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 سیـــستم UFMS (unmanned Flexible Manufacturing System) یا سیستم تولیدي انعطـافپـذیر بـدون حضور انسان، در حـال گـسترش اسـت. در چنـین سیـستمهایي کامپیوتر و ابزارهای اتوماتیك جاي انـسان را مـيگیرنـد. در ایـن سیستمها سعي در استفاده از ابزارهائي اسـت کـه کارهـاي یـك انسان متخصص را بر عهـده بگیرنـد. لـذا ایـن سیـستمها ضـمن اجراي عملیات باید توانائي کنترل فرایند و شرایط کاري را داشته باشند. به این دلیل سنسورهاي مختلفي جهت کنتـرل و گـرفتن اطلاعات از شرایط فراینـد بـه کـار مـيرود. ولـي اطلاعـات ایـن سنسورها باید به نحـوي پـردازش یافتـه و تـصمیمگیـري جهـت کنتـرل فرایند انجام شـود. به این دلیل واحد تصمیمگیـري بایـد به نوعي یك سیستم هوشمند باشد. یکي از مسائل مهمي کـه در ماشینکاري وجود دارد، مسئله سایش ابزار ماشینکاري مـيباشـد. امروزه کارهاي زیادي جهت اندازهگیري و تخمین سایش ابزار در حال انجام است. سایش ابزار به سه دلیـل بـراي مـا مهـم اسـت. دلیل اول آن است که سائیده شدن نوك ابزار روي صافي سطح و دقت قطعه ماشینـکاري تـأثیـر مستقیـمي دارد. در جاهائـيکـه کیفیت و دقت بالائي براي قطعات تولیدي لازم است، باید سایش ابزار کنترل و محدود شود. دلیل دوم آن است کـه سـایش منـشأ شکست ابزار میباشد. با توجه بـه آنکـه شکـست ناگهـاني باعـث صدمه دیدن کل ابزار، ماشین ابزار و قطعه کار مـيشـود، بایـد از این شکست ناگهاني جلوگیري شود. دلیل سوم مسئله اقتـصادي ميباشد چرا که سایش ابزار باعث هزینه تیزکاري مجـدد، پایـان عمر ابزار و توقف عملیات ماشینکاري ميگردد به این دلیل بایـد تا حد امکان سایش ابزار را کنترل کنیم. مسئلهاي که وجود دارد آن است که سایش ابزار هیچ وقت صـفر نیـست. بـا پارامترهـایي مثل (کاهش پیشروي، سرعت برش، عمق بار و...) ميتوان سایش ابزار را کاهش داد ولي این کار باعـث افـزایش زمـان تولیـد و در نتیجه افزایش هزینه ميشود. بنابراین جلوگیري از سایش ابزار نه امکانپذیر است و نه اقتصادي. تنها کاري که ميتوان انجام داد آن است که سایش ابزار را در محـدوده مجـازي قـرار دهـیم. وقتـي سایش از حد مجاز خارج شد، ابزار را تعویض کنیم. یك روش آن است که بگذاریم ابزار ساییده شـده و از روي شکـست ابـزار و یـا اندازهگیري قطعه تولیدي از نظر تلورانس ابعادي و صـافي سـطح سایش ابزار را تشخیص دهیم که این کار از نظر اقتصادي مقرون به صرفه نميباشد. یك راهحل دیگر آن اسـت کـه از روي روابـط محاسباتي مقدار عمر بهینه ابزار را محاسبه کنیم و وقتي که این زمان طي شد، ابزار را تعویض کنیم. که بـاز ایـن نیـز بـه صـرفه نیست. چراکه سـایش ابـزار یـك پدیـده غیرقابـل پـیشبینـي و تصادفي ميباشد. حتي ممکن است ابزار بعد از آن زمان مشخص شده، هنوز قابل استفاده باشد و یا ابزار قبل از تمام شـدن زمـان عمر محاسبه شده دچار شکست یا سایش غیر قابل قبـول شـود. راه حل نهایي آن است کـه دائمـأ سـایش ابـزار را در حـین کـار اندازهگیري کنیم و قبل از رسیدن به حد بحراني ابزار را تعـویض کنـیم. روشـهاي انـدازهگیـري سـایش ابـزار بـه دو دسـته روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم ميشود. در روش مستقیم به طـور دستي و توسط وسـایلي مثـل میکروسـکوپ ابـزار سـازي مقـدار سـایش ابـزار (مثـل طـول ناحیـه سـایش پهلـو) را مـستقیما" اندازهگیري ميکنند. لازمه این کار آن است کـه ماشـین متوقـف شده و سپس کار اندازهگیري انجام گیرد. که این کـار هـم باعـث افزایش زمان تولید ميشود و مهمتـر آن کـه ایـن نـوع توقـف و اندازهگیري توسط انـسان، بـا فلـسفه سیـستمهاي اتوماسـیون و سیستمهاي تولیدي بدون حضور انسان متنـاقض اسـت. در روش غیـر مـستقیم خـود سـایش انـدازهگیـري نمـيشـود بلکـه از پارامترهایي که با سایش ابزار رابطه دارند، و نیز اندازهگیري خود این پارامترها راحتتر است استفاده ميشود. خوشبختانه طبیعت این پارامترها طوري است که بدون توقف عملیات ماشین کـاري و به صورت بلادرنگ و در حین عملیات ميتوان این پارامترهـا را اندازهگیري نمود. در ایـن حالـت سنـسورهایي متناسـب بـا نـوع پارامتر مورد استفاده به کار گرفتـه مـيشـود تـا در طـي فراینـد ماشینکاري دائماً ایـن پارامترهـا را انـدازهگیـري نمایـد . از روي مقادیر پارامترها و با توجه به رابطه بین این پارامترها بـا سـایش ابزار ميتوان سایش ابزار را مونیتورینگ نمود.

