



بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری انگشتی برای رسیدن به زبری سطح مینیمم با ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

اصغر نگارستانی^۱ و محمدحسین ابوالبشری^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

^۲ استاد، گروه مکانیک، مرکز پژوهشی مهندسی تولید ناب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۱/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۷

چکیده

با پیشرفت روزافزون روش‌های ماشین‌کاری، کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در فرآیندهای ماشین‌کاری فلزات برای بالا بردن کیفیت قطعات سودمند به نظر می‌رسد. زبری سطح یکی از پارامترهای مهم کیفیت سطح قطعه ماشین‌کاری شده است. در این پژوهش، به مطالعه بهینه‌سازی پارامترهای ورودی فرزکاری انگشتی برای رسیدن به زبری سطح مینیمم پرداخته شده است. پنج پارامتر از فرآیند فرزکاری برای مینیمم کردن زبری سطح، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، با انجام یک سری آزمایش طرح‌ریزی شده با تکنیک طراحی آزمایشات، یک سری داده‌های ورودی و خروجی به دست آمده، از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی فرآیند استفاده شده است. با روش آزمون و خطا، معماری ۱-۶-۵ به عنوان بهترین معماری برای شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شده است که کمترین خطا را داشت. مدل شبکه عصبی مصنوعی ایجاد شده، به عنوان تابع هدف الگوریتم ژنتیک به کار رفته است. الگوریتم ژنتیک با بهینه‌کردن مقادیر پارامترهای ورودی، زبری سطح را تا ۰/۸۵ میکرومتر کاهش داده است. عملیات بهینه‌سازی برای سه استراتژی مسیر ابزار به صورت جداگانه اجرا شده، استراتژی چرخشی کمترین زبری را نتیجه داده است. در انتها با استفاده از روش تاگوچی سطوحی که دارای بیشترین نسبت سیگنال به نویز هستند، به عنوان سطوح بهینه معرفی شده‌اند که کمترین زبری سطح را نتیجه می‌دهند.

کلمات کلیدی: فرزکاری انگشتی؛ بهینه‌سازی؛ الگوریتم ژنتیک؛ شبکه عصبی مصنوعی؛ روش تاگوچی.

Optimization of End Milling Process for Minimizing Surface Roughness with Combined Artificial Neural Network and Genetic Algorithm

A. Negarestani¹, M.H. Abolbashari^{2,*}

¹M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Prof., Department of Mechanical Engineering, Lean Production Engineering Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

Through enormous development of machining methods, applying optimization method in machining process to improve quality seems to be important. One of the most important parameter of a work piece is its surface roughness. As surface roughness decrease, the quality of work piece increase. In this study, optimization of input parameter of end mill machining to reach minimum surface roughness is investigated. Among these parameters five of them selected and Taguchi method is used for the design of experiments. The process is modeled with neural network method and using try and error test 5-8-6-1 architecture. Genetic algorithm is used for process optimizing and neural network model is selected as the target function. For three different tool path strategies, optimization has been conducted and results are discussed. Using genetic algorithm decrease surface roughness to 0.85 μm . Finally selected level of Taguchi method is analyzed and levels with maximum signal to noise ratio are introduced as optimized level that have minimum surface roughness.

Keywords: Endmilling; Optimization; Genetic Algorithm; Artificial Neural Network; Taguchi Method.

۱- مقدمه

امروزه صنعت ماشین‌کاری یکی از روش‌های پرکاربرد در ساخت و تولید قطعات مختلف است. یکی از مهم‌ترین فرایندها در ماشین‌کاری، فرآیند فرزکاری است. این فرآیند دارای قابلیت بالایی در دستیابی به دقت‌های بسیار بالا و در تولید شکل‌های بسیار پیچیده همراه با خصوصیات مختلف با دستگاه فرز CNC^۱ چند محوره است. فرآیند فرزکاری انگشتی، معمولاً در مراحل نهایی ساخت قطعات استفاده می‌شود؛ بنابراین کنترل این فرآیند برای رسیدن به کیفیت سطح مطلوب در قطعه مهم است [۱]. زبری سطح^۲ به دست آمده در عملیات فرزکاری انگشتی، نقش مهمی در کیفیت نهایی قطعات ساخته شده با این روش ایفا می‌کند. زبری سطح نهایی قطعه بر ویژگی‌هایی از محصول مانند، مقاومت خستگی و بازتاب نور تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل و برای رسیدن به کیفیت سطح مطلوب، باید تا حد امکان زبری سطح نهایی محصول را مینیمم کرد. فاکتورها و پارامترهای زیادی هستند که در عملیات فرزکاری انگشتی بر زبری سطح نهایی محصول اثر می‌گذارند. با مراجعه به مقالات منتشر شده در این زمینه به نظر می‌رسد که روش الگوریتم ژنتیک (GA)^۳ در بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری، کمتر مورد توجه پژوهشگران بوده است؛ به طور مشخص کاربرد الگوریتم ژنتیک برای مینیمم کردن زبری سطح محدود بوده است [۲]. اکتام و همکاران [۳]، به بهینه‌سازی پارامترهای فرزکاری برای رسیدن به کمترین زبری در ساخت قطعات پزشکی پرداختند. آن‌ها از مدل شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی استفاده کردند. نتایجی که آن‌ها به دست آوردند، با مشاهدات تجربی نزدیک بود. زاین و همکاران [۴]، برای مدل‌سازی فرآیند فرزکاری انگشتی معماری‌های متعددی از شبکه عصبی مصنوعی را مورد آزمایش قرار دادند تا به معماری ۱-۱-۳ دست یافتند که کمترین خطای پیش‌بینی را داشت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که برای رسیدن به زبری سطح مینیمم، باید سرعت برشی را افزایش و نرخ پیشروی را کاهش داد.

