

مونیتورینگ سایش ابزار فرز کف تراشی توسط نیروهای فرز کاری با استفاده از شبکه‌های عصبی

امیر مصطفی پوراصل^۱ محمدرضا رازفر^۲

چکیده:

یکی از مسائل مهم در ماشینکاری، سایش ابزار است که روی دقت و کیفیت سطوح ماشینکاری شده، نیروهای ماشینکاری، ارتعاشات، عمر ابزار و عمر ماشین تأثیر می‌گذارد. از طرف دیگر از اهداف اساسی در سیستم‌های اتوماتیک آن است که بتوان بدون قطع عملیات ماشینکاری، مقدار سایش ابزار را تخمین زد. در این مقاله یک روش هوشمند بر اساس اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری برای تخمین مقدار سایش ارائه شده است. برای این کار آزمایش‌های زیادی در شرایط مختلف ماشینکاری، از نظر عمق بار، پیشروی و دور ماشین، انجام گرفته و مقدار سایش ابزار در هر آزمایش بطور مستقیم اندازه‌گیری شد. با اطلاعات بدست آمده یک برنامه شبکه عصبی از نوع bp طراحی و آموزش داده شد. این برنامه قادر است با دریافت اطلاعات عمق بار، پیشروی، دور ابزار و نیروهای ماشینکاری در جهات X، Y و Z مقدار سایش ابزار را با دقت بالایی تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی:

سایش ابزار، شبکه‌های عصبی، فرزکاری کف تراشی، مونیتورینگ و نیروهای ماشینکاری.

Tool Wear Monitoring in Face Milling by Force Measuring with Neural Networks

Amir Mostafapour Mohammad Reza Razfar

ABSTRACT:

Tool wear is a purpose in machining process. Dimensional accuracy, surface quality of work, machining forces, vibration, tool life, and machine tools life are influenced by tool wear. In other hand estimating the tool wear without stopping the operation is an essential problem in system automation. In this paper an intelligent approach for tool wear estimation from machining forces is proposed. Many experimental tests have been done in different machining conditions and tool wear amount have been measured directly. With this data, a back propagation (bp) neural network have been designed and trained. This neural network can estimate the tool wear amount with a high accuracy receiving data of depth of cut, feed rate, revolution and machining forces in X, Y and Z coordinates.

رایانه و سیستم‌های خودکار 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 مورد نظر باید توانایی کنترل فرایند در شرایط مختلف کاری و تصمیم‌گیری برای تغییر شرایط کاری

۱- مقدمه

امروزه سیستم UFMS (Unmanned Flexible Manufacturing System) یا سیستم تولیدی انعطاف‌پذیر بدون حضور انسان، در حال گسترش است. در چنین سیستم‌هایی

۱- دانشجوی دکترای ساخت و تولید دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر E-mail: amir_mostafapur@yahoo.com

۲- استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر



را داشته باشند. به این دلیل سنسورهای مختلفی جهت کنترل و گرفتن اطلاعات از شرایط فرایند لازم است. ولی اطلاعات این سنسورها باید به نحوی پردازش شده و تصمیم‌گیری برای کنترل فرایند 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 است. امروزه کارهای زیادی جهت اندازه‌گیری و تخمین سایش ابزار انجام می‌گیرد [۲]. سایش ابزار به سه دلیل برای ما اهمیت دارد. دلیل اول آن است که سائیده شدن 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 منشأ شکست ابزار می‌شود. با توجه به آنکه شکست ناگهانی باعث صدمه به کل ابزار، ماشین ابزار و قطعه کار می‌شود، باید از این شکست ناگهانی جلوگیری کرد. دلیل سوم مسأله اقتصادی است. چرا که سایش ابزار باعث هزینه تیزکاری مجدد، پایان عمر ابزار و از همه مهمتر توقف عملیات ماشینکاری می‌شود. به این دلیل باید تا حد امکان سایش ابزار کنترل شود. روشهای اندازه‌گیری سایش ابزار به دو دسته روش مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شود. در روش مستقیم بطور دستی و توسط وسایلی مثل میکروسکوپ ابزارسازی، 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 اساس سیستم‌های اتوماسیون و سیستم‌های تولیدی بدون حضور انسان تناقض دارد. در روش غیر مستقیم خود سایش اندازه‌گیری نمی‌شود. بلکه از پارامترهایی که با سایش ابزار رابطه دارند و اندازه‌گیری آنها راحت‌تر است، استفاده می‌شود. خوشبختانه طبیعت این پارامترها طوری است که بدون توقف عملیات ماشینکاری و بصورت بلادرنگ و در حین عملیات می‌توان این پارامترها را اندازه‌گیری نمود. برای این کار حسگرهایی متناسب با نوع پارامتر مورد استفاده، بکار گرفته می‌شود تا در طی فرایند ماشینکاری دائماً این پارامترها را اندازه‌گیری کند. از روی مقادیر پارامترها و با توجه به رابطه بین این پارامترها با سایش ابزار می‌توان سایش ابزار را تخمین زد. کارهای بسیار زیادی برای تخمین سایش ابزار انجام شده است که در آنها از اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری، حرارت ایجاد شده در ماشینکاری، ارتعاشات مکانیکی، امواج آکوستیک و غیره استفاده شده