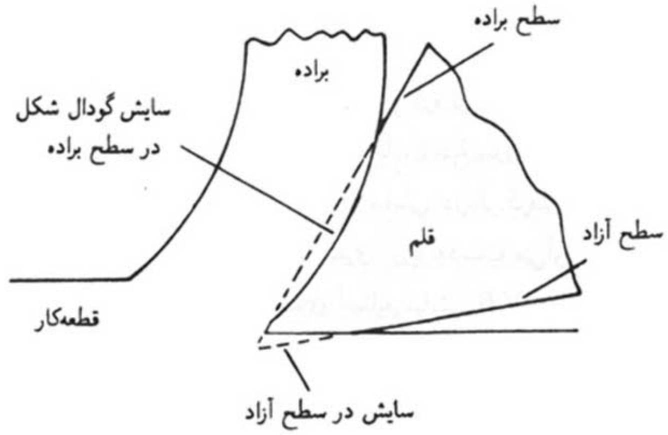
۲- سایش ابزار

عمر ابزار یکي از مهمترین مـسایل اقتـصادي در ماشـینکاري ميباشد ابزاري که دیگر نتواند وظیفه و کار خـود را انجـام دهـد، گفته ميشود از کار افتاده است. معیارهاي از کار افتـادگي بـسته به دقت و کیفیت قطعـه و شـرایط ماشـینکاري (خـشنکـاري یـا پرداختکاري) متفاوت است. مهمترین معیار از کار افتادگي ابـزار، سایش تدریجي نوك ابزار است که به دو صورت سایش حفـرهاي و سایش پهلو دیده ميشود. سایش حفرهاي در سطح براده ایجاد

