



## تخمین به‌هنگام خمش ابزار میکرو فرزکاری با استفاده از سیگنال‌های میزهای متحرک با موتورهای خطی

محمد صادق حیدرزاده<sup>1</sup>، سید مهدی رضاعی<sup>2\*</sup>، نور عزیز مردی<sup>3</sup>، علی کمالی<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران  
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران  
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مالایا، کوالالامپور، مالزی  
 4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران  
 \*smrezaei@aut.ac.ir، 159163-4311، صندوق پستی

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 25 بهمن 1395  
 پذیرش: 27 فروردین 1396  
 ارائه در سایت: 08 تیر 1396  
 کلید واژگان:  
 خمش ابزار  
 میکروفرزکاری  
 شبکه عصبی  
 موتورهای خطی  
 تخمین نیرو

با وجود ابداع روش‌های متنوع میکروساخت، میکروفرزکاری به علت ویژگی‌هایش در ساخت قطعات سه بعدی، نرخ براده‌برداری زیاد و دقت بالا مورد توجه ویژه است. با این حال این فرایند با چالش‌هایی روبروست که از مهمترین آنها خمش ابزار است که گاهی تا 90 درصد از خطای محصول نهایی را نیز در برمی‌گیرد. در این مقاله، یک روش به‌هنگام برای تخمین خمش ابزار میکروفرز برای ماشین‌های میکروفرزی که مجهز به موتورهای خطی هستند، ارائه می‌شود. در این روش از یک فیلتر کالمن برای تخمین غیرمستقیم نیروی ماشین‌کاری از پسخوراند موقعیت و جریان ورودی آمپلی‌فایرهای موتورهای خطی میز تغذیه استفاده می‌شود. با توجه به اینکه خروجی تخمین‌گر نیرو، برابندی از تمامی نیروهای وارده به موتور است، بنابراین باید منابع اغتشاشی اضافی که عمدتاً اصطکاک و موج‌های نیرویی است، حذف شود. در پژوهش پیش‌رو، از شبکه‌های عصبی برای حذف این نیروها استفاده شده است. برای این هدف از یک شبکه عصبی پرسپترون با یک لایه پنهان 16 گره‌ای و دو تاخیر زمانی در ورودی استفاده شد. نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد که روش مزبور به طور میانگین تا 75 درصد از خمش ابزار را پیش‌بینی کند.

## Real-time estimation of micro-milling cutting tool deflections by using signals of stages driven by linear motors

Mohammad Sadegh Heydarzadeh<sup>1</sup>, Seyed Mehdi Rezaei<sup>1\*</sup>, Noor Azizi Mardi<sup>2</sup>, Ali Kamali<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia  
 \*P.O.B. 159163-4311, Tehran, Iran, smrezaei@aut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 13 February 2017  
 Accepted 16 April 2017  
 Available Online 29 June 2017

### Keywords:

Tool deflection  
 Micro-milling  
 neural networks  
 linear motors  
 cutting force estimation

### ABSTRACT

Micro-milling is prominent among other micro-manufacturing processes due to their abilities in manufacturing of 3D features, high material removal rates and high precision. One of the most important challenges of this process is tool deflections which contribute even up to 90% of dimensional errors of the finished product. This paper addresses a novel method to estimate micro-milling tool deflections applicable in micro-milling machines equipped with linear motors. In this method, position feedbacks and inputs to the amplifiers are used for the real-time estimation of cutting forces by applying Kalman filter. Outputs of the estimator include a resultant of all disturbing forces in servo control loop of the motors. Therefore, cutting forces need to be compensated for other disturbing forces that are mostly friction and force ripples in linear motors. To compensate them, neural networks were used. A neural network with a hidden layer and 16 nodes inside, and with two time-delayed lined (TDL) could well model friction and force ripples. Results showed that the proposed tool deflection method is able to estimate 22% of micro-milling tool deflections.

### 1- مقدمه

طرف دیگر این فرایند با چالش‌هایی روبروست. یکی از مهمترین این چالش‌ها، سفتی<sup>1</sup> کم ابزار برشکاری در این فرایند است [2]. کاهش سفتی یک تیر متناسب با توان چهارم قطر آن است. بنابراین با کاهش قطر ابزار فرزکاری در فرآیند میکروفرزکاری، سفتی آن به شدت کاهش می‌یابد. در میکروفرزکاری 80 الی 90 درصد انعطاف‌پذیری که در نوک ابزار ظاهر می‌شود صرفاً به علت

با وجودی که روش‌های تولید متنوعی برای ساخت قطعات مینیاتوری ابداع شده‌اند، ولی روش میکروفرزکاری به علت توانایی‌های ویژه‌اش مورد توجه خاصی است. این فرایند توانایی ایجاد مشخصه‌های سه بعدی از طیف وسیعی از مواد مهندسی را دارد [1]. همچنین دقت و در عین حال نرخ براده‌برداری بالای آن، باعث شده است تا کمتر فرایند مشابهی بتواند با آن رقابت کند. از

<sup>1</sup> stiffness

### Please cite this article using:

M. S. Heydarzadeh, S. M. Rezaei, N. Azizi Mardi, A. Kamali, Real-time estimation of micro-milling cutting tool deflections by using signals of stages driven by linear motors, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 357-364, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

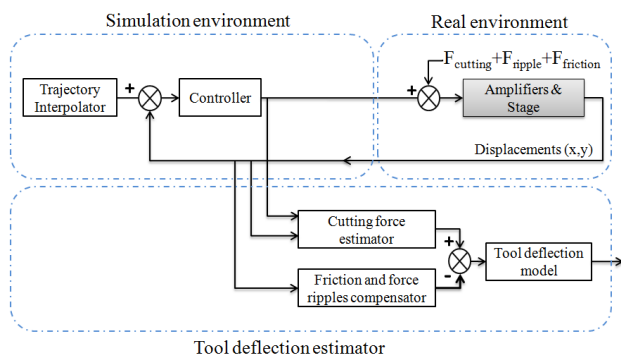


Fig. 1 The proposed scheme for estimation of tool deflections

شکل 1 طرح پیشنهادی برای تخمین خمش ابزار

اجرای به‌هنگام الگوریتم‌های کنترلی از نرم افزارهای متلب و سیمولینک بهره گرفته شد. کارت انتقال داده مدل دی‌اسیسی<sup>7</sup> 1104 نیز برای انتقال سیگنال‌ها بین کامپیوتر میزبان و آمپلی فایرها بکار گرفته شد. میز دو محوره مزبور بر روی میز یک ماشین فرز پر سرعت نصب گردید و از اسپیندل آن برای دوران ابزار میکروفرز استفاده شد. نحوه ارتباط سخت افزارهای مذکور در شکل 2 نشان داده شده است.

