



بررسی عددی و بهینه‌سازی پارامترهای قالب فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی

امین آرمانیان^۱، حسن خادمی‌زاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران.

* اصفهان، خمینی شهر، صندوق پستی ۱۱۹-۸۴۱۷۵، khademizadeh@iaukhsh.ac.ir

چکیده

امروزه مواد فوق ریزدانه به دلیل خواص کم‌نظیر خود جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. با کاهش اندازه دانه، سهم اتم‌های موجود در مرز دانه‌ها افزایش یافته و زیاد شدن مرز دانه‌ها موجب جلوگیری از حرکت ناب‌جایی‌ها و بالا رفتن استحکام می‌شود. یکی از روش‌های تولید مواد فوق‌ریزدانه، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد. جهت اعمال تغییر شکل پلاستیک می‌توان از روش‌های بسیاری استفاده نمود که در این پژوهش از کانال‌های زاویه‌دار موازی استفاده می‌شود. جهت بررسی عددی این فرایند از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و جهت بهینه‌سازی نتایج از روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این پژوهش اثر پارامترهای قالب که شامل زاویه کانال، طول لوله، افزایش اختلاف قطر و ضریب اصطکاک می‌باشد، بررسی می‌شود. نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک و طول لوله مورد آزمایش هر کدام جداگانه بر همگن شدن توزیع کرنش بسیار نقش داشته است، به طوری که با افزایش مقدار ضریب اصطکاک تعریفی و کاهش میزان طول لوله، توزیع کرنش به سمت همگنی و یکنواختی سوق پیدا خواهد کرد. تفاضل افزایش قطر لوله و زاویه کانال قالب تاثیر چندانی بر بهبود یکنواختی توزیع کرنش نخواهند داشت. از سوی دیگر افزایش ضریب اصطکاک، طول لوله و افزایش قطر لوله هر کدام جداگانه منجر به افزایش نیروی فرایند می‌شوند درحالی که افزایش زاویه کانال قالب منجر به کاهش نیروی شکل‌دهی شد. همچنین باتوجه به نتایج استخراج شده از بهینه‌سازی پارامترها، ایده‌آل‌ترین مسیر از پارامترهای ورودی ضریب اصطکاک معادل ۰/۰۵، طول لوله ۴۰ میلی‌متر، زاویه کانال ۱۴۰ درجه و تفاضل افزایش قطر $0/65t_0$ می‌باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۴ مهر ۱۳۹۶

پذیرش: ۳۰ آبان ۱۳۹۶

ارائه در سایت: ۲۰ دی ۱۳۹۶

کلیدواژگان

کانال‌های زاویه‌دار موازی

مواد فوق‌ریزدانه

تغییر شکل پلاستیک شدید

شبیه‌سازی المان محدود.

Numerical Investigation and Optimization of Die Parameters in Parallel Tubular Channel Angular Pressing Process

Amin Armanian¹, Hassan Khademi zadeh^{2*}

1- MSc Student, Department of Mechanic Engineering, Azad Islamic University, Khomeinishahr Branch, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of of Mechanic Engineering, Azad Islamic University, Khomeinishahr Branch, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

* P.O.B. 84175-119, Khomeinishahr, Isfahan, Iran, khademizadeh@iaukhsh.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 26 September 2017

Accepted 21 November 2017

Available Online 1 January 2018

Keywords

Parallel Tubular Channel Angular Pressing

ABSTRACT

In this day and age, the ultra-fine materials due to their unique properties have found a special place in various industries. By reducing the grain size, the share of atoms at the grain boundaries has been increased and the increase of grain boundaries prevents the movement of dislocations and increases the strength. One method of producing ultra-fine materials is imposing severe plastic deformation. In order to apply Plastic deformation,

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Amin Armanian, Hassan Khademi zadeh, Numerical Investigation and Optimization of Die Parameters in Parallel Tubular Channel Angular Pressing Process, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 8, No. 4, pp. 78-88, 2018 (In Persian)

ultra-fine materials
severe plastic deformation
Finite Element Simulation

disparate methods can be used that parallel angled channels are used in this study. ABAQUS finite element software is used to analyze the process numerically and to optimize the results, neural network and genetic algorithm methods have been used. In this study, the effects of die parameters including channel angle, tube length, increase of diameter difference and the friction coefficient are checked out. The results depicted that the coefficient of friction and pipe length which are tested, played a pivotal role in the homogenization of strain distribution separately; that by increasing the supposed friction coefficient and reducing the length of the tube, the strain distribution will be homogeneous. The difference between the increase in the diameter of pipe and the angle of die's channel will have little impact on the improved uniformity of strain distribution. On the other hand, increasing the coefficient of friction, pipe length and diameter of pipe ends with an increase in the force of process while increasing the angle of die's channel culminated in reducing the formation force. Additionally, considering the results obtained from optimization of parameters, the most ideal way of input parameters is a friction coefficient of 0/05, tube length of 40 mm, channel angle of 140 degrees and minus increase channel diameter of 0/65t0.

۱- مقدمه

در طی یک دهه گذشته تولید مواد فلزی فوق ریزدانه^۱ (نانوساختار) به طور ویژه‌ای مورد توجه محققین دنیا قرار گرفته است. این مواد به عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی مطرح هستند که خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در مقایسه با مواد درشت‌دانه به طور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌باشد. جهت تولید این مواد نیاز به فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد. هنگامی که یک فلز تغییر شکل می‌دهد، بسته به مقدار نیروی وارد شده، این تغییر می‌تواند به دو صورت در فلز اتفاق بیفتد. تغییر شکل الاستیک و یا تغییر شکل الاستیک به اضافه تغییر شکل پلاستیک. تغییر شکل الاستیک آن قسمت از تغییر شکل است که قابل بازگشت می‌باشد و حالت فنری داشته بدین صورت که وقتی بار اعمالی برداشته شود، فلز تغییر شکل یافته به حالت اول باز می‌گردد. در این نوع تغییر شکل، کرنشی که به فلز وارد می‌شود، متناسب با مقدار تنش وارد شده است، به این معنی که رابطه بین تنش و کرنش اعمالی به صورت خطی است که به شیب این خط، مدول الاستیک (E) گفته می‌شود. این رابطه را می‌توان با قانون فتر (یا همان قانون هوک) معادل در نظر گرفت [۱ و ۲].

هنگامی که تنش اعمالی به فلز، از حد محدوده الاستیک فراتر رود، فرایند تغییر شکل وارد محدوده پلاستیک می‌شود. تغییر شکل پلاستیک که در ادامه تغییر شکل الاستیک می‌آید،

یک فرایند غیرقابل بازگشت است و تغییر شکل دائمی محسوب می‌شود.

