

استفاده از پارامترهای موتور اسپیندل برای تخمین سایش ابزار در فرزکاری کف تراشی به کمک شبکه‌های عصبی

امیر مصطفی پورااصل^۱ و محمدرضا رازفر^۲
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

مونیتورینگ سایش ابزار، یکی از روش‌های مهم در بهبود دقت ابعادی و مسائل اقتصادی ماشین‌کاری است. برای این کار، به جای اندازه‌گیری مستقیم سایش ابزار، پارامترهای دیگری بکار برده می‌شود که با سایش ابزار رابطه دارند و اندازه‌گیری آنها راحت‌تر و بدون نیاز به توقف عملیات است. در این مقاله، یک سیستم هوشمند بر پایه شبکه عصبی ارائه شده که در آن با اندازه‌گیری پارامترهای موتور اسپیندل، مثل جریان و دور موتور، می‌توان سایش ابزار را به صورت بلادرنگ تخمین زد. برای این کار، با انجام آزمایش‌های عملی در شرایط مختلف ماشین‌کاری، یعنی پیشروی، عمق بار و دور ابزار و نیز در سایش‌های مختلف، مقدار جریان و دور موتور اندازه‌گیری شده و تأثیر سایش ابزار روی جریان و دور موتور بررسی شده است. همچنین، با استفاده از اطلاعات بدست آمده، شبکه‌ای عصبی از نوع (Back Propagation) BP (یا پس انتشار، طراحی و آموزش داده شده است. با استفاده از این شبکه، می‌توان در شرایط مختلف ماشین‌کاری با اندازه‌گیری جریان و دور موتور اسپیندل در حین ماشین‌کاری، سایش ابزار را تخمین زد. از این سیستم می‌توان در کنترل و مونیتورینگ فرآیند ماشین‌کاری استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: سایش ابزار، فرزکاری کف تراشی، شبکه‌های عصبی، جریان موتور، دور موتور

Tool Wear Estimation in Face Milling Using Spindle Motor Parameters with Neural Networks

A. Mostafapour-Asl, and M.R. Razfar
Mech. Eng. Department, Amirkabir Univ. of Technology

ABSTRACT

The monitoring of tool wear is one of the important methods to improve the dimensional accuracy and economic aspects of machining. To achieve this, instead of measuring the tool wear, other parameters, which are related to tool wear are used. In this paper, an intelligent system, based on neural networks, is presented. By this method, the tool wear is estimated on-line with measuring spindle motor parameters, such as current and the speed of motor. Thus, the current and the speed of motor in different condition of machining (feed, depth of cut and rpm of tool) and wear were measured with practical experiments and the effects of tool wear on current and speed of motor is analyzed. Based on the results, a back propagation (BP) neural network is developed and trained. Using this network, the tool wear could be estimated while machining in different conditions, measuring current and speed of motor. This system could be used to control and monitor the machining process.

Key Words: Tool Wear, Face Milling, Neural Networks, Motor Current, Motor Speed

مقدمه

امروزه، سیستم UFMS^۱ یا سیستم تولیدی انعطاف‌پذیر بدون حضور انسان، در حال گسترش است. در چنین سیستم‌هایی، رایانه و سیستم‌های اتوماتیک جای انسان را می‌گیرند. در این سیستم‌ها سعی بر استفاده از ابزارهایی است که کارهای یک انسان متخصص را انجام دهند. برای این منظور این سیستم‌ها، ضمن اجرای عملیات موردنظر باید توانایی کنترل فرآیند در شرایط مختلف کاری و تصمیم‌گیری برای تغییر شرایط کاری را داشته باشند. به این دلیل، حسگرهای مختلفی برای کنترل و گرفتن اطلاعات از شرایط فرآیند لازم است. ولی اطلاعات این حسگرها باید به نحوی پردازش شده و تصمیم‌گیری برای کنترل فرآیند انجام شود. به این دلیل، واحد تصمیم‌گیری باید به نوعی یک سیستم هوشمند باشد [۱].

یکی از مسائل مهمی که در ماشین‌کاری وجود دارد، مسئله سایش ابزار ماشین‌کاری است. امروزه کارهای زیادی جهت اندازه‌گیری و تخمین سایش ابزار در حال انجام است [۲]. سایش ابزار به سه دلیل برای ما مهم است؛ دلیل اول آن است که ساییده‌شدن نوک ابزار روی صافی سطح و دقت ابعادی قطعه ماشین‌کاری تأثیر مستقیمی دارد. در مواردی که کیفیت و دقت ابعادی برای قطعات تولیدی مهم است. باید سایش ابزار کنترل و در حد مجاز محدود شود [۳]. دلیل دوم آن است که سایش منشا شکست ابزار است. با توجه به آنکه شکست ناگهانی باعث صدمه دیدن کل ابزار، ماشین‌ابزار و قطعه کار می‌شود، باید از این شکست ناگهانی جلوگیری شود. دلیل سوم، مسئله اقتصادی است چرا که سایش ابزار باعث هزینه‌تیزکاری مجدد، پایان عمر ابزار و از همه مهمتر توقف عملیات ماشین‌کاری می‌شود. به این دلیل باید تا حد امکان سایش ابزار را کنترل کنیم. روش‌های اندازه‌گیری سایش ابزار به دو دسته روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شود. در روش مستقیم، به طور دستی و با وسایلی مثل میکروسکوپ ابزارسازی‌ها مقدار سایش ابزار را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند. لازمه این کار آن است که ماشین متوقف شده و سپس کار اندازه‌گیری انجام گیرد. این کار هم باعث افزایش زمان تولید می‌شود و مهمتر آنکه این نوع توقف و