### 3- تخمین نیروهای ماشین کاری

#### 1-3 مدل دینامیکی موتورهای خطی

با چشم‌پوشی از برخی ویژگی‌های غیر خطی موتورهای خطی، رفتار دینامیکی آنها را می‌توان با رابطه (1) نشان داد [14].

$$G(s) = \frac{j}{s(s + \alpha)} \quad (1)$$

که در آن  $J$  و  $\alpha$  دو پارامتری هستند که می‌توان آنها را با روش‌های شناسایی سیستم تعیین نمود. مدل دینامیکی دو محور میز مذکور به شرح ذیل بدست آمد:

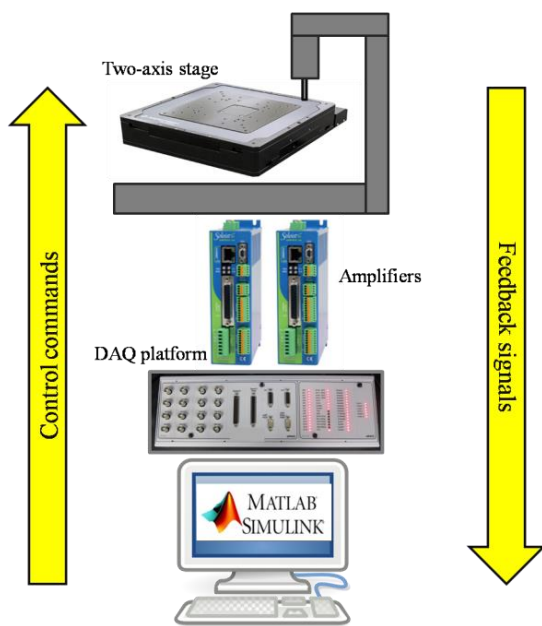


Fig. 2 Experimental setup and its connections

شکل 2 پیکربندی و اتصالات تجهیزات آزمون‌های تجربی

انعطاف‌پذیری خود ابزار است [3-5]. بنابراین در این فرایند سهم خمش ابزار در مجموع خطاهای قطعه کار نهایی بیش از فرایند ماکروفرزکاری است.

در تخمین خمش ابزار دو رویکرد به‌هنگام و نابه‌هنگام مورد توجه بوده است. در روش نابه‌هنگام، معمولاً مسیر ماشین کاری مورد تحلیل قرار می‌گیرد و با استفاده از مدل‌های نیرویی، نیروی ماشین کاری تخمین زده می‌شود. سپس با داشتن تخمین نیرو و با استفاده از مدلی از ابزار، خمش ابزار در هر نقطه از مسیر تخمین زده می‌شود [6,7]. در روش نابه‌هنگام دیگری که معمولاً در تولید انبوه کارایی دارد، قطعات نمونه اولیه اندازه‌گیری می‌شوند و خمش ابزار از اختلاف ابعاد مشخصه‌های هندسی با مقدار نامی آنها محاسبه می‌گردد [8]. اشکال عمده روش‌های نابه‌هنگام در این است که در صورت وجود تغییرات در شرایط ماشین کاری مانند عدم یکنواختی در ماده، سایش ابزار برشی، لنگی ابزار، اثرات متغیر روانکار و دمای محیط ماشین کاری با خطا مواجه می‌شوند.

در روش‌های به‌هنگام معمولاً از یک تجهیز اندازه‌گیری برای بدست آوردن اندازه نیروهای ماشین کاری استفاده می‌شود و سپس با استفاده از یک مدل از خمش ابزار، میزان خمش ابزار محاسبه می‌گردد. برای این هدف، معمولاً از دینامومتر استفاده می‌شود [9]. از سنسورهای پیزوالکتریک نیز در ساختار اسپیندل‌های تطبیقی استفاده شده است [10]. برخی از پژوهشگران نیز با نصب سنسور در نقطه‌ای مقابل ابزار به طور مستقیم به اندازه‌گیری خمش پرداخته‌اند [11] و یا با نصب سنسور در فضای مناسبی از ماشین و با استفاده از مدل‌های مکانیکی به طور غیرمستقیم خمش را اندازه‌گیری نموده‌اند [12]. اشکال عمده روش‌های به‌هنگام ارائه شده نیز استفاده از سنسورهای گران‌قیمت و تجهیزات اضافی محدود کننده است.

شاید بتوان فعالیت هود<sup>2</sup> و همکاران را نخستین فعالیت پژوهشی در زمینه تخمین به‌هنگام خمش ابزار میکرو فرز دانست [9]. ایشان همزمان از یک مدل نیرویی و دینامومتر برای تخمین نیرو و نیز از آزمون‌های تجربی برای تعیین مدل خمش ابزار بهره گرفتند. این روش الهام بخش پژوهش هتو<sup>3</sup> و همکاران نیز بوده است [13].

در مقاله پیش‌رو، یک روش به‌هنگام برای تخمین خمش ابزار میکروفرز ارائه می‌شود که برای ماشین‌های میکروفروزی که مجهز به موتورهای خطی در سیستم تغذیه خود هستند قابل استفاده است. در این روش که طرح آن در شکل نشان داده شده است، از سیگنال‌های پسخوراند موقعیت و جریان ورودی آمپلی‌فایرهای موتورهای محرک هر محور برای تخمین نیرو در راستای آن محور بهره گرفته می‌شود. با توجه به اینکه تخمین‌های نیرویی همواره با منابع اغتشاشی دیگر آمیخته است، اثر این نیروهای مزاحم اصلاح می‌شود. با داشتن نیروی خالص ماشین کاری و با استفاده از یک مدل تجربی از خمش ابزار، خمش ابزار در هر لحظه تخمین زده می‌شود.

#### 2- تجهیزات بکار رفته در آزمون‌های تجربی

برای انجام آزمون‌های تجربی این مقاله، از یک میز دو محوره متحرک با موتورهای خطی<sup>4</sup> ساخت شرکت ایروتک<sup>5</sup> برای موقعیت دهی قطعه کار در هنگام فرایند میکروفرزکاری استفاده شد. برای حرکت این میز خطی از آمپلی‌فایرهای سولویست سی‌پی<sup>6</sup> ساخت همان شرکت و برای طراحی و

<sup>1</sup> Adaptronic spindle

<sup>2</sup> Hood

<sup>3</sup> Heo

<sup>4</sup> Model "PlanarLD 100XY"

<sup>5</sup> Aerotech

<sup>6</sup> Soloist CP amplifiers

<sup>7</sup> dSpace

هموارتر با جزییات کمتر می‌شود و مقادیر بزرگتر منجر به تخمین‌های دقیق‌تر و البته با بزرگ‌نمایی اثرات نویزها می‌شود.