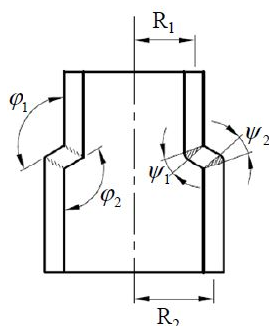
هنگامی که یک فلز در دماهای نه چندان بالا، تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد، ساختار درونی فلز شروع به مقاومت در برابر تغییر شکل بیشتر می‌کند. در نتیجه برای ادامه تغییر شکل، باید مقدار تنش بیشتری اعمال نمود. به این حالت ایجاد شده در فلز، کار سختی^۳ و یا کرنش سختی گفته می‌شود. در واقع، کارسختی باعث افزایش استحکام و سختی فلز در اثر تغییر شکل می‌شود [۳]. در مقابل این افزایش استحکام، فلز داکتیلیته^۴ خود را از دست می‌دهد و قابلیت تغییر شکل آن پایین می‌آید و بنابراین این محدودیت باعث می‌شود که افزایش استحکام بیشتر فلز توسط اعمال کار مکانیکی محدود شود، چراکه باعث شکست ماده خواهد شد. بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی صنعتی که بر روی فلزات انجام می‌گیرد، به دلیل این محدودیت فلزات، امکان افزایش استحکام فلز را تا مقدار مورد نظر ندارد [۴]. در روش‌های مرسوم، در برخی موارد هم محدودیت ابزار وجود دارد، به این معنی که اعمال کرنش بالاتر به ماده منجر به خرابی دستگاه و ابزارآلات می‌شود [۵].

تغییر شکل پلاستیک شدید، در واقع مجموعه روش‌هایی است که طی آن می‌توان کار مکانیکی نسبتاً زیادی را به فلز اعمال نمود، بدون این که فلز دچار شکست و ترک‌خوردگی شود. واژه (شدید) به این خاطر اطلاق می‌شود که با توجه به

۱- Work hardening
۲- Ductility

۱- UltraFine Grained
۲- Nanostructured

فرجی و همکاران [۹] به تجزیه و تحلیل تغییر شکل پلاستیک در کانال موازی لوله‌های زاویه دار پرداختند. آنها با بیان این‌که این روش اخیراً برای تغییر شکل پلاستیک شدید و ریز کردن دانه‌ها به کار می‌رود از این روش استفاده نمودند و بیان کردند که این فرایند از دو نیم سیکل تشکیل شده است و توسط پارامترهای متعددی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. آنها پارامتر-های زاویه کانال، زاویه انحنا و ضخامت ($R_2 - R_1$) را مطابق شکل (۲) مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که با افزایش زاویه کانال مشاهده شد که کرنش پلاستیک کاهش یافته است به طوری که با افزایش زاویه به میزان ۶۰٪ مقدار کرنش به میزان ۰/۲۵ کاهش یافته است و همچنین با افزایش زاویه نیرو نیز کاهش یافته است به طوری که با افزایش زاویه به مقدار ۶۰٪ مقدار نیرو به میزان ۰/۲ کاهش یافته است. با افزایش زاویه انحنا نیز به مقدار ۲۰٪ مقدار کرنش به میزان ۱۷/۲۴ افزایش یافته است و میزان نیرو نیز کاهش یافته است. و در نهایت بیان کردند که با ۲/۳۴ برابر کردن مقدار ضخامت نیز کرنش به میزان ۳۷/۵ افزایش می‌یابد و نیرو با توجه به ضخیم شدن قطعه افزایش می‌یابد.

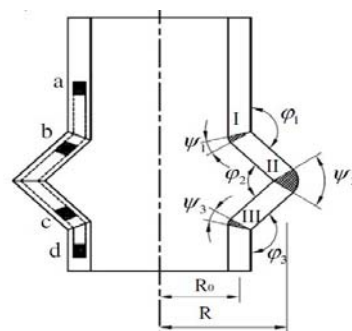


شکل ۲ نقشه لوله شکل‌دهی داده شده و پارامترهای تعریف شده آن [۹]

غدیری و همکاران [۱۰] به بررسی اثرات پارامترهای موثر در عملکرد قالب زاویه‌دار لوله‌ای موازی پرداختند آنها با بیان این‌که این فرایند عمدتاً برای تولید قطعات سبک وزن با استحکام و قابلیت اطمینان بالا هدف کار خود را بررسی پارامترهای موثر این فرایند اعلام نمودند. آنها در این تحقیق به طراحی یک قالب بهینه به منظور افزایش همگنی ریز ساختار ماده و همچنین کاهش نیروی عملی فرایند تولید لوله انجام شده است. قالب طراحی شده بر اساس فرایند فشار در کانال‌های زاویه دار لوله-ای موازی طراحی شده است. این فرایند به دلیل دارا بودن نیروی مورد نیاز کمتر و همگنی بیشتری نسبت به سایر فرایندها، دارای مزیت است. آنها پارامترهای زوایای کانال، زوایای

تمهیداتی که در این روش‌ها انجام می‌گیرد، تغییر شکل شدیدی را می‌توان به فلز در مقایسه با سایر روش‌های معمولی شکل‌دادن فلزات اعمال نمود. یکی دیگر از مزایای تغییر شکل پلاستیک شدید این است که نه تنها موجب افزایش استحکام فلز می‌شود، بلکه در بسیاری از اوقات افت داکتیلیته حذف شده و گاهی افزایش نرمی نیز مشاهده می‌شود. این موضوع دقیقاً وجه تمایز این روش با سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک است که علت این ویژگی خاص را باید در ساختار نانو ایجاد شده در فلز توسط روش تغییر شکل پلاستیک شدید جستجو نمود [۴ تا ۶]

با توجه به کاربرد زیاد مواد فوق ریزدانه تولید شده به روش کانال‌های زاویه‌دار موازی در صنعت، تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. فرجی و همکاران [۷] به بررسی پرس کانال لوله‌های زاویه دار به عنوان یک تغییر پلاستیک شدید برای ایجاد سلیندر لوله‌ای پرداختند آنها با بیان این‌که در این روش کرنش بزرگی بدون تغییر ابعاد اتفاق می‌افتد از این روش استفاده کردند و بر روی لوله‌های منیزیم AZ91 این عمل را انجام دادند و بیان کردند که مقدار سختی از مقدار ۵۲ ویکرز در نقطه a به مقدار ۸۰ ویکرز در نقطه d نشان داده شده بر روی شکل (۱) افزایش یافته است همچنین ایشان در پژوهش دیگر خود [۸] آنها به بررسی قانون اصطکاک در کانال لوله‌های موازی زاویه دار پرداختند. آنها با استفاده از روش‌های عددی، تجربی و محاسباتی بیان کردند که ضریب اصطکاک بیشترین تاثیر را در فرایند کانال موازی لوله‌های زاویه دار دارد. آنها ضریب اصطکاک ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ را بررسی کردند و بیان کردند که با افزایش ضریب اصطکاک به میزان سه برابر زاویه سوم (نشان داده شده در شکل (۱) از ۴۵ درجه به ۴۰ درجه کاهش یافته و میزان کرنش نیز به مقدار ۲/۹۴ درصد افزایش و مقدار نیرو نیز به میزان ۲/۵ برابر افزایش یافته است.