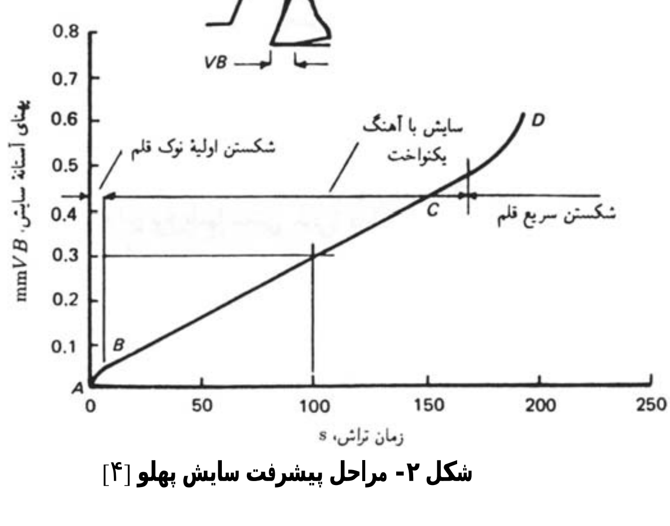
مي‌شود که در نتیجه حرکت براده صورت مـي‌گیـرد و بـه شـکل گودال دیده مي‌شود. سایش پهلو در سطح آزاد و نزدیك لبه قلـم ایجاد مي‌شود که در نتیجه مالش سطح تازه تراشیده شده قطعـه کار صورت مي‌گیرد. شکل (۱) در این میان سایش پهلـو اهمیـت بالایي نسبت به سایش حفره‌اي دارد.

مطالعات نشان مي‌دهد که رشد منطقه سایش پهلو داراي سه مرحله است که در شکل (۲) نشان داده شده است [۴].

سایش پهلو به صورت یك ناحیه (LAND) مي‌باشـد کـه در اثـر حرکت مالشي سطوح ماشـین کـاري شـده روي ابـزار بـه وجـود مي‌آید. این سطح موازي جهت حرکت برشي مي‌باشد. عرض این ناحیـه سـایش بـه عنـوان مقـدار سایش مطرح است که توسط میکروسکوپ ابزارسازي تعیین مي‌شود در ابتداي عمر ابزار یعنـي ناحیه AB ابزار تیز با سرعت بالایي دچار سـایش شـده و ناحیـه سایش مشخصي ایجاد مي‌شود در این ناحیـه نـرخ سـایش بـالا مي‌باشد. این حالت به سایش اولیه موسوم است. با ادامـه ماشـین کاري در ناحیه BC سایش به حالـت پایـداري مـي‌رسـد. و نـرخ سایش یکنواخت مي‌شود. و در اواخر عمر ابزار در ناحیه CD نـرخ سایش دوباره افزایش مي‌یابد که به سایش سـریع موسـوم اسـت. ناحیه CD ناحیه‌اي است که در آن دما شدیداً افـزایش مـي‌یابـد پیشنهاد مي‌شود که قبل از آنکه سایش به این منطقه برسد ابزار تیزکاري شود.



شکل ۱- سایش پهلو و گودال فرسایش در نوك ابزار برش



شکل ۲- مراحل پیشرفت سایش پهلو [۴]

در شکل (۳) دیده مي‌شود که در نزديکـي نـوك ابزارسـايش پهلو شديدتر است و علت آن تأثير جريان بـراده در نـوك ابـزار و پيچيدگي جريان براده در آن ناحيه مي‌باشد. سايش پهلـو در آن منطقه بـا V_C نشان داده مي‌شود. در انتهاي ديگر يك شـيار يـا ناچ (NOTCH) ايجاد مي‌شود که به دليل کار سختي سطح قطعه در اثـر نيروهـاي ماشينـــکاري، اکـسيـداسيون و يـا تغييـرات شيميايي در آن قسمتها ، قطعه کار سخت شـده و سـايش ابـزار شديدتر مي‌شود. سايش در اين قسمت را با V_N نشان مي‌دهنـد. در ناحيه بين آن دو، منطقه سايش نسبتاً يکنواخت است ولي بـا اين وجود به دليل تغييرات شـرايط بـراده بـرداري اختلافـاتي در عرض منطقه سايش ديده مي‌شود. به اين خاطر در ايـن منطقـه از دو پارامتر استفاده مي‌شود که شامل مقدار عـرض متوسـط در اين ناحيه که با V_B نشان داده مي‌شود و مقدار حـداکثر عـرض منطقه سايش کـه بـا $V_{B}max$ نـشان داده مـي‌شـود، مـي‌باشـد. مکانيزمهاي فرسايش مختلفي در ايجاد سايش پهلو تـأثير دارنـد. که مهمترين آنها مکانيزمهـاي چـسبندگي سـايش در اثـر ذرات ساينده و سايش در اثر نفوذ مي‌باشد.

