



## تحلیل و اندازه گیری انحراف تیغه فرز انگشتی در فرز کاری فولاد (1/1740)

سعید امینی<sup>1\*</sup>، علیرضا صالحی<sup>2</sup>، احمد حسین پور<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

\* کاشان، صندوق پستی 8731751167، amini.s@kashanu.ac.ir

### چکیده

در این مقاله به بررسی انحراف تیغه فرز انگشتی در تحلیل تئوری و آزمایش در فرز کاری فولاد (1/1740) پرداخته می شود. به طور کلی انحراف تیغه فرز به دو دسته تغییر شکل استاتیکی و انحراف دینامیکی تقسیم می شود که جهت اندازه گیری آن ها با دانستن این که جهت پیشروی در راستای محور  $X$  است، ابتدا نیروی برآیند عمودی  $F_y$  توسط دستگاه دینامومتر اندازه گیری شده و سپس با داشتن پارامترهای ماشین کاری و مشخصات ابزار مانند: زاویه درگیری ورود، خروج ابزار و عمق درگیری ابزار با قطعه کار، انحراف تیغه فرز به صورت تئوری حاصل می گردد. نتایج به دست آمده از تحلیل تئوری با نتایج به دست آمده از آزمایش ها تطابق خوبی با یکدیگر داشته، به طوری که می توان انحراف تیغه فرز انگشتی را در فرآیند فرز کاری به دست آورد.

کلید واژگان: انحراف تیغه فرز انگشتی، فولاد 1/1740، دینامومتر

## Analysis and measurement of the milling tool deflection in machining of steel 1.1740

Saeed Amini\*, Alireza Salehi, Ahmad Hoseinpoor

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

\* P.O.B. 8731751167, Kashan, Iran, amini.s@kashanu.ac.ir

### ABSTRACT

This paper examines the deflection of milling tool in machining of steel (1.1740). In general, milling deflection divided into two categories: the static deformation and dynamic deflection. by considering feed direction along the x-axis, these two deflections can be obtained by first measuring the resultant vertical force ( $F_y$ ) using dynamometer. Considering the machining parameters and tools specifications such as entry swept angle, exit tools angle and cutting depth, milling deflection has been theoretically determined. The results of the theoretical analysis were in good agreement with the results of experiments. So, the deflection of milling tool can be obtained in the milling process.

Keywords: Dynamometer, Milling Tool Deflection, Steel 1.1740.

### 1- مقدمه

امروزه فرآیند فرز کاری به یکی از پرکاربردترین و متداول ترین شیوه های تولید تبدیل شده است و به همین منظور جهت برخورد با خطای حاصل از تغییر شکل ابزار نیاز به تحلیل و اندازه گیری آن ها وجود دارد. در این پژوهش فرز کاری دیواره های قطعات توسط محیط ابزار فرز انگشتی ماشین کاری می شود و انحراف تیغه فرز انگشتی توسط نیروی برآیند عمودی  $F_y$  ایجاد می شود. جهت بهینه کردن خطاهای حاصل از تغییر شکل ابزار، روش های متنوعی وجود دارد که از آن جمله می توان به روش طراحی فرآیند اشاره نمود. در این روش، شرایط ماشین کاری (پیشروی، عمق برش، سرعت برشی و غیره) با در نظر گرفتن محدودیت در نیروهای برشی و خطای سطح بهینه می گردند [1-4]. انحراف در تیغه فرزهای مارپیچ نسبتاً پیچیده است [5]. نیروهای برش ثابت نیستند و زاویه مارپیچ لبه های تیغه فرز بر روی نیروهای برش در راستای محور  $Z$  برش تأثیر می گذارد [6]. آلتینتاس و بوداک در سال 1993 مدلی ارائه کردند که دقت ابعادی در فرز کاری محیطی را بهبود می بخشد [7]. انگین و آلتینتاس در سال 2001 هندسه و دینامیک تمام تیغه فرزهای انگشتی را تحلیل و بررسی کردند [8]. ای پی ایکس یو و همکارانش در سال 2003 انحراف تیغه فرز انگشتی را تحلیل و بررسی کردند [9] و

