



بررسی عددی و تجربی پارامترهای روش شکل دهی تدریجی ورق و بهینه سازی چند هدفه توسط الگوریتم عصبی-ژنتیک

حسین محمدی نجف آبادی^۱، علی اصغر عطایی^{۲*}، مسعود شریفی فر^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تهران، تهران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، aataee@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۷ بهمن ۱۳۹۱

پذیرش: ۲۳ اسفند ۱۳۹۱

ارائه در سایت: ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

شکل دهی تدریجی ورق

روش اجزای محدود

الگوریتم عصبی-ژنتیک

روش شکل دهی تدریجی ورق فلزی از جمله روش های نوین و بسیار انعطاف پذیر در فناوری شکل دهی ورق های فلزی است که برای تولید قطعات به تعداد کم و ساخت مدل نمونه اولیه، مورد استفاده قرار می گیرد. برای تولید قطعات با خواص مطلوب، با بیشترین کیفیت و کمترین هزینه، تعیین میزان بهینه برای پارامترهای فرایند ضروری می باشد. در این تحقیق پس از شبیه سازی فرایند با استفاده از نرم افزار آباکوس، تأثیر سه پارامتر شامل ضریب اصطکاک، قطر ابزار و اندازه گام عمودی بر سه پارامتر نیروی عمودی ابزار، ضخامت ورق تغییر شکل یافته و مقدار برگشت فنری با استفاده از مدل اجزای محدود در سطوح مختلف بررسی شد. سپس با استفاده از اطلاعات به دست آمده، مدلی توسط شبکه عصبی مصنوعی در نرم افزار متلب به دست آمده و سپس این مدل به عنوان تابع ورودی به الگوریتم بهینه سازی ژنتیک چند هدفه ارائه گردید تا پارامترهای بهینه فرایند جهت به دست آمدن حداقل نیروی عمودی، حداقل برگشت فنری و حداقل کاهش ضخامت به دست آیند و جبهه پارتوی مربوطه حاصل شود.

Numerical and Experimental Investigation of Incremental Sheet Metal Forming Parameters and Multi-objective Optimization Using Neural-genetic Algorithm

Hosein Mohammadi Najafabadi¹, Ali Asghar Atai^{2*}, Masoud Sharififar³

1-Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

3- School of Metallurgy and Material Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

*P.O.B. 11155-4563 Tehran, aataee@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 January 2013
Accepted 13 March 2013
Available Online 04 May 2014

Keywords:

Incremental Sheet Metal Forming
Finite Element Method
Neural-Genetic Algorithm

ABSTRACT

The Incremental Sheet Metal Forming (ISMF) process is a new and flexible method that is well suited for small batch production or prototyping. In this study, after the process simulation with ABAQUS software and verification of results through experimental tests, the effects of three parameters including friction coefficient, tool diameter and vertical step size on three objectives including vertical force, minimum thickness of deformed sheet and amount of spring-back are investigated. A neural-network model is developed based on simulation data and the effects of parameters are studied on each objective. Also multi-objective genetic algorithm is performed to get the Pareto front of optimum points.

۱- مقدمه

شکل دهی تدریجی ورق های فلزی^۱ یک روش جدید برای ساخت ورق های فلزی است که برای تولید قطعات به تعداد کم و ساخت مدل نمونه اولیه مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. اصول این روش به این ترتیب است که ابتدا مسیر شکلی که قرار است بر روی ورق ایجاد شود، توسط نرم افزار تولید به کمک کامپیوتر، به صورت جی کد ایجاد شده و بعد از فراخوانی جی کدها در دستگاه فرز با کنترل عددی کامپیوتری، مسیر مورد نظر توسط ابزار سرکروی نصب شده بر روی دستگاه طی شده و با اعمال نیرو از طرف ابزار بر روی ورق مقید شده، شکل مورد نظر بر روی ورق ایجاد می شود [۲]. فرایند شکل دهی

تدریجی ورق به دو نوع کلی تقسیم بندی می شود:

۱- شکل دهی تدریجی تک نقطه ای^۲:

در این روش شکل دهی، ورق از اطراف کاملاً مقید شده و سپس از یک ابزار سرکروی برای اعمال نیروی شکل دهی استفاده می شود. در این روش از ماتریس های خاص استفاده نمی شود.

۲- شکل دهی تدریجی دو نقطه ای^۳:

این روش علاوه بر استفاده از ابزار و ورق گیر، بر پایه حضور یک قالب در زیر ورق انجام می شود تا ورق مورد نظر در دو نقطه تماسی، یک نقطه بین ابزار و

2- Single Point Incremental Forming

3- Two Point Incremental Forming

1- Incremental Sheet Metal Forming

Please cite this article using:

H. Mohammadi Najafabadi, A.A. Atai, M. Sharififar, Numerical and Experimental Investigation of Incremental Sheet Metal Forming Parameters and Multi-objective Optimization Using Neural-genetic Algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 167-174, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نظر، نمونه‌های تخت آزمایش کشش از آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ طبق استاندارد ASTM E08 مطابق شکل ۱ توسط قالب پرس تهیه شدند.

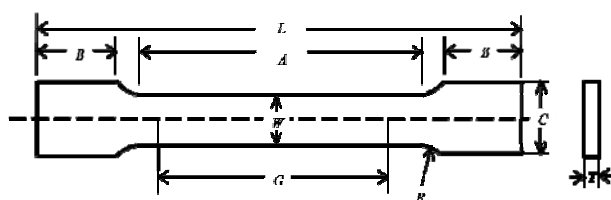
برای بررسی ایزوتروپ بودن ورق مورد استفاده، نمونه‌ها در جهت نورد^۱ و عمود بر جهت نورد^۲ تحت کشش قرار گرفتند.