اندازه‌گیری توسط انسان، با فلسفه سیستم‌های اتوماسیون و سیستم‌های تولیدی بدون حضور انسان تناقض دارد. در روش غیرمستقیم سایش مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌شود. بلکه از پارامترهایی استفاده می‌شود که با سایش ابزار رابطه دارند، و نیز اندازه‌گیری مستقیم این پارامترها راحت‌تر است. خوشبختانه طبیعت این پارامترها طوری است که بدون توقف عملیات ماشین‌کاری و به صورت بلادرنگ و در حین عملیات می‌توان این پارامترها را اندازه‌گیری کرد. برای این کار حسگرهایی متناسب با نوع پارامتر مورد استفاده، بکار گرفته می‌شود تا بتوان در طی فرآیند ماشین‌کاری دائماً این پارامترها را اندازه‌گیری کرد. از روی مقادیر پارامترها و با توجه به رابطه بین این پارامترها با سایش ابزار می‌توان سایش ابزار را تخمین زد. در این مقاله، از جریان و دور موتور اسپیندل برای اندازه‌گیری سایش ابزار استفاده شده است. دانشمندی به نام آلتینتاش^۲ [۴] در سال ۱۹۹۰، از اندازه‌گیری جریان موتور برای تعیین نیروهای ماشین‌کاری در تراش استفاده کرد. چانگ^۳ [۵] در سال ۱۹۹۵، یک شبکه عصبی ارائه کرد که با استفاده از اندازه‌گیری جریان موتور اسپیندل نیروی تراش‌کاری را تخمین می‌زد. ژیانولیت^۴ [۶] در سال ۲۰۰۰، از تبدیل موجی و تکنیک فازی برای مونیورینگ شکست ابزار سوراخ‌کاری استفاده کرد. وی برای این کار از اندازه‌گیری جریان موتور اسپیندل و موتور پیشروی استفاده کرد. اکسیاولیت [۷] در سال ۲۰۰۱، یک روش براساس آنالیز زمانی برای تعیین شکست ابزار فرز انگشتی ارائه کرد. وی در مدل خود از جریان موتور پیشروی و روش آنالیز متوسط ناحیه زمانی استفاده کرد. همان‌طور که دیده می‌شود در کارهای انجام‌شده از جریان موتور برای تعیین مقدار نیروهای ماشین‌کاری یا تعیین شکست ابزار استفاده شده است. با توجه به آنکه کارهای کمتری برای تخمین سایش ابزار از طریق جریان موتور آن هم روی فرز‌کاری کف‌تراشی انجام گرفته است، در این مقاله از جریان موتور به همراه

2- Altintas
3- Chang
4- Xiaolit

1- Unmanned Flexible Manufacturing System

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} I_2^2 \frac{R_2'}{s} \quad (6)$$

در این فرمول، I_2' جریان روتور از سمت استاتور که تقریباً برابر جریان استاتور است. s نیز پارامتری است که بستگی به دور موتور در هنگام بارگذاری موتور دارد. بنابراین، از فرمول فوق دیده می‌شود که بار خارجی اعمالی روی موتور، روی جریان و دور موتور تأثیر می‌گذارد. یعنی جریان متناسب با گشتاور خارجی است که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$KI = T_{mech} \quad (7)$$

سیستم محرکه اسپیندل ماشین فرز دارای اجزاء مکانیکی مثل موتور، گیربکس تغییر دور، ابزارگیر، میله انتقال دور به ابزارگیر، سیستم یاتاقان‌بندی، سیستم روان‌کاری و ابزار برش است که مدل ساده آن در شکل (۱) آورده شده است. بار خروجی موتور صرف اصطکاک، ماشین‌کاری خالص و اینرسی اجزاء می‌شود. بنابراین، گشتاور خارجی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$T_{mech} = T_0 + T_f + T_{cutting} \quad (8)$$

که در آن، T_0 گشتاور مصرفی برای دمپینگ ویسکوز و اینرسی سیستم، T_f گشتاور مصرفی برای اصطکاک سیستم و $T_{cutting}$ گشتاور خالص مصرفی برای براده‌برداری است. گشتاور اصطکاکی را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$T_f = T_{f0} + \Delta T_v \quad (9)$$

که در آن، T_{f0} گشتاور اصطکاک کلمبی و ΔT_v گشتاور ویسکوز در اثر بار براده‌برداری است که بستگی به نیروی ماشین‌کاری دارد. بنابراین، خواهیم داشت:

$$KI = T_0 + T_{f0} + \Delta T_v + T_{cutting} \quad (10)$$

وقتی که ماشین بدون براده‌برداری و با یک دور مشخص کار می‌کند، بر اساس اصطکاک و اینرسی سیستم جریانی می‌کشد (I_0) که مقدار آن بستگی به دور ماشین (n) دارد.

$$I_0 = k_1 n + k_2 \quad (11)$$

که در آن، k_1 و k_2 مقادیر ثابتی هستند. وقتی که ماشین با همان دور تحت بار براده‌برداری می‌کند، به علت نیروی

دور موتور برای تخمین سایش ابزار در عملیات فرز کف‌تراشی استفاده شده است.