### 3-3- اثر نیروی اصطکاک و موج‌های نیرویی

خروجی تخمین‌گر نیرو، برآیند نیروی ماشین‌کاری و دیگر نیروهایی است که به صورت اغتشاش در حلقه کنترل وارد می‌شوند. در موتورهای خطی نیروی اصطکاک و موج‌های نیرویی<sup>1</sup> دو منبع اغتشاشی هستند که همواره وجود دارند. بنابراین خروجی تخمین‌گر نیروی طراحی شده، علاوه بر نیروی ماشین‌کاری، آمیخته با اثرات این دو منبع اغتشاش نیز هست و لازم است که اصلاح شود. روش متداول برای اصلاح اثرات منابع اغتشاشی مزاحم در تخمین نیرو، استفاده از روشی است که در این مقاله روش پیش‌ثبت نامیده می‌شود. در این روش ابتدا تخمین نیروهای اغتشاشی در مسیرهای ماشین‌کاری، و در شرایطی که باربرداری انجام نمی‌شود، ثبت می‌شوند. سپس در هنگام تخمین نیروی ماشین‌کاری، در هر نقطه از مسیر، نیروی اغتشاشی ثبت شده فراخوانی می‌شود و از خروجی تخمین‌گر کسر می‌گردد. این روش زمان فرایند را دو برابر می‌کند. روشی که در این مقاله پیشنهاد شده است، استفاده از شبکه‌های عصبی برای مدل کردن نیروی اصطکاک و موج‌های نیرویی است. مطالعه مکانیزم نیروی اصطکاک و موج‌های نیرویی در موتورهای خطی نشان می‌دهد که برآیند این دو نیرو تابعی غیر خطی از جابه‌جایی و سرعت میز است [14]. بنابراین برای طراحی شبکه، از سری‌های زمانی جابه‌جایی میز به عنوان داده‌های ورودی آموزشی و از خروجی تخمین‌گر به عنوان داده‌های هدف آموزشی استفاده شد. برای داده‌های ورودی از جابه‌جایی میز در مسیرهای سینوسی استفاده گردید. با توجه به تغییر پیوسته سرعت در امتداد یک مسیر سینوسی، استفاده از مسیرهای سینوسی به جای مسیرهای شیب‌دار، این امکان را فراهم می‌کند که با داده‌های کمتری بتوان معیار تعمیم‌پذیری در طراحی شبکه را برآورده نمود. مسیرهای سینوسی به گونه‌ای انتخاب شدند که بتوانند کل ناحیه کاری میز را پوشش دهند. مسیرهای استفاده شده، در شکل نشان داده شده اند.

### 3-4- طراحی شبکه عصبی

برای طراحی ساختار این شبکه سه عامل باید طراحی شوند: تعداد تاخیرها در ورودی، تعداد لایه‌ها، و تعداد نودها. برای طراحی این پارامترها به جای

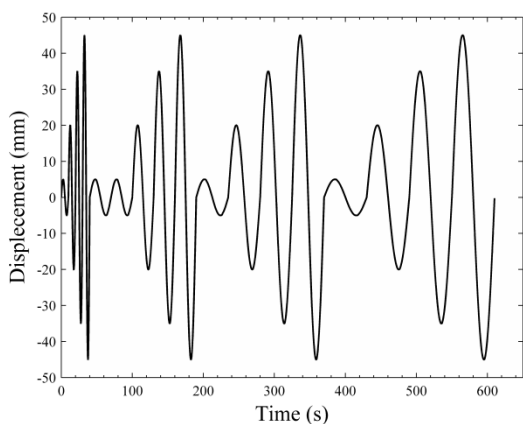


Fig. 3 Trajectories used for training of the network

شکل 3 مسیرهای استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی

<sup>1</sup> Force ripples

$$G_Y(s) = \frac{689}{s(s + 10.2)} \text{ mm/amp} \quad (2)$$

$$G_X(s) = \frac{2010}{s(s + 3.89)} \text{ mm/amp} \quad (3)$$

### 2-3- طراحی تخمین‌گر نیرو

برای تخمین نیروهای ماشین‌کاری از یک فیلتر کالمن استفاده شد. برای فرمول بندی این فیلتر ابتدا مدل دینامیکی در فضای حالت بصورت زیر آورده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ J \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ M \end{bmatrix} F_{load} \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $M$  نشان‌گر اینرسی هر موتور است و  $F_{load}$  معرف نیروهای اعمالی به موتور است.

تخمین نیروهای ماشین‌کاری از سیگنال‌های موتورهای خطی یک مساله تعیین ورودی ناشناخته است. شرایط وجود پاسخ و روش طراحی چنین تخمین‌گرهایی در پژوهش‌های پیشین بحث شده است [15]. نیروهای ناشناخته ماشین‌کاری را می‌توان با مدل پویای تصادفی توصیف نمود [16]. در چنین مدلی فرض می‌شود که یک پیش‌آگاهی نسبت به محتوای طیفی ورودی‌های تخمین‌گر وجود دارد. بنابراین نیروی اعمالی به موتورها را می‌توان با رابطه زیر نشان داد:

$$\dot{F}_{load} = w \quad (5)$$

که در آن  $w$  معرف یک فرآیند تصادفی با انحراف معیار  $\sigma_w$  است. برای طراحی فیلتر کالمن، نیروی ورودی ناشناخته در ماتریس فضای حالت آورده می‌شود و بنابراین دو معادله (4) و (5) ترکیب می‌شوند و رابطه (6) را نتیجه می‌دهند:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{F}_{load} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\alpha & -\frac{1}{M} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ F_{load} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ J \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ J & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ w \end{bmatrix} \quad (6)$$

$y = x_1 + v_p$   
مدل نویز سفید سیگنال  $u$  با انحراف معیار استاندارد  $\sigma_{v_u}$  و  $\sigma_{v_p}$  انحراف معیار استاندارد جابه‌جایی است. در نهایت، تخمین‌گر کالمن فیلتر با رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$\dot{\hat{X}} = A_{aug}\hat{X} + B_{aug}u + K[y - C_{aug}\hat{X}] \quad (7)$$

که در آن

$$A_{aug} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\alpha & -\frac{1}{M} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{aug} = \begin{bmatrix} 0 \\ J \\ 0 \end{bmatrix}, C_{aug} = [1 \ 0 \ 0], \hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{F}_{load} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$K$  بهره فیلتر کالمن است و برابر است با  $PC_{aug}^T R^{-1}$  که در آن  $P$  و  $R = \sigma_{v_p}^2 I$  حل متقارن مثبت معادله جبری ریکاتی زیر است:

$$A_{aug}P + PA_{aug}^T + Q - PC_{aug}^T R^{-1} C_{aug}P = 0 \quad (9)$$

در این رابطه  $Q = \text{diag}(0, \sigma_{v_u}^2, (-K_2/M)^2, \sigma_w^2)$  است.

