



بررسی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر روی صافی سطح در عملیات فرزکاری با استفاده از میز هگزاپاد

رضا احدی^۱، علی ربانی^۱، محمدجواد ناطق^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۸۴۱۱۵، nategh@modares.ac.ir

چکیده

در سال‌های گذشته ماشین‌ابزار هگزاپاد با شش درجه آزادی مورد توجه بسیاری از محققان و صنعت‌گران برای رسیدن به اهدافی چون چالاکي و سرعت بالای ماشین‌کاری قرار گرفته است. سطوح با شکل آزاد از جمله سطوح پرکاربرد در صنعت امروز می‌باشند. از این سطوح در صنایع خودروسازی، هوا و فضا به وفور استفاده می‌گردد. بنابراین ماشین‌کاری این سطوح از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. برای میان‌یابی سطوح با شکل آزاد از منحنی‌های نرَبز استفاده می‌شود که در نرم‌افزارهای مکانیکی کاربرد خاص خود را دارند. برای بررسی کیفیت سطح ماشین‌کاری شده، زبری سطح نهایی حائز اهمیت است و مهم‌ترین شاخصه سطح ماشین‌کاری شده است. در این پژوهش، تاثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری مانند عمق برش، سرعت پیشروی و سرعت برشی بر روی صافی سطح و میزان زبری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای طراحی آزمایش از روش تاگوچی استفاده شده است. همچنین با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک بهترین حالت برای صافی سطح بدست آمده است. نمونه آزمایش از نوع آلومینیوم گرید سه هزار می‌باشد. نتایج نشان داد که سرعت برشی و عمق برش بیشترین تاثیر را بر روی صافی سطح دارد و با افزایش سرعت برشی صافی سطح بهبود می‌یابد. همچنین افزایش عمق برش تاثیر منفی بر صافی سطح دارد.

کلیدواژگان: ماشین‌کاری، صافی سطح، هگزاپاد، سطوح نرَبز، الگوریتم ژنتیک، رگرسیون

Investigation of Machining Parameters Effect on Surface Roughness in Milling with Hexapod Machine Tool

Reza Ahadi, Ali Rabbani, Mohammad Javad Nategh*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

ABSTRACT

In the last years hexapod machine tool with six degrees of freedom has got the attention of experts for achieving high dexterity and high speed machining. Free form surfaces are widely used in today industries. These surfaces are much encountered in aerospace, auto and other industries. Therefore machining of these surfaces is very important. For interpolation of free form surfaces, NURBS curves are commonly used. For investigating the quality of machined surface, final surface roughness is very important and is the most important feature of machined surface. In this study the effect of machining parameters such as cutting depth, feed rate and cutting speed on surface roughness were investigated. Design of experiments was done using Taguchi method. Then with using of neural network and genetic algorithm the best case for surface roughness was achieved. The cutting tool used in this study was ball end-mill and the work piece was aluminum of three thousand series. The results showed that cutting speed and depth of cut had the most effect on the surface roughness.

Keywords: Machining, Surface Roughness, Hexapod, NURBS Surfaces, Genetic Algorithm, Regression.

۱- مقدمه

استفاده از یک فرز سرکروی به ماشین‌کاری سطح مورد آزمایش پرداختند.

آن‌ها در نهایت زمان و هزینه را بین این روش و روش سنتی مقایسه کردند [۲].

بوزاکیس و همکاران به بررسی نیرو و صافی سطح در ماشین‌کاری سطوح با شکل دلخواه پرداختند. آن‌ها استراتژی‌های مختلف را آزمایش کردند و در هر حالت صافی سطح را ارزیابی نمودند. در انتها نیز بهترین حالت برای صافی سطح را به دست آوردند [۳].

وستیکوس و برناردوس با استفاده از شبکه‌های عصبی و روش طراحی آزمایش تاگوچی صافی سطح را در کف تراشی با استفاده از دستگاه CNC پنج محوره به دست آوردند. آن‌ها نشان دادند که پیش‌بینی آن‌ها خطای حدود ۱/۸۶ درصد دارد [۴].