فیلیپ و جین در سال 2006 اثر انحراف تیغه فرز انگشتی را در فرز کاری محیطی تحلیل و بررسی نمودند [10]. در این پژوهش بر اساس مدل ارائه شده توسط آلتینتاس [6]، برآیند نیروی عمودی  $F_y$  با توجه به سرعت های پیشروی و برشی مورد نظر، توسط دستگاه دینامومتر کیستلر مدل 9257B بر روی نمونه های آزمایشی اندازه گیری شده و سپس در تحلیل تئوری با داشتن نیروهای عمودی  $F_y$  به ازای هر دندانه توسط دینامومتر، انحراف تیغه فرز انگشتی بدست آمده و سپس با انحراف نمونه های آزمایشی مطابقت داده شد و نمودارهای آن رسم گردید.

### 2- تحلیل تئوری انحراف (خطای شکلی) تیغه فرز انگشتی در فرز کاری محیطی

در این نوع فرز کاری دیواره های قطعات توسط محیط تیغه فرز انگشتی ماشین کاری می شود. اگر قطر موثر ابزار  $d$  و ارتفاع ابزار تا ابزارگیر  $l$  باشد، انحراف استاتیکی ایجاد شده توسط نیروی عمودی  $F_y$  در انتهای آزاد ابزار از رابطه (1) بدست می آید [6].

$$\delta y = \frac{F_y}{k} \quad (1)$$

و در آن  $K$  و  $I$  از معادلات (2) و (3) به دست می آیند.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. Amini, S. Amini, A. Salehi, A. Hoseinpoor, Analyze and measure the deflection the finger milling in steel (1.1740), *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 522-525, 2015 (in Persian فارسی)

ضخامت هر جزء دیسکی عبارت است از:

$$\Delta z = \frac{a}{M} \quad (12)$$

بنابراین نیروی عمودی  $F_y$  به ازای هر جزء دیسکی از معادله (12) برابر است با (شکل 2):

$$\Delta F_{y,m}(\Phi) = kt \cdot c \cdot \Delta z \sum_{j=0}^{N-1} [\sin(\Phi_j(z)) - kr \cdot \cos(\Phi_j(z))] \cdot \sin(\Phi_j) \quad (13)$$

زاویه تماس برای جزء دیسکی  $m$  به صورت معادله (13) بیان می‌شود.

$$\Phi_j(m) = \Phi + (j-1)\Phi_p - k\beta \cdot m\Delta z \quad (14)$$

و در نتیجه انحراف تیغه فرز انگشتی طبق رابطه (14) بیان می‌شود.

$$\delta y(zk, m) = \begin{cases} \frac{\Delta F_{y,m}(vm)^2}{6EI} (3vm - vk) & 0 < vk < vm \\ \frac{\Delta F_{y,m}(vm)^2}{6EI} (3vk - vm) & vm < vk \end{cases} \quad (15)$$