تخمین اولیه دو پارامتر  $\sigma_{v_u}$  و  $\sigma_{v_p}$  با روش ارائه شده در مرجع [17] تعیین و سپس برای حصول نتیجه دقیق‌تر تنظیم ظریف می‌شوند. پارامتر  $\sigma_w$  نیز یک پارامتر تنظیم‌کننده است که مقدار آن با سعی و خطا و بر اساس حس مهندسی تعیین می‌شود [18]. مقادیر کوچکتر باعث تخمین‌های

مرجع [19] است استفاده گردید. همانطور که در شکل نشان داده شده است، برای اندازه‌گیری پارامتر  $k_t$ ، میز دو محوره بر روی میز فرز پر سرعت نصب گردید. سپس، به آرامی میز در یک بازه کوچک و تا حدی که منجر به شکست ابزار برش نشود، حرکت داده شد و همزمان جابه‌جایی و نیروی اندازه‌گیری شده ثبت شدند. سپس بعد از اصلاح نیروی اندازه‌گیری شده برای حذف اثرات نیروی اصطکاک و موج‌های نیرویی، از تناسب بین جابه‌جایی و نیروی خالص اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (10) برای تعیین ضریب سختی استفاده شد.

## 5- صحنه‌گذاری تجربی

### 5-1- صحنه‌گذاری الگوریتم تخمین نیرو

برای صحنه‌گذاری الگوریتم تخمین نیروی برشی، ابتدا طی آزمون‌هایی نیروهای ماشین‌کاری با یک دینامومتر کیستلر<sup>4</sup> 9257B اندازه‌گیری شدند (شکل 4). سپس این نیروها با توجه به حداکثر نیروی قابل تحمل میز، با ضریب مناسب کوچک‌نمایی شدند و به صورت اغتشاش به حلقه سرو کنترل موتورهای خطی تزریق شدند. برای حذف اثر نیروی اصطکاک و موج‌های نیرویی، کنترلر در حین تزریق نیروهای ماشین‌کاری، میز را در یک نقطه ثابت نگه می‌داشت. تخمین نیروهای ماشین‌کاری در سرعت 150 دور بر دقیقه در شکل نشان داده شده است.

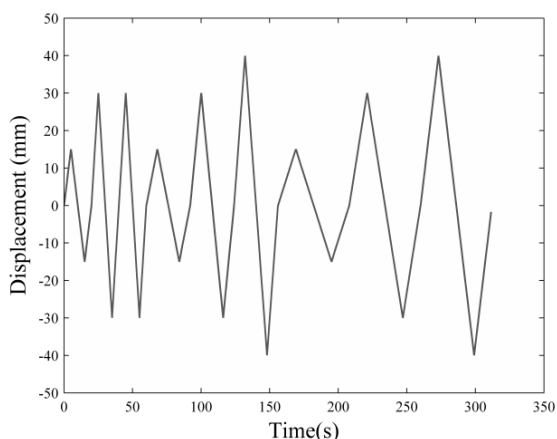


Fig. 4 Ramp trajectories used for verification of the network

شکل 4 مسیرهای شیب استفاده شده برای صحنه‌گذاری شبکه عصبی

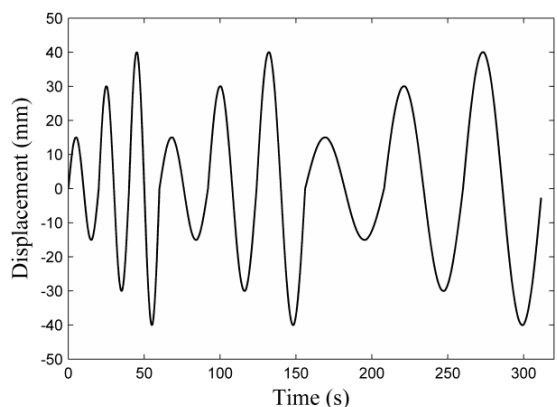


Fig. 5 Sine trajectories used for training of the network

شکل 5 مسیرهای سینوسی استفاده شده برای صحنه‌گذاری شبکه عصبی

استفاده از روش متداول سعی و خطا، از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده گردید. نتایج آزمون‌های طراحی شده در جدول 1 گزارش شده‌اند. نتایج آنالیز واریانس‌ها در جدول 2 ارائه شده است. با توجه به اینکه مقدار P در مورد همه عوامل بیشتر از 0.05 است، بنابراین "یک رابطه معنا دار بین این پارامترهای ساختاری و کارایی شبکه وجود ندارد". این بدان معنا است که هر شبکه‌ای که ساختار آن از میان سطوح تعیین شده انتخاب گردد، عملکرد آن قابل قبول است. به همین دلیل از این میان شبکه‌ای با یک لایه پنهان 16 گره‌ای و دو تاخیر زمانی در ورودی که در عین سادگی، عملکرد قابل قبولی هم داشت، انتخاب گردید.

برای مدل کردن اصطکاک و موج‌های نیرویی، یک شبکه چند لایه پرسپترون<sup>1</sup> با خطوط نگهدارنده تاخیری<sup>2</sup> در ورودی و تابع انتقال سیگموئید انتخاب شد. الگوریتم پس‌گرا لوبنبرگ-مارکواردت<sup>3</sup> با ممنوعیت برای بروزسانی وزن‌ها و بایاس‌ها استفاده شد. در نهایت شبکه طراحی شده، با مسیرهای شیب و سینوسی نشان داده شده در شکل 4 و شکل 5 صحنه‌گذاری شد. شکل 6 و 7 نیز نشان می‌دهد که شبکه طراحی شده توانایی خوبی در تخمین اصطکاک و موج‌های نیرویی در امتداد مسیرهای شیب و سینوسی داراست.