شبیه‌سازی اجزای محدود برای فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. قطعه مورد بررسی در این پژوهش به شکل یک هرم ناقص با زاویه شیب ۶۰ درجه با عمق ۲۳mm می‌باشد که شکل و ابعاد آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

شرایط شبیه‌سازی به طور خلاصه در زیر آورده شده است: ابزار شکل‌دهی یک جسم صلب تحلیلی^۳ و سرعت دورانی ابزار ۶۰۰rpm در نظر گرفته شد. ورق مورد استفاده به عنوان یک جسم پوسته‌ای همگن، سه‌بعدی، قابل تغییر شکل، با ابعاد ۱×۲۰×۲۰ mm و المان‌های از نوع S4R با اندازه ۲/۵mm در نظر گرفته شد (شکل ۳). انتخاب اندازه و نوع المان تأثیر قابل توجهی بر جواب‌های مسئله دارد که بایستی با روش سعی و خطا المان بهینه برای شبیه‌سازی مشخص شود. با کوچک کردن اندازه مش و مقایسه جواب‌های به دست آمده، در شرایطی که جواب‌ها تفاوت قابل توجهی نکنند، اندازه بهینه مش به دست می‌آید. همچنین در این شبیه‌سازی المان‌های ورق از نوع "کواد دومینیت^۴" و تعداد نود هر المان چهار عدد انتخاب شده و رفتار مکانیکی ورق، الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شد و برای به دست آوردن خواص مکانیکی آن از داده‌های آزمایش کشش سرد استفاده شد.

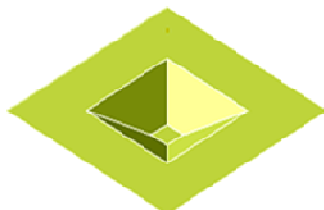
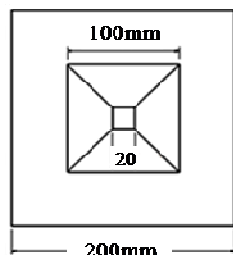
برای این که ابزار، مسیر مورد نظر (شکل ۴) را برای تولید شکل طی نماید، جی‌کدهای مسیر مورد نظر بایستی توسط نرم‌افزار استخراج شده و نقاط به دست آمده برای تعیین مسیر ابزار در شرایط مرزی نرم‌افزار آباکوس وارد شود. برای این منظور از نرم‌افزار کتیا استفاده شد.

در این تحقیق از تحلیل دینامیکی در حل گر "ایکسپلیسیت^۵" استفاده گردید. همچنین برای اعمال خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ در نرم‌افزار آباکوس، از داده‌های آزمایش کشش سرد این آلیاژ استفاده شد.



شکل ۱ ابعاد آزمایش کشش استاندارد [۱۱]

(G=25 mm, W=6 mm, T=1 mm, R=6 mm, L=100 mm, A=32 mm, B= 30 mm, C=10 mm)



شکل ۲ ابعاد و نمای سه بعدی قطعه آزمایش

سطح ورق در بالای ورق و یک نقطه بین سطح ورق و قالب در پایین ورق شکل‌دهی شود [۳].

روش تک‌نقطه‌ای توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات اولیه در مورد این روش در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ توسط جسویت [۴]، لیچ [۵] و فراتینی [۶] انجام شد. آن‌ها نشان دادند که این فرایند می‌تواند بر روی یک دستگاه فرز با کنترل عددی کامپیوتری سه محوره استاندارد با به کارگیری یک نرم‌افزار تولید به کمک کامپیوتر، برای ایجاد مسیر ابزار، انجام شود. در سال ۲۰۰۲ کیم و پارک تأثیر پیشروی ابزار در هر مرحله را بر روی قابلیت شکل‌پذیری ورق با استفاده از آزمایش‌های تجربی و تحلیل اجزای محدود بررسی کردند و دریافتند که با کاهش پیشروی، قابلیت شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد [۷].

در سال ۲۰۰۷ دافلو و همکارانش با استفاده از مطالعات تجربی تأثیر چهار پارامتر اندازه گام عمودی، قطر ابزار، زاویه دیواره شکل و ضخامت ورق را بر روی نیروی مصرفی در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بررسی کردند. در این تحقیق دو نیروی F_p و F_s که به ترتیب حداکثر مقدار نیروی مصرفی و میانگین نیروی مصرفی در طی فرایند شکل‌دهی را نشان می‌دهند، بررسی شد. آن‌ها در این بررسی به این نتیجه رسیدند که با افزایش هر چهار پارامتر اندازه گام عمودی، قطر ابزار، زاویه دیواره شکل و ضخامت ورق، هر دو نیروی مورد بررسی افزایش یافته است [۸]. همچنین در سال ۲۰۰۹، پتک و همکاران، تأثیر پارامترهای فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای را بر مقدار شکل‌پذیری ورق و مقدار نیروی عمودی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر ابزار و اندازه گام عمودی، نیروی عمودی و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد [۹].

برای تولید قطعات با خواص مطلوب، با کیفیت بالا و هزینه پایین، تعیین میزان بهینه برای پارامترهای این فرایند ضروری می‌باشد. برای مثال بهینه کردن پارامترهای فرایند می‌تواند منجر به انتخاب اقتصادی‌تر دستگاه شده، از شکست ورق در نیروهای بالا جلوگیری کرده و از نظر هندسی شکل نهایی قطعه کار بهبود یابد. در این تحقیق پس از شبیه‌سازی فرایند با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، تأثیر سه پارامتر ضریب اصطکاک، قطر ابزار و اندازه گام عمودی بر سه پارامتر نیروی عمودی ابزار، ضخامت ورق تغییر شکل یافته و مقدار برگشت فنری با استفاده از روش اجزای محدود در سطوح مختلف بررسی شد. همچنین برای تأیید آزمایش‌های شبیه‌سازی، آزمایش‌های تجربی بر روی سه نمونه انجام گرفت. پس از آن با استفاده از اطلاعات به دست آمده، مدلی توسط روش شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار متلب به دست آمده و سپس این مدل به عنوان تابع ورودی به الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه ارائه گردید تا پارامترهای بهینه فرایند جهت به دست آمدن حداقل نیروی عمودی، حداقل برگشت فنری و حداقل کاهش ضخامت (حداکثر مینیمم ضخامت) به دست آیند و جبهه پارتوی مربوط به آن حاصل شود.

۲- روش تحقیق

ورق مورد استفاده در این پژوهش از جنس آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ با ضخامت ۱mm می‌باشد. این آلیاژ از آلیاژهای پر کاربرد آلومینیوم بوده و به دلیل مقاومت به خوردگی عالی و چکش‌خواری آن شناخته شده است.

