مونيتورينگ سايش ابزار فرزكاري به كمك شبكه عصبي از طريق اندازه‌گيري جريان موتور

سيد جعفر فتحي و امير مصطفي پور اصل
مربي دانشكدة مكانيک، گروه جامدات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر

چكيده

يكي از مسائل مهم در ماشينكاري اندازهگيري غيرمستقيم سايش ابزار در حين ماشينكاري و بدون توقف عمليات ماشينكاري مي‌باشد. در اين مقاله يك سيستم هوشمند براي تخمين سايش ابزار فرزكاري به صورت بلادرنگ و از طريق اندازهگيري جريان موتور اسپيندل ارائه شده است. براي اينكار با انجام آزمايشات عملي مقدار جريان موتور در شرايط مختلف ماشينكاري يعني پيشروي، عمق بار و دور ابزار و در سايشهای مختلف ابزار اندازهگيری شده و تأثير سايش ابزار فرزكاری روی جريان موتور بررسی شد. همچنين با استفاده از اطلاعات به دست آمده يك شبكه عصبي از نوع bp طراحي شده و آموزش داده شد. طوريكه مي‌توان در شرايط مختلف ماشينكاري با اندازهگيري جريان موتور، سايش ابزار را در حين ماشينكاري تخمين زد. از اين سيستم مي‌توان در كنترل و مونيتورينگ فرايند ماشينكاري استفاده نمود.

كلمات كليدی: سايش ابزار، فرزكاري، شبكه‌هاي عصبي، مونيتورينگ، جريان موتور.

Tool wear monitoring in milling with neural networks by using motor current measuring

J. Fathi and A. Mostafapour
Abhar Islamic Azad un. mechanic department

Abstract

Indirect measuring of tool wear without stopping the process is a purpose in machining. In this paper an intelligent system for on-line tool wear estimation in milling through measuring spindle motor current is proposed. For this the current 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 milling tool wear on current of motor is analysed. 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 with measuring current of motor. This system could be used in controling and monitoring of the machining process.

Key words: tool wear, milling, neural networks, monitoring, motor current.