شکل ۱ نقاط و زاویه‌های مورد نظر در کانال موازی لوله‌های زاویه دار [۱]

سانتی‌گراد ازدیاد طول به میزان ۲۶۳ درصد افزایش یافته است. همچنین بیان کردند که در دمای ۴۰۰ درجه مقدار کسر حفره‌ها به میزان ۱۴ درصد و به میزان ۳ برابر بیشتر از دمای ۴۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. آنها با مقایسه قطعات بیان کردند که ریزدانه‌ترین قسمت مربوطه به قسمت I می‌باشد که در دمای ۴۰۰ درجه به ریزترین مقدار خود می‌رسد همچنین مقدار سختی در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به بیشترین مقدار خود برابر با ۶۵ ویکرز می‌رسد که در دمای ۴۵۰ درجه به مقدار ۵۶ ویکرز و در دمای ۴۰۰ درجه ۶۲/۵ ویکرز کاهش یافته است.

در این پژوهش به کمک شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی، با استفاده از نرم‌افزار تحلیلی آباکوس به بررسی اثر هر کدام از پارامترهای ورودی و کلیدی فرایند شامل زاویه کانال و میزان تغییر قطر بر یکنواختی توزیع کرنش در سطح نمونه می‌باشد. همچنین جهت مشخص شدن بهترین مسیر از پارامترهای ورودی فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی، که با تکیه بر این پارامترها فرایندی ایده‌آل با کمترین عیوب حاصل شود، اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای ورودی فرایند می‌شود. همچنین جهت اعتبارسنجی و صحت‌گذاری بر شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی، مقایسه‌ای میان نتایج بدست آمده از حل عددی این پژوهش با نتایج دیگر محققان صورت خواهد گرفت

۲- روش انجام کار

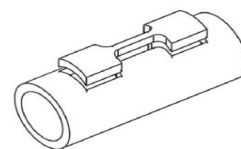
۲-۱- تعریف پارامترها

باتوجه به این نکته که انتخاب مناسب پارامترهای ورودی فرایند بر بهبود خروجی‌های موردنظر موثر واقع می‌شود، کنترل هرکدام از فاکتورهای ذکر شده به تعبیری کنترل یکنواختی توزیع کرنش بوده که در نهایت کنترل فرایند محسوب می‌شود، از این رو انتخاب مناسب و معقول هر کدام از ورودی‌های یاد شده بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

این فرایند شامل دو نیم‌چرخه است. لوله ابتدا در فضای خالی بین قالب و مندرل قرار می‌گیرد. در چرخه اول به واسطه اعمال فشار توسط سنبه اول، لوله وارد منطقه تغییر شکل می‌شود و از دو منطقه برشی متقارن عبور کرده و قطر لوله افزایش پیدا می‌کند. در چرخه دوم از طریق اعمال فشار سنبه دوم، لوله مجدداً از دو منطقه برشی عبور کرده و قطر آن به مقدار اولیه می‌رسد و در نتیجه در پایان دو چرخه قطر لوله تغییری نکرده است و به همین دلیل این فرایند را می‌توان در

انحنا گوشه‌ها، نسبت تغییر شکل و شعاع کانال‌ها، ضریب اصطکاک بین لوله و کانال و تعداد مرحله‌ها را مورد بررسی قرار دادند و تاثیر آنها را بر روی میزان همگنی کرنش موثر و نیروی فرایند مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان کردند که ضریب اصطکاک تاثیر به‌سزایی بر نیروی مورد نیاز فرایند دارد و تمام نمودارهای نیروی مربوط به تمامی ضرایب اصطکاک در انتها به مقدار نیروی مربوط به حالت بدون اصطکاک همگرا می‌شوند. همچنین نیروی مورد نیاز فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار لوله‌ای موازی در مقایسه با سایر فرایند به میزان محسوسی کاهش یافته است. با افزایش زاویه کانال در این روش باعث کاهش کرنش اعمالی در انتهای هر دو نیم سیکل فرایند می‌شود و با افزایش زاویه انحنا باعث کاهش همگنی کرنش می‌شود.

توکلی و همکاران [۱۱] به بررسی ناهمسانگردی استحکام مکانیکی با دانه بندی فوق ریز لوله های مس- روی توسط روش کانال‌های زاویه‌دار موازی پرداختند. آنها با استفاده از این فرایند لوله‌هایی تولید کردند که استحکام بالایی دارند. آنها پس از انجام آزمایشات قطعاتی مطابق شکل (۳) از قطعه کار جهت انجام آزمایش‌های کشش خارج نمودند. با انجام آزمایش‌ها بیان کردند که لوله‌های تولید شده از این روش می‌توانند نیروی ۱۲۲۰ مگاپاسکال را در امتداد محیط و ۵۸۰ مگاپاسکال را در امتداد طول تحمل کنند به طوری که ۶۶ درصد تحمل نیرویی آن در طول و ۱۰۶ درصد آن در امتداد محیط افزایش یافته است. همچنین تنش تسلیم آن در امتداد طول ابتدا ۱۰۶ مگاپاسکال و بعد از انجام فرایند به ۳۴۴ مگاپاسکال افزایش و تنش تسلیم در امتداد محیط در ابتدا ۳۵۹ مگاپاسکال و بعد از انجام فرایند به ۱۰۱۳ مگاپاسکال افزایش یافته است.



شکل ۳ نحوه خروج نمونه از قطعه تولید شده جهت آزمون کشش

فتا و همکاران [۱۲] به بررسی کرنش کششی گرم و رفتار شکست ریز دانه‌های منیزیم آلیاژ AZ31 توسط پردازش تغییر شکل پلاستیک شدید پرداختند. آنها روش کانال‌های زاویه‌دار موازی را برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید انتخاب کردند و برای ریز ساختار منیزیم آلیاژ AZ31 این فرایند را انجام دادند. آنها این آزمایش را در دماهای ۲۵، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه انجام دادند و بیان کردند که در مرحله دوم و دمای ۴۰۰ درجه

چندین پاس بر روی لوله انجام داد و کرنش‌های بزرگ بر لوله اعمال کرد، اما همان‌طور که اشاره شده در این پژوهش از دو نیم‌پاس جهت اعمال کرنش به لوله استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده شد، پارامترهای موجود در قالب ϕ ، R_1 ، R_2 و R می‌باشند که انتخاب مناسب، صحیح و کنترل آن‌ها در پیشبرد فرایندی ایده‌آل در جهت یکنواختی توزیع کرنش، بسیار اهمیت پیدا می‌کند. هر یک از پارامترهای موجود در قالب بصورت جدول (۱) تعریف می‌شود.

جدول ۱ پارامترهای تعریف شده

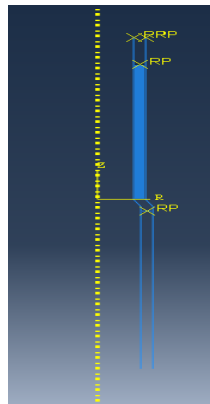
جدول ۳ مشخصات ماده استفاده شده

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	مدول یانگ (E)	100 GPa
۲	ضریب پواسون (ν)	۰/۳

ردیف	پارامتر	سطوح
۱	ضریب اصطکاک (f)	۰/۰۲۵ ۰/۰۵ ۰/۰۷۵
۲	طول لوله (l)	۴۰ میلی‌متر ۵۰ میلی‌متر ۷۰ میلی‌متر
۳	زاویه کانال (ϕ)	۱۳۵ درجه ۱۵۰ درجه ۱۶۰ درجه
۴	تفاضل افزایش قطر $K = R_2 - R_1$	۱/۵ ۲ ۲/۵

۲-۲- نحوه انجام شبیه‌سازی

جهت شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس، مدل به صورت قرینه محوری و دوبعدی رسم و مونتاژ می‌شوند.