به منظور یکسان شدن خواص ورق در جهات مختلف و همچنین بهبود شکل‌پذیری ورق‌های مورد استفاده، ورق‌ها در دمای ۳۵۰°C به مدت یک ساعت آنیل شدند [۱۰]. برای به دست آوردن خواص مکانیکی آلیاژ مورد

- 1- Rolling Direction
- 2- Transverse Direction
- 3- Analytical Rigid Body
- 4- Quad-Dominated
- 5- Explicit

آزمایش‌های عملی برای شکل‌دهی ورق مورد نظر انجام گرفت. برای بدست آوردن متغیرهای بهینه جهت بدست آمدن حداقل نیروی عمودی، حداقل برگشت فنری و حداقل کاهش ضخامت، تابع تخمین به دست آمده از آموزش شبکه عصبی به عنوان تابع ورودی به الگوریتم ژنتیک چندهدفه در جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب ۲۰۰۸ ارائه گردیده و جبهه پارتوی مربوطه به دست آمد. توابع هدف، متغیرهای ورودی، قیود و اهداف مسأله به ترتیب در زیر آورده شده است.

- توابع هدف مسأله:

$Y1 = (\text{mm})$ حداقل ضخامت ورق

$Y2 = (N)$ مقدار نیروی عمودی

$Y3 = (\text{mm})$ مقدار برگشت فنری

- متغیرهای ورودی مسأله:

$X1 =$ ضریب اصطکاک

$X2 = (\text{mm})$ اندازه قطر ابزار

$X3 = (\text{mm})$ اندازه گام عمودی

- قیود مسأله:

$$0.15 \leq X1 \leq 0.5$$

$$15 \leq X2 \leq 5$$

$$2X3 \leq 1$$

- اهداف مسأله:

Max (Y1)

Min (Y2)

Min (Y3)

لازم به ذکر است که بهینه ساز مورد استفاده توابع هدف را حداقل می‌سازد، بنابراین هدف اول به صورت Min (-Y1) در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

منحنی شکل ۶ نتایج آزمایش کشش در جهت نورد و عمود بر جهت نورد در نرخ کرنش ۱/۵۰۰۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، به دلیل یکسان بودن تقریبی نتایج در دو جهت، ورق مورد استفاده ایزوتروپ بوده، بنابراین برای استفاده در فرایند شبیه‌سازی از داده‌های تست کشش سرد عمود بر جهت نورد مطابق با جدول ۱ استفاده شد.

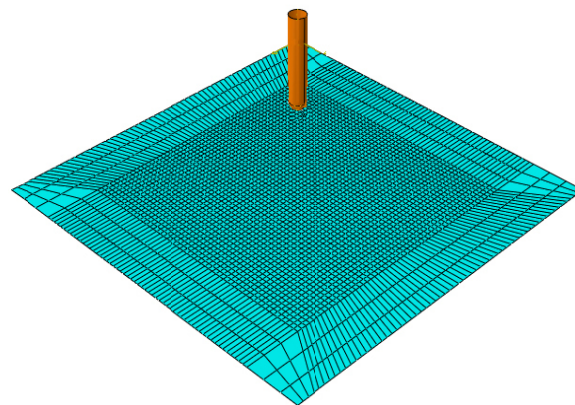
شکل ۷ توزیع ضخامت در نمونه شبیه‌سازی شده را در شرایط ضریب اصطکاک ۰/۰۵، قطر ابزار ۱۵ میلی‌متر و اندازه گام عمودی ۱/۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. در این شکل حداقل ضخامت ۰/۸۳۰۸mm و در لبه‌های قطعه کار اتفاق افتاده است.

۳-۱- حداقل ضخامت ورق

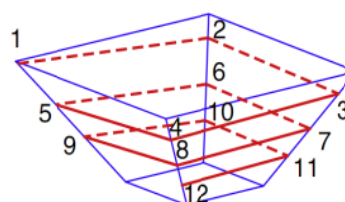
شکل ۸ تأثیر ضریب اصطکاک، اندازه قطر ابزار و اندازه گام عمودی را بر حداقل ضخامت ورق نشان می‌دهد. در این نمودارها هر نقطه نشان دهنده میانگین ۹ حالت هر یک از پارامترهای ورودی می‌باشد. همان‌طور که از این نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه گام عمودی و قطر ابزار، حداقل ضخامت ورق کاهش یافته است. دلیل این کاهش می‌تواند به افزایش نیروی کششی در ورق و غلبه نازک شدگی بر کرنش سختی و در نتیجه کاهش حداقل ضخامت مربوط باشد. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک تأثیری بر حداقل ضخامت ورق نداشته است.

۳-۲- مقدار نیروی عمودی

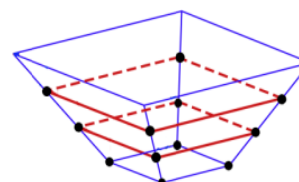
شکل ۹ تأثیر ضریب اصطکاک، اندازه قطر ابزار و اندازه گام عمودی را بر مقدار نیروی عمودی نشان می‌دهد.



شکل ۳ ورق و ابزار مدل شده در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۴ مسیر حرکت ابزار



شکل ۵ نقاط مشخص شده بر روی شکل تئوری برای اندازه‌گیری برگشت فنری

جدول ۱ خواص مکانیکی ماده، عمود بر جهت نورد در نرخ کرنش ۱/۵۰۰۵

مدول یانگ (GPa)	کرنش پلاستیک	تنش سیلان (MPa)
۶۹	۰	۲۸
	۰/۰۱۳	۴۰/۲۵
	۰/۰۲۴	۵۰/۸۱
	۰/۰۴۲	۶۰/۵۸
	۰/۰۷۱	۷۰/۴۹
	۰/۱۲۶	۸۰/۵۵
	۰/۱۹۴	۸۶/۴۵

برای یافتن شرایط بهینه پارامترهای مؤثر بر این فرایند، عوامل قطر ابزار، اندازه گام عمودی و ضریب اصطکاک به عنوان متغیرهای ورودی مسأله در نظر گرفته شدند. فاکتورهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها عبارتند از:

- قطر ابزار: ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر
- اندازه گام عمودی: ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر
- ضریب اصطکاک: ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵

پس از انجام ۲۷ (۳³) مرتبه اجرای شبیه‌سازی در سطوح بالا، مقادیر نیروی عمودی وارده از طرف ابزار به ورق، مقدار برگشت فنری ورق و حداقل مقدار ضخامت ورق به عنوان خروجی‌های شبیه‌سازی استخراج شد. برای به دست آوردن مقدار برگشت فنری ورق در آزمایش‌های شبیه‌سازی، مقدار اختلاف ارتفاع نقاط مشخص شده در شکل تئوری (شکل ۵) و ارتفاع این نقاط در شکل‌های به دست آمده از آزمایش‌های شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. سپس میانگین برگشت فنری این نقاط به عنوان برگشت فنری ورق محاسبه شد. پس از انجام شبیه‌سازی به منظور معتبرسازی نتایج به دست آمده،

در این نمودارها نیز هر نقطه نشان دهنده میانگین ۹ حالت هر یک از پارامترهای ورودی می‌باشد. همان‌طور که از این نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه گام عمودی و اندازه قطر ابزار، مقدار نیروی عمودی افزایش یافته که با نتایج دافلو و پتک کاملاً همخوانی دارد [۸،۹]. علت افزایش نیرو با افزایش اندازه قطر ابزار، می‌تواند به افزایش سطح تماس ابزار با سطح ورق با افزایش قطر ابزار مربوط باشد [۹]. ولی ضریب اصطکاک تأثیر چندانی بر ضخامت ورق نداشته و با افزایش ضریب اصطکاک، تقریباً تغییری در مقدار نیروی عمودی مشاهده نمی‌شود که با نتیجه به دست آمده از پژوهش پتک [۹] همخوانی دارد.

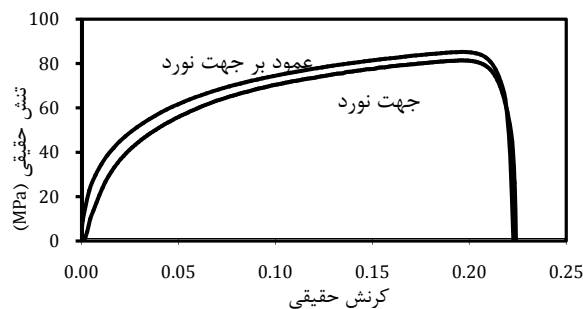
۳-۳- مقدار برگشت فنری ورق

شکل ۱۰ تأثیر ضریب اصطکاک، اندازه قطر ابزار و اندازه گام عمودی را بر مقدار برگشت فنری ورق نشان می‌دهد. در این نمودارها نیز هر نقطه نشان دهنده میانگین ۹ حالت هر یک از پارامترهای ورودی می‌باشد. همان‌طور که از این نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه گام عمودی و ضریب اصطکاک، برگشت فنری ورق کاهش یافته است. در رابطه با علت کاهش برگشت فنری با افزایش اندازه گام، شواهدی وجود دارد که چنانچه حساسیت به نرخ کرنش در رفتار ماده وجود داشته باشد، با افزایش گام برگشت فنری کاهش می‌یابد [۱۲]. اما لازم به ذکر است که برای ورق مورد استفاده در این پژوهش تست کشش در سه نرخ کرنش $1/s$ ، $0.001/s$ و $0.0001/s$ در جهت نورد و عمود بر جهت نورد در دمای اتاق انجام شد و ضریب حساسیت به نرخ کرنش m در جهت نورد 0.04 و عمود بر جهت نورد 0.33 به دست آمد. لذا چنین می‌توان نتیجه گرفت که این آلیاژ در دمای اتاق به نرخ کرنش حساس نیست. پس نمی‌توان کاهش برگشت فنری را در اینجا به نرخ کرنش نسبت داد و باید عوامل دیگری در این موضوع تأثیرگذار باشند که این مسأله نیاز به بررسی بیشتری دارد.

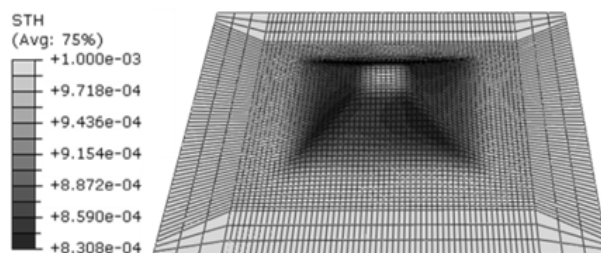
۳-۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی

به منظور معتبرسازی نتایج شبیه‌سازی، آزمایش‌های عملی برای شکل‌دهی ورق مورد نظر در سه حالت انجام شد. در تحقیقات، ضریب اصطکاک بین سطح ابزار و ورق آلومینیومی در حالت استفاده از روانکار روغن 0.05 در نظر گرفته شده است [۱۳،۱۴]، لذا ورق آلومینیومی قبل از انجام آزمایش کاملاً روغنکاری شد و این مقدار ضریب اصطکاک برای آن منظور گردید. همچنین سرعت دورانی ابزار 600 rpm و سرعت پیشروی آن 500 mm/min در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ یک نمونه از قطعات به دست آمده از آزمایش‌های عملی را در شرایط ضریب اصطکاک 0.05 ، قطر ابزار 15 mm و اندازه گام عمودی $1/5\text{ mm}$ میلی‌متر نشان می‌دهد.