سارش و همکاران [۵] با به کار بردن روش GA برای مینیمم کردن زبری سطح در فرآیند فرزکاری انگشتی به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق برش و شعاع نوک، ابزار زبری سطح افزایش پیدا می‌کند و کاهش نرخ تغذیه بیش‌ترین تأثیر را در کاهش زبری سطح دارد. برزونیک و همکاران [۶] نیز، تحقیقاتی در زمینه بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری انگشتی انجام داده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که برای رسیدن به زبری سطح کمتر، GA پیشنهاد می‌کند که از سرعت برشی بالاتر استفاده شود. نتیجه تحقیقات کلاک و همکارانش [۷] در بهینه‌سازی فرزکاری انگشتی این بود که با روش GA برای کاهش زبری سطح نرخ تغذیه پایین و سرعت برشی بالا پیشنهاد می‌شود. نتایج تحقیقات تانسل و همکاران [۸] این بود که روش GA، پارامتر زبری سطح (R_a) را برای فولاد نرم از ۲/۶ تا ۰/۷۱ میکرومتر با در نظر گرفتن پارامترهای برش‌کاری نظیر، سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش کاهش می‌دهد. پلانسیسمی و همکارانش [۹] در تحقیقاتشان نشان دادند که در نظر گرفتن پارامترهایی مانند، نرخ پیشروی، پیشروی محوری، سرعت برش، پیشروی شعاعی و تلورانس ماشین‌کاری و با استفاده از روش GA، مقدار R_a از ۰/۴۱۲ تا ۰/۳۷۵ میکرومتر کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده ۱۰ درصد کاهش است. گلگلو و ساکارایا [۱۰]، برای اولین بار تأثیر استراتژی‌های مسیر ابزار را روی زبری سطح نهایی قطعه مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها همچنین تأثیر پارامتر میزان باردهی عرضی (step over) را نیز در نظر گرفتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عمق برش در استراتژی رفت و برگشتی، بیش‌ترین تأثیر را بر عمق برش دارد و در استراتژی یک جهته نرخ پیشروی، بیش‌ترین تأثیر را بر زبری نهایی قطعه دارد.

در این مقاله پنج پارامتر فرآیند برای مینیمم کردن زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته‌اند که عبارت‌اند از: سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق پیشروی، step over و استراتژی مسیر ابزار. برای انجام این کار یک سری آزمایشات طراحی و انجام شده است. برای مدل‌سازی داده‌ها، از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است و مدل به دست آمده به عنوان تابع هدف در الگوریتم ژنتیک به کار رفته است.

¹ Computer Numerical Control

² Surface Roughness

³ Genetic Algorithm

۲- فرآیند فرزکاری

فرزکاری یک عملیات براده برداری سنتی است که به صورت گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد که از قرن ۱۹ به بعد مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. فرزکاری با توجه به دقت بالا و توانایی بالایی که در ساخت قطعات پیچیده دارد، به یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت قطعه در صنعت تبدیل شده است. از قطعات حساسی مانند، توربین‌ها، پروانه‌های موتورجت، لوازم پزشکی می‌توان به اهمیت این فرآیند پی برد.

عملیات فرزکاری یکی از فرآیندهای مهم ماشین‌کاری است که در آن عملیات براده برداری با یک الگوی حرکتی پیچیده ابزار و قطعه کار صورت می‌گیرد و در آن ابزار حول محوری متقارن حرکت دورانی داشته، بسته به نوع ماشین و نوع عملیات، پیشروی قطعه کار یا ابزار به صورت خطی است. چون در این فرآیند هر لحظه یک یا چند لبه برنده با قطعه کار درگیر است، لذا به فرآیند ماشین‌کاری منقطع معروف است.

۳- تجهیزات مورد نیاز در انجام آزمایشات

در این پژوهش برای مدل‌سازی فرآیند، نیاز به یک مجموعه داده ورودی-خروجی است که از طریق انجام آزمایشات به دست می‌آید. برای انجام آزمایشات و به دست آوردن داده‌های مورد نیاز، جنس قطعه کار فولاد ANSI 1045 یا همان CK45 انتخاب شده است. فولاد AISI 1045 دارای کاربردهای زیادی از جمله در تولید محورها، تسمه‌ها، میله‌های رابط، پمپ‌ها و گیره‌های هیدرولیکی، پین‌ها، غلتک‌ها، ستون‌ها، اسپیندل‌ها دارد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی مربوط به این فولاد را نشان می‌دهد.

برای انجام دقیق عملیات فرزکاری در این تحقیق ماشین فرز CNC سه محوره RM860 ساخت کنترل افراز تبریز انتخاب شده، عملیات فرزکاری روی آن انجام شده است. برای فرزکاری قطعات آزمایش، از تیغه فرز انگشتی کاربایدی ساخت شرکت UKK آلمان استفاده شد. مشخصات کامل تیغه فرز استفاده شده در جدول ۲ آمده است. برای اندازه‌گیری زبری سطوح از زبری سنج شرکت Taylor Habson استفاده شد. مشخصه‌های بارز این زبری سنج، در جدول ۳ آمده است

۳- انتخاب فاکتورهای طرح (پارامترهای مورد

مطالعه)

در فرآیند فرزکاری انگشتی، پارامترهای ورودی زیادی هستند که بر کیفیت سطح نهایی قطعه کار تأثیر می‌گذارند. از جمله این پارامترها می‌توان، سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش، هندسه ابزار، جنس ابزار، میزان باردهی عرضی (step over)، استراتژی مسیر ابزار و مایع خنک کاری را نام برد. در تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه انجام گرفته، تأثیر پارامترهایی نظیر، سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش، بیشتر از بقیه پارامترها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش علاوه بر در نظر گرفتن سه پارامتر مهم و تأثیرگذار سرعت برشی، عمق برش و نرخ پیشروی، دو پارامتر مهم دیگر که در نرم‌افزار Mastercam به راحتی قابل تنظیم هستند، نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این دو پارامتر مهم استراتژی مسیر ابزار و میزان باردهی عرضی (step over) می‌باشند که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند که در ادامه تعریف شده‌اند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی CK45

حداقل مقدار %	حداکثر مقدار %	
۴۳%	۵%	کربن
۱%	۳۵%	سیلیکون
۶%	۹%	منگنز

جدول ۲- مشخصات تیغه فرز

مقدار	مشخصه
تیغه فرز انگشتی	نوع ابزار
UKK آلمان	شرکت سازنده
کارباید	جنس ابزار
۸ mm	قطر ابزار
۶ mm	طول ابزار
۴	تعداد لبه برنده
60 RC	سختی

بار عرضی (step over): اصولاً هنگامی که ابزار فرز انگشتی در حال براده‌برداری است، در دو جهت به آن بار داده شده است؛ یکی در امتداد محور تیغ فرز که به همان عمق برش معروف است و یکی بار در جهت عمود بر محور تیغه فرز است که به آن بار عرضی می‌گویند. بار عرضی در نرم‌افزارهای CAM به step over معروف است.

۴-۱- سطوح تغییرات پارامترهای ورودی

در این پژوهش برای پنج پارامتر انتخاب شده هر کدام سه سطح در نظر گرفته شده است. در جدول ۴ پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده آورده شده است. در این جدول، پارامتر V سرعت برشی، F نرخ پیشروی، a_p عمق برش، step over مقدار بار عرضی و strategy استراتژی مسیر ابزار است.