مدل‌سازی سیستم موتور اسپیندل

هر موتوری براساس ساختمان داخلی خود دارای یک دور اسمی سنکرون است. سرعت سنکرون موتور را می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد [۵]:

$$\omega_{syn} = \frac{120F}{60p} \quad (1)$$

که در آن، F فرکانس و p تعداد قطب‌های موتور است. وقتی موتور تحت بار قرار می‌گیرد، سرعت دورانی آن کاهش یافته و به ω_{mech} می‌رسد. براساس این تغییر سرعت خروجی می‌توان پارامتر لغزش (s) را به صورت زیر تعریف کرد:

$$s = \frac{\omega_{syn} - \omega_{mech}}{\omega_{syn}} \quad (2)$$

رابطه‌ای که بین گشتاور موتور و پارامتر لغزش وجود دارد به صورت زیر است [۸]:

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} * \frac{v_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{th} + X_2')^2} * \frac{R_2'}{s} \quad (3)$$

که در این فرمول، v_{th} ولتاژ ورودی به استاتور، R_2' و X_2' نیز به ترتیب مقاومت و اندوکتانس روتور ارجاع شده به سمت استاتور است که مقادیر ثابتی هستند. R_{th} و X_{th} نیز، قسمت حقیقی و موهومی امپدانس Z_{th} می‌باشند:

$$Z_{th} = R_{th} + iX_{th} \quad (4)$$

در فرمول گشتاور خروجی تنها متغیر پارامتر لغزش می‌باشد که با توجه به سرعت خروجی موتور می‌توان مقدار آن را پیدا نمود.

بار اعمالی روی موتور روی جریان روتور نیز تأثیر می‌گذارد. با افزایش بار خارجی جریانی که موتور می‌کشد، افزایش خواهد یافت که رابطه آن با توان مکانیکی خروجی موتور به صورت زیر است:

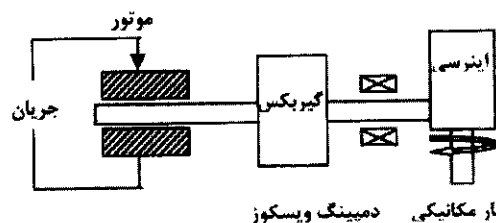
$$P_{mech} = T_{mech} \omega_{mech} = I_2^2 \frac{R_2}{s} (1-s) \quad (5)$$

که در آن، I_2 جریان و R_2 مقاومت روتور است. رابطه بین گشتاور خروجی و جریان نیز به صورت زیر است:

ماشین کاری و اثراتی که آن نیرو روی اصطکاک می‌گذارد، جریان موتور طبق رابطه زیر افزایش خواهد یافت:

$$I = I_0 + f(T_{cutting}) \quad (12)$$

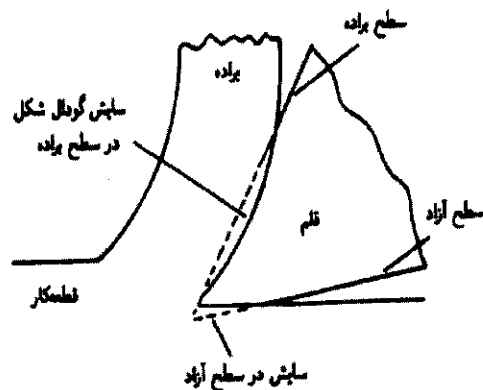
این فرمول، نشان می‌دهد که جریان موتور تابعی از نیروهای ماشین کاری است.



شکل ۱- مدل ساده از سیستم محرکه.

مدل ساییش ابزار

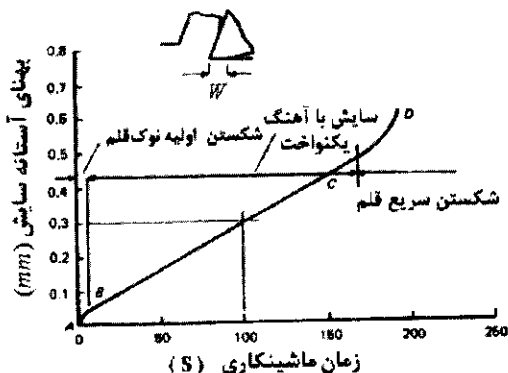
یکی از مهمترین مسائل اقتصادی در ماشین کاری، عمر ابزار است. ابزاری که دیگر نتواند وظیفه و کار خود را انجام دهد، گفته می‌شود، از کار افتاده است. معیارهای از کارافتادگی بسته به دقت و کیفیت قطعه و شرایط ماشین کاری (خشن کاری یا پرداخت کاری) متفاوت است. مهمترین معیار از کارافتادگی ابزار، ساییش تدریجی نوک ابزار است که به دو صورت ساییش حفره‌ای و ساییش پهلو دیده می‌شود. ساییش حفره‌ای در سطح براده ایجاد می‌شود که در نتیجه حرکت براده در روی سطح صورت می‌گیرد و به صورت گودالی دیده می‌شود. ساییش پهلو در سطح آزاد و نزدیک لبه قلم ایجاد می‌شود که در نتیجه مالش سطح قطعه‌کار صورت می‌گیرد (شکل ۲). در این میان ساییش پهلو اهمیت بیشتری نسبت به ساییش حفره‌ای دارد.