۱- مقدمه

امـــروزه سيـــستم UFMS (unmanned Flexible Manufacturing System) يا سيستم توليدي انعطـافپـذير بـدون حضور انسان، در حـال گـسترش اسـت. در چنـين سيـستمهايي كامپيوتر و ابزارهاى اتوماتيك جاي انـسان را مـيگيرنـد. در ايـن سيستمها سعي در استفاده از ابزارهائي اسـت كـه كارهـاي يـك انسان متخصص را بر عهـده بگيرنـد. لـذا ايـن سيـستمها ضـمن اجراي عمليات بايد توانائي كنترل فرايند و شرايط كاري را داشته باشند. به اين دليل سنسورهاي مختلفي جهت كنتـرل و گـرفتن اطلاعات از شرايط فراينـد بـه كـار مـيرود. ولـي اطلاعـات ايـن سنسورها بايد به نحـوي پـردازش يافتـه و تـصميمگيـري جهـت كنتـرل فرايند انجام شـود. به اين دليل واحد تصميمگيـري بايـد به نوعي يك سيستم هوشمند باشد. يكي از مسائل مهمي كـه در ماشينكاري وجود دارد، مسئله سايش ابزار ماشينكاري مـيباشـد. امروزه كارهاي زيادي جهت اندازهگيري و تخمين سايش ابزار در حال انجام است. سايش ابزار به سه دليـل بـراي مـا مهـم اسـت. دليل اول آن است كه سائيده شدن نوك ابزار روي صافي سطح و دقت قطعه ماشينـكاري تـأثيـر مستقيـمي دارد. در جاهائـيكـه كيفيت و دقت بالائي براي قطعات توليدي لازم است، بايد سايش ابزار كنترل و محدود شود. دليل دوم آن است كـه سـايش منـشأ شكست ابزار ميباشد. با توجه بـه آنكـه شكـست ناگهـاني باعـث صدمه ديدن كل ابزار، ماشين ابزار و قطعه كار مـيشـود، بايـد از اين شكست ناگهاني جلوگيري شود. دليل سوم مسئله اقتـصادي ميباشد چرا كه سايش ابزار باعث هزينه تيزكاري مجـدد، پايـان عمر ابزار و توقف عمليات ماشينكاري ميگردد به اين دليل بايـد تا حد امكان سايش ابزار را كنترل كنيم. مسئلهاي كه وجود دارد آن است كه سايش ابزار هيچ وقت صـفر نيـست. بـا پارامترهـايي مثل (كاهش پيشروي، سرعت برش، عمق بار و...) ميتوان سايش ابزار را كاهش داد ولي اين كار باعـث افـزايش زمـان توليـد و در نتيجه افزايش هزينه ميشود. بنابراين جلوگيري از سايش ابزار نه امكانپذير است و نه اقتصادي. تنها كاري كه ميتوان انجام داد آن است كه سايش ابزار را در محـدوده مجـازي قـرار دهـيم. وقتـي سايش از حد مجاز خارج شد، ابزار را تعويض كنيم. يك روش آن است كه بگذاريم ابزار ساييده شـده و از روي شكـست ابـزار و يـا اندازهگيري قطعه توليدي از نظر تلورانس ابعادي و صـافي سـطح سايش ابزار را تشخيص دهيم كه اين كار از نظر اقتصادي مقرون به صرفه نميباشد. يك راهحل ديگر آن اسـت كـه از روي روابـط محاسباتي مقدار عمر بهينه ابزار را محاسبه كنيم و وقتي كه اين زمان طي شد، ابزار را تعويض كنيم. كه بـاز ايـن نيـز بـه صـرفه نيست. چراكه سـايش ابـزار يـك پديـده غيرقابـل پـيشبينـي و تصادفي ميباشد. حتي ممكن است ابزار بعد از آن زمان مشخص شده، هنوز قابل استفاده باشد و يا ابزار قبل از تمام شـدن زمـان عمر محاسبه شده دچار شكست يا سايش غير قابل قبـول شـود. راه حل نهايي آن است كـه دائمـاً سـايش ابـزار را در حـين كـار اندازهگيري كنيم و قبل از رسيدن به حد بحراني ابزار را تعـويض كنـيم. روشـهاي انـدازهگيـري سـايش ابـزار بـه دو دسـته روش مستقيم و غيرمستقيم تقسيم ميشود. در روش مستقيم به طـور دستي و توسط وسـايلي مثـل ميكروسـكوپ ابـزار سـازي مقـدار سـايش ابـزار (مثـل طـول ناحيـه سـايش پهلـو) را مـستقيما" اندازهگيري ميكنند. لازمه اين كار آن است كـه ماشـين متوقـف شده و سپس كار اندازهگيري انجام گيرد. كه اين كـار هـم باعـث افزايش زمان توليد ميشود و مهمتـر آن كـه ايـن نـوع توقـف و اندازهگيري توسط انـسان، بـا فلـسفه سيـستمهاي اتوماسـيون و سيستمهاي توليدي بدون حضور انسان متنـاقض اسـت. در روش غيـر مـستقيم خـود سـايش انـدازهگيـري نمـيشـود بلكـه از پارامترهايي كه با سايش ابزار رابطه دارند، و نيز اندازهگيري خود اين پارامترها راحتتر است استفاده ميشود. خوشبختانه طبيعت اين پارامترها طوري است كه بدون توقف عمليات ماشين كـاري و به صورت بلادرنگ و در حين عمليات ميتوان اين پارامترهـا را اندازهگيري نمود. در ايـن حالـت سنـسورهايي متناسـب بـا نـوع پارامتر مورد استفاده به كار گرفتـه مـيشـود تـا در طـي فراينـد ماشينكاري دائماً ايـن پارامترهـا را انـدازهگيـري نمايـد . از روي مقادير پارامترها و با توجه به رابطه بين اين پارامترها بـا سـايش ابزار ميتوان سايش ابزار را مونيتورينگ نمود.