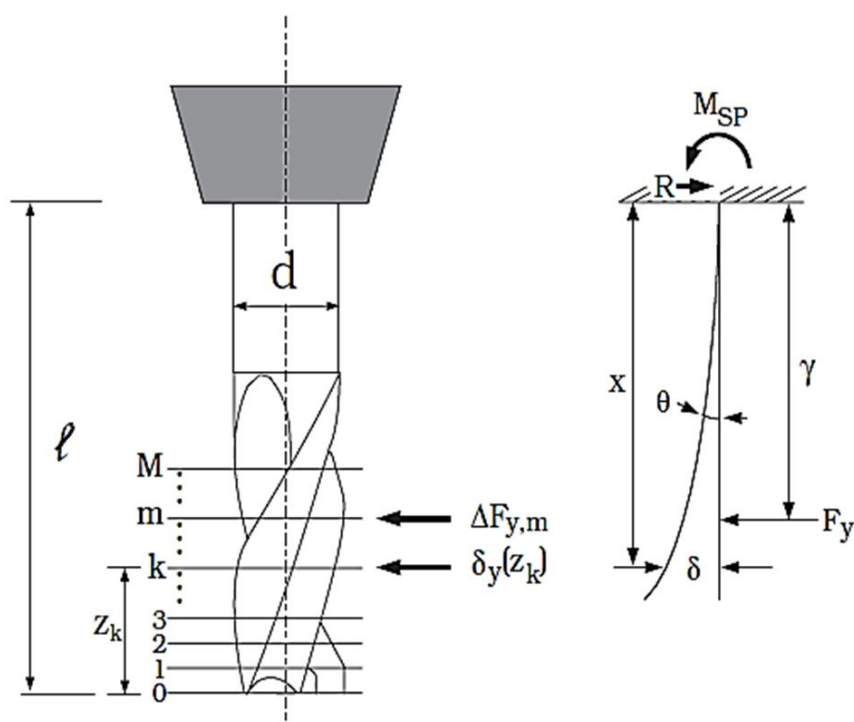
و انحراف تیغه فرز انگشتی از رابطه (16) برابر است با:

$$\delta y(zk) = \sum_{m=1}^M \delta y(zk, m) \quad (16)$$

### 3- تجهیزات و وسایل آزمایش

در آزمایش‌های انجام شده از ماشین فرز انیورسال مدل (zx6350za) استفاده شده است. این ماشین فرز دارای حداکثر سرعت اسپیندل (1300rpm) می‌باشد. ابزار مورد استفاده در این تحقیق، تیغه فرز انگشتی سر تخت 4 لبه از جنس فولاد تندبر (HSS) به قطر 6 میلی‌متر با زاویه ماریچ 30 درجه می‌باشد. مقدار طول لبه برنده تا ابزارگیر 36 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است نمونه‌های مورد آزمایش، قرص‌هایی از جنس فولاد (1/1740) به ضخامت 4 میلی‌متر می‌باشند و در موقعیت آزمایش بر روی نمونه، شیاری به ارتفاع 2 میلی‌متر ماشین‌کاری و برای آزمایش آماده گردید.

جهت اندازه‌گیری نیرو از دینامومتر پیزوالکتریک چند مولفه‌ای کیستلر مدل 9257B استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری اثر انحراف تیغه فرز بر روی قطعه کار از دستگاه اندازه‌گیری تصویری (VMM) استفاده شده است.



شکل 2 مدل تغییر شکل استاتیک یک تیغه فرز انگشتی [6]

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (2)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3)$$

به‌طور تقریبی قطر موثر ابزار (0/85-0/8) قطر ابزار در نظر گرفته می‌شود [6]. نیروی برش نسبت به ضخامت براده  $h$  برابر با رابطه (4) خواهد بود.

$$F_y(\phi) = kt \cdot a \cdot h(\phi) \cdot [\cos(\phi) + kr \cdot \sin(\phi)] \quad (4)$$

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است  $\phi$  زاویه درگیری نسبت به محور  $y$  می‌باشد و  $h(\phi)$  ضخامت براده می‌باشد.

$$h(\phi) = c \cdot \sin(\phi) \quad (5)$$

در رابطه (5)،  $c$  پیشروی به ازای هر دندانه است. هنگامی که ابزار برش در راستای محور  $y$  است. ضخامت براده صفر است. اگر موقعیت فرزکاری از نوع موافق باشد، زاویه درگیری  $\phi = \pi$  و اگر از نوع مخالف باشد، زاویه درگیری  $\phi = 0$  خواهد بود.