شکل ۲- ساییش پهلو و گودال فرسایش در نوک ابزار برش.

$$W = W_0 + \dot{W}t \quad (13)$$

در اواخر عمر ابزار در ناحیه CD نرخ ساییش افزایش می‌یابد که به ساییش سریع موسوم است. در این ناحیه دما شدیداً افزایش می‌یابد و شکست ابزار در این ناحیه اتفاق می‌افتد. باید قبل از رسیدن ساییش به این منطقه، ابزار را تیزکاری یا تعویض کنیم.



شکل ۳- مراحل پیشرفت ساییش پهلو.

وقتی که یک ابزار تیز در حال ماشین کاری است، براساس شرایط و پارامترهای ماشین کاری مقدار نیروی مشخصی لازم است (F_0). ولی وقتی که ابزار کند می‌شود، این نیرو افزایش خواهد یافت که به صورت زیر است:

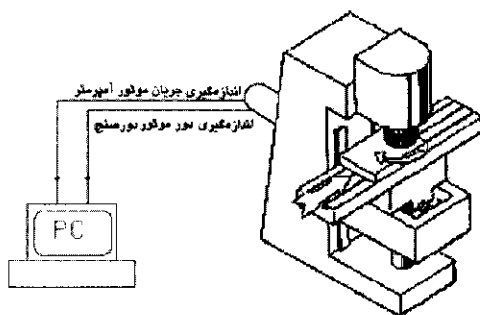
$$F = F_0 + KW \quad (14)$$

که در این رابطه K پارامتری است که به شرایط ماشین کاری بستگی دارد. با ترکیب روابط (۱۳) و (۱۴) خواهیم داشت:

$$F = F_0 + KW_0 + K\dot{W}t \quad (15)$$

روش کار

در این تحقیق از اندازه‌گیری جریان و دور موتور برای تخمین سایش ابزار فرز کف‌تراشی استفاده شده است. برای این کار آزمایش‌هایی روی عملیات فرز کف‌تراشی انجام شد. اطلاعات نحوه انجام آزمایشات در جدول (۱) آورده شده است. به سبب تأثیر مایع خنک‌کاری روی مسائل اصطکاکی و با توجه به نوع نیچ‌های به کار رفته که بدون مایع خنک‌کاری نیز کار می‌کنند و نیز با توجه به آنکه در حین آزمایش‌ها، اندازه‌گیری نیرو با دینامومتر صورت می‌گرفت، از مایع خنک‌کاری استفاده نشد. در این آزمایش‌ها با ثابت‌نگه‌داشتن کلیه پارامترها و تغییر یکی از آنها، در سایش‌های مختلف عملیات ماشین‌کاری انجام گرفته و مقدار جریان با آمپر متر و نیز دور موتور توسط دورسنج مستقیماً اندازه‌گیری شد (شکل ۴). به علت متغیر بودن نیروها در عملیات فرز‌کاری، جریان و دور موتور در حین آزمایش، دائماً در حال تغییر هستند. به این علت از RMS این اندازه‌ها استفاده شده است.



شکل ۴- شماتیک روش انجام آزمایشات.

به این ترتیب، مقادیر جریان و دور موتور در شرایط مختلف ماشین‌کاری و در سایش‌های مختلف بدست آمد. اطلاعات بدست آمده نشان می‌دهد که در یک سایش مشخص با تغییر هرکدام از پارامترهای ماشین‌کاری، جریان و دور موتور نیز تغییر می‌کنند. همچنین، در شرایط ماشین‌کاری ثابت با افزایش سایش ابزار، مقدار جریان و دور موتور نیز افزایش می‌یابند. به عنوان نمونه تغییر جریان و دور در چند شرایط ماشین‌کاری و در دو حالت ابزار، کاملاً تیز و کند در شکل (۵) و (۶) نشان داده شده است.

اگر از این رابطه برحسب زمان مشتق گرفته شود، خواهیم داشت:

$$\Delta F = K \dot{W} \Delta t \quad (16)$$

$$\dot{W} = \frac{\Delta F}{K \Delta t} \quad (17)$$

می‌توان در حین ماشین‌کاری با اندازه‌گیری نیروها و محاسبه \dot{W} از رابطه فوق نرخ سایش را اندازه‌گیری کرد. تا زمانی که نرخ سایش ثابت است، ابزار سالم است، ولی افزایش نرخ سایش به معنی آن است که سایش وارد منطقه سوم شده و باید ابزار تعویض شود. از این روش برای تخمین زمان شکست ابزار استفاده می‌شود.