ماشین‌ابزار هگزاپاد به عنوان ماشین‌ابزاری که دارای شش درجه آزادی و هم چنین از چالاکي بالایی برخوردار است، جایگاه ویژه‌ای در ماشین‌کاری قطعات با شکل دلخواه دارد. ماشین‌کاری سطوح و منحنی‌های آزاد نیز در تولید قطعات پیچیده در صنایع مختلف مانند هوافضا، قالب‌سازی و غیره کاربرد فراوانی دارند. در همین زمینه در دستگاه‌های فرز تلاش‌های زیادی صورت پذیرفته است. بعضی از محققان با استفاده از دستگاه فرز پنج محوره به ماشین‌کاری منحنی‌های ساده پرداختند و توانستند راندمان فرایند را تا ۲۰ درصد افزایش بدهند که البته این فرایند نیازمند تجهیزات خاص می‌باشد [۱]. رورن و همکاران به بررسی مهندسی معکوس سطوح با شکل دلخواه پرداختند. آن‌ها از معادلات نرَبز برای تقریب ساختار سطح بهره بردند و با

Please cite this article using:

R. Ahadi, A. Rabbani, M. J. Nategh, Investigation of Machining Parameters Effect on Surface Roughness in Milling with Hexapod Machine Tool, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 90-94, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اندازه گیری شد و نتایج با هم مقایسه گردیدند. در ضمن با استفاده از شبکه-های عصبی و الگوریتم ژنتیک بهینه ترین حالت برای صافی سطح بدست آمد.

۲- دستگاه هگزپاد

ماشین ابزارهای سنتی از مکانیزم سری بهره می برند که این مکانیزم مزایا و معایب خود را دارد. در سالهای گذشته رباتهایی با ساختار موازی مورد توجه قرار گرفته اند که چالاکی بالا و دقت بالا از مزایای این ساختار می باشد. با توجه به حرکت سیستم های تولیدی به سوی ماشین کاری پرسرعت، نیاز به ماشین ابزاری با عملکرد دینامیکی بالا، سفتی بهبود یافته و جرم در حال حرکت کمتر، احساس می شد. از آنجا که ساختار ماشین های سنتی پاسخگوی نیازهای فوق نبود برای برآورده کردن این نیازها به ربات های موازی روی آورده اند. ماشین ابزار هگزپاد نیز یکی از انواع ماشین ابزارهایی است که بر پایه ی ربات های موازی می باشد که توسط محققین زیادی مورد پژوهش قرار گرفته است [۱۱].

میز ماشین ابزار هگزپاد از دو سکو تشکیل شده است که این دو سکو توسط شش پایه با طول قابل تغییر به کمک مفصل کشویی، به واسطه شش مفصل کروی از بالا و شش مفصل یونیورسال از پایین به یکدیگر متصل شده اند. سکوی پایینی در جای خود ثابت است و به عنوان پایه ی سکوی بالایی مورد استفاده قرار می گیرد و سکوی بالایی با شش درجه آزادی متحرک می باشد و به عنوان میز ماشین ابزار انجام وظیفه می کند.

استفاده از ربات هگزپاد به عنوان ماشین ابزار مزایای زیادی دارد که تولیدکنندگان را برای نیل به اهدافشان، ناچار به روی آوردن به این سیستم کرده است [۱۲]:

سفتی و صلبیت بالای سیستم در نتیجه ی ساختار سیستم موازی و محوری بودن نیروها
نسبت بار به وزن زیاد
خطاهای اتصال غیر تجمعی
حرکت های دقیق، حتی تحت بارهای متناوب سنگین و شتاب های بالا
افزایش سرعت ماشین کاری

۳- منحنی های نربز

برای بیان یک منحنی به زبان ریاضی فرمول های متعددی وجود دارد. از جمله بیزر^۳، هرمیت^۴ و نربز. در این میان فرمول بندی نربز پرکاربرد ترین می باشد. دلیل این امر سادگی در نحوه فرمول بندی و همچنین نمایش یک منحنی با کمترین اطلاعات لازم می باشد. این فرمول بندی در نرم افزارهای مکانیکی کاربرد خاص خود را دارا می باشد. از منحنی های نربز برای بیان سطوح با شکل دلخواه بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. از طرفی لزوم تعریف سطوح با شکل دلخواه که در صنعت امروز کاربرد بسیاری دارند، با کمترین اطلاعات امری ضروری به نظر می رسد. زیرا امکان بروز خطا در مواقع انتقال داده های زیاد همیشه وجود دارد.