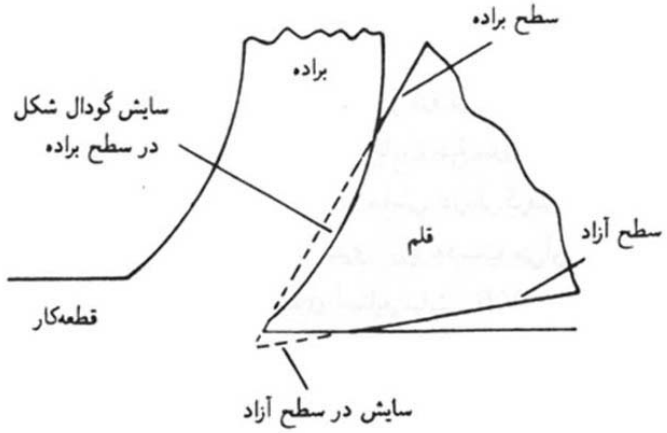
۲- سايش ابزار

عمر ابزار يكي از مهمترين مـسايل اقتـصادي در ماشـينكاري ميباشد ابزاري كه ديگر نتواند وظيفه و كار خـود را انجـام دهـد، گفته ميشود از كار افتاده است. معيارهاي از كار افتـادگي بـسته به دقت و كيفيت قطعـه و شـرايط ماشـينكاري (خـشنكـاري يـا پرداختكاري) متفاوت است. مهمترين معيار از كار افتادگي ابـزار، سايش تدريجي نوك ابزار است كه به دو صورت سايش حفـرهاي و سايش پهلو ديده ميشود. سايش حفرهاي در سطح براده ايجاد

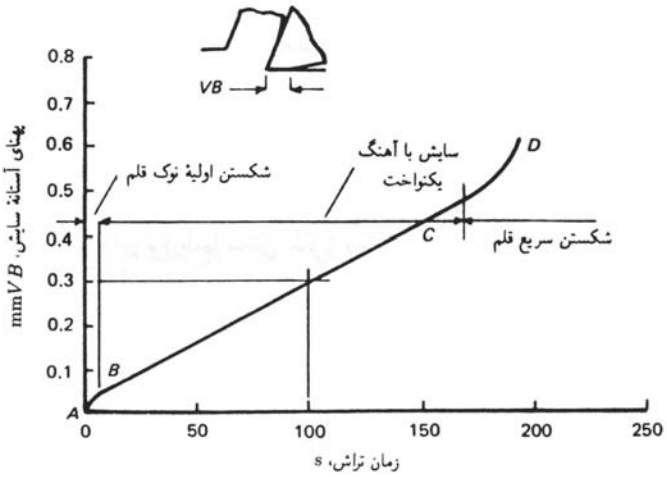
مي‌شود كه در نتيجه حركت براده صورت مـي‌گيـرد و بـه شـكل گودال ديده مي‌شود. سايش پهلو در سطح آزاد و نزديك لبه قلـم ايجاد مي‌شود كه در نتيجه مالش سطح تازه تراشيده شده قطعـه كار صورت مي‌گيرد. شكل (۱) در اين ميان سايش پهلـو اهميـت بالايي نسبت به سايش حفره‌اي دارد.

مطالعات نشان مي‌دهد كه رشد منطقه سايش پهلو داراي سه مرحله است كه در شكل (۲) نشان داده شده است [۴].

سايش پهلو به صورت يك ناحيه (LAND) مي‌باشـد كـه در اثـر حركت مالشي سطوح ماشـين كـاري شـده روي ابـزار بـه وجـود مي‌آيد. اين سطح موازي جهت حركت برشي مي‌باشد. عرض اين ناحيـه سـايش بـه عنـوان مقـدار سايش مطرح است كه توسط ميكروسكوپ ابزارسازي تعيين مي‌شود در ابتداي عمر ابزار يعنـي ناحيه AB ابزار تيز با سرعت بالايي دچار سـايش شـده و ناحيـه سايش مشخصي ايجاد مي‌شود در اين ناحيـه نـرخ سـايش بـالا مي‌باشد. اين حالت به سايش اوليه موسوم است. با ادامـه ماشـين كاري در ناحيه BC سايش به حالـت پايـداري مـي‌رسـد. و نـرخ سايش يكنواخت مي‌شود. و در اواخر عمر ابزار در ناحيه CD نـرخ سايش دوباره افزايش مي‌يابد كه به سايش سـريع موسـوم اسـت. ناحيه CD ناحيه‌اي است كه در آن دما شديداً افـزايش مـي‌يابـد پيشنهاد مي‌شود كه قبل از آنكه سايش به اين منطقه برسد ابزار تيزكاري شود.



