

# تخمین چند حسگری سایش ابزار فرز کف تراشی به کمک شبکه‌های عصبی

امیر مصطفی پوراصل<sup>i</sup> محمد رضا رازفر<sup>ii</sup>

## چکیده

از مهمترین مسائل در اتوماسیون سیستم‌ها، کنترل شرایط کاری سیستم است. در ماشینکاری نیز کنترل سایش ابزار از اهمیت زیادی برخوردار است، چرا که روی دقت ابعادی، صافی سطح قطعه، مسائل اقتصادی ماشینکاری، عمر ماشین ابزار و نیروهای ماشینکاری تاثیر می‌گذارد. برای اینکار باید بتوان بدون قطع عملیات سایش ابزار را تخمین زد. در این مقاله یک روش چند حسگری برای تخمین سایش ابزار فرز کف تراشی در حین ماشینکاری ارائه شده است. برای اینکار از اندازه‌گیری نیرو و جریان موتور بطور همزمان استفاده شده است. به این منظور آزمایش‌های عملی زیادی در شرایط ماشینکاری مختلف انجام گرفته و یک شبکه عصبی با روش پس انتشار خطا آموزش داده شد. این شبکه قادر است در شرایط مختلف ماشینکاری با اندازه‌گیری مقدار نیروهای ماشینکاری و جریان موتور بطور همزمان، مقدار سایش ابزار را با دقت بالایی تخمین بزند. این روش می‌تواند در کنترل و نمایش فرایند ماشینکاری بکار برده شود.

## واژه‌های کلیدی:

سایش ابزار، تخمین چند حسگری، فرزکاری کف تراشی، شبکه‌های عصبی، جریان موتور و نیروهای ماشینکاری

## *Multisensing Tool Wear Estimation in Face Milling With Neural Networks*

Amir Mostafapour, Mohammad Reza Razfar

### ABSTRACT

Controlling system state is a purpose in system automation. Monitoring of tool wear is the same in machining process. Dimensional accuracy, surface quality of work, machining economy, machine tools life and machining forces were influenced by tool wear. So estimating the tool wear without stopping the operation can be a monitoring method. In this paper an on-line multisensing approach for tool wear estimation in face milling proposed. Measuring of forces and motor current simultaneously is used. Many experimental tests have been done in different machining conditions and a back propagation neural network (bp) have been designed. This neural network can estimate the tool wear amount with a high accuracy by measuring of machining forces and motor current simultaneously. This method can be used in controlling and monitoring of machining process.

<sup>i</sup> استادیار گروه ساخت و تولید دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز E-mail: amir\_mostafapour@yahoo.com

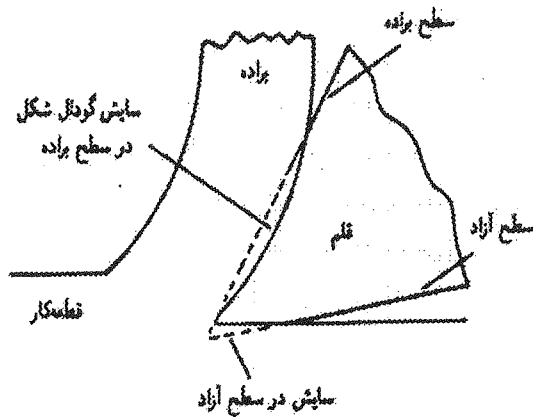
<sup>ii</sup> استادیار گروه ساخت و تولید دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

امروزه سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر بدون حضور انسان، در حال گسترش است. در چنین سیستم‌هایی کامپیوتر 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 مورد نظر باید توانایی کنترل فرایند در شرایط مختلف کاری و تصمیم‌گیری برای تغییر شرایط کاری را داشته باشند. به این دلیل حسگرهای مختلفی برای گرفتن اطلاعات از شرایط فرایند و کنترل آن لازم است. ولی اطلاعات این حسگرها باید به نحوی پردازش و برای کنترل فرایند تصمیم‌گیری شود. به این دلیل واحد تصمیم‌گیری باید به نوعی یک سیستم هوشمند باشد [۱].

یکی از مسائل مهمی که در ماشینکاری وجود دارد، مسأله سایش ابزار ماشینکاری است. امروزه کارهای زیادی برای اندازه‌گیری و تخمین سایش ابزار انجام می‌گیرد [۲]. سایش ابزار به سه دلیل مهم است. دلیل اول آن است که سائیده شدن نوک ابزار روی صافی سطح و دقت ابعادی قطعه ماشینکاری تأثیر مستقیمی دارد. در جایی 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 موجب شکست ابزار می‌شود. با توجه به آنکه شکست ناگهانی باعث صدمه دیدن کل ابزار، ماشین ابزار و قطعه کار می‌شود، باید از آن جلوگیری کرد. دلیل سوم مسأله اقتصادی است، چرا که سایش ابزار هزینه تیزکاری مجدد، پایان عمر ابزار و از همه مهمتر توقف عملیات ماشینکاری را به دنبال دارد. به این دلیل باید تا حد امکان سایش ابزار کنترل گردد. روش‌های اندازه‌گیری سایش ابزار به دو دسته روش مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شود. در روش مستقیم مقدار سایش ابزار را مستقیماً بطور دستی و توسط وسایلی مثل میکروسکوپ ابزارسازی اندازه‌گیری می‌کنند. برای این کار لازم است که ماشین متوقف شده و سپس کار اندازه‌گیری انجام گیرد، که باعث افزایش زمان تولید می‌شود. 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 نیز اندازه‌گیری خود این پارامترها راحت‌تر است، استفاده می‌شود. خوشبختانه طبیعت این پارامترها طوری است که بدون توقف عملیات ماشینکاری و بصورت