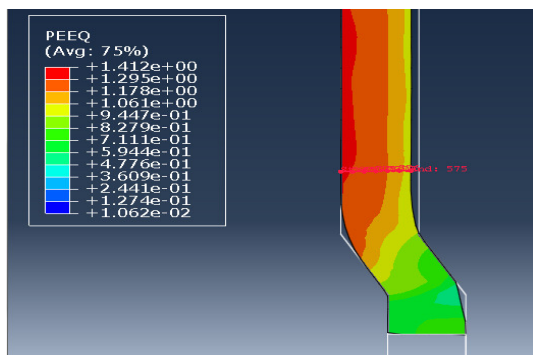


شکل ۴ نحوه مونتاژ لوله و قطعات در نرم‌افزار آباکوس

با توجه به بالا بودن تعداد پارامترها و سطوح آنها، جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش استفاده می‌شود که به وسیله آن تعداد آزمایش‌ها به ۹ آزمایش کاهش می‌یابد که در جدول (۲) تعداد آزمایش‌ها و پارامترهای آن نشان داده شده است.

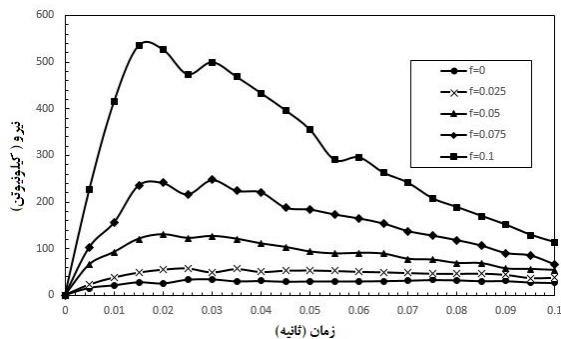
پس از ایجاد شرایط مرزی و مشخص کردن نوع تحلیل، مسئله حل می‌شود و نتایج آن مطابق شکل (۵) نمایش داده می‌شود.

جدول ۲ طراحی آزمایش برای پارامترهای ورودی مسئله



شکل ۵ نتایج بدست آمده از تحلیل عددی برای بررسی همگنی کرنش راستای ضخامت در انتهای فرایند

شماره آزمایش	سطوح			
	ضریب اصطکاک	طول لوله (سانتی-متر)	زاویه کانال (درجه)	تفاضل افزایش قطر (میلی‌متر)
۱	۰/۰۲۵	۴۰	۱۳۵	۱/۵
۲	۰/۰۵	۴۰	۱۳۵	۱/۵
۳	۰/۰۷۵	۴۰	۱۳۵	۱/۵
۴	۰/۰۲۵	۵۰	۱۳۵	۱/۵
۵	۰/۰۲۵	۷۰	۱۳۵	۱/۵
۶	۰/۰۲۵	۴۰	۱۵۰	۱/۵
۷	۰/۰۲۵	۴۰	۱۶۰	۱/۵
۸	۰/۰۲۵	۴۰	۱۳۵	۲
۹	۰/۰۲۵	۴۰	۱۳۵	۲/۵

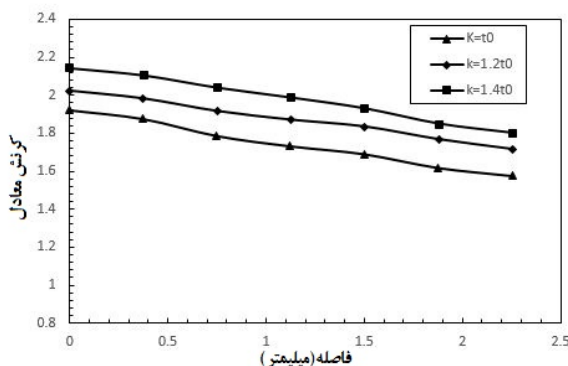


شکل ۷ تغییرات نیروی فرایند در پایان نیم پاس اول برای ضرایب اصطکاک مختلف

۳-۲- بررسی اثر افزایش اختلاف قطر

الف) بررسی اثر افزایش اختلاف قطر بر تغییرات کرنش معادل

شکل (۸) تغییرات کرنش در راستای ضخامت برای افزایش اختلاف قطر (K) مختلف را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل مشاهده می‌شود که تغییرات میزان افزایش اختلاف قطر تاثیر چندانی بر همگنی کرنش ایجاد نکرده و توزیع کرنش در راستای ضخامت برای مقادیر (K) مختلف با شیب تقریباً نزدیک به هم تغییر کرده است.



شکل ۸ تغییرات کرنش معادل در پایان فرایند برای پارامتر K مختلف

ب) بررسی اثر افزایش اختلاف قطر بر نیروی فرایند

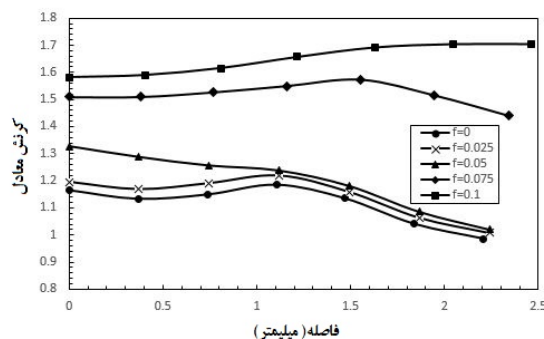
شکل (۹) مقدار تغییرات نیروی نیم‌پاس اول فرایند بر اثر تغییر پارامتر (K) را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل در یک زمان خاص ازدیاد مقدار افزایش اختلاف قطر منجر به افزایش نیروی فرایند می‌شود.

۳- نتایج و بحث

پس از حل عددی فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس نتایج هر یک از پارامترها بر تغییرات کرنش معادل بررسی می‌شود و به‌صورت نمودار نمایش داده می‌شود.

۳-۱- بررسی اثر ضریب اصطکاک

الف) بررسی اثر ضریب اصطکاک بر تغییرات کرنش معادل در شکل (۶) تغییرات کرنش معادل برای ضرایب اصطکاک مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شد در این پژوهش همگنی کرنش در راستای ضخامت لوله مدنظر بود به همین دلیل بررسی اثر ورودی‌های مذکور بر یکنواختی توزیع کرنش اهمیت پیدا می‌کند.

