

# The Analysis of Tool Deflection Error and Hydraulic Mechanism for Its Compensation in Machining

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Malboobi N<sup>1</sup>,  
Razfar M<sup>1</sup>,  
Fesharakifard R<sup>1\*</sup>

### How to cite this article

Malboobi N, Razfar M, Fesharakifard R. The Analysis of Tool Deflection Error and Hydraulic Mechanism for Its Compensation in Machining. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(01):57-66.

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

fesharaki@aut.ac.ir

### Article History

Received: June 11, 2022  
Accepted: September 26, 2022  
ePublished: January 27, 2023

## ABSTRACT

In this paper, the error of tool deflection in perpendicular to a milling process feed direction is investigated and novel compensation method to this error is proposed. While the end mill tool is machining, due to the existence of perpendicular disturbing force on the feed path while the endmill tool is machining, a deflection which reduces machining accuracy. If a compensation force is exerted to the middle of tool, the deflection can be reduced. By using a hydraulic actuator, the compensation force would be proportional to the disturbing machining force, in the opposite direction so that this error can be reduced. It is necessary to estimate disturbing forces and tool deflection magnitude in lateral side of machining precisely before applying the proportional force to the endmill. The first step endmill is modeled on SolidWorks and in the next step The machining operation is simulated to calculate the error causing force in which both the milling tool and the workpiece are 3D flexible. By obtaining the force results of the tool under different machining modes from Abaqus, a semi-analytical model is established on Simscape Multibody module of matlab software. By comparing Abaqus results the parameters of the lumped model are adjusted. The output force is extracted from Abaqus and put in tabular form the tool deflection is extracted from MATLAB SimScape which calculation speed is faster than the numerical model in this method. To find the compensating force, the beam theory obtains a factor of 3.2 times the machining force applied to the middle of the tool. This force is applied in open loop to the MATLAB model and the result indicates almost 70 percent reduction in the tool tip lateral deflection.

**Keywords** Compensation Error, Milling, Tool Lateral Deflection, Finite Element Simulation, Semi-Analytical Model

## CITATION LINKS

1- Tool deflection on peripheral milling 2- Tool wear estimation in micro-machining.Part I: tool usage-cutting force relationship 3- Milling process with finger tool ... 4- Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy 5- Tool deflection error of three-axis computer numerical control milling machines, monitoring and minimizing by a virtual machining system 6- An Approach to Compensation of Machining Error Caused by Deflection of End Mill 7- Approaches for improving cutting processes and machine tools 8- Cutting forces in micro-end-milling processes 9- Tool force and deflection compensation for small milling tools 10- Detection of tool deflection in milling by a sensory axis slide for machine 11- Tool deflection control by a sensory spindle slide for milling machine tools 12- Feeling machines for online detection and compensation of tool 13- simulation of end milling operation for predicting cutting forces to minimize tool deflection by genetic algorithm 14- Virtual compensation of deflection errors in ball end milling 15- Tool deflection compensation by drive signal-based force reconstruction and process control 16- Mechanics of materials ed.6<sup>th</sup> 17- M2 Molybdenum High Speed Tool Steel 18- Elimination of machining error ... 19-HSS M35 HIGH SPEED STEEL 20- Mass Scale Abaqus 21- A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors 22- Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy

## تحلیل خطا ناشی از انحراف ابزار و مکانیزم هیدرولیکی جبران آن در ماشینکاری

ناصر ملیوبی<sup>۱</sup>، دکتر محمدرضا رازفر<sup>۱</sup>، دکتر رسول فشارکی فرد<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله به جبران خطای ناشی از خیز ابزار در جهت عمود بر پیشروی حین براده برداری در فرزکاری پرداخته شده است. هنگام فرزکاری، بدلیل وجود نیروی مزاحم عمود بر پیشروی در ابزار، انحرافی رخ می دهد که دقت ماشینکاری را کاهش می دهد. با نیروی جبران کننده در میانه ابزار این خیز کاهش می یابد و برای ایجاد این نیرو می توان عملگر هیدرولیکی تعبیه کرد. بنابراین همزمان با ماشینکاری، نیرویی متناسب اما بر خلاف نیروی مزاحم اعمال خواهد شد تا این خطا کاهش یابد. بدین منظور نیروهای مزاحم در طول ماشینکاری و خیز ناشی از آن باید بدست آید و سپس نیروی متناسب به ابزار اعمال شود. قدم اول در سالیدورک فرز انگشتی مدل سازی و بعد به روش عددی، عملیات ماشینکاری برای محاسبه نیروی ایجاد کننده خطا (پارامتر خروجی) شبیه سازی می شود که در آن تیغه فرز و قطعه کار هر دو بصورت انعطاف پذیر سه بعدی می باشد. با یافتن نتایج نیرویی ابزار تحت حالات مختلف ماشینکاری (با سرعت پیشروی، دور و عمق و تعداد لبه متفاوت بعنوان پارامترهای کنترلی) از آباکوس، مدل نیمه تحلیلی ماشینکاری در ماژول Simscape Multibody متلب، ایجاد می شود. با مقایسه نتایج با آباکوس پارامترهای مدل توده ای متلب تنظیم می گردد. با استخراج نیرو بصورت جدولی از آباکوس و اعمال آن در متلب خیز سریع تر از مدل عددی بدست می آید. جهت یافتن نیروی جبران کننده (پارامتر خروجی)، از تئوری تیرها ضریب  $3/2$  برابر نیروی ماشینکاری برای اعمال به وسط ابزار حاصل می شود. این نیرو بصورت حلقه باز در مدل متلب وارد و نتیجه آن کاهش خطا در حدود ۷۰ درصد در میزان خیز جانبی نوک ابزار می شود.

**کلیدواژه ها:** جبران خطا، فرزکاری، خیز جانبی ابزار، شبیه سازی المان محدود، مدل نیمه تحلیلی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵

\* نویسنده مسئول: fesharaki@aut.ac.ir

### ۱- مقدمه

ماشینکاری با دستگاه فرز یکی از روش های مرسوم در زمینه قطعه سازی در صنعت می باشد. ماشین های فرز بنابر محورهای آن ها به فرز عمودی، افقی او نیورسال و غیره دسته بندی می شود. در این مقاله ماشین فرز عمودی مدنظر می باشد. در فرزکاری، نیروهای ماشینکاری بر روی ابزار که در واقعیت صلب نبوده و جسم انعطاف پذیر می باشد می تواند تغییراتی را ایجاد می کند که گاهی می تواند دقت ساخت را با چالش مواجه کند. از این رو باید با این مشکلات آشنا شد و در جهت رفع خطای ایجاد شده اقداماتی انجام داد.

اگر نیروهای ماشینکاری را در صفحه ای که جسم در حال تراشیده شدن است به دو مولفه عمود بر هم تجزیه کنیم نیرویی که در جهت پیشروی ابزار می باشد خیزی در ابزار بوجود می آورد که اهمیت چندانی نداشته و فقط ماشینکاری دیرتر یا زودتر انجام می شود. اما نیرویی که در جهت عمود بر پیشروی بر ابزار وارد می شود باعث خیز عمود بر جهت اصلی حرکت شده و دقت ماشینکاری را پایین می آورد و حذف این خطا از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

تا به امروز کارهای متفاوتی در جهت رفع این خطا انجام شده است. این بحث از دو منظر باید مورد توجه قرار گیرد، ابتدا شناخت نیروهای ماشینکاری مزاحم و سپس رفع خطای ناشی از آن ها که در گام اول بصورت خلاصه پیش بینی بر اساس المان بندی و استفاده از ماتریس دوران<sup>[1]</sup>، استفاده از ثوابت تجربی دستگاه و ابزار از کارهایی است که تا به امروز انجام شده است<sup>[5,1]</sup>.

از روش های دیگر استفاده از جداول نیرویی و شبیه سازی رایانه ای و استفاده از دینامومتر می باشد<sup>[6,7]</sup>. در روشی دیگر مدل سه بعدی در میکروفرزکاری با ابزار انگشتی مورد بررسی قرار می گیرد و تحلیل نیرویی می شود و این فرآیند با فرآیند ماکروفرزکاری مقایسه می شود<sup>[8]</sup>. برای ابزار با قطر کمتر از یک میلی متر از روش مدار باز می توان استفاده کرد که در آن نیروی برشی و نیروی محوری را شامل می شود. برای محاسبه انحراف ابزار بعنوان تابعی از عمق برش، براده برداری در هر دور و هندسه قطعه، سختی ابزار با مدل نیرویی ترکیب می شود<sup>[9]</sup>.