بلادرنگ و در حین عملیات می‌توان آنها را اندازه‌گیری نمود. برای این کار حسگرهایی متناسب با نوع پارامتر مورد استفاده، بکار گرفته می‌شود تا در طی فرایند ماشینکاری مدام این پارامترها را اندازه‌گیری نماید. 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. ولی 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، ARTMAPS، MAP خود سازمان‌ده و شبکه عصبی-فازی NEFCLASS بهره گرفت. نتایج کار نشان می‌دهد که بهترین شبکه، از نظر تعیین سایش، شبکه NEFCLASS و MLP می‌باشند، ولی شبکه چند لایه MLP ترجیح داده می‌شود، چرا که هم طراحی و برنامه‌نویسی آن راحتتر است و هم توانایی بالایی در تعیین مقدار سایش ابزار در سایش‌های بالا دارد. وی نتیجه گرفت که بهترین شبکه در مونتورینگ سایش ابزار شبکه عصبی MLP است. کارهای مشابه دیگری نیز انجام شده است که در آنها از اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری جهت تخمین سایش ابزار تراشکاری استفاده شده است [۸] تا [۱۲]. نتایج کارهای انجام شده نشان می‌دهد که با استفاده از اندازه‌گیری نیروها، می‌توان تخمین خوبی از سایش را بدست

بصورت یک گودال دیده می‌شود. 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 سایش حفره‌ای دارد.



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

سایش پهلو در اثر حرکت مالشی سطوح ماشینکاری شده قطعه، بصورت یک ناحیه روی ابزار ایجاد می‌شود. عرض متوسط این ناحیه بعنوان مقدار سایش در نظر گرفته می‌شود (شکل (۲)). مطالعات نشان می‌دهد که رشد منطقه سایش مطابق شکل (۳) 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 به سایش اولیه ( $W_0$ ) موسوم است. با ادامه ماشینکاری در ناحیه BC سایش به حالت پایداری می‌رسد و نرخ سایش ( $\dot{W}$ ) تقریباً ثابت است. در این ناحیه مقدار سایش بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$W = W_0 + \dot{W}t$$

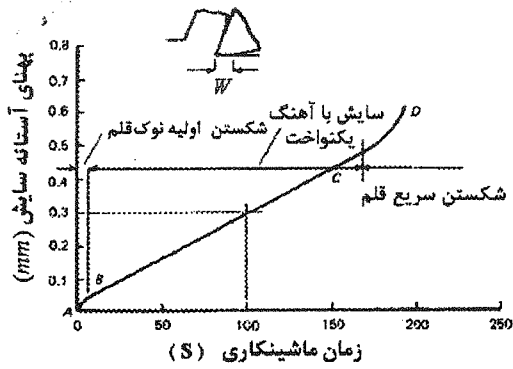
در اواخر عمر ابزار در ناحیه CD نرخ سایش افزایش می‌یابد که به سایش سریع موسوم است. در این ناحیه دما شدیداً افزایش می‌یابد و شکست ابزار در این ناحیه اتفاق می‌افتد. باید قبل از رسیدن سایش به این منطقه، ابزار را تیزکاری یا تعویض کرد. سایش پهلو روی دقت و صافی سطح قطعه ماشینکاری، مقدار نیروها، ارتعاشات مکانیکی، عمر ماشین و حرارت ماشینکاری تاثیر منفی دارد. به این علت باید مقدار آن را محدود نگه داشت. طبق استاندارد ISO مقدار سایش به اندازه  $0.3$  میلی‌متر ملاک عمر ابزار انتخاب شده است. وقتی سایش به این مقدار برسد، گفته می‌شود ابزار از کار افتاده است و باید تعویض گردد.

از پارامترهای دیگری که برای تخمین سایش ابزار مناسب است، جریان موتور می‌باشد. با توجه به سهولت اندازه‌گیری جریان و عدم نیاز به وسایل خیلی گران‌قیمت، این روش به سایر روشها ترجیح داده می‌شود. ولی تغییرات جریان نسبت به سایش چندان زیاد نیست. استفاده از جریان از روشهای جدید محسوب می‌شود و هنوز مطالعات در این زمینه ادامه دارد. در سال ۱۹۹۰ دانشمندی بنام Altintas [۱۴] از اندازه‌گیری جریان موتور برای تعیین نیروهای ماشینکاری در تراش استفاده کرد. در سال ۱۹۹۵ Chang [۱۵] یک شبکه عصبی ارائه کرد که با استفاده از اندازه‌گیری جریان موتور اسپیندل نیروی تراشکاری را تخمین می‌زد. در سال ۲۰۰۰ Xiaolit [۱۶] از تبدیل موجی و تکنیک فازی برای مونیورینگ شکست ابزار سوراخکاری استفاده کرد. وی برای اینکار از اندازه‌گیری جریان موتور اسپیندل و موتور پیشروی بهره گرفت. در سال ۲۰۰۱ Xiaolit [۱۷] یک روش بر اساس تحلیل زمانی برای تعیین شکست ابزار فرز انگشتی ارائه نمود. وی در مدل خود از جریان موتور پیشروی و روش آنالیز متوسط ناحیه زمانی استفاده کرد. در سال ۲۰۰۲ Young Hun [۱۸] با استفاده از شبکه فازی و از طریق اندازه‌گیری جریان موتور پیشروی و اسپیندل، مقدار نیروی برش را تخمین زد. این مطالعات نشان می‌دهد که بجای استفاده از دینامومتر می‌توان برای اندازه‌گیری نیروها از جریان موتور نیز بهره برد.