## 4- مدل خمش ابزار

بعد از طراحی الگوریتم تخمین نیرو، لازم است از مدلی برای خمش ابزار استفاده شود. در این پژوهش از رابطه زیر برای خمش ابزار استفاده شد:

$$\delta_{est} = \frac{F_{est}}{k_t} \quad (10)$$

که در آن  $\delta_{est}$  خمش ابزار،  $F_{est}$  نیروی ماشین‌کاری تخمین زده شده، و  $k_t$  سختی ابزار است. برای بدست آوردن سختی از روشی که الهام گرفته شده از

جدول 1 آزمون‌های طراحی شبکه عصبی و نتایج آن

Table 1 Experiments for design of the neural network and the results

شماره آزمایش	تعداد لایه پنهان	تعداد گره‌ها	تعداد تاخیرها	کارایی شبکه
1	1	10	6	0.0288
2	3	16	2	0.0243
3	1	16	2	0.0333
4	3	10	6	0.0294
5	1	10	6	0.0556
6	3	16	2	0.0279
7	1	16	2	0.0240
8	3	10	6	0.0290
9	1	10	6	0.0299
10	3	16	2	0.0256
11	1	16	2	0.0538
12	3	10	6	0.0243
13	2	14	4	0.0262
14	2	14	4	0.0420
15	2	14	4	0.0250

جدول 2 نتایج تحلیل واریانس‌ها در تعیین عامل موثر در عملکرد شبکه

Table 2 Results of ANOVA in determination of effective factors on neural networks performance

عامل	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P
لایه‌ها	1	0.63	0.447
گره‌ها	1	1.28	0.284
تاخیر	1	1.36	0.271

<sup>1</sup> multi-layer perceptron (MLP) network

<sup>2</sup> tapped delay lines

<sup>3</sup> Levenberg- Marquardt back propagation algorithm

<sup>4</sup> Kistler

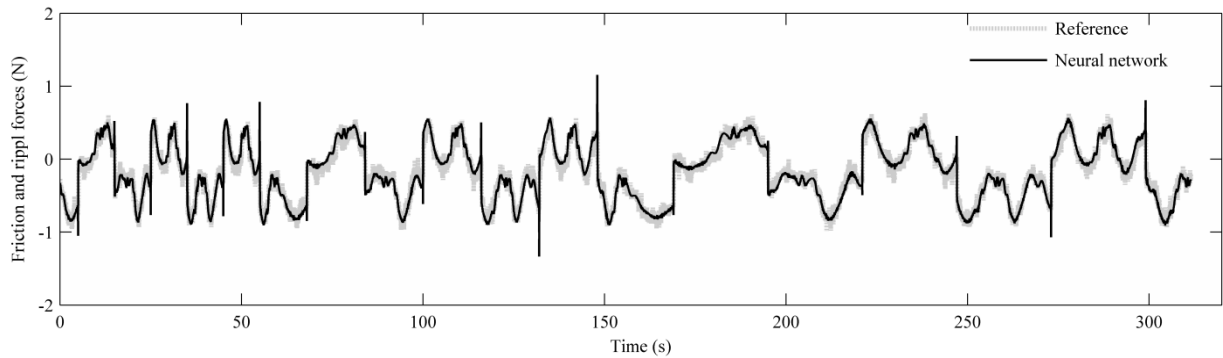


Fig. 6 Verification of the neural network with ramp trajectories in Fig. 4

شکل 6 صفحه‌گذاری شبکه عصبی با مسیرهای شیب نشان‌داده شده در شکل 3

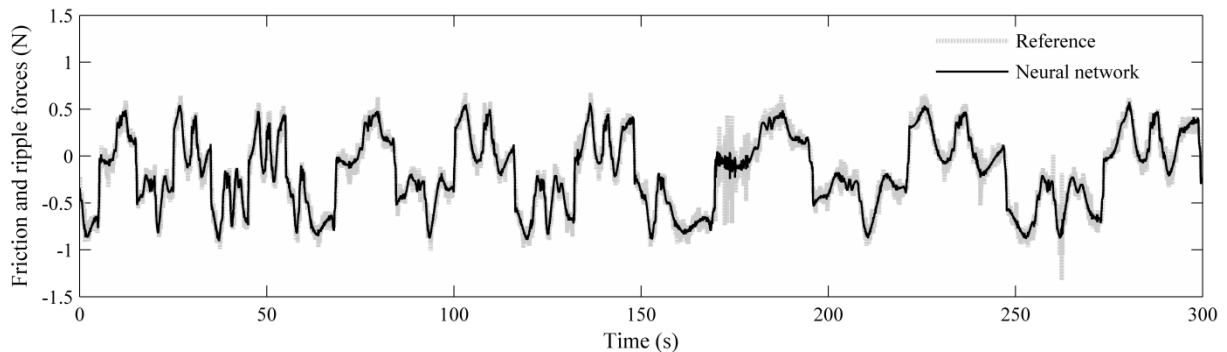


Fig. 7 Verification of the neural network with sin trajectories in Fig. 5

شکل 7 صفحه‌گذاری شبکه عصبی با مسیرهای سینوسی نشان‌داده شده در شکل 4

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این سرعت دورانی تطابق قابل قبولی بین نیروی ماشین‌کاری و نیروی تخمینی وجود دارد. با بالاتر رفتن سرعت دورانی اسپیندل از دقت تخمین به علت اختلاف فاز ظاهر شده و نیز کاهش دامنه نیروی تخمینی کاسته می‌شود. ولی آزمون‌های تجربی نشان داد که در سرعت‌های بسیار بالا (سرعت‌هایی که برای میکروفزکاری استفاده می‌شود و در این پژوهش حدود 18000 دور بر دقیقه)، خروجی تخمین‌گر به نیروی متوسط ماشین‌کاری که مولفه استاتیکی نیروی تخمینی است، همگرا می‌شود. برای تخمین خمش ابزار، تنها داشتن مولفه استاتیکی نیرو کافی است.