شكل ۱- سايش پهلو و گودال فرسايش در نوك ابزار برش



شكل ۲- مراحل پيشرفت سايش پهلو [۴]

در شکل (۳) دیده مي‌شود که در نزدیکي نوك ابزارسایش پهلو شدیدتر است و علت آن تأثیر جریان براده در نوك ابزار و پیچیدگي جریان براده در آن ناحیه مي‌باشد. سایش پهلو در آن منطقه با V_C نشان داده مي‌شود. در انتهاي دیگر یك شیار یا ناچ (NOTCH) ایجاد مي‌شود که به دلیل کار سختي سطح قطعه در اثر نیروهاي ماشینکاري، اکسیداسیون و یا تغییرات شیمیایي در آن قسمتها ، قطعه کار سخت شده و سایش ابزار شدیدتر مي‌شود. سایش در این قسمت را با V_N نشان مي‌دهند. در ناحیه بین آن دو، منطقه سایش نسبتاً یکنواخت است ولي با این وجود به دلیل تغییرات شرایط براده برداري اختلافاتي در عرض منطقه سایش دیده مي‌شود. به این خاطر در این منطقه از دو پارامتر استفاده مي‌شود که شامل مقدار عرض متوسط در این ناحیه که با V_B نشان داده مي‌شود و مقدار حداکثر عرض منطقه سایش که با V_{Bmax} نشان داده مي‌شود، مي‌باشد. مکانیزمهاي فرسایش مختلفي در ایجاد سایش پهلو تأثیر دارند. که مهمترین آنها مکانیزمهاي چسبندگي سایش در اثر ذرات ساینده و سایش در اثر نفوذ مي‌باشد.

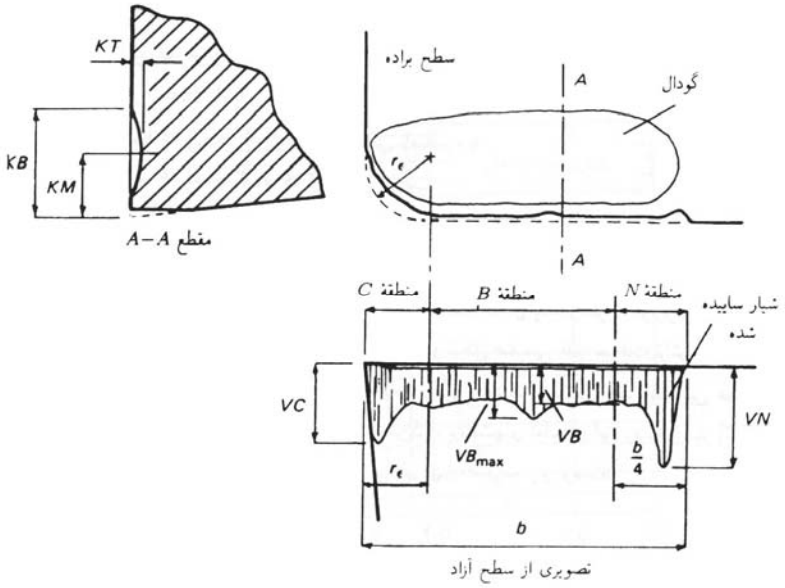
سایش پهلو باعث صدمه زدن به کیفیت سطحي قطعه ماشینکاري، تغییرات ابعادي قطعه، افزایش سطح تماس و در نتیجه افزایش درجه حرارت در حین ماشینکاري مي‌شود. به این علت این نوع سایش اهمیت زیادي داشته و مطالعات زیادي در مورد آن در حال انجام است. به عنوان مثال مطابق شکل (۳) اگر طول منطقه سایش پهلو به اندازه V_B باشد، نوك ابزار به اندازه h از قطعه کار دور خواهد شد که این موضوع باعث خواهد شد قطعه کار از نظر ابعادي دقیق ماشینکاري نشود. در اثر این مقدار سایش، مقداري از حجم مادة ابزار ساییده مي‌شود، که با W نشان داده مي‌شود و براي تیزکاري ابزار نیز باید به اندازه حجم w' باید از ابزار کاسته شود. که روابط مربوطه به صورت زیر مي‌باشد:

$$h = \frac{V_B \tan\alpha}{1 - \tan\gamma \tan\alpha} \qquad (۱)$$

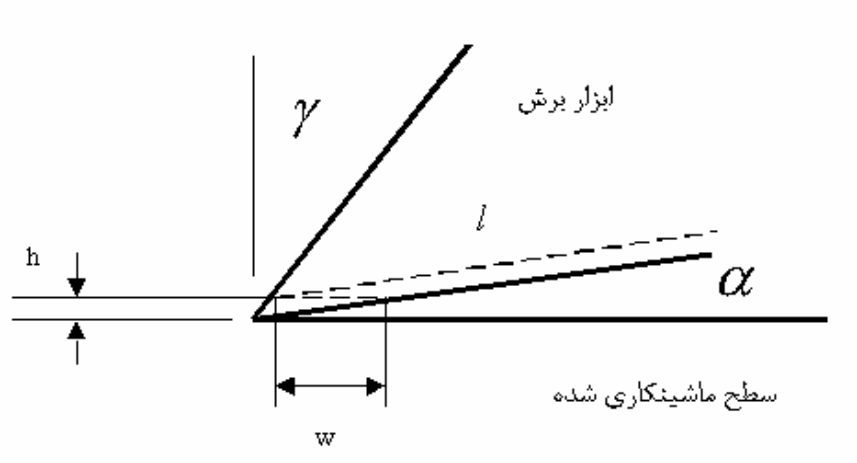
$$W = \frac{bV_B{}^2 \tan\alpha}{2(1 - \tan\gamma \tan\alpha)} \qquad (۲)$$

$$W' \cong lb\sin\alpha \qquad (۳)$$

در این معادلات α زاویه آزاد، γ زاویه براده، b پهناي برش و l طول اسمي مي‌باشد.



شکل ۳- مناطق مختلف سایش پهلو



شکل ۴- شکل هندي ابزارفرسایش یافته دراثر سایش پهلو

تأثير سايش ابزار روي جريان موتور

هر موتوري براساس ساختمان خود داراي يك دوره اسمي سنكرون مي‌باشد. سرعت سنكرون موتور را مي‌توان از فرمول زير محاسبه كرد:

$$\omega_{syn} = \frac{120F}{60p} \qquad (۴)$$

كه در آن F فركانس وp تعداد قطبهاي موتور مي‌باشد. وقتي موتور تحت بار قرار مي‌گيرد سرعت دوراني خروجي موتور كاهش يافته و به w_{mech} مي‌رسد. براساس اين تغيير سرعت خروجي براي موتور پارامتر لغزش (s) تعريف مي‌شود كه به صورت زير است:

$$s = \frac{\omega_{syn} - \omega_{mech}}{\omega_{syn}} \qquad (۵)$$

رابطه‌اي كه بين گشتاور موتور و پارامتر لغزش وجود دارد به صورت زير است:

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} * \frac{v_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{th} + X_2')^2} * \frac{R_2'}{s} \qquad (۶)$$

كه در اين فرمول v_{th} ولتاژ ورودي به استاتور R_1 و X_1 به ترتيب مقاومت و اندوكتانس استاتور و R_2 و X_2 نيز به ترتيب مقاومت و اندوكتانس روتور ارجاع شده به سمت استاتور مي‌باشد كه مقادير ثابتي هستند. R_{th} و X_{th} نيز قسمت حقيقي و موهومي امپدانس Z_{th} مي‌باشند:

$$Z_{th} = R_{th} + iX_{th} \qquad (۷)$$

در فرمول گشتاور خروجي موتور تنها متغير، پارامتر لغزش مي‌باشد كه با توجه به تغيير سرعت خروجي موتور مي‌توان مقدار آن را پيدا نمود.

بار اعمالي روي موتور روي جريان روتور نيز تأثير خواهد گذاشت. با افزايش بار خارجي جرياني كه موتور مي‌كشد افزايش خواهد يافت. كه رابطه آن با توان مكانيكي خروجي موتور به صورت زير است:

$$P_{mech} = T_{mech} . \omega_{mech} = I_2^2 \frac{R_2}{s}(1-s) \qquad (۸)$$

كه در آن I_2 جريان روتور و R_2 مقاومت روتور مي‌باشد. رابطة بين گشتاور خروجي و جريان نيز به صورت زير مي‌باشد:

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \qquad (۹)$$

که در آن I_2' جریان روتور دیده شده از استاتور می‌باشد که تقریباً برابر جریان استاتور می‌باشد. بنابراین هرگونه تغییر در گشتاور یا بار خارجی روی جریان موتور تأثیر خواهد گذاشت.
از طرف دیگر میزان سایش ابزار روی نیروی ماشینکاری تأثیر می‌گذارد. با افزایش سایش مقدار نیروهای ماشینکاری افزایش خواهد یافت [۸-۶]. بنابراین در شرایط ثابت ماشینکاری با افزایش سایش ابزار مقدار جریان موتور نیز افزایش خواهد یافت. از همین موضوع می‌توان با اندازه‌گیری جریان موتور در شرایط ثابت ماشینکاری مقدار سایش ابزار را تخمین زد.