در مهندسی معکوس برای تبدیل ابر نقاط به سطح و دریافت اطلاعات سطح، از فرمول بندی نربز استفاده می گردد و برای تطبیق هر چه بهتر آن با سطح واقعی، از بردار گرهِ غیریکنواخت و تابع وزن استفاده می گردد. بردار گرهِ یکنواخت کاربردهای فراوانی دارد که باعث متمایز شدن فرمول بندی نربز با بقیه فرمول بندی ها شده است.

بوجلبین و همکاران به بررسی تغییرات ساختار و صافی سطح با تغییرات سرعت برشی در فرز کاری پنج محوره پرداختند. آن ها شش استراتژی مختلف برای فرزکاری سطوح نربز^۱ معرفی کردند و کیفیت سطح نهایی آن ها را بررسی کردند. در نهایت آن ها حالتی را که در آن بهترین صافی سطح به دست آمد، معرفی کرده و به تحلیل پارامترهای آن پرداختند [۵].

وی لی و همکاران در سال ۲۰۰۸ به استخراج حرکت ابزار در منحنی های پیچیده پرداختند. آن ها در ابتدا مجموعه ای از خطوط دایره ای و خطی را به منحنی های نربز تبدیل کردند. سپس این منحنی ها را هموار نموده و در انتها حرکت ابزار را برای پیمایش این منحنی ها استخراج نمودند. نتایج آن ها نشان داد که با این روش نوسانات پیشروی و شتاب در این حالت نسبت به حالت عادی کاهش چشمگیری داشته است [۶].

موروگان و همکاران به بررسی تغییرات زبری سطح با تغییر پارامترهای ماشین کاری پرداختند. آن ها با روش تاگوچی طراحی آزمایش کردند و با الگوریتم ژنتیک بهینه ترین حالت را برای زبری سطح به دست آوردند [۷]. ژینگف ژو و همکاران از منحنی های دو آل نربز^۲ برای سطوح پیچیده بهره بردند. آن ها یک پره توربین را با این روش ماشین کاری کردند و با ماشین کاری معمولی از طریق G01 مقایسه کرده و به تحلیل صافی سطح پرداختند [۸].

حسن پور و همکاران به بررسی استراتژی های مختلف فرزکاری سطوح با شکل دلخواه پرداختند. آن ها چهار استراتژی را همراه با تغییر پارامترهای ماشین کاری مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نهایی آن ها حاکی از این است که استراتژی ماشین کاری بر روی خواص نهایی قطعه کار از جمله سختی و صافی سطح مهم می باشد [۹].

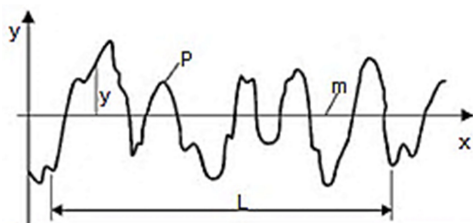
چیچون وو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی نقاط کنترلی سطوح نربز در دستگاه هگزپاد پرداختند. آن ها در این پژوهش بر روی کنترل این نقاط برای دستیابی به یک سطح بهینه تاکید داشتند. در نهایت نیز آن ها یک سطح را با استفاده از کدهای G01 و معادلات نربز خود ماشین کاری کردند و به تحلیل نتایج پرداختند. نتایج آن ها حاکی از این است که روش بیان شده توسط آن ها باعث بالا رفتن کیفیت ماشین کاری و پایین آمدن زمان ماشین کاری به اندازه ۱۹ درصد نسبت حالت معمولی می باشد [۱۰].