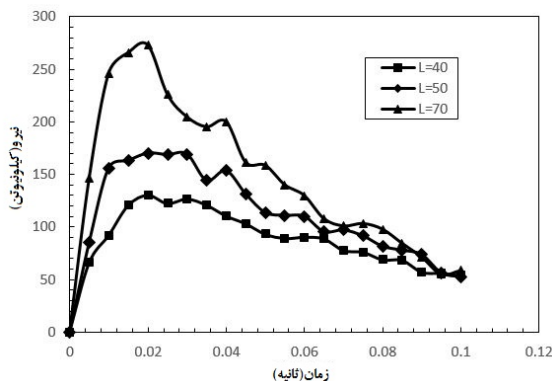


شکل ۶ تغییرات کرنش معادل در پایان فرایند برای ضرایب اصطکاک مختلف

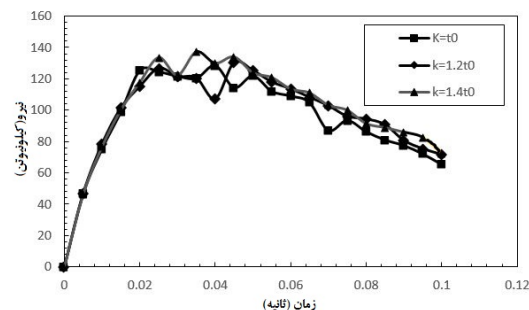
همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش ضریب اصطکاک همگنی توزیع کرنش بیشتر شده است. پس می‌توان گفت به منظور حصول فرایندی ایده‌آل در جهت همگنی توزیع کرنش لازم است میزان ضریب اصطکاک به عنوان پارامتری کلیدی به میزان کنترل شده‌ای افزایش پیدا کند.

ب) بررسی اثر ضریب اصطکاک بر نیروی فرایند

شکل (۷) اثر ضریب اصطکاک بر نیروی فرایند را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در یک زمان خاص هرچه ضریب اصطکاک افزایش پیدا کند میزان نیروی شکل‌دهی افزایش پیدا خواهد کرد. به تعبیری افزایش میزان نیروی شکل‌دهی با افزایش ضریب اصطکاک تعریفی رابطه‌ای مستقیم دارند.



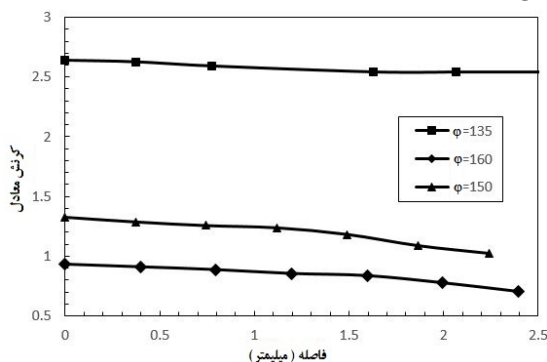
شکل ۱۱ تغییرات نیروی فرایند در پایان نیم‌پاس اول برای پارامتر طول مختلف لوله



شکل ۹ تغییرات نیروی فرایند در پایان نیم‌پاس اول برای پارامتر K مختلف

۴-۳- بررسی اثر زاویه کانال

الف) بررسی اثر زاویه کانال بر تغییرات کرنش معادل تغییرات کرنش در راستای ضخامت برای زاویه کانال‌های مختلف در شکل (۱۲) نشان داده شده است. باتوجه به شکل نشان داده شده مشخص است که زاویه کانال اثر چندانی بر همگنی کرنش نخواهد داشت بدین صورت که یکنواختی توزیع کرنش برای تمامی حالات از زاویه کانال با شیب ملایم و نزدیک به هم تغییر کرده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر در این پارامتر ورودی انتظار تغییر چشم‌گیری بر یکنواختی توزیع کرنش نباید داشت.

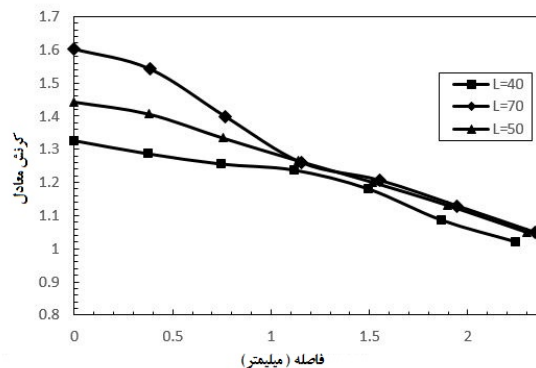


شکل ۱۲ تغییرات کرنش معادل در پایان فرایند برای پارامتر زاویه کانال مختلف

ب) بررسی اثر زاویه کانال بر نیروی فرایند مقدار تغییرات نیروی نیم‌پاس اول فرایند بر اثر تغییر پارامتر زاویه کانال در شکل (۱۳) نشان داده شده است. باتوجه به شکل نشان داده شده مشخص است که انتظار می‌رود کاهش در مقدار زاویه کانال منجر به افزایش میزان نیروی فرایند شود.

۳-۳- بررسی اثر طول لوله

الف) بررسی اثر طول لوله بر تغییرات کرنش معادل تغییرات کرنش در راستای ضخامت برای طول لوله‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. باتوجه به شکل نشان داده شده مشخص است که کم بودن طول لوله تا حدودی بر همگنی توزیع کرنش اثر داشته است. پس می‌توان گفت در طراحی فرایند لازم است از لوله‌هایی با طول کمتر استفاده شود تا همگنی کرنش بیشتری حاصل شود.

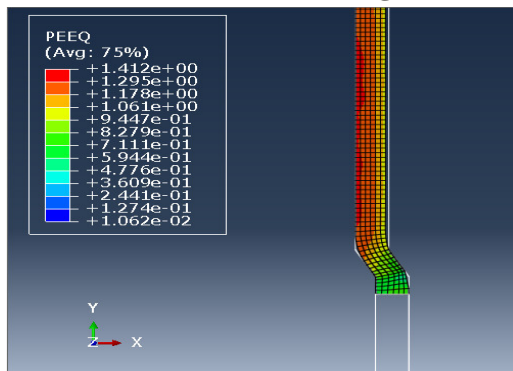


شکل ۱۰ تغییرات کرنش معادل در پایان فرایند برای طول لوله‌های مختلف

ب) بررسی اثر طول لوله بر نیروی فرایند

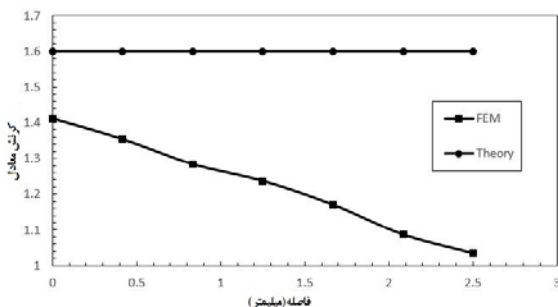
مقدار تغییرات نیروی نیم‌پاس اول فرایند بر اثر تغییر پارامتر طول لوله (L) در شکل (۱۱) نشان داده شده است. باتوجه به شکل نشان داده شده مشخص است که کاهش میزان طول لوله منجر به کاهش نیروی شکل‌دهی فرایند می‌شود.

