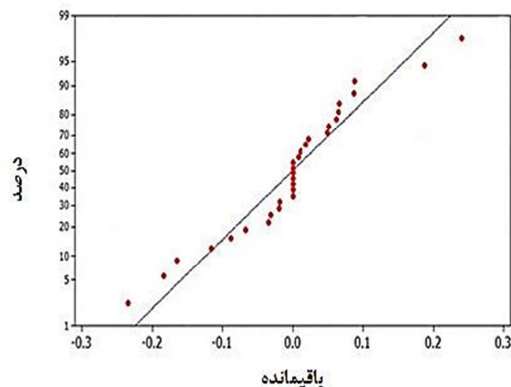
شماره دروازه	افزایش زاویه	زاویه غلتک
۱	۱۸	۱۸
۲	۱۸	۳۶
۳	۱۸	۵۴
۴	۱۸	۷۲
۵	۱۸	۹۰



شکل ۷- مدل اجزا محدود نورد پنج ایستگاهی

مطابق شرایط هر آزمایش، فرآیند با روش اجزای محدود تحلیل و مقادیر خروجی استخراج شد. با توجه به هندسه قطعه‌کار، زاویه نود درجه در محصول نهایی مورد نظر است. ولی محصول نهایی پس از خروج و طی مسافتی مطابق با شکل ۷ دارای زاویه‌ای کمتر از نود درجه می‌باشد. بنابراین مقدار برگشت فنری که به صورت دقت زاویه‌ای بیان می‌شود به عنوان تابع هدف اول مدنظر می‌باشد. دقت زاویه‌ای به صورت تقسیم زاویه نهایی محصول بر زاویه نود درجه و ضرب در صد، در نظر گرفته شده است. در واقع دقت زاویه‌ای بیانگر عکس برگشت فنری است. هرچه دقت زاویه‌ای بیشتر باشد یعنی به صد درصد نزدیک‌تر باشد، به معنای برگشت فنری کمتر است. همچنین مسافت طی شده در لبه ورق نسبت به کف ورق بیشتر است. این مقدار بسته به طول فلنج فرق خواهد داشت و هرچه فلنج طول‌تر باشد، میزان افزایش طول نیز افزایش خواهد داشت. از طرف دیگر این درازشدگی وقتی وارد ناحیه پلاستیک می‌شود می‌تواند بر روی کیفیت محصول تولیدی تأثیر بگذارد. این میزان 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 مورد بررسی قرار گیرد کرنش طولی پلاستیکی در لبه فلنج است که در اینجا کرنش طولی پلاستیکی میانگین به عنوان تابع هدف دوم بررسی می‌شود. به منظور بدست آوردن کرنش طولی پلاستیکی میانگین هر دروازه، ابتدا نمودار کرنش طولی پلاستیکی بر حسب مسافت طی شده به صورت شکل ۸

توجه به تعریف آن در بخش ۳ بیانگر عکس برگشت فنی است. با توجه به نمودار، پراکندگی نقاط اطراف خط مورب بیانگر نرمال بودن توزیع داده‌ها می‌باشد. جهت برآورد ضرایب رابطه پارامترهای موثر بر روی دقت زاویه‌ای^۱ (A.P) رابطه (۲) با استفاده از روش رویه پاسخ حاصل خواهد شد.



شکل ۹- احتمال نرمال دقت زاویه‌ای

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

با ارزیابی مدل رگرسیون و عبارت‌های آن با استفاده از روش آنالیز واریانس، مقادیر احتمال (P-value) بصورت جدول ۴ بدست آمد. مشاهده می‌شود که مدل رگرسیون و عبارت خطی در مدل موثر هستند. لازم به ذکر است که مقدار کفایت مدل رویه پاسخ با استفاده از رابطه (۳) تعریف می‌شود که برای تابع پاسخ دقت زاویه‌ای ۹۸/۸۴٪ بدست آمد که مناسب می‌باشد.

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3)$$

جهت جمع آوری داده‌ها از طرح‌های آزمایش مناسب استفاده شود، می‌توان پارامترهای مدل را بصورت مطلوب‌تر برآورد کرد. رابطه مدل می‌تواند از مرتبه اول تا مراتب بالاتر باشد [۱۳]. برای تابع پاسخ معمولاً یک چند جمله‌ای 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 بخاطر انعطاف‌پذیری که دارد بطور 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، از مدل مرتبه دوم استفاده شده است. این مدل بصورت رابطه (۱) می‌باشد.