است. مطالعات نشان می‌دهد که در میان روشهای مختلف استفاده از نیروهای ماشینکاری تخمین دقیق‌تری از سایش ابزار را ارائه می‌دهد [۴]. Zhang و همکاران در سال ۱۹۹۵ [۵] یک سیستم هوشمند برای مونتورینگ سایش ابزار در تراشکاری را ارائه کردند. آنها با اندازه‌گیری مقدار نیروها با نیروسنج و با استفاده از یک شبکه عصبی توانستند حالت ابزار را از نظر تیز یا کند بودن، با دقت حدود ۹۰٪ تخمین بزنند. ورودی شبکه آنها شامل پیشروی، عمق بار، دور ابزار، زمان، شعاع نوک ابزار و نسبت نیروی پیشروی به نیروی مماسی بود. Bernard Sick و همکاران در سال ۱۹۹۷ [۶] یک سیستم هوشمند شبکه عصبی برای تخمین سایش پهلو روی لبه برش اصلی و فرعی در عملیات تراشکاری را ارائه کردند. پارامترهای ورودی شبکه شامل پیشروی، عمق بار، سرعت برشی، قطر قطعه‌کار و مؤلفه‌های نیرو بود. آنها آزمایش‌های زیادی را با ۳۰ اینسرت انجام دادند و مقدار نیرو را با پیزوالکتریک و مقدار سایش را با میکروسکوپ و سیستم لیزری اندازه‌گیری کردند. آنها توانستند مقدار سایش را با خطای ۳۳ میکرون بدست آورند. Bernard Sick در کار دیگری [۷] شبکه‌های عصبی مختلف را برای تخمین سایش ابزار امتحان کرد. برای اینکار وی از شبکه‌های عصبی MLP، ARTMAP، MAP خود سازمان ده و شبکه عصبی-فازی NEFCLASS استفاده نمود. نتایج کار نشان می‌دهد که بهترین شبکه، از نظر تعیین سایش، شبکه NEFCLASS و MLP است، ولی شبکه چند لایه MLP ترجیح داده می‌شود، چرا که هم طراحی و برنامه‌نویسی آن راحتتر است و هم توانایی بالایی در تعیین سایش‌های بالا دارد. وی نتیجه گرفت که بهترین شبکه در مونتورینگ سایش ابزار شبکه عصبی MLP می‌باشد. کارهای مشابه دیگری نیز انجام شده است که در آنها از اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری برای تخمین سایش ابزار تراشکاری استفاده شده است [۸ - ۱۳]. نتایج کارهای انجام شده نشان می‌دهد که با استفاده از اندازه‌گیری نیروها، می‌توان تخمین خوبی از سایش را بدست آورد.

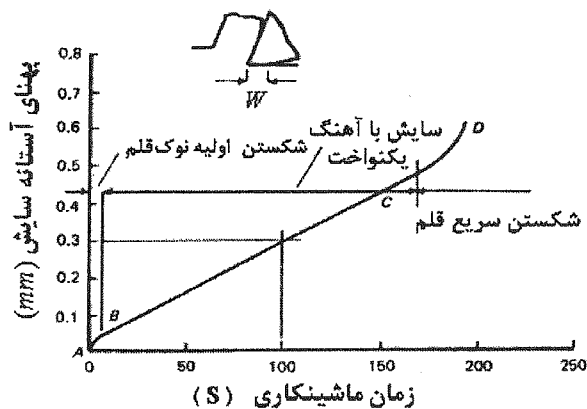
در ماشینکاری گسسته مثل فرزکاری، ابزار در معرض نیروهای سیکلی، شوک‌های مکانیکی و حرارتی در لحظه ورود و خروج ابزار، قرار دارد. به این دلیل یک سری شکست یا سایش‌های تصادفی و غیر یکنواخت در ابزار، در اثر شوک‌های ترمومکانیکی، خستگی، ترک‌های ریز مکانیکی و حرارتی رخ می‌دهد. به این دلیل در فرزکاری، تخمین عمر ابزار و مقدار سایش پیچیده‌تر از تراشکاری است.

در این مقاله از اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری جهت تخمین سایش ابزار در فرزکاری کف‌تراشی استفاده شده

سایش پهلو بصورت یک ناحیه است که در اثر حرکت مالشی سطوح ماشینکاری شده قطعه، روی ابزار ایجاد می‌شود. عرض متوسط این ناحیه بعنوان مقدار سایش در نظر گرفته می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که رشد منطقه سایش مطابق شکل (۲) سه مرحله دارد. در ابتدای عمر ابزار یعنی ناحیه AB ابزار تیز با سرعت بالایی شروع به سایش می‌کند. در این ناحیه نرخ سایش بالاست. این حالت سایش اولیه (W_0) نام دارد. با ادامه ماشینکاری در ناحیه BC سایش به حالت پایداری می‌رسد و نرخ سایش (\dot{W}) تقریباً ثابت می‌شود. در این ناحیه مقدار سایش بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$W = W_0 + \dot{W}t \quad (1)$$

در اواخر عمر ابزار در ناحیه CD نرخ سایش افزایش می‌یابد که به سایش سریع موسوم است. در این ناحیه دما به شدت افزایش می‌یابد و شکست ابزار در این ناحیه اتفاق می‌افتد. باید قبل از رسیدن سایش به این منطقه، ابزار را تیز یا تعویض نماییم.



شکل (۲): مراحل پیشرفت سایش پهلو [۱۴]

وقتی که یک ابزار تیز در حال ماشینکاری است بر اساس شرایط و پارامترهای ماشینکاری یک مقدار نیروی لازم است (F_0)، ولی وقتی که ابزار کند می‌شود، نیرو افزایش خواهد یافت که بصورت زیر است:

$$F = F_0 + KW \quad (2)$$

که در آن K پارامتری است که به شرایط ماشینکاری بستگی دارد. با ترکیب روابط (۱) و (۲) خواهیم داشت:

$$F = F_0 + KW_0 + K\dot{W}t \quad (3)$$

اگر از این رابطه بر حسب زمان مشتق بگیریم، خواهیم داشت:

$$\Delta F = K\dot{W}\Delta t \quad (4)$$

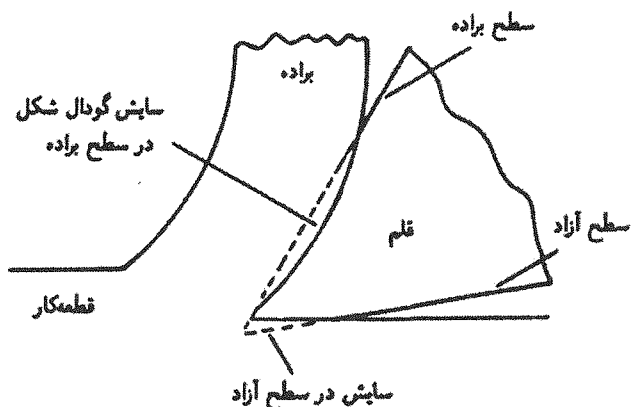
$$\dot{W} = \frac{\Delta F}{K\Delta t} \quad (5)$$