در کانال‌های زاویه‌دار موازی، ماکزیمم کرنش اعمالی بدست آمده حدود ۱/۴ می‌باشد.



شکل ۱۴ توزیع کرنش در پایان یک پاس انجام فرایند

شکل (۱۵) مقایسه بین کرنش بدست آمده از رابطه تحلیلی و تغییرات کرنش در راستای ضخامت را نشان می‌دهد. رابطه تئوری اثرات طول لوله، خواص مواد و ضریب اصطکاک را در نظر نمی‌گیرد که خطای موجود بین مقادیر کرنش تئوری و شبیه سازی عددی نیز به همین دلیل می‌باشد.

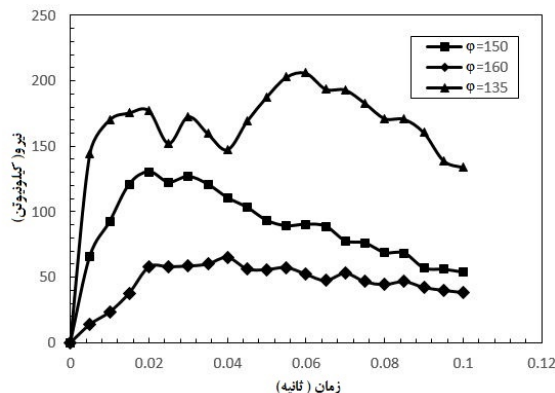


شکل ۱۵ مقایسه بین کرنش حاصله از شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند با کرنش بدست آمده از رابطه تحلیلی

۴- بهینه‌سازی نتایج

در پژوهش حاضر هدف دستیابی به کرنشی همگن و همچنین دستیابی به ماکزیمم کرنش بهینه باتوجه به در نظر گرفتن اثر پارامترهای ورودی شامل ضریب اصطکاک، طول لوله، زاویه کانال و تفاضل افزایش قطر می‌باشد. بدین منظور پس از شبیه‌سازی اجزا محدود با استفاده از نرم‌افزار تحلیلی آباکوس نوبت به بهینه‌سازی پارامترهای ورودی در جهت حاصل شدن همگنی توزیع کرنش می‌رسد. با استفاده از شبکه عصبی رابطه-ای بین ورودی‌ها و خروجی مسئله بدست آمد و سپس به کمک الگوریتم ژنتیک رابطه مورد نظر بهینه شد و مقادیر پارامترهای ورودی بدست آمد که به ازای آن‌ها فرایند به سمت توزیع همگن

می‌توان گفت تغییرات زاویه کانال با نیروی فرایند رابطه معکوسی باهم دارند.



شکل ۱۳ تغییرات نیروی فرایند در پایان نیم‌پاس اول برای پارامتر زاویه کانال مختلف

۵-۳- اعتبارسنجی پژوهش حاضر

جهت صحت‌گذاری بر این پژوهش لازم است نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند با رابطه تحلیلی بدست آمده برای قالب فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی مورد مقایسه قرار گیرد. جهت انجام این مقایسه از مقادیر پارامترهای اصلی ورودی شامل $\psi = 0^\circ$ ، $\phi = 15^\circ$ ، $R_1 = 10\text{mm}$ و $R_2 = 11/5\text{mm}$ برای معرفی به رابطه مذکور جهت بدست آوردن مقدار کرنش استفاده شد. رابطه تحلیلی (۱) معرف میزان کرنش حاصله برای فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی می‌باشد که از مرجع [۸] استخراج شده است.

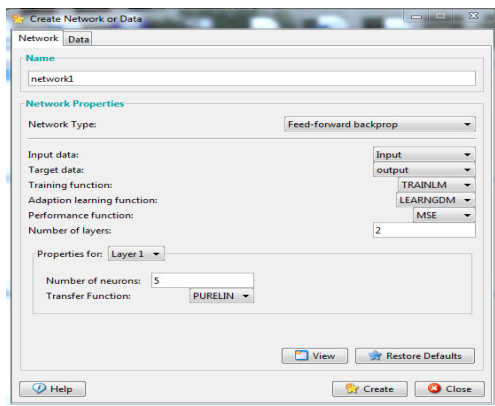
$$\bar{\epsilon}_{max} = 2N \left\{ \sum_{r=1}^2 \left[\frac{2\cot(\phi/2 + \psi_r/2) + \psi_r \operatorname{cosec}(\phi/2 + \psi_r/2)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1} \right\} \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامتر N برابر تعداد پاس می‌باشد. با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی معرفی شده و انجام یک پاس فرایند، مقدار کرنش معادل اعمالی برابر ۱/۶ می‌باشد. مقدار کرنشی که از رابطه (۱) بدست می‌آید با فرض یکنواختی کرنش در راستای ضخامت می‌باشد اما در حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی کرنش در راستای ضخامت متغیر می‌باشد. تغییرات کرنش در راستای ضخامت بایستی کمینه باشد و بنابراین همگنی کرنش جهت دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب بسیار ضروری می‌باشد. شکل (۱۴) توزیع کرنش در پایان یک پاس فرایند را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند فشار

و یکنواخت کرنش سوق پیدا کند. در ادامه ابتدا روند شبکه عصبی و سپس الگوریتم ژنتیک برای پژوهش حاضر ارائه خواهد شد.

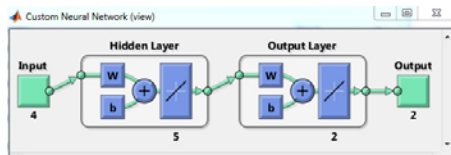
۴-۱- تعریف شبکه‌های عصبی مصنوعی مسئله

همان‌طور که در قبل هم به آن اشاره شد شبکه‌های عصبی در کاربردهای مهندسی و به ویژه در سیستم‌های غیرخطی به‌عنوان یک تقریب‌زننده خوب برای توابع شناخته شده‌اند. در این پژوهش لازم است به منظور بدست آوردن رابطه‌ای منطقی بین پارامترهای ورودی و خروجی از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کرده و در پایان به کمک روش الگوریتم ژنتیک تابع مربوطه بهینه شود. پنجره‌ی مربوط به شبکه عصبی در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



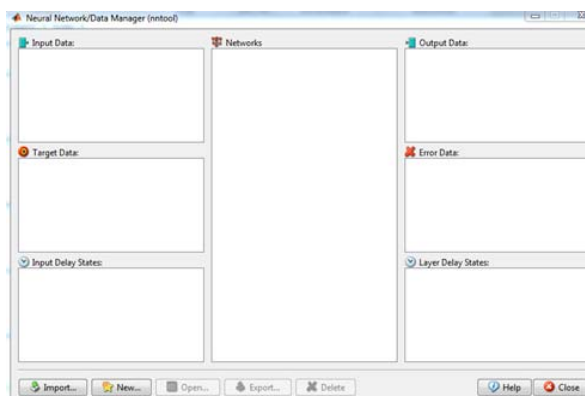
شکل ۱۷ تعریف شبکه عصبی

شماتیک شبکه عصبی ایجاد شده با چهار ورودی و دو خروجی و یک لایه مخفی در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