درگام بعدی، از تخمین‌گر نیرو برای اندازه‌گیری نیروی میکروفزکاری استفاده شد. برای این منظور تعدادی قطعه مربعی شکل و تعدادی قطعه دایره‌ای شکل ماشین‌کاری و نیروهای ماشین‌کاری با دینامومتر اندازه‌گیری شدند. قطعات مربعی شکل امکان ارزیابی عملکرد تخمین‌گر نیرو را در راستای هر یک از محورها فراهم می‌کند. قطعات دایره‌ای شکل نیز امکان ارزیابی در هنگام حرکت دو بعدی میز را مهیا می‌کنند. تزریق نیروهای اندازه‌گیری شده در حلقه سرو کنترل و مقایسه آنها نشان می‌دهد که تخمین‌گر طراحی شده، قادر است نیروهای میکروفزکاری را با دقت قابل قبولی تخمین بزند (شکل و شکل). در نهایت قطعات مزبور بر روی میز نصب شدند و عملیات میکروفزکاری صورت گرفت. خروجی تخمین‌گر بعد از اصلاح نیروهای اغتشاشی با نیروهای اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر در تطابق بود.

## 2-5 - آزمون‌های تجربی صفحه‌گذاری تخمین خمش

برای صفحه‌گذاری روش خمش ابزار، تعداد پنج قطعه دایره‌ای شکل با شرایط

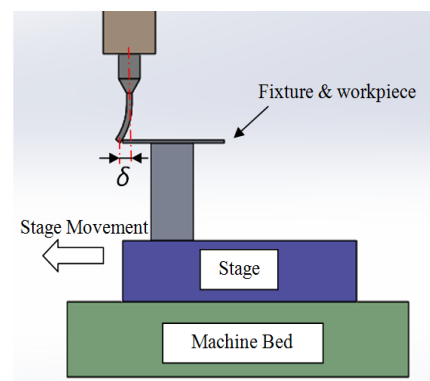


Fig.8 Calculation of tool stiffness

شکل 8 محاسبه سختی ابزار



Fig.9 Measurement of cutting forces by a dynamometer

شکل 9 اندازه‌گیری نیروهای ماشین‌کاری با استفاده از یک دینامومتر

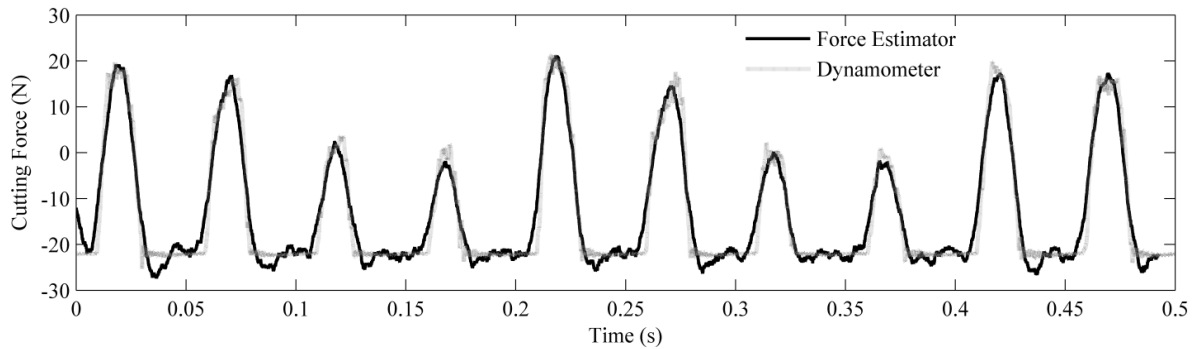


Fig. 10 Measured and estimated cutting forces

شکل 10 نیروهای ماشین کاری اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده

است.

همانطور که مشاهده می‌شود، متوسط خطا برای قطعات دایره ای شکل حدود 22 درصد است. این خطا دارای چهار منشا است: خطا در تخمین نیروهای میکروفرزکاری، خطا در تخمین نیروهای اغتشاشی و اصلاح آنها، خطا در مدل خمش ابزار، و اثر انباشتگی خطا در هر دو محور. آزمون‌های بیشتری که بر روی قطعات مربعی شکل انجام گرفت نشان می‌داد که متوسط خطا در هر محور حدود 17 درصد است. در جدول 5 روش پیشنهادی در این پژوهش با روشهای بکار گرفته شده در پژوهش‌های مشابه پیشین مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، خطای این روش در مقایسه با روشهای مشابه، قابل قبول است.

#### 6- نتیجه گیری

در این پژوهش، روشی برای تخمین خمش ابزار میکروفرزکاری ارائه شد. در این روش از سیگنال‌های موتورهای خطی که معمولاً در ماشین‌های میکروفرز استفاده می‌شوند، برای تخمین نیرو استفاده گردید. خلاصه نتایج بدست آمده به شرح ذیل است.

جدول 3 شرایط ماشین کاری آزمون‌های تجربی

Table 3 Machining conditions of experiments	
مشخصه	توضیحات
نوع عملیات	فرزکاری کناری
سرعت دورانی	18000rpm
نرخ تغذیه	400 تا 680 mm/min
هندسه قطعات	دایره ای شکل با قطر 24.6mm ضخامت 1mm
قطر ابزار برشی	1mm
جنس قطعات	فولاد زنگ نزن

جدول 4 اندازه پیش بینی شده قطعات با در نظر گرفتن خطای خمش ابزار برشی و مقایسه با اندازه واقعی قطعات

Table 4 Predicted and measured diameter of parts considering cutting tool deflections			
نمونه <sup>(*)</sup>	اندازه پیش بینی شده (mm)	اندازه واقعی (mm)	درصد خطا
نمونه شماره 1	24.77	24.80	18%
نمونه شماره 2	24.80	24.82	10%
نمونه شماره 3	24.77	24.82	29%
نمونه شماره 4	24.76	24.80	25%
نمونه شماره 5	24.78	24.83	28%

<sup>(\*)</sup> نمونه‌ها قطعات دایره ای شکل با قطر 24.6 هستند.