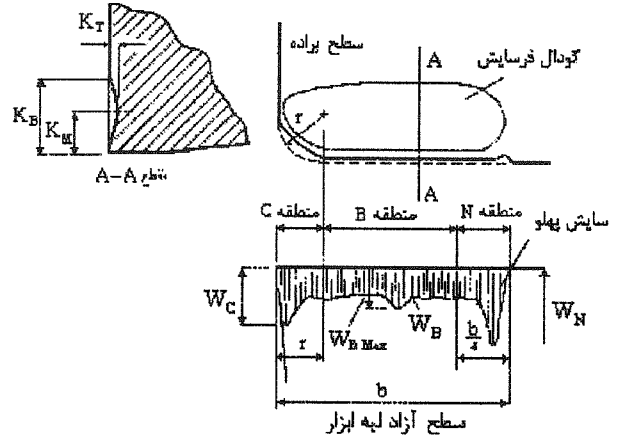
در این مقاله یک روش چند حسگری برای اندازه‌گیری سایش ابزار ارائه شده است. برای اینکار سه شبکه عصبی طراحی شد. در شبکه اول فقط از اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری و در شبکه دوم فقط از جریان موتور و در شبکه سوم از هر دو برای تخمین سایش ابزار استفاده شده است. در نهایت عملکرد و دقت این شبکه‌ها باهم مقایسه شده است.

## ۲- سایش ابزار

یکی از مهمترین مسائل اقتصادی در ماشینکاری، مسأله تعویض ابزار است. ابزاری که دیگر نتواند وظیفه و کار خود را انجام دهد، یک ابزار کار افتاده است و باید تعویض شود. معیارهای از کارافتادگی بسته به دقت و کیفیت قطعه و شرایط ماشینکاری (خشن‌کاری یا پرداخت‌کاری) متفاوت است. یکی از مهمترین معیارهای از کارافتادگی ابزار، سایش تدریجی 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



شکل (۳): مراحل پیشرفت سایش پهلو



شکل (۲): شکل منطقه سایش پهلو

### ۳- تأثیر سایش ابزار روی نیروهای مکانیکی

براده برداری در فرزکاری جزو روشهای براده برداری گسسته محسوب می شود. وقتی ابزار با دور  $n$  در حال چرخش است، هر لبه فقط در قسمتی مسیر خود با قطعه درگیر شده و براده برداری می کند. اگر تعداد لبه های ابزار را  $z$  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:

$$\varphi_j = \omega t + j\theta \quad (2)$$

که در آن  $\omega$  سرعت زاویه ای ابزار و  $\theta$  زاویه بین دو لبه می باشد:

$$\theta = \frac{360}{z}, \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

هر لبه زمانی در موقعیت درگیری با قطعه است که داشته باشیم:

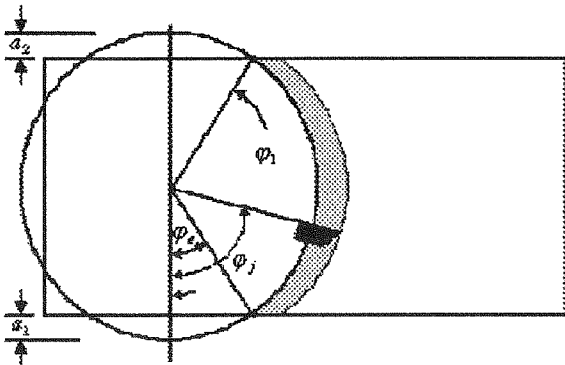
$$\varphi_e \leq \varphi_j \leq \varphi_l \quad (4)$$

که در آن  $\varphi_l$  و  $\varphi_e$  به ترتیب زاویه ورود و خروج ابزار می باشند که به پارامترهای هندسی بستگی دارند و بصورت زیر بدست می آیند:

$$\cos(\varphi_l) = -1 + \frac{2a_2}{d}$$

$$\cos(\varphi_e) = 1 - \frac{2a_1}{d} \quad (5)$$

که در آن  $a_1$  و  $a_2$  مطابق شکل (۴) فواصل لبه ابزار تا لبه قطعه کار و  $d$  قطر ابزار هستند.



شکل (۴): هندسه درگیری ابزار کف تراشی

اگر پیشروی میز با زاوی یک لبه را به اندازه  $S_z$  تنظیم کنیم، با توجه به هندسه درگیری لبه با قطعه و موقعیت زاویه ای هر لبه، مقدار ضخامت لحظه ای براده برابر خواهد بود با:

$$h_j = S_z \sin(\varphi_j) \sin(\kappa_r) \quad (6)$$

که در آن  $\kappa_r$  زاویه تنظیم ابزار است. از خصوصیات عملیات فرزکاری برشکاری از نوع مایل است. مؤلفه های نیروهای ماشینکاری برای لبه  $j$  ام در حین براده برداری مایل را می توان بصورت زیر محاسبه کرد: [۱۳]