۵- طراحی ماتریس آزمایشات

در ماتریس انجام آزمایشات تعداد آزمایش و چگونگی ترکیب متغیرها در هر آزمایش از نظر سطح اختصاص یافته به آن‌ها تعیین می‌شود. در انجام این تحقیق به دلیل داشتن ۵ عامل سه سطحی ماتریس L_{27} از طرح تاگوچی استفاده شده است که دارای ۲۷ آزمایش پیشنهادی است. این طرح تاگوچی نسبت به ۲۴۳ آزمایشی مناسب‌تر به نظر می‌رسد که طرح عاملی کامل ارائه می‌دهد. ماتریس‌های تاگوچی در نرم‌افزارهای طراحی آزمایشات و آمار قابل دسترسی است. در این تحقیق یکی از نرم‌افزارهای که در بخش‌های مختلف مورد استفاده واقع شده، نرم‌افزار آماری Minitab است که ماتریس طرح انتخابی L_{27} با این نرم‌افزار طراحی گردید. در جدول ۵، ماتریس مربوطه ارائه شده است. هر ردیف جدول بیانگر یک آزمایش است. در هر آزمایش سطوح اختصاص یافته به پارامترهای ورودی در ستون مربوط به آن پارامتر بیان شده است.

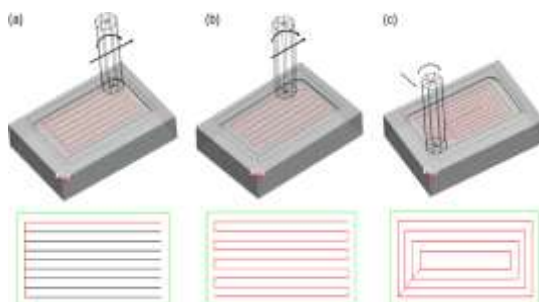
در اندازه‌گیری زبری سطح، چندین معیار استاندارد شده وجود دارد. در این پژوهش از معیار R_a استفاده شده است. زبری سطوح نهایی نمونه‌های فرزکاری شده در این تحقیق، از میانگین ۴ عدد زبری به دست آمده از حرکت سوزن لمس کننده به موازات راستای برش و عمود بر آن محاسبه شده است. برای زبری سنجی نمونه‌ها، معیار متوسط ارتفاع

جدول ۳- مشخصات زبری سنج Taylor Habson

مقدار	مشخصه
۰/۰۲	دقت μm
۲/۵	طول پیمایش ماکزیمم mm
۰/۲۵	طول پیمایش مینیمم mm
۰/۲۵-۰/۸-۲/۵	مقادیر کات آف mm

استراتژی‌های مسیر ابزار: در این پژوهش عملیات فرزکاری روی یک پاکت بررسی شده است در واقع عملیات پاکت تراشی انگشتی بهینه‌سازی شده است. فرزکاری یک پاکت در قطعات ماشین‌کاری با به‌کارگیری استراتژی‌های مختلف انجام‌پذیر است. معمولاً سه استراتژی که بیشتر در نرم‌افزارهای CAM استفاده می‌شوند شامل: استراتژی یک‌جهته (Oneway)، رفت و برگشتی (Back&Front) و چرخشی (Spiral) می‌باشند.

در استراتژی یک‌جهته ابزار روی خطوط موازی روی سطح ماشین‌کاری حرکت می‌کند. در انتهای خط ابزار از کار فاصله می‌گیرد و به ابتدای خط برمی‌گردد؛ سپس با یک بار ثابت موازی با خط قبلی حرکت می‌کند (شکل ۱ a). در استراتژی رفت و برگشتی ابزار یک مسیر زیگزاگ را روی سطح قطعه و در صفحه xy را طی می‌کند (شکل ۱ b). در استراتژی مارپیچ ابزار از مرکز پاکت براده برداری را شروع می‌کند و به صورت مارپیچ به سمت لبه پاکت حرکت می‌کند. در ابتدای هر سیکل ابزار دوباره به مرکز پاکت بر می‌گردد و دوباره با حرکت مارپیچ به لبه پاکت می‌رسد. این کار تکرار می‌شود تا داخل قطعه ماشین‌کاری شود. (شکل ۱-c).



شکل ۱- استراتژی‌های مسیر ابزار

جدول ۴- سطوح تغییرات پارامترهای ورودی

پارامتر	واحد	سطوح تغییرات		
		۱	۲	۳
V	m/min	۱۱۰	۱۳۰	۱۵۰
F	mm/min	۵۰۰	۷۰۰	۹۰۰
ap	mm	۰/۱	۰/۲	۰/۳
Strategy	mm	۴	۵	۶
		Oneway	Back&front	Spiral

جدول ۵- نتایج آزمایشات

شماره آزمایش	strategy	متغیرهای ورودی				متغیر خروجی Ra
		Step over	ap	F	V	
۱	oneway	۴	۰/۱	۵۰۰	۱۱۰	۰/۹۱
۲	zigzag	۴	۰/۱	۵۰۰	۱۱۰	۰/۹۲۵
۳	spiral	۴	۰/۱	۵۰۰	۱۱۰	۰/۹۴۵
۴	oneway	۵	۰/۲	۷۰۰	۱۱۰	۰/۵۳۵
۵	zigzag	۵	۰/۲	۷۰۰	۱۱۰	۰/۴۵۵
۶	spiral	۵	۰/۲	۷۰۰	۱۱۰	۱/۷۶
۷	oneway	۶	۰/۳	۹۰۰	۱۱۰	۱/۶۶
۸	zigzag	۶	۰/۳	۹۰۰	۱۱۰	۱/۷۷۵
۹	spiral	۶	۰/۳	۹۰۰	۱۱۰	۱/۶۳۵
۱۰	oneway	۶	۰/۲	۵۰۰	۱۳۰	۱/۳۹۵
۱۱	zigzag	۶	۰/۲	۵۰۰	۱۳۰	۱/۶۰۵
۱۲	spiral	۶	۰/۲	۵۰۰	۱۳۰	۱/۵۲
۱۳	oneway	۴	۰/۳	۷۰۰	۱۳۰	۱/۱
۱۴	zigzag	۴	۰/۳	۷۰۰	۱۳۰	۱/۸۵۵
۱۵	spiral	۴	۰/۳	۷۰۰	۱۳۰	۱/۰۴۵
۱۶	oneway	۵	۰/۱	۹۰۰	۱۳۰	۱/۱۳۵
۱۷	zigzag	۵	۰/۱	۹۰۰	۱۳۰	۱/۳۷۵
۱۸	spiral	۵	۰/۱	۹۰۰	۱۳۰	۱/۲۳۵
۱۹	oneway	۵	۰/۳	۵۰۰	۱۵۰	۱/۰۷۵
۲۰	zigzag	۵	۰/۳	۵۰۰	۱۵۰	۰/۹۴
۲۱	spiral	۵	۰/۳	۵۰۰	۱۵۰	۱/۲۰۵
۲۲	oneway	۶	۰/۱	۷۰۰	۱۵۰	۱/۰۸۵
۲۳	zigzag	۶	۰/۱	۷۰۰	۱۵۰	۱/۳۰۵
۲۴	spiral	۶	۰/۱	۷۰۰	۱۵۰	۱/۴۷۵
۲۵	oneway	۴	۰/۲	۹۰۰	۱۵۰	۱/۷۵۷
۲۶	zigzag	۴	۰/۲	۹۰۰	۱۵۰	۱/۹۶۵
۲۷	spiral	۴	۰/۲	۹۰۰	۱۵۰	۲/۱۲۵