است. با انجام آزمایش‌ها در شرایط مختلف ماشینکاری (از نظر عمق بار، مقدار پیشروی، دور ابزار و سایش) یک سری اطلاعات بدست آمد. با استفاده از این اطلاعات یک شبکه عصبی چند لایه (MLP) از نوع bp یا پس خور طراحی و آموزش داده شد. با آزمایش این شبکه معلوم شد که با دادن اطلاعات ماشینکاری، یعنی دور ابزار، مقدار پیشروی، عمق بار و مقدار RMS نیروهای ماشینکاری، با دقت خیلی خوبی می‌توان سایش ابزار را تخمین زد.

فرق کار انجام شده در این مقاله با کارهای انجام شده قبلی آن است که اولاً در این مقاله تخمین سایش روی روش فرزکاری انجام شده که پیچیده‌تر از روش تراشکاری است. ثانیاً در این مقاله مقدار عددی سایش اندازه‌گیری می‌شود. در حالیکه در کارهای قبلی عموماً حالت سایش از نظر تیز یا کند بودن تعیین می‌شود.

۲- سایش ابزار

یکی از مهمترین مسائل اقتصادی در ماشینکاری، عمر ابزار است. به ابزاری که دیگر نتواند وظیفه و کار خود را انجام دهد، از کار افتاده گفته می‌شود. معیارهای از کارافتادگی بسته به دقت و کیفیت قطعه و شرایط ماشینکاری (خشن‌کاری یا پرداخت‌کاری) متفاوت است. مهمترین معیار از کارافتادگی ابزار، سایش تدریجی نوک ابزار است که به دو صورت سایش حفره‌ای و سایش پهلو دیده می‌شود. سایش حفره‌ای در سطح براده ایجاد می‌شود که در نتیجه حرکت براده در روی سطح صورت می‌گیرد و بصورت یک گودال در می‌آید. سایش پهلو در سطح آزاد و نزدیک لبه قلم ایجاد می‌شود که در نتیجه مالش سطح قطعه‌کار صورت می‌گیرد. (شکل ۱) در این میان سایش پهلو اهمیت بیشتری نسبت به

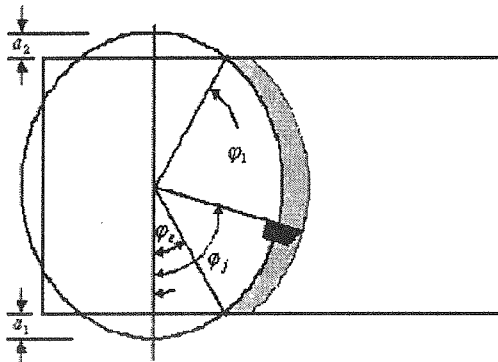


شکل (۱): سایش پهلو و گودال فرسایش در نوک ابزار برش

$$\cos(\varphi_1) = -1 + \frac{2a_2}{d} \quad (9)$$

$$\cos(\varphi_e) = 1 - \frac{2a_1}{d}$$

که در آن a_1 و a_2 مطابق شکل (۳) فواصل لبه ابزار تا لبه قطعه کار و d قطر ابزار می باشند.



شکل (۳): هندسه درگیری ابزار کف تراشی

اگر پیشروی میز بازای یک لبه را به اندازه S_z تنظیم کنیم، با توجه به هندسه درگیری لبه با قطعه و موقعیت زاویه‌ای هر لبه، مقدار ضخامت لحظه‌ای ایده‌آل براده بصورت زیر خواهد شد:

$$h_j = S_z \sin(\varphi_j) \sin(\kappa_r) \quad (10)$$

که در آن κ_r زاویه تنظیم ابزار می باشد. از خصوصیات عملیات فرزکاری آن است که برشکاری از نوع مایل می باشد و ابزار با زاویه تمایل i با قطعه درگیر است. با فرض آنکه α_r زاویه هدایت براده شعاعی، α_n زاویه براده محوری، α_v زاویه براده واقعی، α_n زاویه براده نرمال، φ_n زاویه برش عمودی و β_n زاویه اصطکاکی عمودی باشد، مؤلفه‌های نیروهای ماشینکاری برای لبه j ام در حین براده برداری مایل را می توان با تعریف ضرایب K_{rc} ، K_{ic} و K_{ac} بصورت زیر محاسبه نمود: [۱۳]

(۱۱)

$$\begin{cases} K_{ic} = \frac{\tau_s}{\sin(\varphi_n)} \cdot \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) + tg^2(i) \cdot \sin(\beta_n)}{\sqrt{\cos^2(\varphi_n + \beta_n) + tg^2(i) \sin^2(\beta_n)}} \\ K_{rc} = \frac{\tau_s}{\sin(\varphi_n) \cos(i)} \cdot \frac{\sin(\beta_n - \alpha_n)}{\sqrt{\cos^2(\varphi_n + \beta_n) + tg^2(i) \sin^2(\beta_n)}} \\ K_{ac} = \frac{\tau_s}{\sin(\varphi_n)} \cdot \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) tg(i) - tg(i) \cdot \sin(\beta_n)}{\sqrt{\cos^2(\varphi_n + \beta_n) + tg^2(i) \sin^2(\beta_n)}} \end{cases}$$