روش کار

در این پروژه عملیات فرزکاری با فرز عمودی روی قطعات فولادی از جنس ST37 با عرض 50mm انجام گرفت. ابزار بکار رفته از نوع تیغچه‌های سه گوش کاربیدی بدون روکش بودند که روی ابزارگیر چهار تیغچه‌ای مدل Iso40-22-E و با قطر کاری ۶۳mm بسته می‌شوند. برای اینکار در شرایط مختلف برش (پیشروی بین ۸۰ تا ۲۲۴ mm/min، عمق بار بین ۰/۵ تا ۲/۵ mm دور ابزار بین۳۳۵ تا ۱۰۰۰rpm) ماشینکاری صورت گرفته و در سایشهای مختلف ابزار، مقدار جریان موتور با آمپرمتر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقدار سایش نیز از ذره‌بین با بزرگنمایی ۸ برابر استفاده شد. به عنوان نمونه برخی از اطلاعات اندازه‌گیری شده در جدول (۱) آورده شده است. برای اینکار با ثابت نگه داشتن کلیه پارامترها و تغییر یکی از پارامترها، در سایشهای مختلف مقدار جریان موتور مستقیماً اندازه‌گیری شد. برای ایجاد سیستم هوشمند در محیط نرمافزار matlab یک شبکه عصبی از نوع bp با سه لایه (یک لایه ورودی، یک لایه مخفی و یک لایه خروجی) طراحی شد. لایه ورودی دارای پنج ورودی شامل مقدار پیشروی، عمق بار، دور ابزار و مقدار جریان موتور و لایه خروجی دارای یک ورودی می‌باشد که همان مقدار سایش ابزار می‌باشد. تعداد گره‌های لایه مخفی نیز ۵۰ می‌باشد. تابع تبدیل بکار رفته در شبکه نیز تابع سیگموئید باینری به صورت زیر می‌باشد:

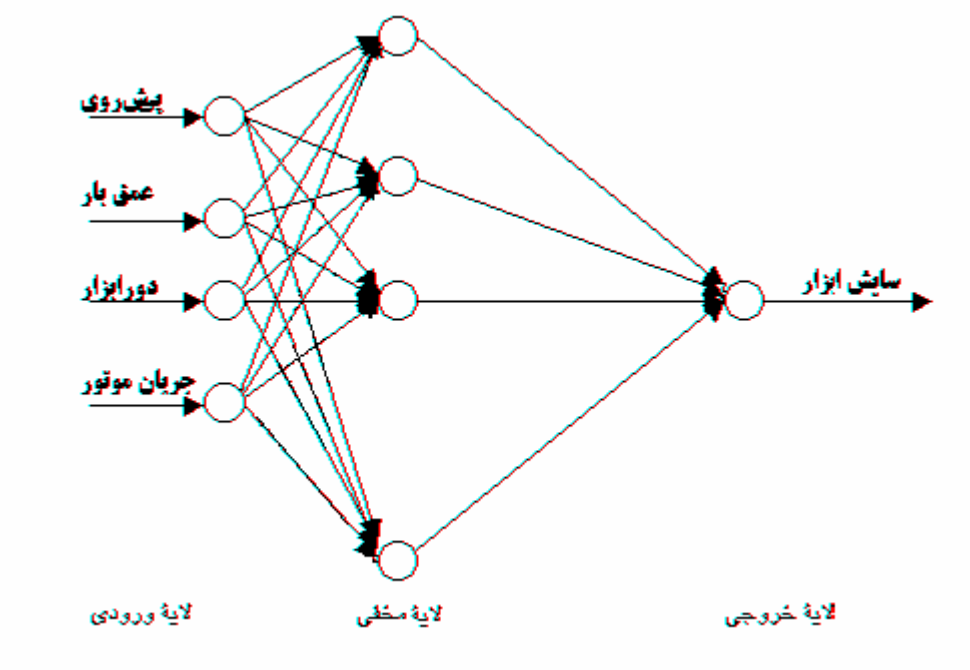
$$f(x)=\frac{2}{1+\exp(-x)}-1 \qquad (۱۰)$$