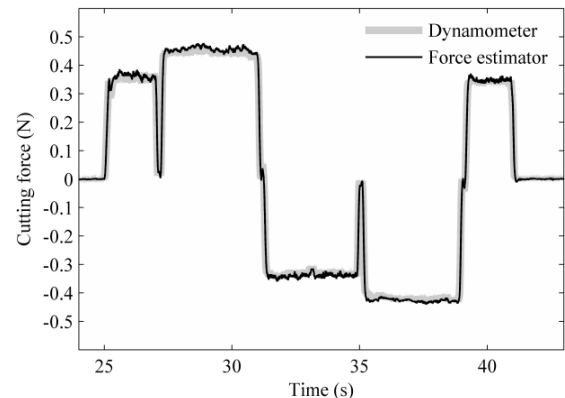


Fig. 11 Estimated micro-milling cutting forces around a square part

شکل 11 نیروهای میکروفرزکاری تخمینی در پیرامون یک قطعه مربعی شکل

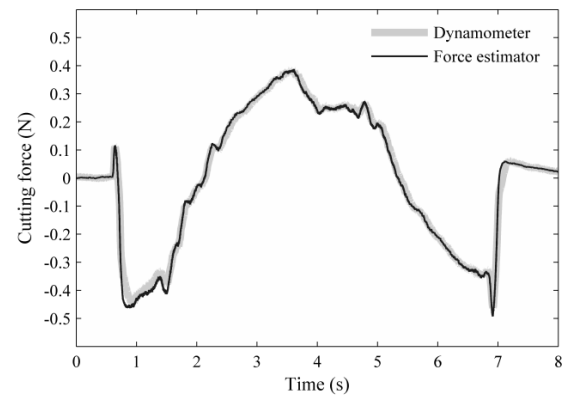


Fig. 12 Estimated micro-milling cutting forces around a round part

شکل 12 نیروهای میکروفرزکاری تخمینی در پیرامون یک قطعه دایره ای شکل

توصیف شده در جدول ماشین کاری شدند تا بتوان اثر دو بعدی خطای خمش و تاثیر آن بر مشخصه های دو بعدی را نیز ارزیابی نمود (شکل 1). سرعت دورانی و نرخ تغذیه بر اساس مقاومت ابزار و توصیه سازنده ابزار انتخاب شده اند. با توجه به اینکه خمش ابزار معمولاً در ماشین کاری قطعات مستحکم قابل توجه و چالش برانگیز است، برای آزمون‌ها از قطعات فولاد زنگ نزن استفاده شد. فرزکاری کناری نیز اندازه‌گیری قطعات را تسهیل می‌کند و این امکان را فراهم می‌کند که با میکرومتر خارجی با عدم قطعیت مناسب اندازه‌گیری قطعات انجام شود. اختلاف بین اندازه نامی و مقدار اندازه‌گیری شده قطر قطعات، نشان دهنده مقدار واقعی خمش ابزار فرض می‌شود (شکل 1). اختلاف بین این مقدار و مقداری که الگوریتم تخمین می‌زند، نشانگر خطای تخمین است. در جدول نتایج این آزمون ارائه شده

1- برای تخمین نیرو، می‌توان از پسخوراند موقعیت و جریان کنترلی ورودی به آمپلی‌فایرها استفاده کرد. روش پیشنهاد شده در این مقاله، یک روش مدل مینا است. نشان داده شد که با یک مدل درجه دو برای موتورهای خطی، می‌توان به تخمین قابل قبولی از نیروهای ماشین‌کاری دست یافت.

2- استفاده از فیلتر کالمن، امکان فیلتر کردن نویزهای اندازه‌گیری و کاهش اثرات آنها را فراهم نمود. از طرف دیگر باعث کاهش اثرات عدم قطعیت مدل می‌شود. وجود پارامترهای تنظیم کننده در فیلتر، امکان ایجاد مصالحه ای بین دقت تخمین و کاهش اثرات نویز و عدم قطعیت مدل را فراهم می‌کند. این ویژگی روش فیلتر کالمن، مزیت این روش تخمین نیرو بر روشهایی است که مبتنی بر دینامیک معکوس سیستم هستند.

3- روش تخمین ارائه شده، قادر است با دقت خوبی هر دو مولفه دینامیکی و استاتیکی نیروی برشی را در فرکانسهای پایین تخمین بزند. ولی با افزایش سرعت دورانی، از دقت تخمین مولفه دینامیکی کاسته می‌شود، ولی دقت مولفه استاتیکی همچنان بادقت بالایی تخمین زده می‌شود. در سرعت‌های دورانی بسیار بالا که برای میکروفزکاری انجام می‌شود (در این مقاله 18000 rpm)، تخمین گر، مولفه‌های دینامیکی را کاملاً فیلتر می‌کند و با دقت خوبی، نیروی استاتیکی را تخمین می‌زند. برای تخمین خمش ابزار، تنها به تخمین دقیق نیروهای استاتیکی میکروفزکاری نیاز است.

4- برای بدست آوردن خمش ابزار از نیروهای ماشینکاری یک مدل تجربی ارائه شد. در این مدل تجربی، با استفاده از حرکت‌های بسیار ظریف میز به نوک ابزار نیرو اعمال می‌گردد و جابه‌جایی میز که باعث اعمال نیرو و خمش نوک ابزار می‌شود همراه با نیروی تخمین زده شده معادل ذخیره می‌شوند. سفتی ابزار از این داده‌ها تخمین زده می‌شود.

5- در این روش، برای داشتن یک تخمین دقیق، نیاز به تخمین و جبران اثرات نیروهای اغتشاشی نظیر اصطکاک وجود دارد. به این منظور، استفاده از شبکه‌های عصبی پیشنهاد شد. نشان داده شد که یک شبکه عصبی با یک لایه پنهان و 14 گره در آن به خوبی می‌تواند برای این هدف استفاده شود. استفاده از شبکه‌های عصبی به جای شناسایی این نیروها در طول مسیر ماشینکاری باعث کاهش زمان کل فرآیند می‌شود. البته استفاده از شبکه‌های عصبی همراه با خطاهایی نیز هست، ولی آزمون‌های صحه‌سنجی نشان داد که این میزان خطا قابل قبول است.

6- آزمون‌های طراحی شده برای صحه‌گذاری الگوریتم تخمین خطای خمش ابزار در قطعات دایره‌ای شکل نشان داد که این روش قادر است به طور متوسط 78 درصد خمش دو بعدی ابزار میکروفز را تخمین بزند. همچنین این روش به طور میانگین 83 درصد خمش در راستای هر محور را می‌تواند تخمین بزند. خطا در تخمین نیروی ماشین‌کاری، خطا در تخمین نیروهای اغتشاشی، خطا در مدل خمش ابزار، و خطای تجمعی خمش ابزار در راستای هر محور، از منابع خطاهای این روش تخمین می‌باشند.