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

۵- بهینه‌سازی به روش نمودارهای کانتوری

منظور از 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 مساله، اغلب طرح یک جواب جهت کمینه نمودن هزینه ممکن تولید یا بیشینه ساختن قابلیت اطمینان ممکن است. به دلیل چنین ویژگی‌های مهم جواب‌های بهینه، روش‌های بهینه‌یابی اهمیت زیادی در عمل به ویژه در طراحی‌های مهندسی، عملی و تصمیم‌گیری‌های تجاری دارند [۱۴]. اگر مساله بهینه‌یابی شامل بیش از یک تابع هدف باشد، فرایند یافتن یک یا چند جواب بهینه، بهینه‌یابی چند هدفه نامیده می‌شود که در این تحقیق از این روش روی هم قرار دادن نمودارهای کانتور استفاده شده است. این روش بهینه‌سازی با کشیدن نمودارهای کانتور برای چندین پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرد و با روی هم قرار دادن چندین نمودار کانتور، یک نمودار ایجاد می‌شود. این روش به مقایسه دو به دوی عوامل ورودی برای رسیدن به پاسخ بهینه، با ثابت فرض کردن عوامل ورودی دیگر می‌پردازد. به عبارت دیگر، ابتدا محدوده مجاز پاسخ‌ها مشخص شده و برای آنها کران بالا و کران پایین به گونه‌ای که جواب بین این کران‌ها مورد قبول باشد، تعیین می‌شود. سپس از بین عوامل ورودی، دو عامل مشخص شده و بقیه عوامل ثابت (در کمترین حالت، بیشترین حالت یا میانه) فرض می‌شوند. نمودار هر پاسخ طوری رسم می‌شود که منحنی صاف نشان دهنده حداقل و منحنی خط چین نشان دهنده حداکثر مقدار پاسخ باشد. ناحیه‌ای که همه پاسخ‌ها در آن مشترک باشند به رنگ سفید مشخص می‌شود که در این ناحیه، همه پاسخ‌ها در محدوده مورد قبول قرار دارند و نقاط انتخاب شده از این ناحیه، نقاط بهینه خواهند بود. به طور کلی محدوده بهینه، ناحیه همپوشانی هر دو متغیر برای محدوده بهینه می‌باشد.

۶- نتایج

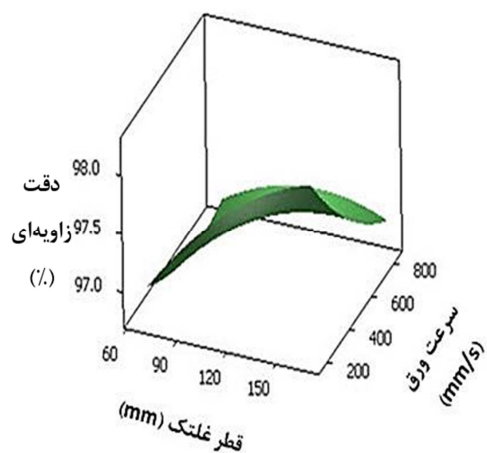
در این بخش تاثیر پارامترها بر روی پاسخ‌های حاصل شده مورد بررسی قرار گرفته و محدوده بهینه پارامترها بدست می‌آید.

۶-۱- مدل‌سازی تابع پاسخ دقت زاویه‌ای (برگشت فنی)

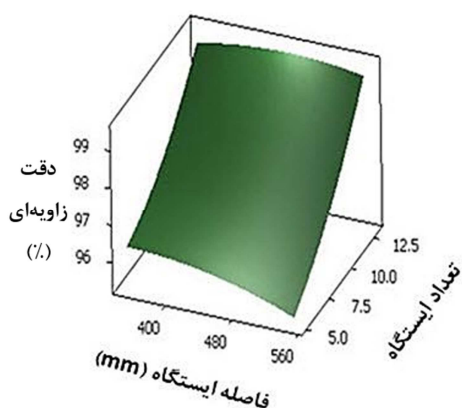
در شکل ۹ نمودار احتمال توزیع نرمال دقت زاویه‌ای یا برگشت فنی نشان داده شده است. قابل ذکر است که دقت زاویه‌ای در واقع با

¹ Angular Precision

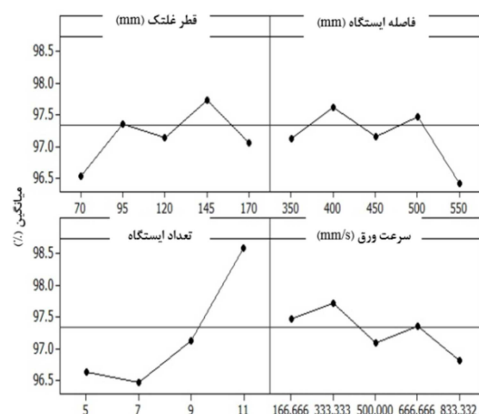
ناشی از مراحل قبلی در مراحل بعدی بهتر اصلاح می‌شود، در نتیجه برگشت فنری کمتر می‌شود.