در شرایطی که دو یا چند لبه ابزار به‌طور همزمان در ناحیه برش وجود داشته باشند، نیروی برش هنگامی که یک دندانه در راستای محور  $y$  است، صفر نخواهد شد و شیارهای دیگر در ناحیه برش درگیر می‌باشند. از آنجا که نیروی برش  $F_y$  در این لحظه صفر نخواهد شد، جابجایی الاستیک تیغه فرز انگشتی، خطای شکلی روی سطح ایجاد خواهد کرد و این به دلیل زاویه ماریچ ابزار است [6]. با توجه به تعداد شیارها و عرض برش، ممکن است بیش از یک نقطه از لبه برش در راستای محور  $y$  و یا در تماس با سطح نهایی قطعه کار وجود داشته باشد. زاویه گام لبه برنده ( $\phi_p$ ) می‌باشد، بنابراین نقاط تماس را می‌توان با رابطه (6) تعیین نمود. پارامترهای این معادله در روابط (7) تا (11) آمده است.

$$\Phi_j(z) = \Phi + (j-1)\Phi_p - k\beta \cdot z \quad z=1,2,\dots,N-1 \quad (6)$$

$$\Phi_p = \frac{2\pi}{N} \quad (7)$$

$$k\beta = \frac{2 \cdot \tan(\beta)}{d} \quad (8)$$

در فرز کاری مخالف:

$$z = \frac{\Phi + (j-1) \cdot \Phi_p}{k\beta} \quad (9)$$

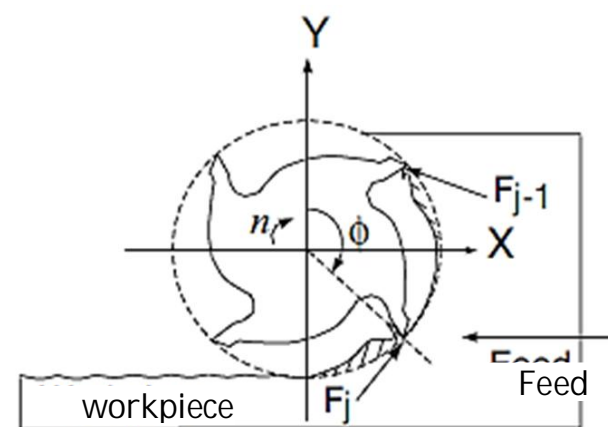
و در فرز کاری موافق:

$$z = \frac{\pi - (\Phi - (j-1) \cdot \Phi_p)}{k\beta} \quad (10)$$

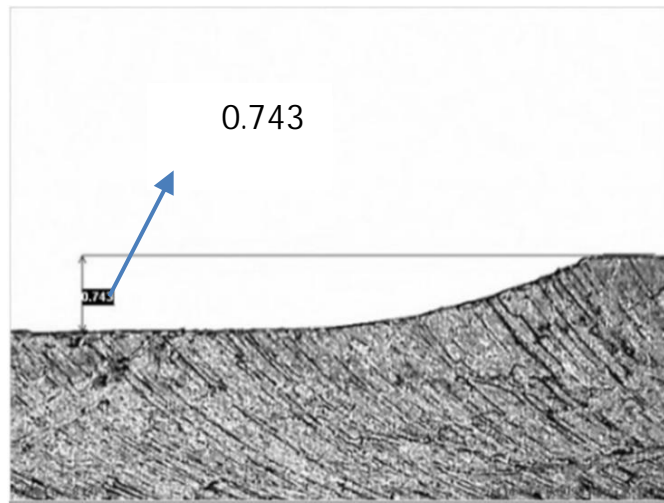
لبه برنده محیط تیغه فرز انگشتی می‌تواند به تعداد  $M$  جز دیسکی کوچک با توجه به عمق برش ( $a$ ) تقسیم گردد و به مقدار  $\Delta\Phi$  به ازای هر دندانه دوران داد.