با توجه به تلاش هایی که در زمینه ماشین کاری سطوح با شکل دلخواه در دستگاه های فرز پنج محوره انجام شده است، انجام چنین آزمایش هایی با استفاده از دستگاه هگزپاد امری ضروری به نظر می رسد. قبل تر عنوان گردید که تاکنون از دستگاه هگزپاد به عنوان میز ماشین کاری هیچ استفاده ای نشده است و در این پژوهش برای اولین بار است که از ربات هگزپاد به عنوان میز ماشین ابزار که وظیفه موقعیت دهی را دارد، استفاده می گردد. منحنی های با شکل دلخواه توسط سیستم CNC دستگاه با استفاده از معادلات نربز میان یابی می شوند.

با توجه به این که دستگاه هگزپاد موجود نمونه آزمایشگاهی بوده و از نوع صنعتی نمی باشد، انجام آزمایش ها با سختی همراه بوده و به همین دلیل از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای کاهش تعداد آزمایش ها بهره برده شده است. در این مقاله سه پارامتر اصلی ماشین کاری یعنی سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش ورودی های مسئله می باشند. ابزار استفاده شده در این آزمایش ها از نوع فولاد سر کروی ضد زنگ HSS-T می باشد و نمونه آزمایش هم از نوع آلومینیوم گرید سه هزار می باشد. در پایان زبری نهایی هر سطح

3. Bezier
4. Hermite

1. NURBS (Non Uniform Rational B-Spline)
2. Dual Nurbs



داده شدند. در این پژوهش، طرح آزمایش تاکوچی برای طرح ریزی آزمایشها بکار گرفته شد. در حالت فاکتوریل کامل نیاز به انجام ۲۷ آزمایش می باشد که این حجم آزمایش با توجه به آزمایشگاهی بودن دستگاه امری سخت می باشد. لذا از روش تاکوچی برای پایین آوردن تعداد آزمایشها بهره برده شد. در این روش تعداد آزمایشهای لازم فقط ۹ عدد می باشند. با این روش هم می توان تغییرات خروجی را با توجه به پارامترهای ورودی مختلف نشان داد. پارامترهای فرزکاری، تعداد سطوح و هم چنین مقادیر آنها در جدول ۱ آمده است. برای جلوگیری از بروز خطا بعضی از آزمایشها با تکرار صورت پذیرفتند. در هر آزمایش ۳۰ میلی متر از قطعه کار براده برداری شد. در ضمن برای انجام تحلیل های آماری از نرم افزار مینی تب ۱۷^{۱۲} استفاده گردید.

۶- نتایج و تحلیل آن

در جدول ۲ نتایج مربوط به زبری سطح آمده است. در شکل ۳ نمودار تاثیر پارامترهای ماشین کاری بر روی صافی سطح نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۳ و رابطه (۲) پیداست سرعت برشی و عمق براده محوری بیشترین تاثیر را بر روی صافی سطح و میزان زبری دارند. با افزایش سرعت برشی میزان زبری سطح کاهش یافته و کیفیت آن بهبود یافته است. یکی از دلایل این امر کاهش نیروها می باشد و این کاهش نیرو بر روی زبری تاثیر مستقیم می گذارد. همچنین با افزایش عمق براده زبری افزایش زیادی یافته است. در حین انجام آزمایشها با افزایش عمق برش میزان ارتعاش کلگی دستگاه فرز بسیار افزایش یافت. همین امر باعث افزایش زبری و کاهش کیفیت سطح گردید. البته افزایش عمق برش در حالت عادی نیز باعث افزایش