$$F_{tj} = K_{tc} h_j a$$

$$F_{rj} = K_{rc} h_j a \quad (7)$$

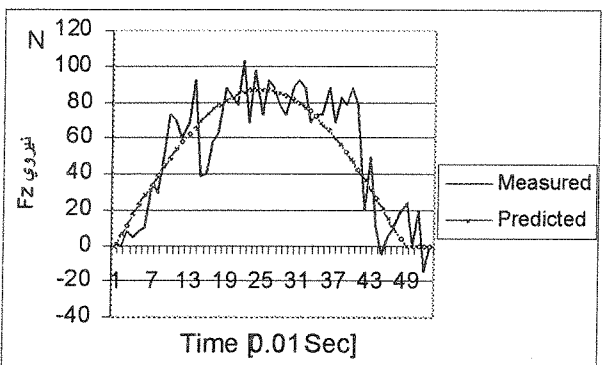
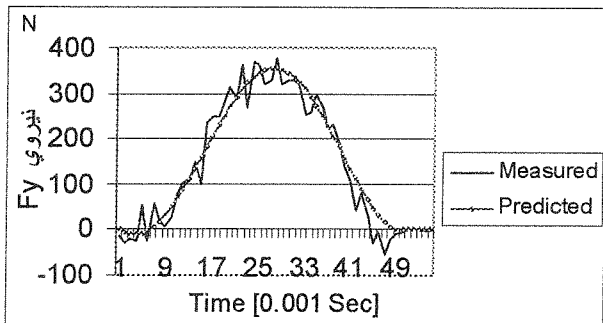
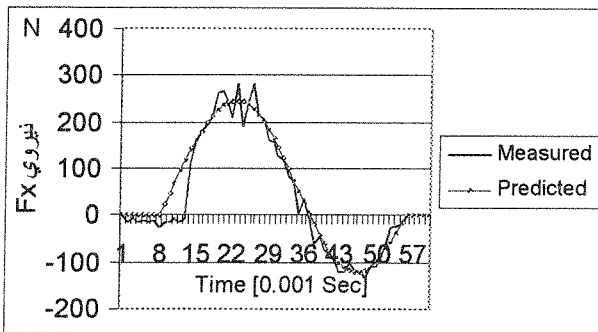
$$F_{aj} = K_{ac} h_j a$$

که در آن  $F_{tj}$ ،  $F_{rj}$  و  $F_{aj}$  به ترتیب نیروی مماسی، شعاعی و محوری وارد به لبه  $j$  ام هستند. ضرایب  $K_{rc}$ ،  $K_{tc}$  و  $K_{ac}$  نیز ضرایبی هستند که بستگی به زوایا و جنس قطعه کار دارند. مؤلفه های  $x$ ،  $y$  و  $z$  نیروهای وارد به لبه  $j$  ام بصورت زیر بدست می آید:

$$F_z = \sum_{j=0}^{z-1} G_j(\varphi_j) \cdot S_z \cdot \sin(\varphi_j) \cdot \sin(\kappa_r) \cdot a \cdot K_{ac} \quad (8)$$

(۱۲)

روابط فوق روابط نهائی برای محاسبه نیروهای فرزکاری کف تراشی هستند. در این روابط فرض بر آن است که ابزار کاملاً تیز است و سایش ابزار در این روابط وارد نشده است. به زبان توربو Turbo C++ یک برنامه نوشته شد که با دریافت شرایط ماشینکاری (پیشروی میز، عمق بار و دور ماشین)، هندسه ابزار (زوایای تیغه‌ها، تعداد تیغه‌ها و قطر ابزار)، هندسه درگیری ابزار و قطعه کار ( $a_1$  و  $a_2$ ) و جنس قطعه کار ( $T_s$ ) نیروهای فرزکاری را بصورت لحظه‌ای و در بازه‌های زمانی ۰/۰۱ ثانیه محاسبه می‌کند.



شکل (۵): مقایسه نتایج تجربی نیروهای فرز تراشی با نتایج حاصل از (۱۲)

$$\text{ولی} \begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_j) & \cos(\varphi_j) & 0 \\ -\cos(\varphi_j) & \sin(\varphi_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F'_{xj} \\ F'_{yj} \\ F'_{zj} \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{cases} F_{xj} = F_{ij} \cos(\varphi_j) + F_{ij} \sin(\varphi_j) & \varphi_e \leq \varphi_j \leq \varphi_l \\ F_{xj} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

به این منظور از تابع پله‌ای زیر استفاده می‌شود:

$$G_j(\varphi) = \frac{1}{2} [1 + \text{sgn}(\sin(\varphi_j - \psi) - p)] = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

که در آن:

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

و

$$p = \sin(\varphi_s - \psi) \quad (10)$$

این تابع در زمان درگیری لبه  $Z$ ام با قطعه برابر یک و در سایر حالات صفر است. بنابراین، با استفاده از روابط (۶)، (۸)، (۹) و (۱۰)، نیروهای مؤثر در لبه  $Z$ ام بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{bmatrix} = G_j(\varphi_j) \cdot S_z \cdot \sin(\varphi_j) \cdot \sin(\kappa_r) \cdot a \cdot \begin{bmatrix} \sin(\varphi_j) & \cos(\varphi_j) & 0 \\ -\cos(\varphi_j) & \sin(\varphi_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{rc} \\ K_{tc} \\ K_{ac} \end{bmatrix} \quad (11)$$

کل نیروی وارده به ابزار، برابر است با مجموع نیروهای وارده به لبه‌های درگیر با قطعه کار، پس خواهیم داشت:

$$F_x = \sum_{j=0}^{z-1} G_j(\varphi_j) \cdot S_z \cdot \sin(\varphi_j) \cdot \sin(\kappa_r) \cdot a \cdot [K_{rc} \cos(\varphi_j) + K_{tc} \sin(\varphi_j)]$$

$$F_y = \sum_{j=0}^{z-1} G_j(\varphi_j) \cdot S_z \cdot \sin(\varphi_j) \cdot \sin(\kappa_r) \cdot a \cdot [K_{rc} \sin(\varphi_j) - K_{tc} \cos(\varphi_j)]$$

قرار می‌گیرد، دور موتور کاهش یافته و به دور  $\omega_{mech}$  می‌رسد. بر این اساس پارامتری بنام لغزش بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$s = \frac{\omega_{syn} - \omega_{mech}}{\omega_{syn}} \quad (13)$$

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

$$P_{mech} = I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} (1-s) \quad (14)$$