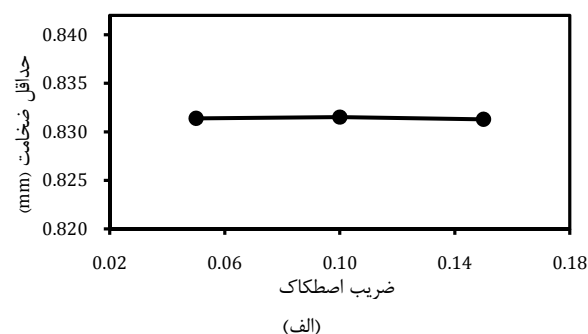
همچنین در جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی به همراه درصد خطای آن‌ها در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. آزمایش ۱ مربوط به شرایط ضریب اصطکاک 0.05 ، قطر ابزار 5 mm و اندازه گام عمودی 1 mm ، آزمایش ۲ مربوط به شرایط ضریب اصطکاک 0.05 ، قطر ابزار 10 mm و اندازه گام عمودی 2 mm و آزمایش ۳ مربوط به شرایط ضریب اصطکاک 0.05 ، قطر ابزار 15 mm و اندازه گام عمودی $1/5\text{ mm}$ می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نتایج با درصد خطای قابل قبولی در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی، به دست آمده‌اند. بنابراین نتایج شبیه‌سازی مورد تأیید می‌باشند. علت خطای بیشتر برگشت فنری می‌تواند به عدم همخوانی نقاط سنجش عمق ورق در عمل و در شبیه‌ساز مربوط باشد.



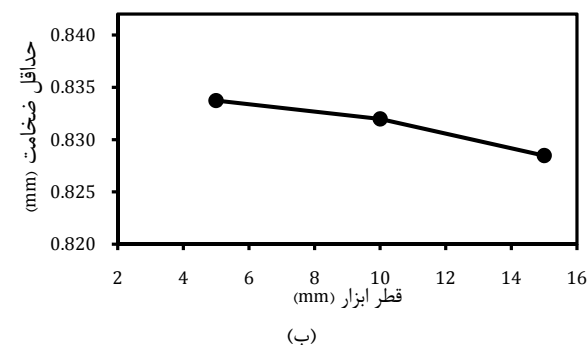
شکل ۶ منحنی تنش-کرنش حقیقی در جهت نورد و عمود بر جهت نورد



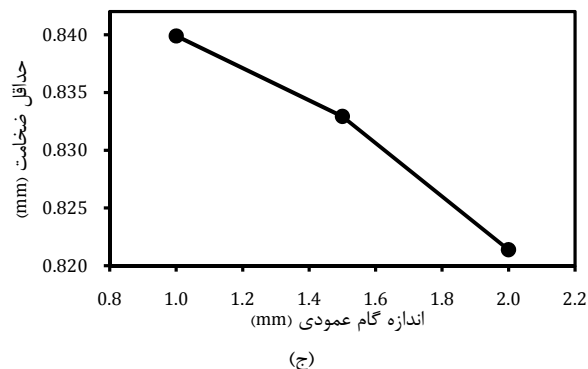
شکل ۷ توزیع ضخامت در مدل شبیه‌سازی شده با ضریب اصطکاک 0.05 ، قطر ابزار 15 mm میلی‌متر و اندازه گام عمودی $1/5\text{ mm}$ میلی‌متر



(الف)

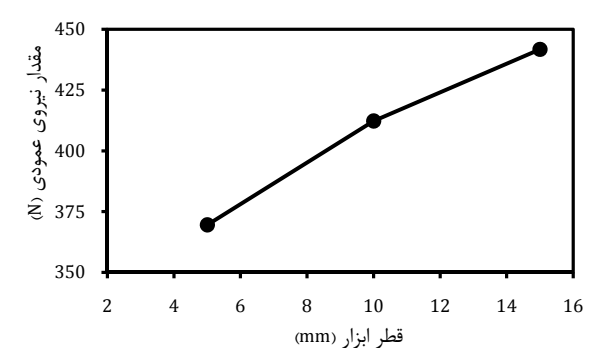
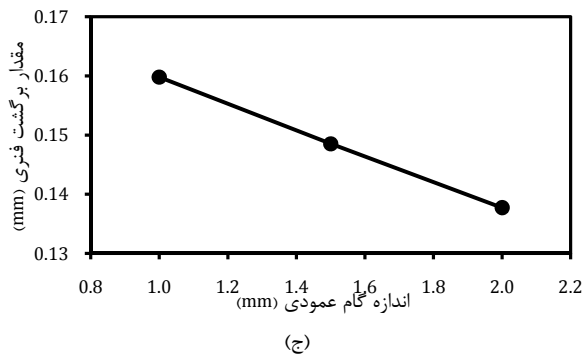
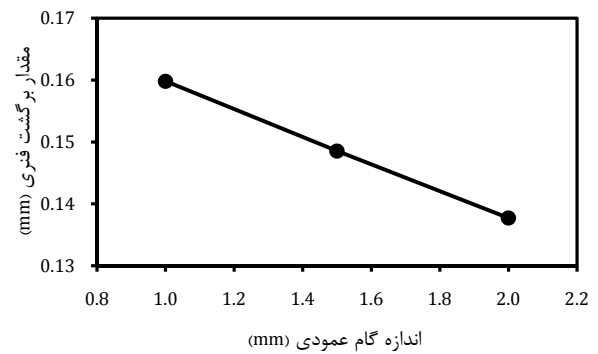
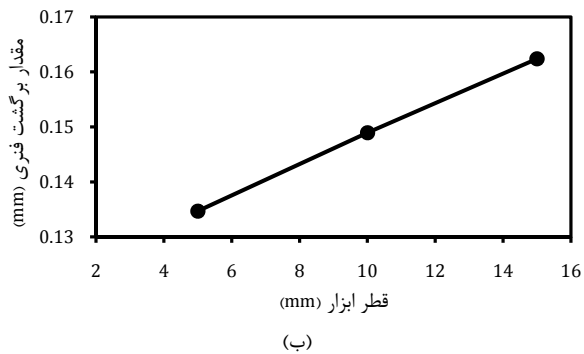
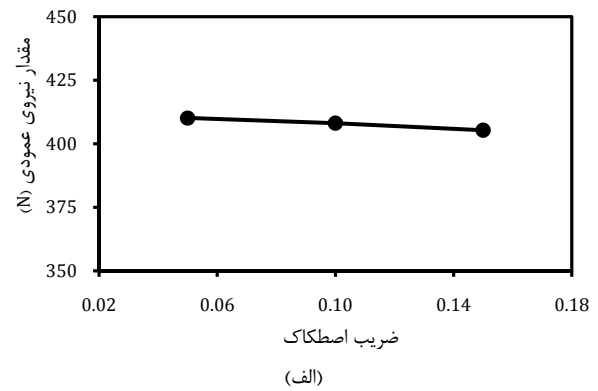
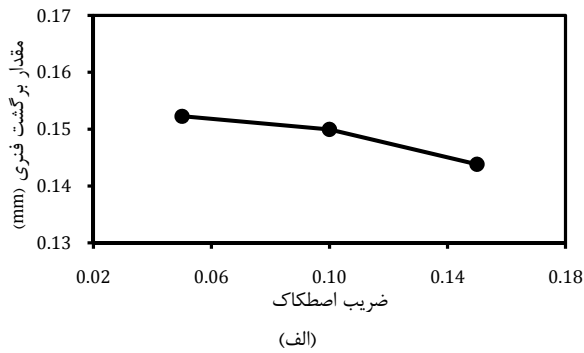