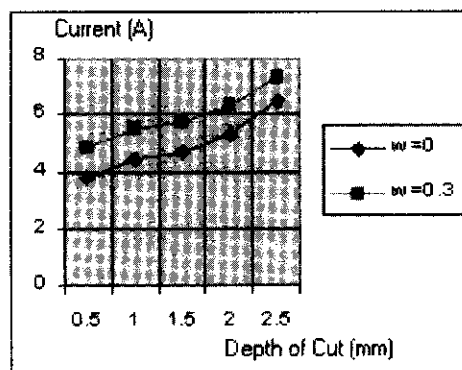
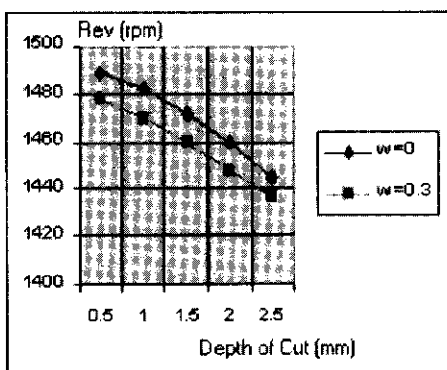
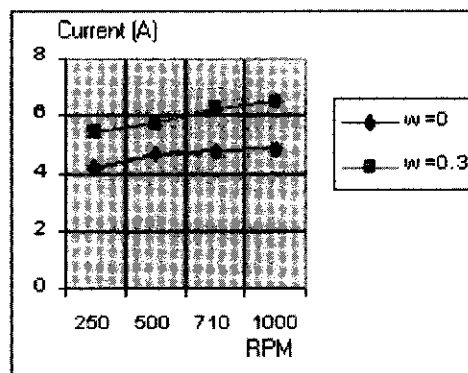
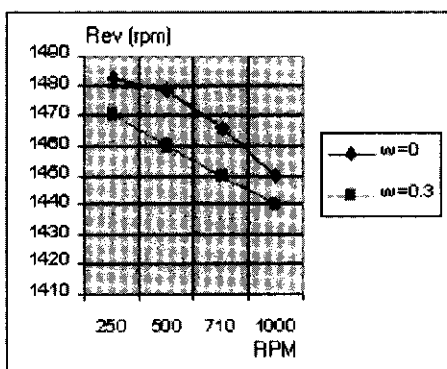
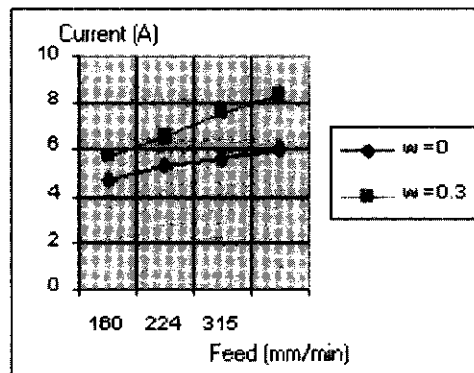
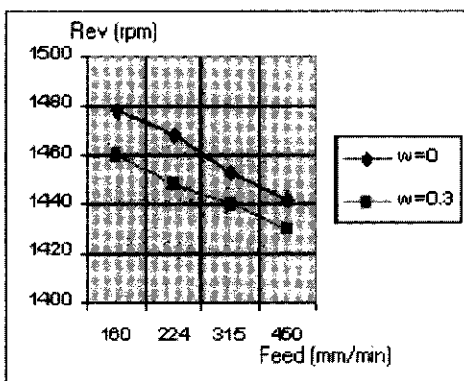
با توجه به آنکه گشتاور ماشین‌کاری رابطه مستقیمی با نیرو دارد و نیرو نیز، طبق رابطه (۱۵) با سایش متناسب است، می‌توان رابطه (۱۲) را به صورت زیر نوشت:

$$I = I_0 + f(F_0, W) \quad (18)$$

یعنی جریان متناسب با شرایط ماشین‌کاری و مقدار سایش ابزار است. از این اصل می‌توان برای تخمین سایش ابزار استفاده کرد. تابع f یک تابع غیرخطی است که تعیین دقیق آن پیچیده است. به این منظور بهترین راه استفاده از شبکه هوشمند عصبی است. با اندازه‌گیری مقدار جریان می‌توان در شرایط مختلف ماشین‌کاری (F_0)، مقدار سایش را از طریق شبکه عصبی هوشمند تخمین زد. طبق رابطه (۶) گشتاور خروجی به دور موتور (S) نیز تأثیر می‌گذارد. لذا، با تغییر دور موتور نیز می‌توان به سایش ابزار پی‌برد.

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام شده.