که در آن  $I_2$  و  $R_2$  به ترتیب جریان و مقاومت روتور هستند. در این فرمول دیده می‌شود که توان مکانیکی با جریان و دور موتور مرتبط است. وقتی ماشین فرز بدون براده‌برداری کار می‌کند، جریان موتور  $I_0$  خواهد بود که بستگی به اصطکاک، شرایط دمپینگ و اینرسی سیستم محرکه و انتقال دور و گیربکس دارد. وقتی ابزار با قطعه درگیر می‌شود، نیروی ماشینکاری طبق (۱۳) باعث تغییر جریان شده و جریان موتور به  $I$  افزایش خواهد یافت:

$$I = I_0 + f(P_{mech}) \quad (15)$$

توان مکانیکی بستگی به مقدار نیروهای ماشینکاری دارد. نیروهای ماشینکاری نیز به شرایط ماشینکاری، هندسه ابزار و جنس قطعه بستگی دارد. از طرف دیگر تیز و کند بودن لبه برش نیز روی مقدار نیروها تأثیر خواهد داشت. بنابراین در شرایط ماشینکاری ثابت، جریان موتور به مقدار سایش لبه ابزار نیز بستگی دارد بنابراین خواهیم داشت:

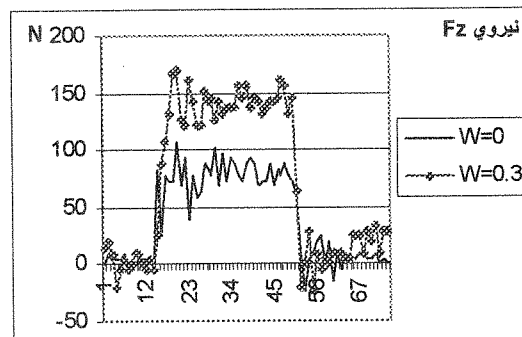
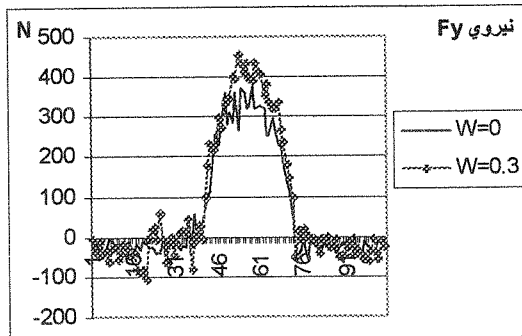
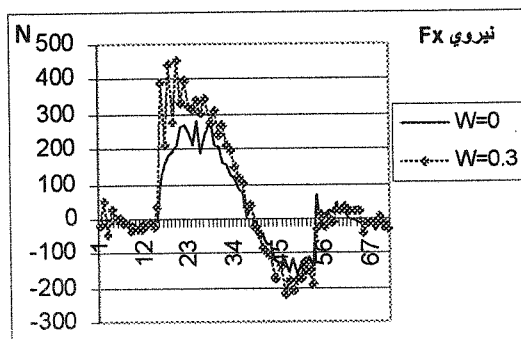
$$I = I_0 + f(\text{ابزار}) \quad (16)$$

اثر سایش لبه ابزار و شرایط ماشینکاری روی جریان موتور در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل با ثابت نگه داشتن تمام پارامترها و تغییر یکی از آنها اثر سایش روی مقدار جریان بررسی شده است. همانطور که دیده می‌شود، ضمن آنکه مقدار جریان به شرایط ماشینکاری بستگی دارد، به سایش ابزار نیز حساس است. از این موضوع می‌توان برای تخمین سایش ابزار از روی جریان موتور استفاده کرد. با توجه به غیر خطی بودن رابطه بین سایش و جریان می‌توان از شبکه عصبی برای تخمین این رابطه استفاده نمود.

## ۵- روش انجام آزمایش‌های عملی

با توجه به تأثیر سایش ابزار روی جریان موتور و

نتایج کار نشان می‌دهد که رابطه (۱۲) مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد (شکل (۵)). همچنین آزمایش‌های عملی نشان می‌دهد که سایش لبه ابزار روی مقدار نیروها تأثیر خیلی زیادی دارد (شکل (۶)). به خاطر وجود رابطه بین سایش و نیروها، می‌توان از اندازه‌گیری نیرو برای تخمین سایش لبه ابزار استفاده کرد.



شکل (۶): مقایسه نیروهای فرزکاری اندازه‌گیری شده در ماشینکاری با ابزار تیز و کند شده

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

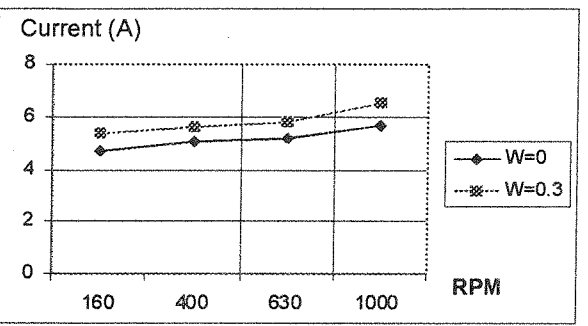
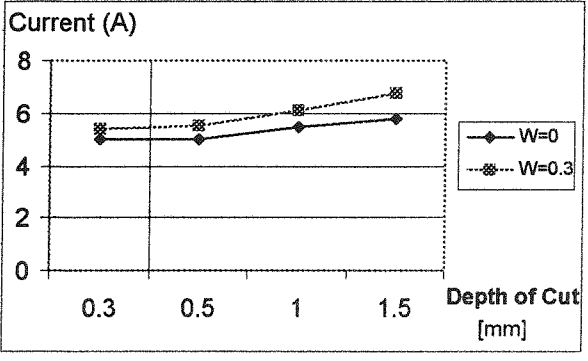
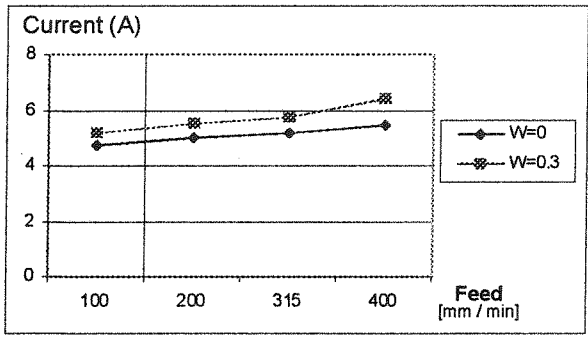
## ۶- تأثیر سایش ابزار روی جریان موتور