شکل ۱۰- نمودار رویه‌ای دقت زاویه‌ای بر حسب قطر غلتک و سرعت ورق



شکل ۱۱- نمودار رویه‌ای دقت زاویه‌ای بر حسب فاصله و تعداد ایستگاه



شکل ۱۲- نمودار تأثیرات اصلی بر روی دقت زاویه‌ای

۶-۲- مدل‌سازی تابع پاسخ کرنش طولی میانگین

شکل ۱۳ نمودار احتمال توزیع نرمال کرنش طولی پلاستیکی میانگین را نشان می‌دهد. پراکندگی نقاط اطراف خط مورب نشان دهنده نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده می‌باشد. با استفاده از روش

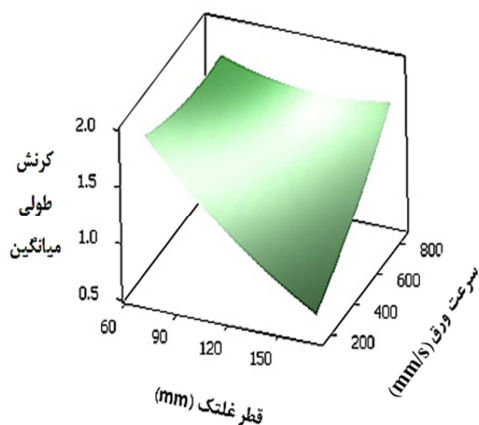
جدول ۴- جدول آنالیز واریانس برای دقت زاویه‌ای

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	۰/۳۷۰۹	۰/۳۷۰۹	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
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			

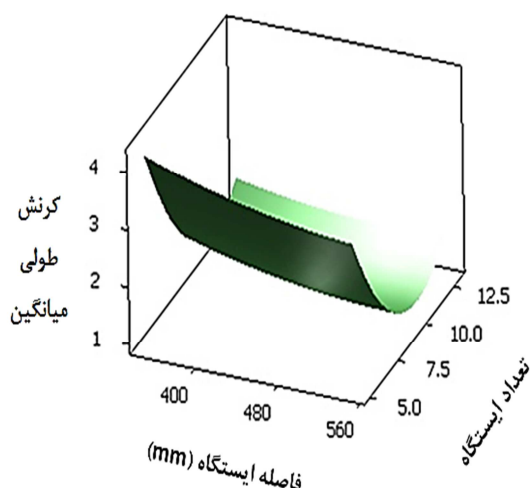
DF: درجه آزادی SS: مجموع مربعات MS: میانگین مربعات
F: عدد فیشر P: مقدار احتمال

شکل ۱۰ نمودار رویه‌ای برای پاسخ دقت زاویه‌ای بر حسب قطر غلتک و سرعت ورق را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۱ نشان دهنده نمودار رویه‌ای برای دقت زاویه‌ای بر حسب فاصله و تعداد ایستگاه‌ها می‌باشد. مطابق با شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که افزایش سرعت، دقت زاویه‌ای را کاهش داده و افزایش قطر منجر به افزایش دقت زاویه‌ای یا کاهش برگشت فنری می‌شود. در نتیجه کمترین سرعت و بیشترین قطر، بیشترین دقت زاویه‌ای (کمترین میزان برگشت فنری) را نتیجه می‌دهد. همچنین افزایش تعداد ایستگاه باعث افزایش دقت زاویه‌ای و افزایش فاصله نیز باعث کاهش دقت زاویه‌ای خواهد شد. با توجه به این نمودار، بیشترین دقت زاویه‌ای در بیشترین تعداد ایستگاه‌ها و کمترین فاصله ایستگاه‌ها رخ می‌دهد. در شکل ۱۲ نمودار اثرات اصلی نشان داده شده که بیانگر اثرات هر پارامتر بر روی پاسخ دقت زاویه‌ای می‌باشد. با توجه به اینکه هر آزمایش در شرایط متفاوت انجام می‌گیرد و با در نظر گرفتن اثرات متقابل هر آزمایش، افزایش سرعت ورق و فاصله ایستگاه‌ها باعث کاهش دقت زاویه‌ای یا افزایش برگشت فنری و افزایش قطر غلتک و تعداد ایستگاه‌ها نیز باعث افزایش دقت زاویه‌ای یا کاهش برگشت فنری می‌شود. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود تعداد ایستگاه‌ها بیشترین تأثیر را بر روی دقت زاویه‌ای یا برگشت فنری دارد در مورد علت افزایش دقت زاویه‌ای یا کاهش برگشت فنری با افزایش ایستگاه‌ها می‌توان گفت برای ایجاد یک خم معین ۹۰ درجه بر روی ورق، هر چه تعداد ایستگاه‌ها بیشتر باشد عملیات خمکاری در مراحل بیشتری اتفاق می‌افتد و برگشت فنری