می توان در حین ماشینکاری با اندازه گیری تغییر نیروها و محاسبه \dot{W} از رابطه فوق نرخ سایش را اندازه گیری کرد. تا زمانی که نرخ سایش ثابت است، ابزار سالم است ولی وقتی که نرخ سایش افزایش می یابد، یعنی سایش وارد منطقه سوم شده و باید تعویض شود. از این روش برای تخمین شکست ابزار استفاده می شود. ولی برای تعیین مقدار سایش با توجه به رابطه (۲)، که افزایش سایش مقدار نیروها را افزایش می دهد، از اندازه گیری خود نیروها استفاده می شود. برای تعیین مقدار نیروها در ابزار تیز می توان از روابط تحلیلی استفاده نمود. ولی با توجه به پیچیده و تصادفی بودن سایش در فرزکاری، برای نیروها در ابزار کند شده نمی توان از روابط تحلیلی استفاده نمود. به این خاطر از سیستم های هوشمند مثل شبکه های عصبی استفاده می شود.

۳- مدل سازی نیروهای استاتیکی در عملیات

کف تراشی

در فرزکاری کف تراشی ابزار چند لبه در حال چرخش است و قطعه کار با حرکت پیشروی خطی خود با ابزار درگیر می شود. هر لبه برش در قسمتی از مسیر خود با قطعه کار درگیر شده و براده برداری می کند. اگر تعداد لبه های ابزار را با z و شماره هر لبه را با j نشان دهیم، $(j = 0, 1, 2, \dots, z-1)$ موقعیت زاویه ای لبه j ام بصورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\varphi_j = \omega t + j\theta \quad (6)$$

در آن ω سرعت زاویه ای ابزار و θ زاویه بین دو لبه می باشد:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (7)$$

$$\theta = \frac{360}{z}$$

هر لبه زمانی در موقعیت درگیری با قطعه است که داشته باشیم: (شکل ۳)

$$\varphi_e \leq \varphi_j \leq \varphi_1 \quad (8)$$

که در آن φ_e و φ_1 به ترتیب زاویه ورود و خروج ابزار می باشند که به پارامترهای هندسی بستگی دارند و بصورت زیر بدست می آیند:

کل نیروی وارده به ابزار، مجموع نیروهای وارده به لبه‌های درگیر با قطعه‌کار می‌باشد. لذا خواهیم داشت:

(۱۷)

$$\Rightarrow \begin{cases} F_{ij} = K_{ic} h_j a \\ F_{rj} = K_{rc} h_j a \\ F_{aj} = K_{ac} h_j a \end{cases}$$

که در آن F_{ij} ، F_{rj} و F_{aj} به ترتیب نیروی مماسی، شعاعی و محوری وارده لبه j ام می‌باشند. مؤلفه x ، y و z وارد به لبه j ام بصورت زیر بدست می‌آید:

(۱۲)

$$\begin{cases} F_x = \sum_{j=0}^{z-1} G_j(\varphi_j) S_z \sin(\varphi_j) \sin(\kappa_r) a [K_{ic} \cos(\varphi_j) + K_{rc} \sin(\varphi_j)] \\ F_y = \sum_{j=0}^{z-1} G_j(\varphi_j) S_z \sin(\varphi_j) \sin(\kappa_r) a [K_{ic} \sin(\varphi_j) - K_{rc} \cos(\varphi_j)] \\ F_z = \sum_{j=0}^{z-1} G_j(\varphi_j) S_z \sin(\varphi_j) \sin(\kappa_r) a K_{ac} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_j) & \cos(\varphi_j) & 0 \\ -\cos(\varphi_j) & \sin(\varphi_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{rj} \\ F_{ij} \\ F_{aj} \end{bmatrix}$$

ولی در کف تراشی هر لبه برش در قسمتی از مسیر خود براده‌برداری می‌کند، و در بقیه مسیر آزادانه می‌چرخد. بعنوان مثال خواهیم داشت:

$$\begin{cases} F_{xj} = F_{ij} \cos(\varphi_j) + F_{rj} \sin(\varphi_j) & \varphi_e \leq \varphi_j \leq \varphi_l \\ F_{xj} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۱۳)$$

به این منظور از تابع پله‌ای زیر استفاده می‌شود:

(۱۴)

$$\text{tg}(\psi) = \frac{\sin(\varphi_e) - \sin(\varphi_l)}{\cos(\varphi_e) - \cos(\varphi_l)}$$

$$p = \sin(\varphi_s - \psi)$$

این تابع در زمان درگیری لبه j ام با قطعه برابر یک و در سایر حالات صفر است. بنابراین از روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) نیروهای مؤثر در لبه j ام بصورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{bmatrix} = G_j(\varphi_j) h_j a \begin{bmatrix} \sin(\varphi_j) & \cos(\varphi_j) & 0 \\ -\cos(\varphi_j) & \sin(\varphi_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{rc} \\ K_{ic} \\ K_{ac} \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

با جاگذاری رابطه (۱۰) خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{bmatrix} = G_j(\varphi_j) S_z \sin(\varphi_j) \sin(\kappa_r) a \quad (۱۶)$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\varphi_j) & \cos(\varphi_j) & 0 \\ -\cos(\varphi_j) & \sin(\varphi_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{rc} \\ K_{ic} \\ K_{ac} \end{bmatrix}$$

روابط فوق روابط نهایی برای محاسبه نیروهای فرزکاری کف‌تراشی می‌باشند. فرض این روابط آن است که ابزار کاملاً تیز است و سایش ابزار در این روابط وارد نشده است. به زبان توربو ++C یک برنامه کامپیوتری نوشته شد که با دریافت شرایط ماشینکاری (پیشروی میز، عمق بار و دور ماشین)، هندسه ابزار (زوایای تیغچه‌ها، تعداد تیغچه‌ها و قطر ابزار)، هندسه درگیری ابزار و قطعه (a_1 و a_2 که هر دو برابر صفر هستند) و جنس قطعه‌کار (τ_s)، نیروهای فرزکاری را بصورت لحظه‌ای و در بازه‌های زمانی ۰/۱ ثانیه محاسبه می‌کند.