$$f'(x)=\frac{1}{2}\left[1+f_2(x)\right]\left[1-f_2(x)\right] \qquad (۱۱)$$

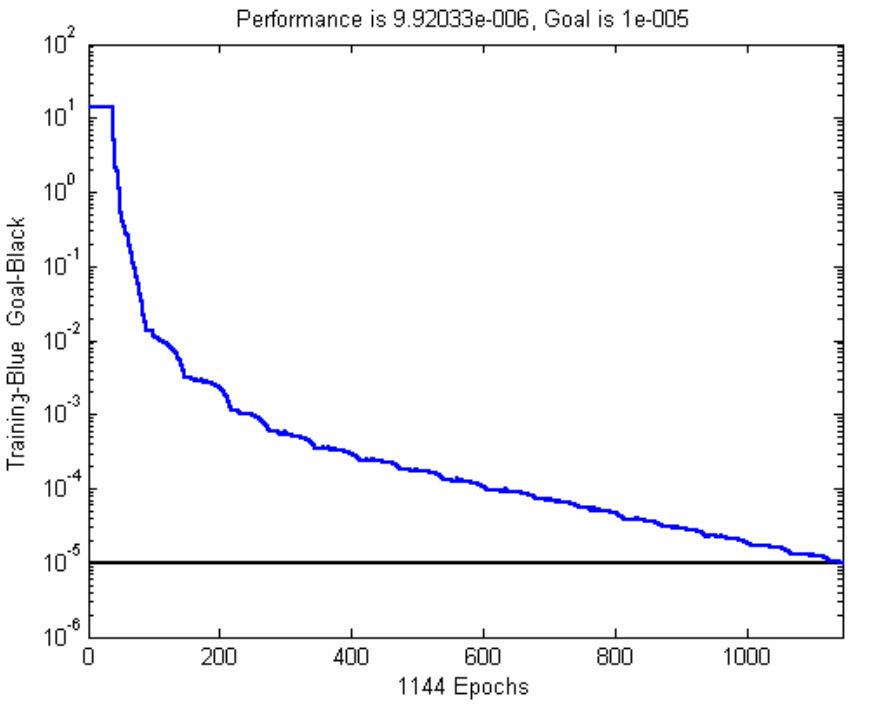
طرحواره شبکه در شکل (۵) نشان داده شده است. شبکه با استفاده از اطلاعات آموزشی حاصل از اندازه‌گیری مستقیم، آموزش داده شد. دیده شد که شبکه بعد از ۸۲۰ تکرار به خطای کمتر از ۰/۰۰۱ رسید که منحنی خطای آموزش برنامه به صورت شکل (۶) می‌باشد. سپس با استفاده از اطلاعات آزمایشی عملکرد برنامه آزمایش شد.

جدول ۱- نمونه اطلاعات جریان موتور بر حسب آمپر در آزمایشات عملی

دور ماشین (rpm) f=112 و a=1.0	۳۵۵	۵۰۰	۱۰۰۰	-
ابزارتیز	۴/۱۵۶	۴/۲۰۲	۴/۲۶	-
ابزار کند	۴/۲۸۸	۴/۳۲۴	۴/۵۰۶	-
پیشروی میز (max/min) n=500 و a=1.0	۸۰	۱۱۲	۱۶۰	-
ابزار تیز	۴/۱۷۸	۴/۲۰۲	۴/۲۲۱	-
ابزار کند	۴/۲۳۴	۴/۳۲۴	۴/۳۴۵	-
عمق بار (mm) f=112 و n=500	۰/۵	۱/۰	۱/۵	۲/۰
ابزار تیز	۴/۰۶	۴/۲۰۲	۴/۳۲	۴/۴۶
ابزار کند	۴/۱۹۵	۴/۳۲۴	۴/۵۸	۴/۷۳