همچنین مقدار کفایت مدل ۹۸/۸۲٪ بدست آمد که حاکی از مطلوب بودن مدل می باشد. در شکل ۱۴ نمودار رویه ای کرنش طولی پلاستیکی میانگین بر حسب قطر غلتک و سرعت ورق نشان داده شده است. همچنین شکل ۱۵ نمودار رویه ای کرنش طولی پلاستیکی میانگین بر حسب فاصله و تعداد ایستگاه ها را نشان می دهد. با توجه به این دو شکل، مشاهده می شود که کاهش سرعت و افزایش قطر باعث کاهش کرنش طولی پلاستیکی میانگین شده و افزایش سرعت و کاهش قطر، منجر به افزایش کرنش طولی پلاستیکی میانگین خواهد شد. افزایش فاصله و تعداد ایستگاه ها باعث کاهش مقدار کرنش پلاستیکی میانگین می شود. در شکل ۱۶ نمودارهای اثرات اصلی نشان داده شده است. اثرات اصلی بیانگر تاثیر مستقیم فاکتورها بر روی کرنش طولی پلاستیکی میانگین می باشد. مشاهده می شود که افزایش تعداد ایستگاه ها بیشترین تاثیر را در کاهش کرنش طولی پلاستیکی میانگین دارد.

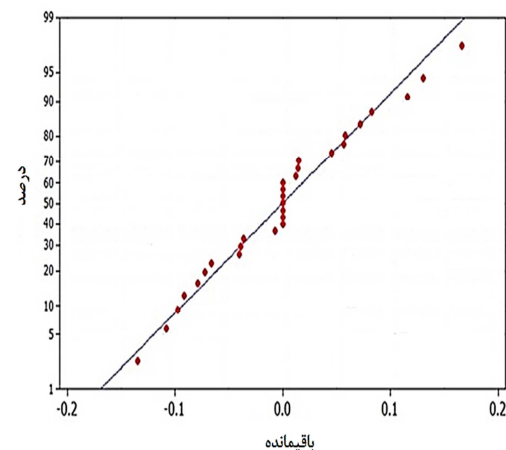


شکل ۱۴- نمودار رویه ای کرنش طولی پلاستیکی میانگین بر حسب قطر غلتک و سرعت ورق



شکل ۱۵- نمودار رویه ای کرنش طولی پلاستیکی میانگین بر حسب فاصله و تعداد ایستگاه

رویه پاسخ مدل تابع پاسخ برای کرنش طولی پلاستیکی میانگین^۱ (A.S) بصورت رابطه (۴) بدست می آید. با ارزیابی مدل رگرسیون و عبارتهای آن با استفاده از روش آنالیز واریانس برای کرنش طولی میانگین بصورت جدول ۵ بدست آمد. مشاهده می شود که مدل رگرسیون، عبارتهای خطی و درجه دو آن در مدل موثر هستند.



شکل ۱۳- نمودار احتمال نرمال کرنش طولی پلاستیکی میانگین

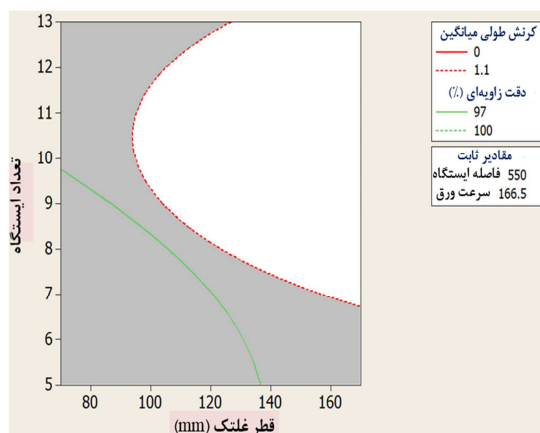
$$A.S = -0.009D - 0.005Di - 2.26N - (9.36 \times 10^{-4})V + (7.37 \times 10^{-6})D^2 + (3.94 \times 10^{-6})Di^2 + 0.123N^2 - (1.17 \times 10^{-7})V^2 - (2.29 \times 10^{-5})D \times Di - 0.001D \times N + (2.88 \times 10^{-6})D \times V - (2.85 \times 10^{-4})Di \times N - (6.25 \times 10^{-7})Di \times V + 0.00014N \times V \quad (4)$$