در ماشین فرز توان لازم برای براده‌برداری توسط موتور الکتریکی تأمین می‌شود. موتور الکتریکی بر اساس ساختمان داخلی خود مقداری جریان الکتریکی را می‌کشد و با دور مشخصی کار می‌کند که به دور سنکرون موسوم است. دور خروجی موتور توسط گیربکس به دورهای مختلف ماشینکاری تغییر یافته و ماشینکاری صورت می‌گیرد. وقتی روی محور خروجی موتور در اثر ماشینکاری، بار مکانیکی

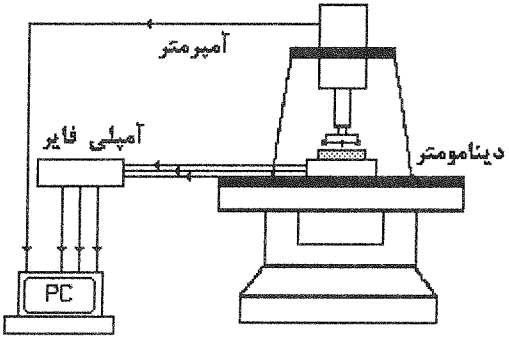
نیروهای ماشینکاری، در این مقاله یک روش چند سنسوری برای تخمین سایش ابزار ارائه شده است. برای انجام آزمایش‌ها از ماشین فرز عمودی *DECKEL* مدل *FP4* با توان  $4/4-3/7$  کیلو وات و با خارج از مرکزیت اسپیندل همراه با تیغ فرز  $10-100-R257.1$  با قطر  $100$  mm و نوع تیغچه‌ها نیز *SPKN-1203-EDR* است. برای اندازه‌گیری نیرو نیز از دینامومتر *KISTLER* مدل *Heme Analyst 5019B* و برای اندازه‌گیری جریان از آمپرمتر مدل  $2050$  استفاده شد. قطعه‌کار بکار رفته نیز فولاد آلیاژی به سختی  $RC 20$  و استحکام برش  $660$  Mpa است. برای اینکار در شرایط مختلف ماشینکاری مطابق شکل (۸) عملیات کف‌تراشی صورت گرفت. در این آزمایش‌ها با ثابت نگه داشتن تمام پارامترها (پیشروی، عمق بار، دور ابزار، عمق بار و مقدار سایش) و تغییر یکی از آنها، مقدار جریان و نیروهای ماشینکاری بطور همزمان اندازه‌گیری شد. با توجه به تغییرات سریع و سیکی نیروها، از RMS (جذر مجموع مربعات) جریان و نیروهای اندازه‌گیری شده، استفاده شد.

با توجه به اینکه اثر سایش روی جریان و نیروها یک رابطه غیر خطی، به شکل تابعی متفاوت در شرایط مختلف ماشینکاری است، ارائه یک فرمول تحلیلی یا تجربی مشکل است. به این خاطر از شبکه هوشمند عصبی استفاده شده است. شبکه هوشمند بکار رفته از نوع MLP 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) است. لایه ورودی شبکه دارای ۷ ورودی شامل مقدار پیشروی، عمق بار، دور ابزار، جریان موتور و نیروهای فرزکاری و لایه خروجی دارای یک خروجی یعنی مقدار سایش ابزار است (شکل ۹). تعداد ۱۰۰ گره در لایه مخفی در نظر گرفته شده است. علت انتخاب ۱۰۰ گره آن است که با انتخاب تعداد گره‌های مخفی پائین، تعداد تکرارهای لازم برای آموزش شبکه خیلی زیاد می‌شود و دقت تخمین نیز پائین می‌آید. به این علت بصورت سعی و خطا تعداد ۱۰۰ گره در لایه مخفی مناسب تشخیص داده شد. تابع تبدیل بکار رفته در شبکه از نوع تابع سیگموئید باینری بصورت زیر است:

$$f(x) = \frac{2}{1 + \exp(-x)} - 1 \quad (17)$$



شکل (۷): اثر سایش ابزار روی جریان موتور در شرایط مختلف ماشینکاری



شکل (۸): شماتیک روش انجام آزمایشات عملی

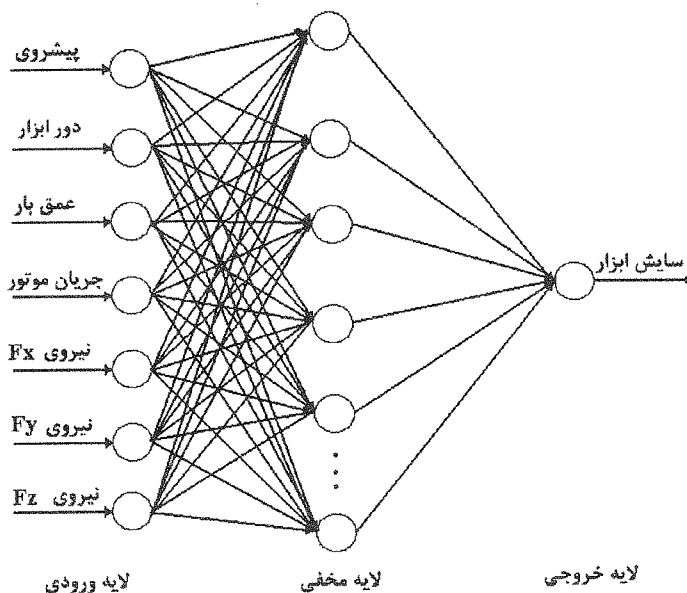
برای آموزش شبکه آزمایش‌های زیادی در شرایط مختلف ماشینکاری انجام شد، اطلاعات حاصل از هر آزمایش یک دسته نمونه آموزشی برای آموزش شبکه است، که در آن

بزند، که چند نمونه از آنها در جدول (۲) آورده شده است. در نهایت یک شبکه عصبی چند حسگری طراحی شد که در آن از اندازه‌گیری جریان موتور و نیروهای ماشینکاری، بطور همزمان برای تخمین سایش ابزار استفاده شده است. این شبکه بعد از ۲۵۱۵ تکرار آموزش توانست سایش ابزار را با دقت ۹۴/۲٪ تخمین بزند. چند نمونه از آزمایش این شبکه در جدول (۳) نشان داده شده است

### ۶- نتیجه‌گیری

از مهمترین مسائل در اتوماسیون فرایند ماشینکاری، اندازه‌گیری غیرمستقیم و نمایش فرایند سایش ابزار است. در این مقاله یک روش چند حسگری برای اندازه‌گیری سایش ابزار فرز کف‌تراشی ارائه شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقدار سایش ابزار روی مقدار نیروهای ماشینکاری و جریان موتور اسپیندل تاثیر زیادی می‌گذارد. بر این اساس یک سیستم هوشمند شبکه عصبی طراحی شد که با اندازه‌گیری مقدار نیروهای ماشینکاری و جریان موتور در شرایط مختلف ماشینکاری، مقدار سایش ابزار را تخمین بزند. نتایج کار نشان می‌دهد که دقت تخمین با نیروهای ماشینکاری بیشتر از جریان موتور است. پاسخ جریان موتور بدلیل اینرسی سیستم انتقال قدرت ماشین، نسبت به سایش ابزار کندتر است. همچنین بدلیل مسائل تلفات انرژی و توان جواب حاصل از جریان موتور کمتر است. ولی استفاده از جریان موتور برای تخمین سایش ابزار مزایایی مثل هزینه کمتر تجهیزات، عدم محدودیت نسبت به وزن و ابعاد قطعه، امکان استفاده از مایع خنک‌کاری در ماشینکاری و مانند آن دارد. همچنین نتایج کار نشان می‌دهد که استفاده از چند حسگری بیشترین دقت را نسبت به حالت تک حسگری دارد.

مقادیر ورودی و خروجی معلوم می‌باشند. در شبکه ارتباط بین نوروها توسط مقدار وزنی تعیین می‌شود. در ابتدا مقدار این بردار وزنی بصورت مقادیر تصادفی انتخاب می‌شود. 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. بعد از آموزش شبکه، با استفاده از اطلاعات آزمایشی، عملکرد شبکه بررسی شد. در دسته‌های آزمایشی، نتیجه خروجی شبکه یعنی مقدار سایش ابزار با اندازه‌گیری مستقیم معلوم است. با وارد کردن ورودی‌ها، شبکه مقدار سایش ابزار را تخمین می‌زند. مقایسه نتایج خروجی شبکه‌های طراحی شده و سایش ابزار واقعی نشان می‌دهد که دقت تخمین این شبکه‌ها بسیار زیاد است.



برای تخمین سایش لبه ابزار سه شبکه عصبی طراحی و آموزش داده شد. در شبکه اول ورودی شبکه شرایط ماشینکاری و مقدار RMS جریان موتور فرض شده است. این شبکه با ۲۱۰۴ تکرار آموزش دید. آزمایش این شبکه نشان می‌دهد که این شبکه مقدار سایش ابزار را با دقت ۸۷/۱٪ می‌تواند تخمین بزند. که چند نمونه از این تخمین‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

در شبکه عصبی دوم از مقدار نیروهای ماشینکاری برای تخمین سایش ابزار استفاده شد. این شبکه بعد از ۳۸۹ تکرار آموزش، توانست سایش ابزار را با دقت حدود ۹۲٪ تخمین



جدول (۱): نمونه اطلاعات آموزشی و تخمین انجام شده در شبکه عصبی اول

| ردیف | دور ابزار [RPM] | پیشروی میز [mm/min] | عمق بار [mm] | RMS جریان [A] | سایش واقعی [mm] | سایش تخمینی [mm] | دقت تخمین |
|------|-----------------|---------------------|--------------|---------------|-----------------|------------------|-----------|
| ۱    | ۱۶۰             | ۲۰۰                 | ۰/۳          | ۵/۴۵          | ۰/۳             | ۰/۳۱۱۲           | ٪۹۶/۲     |
| ۲    | ۴۰۰             | ۲۰۰                 | ۰/۷          | ۵/۸۸          | ۰/۳             | ۰/۲۸۲۵           | ٪۹۴/۸     |
| ۳    | ۵۰۰             | ۱۶۰                 | ۰/۵          | ۵/۴           | ۰/۲             | ۰/۱۶۴۲           | ٪۸۲/۸     |
| ۴    | ۴۰۰             | ۲۰۰                 | ۰/۷          | ۵/۵۸          | ۰/۲             | ۰/۲۱۱۲           | ٪۹۴/۴     |
| ۵    | ۱۶۰             | ۳۱۵                 | ۰/۴          | ۵/۲۱          | ۰/۱             | ۰/۰۸۷۵           | ٪۸۷/۵     |