$$\Phi = 0, \Delta\Phi, 2\Delta\Phi, \dots, \Phi_p \quad (11)$$

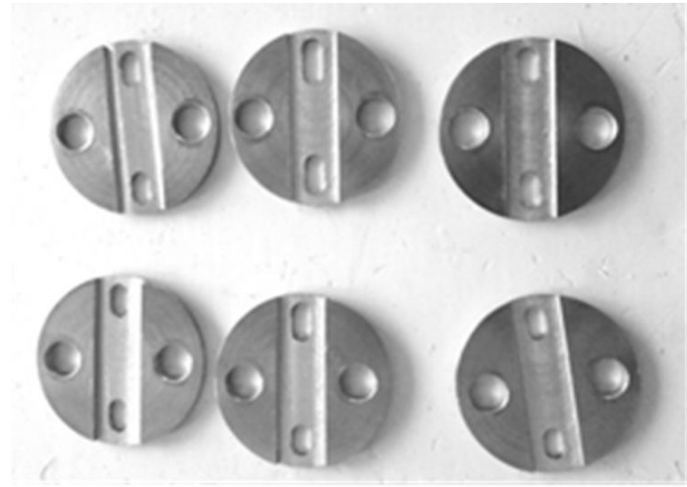
شکل 2 مدل تغییر شکل استاتیک یک تیغه فرز انگشتی را نشان می‌دهد.



شکل 1 فرآیند فرزکاری موافق [6]



شکل 6 تصویر اثر انحراف تیغه فرز انگشتی بر روی نمونه آزمایشی



شکل 3 نمونه های آزمایش

#### 4- روش انجام آزمایش

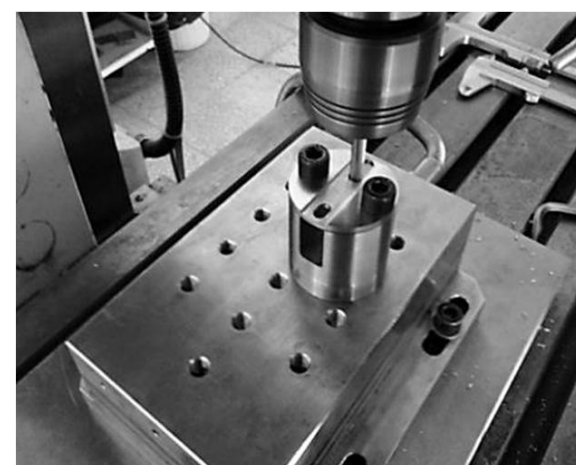
ابتدا به منظور کاهش خطای حاصل از لنگی تیغه فرز انگشتی در زمان بستن روی ماشین فرز، قبل از محکم کردن ابزارگیر به کمک ساعت اندازه‌گیری، 4 لبه ابزار را از لحاظ لنگی کنترل و سپس محکم کردن ابزارگیر انجام شد (شکل 4 و 5).

با توجه به این که هدف، به دست آوردن انحراف تیغه فرز انگشتی می‌باشد، در این روش ابتکاری، شرایط گیره‌بندی نمونه آزمایشی به گونه‌ای می‌باشد که هیچ‌گونه انحرافی از جهت نمونه آزمایشی وجود ندارد و صلب فرض گردیده شده است، در مقابل اثر و وضعیت انحراف تیغه فرز انگشتی بر روی نمونه آزمایشی ظاهر می‌گردد (شکل 6).

در این روش به منظور آشکار نمودن انحراف تیغه فرز انگشتی، ابتدا یک شیار به قطر 5 میلی‌متر و به طول حدودی 10 میلی‌متر در راستای حرکت پیشروی ابزار ایجاد گردید. هنگام آزمایش، تیغه فرز انگشتی مورد نظر از ابتدای شیار مربوطه، شروع به دیواره تراشی می‌کند و هنگامی که به انتهای شیار می‌رسد مانند آنچه در شکل 6 قابل مشاهده است در اثر اعمال نیروی عمودی  $F_y$  انحراف تیغه فرز انگشتی بر روی نمونه مشخص می‌شود.