جدول ۵- جدول آنالیز واریانس برای کرنش طولی میانگین

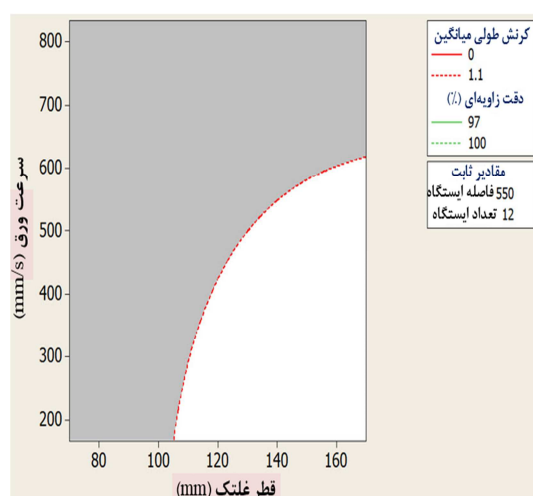
Source	DF	SS	MS	F	P
رگرسیون	۱۴	۱۲/۳۲۸۴	۰/۸۸۰۶۰	۸۳/۷۶	۰/۰۰۰
خطی	۴	۴/۳۰۳۰	۱/۰۷۵۷۵	۱۰۲/۳۳	۰/۰۰۰
D	۱	۰/۳۶۷۱	۰/۳۶۷۱	۳۴/۹۲	۰/۰۰۰
Di	۱	۰/۱۷۰۵	۰/۱۷۰۵	۱۵/۲۲	۰/۰۰۱
N	۱	۳/۳۰۵۴	۳/۳۰۵۴	۳۱۴/۴۱	۰/۰۰۰
V	۱	۰/۰۷۸۱	۰/۰۷۸۱	۷/۴۳	۰/۰۱۶
درجه دو	۴	۳/۹۹۱۰	۰/۹۹۷۷۴	۹۴/۹۱	۰/۰۰۰
D×D	۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۶	۰/۸۱۷
Di×Di	۱	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۷	۰/۲۵	۰/۶۲۲
N×N	۱	۳/۹۷۲۲	۳/۹۷۲۲	۳۷۷/۸۴	۰/۰۰۰
V×V	۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۳	۰/۸۷۰
اثر متقابل	۶	۰/۰۸۳۰	۰/۰۱۳۸۳	۱/۳۲	۰/۳۱۳
D×Di	۱	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۱۵	۱/۰۹	۰/۳۱۴
D×N	۱	۰/۰۳۸۱	۰/۰۳۸۱	۳/۶۲	۰/۰۷۸
D×V	۱	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰	۰/۱۹	۰/۶۶۸
Di×N	۱	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۱۴	۱/۰۸	۰/۳۱۶
Di×V	۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۴	۰/۸۵۲
N×V	۱	۰/۰۳۵۴	۰/۰۳۵۴	۳/۲۸	۰/۰۹۱
Error	۱۴	۱۴/۷۲	۰/۰۱۸۴		
Total	۲۸	۱۲/۴۷۵۶			

¹ Average Strain

در شکل ۱۸ نمودار کانتور برای قطر غلتک و تعداد ایستگاه نشان داده شده است. در این نمودار نیز مطابق توضیحات داده شده، فاصله ایستگاه و سرعت ورق مقادیر نقطه بهینه بدست آمده به روش تابع مطلوبیت قرار گرفته است. شکل ۱۹ نمودار کانتور را برای قطر غلتک و سرعت ورق نشان می‌دهد. مطابق این نمودار فاصله و تعداد ایستگاه مقادیر بدست آمده از بهینه سازی به روش تابع مطلوبیت قرار داده شده‌اند. محدوده سفید رنگ نیز محدوده‌ای است که هر دو پاسخ در مقدار بهینه واقع شده‌اند. با انتخاب قطر مشخص، می‌توان محدوده سرعت ورق را تعیین کرد.