پروفیل‌های زبری سطح که با علامت R_a معرفی می‌شود، انتخاب شده است.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1)$$

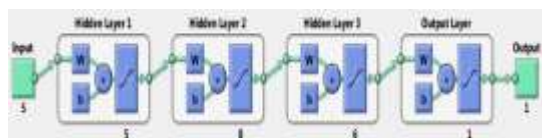
پس از اندازه‌گیری زبری هر قطعه و به دست آوردن میانگین R_a ، خروجی آزمایشات به جدول طراحی تاگوچی اضافه شده، در نهایت به صورت جدول ۵ تکمیل شده است.

۷- مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی

تا کنون انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی معرفی شده‌اند که بر اساس آرایش نورون‌ها و نحوه ارتباط آن‌ها با هم (معماری شبکه)، روش یادگیری و توابع تبدیل طبقه‌بندی‌های بسیاری مطرح شده است. شبکه‌های عصبی پرسپترون به ویژه پرسپترون چند لایه، در زمره کاربردی‌ترین شبکه‌های عصبی می‌باشند. این شبکه‌ها قادرند، پس از انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی، یک مدل غیرخطی با دقت بالایی را تخمین بزنند؛ لذا تنها این نوع از شبکه‌ها در این پروژه استفاده شده، جهت مدل‌سازی فرآیند فرزندکاری از آن‌ها بهره می‌گیریم.

۷-۱- نتایج مدل‌سازی فرآیند

پس از انتخاب الگوریتم پرسپترون چند لایه و استفاده از Toolbox نرم‌افزار Matlab برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی، ماتریس طراحی آزمایش تاگوچی به عنوان داده‌های ورودی و خروجی استفاده می‌شوند [۱۱]. معماری‌های متعددی برای شبکه به روش سعی و خطا آزمایش شد که در نهایت شبکه‌ای با معماری ۱-۶-۸-۵ دارای کمترین خطا بود؛ که عدد ۵ تعداد پارامترهای ورودی است، عدد ۸ تعداد نورون‌های لایه مخفی اول، عدد ۶ تعداد نورون‌های لایه مخفی دوم و ۱ هم خروجی یا همان زبری سطح است (شکل ۲).



شکل ۲- معماری شبکه عصبی

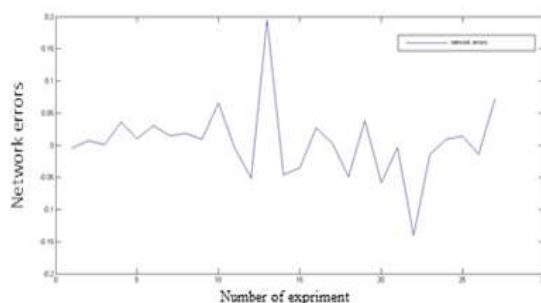
در جدول ۶، مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و همچنین مقدار خطایی که شبکه در پیش‌بینی داشته است نشان داده شده است. بیش‌ترین درصد خطای شبکه ۱۱/۴۸٪، کمترین مقدار خطای آن، ۰/۰۹٪ و میانگین درصد خطای شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده ۳/۰۲٪

جدول ۶- نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی مصنوعی

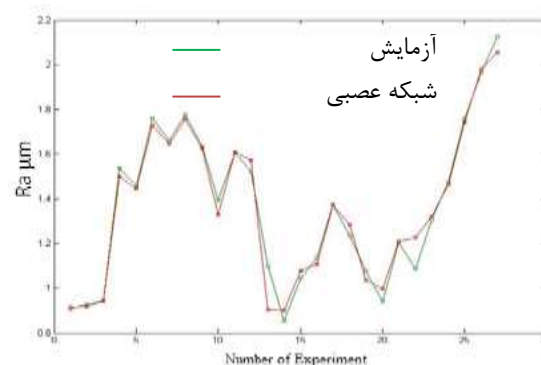
شماره آزمایش	Ra پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی	Ra به دست آمده از آزمایش	باقیمانده درصد خطا
۱	۰/۹۱۴۳	۰/۹۱۰	۰/۴۸
۲	۰/۹۱۸۴	۰/۹۲۵	۰/۷۲
۳	۰/۹۴۴۲	۰/۹۴۵	۰/۰۹
۴	۱/۴۹۸۹	۱/۵۳۵	۲/۴۱
۵	۱/۴۴۴۹	۱/۴۵۵	۰/۷
۶	۱/۷۲۹۴	۱/۷۶۰	۱/۷۷
۷	۱/۶۴۵۴	۱/۶۶۰	۰/۸۹
۸	۱/۷۵۶۹	۱/۷۷۵	۱/۰۴
۹	۱/۶۲۵۴	۱/۶۳۵	۰/۶
۱۰	۱/۳۲۹۲	۱/۳۹۵	۴/۹۶
۱۱	۱/۶۰۹۱	۱/۶۰۵	۰/۲۶
۱۲	۱/۵۷۱۵	۱/۵۲۰	۳/۲۸
۱۳	۰/۹۰۴۶	۱/۱۰۰	۰/۲۱
۱۴	۰/۹۰۰۶	۰/۸۵۵	۵/۰۷
۱۵	۱/۰۸۰۰	۱/۰۴۵	۳/۲۵
۱۶	۱/۱۰۷۹	۱/۱۳۵	۲/۴۵
۱۷	۱/۳۷۱۸	۱/۳۷۵	۰/۲۴
۱۸	۱/۲۸۳۷	۱/۲۳۵	۳/۸
۱۹	۱/۰۳۶۹	۱/۰۷۵	۳/۶۸
۲۰	۰/۹۹۷۹	۰/۹۴۰	۵/۸۱
۲۱	۱/۲۰۸۵	۱/۲۰۵	۰/۲۹
۲۲	۱/۲۲۵۷	۱/۰۸۵	۱۱/۴۸
۲۳	۱/۳۱۹۲	۱/۳۰۵	۱/۰۸
۲۴	۱/۴۶۵۸	۱/۴۷۵	۰/۶۳
۲۵	۱/۷۴۳۰	۱/۷۵۷	۰/۸۱
۲۶	۱/۹۷۹۴	۱/۹۶۵	۰/۷۳
۲۷	۲/۰۵۳۱	۲/۱۲۵	۳/۵۱