(ب)



(ج)

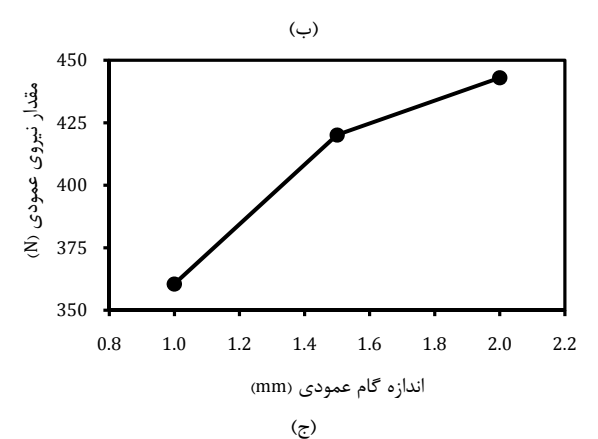
شکل ۸ تأثیر الف- ضریب اصطکاک، ب- اندازه قطر ابزار و ج- اندازه گام عمودی بر حداقل ضخامت ورق



شکل ۱۰ تأثیر الف- ضریب اصطکاک، ب- اندازه قطر ابزار و ج- اندازه گام عمودی بر مقدار برگشت فنری ورق



شکل ۱۱ قطعه به دست آمده در شرایط ضریب اصطکاک ۰/۰۵، قطر ابزار ۱۵ میلی‌متر و اندازه‌ی گام عمودی ۱/۵ میلی‌متر

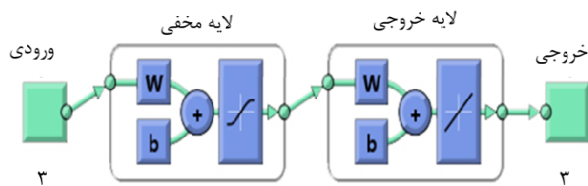


شکل ۹ تأثیر الف- ضریب اصطکاک، ب- اندازه قطر ابزار و ج- اندازه گام عمودی بر مقدار نیروی عمودی

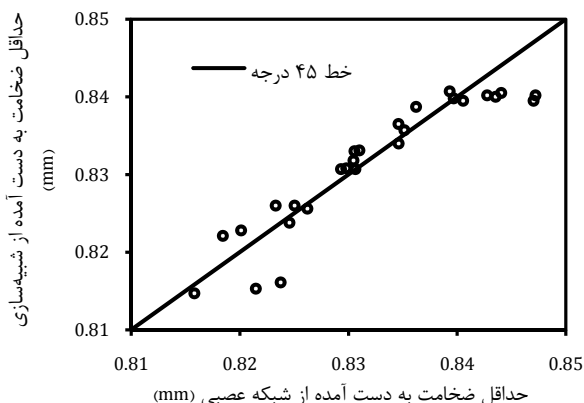
جدول ۲ نتایج آزمایش‌های عملی به همراه درصد خطای آن‌ها در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی

شماره آزمایش	حداقل ضخامت ورق در شبیه‌سازی (mm)	حداقل ضخامت ورق در آزمایش‌های عملی (mm)	درصد خطا	مقدار برگشت فنری در شبیه‌سازی (mm)	مقدار برگشت فنری در آزمایش‌های عملی (mm)	درصد خطا
۱	۰/۸۳۹۵	۰/۸۴	۰/۰۶	۰/۱۴۲۵	۰/۱۶۱۷	۱۳/۴۷
۲	۰/۸۲۲۱	۰/۸۲	-۰/۲۶	۰/۱۳۹۲	۰/۱۵۸۳	۱۳/۷۲
۳	۰/۸۳۰۸	۰/۸۳	-۰/۱	۰/۱۷۶	۰/۱۵۶۳	-۱۱/۱۹

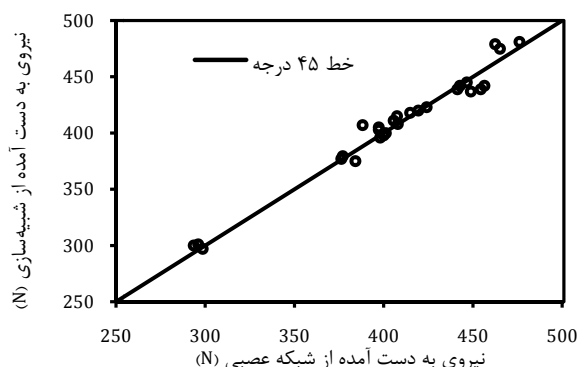
مقادیر حداقل هر سه تابع تشکیل می‌شود) تعیین شده و نزدیکترین نقطه از جبهه پارتو به یوتوپیا، به عنوان این نقطه بینابینی معرفی و مقادیر متغیرهای طراحی متناظر با آن ارائه می‌شود.