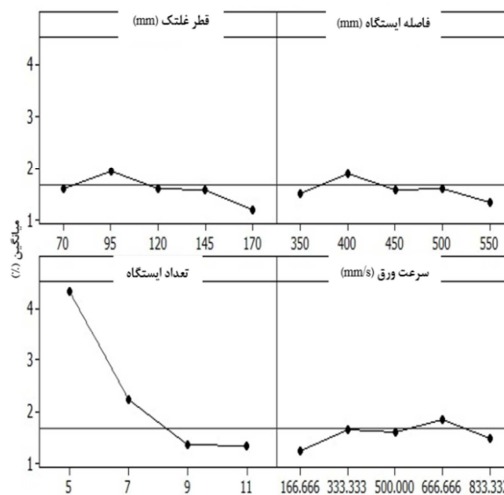


شکل ۱۸- نمودار کانتور برای قطر غلتک و تعداد ایستگاه



شکل ۱۹- نمودار کانتور برای قطر غلتک و سرعت ورق

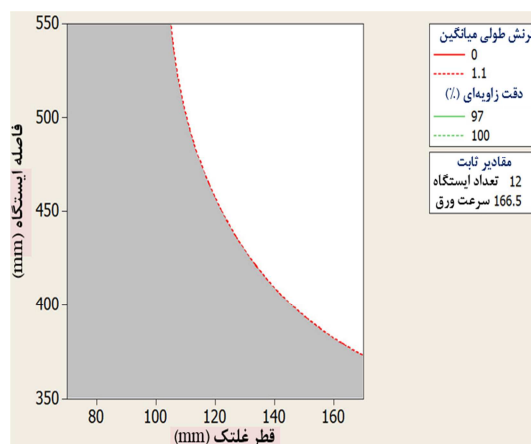
همچنین شکل ۲۰ نمودار کانتور برای فاصله و تعداد ایستگاه را نشان می‌دهد. در این نمودار قطر غلتک و سرعت ورق مقادیر بدست آمده از روش تابع مطلوبیت می‌باشد. محور افقی نمودار نشان دهنده فاصله ایستگاه و محور عمودی نشان دهنده تعداد ایستگاه می‌باشد. با انتخاب یک مقدار برای تعداد ایستگاه و کشیدن خطی موازی محور افقی مقدار مناسب فاصله ایستگاه برای اینکه پاسخ‌ها از ناحیه بهینه خارج نشوند تعیین می‌شود.



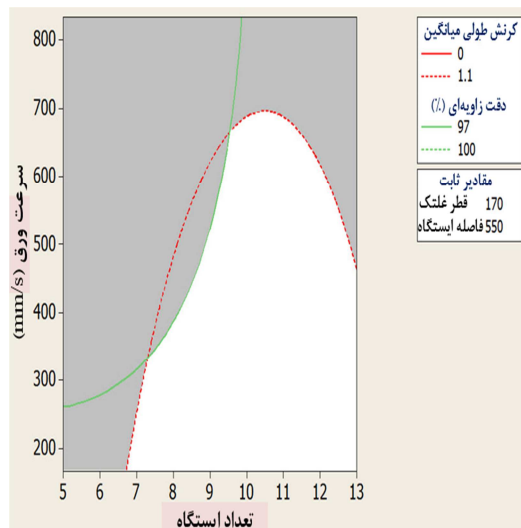
شکل ۱۶- نمودار تأثیرات اصلی بر روی کرنش طولی میانگین

۳-۶- نتایج بهینه‌سازی

با توجه به اینکه بهترین حالت برای دقت زاویه‌ای که بر حسب درصد بیان می‌شود ۱۰۰٪ بوده که به معنی شکل دقیق محصول خروجی می‌باشد. بنابراین کران بالا ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. کران پایین نیز هر چه بیشتر در نظر گرفته شود محدوده بهینه‌سازی کوچک‌تر و دقیق‌تر خواهد بود. از این رو، کران پایین برای دقت ابعادی ۹۷ انتخاب شده است. مقدار کرنش طولی پلاستیکی میانگین نیز هرچه قدر کمتر باشد بهتر خواهد بود. بنابراین کران پایین آن را برابر صفر و کران بالا را نیز برابر ۱/۱ انتخاب شده است. هرچقدر کران بالا پایین‌تر باشد بهینه‌سازی بهتر صورت گرفته و جواب‌ها محدودتر خواهند شد. شکل ۱۷ نمودار کانتور برای دو پارامتر قطر غلتک و فاصله ایستگاه را نشان می‌دهد. تعداد ایستگاه و سرعت ورق به ترتیب ۱۲ عدد و ۱۶۶/۵ میلی‌متر بر ثانیه تعیین شده است. ناحیه سفید رنگ، ناحیه‌ای که دو پاسخ در محدوده بهینه قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. یعنی هر دو پاسخ در این منطقه در محدوده بهینه موردنظر واقع شده‌اند. مطابق با شکل ۱۷ ضمن ثابت فرض کردن تعداد ایستگاه و سرعت ورق در محدوده مشخص شده، با انتخاب یک قطر مشخص، یک خط عمودی به موازات محور فاصله ایستگاه رسم می‌شود و در منطقه‌ای که خط عمودی در ناحیه سفید رنگ واقع شود به عنوان منطقه بهینه برای فاصله ایستگاه‌ها در آن قطر مشخص تعیین می‌شود. به عنوان مثال در صورت انتخاب مقدار ۱۶۰ میلی‌متر برای قطر و کشیدن خط به موازات محور عمودی، فاصله بهینه در حدود ۳۷۵ تا ۵۵۰ میلی‌متر واقع خواهد شد.