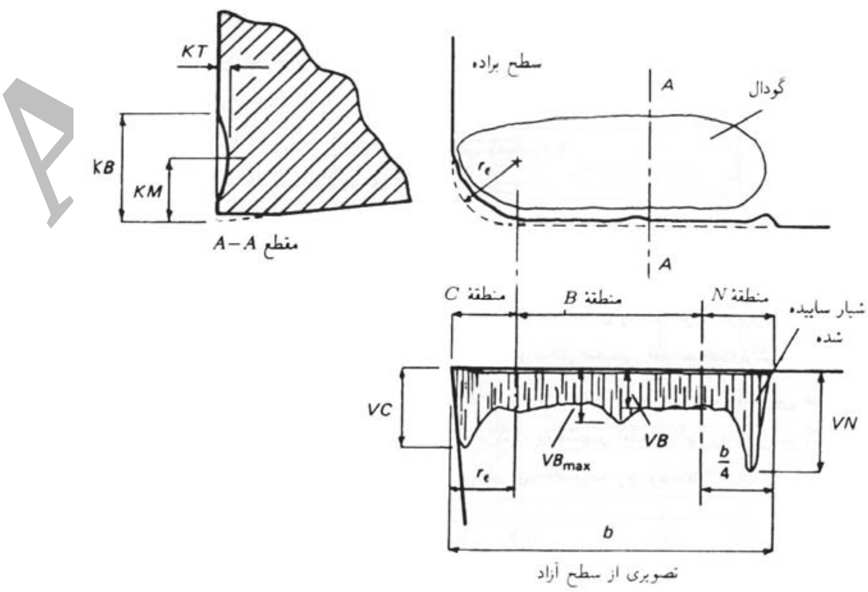
سايش پهلـو باعـث صـدمه زدن بـه کيفيـت سـطحي قطعـه ماشينکاري، تغييرات ابعادي قطعـه، افـزايش سـطح تمـاس و در نتيجه افزايش درجه حرارت در حين ماشينکاري مي‌شود. به اين علت اين نوع سايش اهميت زيادي داشته و مطالعـات زيـادي در مورد آن در حال انجام است. به عنوان مثـال مطـابق شـــکل (۳) اگر طول منطقه سايش پهلو به اندازه V_B باشـد، نـوك ابـزار بـه اندازه h از قطعه کار دور خواهد شد که اين موضوع باعث خواهد شد قطعه کار از نظر ابعادي دقيق ماشينکاري نشود. در اثـر ايـن مقدار سايش، مقداري از حجم مادة ابزار ساييده مي‌شود، کـه بـا W نشان داده مي‌شود و براي تيزکاري ابـزار نيـز بايـد بـه انـدازه حجم W' بايد از ابزار کاسته شود. که روابط مربوطه بـه صـورت زير مي‌باشد:

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

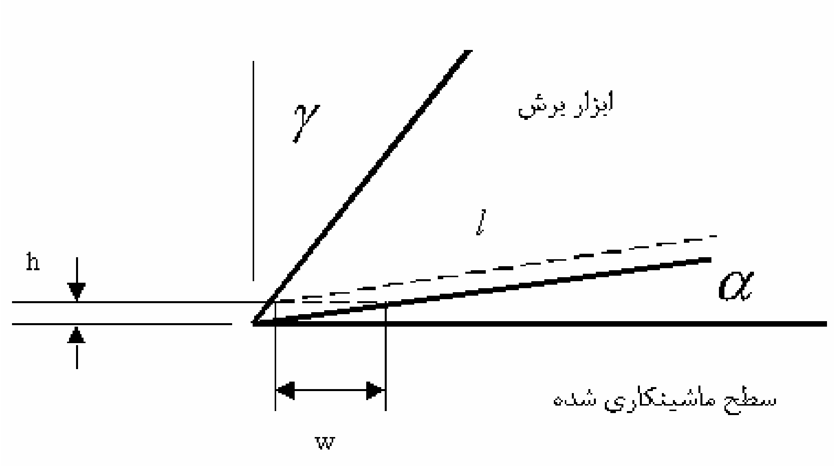
$$W = \frac{b V_B^{\,2} \tan\alpha}{2(1 - \tan\gamma \tan\alpha)} \qquad (۲)$$

$$W' \cong l b \sin\alpha \qquad (۳)$$

در اين معادلات α زاويه آزاد، γ زاويه براده، b پهناي بـرش 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:

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

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:

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

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

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

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:

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

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:

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

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

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

كه در آن $I_2{}'$ جريان روتور ديده شده از استاتور مي‌باشد كه تقريباً برابر جريان استاتور مي‌باشد. بنابراين هرگونه تغيير در گشتاور يا بار خارجي روي جريان موتور تأثير خواهد گذاشت.
از طرف ديگر ميزان سايش ابزار روي نيروي ماشينكاري تأثير مي‌گذارد. با افزايش سايش مقدار نيروهاي ماشينكاري افزايش خواهد يافت [۸-۶]. بنابراين در شرايط ثابت ماشينكاري با افزايش سايش ابزار مقدار جريان موتور نيز افزايش خواهد يافت.
از همين موضوع مي‌توان با اندازه‌گيري جريان موتور در شرايط ثابت ماشينكاري مقدار سايش ابزار را تخمين زد.

روش كار

در اين پروژه عمليات فرزكاري با فرز عمودي روي قطعات فولادي از جنس ST37 با عرض 50mm انجام گرفت. ابزار بكار رفته از نوع تيغچه‌هاي سه گوش كاربيدي بدون روكش بودند كه روي ابزارگير چهار تيغچه‌اي مدل Iso40-22-E و با قطر كاري ۶۳mm بسته مي‌شوند. براي اينكار در شرايط مختلف برش (پيشروي بين ۸۰ تا ۲۲۴ mm/min، عمق بار بين ۰/۵ تا ۲/۵ mm دور ابزار بين ۳۳۵ تا ۱۰۰۰rpm) ماشينكاري صورت گرفته و در سايشهاي مختلف ابزار، مقدار جريان موتور با آمپرمتر اندازه‌گيري شد. براي اندازه‌گيري مقدار سايش نيز از ذره‌بين با بزرگنمايي ۸ برابر استفاده شد. به عنوان نمونه برخي از اطلاعات اندازه‌گيري شده در جدول (۱) آورده شده است. براي اينكار با ثابت نگه داشتن كليه پارامترها و تغيير يكي از پارامترها، در سايشهاي مختلف مقدار جريان موتور مستقيماً اندازه‌گيري شد. براي ايجاد سيستم هوشمند در محيط نرمافزار matlab يك شبكه عصبي از نوع bp با سه لايه (يك لايه ورودي، يك لايه مخفي و يك لايه خروجي) طراحي شد. لايه ورودي داراي پنج ورودي شامل مقدار پيشروي، عمق بار، دور ابزار و مقدار جريان موتور و لايه خروجي داراي يك ورودي مي‌باشد كه همان مقدار سايش ابزار مي‌باشد. تعداد گره‌هاي لايه مخفي نيز ۵۰ مي‌باشد. تابع تبديل بكار رفته در شبكه نيز تابع سيگموئيد باينري به صورت زير مي‌باشد:

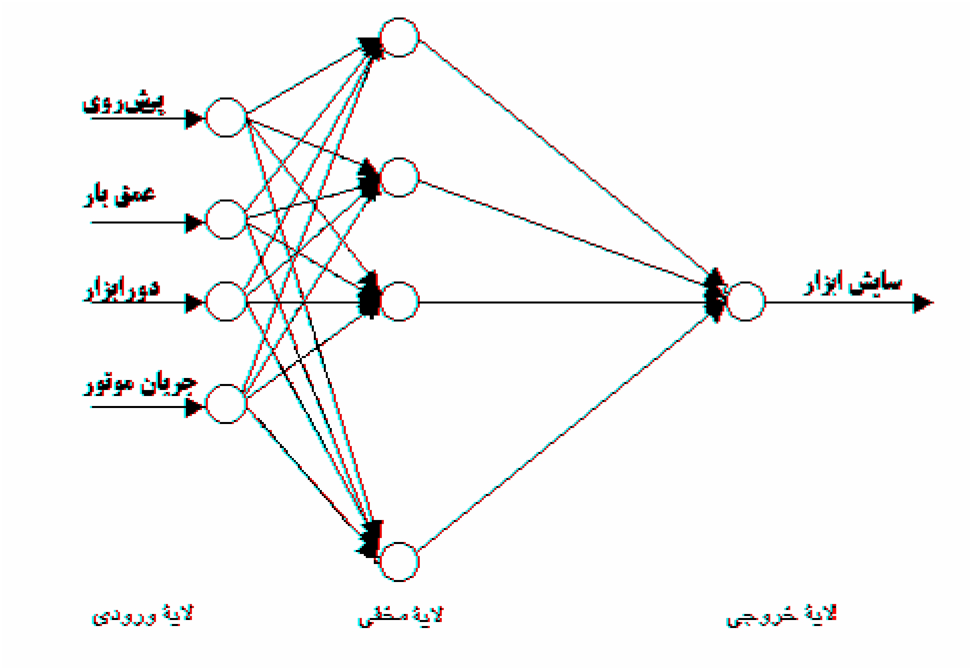
$$f(x) = \frac{2}{1+\exp(-x)} - 1 \qquad (۱۰)$$

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

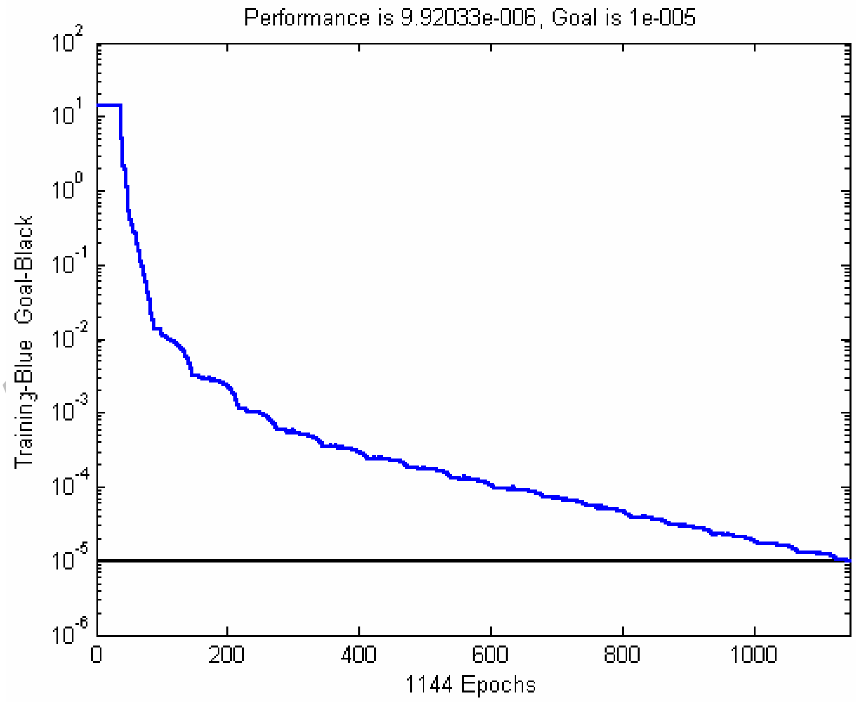
طرحواره شبكه در شكل (۵) نشان داده شده است. شبكه با استفاده از اطلاعات آموزشي حاصل از اندازه‌گيري مستقيم، آموزش داده شد. ديده شد كه شبكه بعد از ۸۲۰ تكرار به خطاي كمتر از ۰/۰۰۱ رسيد كه منحني خطاي آموزش برنامه به صورت شكل (۶) مي‌باشد. سپس با استفاده از اطلاعات آزمايشي عملكرد برنامه آزمايش شد.