۴- مواد و تجهیزات مورد استفاده

جنس ماده قطعه کار استفاده شده در این آزمایش آلومینیوم گرید سه هزار می باشد که از گروه آلومینیوم های خوش تراش به حساب می آید. هر آزمایش بر روی قسمتی از عرض قطعه کار با اندازه ۳۰ میلی متر صورت گرفته شد. ابزار مورد استفاده در این آزمایش از نوع ابزار سر کروی است. جنس آن از نوع HSS-T و برای تراش آلومینیوم مناسب می باشد. برای انجام آزمایشها از کلگی دستگاه فرز رونگ فو مدل 40 - RF برای تامین حرکت دورانی ابزار استفاده گردید. لازم به ذکر است که کلگی فرز قبل آزمایش در جای مناسب قرار می گیرد و بعد از آن و در حین انجام آزمایشها تغییری در مکان آن صورت نمی گیرد. کلگی فرز این قابلیت را دارد که با چرخش ۱۸۰ درجه ای در زاویه ای مناسب بر روی میز هگزپاد قرار بگیرد. برای موقعیت دهی قطعه کار از دستگاه هگزپاد دارای ۶ درجه آزادی استفاده گردید. این دستگاه نمونه آزمایشگاهی می باشد و در آزمایشگاه فناوری های پیشرفته در ماشین ابزار دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده است و پژوهشها برای تکمیل و بهبود آن در این آزمایشگاه ادامه دارد. این دستگاه از شش پایه که هر یک مجهز به یک سروموتور می باشند تشکیل شده است. از یک رایانه صنعتی با سروکنترل های موتورهای برای ایجاد و انتقال دستورهای حرکتی بهره برده شده است. در شکل ۱ نحوه قرار گیری مجموعه دستگاه هگزپاد، دستگاه فرز، دینامومتر، گیره، ابزار و قطعه کار را مشاهده می نمایید.

زبری سطح توسط دستگاه زبری سنج پرتابل ماهر^۱ مدل PS1 اندازه گیری شد. از میان روش های مختلفی که برای بیان زبری وجود دارد، روش زبری متوسط که معمولا با Ra نشان داده می شود، انتخاب گردید. در این روش معدل ارتفاعات نسبت به یک خط مرکزی را مقدار زبری می گویند. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می نمایید پروفایل p نشان دهنده برجستگی های برشی از قطعه کار می باشد. خط میانگین m طوری انتخاب می گردد که مساحت بالا و پایین در طول مشخص l برابر باشند. L نیز طول نمونه گیری می باشد. λ نیز مختصات منحنی پروفایل می باشد [۱۳]. Ra طبق رابطه (۱) تعریف می شود.

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

۵- روش انجام آزمایش

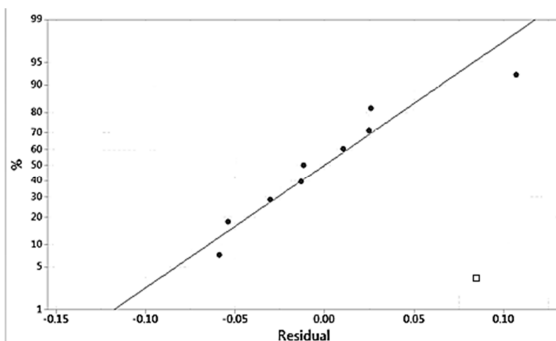
برای بررسی تاثیر پارامترهای ماشین کاری بر روی صافی سطح نهایی در ماشین کاری آلومینیوم، سه فاکتور سرعت برشی (V_c)، سرعت پیشروی (f_z) و عمق برش (a_p) به عنوان اصلی ترین پارامترهای فرزکاری، در سه سطح تغییر



شکل ۱ مجموعه دستگاه هگزپاد، فرز، گیره و قطعه کار

جدول ۱ پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن ها			
فاکتورها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
عمق براده (a_p) (mm)	۰/۳	۰/۶	۰/۹
سرعت پیشروی (f_z) (cm/sec)	۳	۵	۷
سرعت برشی (V_c) (rev/min)	۴۵۰	۸۰۰	۱۲۰۰

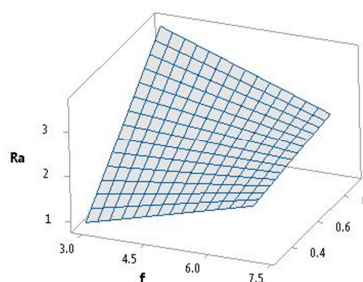
جدول ۲ جدول طراحی آزمایش به همراه نتایج بدست آمده				
شماره آزمایش	a_p	f_z	V_c	Ra (μm)
۱	۰/۳	۳	۴۵۰	۲/۰۸۳
۲	۰/۶	۳	۸۰۰	۲/۵۴۱
۳	۰/۹	۳	۱۲۰۰	۲/۱۱۸
۴	۰/۶	۵	۴۵۰	۲/۸۸۳
۵	۰/۹	۵	۸۰۰	۳/۱۰۸
۶	۰/۳	۵	۱۲۰۰	۰/۴۹۸
۷	۰/۹	۷	۴۵۰	۲/۴۰۲
۸	۰/۳	۷	۸۰۰	۰/۹۵۰
۹	۰/۶	۷	۱۲۰۰	۱/۹۰۰