#### 7- فهرست علائم

$F_{load}$	نیروهای مقاوم در موتور خطی (N)
$G(s)$	تابع تبدیل موتور خطی (mm/amp)
$K$	بهره کالمن فیلتر
$k_t$	سختی ابزار برشی (N/mm)
$P$	حل متقارن مثبت معادله جبری ریکاتی
$w$	فرایند تصادفی

#### علائم یونانی



Fig. 13 Installation of the stage and fixture, and conducting machining experiments

شکل 13 نصب میز دو محوره و فیکسچر نگهدارنده قطعه و انجام آزمون‌های ماشین‌کاری



$D_m =$  Average of 7 measurements of actual diameter  
 $D_n =$  Nominal diameter  
 $\delta_a =$  Actual tool deflection  
 $\delta_a \approx D_m - D_n$

Fig. 14 Calculation of tool deflection error

شکل 14 محاسبه خطای خمش ابزار

جدول 5 مقایسه پژوهش حاضر با روش‌های دیگر تخمین به‌هنگام خمش ابزار در پژوهش‌های پیشین

Table 5 Comparison of presented method with other on-line methods

درصد خطا	مدل خمش ابزار	فرایند، روش تخمین	محققان
25%	مدلی تجربی از خطای سطح با پارامترهای ورودی نیرو، ابزار و پارامترهای ماشینکاری	فرزکاری سنتی، استفاده از کرنش سنج در واسط ابزار	یانگ و چوی [20]
*	اندازه‌گیری مستقیم سختی ابزار و مدل خمش-نیرو	میکروفزکاری، استفاده از یک مدل نیرویی و همزمان دینامومتر	هود [9]
10-50%	رابطه تیرها، تیر یک سر درگیر	فرزکاری سنتی، استفاده از دینامومتر	دنکا [10]
25%	اندازه‌گیری جابه‌جایی نقطه‌ای از ابزار با حسگر جابه‌جایی و استنتاج خمش در نوک ابزار	فرزکاری سنتی، استفاده از اندازه‌گیری مستقیم خمش	شیمانان [11]
23-33%	استفاده از یک مدل ساده تیر یک سر درگیر	میکروفزکاری، استفاده از دینامومتر	هئو [9]
10-29%	استفاده از رابطه نیرو-جابه‌جایی و محاسبه تجربی سختی ابزار	میکروفزکاری، تخمین از سیگنال‌های موتورهای خطی میز تغذیه	پژوهش حاضر

<sup>(\*)</sup> از این روش برای حذف خطای سیستماتیک یک مسیر شیب‌دار استفاده شده و مقدار خطا گزارش نشده است.

repeated machining process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, No. 3, pp. 205–213, 1998.

- [9] D. Hood, S. Clayton, G. Buckner, T. A. Dow, K. Garrard, Closed loop control of milling tool deflection, *ASPE Proceedings*, Vol 27, pp. 623-627, 2003.
- [10] B. Denkena, J. C. Will, B. Möhring, Tool deflection compensation with an adaptronic milling spindle, *International Conference on Smart Machining Systems ICSMS*, Gaithersburg, USA, 2007.
- [11] K. Shimana, E. Kondo, D. Shigemori, S. Yamashita, Y. Kawano, N. Kawagoishi, An approach to compensation of machining error caused by deflection of end mill, *Procedia CIRP*, Vol. 1, No. 1, pp. 677–678, 2012.
- [12] B. Denkena, K. M. Litwinski, H. Boujnah, Detection of tool deflection in milling by a sensory axis slide for machine tools, *Mechatronics*, Vol. 34, No.1, pp. 95–99, 2016.
- [13] S. Heo, M. Lee, S. H. Kim, W. Lee, B. K. Min, Compensation of tool deflection in micromilling using workpiece holder control device, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 16, No. 6, pp. 1205–1208, 2015.
- [14] K. K. Tan, T. H. Lee, S. Huang, *Precision Motion Control, Design and Implementation*, 2nd edition, London, U.K: Springer-Verlag, 2008.
- [15] M. Hou, R. J. Patton, Input observability and input reconstruction, *Automatica*, Vol. 34, No. 6, pp. 789–794, 1998.
- [16] S. S. Park, Y. Altintas, Dynamic compensation of spindle integrated force sensors with kalman filter, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 126, No. 3, pp. 443, 2004.
- [17] K. Erkorkmaz, Y. Altintas, High speed CNC system design, Part II: Modeling and identification of feed drives, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 10, pp. 1487–1509, 2001.
- [18] R. S. Blom, P. M. J. Van Den Hof, Estimating cutting forces in micromilling by input estimation from closed-loop data, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, Vol. 17, No. 1 PART 1, pp. 468–473, 2008.
- [19] S. N. B. Oliaei, Y. Karpat, Influence of tool wear on machining forces and tool deflections during micro milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, No. 9–12, pp. 1963–1980, 2016.
- [20] Y. Yang, J. G. Choi, A tool deflection System for End Milling Accuracy Improvement, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 120, No. 2, pp. 222-229, 1998.

$\sigma$  انحراف معیار استاندارد

$\delta$  خمش ابزار

زیر نویس‌ها

est تخمین زده شده

## 8- تقدیر و تشکر

در انجام این پژوهش از بودجه تحقیقاتی شماره SF025-2013 دانشگاه مالایا بهره گرفته شد. نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از دانشگاه مالایا که امکان استفاده از این بودجه تحقیقاتی را فراهم آوردند، اعلام می‌دارند.

## 9- مراجع

- [1] M. S. Heydarzadeh, S. M. Rezaei, N. A. Mardi, A. Kamali, E. Motion control of a two-axis linear motor-driven stage in the micro-milling process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 0, No. 0, pp. 1–12, 2016.
- [2] P. Li, *Micromilling of Hardened Tool Steels*, PhD Thesis, Delft University of Technology, 2009.
- [3] L. Uriarte, A. Herrero, M. Zatarain, G. Santiso et al., Error budget and stiffness chain assessment in a micromilling machine equipped with tools less than 0.3mm in diameter, *Precision Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 1–12, 2007.
- [4] G. Mijušković, P. Krajnik, J. Kopač, Analysis of tool deflection in micro milling of graphite electrodes, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 1–4, pp. 1–9, 2013.
- [5] D. Zdebski, *The Impact of Tool Performance on Micromachining Capability*, PhD Thesis, Cranfield University, 2012.
- [6] S. H. Suh, C. Jung Hoon, Incorporation of tool deflection in tool path computation: Simulation and analysis - ProQuest, *Journal Of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 190, 1996.
- [7] M. Soori, B. Arezoo, M. Habibi, Tool deflection error of three-axis computer numerical control milling machines, monitoring and minimizing by a virtual machining system, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 138, No. 8, pp. 81005, 2016.
- [8] C. C. Lo, C. Y. Hsiao, A method of tool path compensation for