جدول (۲): نمونه اطلاعات آزمایشی و نتیجه تخمین انجام شده با شبکه عصبی دوم

| 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          | ۱۷۴/۰۲            | ۲۳۷/۴۲            | ۱۰۶/۲۶            | ۰/۳             | ۰/۲۹۶۱           | ٪۹۸/۷     |
| ۵    | ۲۰۰             | ۱۶۰                 | ۰/۵          | ۲۸۰/۳۲            | ۲۹۱/۸۸            | ۱۰۰/۱             | ۰/۰۰۰۱          | ۰/۰۰۰۰۸۲         | ٪۸۲       |

جدول (۳): نمونه تخمین انجام شده توسط شبکه عصبی چند سنسوری

| ردیف | دور ابزار RPM | پیشروی میز [mm/min] | عمق بار [mm] | RMS نیروی Fx [kg] | RMS نیروی Fy [kg] | RMS نیروی Fz [kg] | RMS جریان [A] | سایش واقعی [mm] | سایش تخمینی [mm] | دقت تخمین |
|------|---------------|---------------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|-----------------|------------------|-----------|
| ۱    | ۵۰۰           | ۲۰۰                 | ۰/۵          | ۲۰۷/۸۵            | ۳۶۷/۳۳            | ۱۰۵/۵۵            | ۵/۹۲          | ۰/۳             | ۰/۲۹۵            | ٪۹۸/۳     |
| ۲    | ۲۰۰           | ۳۱۵                 | ۰/۵          | ۴۷۷/۱۱            | ۵۹۷/۷۲            | ۲۰۰/۷۹            | ۵/۲۰          | ۰/۰۰۰۱          | ۰/۰۰۰۱۰۸         | ٪۹۲/۰     |
| ۳    | ۵۰۰           | ۲۰۰                 | ۰/۵          | ۱۴۴/۷۳            | ۱۰۷/۸             | ۴۷/۷۲             | ۵/۷۶          | ۰/۰۰۰۱          | ۰/۰۰۰۱۱          | ٪۹۰/۰     |
| ۴    | ۶۳۰           | ۲۰۰                 | ۰/۵          | ۱۵۱/۳۶            | ۲۰۲/۳             | ۵۷/۶۳             | ۵/۹           | ۰/۱             | ۰/۰۹۱            | ٪۹۱       |
| ۵    | ۲۰۰           | ۲۰۰                 | ۱            | ۵۹۳               | ۹۵۲/۳۵            | ۳۶۱/۳۶            | ۵/۵۱          | ۰/۳             | ۰/۲۸۴            | ٪۹۴/۶     |

## ۷- منابع و مراجع

- Bernard Sick, "Monitoring the wear of cutting tools in cnc lathes with artificial neural networks", Proc. ICASSP-97, Apr. 21-24 Munich, Germany, 1997 [۶]
- Bernard Sick, "Classifying the wear of turning tools with neural networks", University of passau, Germany, Internet, 1998 [۷]
- R. G. Caudill, "Design of artificial neural network for tool wear monitoring", J. of Intelligent Manufacturing, Vol. 8, pp 215-226, 1997 [۸]
- Q. Liu, Y. Altintas, "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, 1999 [۹]
- Peter Wikins, "Tool wear monitoring using the performance index method", 32th ISATA Conference, 14-18 June, 1999, Australia, pp. 403-410 [۱۰]
- R. G. Silva, "The adaptability of a tool wear monitoring systems under changing cutting conditions", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, No. 2, pp.287-298, 2000 [۱۱]
- Tugrul Ozel, "Prediction of flank wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened [۱۲]
- G.M. Zhang, R.G. Kanchustambham, "Neural Network application in on-line monitoring of turning processes", Technical research report, University of Maryland, Internet, 1999 [۱]
- 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 [۲]
- 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 [۳]
- Jr. D. E. Dimla Jr, P.M. Lister, "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, 1997 [۴]
- G. M. Zhang, R. G. Kanchustambham, "Neural Network application in on-line monitoring of turning processes", Technical research report, University of Maryland, Internet, 1995 [۵]

- H-13 steel with chamfered and honed CBN tools", *Int. J. of Mach. Tools & Man.*, Vol. 42 pp. 287-297, 2002
- E. Budak, Y. Altintas, 1996 "Prediction of milling [۱۳] force coefficients from orthogonal cutting data", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp 216-224, 1996
- Y. Altintas, C. L. Dong, "Design and analysis of [۱۴] modular CNC system for machining control and monitoring", *Modeling of Machine tools: Accuracy, Dynamics and Control*, New York, ASME, Vol. 45, 1990 pp 199-208
- Y. C. Chang, K. T. Lee, "Cutting Force estimation of [۱۵] spindle motor", *J. Contr. Sys. Tech.*, Vol. 3, No. 2, pp 145-152, 1995
- Xiaolit Li, "Real time tool condition monitoring [۱۶] using wavelet transform and fuzzy techniques", *IEEE Transactions on Systems Part C. Application and Review*, Vol. 30 No. 3, 2000 pp 352-357
- Xiaolit Li, "Detection of tool flute breakage in end [۱۷] milling using feed motor current signatures", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* Vol. 6, 2001, pp 491-498
- Young Hun Jeong, "Adaptive control of resultant [۱۸] cutting force using two feed motor currents in general 2-dimensional machining", internet, 2002