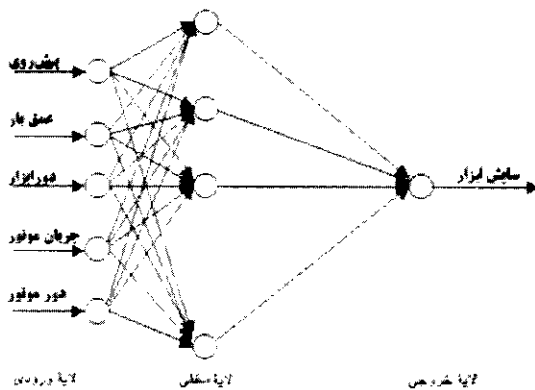
نوع ماشین	فرز عمودی با قدرت ۴ Kw
قطعه‌کار	فولاد ST37 به عرض ۱۰۰ mm و طول ۲۵۰ mm
تیغ فرز	تیغ فرز کف‌تراش از نوع R 257.1-100-10
نیچ‌چه	SPKN 1203 EDR
پیشروی میز	۱۰۰-۱۶۰-۲۰۰-۳۱۵-۴۵۰
عمق بار	۰/۳-۰/۵-۰/۷-۱/۰-۱/۵-۲/۰ mm
دور اسپیندل	۲۰۰-۴۰۰-۵۰۰-۶۳۰-۸۰۰ rpm
آمپر متر	Heme Analyst 2050
دورسنج	با دقت ۵ دور در دقیقه
دره‌بین	با بزرگنمایی ۸ برابر و با دقت ۰/۰۵ mm



شکل ۶- تغییر دور موتور در سایش‌های مختلف.

شکل ۵- تغییر جریان موتور در سایش‌های مختلف.

از مقدار مشخصی کمتر شود. با شبکه آموزش دیده می‌توان با معلوم بودن پارامترهای ورودی، خروجی مجهول را تعیین کرد. تعداد کل آزمایش‌ها ۵۰ نمونه است که ۴۰ نمونه برای آموزش شبکه و ۱۰ نمونه جدید و ۵ نمونه آموزشی (کلاً ۱۵ نمونه) برای آزمایش شبکه به کار گرفته شد. عملکرد شبکه‌های طراحی شده نشان می‌دهد که در استفاده از جریان، تعداد تکرارهای آموزش ۱۵۰۳ تکرار است که بیشتر از شبکه‌های دیگر می‌باشد، یعنی شبکه دیرتر آموزش می‌بیند. ولی در عوض بعد از آموزش دقت تخمین برای نمونه‌های آزمایشی استفاده از دور بهتر است که این دقت تخمین ۹۳ درصد است. در شبکه دوم، تعداد تکرار پایین، ولی دقت تخمین کمتر است. در شبکه سوم، در استفاده همزمان از دور و جریان، معایب هر کدام با مزایای دیگری هم‌پوشانی می‌کنند. شبکه سوم، ضمن آنکه تعداد تکرارهای آن در مرحله آموزش خیلی بالا نیست (۱۱۲۰ تکرار)، دقت تخمین آن در نمونه‌های آموزشی نیز بالا می‌باشد (۹۱ درصد). برخی از نمونه‌های آموزشی و آزمایشی در جدول‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) آورده شده‌اند.



شکل ۷- شکل شماییک شبکه عصبی طراحی شده.

این شکل‌ها وابستگی جریان و دور موتور به سایش ابزار را تأیید می‌کنند. ولی رابطه سایش با جریان و دور موتور رابطه غیرخطی است. تعیین این رابطه غیرخطی نیز بسیار پیچیده می‌باشد. به این دلیل در این تحقیق از شبکه عصبی استفاده شد. برای این کار در محیط نرم‌افزار Matlab یک شبکه عصبی از نوع bp^1 یا پس انتشار طراحی شد که دارای یک سری نرون‌های ورودی، یک لایه مخفی و یک لایه خروجی است. ورودی شبکه دارای پنج ورودی شامل مقدار پیشروی، عمق بار، دور ابزار، جریان و دور موتور و لایه خروجی دارای یک خروجی یعنی مقدار سایش ابزار می‌باشد. تعداد گره‌های لایه مخفی نیز ۱۰۰ می‌باشد که به روش سعی و خطا تعیین شد. در تعداد کم گره تعداد تکرارها در مرحله آموزش برای رسیدن به دقت مورد نظر خیلی بالا می‌رود و دقت تخمین نیز کم می‌شود. به این دلیل، از تعداد گره‌های مخفی بالاتری استفاده شد. تابع تبدیل به کاررفته در شبکه از نوع تابع سیگموئید بی‌پلار است که برخلاف تابع سیگموئید معمولی مقدار خروجی آن بین $+1$ و -1 است. این تابع مشابه تابع \tanh است و در نرم‌افزار Matlab به تابع tansig موسوم است. فرم ریاضی این تابع به صورت زیر است:

$$f(x) = \frac{2}{1 + \exp(-x)} - 1 \quad (19)$$

شکل شماتیک شبکه در شکل (۷) نشان داده شده است. برای این کار سه شبکه مجزا طراحی شده است. در شبکه اول، شرایط ماشین‌کاری و جریان موتور به عنوان ورودی شبکه استفاده شدند. در شبکه دوم، به جای جریان از دور موتور و در شبکه سوم از هر دو به عنوان ورودی شبکه همراه شرایط ماشین‌کاری استفاده شد. در شبکه عصبی ارتباط بین نرون‌ها با مقادیر وزنی مشخص می‌شود. در شروع کار، مقدار بردار وزنی بصورت تصادفی تعیین می‌شود. در مرحله آموزش شبکه، با دادن نمونه‌های آموزشی که در آنها مقدار خروجی نیز معلوم است، خروجی شبکه محاسبه شده و با خروجی واقعی مقایسه می‌شود. در صورت وجود اختلاف مقدار خطا به عقب برگشته و مقدار وزن‌ها تصحیح می‌شود. این کار آنقدر تکرار می‌شود تا خطا

جدول ۲- ده نمونه از اطلاعات آموزشی برای شبکه عصبی تخمین سایش از روی جریان و دور موتور.