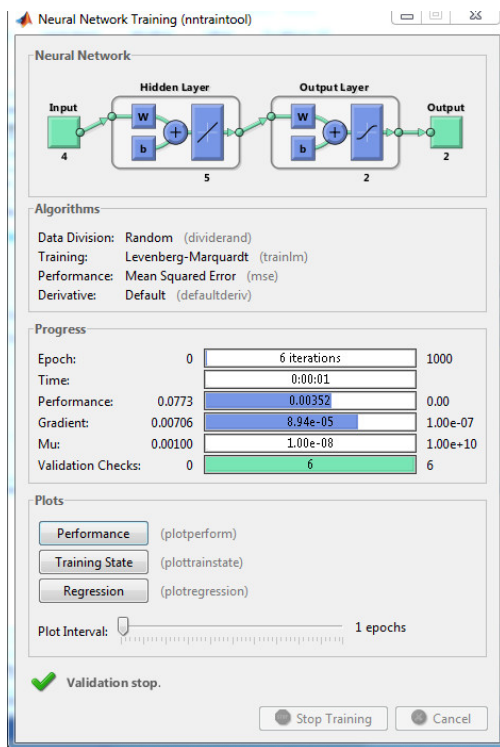
شکل ۱۸ شماتیک شبکه عصبی

پس از این که شبکه عصبی ایجاد شد، شبکه مطابق شکل (۱۹) پس از ۶ اپیاک آموزش داده می‌شود.



شکل (۱۶) ایجاد شبکه عصبی

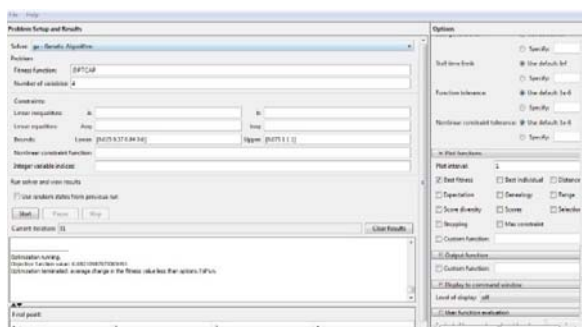
پس از آن نوبت به وارد کردن پارامترهای ورودی و خروجی فرایند به نرم‌افزار می‌رسد. پس از وارد کردن اطلاعات ورودی مسئله شامل زاویه کانال، طول لوله، تفاضل افزایش قطر لوله و ضریب اصطکاک و همچنین اطلاعات خروجی مسئله یعنی تغییرات کرنش و ماکزیمم کرنش، نوبت به تعریف شبکه عصبی مصنوعی می‌رسد. نوع شبکه عصبی مصنوعی که در این پژوهش تعریف شد Feed forward back propagation و یک لایه مخفی می‌باشد. شکل (۱۷) تعریف شبکه عصبی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹ شبکه عصبی تربیت شده

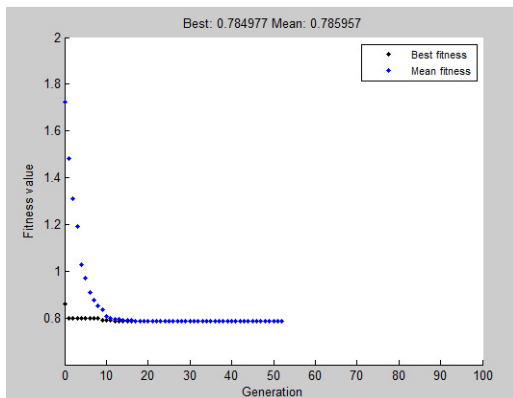
```
function y=FITCAP(LN)
x1=LN(1)
x2=LN(2)
x3=LN(3)
x4=LN(4)
%.....
H1=(0.46492*x1)+(-0.12251*x2)+(-0.020471*x3)+(-0.44795*x4)-0.0032719;
H2=(0.38944*x1)+(-0.23689*x2)+(-0.10813*x3)+(-0.35941*x4)+0.91949;
H3=(-0.3458*x1)+(0.53103*x2)+(0.29265*x3)+(0.3102*x4)-0.33293;
H4=(0.90044*x1)+(0.5904*x2)+(0.41873*x3)+(-0.67478*x4)+0.17054;
H5=(-0.93311*x1)+(-0.62625*x2)+(0.50937*x3)+(-0.762*x4)-0.55239;
%.....
output1=(0.69178*H1)+(0.016401*H2)+(1.0762*H3)+(0.12999*H4)+(-0.96555*H5)-0.9082
output2=(-0.85701*H1)+(0.45278*H2)+(1.0466*H3)+(-0.82192*H4)+(-0.55153*H5)-0.6072
%.....
y=output1+output2;
```

شکل ۲۱ تابع مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک با استفاده از دستور gatool پنجره مربوط به الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب مطابق شکل (۲۲) باز می‌شود و تابع مربوطه فرخوانده می‌شود. همچنین تعداد ۴ متغیر ورودی در نظر گرفته و محدوده تغییرات متغیرها نیز وارد می‌شود.



شکل ۲۲ پنجره الگوریتم ژنتیک در متلب

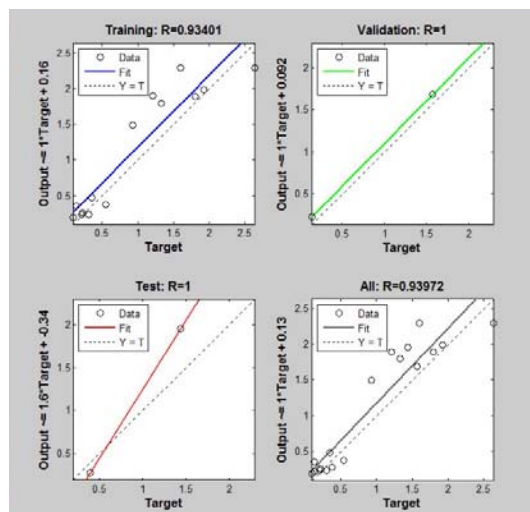
در نهایت الگوریتم ژنتیک مساله را حل می‌کند و مقادیر پارامترهایی که به ازای آن‌ها خروجی بهینه شود را ارائه می‌دهد. روند همگرایی حل در شکل (۲۳) نشان داده شده است.



شکل ۲۳ روند همگرایی الگوریتم ژنتیک

در نهایت مطابق جدول (۴) مسیر پارامترهای ورودی فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی که با تکیه بر آن فرایند مذکور به ایده‌آل‌ترین حالت ممکن در جهت همگنی توزیع کرنش می‌رسد، بدست آمد.