جواب‌ها را اصلاح می‌کند و در هر مرحله، جواب‌های بهتری نسبت به مرحله قبل به دست می‌دهد. با گذشت نسل‌های متمادی، جمعیت جواب‌ها به سمت یک جواب بهینه میل می‌کند. الگوریتم ژنتیک، یک روش مناسب بهینه‌سازی الهام گرفته شده از طبیعت و از جمله کارآمدترین این روش‌هاست که امروزه به طور گسترده‌ای در علوم مختلف به کار می‌رود.

است. شکل ۳ خطای پیش‌بینی مدل شبکه عصبی در ۲۷ آزمایش انجام شده را نشان می‌دهد. در شکل ۴، نمودار زبری سطح به دست آمده در آزمایشات و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است. همان طور که در نمودار دیده می‌شود، اختلاف اندکی بین پیش‌بینی مدل شبکه عصبی و نتایج عملی وجود دارد و این دقت بالای مدل شبکه عصبی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار خطای شبکه عصبی



شکل ۴- نمودار مقادیر پیش‌بینی شده شبکه عصبی و مقادیر به دست آمده در آزمایشات

۸- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک [۱۲] از الگوریتم‌های تکاملی است که بر اساس انتخاب شایسته‌ترین افراد و تکامل نسل‌های متوالی، استوار است. این روش، تقلیدی از فرآیند تکامل با استفاده از الگوریتم‌های رایانه‌ای است. اساسی‌ترین اصل تکامل، وراثت است. هر نسل، خصوصیات نسل قبلی را به ارث می‌برد و به نسل بعد انتقال می‌دهد. این انتقال خصوصیات، از نسلی به نسل دیگر با ژن‌ها صورت می‌گیرد. این الگوریتم ابتدا برخی از جواب‌ها را تصادفی در نظر می‌گیرد و دائم جمعیت

جدول ۸- پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک

پارامتر تنظیمی	مقدار
شرط توقف	۲۰۰-۵۰۰ تکرار
عملگر انتخاب	چرخ رولت
احتمال جهش	۰/۲۱
نحوه تقاطع	Two points
اندازه جمعیت	۵۰

جدول ۹- نتایج پیشنهادی الگوریتم ژنتیک برای پارامترهای ورودی در استراتژی یک جهته

ردیف	strategy	Step over (mm)	ap (mm)	F (mm)	V (m/min)	Ra (μm)	مقادیر پیشنهادی الگوریتم ژنتیک برای پارامترهای ورودی خروجی
۱	oneway	۴	۰/۱	۵۷۷/۲۰	۱۴۹/۹۹	۰/۸۶۷	
۲	oneway	۴	۰/۱۰۱	۵۸۷/۸۰	۱۴۴/۵۵	۰/۸۶۸	
۳	oneway	۴/۰۰۲	۰/۱	۵۸۵/۴۳	۱۴۴/۶۹	۰/۸۶۸	
۴	oneway	۴/۰۰۵	۰/۱	۵۸۵/۵۹	۱۴۳/۹۸	۰/۸۶۸	
۵	oneway	۴/۰۰۲	۰/۱۰۱	۵۸۷/۴۳	۱۴۴/۴۳	۰/۸۶۸	

با بررسی مقادیر پیشنهادی پارامترها توسط الگوریتم ژنتیک در جدول ۹ می‌توان دید که الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن زبری مینیمم در استراتژی یک جهته برای سرعت برشی مقدار تقریبی ۱۴۴ متر بر دقیقه را پیشنهاد می‌دهد که نزدیک به سطح سوم برای این پارامتر، یعنی ۱۵۰ متر بر دقیقه است. این نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک برای مینیمم شدن زبری سطح در فرزکاری انگشتی سرعت برشی ماکزیمم را پیشنهاد می‌دهد؛ همچنین این الگوریتم برای پارامتر نرخ پیشروی ۵۸۵ میلی‌متر بر دقیقه، برای عمق برش ۰/۱ میلی‌متر و برای step over مقدار ۴ میلی‌متر را برای رسیدن به زبری سطح مینیمم پیشنهاد می‌دهد؛ یعنی نرخ پیشروی تقریباً در کمترین مقدار، عمق برش در کمترین مقدار و step over در کمترین مقدار را پیشنهاد می‌دهد.

جدول ۹-۲- بهینه‌سازی زبری سطح استراتژی رفت و برگشتی

در مرحله دوم سطح دوم برای استراتژی مسیر ابزار، یعنی استراتژی رفت و برگشتی در نظر گرفته می‌شود و بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک را برای چهار پارامتر دیگر انجام می‌شود.

۹- مسئله بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری انگشتی

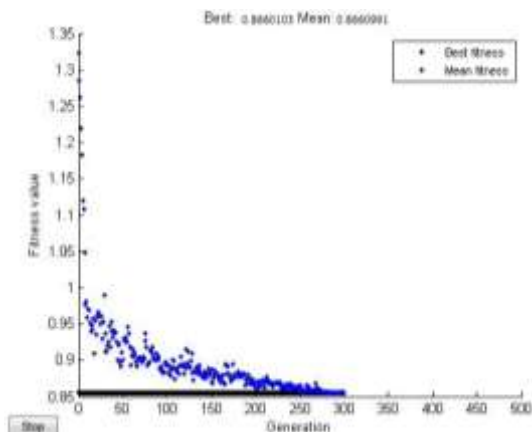
در بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری انگشتی، هدف یافتن مقادیری از پارامترهای اثرگذار بر فرآیند است که با آن‌ها بتوان به حداقل زبری سطح قطعه در حال ماشین‌کاری دست یافت. بدین منظور برای بهینه‌سازی خروجی فرآیند، از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده به عنوان تابعی استفاده می‌شود که قابلیت پیش‌بینی خروجی فرآیند را دارد. برای این کار از یک الگوریتم ابتکاری بنام الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای استفاده از این الگوریتم، از Toolbox ژنتیک نرم‌افزار Matlab2011 استفاده می‌شود. اولین قدم در شروع یک فرآیند بهینه‌سازی، رابطه‌سازی مسئله است که بدین منظور باید متغیرهای طراحی، قيود و تابع سیستم تعیین گردد. برای هر یک از پارامترهای ورودی، حد بالا و حد پایینی در نظر گرفته شده است که به عنوان قيود مسئله مطرح می‌شوند. بازه پارامترهای ورودی و تابع شایستگی که همان مدل شبکه عصبی است، در Toolbox ژنتیک نرم‌افزار Matlab وارد شده، تنظیم شده‌اند. در جدول ۷، بازه پارامترهای ورودی آمده است.