ردیف	دور ابزار RPM	پیشروی mm	عمق بار mm	RMS جریان موتور [A]	RMS دور موتور [rev/min]	سایش mm
۱	۲۰۰	۲۰۰	۰/۵	۵/۰۹	۱۴۸۱	۰/۰۰۱
۲	۶۳۰	۲۰۰	۰/۵	۵/۱۱	۱۴۷۹	۰/۰۰۱
۳	۲۰۰	۲۰۰	۰/۳	۵/۴۲	۱۴۸۴	۰/۳
۴	۲۰۰	۳۱۵	۰/۵	۵/۷۳	۱۴۷۷	۰/۳
۵	۵۰۰	۲۰۰	۰/۵	۵/۱۸	۱۴۸۵	۰/۰۰۱
۶	۴۰۰	۲۰۰	۰/۵	۵/۵۰	۱۴۷۶	۰/۳
۷	۲۰۰	۱۶۰	۰/۵	۴/۸۹	۱۴۹۱	۰/۰۰۱
۸	۵۰۰	۲۰۰	۱/۰	۶/۳۵	۱۴۶۰	۰/۳
۹	۲۰۰	۲۰۰	۰/۳	۴/۹۸	۱۴۹۳	۰/۰۰۱
۱۰	۵۰۰	۳۱۵	۰/۷	۵/۴۱	۱۴۸۰	۰/۰۰۱

جدول ۳- چند نمونه از نتایج آزمایش شبکه عصبی اول.

ردیف	دور ابزار RPM	پیشروی mm	عمق بار mm	RMS جریان موتور [A]	سایش واقعی	سایش تخمینی	دقت تخمین
۱	۲۰۰	۲۰۰	۰/۵	۵/۵۹	۰/۳	۰/۳۱۵	٪۹۵
۲	۵۰۰	۲۰۰	۱/۰	۵/۴۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۹	٪۹۰
۳	۲۰۰	۱۶۰	۰/۵	۵/۲۹	۰/۳	۰/۳۷۸	٪۹۲/۶
۴	۵۰۰	۳۱۵	۰/۷	۵/۹۸	۰/۳	۰/۳۲	٪۹۳/۳
۵	۴۰۰	۱۶۰	۰/۵	۵/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۹۶	٪۹۶

جدول ۴- چند نمونه از نتایج آزمایش شبکه عصبی دوم.

ردیف	دور ابزار RPM	پیشروی mm	عمق بار mm	RMS دور موتور [rev/min]	سایش واقعی	سایش تخمینی	دقت تخمین
۱	۲۰۰	۲۰۰	۰/۵	۱۴۴۵	۰/۳	۰/۳۷۶	٪۸۲
۲	۵۰۰	۲۰۰	۱/۰	۱۴۷۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۹۱۲	٪۹۱/۲
۳	۲۰۰	۱۶۰	۰/۵	۱۴۴۲	۰/۳	۰/۳۲۹۷	٪۹۰/۱
۴	۵۰۰	۳۱۵	۰/۷	۱۴۳۵	۰/۳	۰/۲۵۳۸	٪۸۴/۶
۵	۴۰۰	۱۶۰	۰/۵	۱۴۸۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۱۷۷	٪۸۲/۳

جدول ۵- چند نمونه از نتایج آزمایش شبکه عصبی سوم.

ردیف	دور ابزار RPM	پیشروی mm	عمق بار mm	RMS جریان موتور [A]	RMS دور موتور [rev/min]	سایش واقعی	سایش تخمینی	دقت تخمین
۱	۲۰۰	۲۰۰	۰/۵	۵/۵۹	۱۴۴۵	۰/۳	۰/۳۷۰۳	٪۹۰/۱
۲	۵۰۰	۲۰۰	۱/۰	۵/۴۸	۱۴۷۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۰۶۵	٪۹۳/۵
۳	۲۰۰	۱۶۰	۰/۵	۵/۲۹	۱۴۴۲	۰/۳	۰/۳۳۱۲	٪۸۹/۶
۴	۵۰۰	۳۱۵	۰/۷	۵/۹۸	۱۴۳۵	۰/۳	۰/۳۷۷۲	٪۹۲/۴
۵	۴۰۰	۱۶۰	۰/۵	۵/۰۱	۱۴۸۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۸۹۸	٪۸۹/۸

نتیجه گیری

عصبی در جدول (۶) آورده شده است. شبکه‌های عصبی به کار رفته در این تحقیق از نوع استاتیکی هستند، یعنی تمام شرایط ماشین‌کاری مثل جنس قطعه‌کار، نوع ماشین، استفاده یا عدم استفاده از مایع خنک‌کاری، نوع مایع و کیفیت آن و ... هم در مرحله آموزش و هم در مرحله آزمایش ثابت در نظر گرفته شده‌اند. به عنوان یک کار پیشنهادی می‌توان از شبکه عصبی دینامیکی یا تطبیقی استفاده کرد که به طور پیوسته و در شرایط متغیر آموزش ببیند. تا با دقت در شرایط متغیر سایش ابزار را بهتر تخمین بزند.