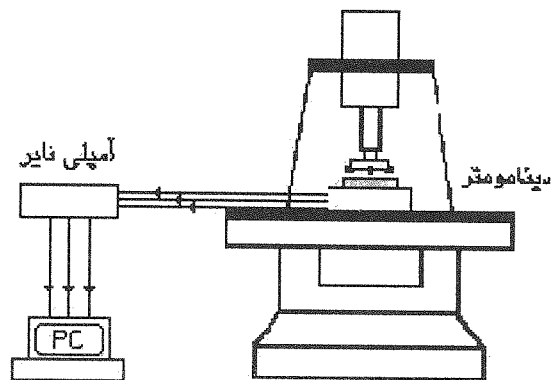
۴- روش انجام آزمایش‌های عملی

برای انجام آزمایش‌ها از ماشین فرز عمودی DECKEL مدل FP4 با توان ۳/۷-۴/۴ KW و با خارج از مرکزیت اسپیندل همراه با تیغ‌فرز ۱۰+ میکرومتر استفاده شد. ابزار بکار رفته نیز تیغ‌فرز کف‌تراش مدل 10-100-1 R257.1 با قطر ۱۰۰ mm و تعداد تیغچه‌های ۸ عدد و نوع تیغچه‌ها نیز EDR-1203-SPKN می‌باشد. برای اندازه‌گیری نیرو نیز از دینامومتر KISTLER مدل 5019B استفاده شد. برای اینکار در شرایط مختلف ماشینکاری روی قطعه فولادی ST14 مطابق شکل (۴) عملیات کف‌تراشی صورت گرفته و نیروهای ماشینکاری با دینامومتر اندازه‌گیری شده و توسط نرم افزار مربوطه دیاگرام این نیروها بر حسب زمان رسم گردید.



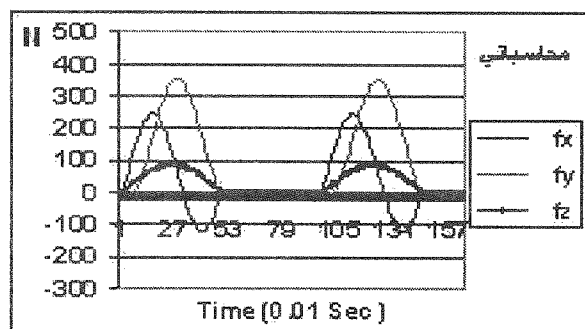
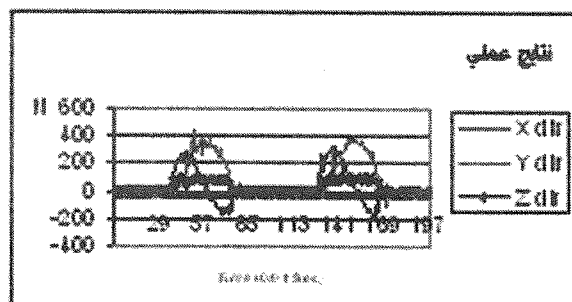
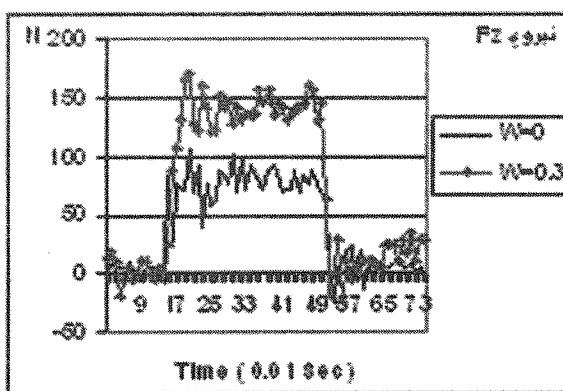
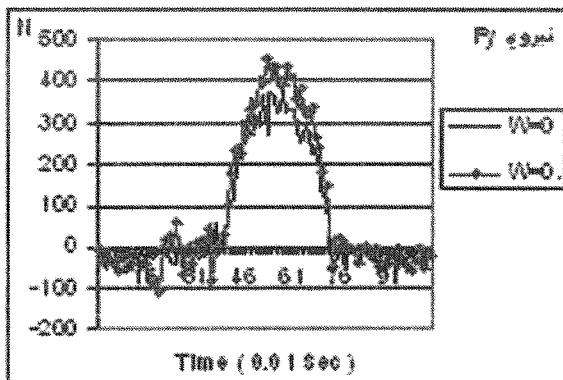
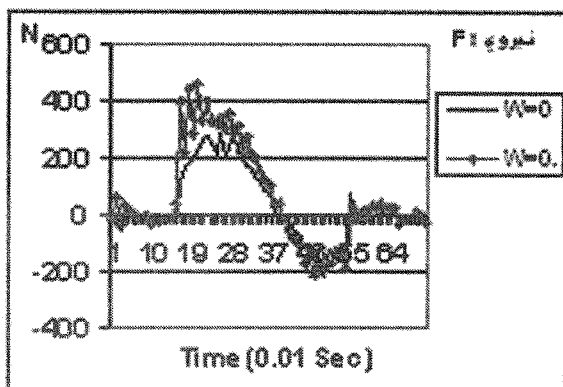
ماشینکاری دارد. که این تاثیر در شکل (6) نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر تاثیر سایش ابزار یک برنامه کامپیوتری نوشته شد که مقدار RMS و ماکزیمم نیروهای اندازه گیری شده با دینامومتر را محاسبه می کند.