شکل ۱۷- نمودار کانتور برای قطر غلتک و فاصله ایستگاه



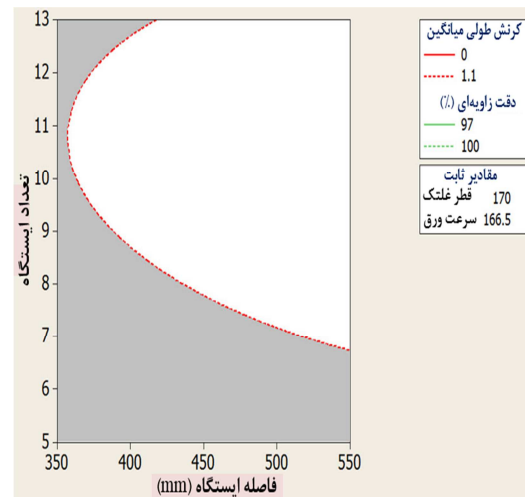
شکل ۲۲- نمودار کانتور برای تعداد ایستگاه و سرعت ورق

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر چهار پارامتر قطر غلتک، سرعت خطی ورق، فاصله و تعداد ایستگاه بر روی دقت زاویه‌ای یا برگشت فتری و کرنش طولی پلاستیکی میانگین، در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مدل‌سازی شده و محدوده مناسب پارامترها با نمودارهای کانتوری استخراج شد. پس از طراحی آزمایش‌ها به روش مرکب مرکزی و اجرای آنها با روش اجزای محدود، مدل رویه پاسخ توابع استخراج شد. سپس بهینه‌سازی سازی همزمان توابع پاسخ‌ها به منظور کمینه کردن برگشت فتری یا بیشینه کردن دقت زاویه‌ای و کمینه کردن کرنش طولی پلاستیکی میانگین و با استفاده از روش هم انداختن نمودارهای کانتوری صورت گرفت. بررسی نمودار رویه‌ای برگشت فتری نیز نشان داد که افزایش تعداد ایستگاه بر روی برگشت فتری تاثیر مثبت داشته یعنی باعث کاهش آن و افزایش دقت زاویه‌ای شده و افزایش سرعت باعث کاهش دقت زاویه‌ای می‌شود. کاهش فاصله نیز تا حدودی تاثیر مثبت بر روی دقت زاویه‌ای می‌گذارد و برگشت فتری را کاهش می‌دهد. بررسی نمودار رویه‌ای کرنش طولی پلاستیکی میانگین نشان می‌دهد که افزایش قطر غلتک و فاصله ایستگاه‌ها، کرنش طولی پلاستیکی میانگین ورق را کاهش داده و نیز افزایش سرعت ورق، باعث افزایش کرنش طولی پلاستیکی میانگین می‌شود. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که روش رویه پاسخ با دقت مناسبی تاثیر پارامترهای ورودی بر توابع پاسخ را برازش می‌کند. همچنین بهینه‌سازی فرآیند با روش نمودارهای کانتور، محدوده بهینه پارامترها را برای بیشترین دقت زاویه‌ای (کمترین برگشت فتری) و کمترین کرنش طولی پلاستیکی میانگین را نشان می‌دهد.

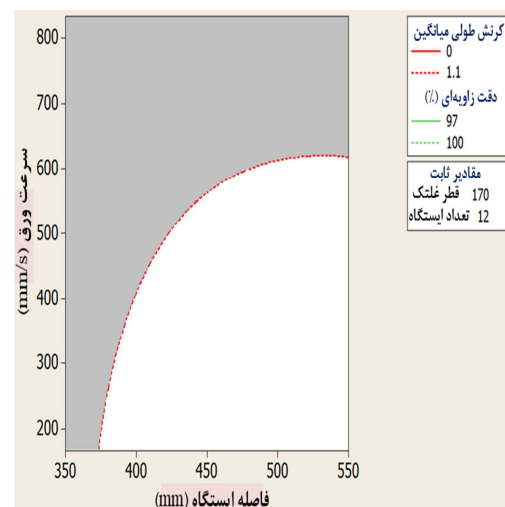
۸- تشکر و قدردانی

در انجام این پروژه شرکت فولاد مهر سهند نهایت همکاری و مشاوره را انجام دادند که در اینجا از حمایت این عزیزان تشکر و قدردانی می‌شود.