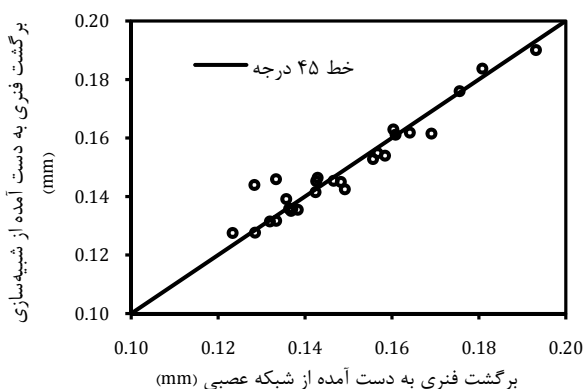
شکل ۱۲ شبکه عصبی طراحی شده برای مدل‌سازی نتایج شبیه‌سازی



شکل ۱۳ مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی برای حداقل ضخامت ورق



شکل ۱۴ مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی برای مقدار نیروی عمودی



شکل ۱۵ مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی برای مقدار برگشت فنری

۳-۵- آموزش شبکه عصبی مصنوعی

به منظور ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های حاصل از آزمایش‌های شبیه‌سازی و ایجاد یک تابع تخمین مناسب، شبکه عصبی مناسب با مشخصات زیر در نرم‌افزار متلب آموزش داده شد:

یک شبکه با یک لایه مخفی دارای ۱۰ نورون و تابع انتقال تانژانت-سیگموئید^۱ و با یک لایه خروجی دارای سه نورون و تابع انتقال خطی. شکل ۱۲ این شبکه را نشان می‌دهد.

این شبکه، یک شبکه پیش‌خور^۲ از نوع پس‌انتشار^۳ بوده که با الگوریتم لونبرگ-مارکوارت^۴ آموزش می‌بیند. در این شبکه ۱۹ داده آزمایش برای آموزش شبکه عصبی، ۴ داده برای آزمایش شبکه و ۴ داده برای صحت‌سنجی شبکه در حین آموزش شبکه به طور تصادفی توسط نرم‌افزار انتخاب گردید.

شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ مقایسه بین مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و شبکه عصبی را به ترتیب برای مینیمم ضخامت ورق ($R=0.9294$) مقدار نیروی عمودی ($R=0.9865$) و مقدار برگشت فنری ($R=0.9587$) نشان می‌دهد. تطابق داده‌های آموزش با خط ۴۵ درجه و ضریب همبستگی بالا نشان از آموزش بسیار خوب و قابل قبول شبکه می‌باشد.

۳-۶- بهینه‌یابی چندهدفه توسط الگوریتم ژنتیک

به منظور یافتن شرایط بهینه برای پارامترهای ضریب اصطکاک، اندازه قطر ابزار و اندازه گام عمودی برای حداکثر کردن مقدار مینیمم ضخامت، حداقل کردن مقدار نیروی عمودی و برگشت فنری، تابع پیش‌بینی به دست آمده از آموزش شبکه عصبی به عنوان تابع ورودی در جعبه ابزار "بهینه‌یابی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک" وارد شده و پس از آن با در نظر گرفتن موارد زیر، شرایط بهینه برای پارامترهای ضریب اصطکاک، اندازه قطر ابزار و اندازه گام عمودی، به دست آمد.

- جمعیت اولیه: ۲۰۰ کوروموزوم
- تعداد نسل: ۲۰۰۰ نسل
- نرخ تقاطع: ۰/۸

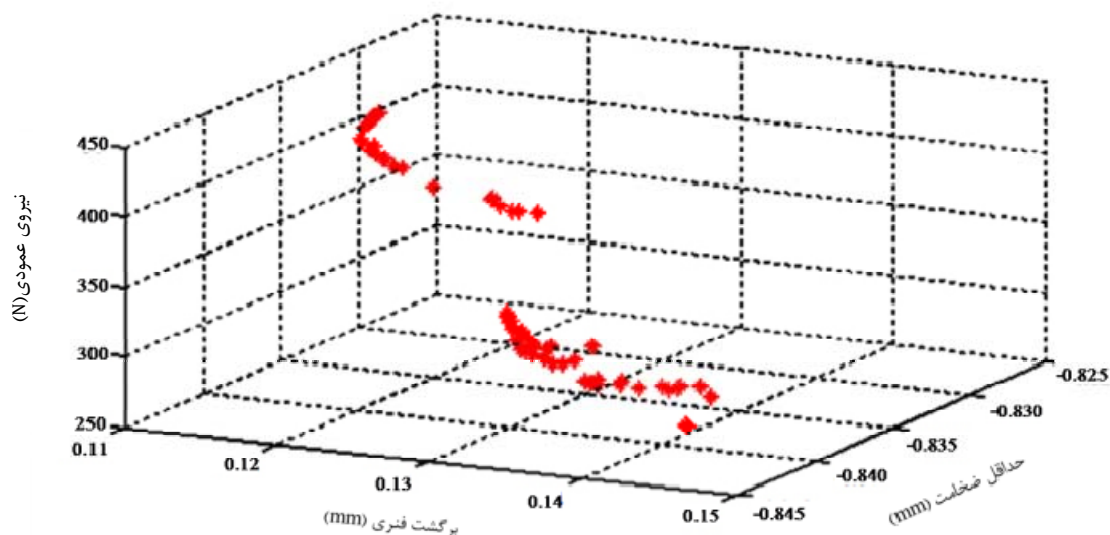
الگوریتم ژنتیک چند هدفه با ابزارهای متداول جهش و آمیزش صورت گرفته و اعضای هر نسل به صورت غیر مغلوب^۵ مرتب‌سازی شده‌اند تا به تدریج جبهه پارتو نهایی شکل بگیرد. نمودار شکل ۱۶ نقاط جبهه پارتو (مقادیر بهینه توابع به دست آمده) را برای مقادیر بهینه ضریب اصطکاک، اندازه قطر ابزار و اندازه گام عمودی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این اطلاعات مربوط به ۵ اجرای مختلف بهینه‌ساز است که همگی به طور تقریبی یک جبهه پارتو را نتیجه داده‌اند و می‌تواند بیانگر همگرایی روش به نقاط بهینه باشد. همان‌طور که در شکل جبهه پارتو مشاهده می‌شود، بخش‌هایی از این جبهه خالی به نظر می‌رسند. طبق بررسی نقاط بدست آمده در آخرین نسل الگوریتم بهینه‌سازی مشاهده می‌شود که نقاطی وجود دارند که مقدار نیروی مربوط به آن‌ها (هدف دوم) در این نواحی خالی قرار می‌گرفته، اما به دلیل آن که در مرتب‌سازی نقاط، جزء نقاط جبهه قرار نگرفته‌اند، این بخش‌ها خالی دیده می‌شوند.