نتایج کار نشان می دهد که در شرایط مختلف ماشینکاری سائیده شدن لبه ابزار، باعث افزایش شدید نیروهای ماشینکاری می شود که بدلیل ایجاد حالت مالشی (Rubbing) در لبه ابزار، در اثر سایش پهلو می باشد. که بعنوان نمونه در شکل (7) و در پیشروی های مختلف تاثیر سایش ابزار روی مقدار RMS نیروهای ماشینکاری نشان داده شده است.



شکل (۴): شماتیک روش انجام آزمایشات عملی

در شکل (۵) نتایج تجربی و تئوری از نظر شکل منحنی و مقدار نیروها، در شرایط یکسان ماشینکاری باهم مقایسه شده اند. آزمایش های عملی زیادی در شرایط مختلف ماشینکاری انجام شد. نتایج کار نشان می دهد که با توجه به شکل (۵) تطابق بسیار خوبی بین نتایج عملی و تئوری وجود دارد و صحت روابط بدست آمده بسیار خوب می باشد و با اطمینان بالا می توان از آن روابط استفاده نمود.



شکل (۵): مقایسه نتایج تجربی و عملی نیروهای فرز کف تراشی با ابزار تیز

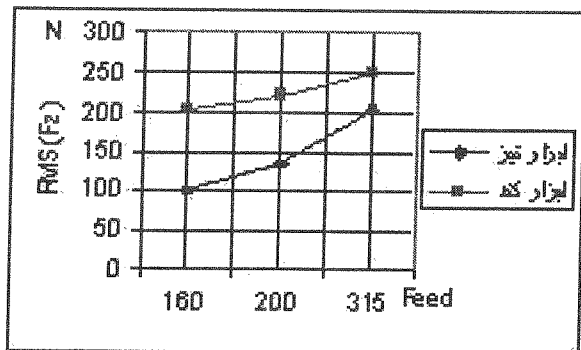
$$(n=630 \text{ rpm}, \text{Feed}=200\text{mm/min}, a=0.5 \text{ mm}, z=1)$$

رابطه (۱۷) برای ابزار کاملاً تیز خوب جواب می دهد. ولی اثر سایش ابزار، روی مقدار نیروها در نظر گرفته نشده است. آزمایش های عملی که با ابزار کند شده انجام شد، نشان می دهد که مقدار سایش پهلو تاثیر زیادی روی نیروهای

شکل (۶): مقایسه نیروهای فرزکاری اندازه گیری شده در

ماشینکاری با ابزار تیز و کند شده

$$(n = 630\text{rpm}, a = .5\text{mm}, \text{Feed} = 200\text{mm}/\text{min}, Z = 1)$$



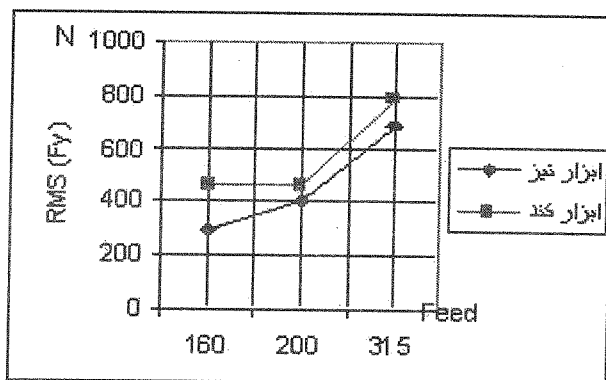
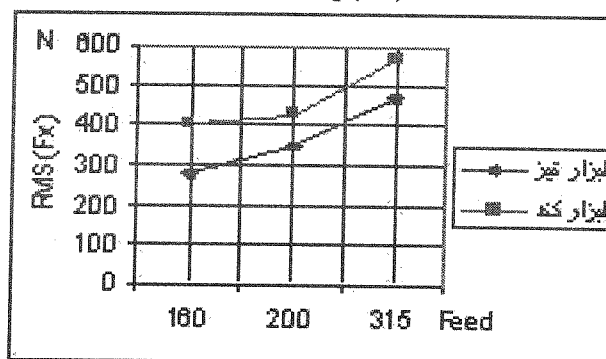
شکل (۷): تاثیر سایش ابزار روی مقدار نیروهای ماشینکاری در پیشروی‌های مختلف شده

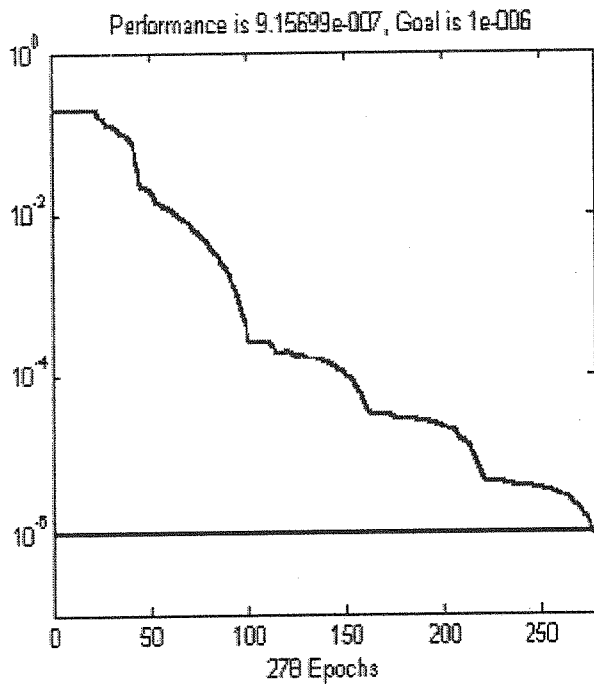
$$(n = 200\text{rpm}, a = 0.5\text{mm}, z = 1)$$