شکل ۲۰- نمودار کانتور برای فاصله و تعداد ایستگاه

شکل ۲۱ نمودار کانتور برای فاصله ایستگاه و سرعت ورق را نشان می‌دهد. در این نمودار نیز قطر و تعداد ایستگاه مطابق مقادیر بدست آمده است. محور افقی فاصله ایستگاه و محور عمودی سرعت ورق را نشان می‌دهد. ناحیه سفید رنگ محدوده بهینه هر دو فاکتور می‌باشد. با انتخاب سرعت مشخص، فاصله ایستگاه مناسب را به گونه‌ای که پاسخ‌ها در محدوده بهینه واقع شوند تعیین می‌گردد.



شکل ۲۱- نمودار کانتور برای فاصله ایستگاه و سرعت ورق

شکل ۲۲ نمودار کانتور برای تعداد ایستگاه و سرعت ورق را نشان می‌دهد. قطر غلتک و فاصله ایستگاه نیز مطابق مقادیر بدست آمده از روش تابع مطلوبیت انتخاب شده‌اند. محور افقی نشان دهنده تعداد ایستگاه و محور عمودی نیز نشان دهنده سرعت ورق می‌باشد. برای بدست آوردن سرعت بهینه در محدوده اعداد وارد شده، تعداد ایستگاه مشخصی را انتخاب نموده و سپس با کشیدن خطی موازی محور عمودی، محدوده بهینه برای سرعت تعیین خواهد شد.

۹-مراجع

- [1] Halmos G.T., Roll Forming Handbook, Published by Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] Safdarian R. and Moslemi Naeini H., The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section, Thin-Walled Struc, Vol. 92, pp. 130-136, 2015.
- [3] Bhattacharyya D., Smith C., Yee I., and Collins 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., Vol. 1, pp. 422-427, 1984.
- [4] Heislitz F., Livatyali H., Ahmetoglu M.A., Kinzel G.L., and Altan, T., Simulation of roll forming process with 3-D FEM Code PAM-STAMP, J. Materials Proc. Tech., Vol. 59, No. 1-2, pp. 59-67, 1996.
- [5] Hong S., Lee S., and Kim N., A parametric study on forming length in roll forming, J. Materials Proc. Tech., Vol. 113, No. 1-3, pp. 774-778, 2001.
- [6] Panton S.M., Zhu S.D., and Duncan J.L., Geometric constraints on the forming path in roll forming channel sections, Proc. Inst. Mech. Eng. 2006.
- [7] Zhu S.D. and Panton S.M., The effects of geometric variables in roll forming a channel section, Proc. Inst. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manuf., Vol. 210, No. 2, pp. 127-134, 1996.
- [۸] پناهی‌زاده رحیم‌و ولی‌اله، مسلمی نائینی حسن، لیاقت غلامحسین، سلمانی تهرانی مهدی، بررسی عددی و تجربی اثر مدل‌های سخت‌شوندگی روی پدیده برگشت فنری در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع U شکل متقارن، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۶، صفحه ۸۲-۷۴، تابستان ۱۳۹۲.
- [۹] سلمانی تهرانی مهدی، بهرامی مسلم، بررسی تحلیلی و عددی طول تغییر شکل در شکل‌دهی غلتکی لوله گرد، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مجلسی، سال ۳، شماره ۲، صفحه ۳۵-۲۵، تابستان ۱۳۸۸.
- [10] McClure C.K., and Li H., Roll forming simulation using finite element analysis, Manuf Review, Vol. 8, No. 2, pp. 114-122, 1995.
- [11] Montgomery D.C. Design and analysis of experiments, 4th edition, Wiley, 1997.
- [12] Modanloo M., Hasanzadeh R., and Esmaili P., The Study of Deep Drawing of Brass-steel Laminated Sheet Composite Using Taguchi Method, Int. J. Eng., TRANSACTIONS A: Basics, Vol. 29, No. 1, pp. 103-108, 2016.
- [13] Alimirzaloo V. Optimization of the Final Forging Process of the Compressor Blade of an Aerial Motor, Ph.D. thesis., Amirkabir Uni. Tech., 2011.
- [14] Alimirzaloo V. and Modanloo M., Minimization of the Sheet Thinning in Hydraulic Deep Drawing Process Using Response Surface Methodology and Finite Element Method, Int. J. Eng., TRANSACTIONS B: Applications, Vol. 29, No. 2, pp. 264-273, 2016.