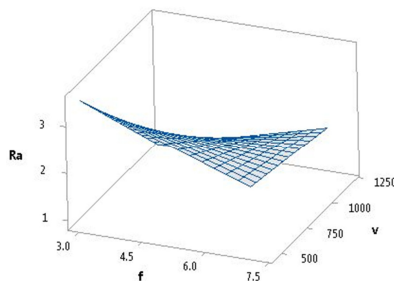
شکل ۴ نمودار توزیع نرمال باقیمانده با قابلیت اطمینان ۹۵٪



شکل ۵ نمونه منحنی ماشین کاری شده توسط دستگاه هگزاپاد بر روی آلومینیوم



شکل ۶ نمودار تاثیر متقابل سرعت پیشروی و عمق برش بر روی زبری سطح



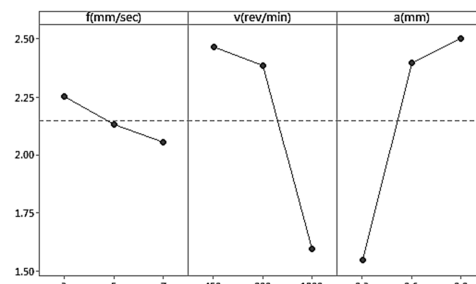
شکل ۷ نمودار تاثیر متقابل سرعت پیشروی و برشی بر روی زبری سطح

برخوردار می باشد. در شکل های ۶ و ۷ نیز نمودار رویه پاسخ تداخل سرعت پیشروی با عمق برش و سرعت برشی آورده شده است. در رابطه (۲) نیز فرمولی تجربی برای تخمین زبری سطح آمده است. لازم به ذکر است که این رابطه برای این که گویاتر باشد، پارامترهای آن بی بعدسازی شده اند.

$$f \cdot f + 6.152 v \cdot R_a = 2.613 + 6.522 a - 6.704 v - 0.529 f - 6.007 a \quad (2)$$

۶-۱- بهینه سازی نتایج

شبکه عصبی مصنوعی، شبکه ای است متشکل از تعداد زیادی پردازنده ساده،



شکل ۸ تاثیر پارامترهای ماشین کاری بر روی زبری سطح

ارتعاش دستگاه می گردد، ولی در این مورد به دلیل این که مرکز ثقل دستگاه جابجا شده است، تاثیر آن بیشتر می گردد. در نهایت هم همان طور که در شکل ۳ پیداست سرعت پیشروی تاثیر کمی بر روی صافی سطح دارد. شاید دلیل این امر این باشد که سطوح مربوط به سرعت پیشروی نزدیک به هم بوده و همچنین با توجه به مجموعه آزمایش، تاثیر آن در مقابل سرعت برشی و عمق براده محوری کمتر به نظر آید.

بحث دیگری که در این جا باید به آن پرداخته گردد، سفتی^۱ دستگاه هگزاپاد می باشد. دستگاه هگزاپاد به دلیل ساختار موازی آن در هر نقطه ای سفتی خاص خود را دارد و این سفتی بر روی نحوه ورود ابزار به قطعه کار تاثیر می گذارد. برای کاهش تاثیر این پارامتر بر روی نتایج نهایی، سعی بر آن بود که نقطه ورود ابزار به قطعه کار برای تمامی حالات یکسان در نظر گرفته شود. نتایج تحلیل آماری داده ها با استفاده از نرم افزار مینی تب ۱۷ در جدول ۳ به صورت خلاصه آورده شده است.

جدول ۳ تحلیل واریانس داده های زبری پس از حذف پارامترهای بی معنی را نشان می دهد. با قابلیت اطمینان بالاتر از ۹۵٪ مقادیر P که کمتر از ۰/۰۵ باشند، نشان دهنده موثر بودن آن پارامتر می باشند. با توجه به این جدول نتایج حاکی از این است که عمق براده و سرعت برشی بیشترین تاثیر را داشته و مهم ترین عامل در کیفیت سطح نهایی می باشند. همچنین پیشروی سهم بسیار کمی در زبری داشته و از تاثیر آن می توان چشم پوشی کرد.