جدول ۷- بازه تغییرات پارامترهای ورودی

پارامتر	بازه تغییرات
V (m/min)	۱۱۰-۱۵۰
F (mm/min)	۵۰۰-۹۰۰
ap (mm)	۰/۱-۰/۳
Step over (mm)	۴-۶

۹-۱- بهینه‌سازی زبری سطح استراتژی یک جهته

در این مرحله پارامتر پنجم، یعنی پارامتر استراتژی مسیر را روی سطح اول در نظر گرفته، چهار پارامتر اول مانند جدول ۷ تنظیم می‌شود و سپس الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود. الگوریتم ژنتیک دارای پارامترهای تنظیمی متعددی است که با تغییر هر کدام جواب مسئله نیز متفاوت می‌شود. در این پژوهش، از روش آزمون و خطا استفاده شد تا به بهترین حالت پارامترهای تنظیمی الگوریتم به دست آمد که جواب بهتری را تولید می‌کند. پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک که بهترین جواب را داده‌اند، در جدول ۸ آمده‌اند. نتیجه پنج اجرای الگوریتم که کمترین زبری سطح را داشته‌اند، در جدول ۹ آمده است.



شکل ۵- تغییرات تابع شایستگی در اجرای الگوریتم ژنتیک (استراتژی رفت و برگشت)

نتایج حاصل از بهینه‌سازی فرآیند در مرحله سوم و برای استراتژی مسیر چرخشی در سه پارامتر نرخ پیشروی، عمق برش و step over همانند دو استراتژی یک جهته و رفت و برگشتی است، اما در پارامتر سرعت برشی برای استراتژی چرخشی سرعت برشی ۱۲۴ متر بر دقیقه پیشنهاد شده است که نزدیک به سطح دوم در نظر گرفته شده برای سرعت برشی است. نتایج نشان می‌دهد که برای رسیدن به زبری سطح مینیمم در فرزکاری انگشتی، باید سرعت برشی را در بالاترین سطح یعنی سطح سوم، نرخ پیشروی، عمق برش و step over را در کمترین مقدار، تنظیم کرد. نتایج حاصل برای پارامتر استراتژی نشان می‌دهد که استراتژی رفت و برگشتی، زبری سطح کمتری را ایجاد می‌کند، البته تفاوت زبری سطح در سه استراتژی متفاوت، بسیار کم و در حدود ۰/۰۱ میکرومتر است که قابل چشم‌پوشی است.

۱۰- تحلیل نتایج آزمایشات فرآیند فرزکاری

انگشتی با روش تاگوچی

در این پژوهش برای استفاده از روش تاگوچی، از نرم‌افزار MINITAB استفاده شده است. این نرم‌افزار تمامی محاسبات مربوط به روش تاگوچی از جمله نسبت سیگنال به نویز را محاسبه کرده، نمودار آن‌ها را ترسیم می‌کند. برای انجام این تحلیل خروجی آزمایشات به همراه مقادیر سطوح پارامترها برای تمامی آزمایشات را وارد نرم‌افزار MINITAB کرده، تحلیل تاگوچی روی آن انجام می‌شود. مشخصه کیفی مورد نظر در این پژوهش، میزان زبری سطح به دست آمده قطعه

نتایج پنج اجرای الگوریتم ژنتیک برای استراتژی مسیر ابزار رفت و برگشتی، در جدول ۱۰ آمده است. با بررسی نتایج الگوریتم ژنتیک برای استراتژی رفت و برگشتی برای رسیدن به زبری سطح مینیمم در فرزکاری انگشتی در جدول ۱۰، دیده می‌شود که GA بیشترین مقدار را برای سرعت برشی، کمترین مقدار را برای نرخ پیشروی، کمترین مقدار را برای عمق برش و همچنین مقدار ۴/۶۶ میلی‌متر را برای step over را پیشنهاد داده است که نزدیک به کمترین مقدار است. نمودار تغییرات تابع در اجرای الگوریتم ژنتیک، در شکل ۵ ادامه آمده است.

۹-۳- بهینه‌سازی زبری سطح استراتژی چرخشی

در مرحله سوم اجرای GA استراتژی مسیر ابزار چرخشی در نظر گرفته شده است که نتایج آن در جدول ۱۱ آمده است.

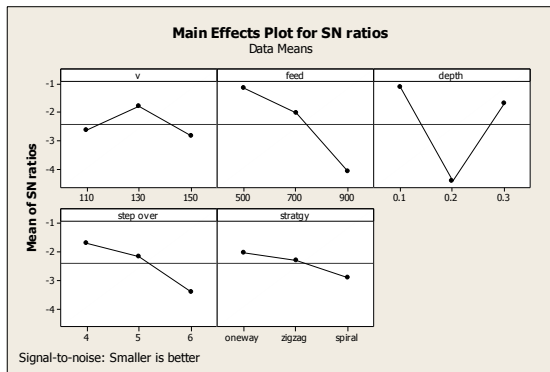
جدول ۱۰- مقادیر پیشنهادی الگوریتم ژنتیک در استراتژی رفت و برگشتی

ردیف	Step over (mm)	ap (mm)	F (mm)	V (m/min)	Ra (μm)	مقادیر پیشنهادی الگوریتم ژنتیک برای پارامترهای ورودی	خروجی
۱	۴/۶۶۵	۰/۱	۵۰۲/۰۰	۱۴۹/۹۶۰	۰/۸۶۰	zigzag	۱
۲	۴/۶۶۲	۰/۱	۵۰۰/۷۹	۱۴۹/۸۸۵	۰/۸۶۰	zigzag	۲
۳	۴/۶۵۹	۰/۱	۵۰۰/۴۲	۱۴۹/۹۷۶	۰/۸۶۰	zigzag	۳
۴	۴/۶۴۴	۰/۱	۵۰۰/۰۰	۱۴۹/۰۰۰	۰/۸۶۶	zigzag	۴
۵	۴/۶۶۶	۰/۱	۵۰۱/۰۹	۱۴۹/۹۹۸	۰/۸۶۶	zigzag	۵