شکل 4 ساعت نمودن ابزار



شکل 5 تصویر نمونه گیره‌بندی شده روی دینامومتر

#### 5- نتایج آزمایش و مقایسه با تحلیل تئوری

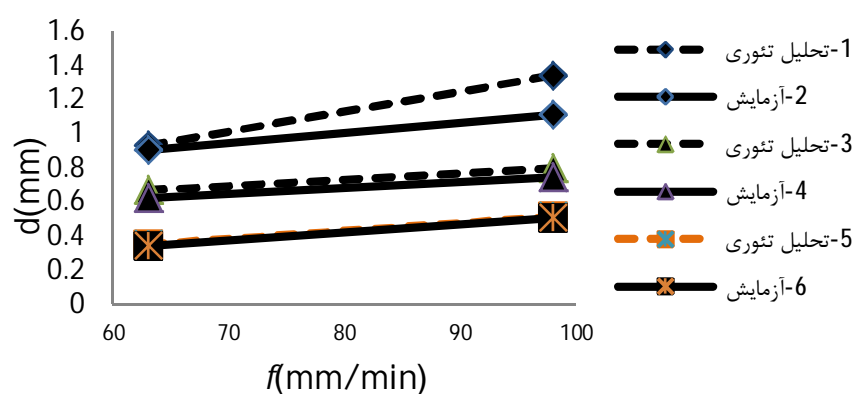
با توجه به این که هدف، بهینه کردن انحراف تیغه فرز انگشتی در طراحی فرآیند فرزکاری می‌باشد، در شرایط ماشین‌کاری (سرعت برشی و پیشروی) مختلف، آزمایش‌ها انجام شده و نمودارهای مربوط به آن به ازای انحراف تیغه فرز انگشتی به دست آمد که نتایج آن به شرح جدول 1 و شکل 7 بیان شده است.

در شکل 7 نمودارهای انحراف تیغه فرز انگشتی به ازای سرعت‌های پیشروی 63 میلی‌متر بر دقیقه و 98 میلی‌متر بر دقیقه بصورت تئوری و آزمایش به دست آمده اند که به صورت زیر تعریف شده‌اند.

الف) نمودارهای (1 و 2) در سرعت برشی 6/78 (m/min)

ب) نمودارهای (3 و 4) در سرعت برشی 10/64 (m/min)

ج) نمودارهای (5 و 6) در سرعت برشی 17/9 (m/min)



شکل 7 نمودارهای انحراف تیغه فرز انگشتی و سرعت پیشروی

جدول 1 شرایط ماشین‌کاری و آزمایش‌های انجام شده در حالت فرزکاری خشک

آزمایش	عمق برش محوری $a$ (mm)	سرعت پیشروی $f$ (mm/min)	سرعت برشی $v$ (m/s)	طول ابزار تا کولت $\ell$ (mm)	$Z_k$ (mm)
1	2	98	10/64	36	1
2	2	98	10/64	36	20
3	2	63	10/64	36	1
4	2	98	6/78	36	1
5	2	63	17/9	36	1
6	2	98	17/9	36	1
7	2	63	6/78	36	1



changing the path, *11th National Conference of manufacture and production*, 1389. (in Persian)

- [5] E. Budak, Y. Altintas, Modeling And Avoidance Of Static Form Errors In Peripheral Milling Of Plates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 3, pp. 907–918, 1995.
- [6] Y. Altintas, *Manufacturing Automation*, Second Editition, pp.30-80 Cambridge University Press, 2000.
- [7] E. Budak, Y. Altintas, Peripheral Milling Conditions For Improved Dimensional Accuracy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 7, pp. 907–918, 1994.
- [8] S. Engin, Y. Altintas, Mechanics and Dynamics of General Milling Cutters. Part I: Helical End Mills, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 15, pp. 2195–2212, 2001.
- [9] A. P. Xu, Y. X. Qu, D. W. Zhang, T. Huang, Simulation and experimental investigation of the end milling process considering the cutter flexibility, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 3, pp. 283–292, 2003.
- [10] Ph. Depince, J. Y. Hascoet, Active integration of tool deflection effects in end milling. Part 1: Prediction of milled surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 9, pp. 937–944, 2006.