دلیل تاثیر بسیار زیاد عمق براده برداری بر روی زبری سطح همان طور که قبلا گزارش گردید، با توجه به سیستم خاص کنگی فرز و نامیزانی آن، در عمق های برشی زیاد ارتعاش دستگاه زیاد گشته و باعث افزایش نیروها و در نتیجه کاهش صافی سطح می گردد. تاثیر کم سرعت پیشروی نیز می تواند ناشی از نزدیک بودن مقادیر آن در آزمایش ها دانست. در شکل ۴ یک نمونه منحنی ماشین کاری شده بر روی آلومینیوم آورده شده است.

همچنین مقدار R_{eq} برای این مدل برابر با ۹۹/۴۳٪ گزارش داده شد که حاکی از پوشش خوب مدل تهیه شده از زبری سطح می باشد. در شکل ۴ پراکندگی داده ها نسبت به مقدار پیش بینی شده را نشان می دهد که از پراکندگی خوبی

جدول ۳ تحلیل واریانس زبری سطح

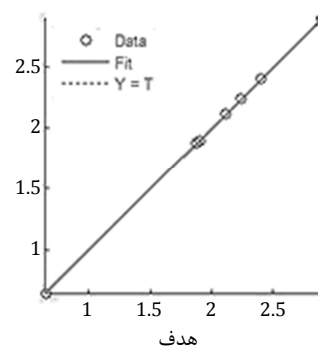
عامل	درجه آزادی	درصد مشارکت	مقدار F	مقدار P
a_p	۱	۳۸/۵۷	۱۹۰/۷۳	۰/۰۰۱
f_z	۱	۱/۶۲	۱/۲۰	۰/۳۵۴
V_c	۱	۳۲/۸۲	۱۷۵/۹۶	۰/۰۰۱
$ap \times fz$	۱	۱۹/۶۱	۱۰۳/۹۸	۰/۰۰۲
$Vc \times fz$	۱	۶/۹۲	۹۵/۰۱	۰/۰۰۲
خطا	۳	۰/۴۵		
مجموع	۸			

1. Stiffness

- ۲- تاثیر سرعت پیشروی بر روی زبری نهایی سطح نسبت به دو پارامتر دیگر اندک می باشد.
- ۳- تاثیر عمق براده محوری از بقیه پارامترها به دلیل افزایش ارتعاش دستگاه بیشتر می باشد.
- ۴- با توجه به ساختار موازی دستگاه هگزپاد و لقی مفاصل کروی آن نقطه ورود قطعه کار به دستگاه حائز اهمیت می باشد.

۸- مراجع

- [1] B. Kim, C. Chu, Effect of cutter mark on surface roughness and scallop height in sculptured surface machining, *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 179-188, 1994.
- [2] A. Werner, K. Skalski, S. Piszczatowski, W. Świeszkowski, Z. Lechniak, Reverse engineering of free-form surfaces, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 76, pp. 128-132, 1998.
- [3] Bouzakis, K.-D, Aichouh, P, Efstathiou, K, Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43 (5), pp. 499-514, 2003.
- [4] P.G. Benardos, G. C. Vosniakos, Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 343-354, 2002.
- [5] M. Boujelbene, A. Moisan, W. Bouzid, S. Torbaty, Variation cutting speed on the five axis milling, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, VOLUME 21 ISSUE 2, April (2007).
- [6] Wei Li, Yadong Liu, Kazuo Yamazaki, Makoto Fujisima, Masahiko Mori, The design of a NURBS pre-interpolator for five-axis machining, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 36, pp. 927-935, 2008.
- [7] B. Murugan Goparsamy, B. Mondal, S. Ghosh, Taguchi method and ANOVA: an approach for process parameter optimization of hard machining while machining hardened steel, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 68, pp. 686-695, 2009.
- [8] Zhifeng Qiao, Taiyong Wang, Yunfeng Wang, Miao Hu, Qingjian Liu, Bezier polygons for the linearization of dual NURBS curve in five-axis sculptured surfacemachining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 53, pp. 107-117, 2012.
- [9] H. Hassanpour, Sh. Shajari, A. Rasti, M. H. Sadeghi, Investigation of milling strategies effect on microhardness of a typical curved surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 34-40, 2015. (In Persian)
- [10] Jichun Wu, Huicheng Zhou, Xiaoqi Tang, Jihong Chen, Implementation of CL points preprocessing methodology with NURBS curve fitting technique for high-speed machining, *Computers & Industrial Engineering* 81 (2015) 58-64.
- [11] L. Cheng, Y. Zhao and Y. Zhao, Motion Control Algorithm of A 5-DOF Parallel Machine Tool, *proc. IEEE conference on Robotics and Biomimetics*, Sanya, China, 2007.
- [12] D. Zhang, *Parallel Robotic Machine Tools*, Oshawa, ON, Springer, 2010.
- [13] M. Brezocnik, M. Kovacic, M. Ficko, Prediction of surface roughness with genetic programming, *Journal of material processing technology*, Vol. 157-158 (2004) 28-36.