برای آموزش شبکه آزمایش‌های زیادی در شرایط مختلف ماشینکاری انجام شد، که محدوده تغییرات پارامترها در جدول (۱) آورده شده است. اطلاعات حاصل از هر آزمایش یک دسته نمونه آموزشی برای آموزش شبکه می‌باشد، که در آن مقادیر ورودی و خروجی معلوم می‌باشند. تعداد این نمونه‌های آموزشی ۵۰ نمونه است. در شبکه ارتباط بین نورونها توسط مقدار وزنی تعیین می‌شود. در ابتدا این بردار وزنی بصورت مقادیر تصادفی می‌باشد. در هر آموزش، شبکه با اطلاعات ورودی، مقدار خروجی را محاسبه می‌کند و در صورت وجود اختلاف بین مقدار خروجی واقعی و خروجی محاسبه شده، خطا را به عقب منتشر کرده و مقادیر وزنی بین گره‌ها را تصحیح می‌کند. این کار را آنقدر ادامه می‌دهد تا مقدار خطای شبکه برای نمونه‌های آموزشی از مقدار 0.000001 میلی‌متر پائین‌تر باشد. با استفاده از اطلاعات ورودی تعداد تکرار آموزش برای شبکه طراحی شده، ۲۷۸ تکرار می‌باشد که منحنی خطای آن بصورت شکل (۹) می‌باشد. بعد از آموزش شبکه، با استفاده از اطلاعات آزمایشی، عملکرد تست بررسی شد. تعداد نمونه‌های آزمایشی ۲۰ نمونه می‌باشد. در دسته‌های آزمایشی، نتیجه خروجی شبکه یعنی مقدار سایش ابزار با اندازه‌گیری مستقیم معلوم می‌باشد. با وارد کردن ورودی‌ها، شبکه مقدار سایش ابزار را تخمین زد. مقایسه نتایج خروجی شبکه و سایش ابزار واقعی نشان می‌دهد که دقت تخمین این شبکه بسیار بالا می‌باشد. بعنوان نمونه برخی از اطلاعات آزمایشی و مقدار سایش تخمین زده شده با شبکه در جدول (۲) نشان داده شده است.

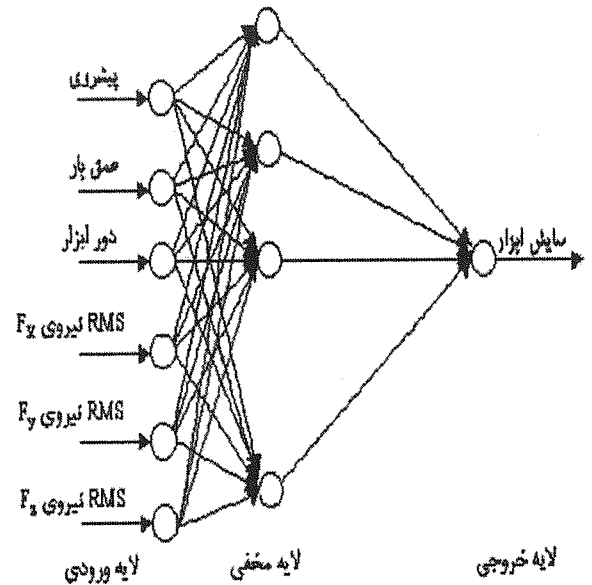
همانطور که دیده می‌شود سایش ابزار تاثیر زیادی روی مقدار نیروها دارد. از این موضوع می‌توان برای تخمین سایش ابزار استفاده کرد. طوریکه با اندازه‌گیری نیرو بتوان مقدار سایش ابزار را تعیین نمود. با توجه به ماهیت تصادفی سایش ابزار و رابطه غیر خطی سایش با مقدار نیروها، از شبکه عصبی استفاده گردید. شبکه عصبی بکار رفته برای این کار از نوع bp (Back Propagation) یا پس‌خور می‌باشد. برای این منظور در محیط نرم‌افزار Matlab یک شبکه عصبی bp طراحی شد که دارای سه لایه (یک لایه ورودی، یک لایه مخفی و یک لایه خروجی) می‌باشد. لایه ورودی شبکه دارای شش ورودی شامل مقدار پیشروی، عمق بار، دور ابزار، و نیروهای فرزکاری و لایه خروجی دارای یک خروجی یعنی مقدار سایش ابزار می‌باشد (شکل ۸). تعداد گره‌های لایه مخفی نیز ۱۰۰ می‌باشد. تابع تبدیل بکار رفته در شبکه از نوع تابع سیگموئید باینری بصورت زیر می‌باشد:

$$f(x) = \frac{2}{1 + \exp(-x)} - 1 \quad (18)$$





شکل (۹): منحنی خطا در مرحله آموزش شبکه عصبی طراحی شده



شکل (۸): شکل شماتیک شبکه عصبی طراحی

جدول (۱): محدوده پارامترهای ماشینکاری در آزمایشات عملی

۱۶۰-۲۰۰-۳۱۵	mm/min	پیشروی میز
۰/۳-۰/۵-۱	عمق بار mm	
۲۰۰-۴۰۰-۵۰۰-۶۳۰	دور ابزار RPM	