جدول ۱۱- مقادیر پیشنهادی الگوریتم ژنتیک در استراتژی چرخشی

ردیف	Step over (mm)	ap (mm)	F (mm)	V (m/min)	Ra (μm)	مقادیر پیشنهادی الگوریتم ژنتیک برای پارامترهای ورودی	خروجی
۱	۴/۰۳۹	۰/۱۰۲	۵۰۲/۰۱	۱۲۴/۷۷۹	۰/۸۶۵	spiral	۱
۲	۴/۰۰۰	۰/۱۰۰	۵۰۰/۱۲	۱۲۴/۰۷۸	۰/۸۶۵	spiral	۲
۳	۴/۰۰۳	۰/۱۰۳	۵۰۰/۰۰	۱۲۴/۳۰۶	۰/۸۶۵	spiral	۳
۴	۴/۰۲۰	۰/۱۰۰	۵۰۰/۵۴	۱۲۴/۱۸۴	۰/۸۶۵	spiral	۴
۵	۴/۰۵۲	۰/۱۰۴	۵۰۱/۶۵	۱۲۴/۷۳۳	۰/۸۶۶	spiral	۵

و استراتژی مسیر ابزار در سطح اول باشد. با مراجعه به ردیف ششم جدول ۱۲ دیده می‌شود که میزان تأثیرگذاری هر پارامتر بر زبری سطح نهایی قطعه را نشان می‌دهد که عمق برش بیش‌ترین تأثیر را بر زبری نهایی قطعه دارد و پس از آن به ترتیب نرخ پیشروی، step over، سرعت برشی و در نهایت استراتژی مسیر برش، بیش‌ترین تأثیر را بر زبری نهایی سطح قطعه دارد. آنالیز واریانس اطلاعات خروجی نیز که در جدول ۱۳ نشان داده شده است، تایید کننده این نتایج است.



شکل ۶- نمودار مقادیر سیگنال به نویز

جدول ۱۲- مقادیر سیگنال به نویز برای پارامترهای فرآیند فرزکاری انگشتی

V (m/min)	F (mm)	ap (mm)	Step over (mm)	strategy	سطح
-۲/۶۱۸	-۱/۱۵۱	-۱/۱۲۳	-۱/۶۸۶	-۲/۰۴۰	۱
-۱/۷۹۹	-۲/۰۱۵	-۴/۴۲۶	-۲/۱۴۴	-۲/۳۰۲	۲
-۲/۸۲۴	-۴/۰۷۴	-۱/۶۹۱	-۳/۴۱۰	-۲/۸۹۸	۳
۱/۰۲۶	۲/۹۲۳	۳/۳۰۳	۱/۷۲۴	۰/۸۵۹	تغییرات
۴	۲	۱	۳	۵	رتبه

جدول ۱۳- آنالیز واریانس نسبت‌های سیگنال به نویز برای نتایج خروجی

Analysis of Variance for SN ratios						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
v	2	5.296	5.296	2.6481	4.05	0.038
feed	2	40.584	40.584	20.2919	31.06	0.000
depth	2	56.152	56.152	28.0761	42.98	0.000
step over	2	14.358	14.358	7.1788	10.99	0.001
stratgy	2	3.484	3.484	1.7422	2.67	0.100
Residual Error	16	10.451	10.451	0.6532		
Total	26	130.325				

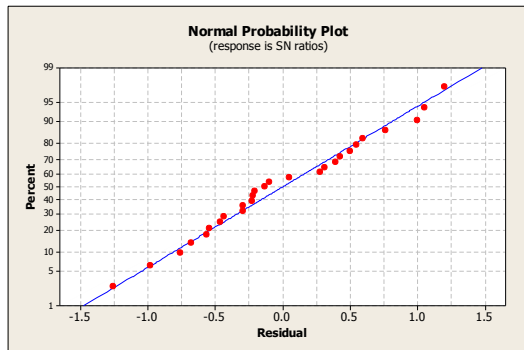
در فرآیند فرزکاری انگشتی است و این مشخصه کیفی میزان مینیمم آن مطلوب است؛ یعنی هدف کمینه کردن زبری سطح (R_a) است؛ بنابراین باید گزینه کوچک‌ترین بهتر را انتخاب کرد. در حالت کوچک‌ترین بهتر فرمولی که برای محاسبه نسبت S/N استفاده می‌شود، در معادله (۱) آمده است.

$$\frac{s}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \right) \quad (1)$$

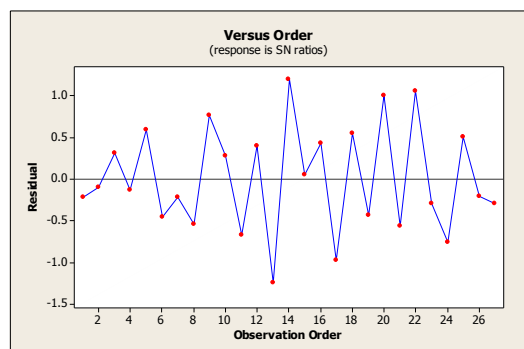
پس از محاسبه نسبت سیگنال به نویز مقادیر آن برای کلیه سطوح پارامترها در جدول ۱۲ آمده است.

در روش تاگوچی برای رسیدن به کمترین زبری سطح نسبت سیگنال به نویز، باید بیش‌ترین مقدار باشد. با مراجعه به ستون دوم جدول ۱۲، سطح دوم از پارامتر سرعت برشی دارای بیش‌ترین مقدار نسبت سیگنال به نویز است؛ یعنی تاگوچی سطح دوم سرعت برشی که دارای مقدار ۱۳۰ متر بر دقیقه است را به عنوان مقداری مناسب معرفی می‌کند که کمترین زبری را نتیجه می‌دهد. مقدار حداکثر نسبت سیگنال به نویز برای پارامتر نرخ پیشروی در سطح اول به دست آمده است و این یعنی تاگوچی پیشنهاد می‌کند برای اینکه کمترین مقدار برای زبری سطح به دست آید، باید نرخ پیشروی در سطح اول یعنی در ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شود. برای پارامتر عمق برش نسبت سیگنال به نویز در سطح اول (۱/۱ میلی‌متر)، دارای بیش‌ترین مقدار است و نشان می‌دهد که کمترین مقدار برای عمق برش، کمترین زبری سطح را نتیجه می‌دهد. نسبت S/N برای پارامتر step over در سطح اول، دارای بیش‌ترین مقدار است و این نشان می‌دهد که هرچه مقدار بار عرضی کمتر باشد، زبری سطح کمتری حاصل می‌شود. برای پنجمین پارامتر یعنی استراتژی مسیر ابزار، نسبت سیگنال به نویز در سطح اول، یعنی استراتژی یک جهته دارای بیش‌ترین مقدار است و این یعنی استراتژی یک جهته زبری سطح کمتری را نسبت به بقیه استراتژی‌ها نتیجه می‌دهد.