شکل ۵- طرحواره شبکهٔ عصبي طراحي شده



شکل ۶- منحني تغييرات خطا در مرحلهٔ آموزش

نمادها

a	عمق بار
b	پهناي برش
f	پيشروي
fi	زاويه اختلاف فاز جريان و ولتاژ
I	جريان موتور
I_2	جريان روتور
n	دور ابزار
P	توان موتور
R_1	مقاومت استاتور
R_2	مقاومت موتور
s	پارامتر لغزش
T	گشتاورخروجي موتور
X_1	اندوکتانس استاتور
X_2	اندوکتانس روتور
V	ولتاژموتور
V_B	مقدار پهناي سايش ابزار
V_{th}	ولتاژ ورودي به استاتور
W	حجم ماده سائيده شده
α	زاويه آزاد
γ	زاويه براده
ω	سرعت سنکرون موتور

نتيجه گيري

سيستم حاصل يك روش مناسب براي پيشبيني و تخمين سايش ابزار فرزکاري با استفاده از اندازه‌گيري جريان موتور است. با استفاده از اطلاعات آزمايشي عملکرد سيستم آزمايش شد. نتايج عملي نشان مي‌دهدکه سيستم، عملکرد خوبي داشته و با خطاي کمتر از ۰/۰۰۱ مي‌تواند مقدار دقيق سايش ابزار را تخمين بزند. آزمايشات عملي نشان داد که با افزايش سايش ابزار مقدار جريان موتور نيز افزايش مي‌يابد. يکي از مواردي که در اين پروژه با آن مواجه هستيم، آن است که مقدار جريان موتور با تغيير ميزان سايش، تغييرات کمتري دارد. علت اين است که طبق فرمول (۹) مقدار گشتاور با توان دو جريان رابطه دارد. با تغيير بسيار جزئي در جريان، مقدار گشتاور به مقدار زيادي تغيير خواهد کرد. همچنين مقدار توان خروجي موتور تنها با جريان رابطه ندارد بلکه مقدار ولتاژ و cos (fi) نيز در توان خروجي دخالت دارد. که رابطه آن به صورت زير است:

$$p = VI\cos(f_i) \qquad (۱۲)$$

در اين رابطه fi زاويه اختلاف فاز جريان و ولتاژ مي‌باشد. وقتي نيروي ماشينکاري تغيير مي‌کند، مي‌تواند اثر خود را به صورت تغيير جريان موتور و يا تغيير زاويه fi نشان دهد. هرچند که نتايج نشان مي‌دهد روند تغييرات جريان روش خوبي براي تخمين ميزان سايش ابزار است، ولي پيشنهاد مي‌شود که در کارهاي بعدي مقدار جريان و زاويه fi همراه هم به عنوان روش اندازه‌گيري سايش بکار برده شوند. همچنين پيشنهاد مي‌شود جنس قطعه کار و سطح تماس ابزار با قطعه کار نيز به عنوان متغير در نظر گرفته شده و در ورودي شبکه از آن استفاده شود.

مراجع

[1] G.M. Zhang, R.G. Kanchustambham, “Neural Network application in on-line monitoring of turning processes”, Technical research report, University of Maryland, Internet, 1999
[2] Bernard Sick, “Monitoring the wear of cutting tools in CNC lathes with Artificial Neural Networks”, pp. In Proc. ICASSP-97,Apr. 21-24, Munich Germany, IEEE 1997
[3] J. Y. Wang, C. R. Liu, ”The effect of flank wear on the heat transfer, thermal damage and cutting mechanics in finish hard turning”, Annals of CIRP, Vol. 48.1, 1999, pp. 53-58
[4] E.J.A. ARMAREGO, R.H. Brown, "The Machining of Metals", Prentice-Hall, Inc., 1969
[5] Stephen J., Chapman, "Electric Machinery Fundamentals"
[6] Tugrul Ozel, Abhijit Nadgir, "Predication of flank wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H-13 steel with chamfered and honed CBN tools", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42, 2002, 287-297
[7] R. G. Silva, K.J. Baker, S.J. Wilcox, "The adaptability of a tool wear monitoring system under changing cutting condition" , Mechanical Systems and Signal Processing, 14 (2), 2000, 287-298
[8] Abhijit Nadgir, Tugrul Ozel, "Neural network modeling of wear for tool condition monitoring in orthogonal cutting of hardened steels", 4th International Conference on Engineering Design and Automation, July 30-August, Orland, Florida, USA, 2000