جدول (۲): نمونه اطلاعات آزمایشی و نتیجه تخمین شبکه آموزش دیده

ردیف	دور ابزار RPM	پیشروی میز mm/min	عمق بار mm	RMS نیروی Fx kg	RMS نیروی Fy kg	RMS نیروی Fz kg	سایش واقعی mm	سایش تخمینی mm	دقت تخمین
۱	۲۰۰	۳۱۵	۰/۵	۴۷۷/۱۱	۵۹۷/۷۲	۲۰۰/۷۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۰۶	٪۹۴
۲	۴۰۰	۲۰۰	۰/۵	۱۹۰/۴۹	۲۵۴/۹	۷۷/۹۶	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۱	٪۹۰
۳	۲۰۰	۲۰۰	۰/۵	۳۸۳	۴۴۱/۱۸	۱۳۹/۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۲	٪۸۰
۴	۶۳۰	۲۰۰	۰/۵	۱۷۴/۰۳	۲۳۷/۴۲	۱۰۶/۲۶	۰/۳	۰/۲۹۹۱	٪۹۹/۷
۵	۲۰۰	۲۰۰	۱	۵۹۳	۹۵۲/۳۵	۲۶۱/۳۶	۰/۳	۰/۲۹۶۸	٪۹۸/۹
۶	۲۰۰	۱۶۰	۰/۵	۲۸۰/۳۲	۲۹۱/۸۸	۱۰۰/۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۸۲	٪۸۲

۵- نتیجه گیری

نتایج کارهای عملی انجام شده نشان می‌دهد که مقدار نیروهای ماشینکاری را در حالتی که ابزار کاملاً تیز است، می‌توان از روابط تئوری محاسبه کرد. نتایج روابط تحلیلی انطباق بسیار خوبی با نتایج عملی دارند. ولی با سایش ابزار مقدار نیروها افزایش می‌یابد. این افزایش نیرو غیر خطی است و نمی‌توان رابطه تحلیلی برای آن تعیین کرد. به این خاطر باید از روشهای تخمین استفاده نمود. در این مقاله یک سیستم هوشمند شبکه عصبی برای تخمین سایش ابزار فرز کف‌تراشی ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات آموزشی حاصل از آزمایش‌های عملی در شرایط مختلف ماشینکاری، یک شبکه عصبی bp آموزش داده شد. سپس با استفاده از اطلاعات آزمایشی که آنها هم با آزمایش ماشینکاری مستقیم بدست آمده‌اند، شبکه آموزش یافته تست شد. نتیجه کار نشان می‌دهد که شبکه با دقت بالایی می‌تواند سایش ابزار را تخمین بزند. دقت متوسط کار شبکه حدود ۹۲٪ است. یعنی شبکه با دقت ۹۲٪ سایش ابزار را درست تخمین می‌زند. که دقت مناسبی است. نتایج نشان می‌دهد که دقت شبکه برای نمونه‌های آموزشی بیشتر از نمونه‌هایی است که خارج از محدوده اطلاعات آموزشی هستند.

۶- علائم اختصاری انگلیسی

a : عمق بار	F_z : نیرو در جهت
c : زاویه گوشه ابزار	محور z
d : قطر ابزار	h_j : ضخامت براده
F_a : نیروی محوری	i : زاویه تمایل
F_r : نیروی شعاعی	j : شماره لبه برش
F_t : نیروی مماسی	n : دور ماشین
F_x : نیرو در جهت	S_z : پیشروی میز
محور x	Z : تعداد لبه برش
F_y : نیرو در جهت	
محور y	

۷- علائم اختصاری یونانی

α_a : زاویه هدایت براده محوری	ϕ_1 : زاویه خروج
ابزار	
α_n : زاویه هدایت براده نرمال	ϕ_n : زاویه برش عمودی

α_r : زاویه هدایت براده شعاعی	θ : زاویه بین دو
لبه	
α_v : زاویه هدایت براده واقعی	κ_r : زاویه تنظیم اصلی
β_n : زاویه اصطکاک عمودی	τ_s : تنش برشی
جنس قطعه	
ϕ : موقعیت زاویه‌ای لبه برنده	ω : سرعت زاویه‌ای
ابزار	
ϕ_e : زاویه ورود ابزار	w : سایش پهلوی
ابزار	

۸- منابع و مراجع

- [1] G.M. Zhang, R.G. Kanchustambham, 1999, "Neural Network application in on-line monitoring of turning processes", Technical research report, University of Maryland, Internet, Google Search
- [2] Bernard Sick, 1997, "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, 1999, "The effect of flank wear on the heat transfer, thermal damage and cutting mechanics in finish hard turning", Annals of CIRP, Vol. 48.1, pp. 53-58
- [4] Jr. D. E. Dimla Jr, P.M. Lister, 1997, "Neural network solutions to the tool condition monitoring problems in metal cutting - a critical review of methods", Int. J. Mach. Tool Mf., Vol. 37, No. 9, pp. 1219-1241
- [5] G. M. Zhang, R. G. Khanchustambham, 1995, "Neural Network application in on-line monitoring of turning processes", Technical research report, Uni. Of Maryland, Internet
- [6] Bernard Sick, 1997, "Monitoring the wear of cutting tools in cnc lathes with artificial neural networks", Proc. ICASSP-97, Apr. 21-24, Munich, Germany
- [7] Bernard Sick, 1998, "Classifying the wear of turning tools with neural networks", University of passau, Germany, Internet
- [8] R. G. Caudill, 1997, "Design of artificial neural network for tool wear monitoring", J. of Intelligent Manufacturing, Vol. 8, pp. 215-226
- [9] Q. Liu, Y. Altintas, 1999, "On-line monitoring of flank wear in turning with multi-layered feed-forward neural network", Int. J. of Mach. Tools & Man., Vol. 39, pp. 1945-1959
- [10] Peter Wikins, 1999, "Tool wear monitoring using the performance index method", 32th ISATA Conference, 14-18 June, 1999, Australia, pp. 403-410
- [11] R. G. Silva, 2000, "The adaptability of a tool wear monitoring systems under changing cutting conditions", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, N0. 2, pp. 287-298
- [12] Tugrul Ozel, 2002, "Prediction of flank wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H-13 steel with chamfered and honed CBN tools", Int. J. of Mach Tools & Man., Vol. 42, pp. 287-297
- [13] E. Budak, Y. Altintas, 1996, "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 216-224
- [14] Milton C. Shaw, 1984, "Metal cutting principles", prentice Hall, inc.