پس از تربیت شبکه عصبی، خطاها و رگرسیون آن مطابق شکل (۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۲۰ خطاها و رگرسیون پس از آموزش شبکه عصبی

در نهایت رابطه‌ای بین پارامترهای ورودی و خروجی مطابق روابط (۲) الی (۴) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned}
 N_1 &= (0.55108x_1) + (-0.30494x_2) + (1.0558x_3) + (0.50484x_4) + 0.81868 \\
 N_2 &= (-0.93464x_1) + (-0.56413x_2) + (-0.33468x_3) + (-0.60872x_4) - 0.40777 \\
 N_3 &= (-0.10004x_1) + (-0.35363x_2) + (0.53122x_3) + (0.63117x_4) + 0.68111 \\
 N_4 &= (-0.78879x_1) + (0.61911x_2) + (-0.39909x_3) + (0.16062x_4) - 0.97717 \\
 N_5 &= (-0.29665x_1) + (0.17376x_2) + (-0.022358x_3) + (0.42406x_4) - 0.20155
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 Strain \ Homogeneity &= (0.13311N_1) + (-0.23809N_2) + (0.026836N_3) + (0.14679N_4) \\
 &+ (0.68267N_5) + 0.16897
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 Max \ Strain &= (0.38488N_1) + (-0.1473N_2) + (0.2357N_3) + (-0.032853N_4) \\
 &+ (0.17925N_5) + 0.63963
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

در رابطه فوق X_1, X_2, X_3, X_4 پارامترهای ورودی و به ترتیب بیانگر ضریب اصطکاک، طول لوله، زاویه کانال و تغییر افزایش قطر می‌باشند.

۴-۲- تعریف الگوریتم ژنتیک مسئله

در قسمت قبل باتوجه به در دست داشتن پارامترهای ورودی و خروجی فرایند، شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور بدست آوردن تابع هدف برای مسئله تنظیم شد. در این قسمت با استفاده از الگوریتم ژنتیک رابطه بدست آمده از شبکه عصبی بهینه می‌شود. بدین منظور ابتدا تابعی در نرم افزار متلب تعریف می‌شود و سپس با استفاده از ابزار الگوریتم ژنتیک تابع مورد نظر فراخوانده شده و در نهایت بهینه‌سازی انجام می‌شود. شکل (۲۱) تابع تعریف شده که شامل رابطه بدست آمده از شبکه عصبی می‌باشد را نشان می‌دهد.

جدول ۴ پارامترهای بهینه‌شده فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی

تغییرات کرنش	نیروی فرایند (KN)	تفاضل افزایش قطر (mm)	زاویه کانال (درجه)	طول لوله (mm)	ضریب اصطکاک
۰/۲۳	۰/۴۹	۰/۶۵ t ₀	۱۴۰	۴۰	۰/۰۵

مقدار خود یعنی ۰/۲۳ میل پیدا کند به تعبیری توزیع کرنش به یکنواخت‌ترین حالت ممکن دست پیدا خواهد کرد.

۶- مراجع

- [1] Valiev, Ruslan Zafarovich, Rinat K. Islamgaliev, and Igor V. Alexandrov. "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", *Progress in materials science* 45.2 (2000): 103-189.
- [2] Valiev, Ruslan Z., and Terence G. Langdon. "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", *Progress in Materials Science* 51.7 (2006): 881-981.
- [3] W. Johnson, P.B. Mellor, 1973, *Engineering plasticity*, Ellis Horwood limited, John Wiley and Sons, New York, Brisbane, Chichester, Ontario
- [4] W. F. Hosford, R. M. Caddell, "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy", 4th Edition. USA: Cambridge University Press, (2011).
- [5] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", *progress in Materials Science*, Vol. 45, (2000), pp. 103-189.
- [6] A. Rosochowski, "Processing Metals by Severe Plastic Deformation", *Solid State phenomena*, vol. 101-102, (2005), pp 13-22.
- [7] Faraji, Ghader, Mahmoud Mosavi Mashhadi, and Hyoung Seop Kim. "Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes", *Materials Letters* 65.19 (2011): 3009-3012.
- [8] Faraji, Ghader, et al. "Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes", *Materials Letters* 77 (2012): 82-85.
- [9] G.Faraji, M.M.mashhadi, A.R. Bushroa, A. Babaei, TEM analysis and determination off dislocation densities in nanostructured copper tube produced via parallel tubular channel angular pressing process, *Matereials science and Engineering A*, Vol 563, 2013, pp.193.198
- [10] Mostafa Ghadiri, Mahmoud Mosavi Mashhadi, Mahdi Ghamami, Study of effective parameters of Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP), *Modares Mechanical Engineering*, 2013, Vol14, pp.27-33. (in Persian)
- [11] Tavakkoli, V., Afrasiab, M., Faraji, G., Mashhadi, M.M., Severe mechanical anisotropy of high-strength ultrafine grained Cu-Zn tubes processed by parallel tubular channel angular pressing (PTCAP), *Material Science and Engineering A*, Vol.625, 2015, pp.50-55
- [12] Fata, A., Faraji, G., Mashhadi, M.M., Tavakkoli, V., Hot tensile deformation and fracture behavior of ultra fine-grained AZ31 magnesium alloy processed by severe plastic deformation, *material Science and Engineering A*, Vol.674, 2016, pp.9-17.

۵- نتیجه‌گیری

پس از شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی و استخراج نتایج حاصل از آن مشخص شد که کنترل پارامترهای ورودی فرایند مذکور، بر بهبود فرایند موثر واقع خواهد بود. به تعبیری به منظور حصول فرایندی کم‌عیب و یا بی‌عیب لازم است در طراحی فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی، پارامترهای ورودی فرایند مناسب انتخاب شوند. نتایج حاصل از حل عددی نشان داد ضریب اصطکاک و طول لوله مورد آزمایش هر کدام جداگانه بر همگن شدن توزیع کرنش بسیار نقش داشته به طوری که با افزایش مقدار ضریب اصطکاک تعریفی و کاهش میزان طول لوله مورد آزمایش، توزیع کرنش به سمت همگنی و یکنواختی سوق پیدا خواهد کرد، این درحالی بود که دو پارامتر ورودی باقیمانده فرایند یعنی تفاضل افزایش قطر لوله و زاویه کانال قالب تاثیر چندانی بر بهبود یکنواختی توزیع کرنش نخواهند داشت. از سوی دیگر افزایش ضریب اصطکاک، طول لوله و افزایش قطر لوله هر کدام جداگانه منجر به افزایش نیروی فرایند می‌شوند این در حالی بود که افزایش زاویه کانال قالب منجر به کاهش نیروی شکل‌دهی شد.

همچنین با توجه به نتایج استخراج شده از بهینه‌سازی پارامترهای فرایند فشار در کانال‌های زاویه‌دار موازی بدست آمد که بنا بر اطلاعات ورودی تعریف شده برای مسئله، ایده‌آل‌ترین حالت برای فرایند مذکور به منظور تولید محصولی با همگن‌ترین توزیع کرنش، زمانی محقق می‌شود که در طراحی آزمایش از ضریب اصطکاک معادل ۰/۰۵، طول لوله ۴۰ میلی‌متر، زاویه کانال ۱۴۰ درجه و تفاضل افزایش قطر ۰/۶۵ t₀ استفاده شود. با انتخاب چنین مقادیری تغییرات کرنش به کمترین مقدار خود یعنی ۰/۲۳ و مقدار کرنش به ماکزیمم مقدار خود یعنی ۲/۳۷ می‌رسد، این بدان معناست زمانی که تغییرات کرنش به کمترین