جدول ۱- نمونه اطلاعات جريان موتور بر حسب آمپر در آزمايشات عملي

دور ماشين (rpm) f=112 و a=1.0	۳۵۵	۵۰۰	۱۰۰۰	-
ابزارتيز	۴/۱۵۶	۴/۲۰۲	۴/۲۶	-
ابزار كند	۴/۲۸۸	۴/۳۲۴	۴/۵۰۶	-
پيشروي ميز (max/min) n=500 و a=1.0	۸۰	۱۱۲	۱۶۰	-
ابزار تيز	۴/۱۷۸	۴/۲۰۲	۴/۲۲۱	-
ابزار كند	۴/۲۳۴	۴/۳۲۴	۴/۳۴۵	-
عمق بار (mm) f=112 و n=500	۰/۵	۱/۰	۱/۵	۲/۰
ابزار تيز	۴/۰۶	۴/۲۰۲	۴/۳۲	۴/۴۶
ابزار كند	۴/۱۹۵	۴/۳۲۴	۴/۵۸	۴/۷۳



شكل ۵- طرحواره شبكة عصبي طراحي شده



شكل ۶- منحني تغييرات خطا در مرحلة 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 سنكرون موتور

نتيجه گيري

سيستم حاصل يك روش مناسب براي پيشبيني و تخمين سايش ابزار فرزكاري با استفاده از اندازه‌گيري جريان موتور است. با استفاده از اطلاعات آزمايشي عملكرد سيستم آزمايش شد. نتايج عملي نشان مي‌دهدكه سيستم، عملكرد خوبي داشته و با خطاي كمتر از ۰/۰۰۱ مي‌تواند مقدار دقيق سايش ابزار را تخمين بزند. آزمايشات عملي نشان داد كه با افزايش سايش ابزار مقدار جريان موتور نيز افزايش مي‌يابد. يكي از مواردي كه در اين پروژه با آن مواجه هستيم، آن است كه مقدار جريان موتور با تغيير ميزان سايش، تغييرات كمتري دارد. علت اين است كه طبق فرمول (۹) مقدار گشتاور با توان دو جريان رابطه دارد. با تغيير بسيار جزئي در جريان، مقدار گشتاور به مقدار زيادي تغيير خواهد كرد. همچنين مقدار توان خروجي موتور تنها با جريان رابطه ندارد بلكه مقدار ولتاژ و cos (fi) نيز در توان خروجي دخالت دارد. كه 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 ماشينكاري تغيير مي‌كند، مي‌تواند اثر خود را به صورت تغيير جريان موتور و يا تغيير زاويه fi نشان دهد. هرچند كه نتايج نشان مي‌دهد روند تغييرات جريان روش خوبي براي تخمين ميزان سايش ابزار است، ولي پيشنهاد مي‌شود كه در كارهاي بعدي مقدار جريان و زاويه fi همراه هم به عنوان روش اندازه‌گيري سايش بكار برده شوند. همچنين پيشنهاد مي‌شود جنس قطعه كار و سطح تماس ابزار با قطعه كار نيز به عنوان متغير در نظر گرفته شده و در ورودي شبكه 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