همان‌طور که متداول است برای معرفی یک نقطه بینابینی که از نظر همه اهداف مناسب باشد، در فضای توابع هدف، نقطه یوتوپیا (نقطه‌ای که از

1- Tan-Sigmoid
2- Feed Forward
3- Back Propagation
4- Levenberg-Marquardt
5- NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm)

جدول ۳ مقایسه خروجی‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در نقطه بهینه به دست آمده

حداقل ضخامت ورق در شبیه‌سازی (mm)	حداقل ضخامت ورق در بهینه‌سازی (mm)	درصد خطا	مقدار نیرو در شبیه‌سازی (N)	مقدار نیرو در بهینه‌سازی (N)	درصد خطا	برگشت فنری در شبیه‌سازی (mm)	برگشت فنری در بهینه‌سازی (mm)	درصد خطا
۰/۸۲۹۲	۰/۸۳۹۳	-۱/۲۱	۳۲۶	۳۰۲/۷	۷/۱	۰/۱۲۰۸	۰/۱۳۰۱	-۸/۳۴



شکل ۱۶ جبهه پارتو نقاط بهینه

- اندازه گام عمودی برای حداقل نیروی عمودی، حداقل برگشت فنری و بیشینه حداقل ضخامت، مقداری مختلف به دست آمد.

۵-مراجع

- [1] E. Hagan, J. Jeswiet, A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217, No. 2, pp. 213-225, 2003.
- [2] J. Kopac, Z. Kampus, Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162-163, No.3, pp. 622-628, 2005.
- [3] 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.
- [4] J. Jeswiet, E. Hagan, Rapid Prototyping of a Headlight with Sheet Metal, *Proceedings of Shemet, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (Canada)*, pp. 165-170, 2001.
- [5] D. Leach, A.J. Green, A.N. Bramley, A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts, *9th International Conference on sheet metal*, pp. 211-218, 2001.
- [6] L. Filice, L. Fratini, F. Micari, Analysis of Material Formability in Incremental Forming, *Annals of the CIRP*, Vol. 51, No. 3, pp. 199-202, 2002.
- [7] Y.H. Kim, J.J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 130-131, No.2, pp. 42-46, 2002.
- [8] J. Dufloy, Y. Tunc, A. Szekeres, P. Vanherck, Experimental study on force measurements for single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, No. 4, pp. 65-72, 2007.
- [9] A. Petek, K. Kuzman, J. Kopač, Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming, *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 35, No. 3, pp. 107-116, 2009.
- [10] A.B. Lopes, F. Barlat, J.J. Gracio, J.F. Ferreira Duarte, Effect of texture and microstructure on strain hardening anisotropy for aluminum deformed in uniaxial tension and simple shear, *International Journal of Plasticity*, Vol. 19, No. 2, pp. 1-22, 2003.
- [11] "Standard test methods for tension testing of metallic materials", ASTM, 2004.
- [12] L.R. Sanchez, Modeling of springback, strain rate and Bauschinger effects for two-dimensional steady state cyclic flow of sheet metal subjected to bending under tension, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, No. 1, pp. 429-439, 2010.

با توجه به مقادیر جبهه پارتو بیشترین مقدار حداقل ضخامت با مقدار ۰/۸۴۲۴mm، حداقل نیرو با مقدار ۲۷۸/۵۲N و حداقل برگشت فنری با مقدار ۰/۱۱۱۹ mm می‌باشند که تشکیل نقطه یوتوپیا با مختصات (۰/۱۱۱۹mm، ۰/۸۴۲۴mm، ۲۷۸/۵۲N) را می‌دهند؛ و نقطه‌ای که روی جبهه پارتو کمترین فاصله را از این نقطه دارد، نقطه‌ای است با مختصات (۰/۱۳۰۱mm، ۰/۸۳۹۳mm، ۳۰۲/۷N) با مقدار ضریب اصطکاک ۰/۰۵، اندازه قطر ابزار ۵ mm و اندازه گام عمودی ۱/۳۱ mm.

همچنین به منظور ارزیابی نقطه بهینه به دست آمده، شبیه‌سازی فرایند در این نقطه انجام گرفت. در جدول ۳ خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی با خروجی‌های نقطه بهینه به دست آمده مقایسه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، این نتایج با درصد خطای قابل قبولی در مقایسه با نتایج بهینه‌سازی، به دست آمده‌اند. بنابراین نقطه بهینه به دست آمده مورد تأیید می‌باشد.

۴- نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج آزمایش‌های شبیه‌سازی، شبکه‌ی عصبی آموزش داده شده و مقادیر بهینه برای پارامترهای فرایند عبارتند از:

- شبکه عصبی که با استفاده از نتایج شبیه‌سازی آموزش داده شده بود، توانست به خوبی ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی را پیش‌بینی کند.
- نقطه یوتوپیا به مختصات (۰/۱۱۱۹mm، ۰/۸۴۲۴mm، ۲۷۸/۵۲N) و نقطه‌ای از جبهه پارتو با کمترین فاصله از نقطه یوتوپیا با مختصات (۰/۱۳۰۱mm، ۰/۸۳۹۳mm، ۳۰۲/۷N) در ضریب اصطکاک ۰/۰۵، اندازه قطر ابزار ۵ mm و اندازه گام عمودی ۱/۳۱ mm به دست آمد.
- قطر ابزار برای حداقل نیروی عمودی، حداقل برگشت فنری و بیشینه حداقل ضخامت ورق، ۵mm به دست آمد.
- ضریب اصطکاک برای دستیابی به حداقل نیروی عمودی و برگشت فنری و بیشینه حداقل ضخامت، ۰/۱۵ به دست آمد.

[14] M. Durante, A. Formisano, A. Langella, MemolaCapeceMinutolo F., The influence of tool rotation on an incremental forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 4621-4626, 2009.

[13] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.54, No. 2, pp. 88-114, 2005.