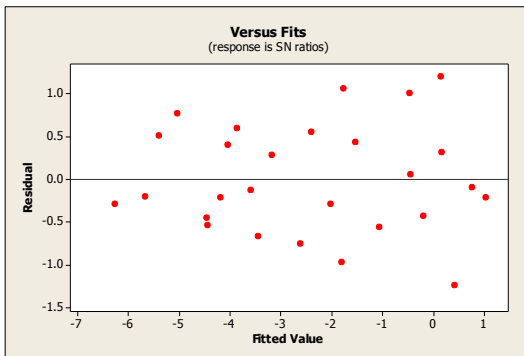
نمودار مقادیر نسبت سیگنال به نویز در سطوح مختلف پارامترها، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، برای رسیدن به زبری سطح مینیمم باید سرعت برشی در سطح دوم، نرخ پیشروی در سطح اول، عمق برش در سطح اول، step over در سطح اول



شکل ۷- توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها



شکل ۸- توزیع مقادیر باقیمانده در آزمایش‌های مختلف



شکل ۹- توزیع مقادیر باقیمانده نسبت به مقادیر برازش یافته

۳. پیش‌بینی زبری سطح قطعه با تنظیم مقادیر پارامترهای ورودی بدون انجام آزمایش برای استفاده در بهینه‌سازی فرآیند.
۴. طراحی و ارائه روش بهینه‌سازی کارآمد به منظور تعیین سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی برای نیل به مقدار مینیمم از خروجی فرآیند.

چگونگی توزیع مقادیر باقی‌مانده در ارزیابی کیفیت مدل آماری، از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از فرض‌هایی که باید برای هر مدل رگرسیون بررسی شود، نرمال بودن توزیع باقیمانده‌هاست. پراکندگی نقاط نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها در اطراف خط مستقیم در شکل ۷، نشان دهنده توزیع نرمال باقیمانده‌هاست. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب، نمودارهای مقادیر باقیمانده را به ازای شماره‌ی آزمایش و مقادیر برازش شده نشان می‌دهند. پراکندگی نقاط طراحی و عدم وجود یک ساختار منظم و الگوی مشخص در این نمودارها نشان‌دهنده‌ی ثابت بودن واریانس بوده، مناسب بودن مدل برازش شده را نشان می‌دهد.

۱۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری انگشتی، روی قطعه‌ای از جنس AISI 1045 انجام شد. برای رسیدن به کیفیت سطح مطلوب قطعه، باید تا حد امکان زبری سطح مینیمم شود. به این ترتیب زبری سطح به دست آمده از فرآیند فرزکاری انگشتی، به عنوان خروجی فرآیند انتخاب شد. مجموعه تحقیقات انجام شده در این پژوهش، رویکرد مناسبی را برای کنترل فرآیند فرزکاری انگشتی معرفی می‌کند. از آن‌جا که این کار با خطای ناشی از متغیرهای غیرقابل کنترل همراه است، می‌توان انتظار داشت که حتی با یک مجموعه از سطوح پارامترهای تنظیمی خاص، نتایج متفاوتی به دست آید. با این حال با توجه به ماهیت فرآیند، انطباق بالاتر از ۹۰٪ مدل‌سازی کاملاً قابل قبول به نظر می‌رسد. این انطباق در شرایط صنعتی دقت بسیار خوبی دارد. به طور کلی دستاوردهای مهم این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱. جمع‌آوری داده‌های تجربی فرآیند فرزکاری انگشتی فولاد AISI 1045 به کمک طراحی آزمایشات با اجرای طرح تاگوچی و امکان استفاده از این داده‌ها، به عنوان یک بانک اطلاعاتی که می‌تواند برای انجام مدل‌سازی به روش‌های مختلف و یا سایر تحقیقات مرتبط، مورد استفاده قرار گیرد.
۲. ایجاد ارتباط معنی‌دار بین پارامترهای تنظیمی ورودی فرآیند فرزکاری انگشتی و خروجی زبری سطح نهایی با طراحی و ایجاد یک مدل شبکه عصبی مصنوعی.

- roughness prediction model. *Int J Mach Tool Manu* 42(6): 675-680.
- [6] Brezocnik M, Kovacic M, Ficko M (2004) Prediction of surface roughness with genetic programming. *J Mater Process Tech* 157: 28-36.
- [7] Çolak O, Kurbanoglu C, Kayacan MC (2007) Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. *Mater Design* 28(2): 657-666.
- [8] Tanse IN (2006) Selection of optimal cutting conditions by using GONNS. *Int J Mach Tool Manu* 46(1): 26-35.
- [9] Palanisamy P, Rajendran I, Shanmugasundaram S (2007) Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations. *Int J Adv Manuf Tech* 32(7-8): 644-655.
- [10] Gologlu C, Sakarya N (2008) The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method. *J Mater Process Tech* 206(1): 7-15.
- [11] Holland JH (1975) *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- [12] Golberg DE (1989) *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co Inc. Boston, MA, USA.
۵. استفاده از روش پیش‌بینی تاگوچی برای به دست آوردن سطوح بهینه پارامترها.
۶. از میان پارامترهای تاثیر گذار بر زبری سطح، عمق برش بیش‌ترین تاثیر را بر زبری نهایی قطعه دارد و پس از آن به ترتیب نرخ پیشروی، step over، سرعت برشی و در نهایت استراتژی مسیر برش، بیش‌ترین تاثیر را بر زبری نهایی سطح قطعه دارد.

مراجع

- [1] Stephenson DA, Agapiou JS (2005) *Metal cutting theory and practice*. 68. CRC press.
- [2] Zain AM, Haron H, Sharif S (2008) An overview of GA technique for surface roughness optimization in milling process. *ITSim 2008. International Symposium*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- [3] Oktem H, Erzurumlu T, Erzincanli F (2006) Prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm. *Mater Design* 27(9): 735-744.
- [4] Zain AM, Haron H, Sharif S (2010) Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process. *Expert Syst Appl* 37(6): 4650-4659.
- [5] Suresh P, Rao PV, Deshmukh S (2002) A genetic algorithmic approach for optimization of surface