جدول 2 درصد خطا در تحلیل تئوری و آزمایش

آزمایش	تحلیل تئوری	نتایج آزمایش	درصد خطا/
	$d_{theo}$	$d_{exp}$	
1	0/797	0/743	7/26
2	0/067	0/094	28/72
3	0/667	0/62	7/58
4	0/93	0/902	3/104
5	0/35	0/342	2/34
6	0/513	0/506	1/38
7	1/34	1/108	20/9

با مقایسه موارد مختلف در این شکل 7، ملاحظه می‌شود که برای سرعت‌های برشی بالا، نتایج تئوری با آزمایش‌ها تطابق خوبی داشته و از دقت خوبی برخوردار است، اما برای سرعت‌های برشی پایین به تدریج منحنی تئوری به‌دست آمده از نتایج تجربی دور می‌شود.

در سرعت پیشروی پایین نیز میزان انحراف تیغه فرز انگشتی کاهش پیدا کرده است و هرچه سرعت پیشروی افزایش پیدا می‌کند، انحراف تیغه فرز انگشتی نیز بیشتر شده است.

در سرعت‌های برشی بالا، انحراف تیغه فرز انگشتی کاهش پیدا کرده است و هرچه به سمت سرعت‌های برشی پایین می‌رود، میزان انحراف تیغه فرز انگشتی نیز افزایش پیدا کرده است.

لازم به توضیح است که مقطع انحراف تیغه فرز انگشتی اندازه‌گیری شده در تحلیل تئوری و آزمایش با توجه به  $(z_k)$  مربوط به سطح روی نمونه آزمایشی درگیر با تیغه فرز انگشتی می‌باشد.

با توجه به نمودارهای فوق مشاهده می‌شود که انحراف تیغه فرز اندازه‌گیری شده در آزمایش و تحلیل تئوری از سازگاری خوبی برخوردار می‌باشد.

در جدول 2 خطا بین نتایج آزمایش و تحلیل تئوری ناشی از عدم پوشش کلی فرضیات مدل تئوری در نظر گرفته شده با واقعیت می‌باشد که شامل موارد متفاوتی می‌باشد. از جمله، مشکل خارج از مرکزی ابزار می‌باشد که سبب خطا می‌گردد. دلیل دیگر فرض صلب بودن قطعه کار می‌باشد که در واقعیت چنین نبوده و با وارد شدن نیرو به لبه ابزار، خود ابزار و ماشین فرز و نمونه آزمایشی تغییر شکل می‌یابند و سبب ایجاد خطا می‌گردد. در آزمایش 2 به دلیل این‌که  $z_k$  متفاوت با بقیه آزمایش‌ها می‌باشد، انحراف تیغه فرز کمتر بوده و ضریب حساسیت خطا نیز بیشتر است و آزمایش 7 نیز چون در کمترین سرعت برشی و بیشترین سرعت پیشروی مورد نظر در این آزمایش انجام گرفته است، تحت شرایط خطایی بالاتری قرار گرفته و موارد خطایی ذکر شده را شامل می‌شود.

## 6- مراجع

- [1] Z. Yazar, K.F. Koch, T. Merrick, T. Altan, Feed rate optimization based on cutting force calculations in 3 axis milling of dies and moulds with sculptured surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 3, pp. 365–377, 1994.
- [2] J. Tlustý, S. Smith, W.R. Winfough. Techniques for the long slender end mill in high speed milling, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 393-396, 1996.
- [3] O.E.E.K. Omart, T. El-Wardany, E.Ng, M.A. Elbestawi, An improved cutting force and surface topography prediction model in end milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 7-8, pp. 1263 – 1275, 2007.
- [4] M. Habibi, M. Vahebi, B. Arezo, Error correction from deformed tools and machine tool geometric errors in three-axis milling machine by