شکل ۸ خطای حاصل از شبکه عصبی در مرحله آموزش

موسوم به واحدهای پردازشگر یا نورون است. این نورون ها توسط مجاری ارتباطی موسوم به اتصال یا وزن به یکدیگر متصل می باشند. در هر نورون با اعمال یک تابع تبدیل خروجی حاصل می گردد.

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی است که بر خلاف الگوریتم های سنتی از روش تصادفی برای بهینه کردن تابع مورد نظر استفاده می نماید. در این روش با تولید جمعیت اولیه آغاز و از میان جمعیت متناسب با برازندگی آنها نسل بعد انتخاب می شود. سپس عملگرهای ژنتیکی نظیر هم گذاری، جهش و انعکاس اعمال و جمعیت جدید به وجود می آید و این چرخه تا رسیدن به شرایط بهینه ادامه پیدا می کند.

به منظور بهینه سازی داده های حاصل از زبری حاصل از این پژوهش از نرم افزار متلب استفاده شد. برای انجام بهینه سازی ابتدا تابع هدف که همان تابع زبری است توسط شبکه های عصبی ایجاد شد. در شبکه عصبی ایجاد شده ۸۵ درصد داده ها برای آموزش شبکه و ۱۵ درصد داده ها به منظور آزمایش شبکه مورد استفاده قرار گرفت. تعداد نسل ها در ایجاد این شبکه ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد و مجموع مربعات خطا 0.0001 انتخاب شد.

نتایج حاصل از بهینه سازی در ادامه آورده شده است. در شکل ۸ نمودار رگرسیون داده ها و تطابق بسیار عالی آن با رابطه در نظر گرفته شده توسط شبکه های عصبی می باشد. همان طور که در شکل پیداست، توسط روش شبکه های عصبی میزان ضریب همبستگی در این روش برابر با ۱ به دست آمده است. این رابطه بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک مورد تحلیل قرار گرفت و پس از ۵۱ تکرار بهترین زبری در حالتی گزارش شد که میزان پیشروی برابر با ۶ سانتی متر بر ثانیه، میزان سرعت برشی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و میزان عمق براده برابر با 0.33 میلی متر باشد. در این حالت میزان زبری گزارش شده توسط الگوریتم ژنتیک برابر با 0.4455 است.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند ماشین کاری سطوح نرَبز در دستگاه هگزپاد و زبری حاصل از آن مورد بررسی قرار گردید. ابزار مورد استفاده از نوع فرز سرکروی HSS-T و جنس قطعه کار نیز از نوع آلومینیوم سری سه هزار است. در ادامه با استفاده از روش تاگوچی طراحی آزمایش صورت گرفت و در نهایت با استفاده از شبکه های عصبی و الگوریتم ژنتیک بهینه ترین حالت برای زبری سطح بدست آمد. نتایج بدست آمده از این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آمده است:

- ۱- با افزایش سرعت برشی، زبری سطح کاهش یافت و با افزایش عمق براده، زبری سطح افزایش یافت.