جدول ۶- مقایسه شبکه‌های عصبی به کار رفته.

شبکه عصبی	۱	۲	۳
ورودی شبکه	پیشروی دور ابزار عمق بار جریان موتور	پیشروی دور ابزار عمق بار دور موتور	پیشروی دور ابزار عمق بار دور موتور جریان موتور
نمونه آموزشی	۴۰ عدد	۴۰ عدد	۴۰ عدد
نمونه آزمایشی	۱۵ عدد	۱۵ عدد	۱۵ عدد
دقت تخمین	٪۹۳	٪۸۹	٪۹۱
تعداد تکرار برای آموزش	۱۵۰۲	۱۰۵۶	۱۱۲۰

نتایج کار نشان می‌دهد که جریان و دور موتور اسپیندل به هر کدام از شرایط ماشین‌کاری و نیز به مقدار سایش ابزار حساس است. از این موضوع می‌توان هم برای تعیین نیروهای ماشین‌کاری و تخمین زمان شکست و هم سایش ابزار با استفاده از جریان و دور موتور استفاده کرد. در شکل (۵) دیده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، دور ابزار و عمق بار مقدار جریان به طور غیرخطی افزایش می‌یابد. این افزایش جریان بدلیل افزایش نیروهای ماشین‌کاری می‌باشد که باعث افزایش بار مکانیکی روی موتور شده و موتور جریان بیشتری را می‌کشد. از طرف دیگر، در شکل دیده می‌شود که با ساییده شدن لبه ابزار، باز هم مقدار جریان زیاد می‌شود. این مسئله نیز به دلیل افزایش سطح تماس لبه ابزار با قطعه و زیاد شدن نیروی اصطکاکی و نیروهای ماشین‌کاری می‌باشد و در کل با زیاد شدن سایش ابزار جریان موتور نیز افزایش می‌یابد. همین مسئله در مورد دور موتور نیز وجود دارد. در شکل (۶) دیده می‌شود که با افزایش شرایط ماشین‌کاری و سایش ابزار به دلیل زیاد شدن بار مکانیکی روی موتور، دور موتور کاهش می‌یابد. همچنین، در این تحقیق سه شبکه عصبی مجزا طراحی شدند که با استفاده از ۴۰ نمونه در شرایط مختلف ماشین‌کاری آموزش داده شده و با ۱۰ نمونه جدید و ۵ نمونه از اطلاعات آموزشی نحوه کار شبکه‌ها آزمایش شدند. نتایج کار نشان می‌دهد که تخمین سایش با استفاده از جریان موتور دقت خوبی دارد، ولی سرعت یادگیری آن پایین است. علت آن اینست که تغییر سایش، تغییرات کمتری روی جریان ایجاد می‌کند. دلیل آنست که جریان با توان ۲ با گشتاور مکانیکی رابطه دارد و رابطه غیر خطی جریان با سایش از درجه بالاتری می‌باشد (رابطه ۶). ولی در استفاده از دور موتور چون تغییرات دور نسبت به سایش چشمگیر و رابطه غیرخطی دور با سایش پایین‌تر است، سرعت یادگیری نیز بالاست. ولی دقت تخمین آن پایین است. در نهایت یک شبکه عصبی طراحی شده که از هر دو پارامتر به طور همزمان استفاده می‌کند. نتایج کار نشان می‌دهد که در این حالت سرعت یادگیری و قدرت تخمین شبکه بهبود می‌یابد. این شبکه می‌تواند با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر سایش ابزار را تخمین بزند. مقایسه شبکه‌های

مراجع

- [1] Zhang, G.M. and Kanchustambham, R.G. "Neural Network Application in Online Monitoring of Turning Processes", Technical Research Report, Univ. of Maryland, 1999.
- [2] Sick, B. "Monitoring the Wear of Cutting Tools in CNC Lathes with Artificial Neural Networks", ICASSP-97, Apr. 21-24, Munich, Germany, 1997.
- [3] Wang, J.Y. and Liu, C.R. "The Effect of Flank Wear on the Heat Transfer, Thermal Damage and Cutting Mechanics in Finish Hard Turning", Annals of CIRP, Vol. 48, No. 1, pp. 53-58, 1999.
- [4] Altintas, Y. and Dong, C.L. "Design and Analysis of Modular CNC System for Machining Control and Monitoring Modeling of Machine Tools: Accuracy, Dynamics and Control", ASME J., Vol. 45, pp. 199-208, 1990.
- [5] Chang, Y.C. and Lee, K.T. "Cutting Force Estimation of Spindle Motor", J. Control System Tech., Vol. 3, No. 2, pp. 145-152, 1995.
- [6] Li, X. "Real Time Tool Condition Monitoring Using Wavelet Transform and Fuzzy Techniques", IEEE Transactions on Systems, Part C., Application and Review, Vol. 30, No. 3, pp. 352-357, 2000.
- [7] Li, X. "Detection of Tool Flute Breakage in End Milling Using Feed Motor Current Signatures", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 6, pp. 491-498, 2001.
- [8] Chapman, S.J. "Electric Machinery Fundamentals". McGraw Hill, New York, 1991.