در گام دوم که مربوط به جبران خطا می باشد روش کنترل حرکت میز ماشینکاری<sup>[6]</sup>، اصلاح مسیر حرکت ابزار با اصلاح کدهای CNC، روش استفاده از اسپیندل لغزنده<sup>[10,11]</sup> از روش هایی است که می توان استفاده کرد. استفاده از قید و بند برای هدایت ابزار و استفاده از سرووموتور خارج از مرکز برای خنثی سازی خیز ابزار و روش آنلاین ماشین های حساس برای جبران و تشخیص خیز ابزار فرزکاری، استفاده از کرنش سنچ ها بر روی اسپیندل از جمله این روش ها می باشد<sup>[12]</sup>. در روشی دیگر پارامترهای ماشینکاری با الگوریتم ژنتیک با هدف کاهش انحراف ابزار بهینه سازی می شوند<sup>[13]</sup>. روش جبران خطا بوسیله اصلاح مسیر فرزکاری با جبران میزان انحراف را در ماشینکاری پره توربین ها در حالتی که پره توربین و ابزار انعطاف پذیر باشند می توان بکار برد<sup>[14]</sup>. در روشی جدیدتر از کنترلر و سیگنال های محرک مرکز فرزکاری برای جبران خطا استفاده شده است<sup>[15]</sup>.

روشی که برای شناخت این نیروها مدنظر بوده است برای شناخت نیروهای مزاحم از دینامومتر در تست تجربی و نرم افزار آباکوس در حالت سه بعدی و انعطاف پذیر گرفتن ابزار می باشد که در این حالت خیز ناشی از نیروهای ماشینکاری با استفاده از نرم افزار المان محدود قابل بررسی خواهد بود. در گام بعدی که مربوط به جبران خطا می باشد از سیم اسکپ متلب بهره گرفته شده است که

$$\xrightarrow{\text{superposition}} y_A = y_A' + y_A'' \quad (۸)$$

$$y_A = \frac{5FL^3}{48EI} - \frac{PL^3}{3EI} \quad (۹)$$

در حالت مطلوب خیز نوک تیغه فرز باید صفر شود و مقدار نیرویی که باعث خیز صفر تیر می‌شود بدست می‌آید [16]:

$$\xrightarrow{y_A=0} \frac{5FL^3}{48EI} = \frac{PL^3}{3EI} \rightarrow F = \frac{16}{5}P = 3.2P \quad (۱۰)$$

در جدول ۱ خواص مقاومت مصالحی ابزار و قطعه کار را مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای ابزار جنس تیغه فرز تجربی از M35 می‌باشد که از مواد مشابه آن M2 استفاده شده است و خواص آن از منبع [17] استخراج شده است. خواص آلومینیوم هم با توجه به منبع [18] بدست آمده است.

جدول ۱) خواص کلی ابزار و قطعه کار [17]

ضریب پواسون	مدول یانگ (پاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ابزار
۰/۳	$2/1 \times 10^{11}$	۸۱۶۰ (M2)	فولاد تندبر مولیبدنی
۰/۳۱	$74/4 \times 10^{10}$	۲۸۱۰ (AL 7075-T6)	آلومینیوم

### ۳- مدل جانسون کوک

به دلیل نرخ کرنش و دمای بالا در عملیات فرزکاری نمی‌توان از تنش تسلیم یا معادله پلاستیک معمولی استفاده کرد و به مدلسازی بر اساس سخت‌شوندگی نیاز است. به خاطر اینکه قطعه کار آلومینیومی براده‌برداری شده و تغییر شکل سریع اتفاق می‌افتد برای بیان رفتار آن از معادلات و ضرایب سخت‌شوندگی جانسون کوک استفاده شده است.

سخت‌شوندگی به این معنا می‌باشد که بعد از ناحیه تسلیم در نمودار تنش-کرنش ناحیه‌ای وجود دارد که در آن مقاومت ماده در برابر تغییر شکل بیشتر می‌شود که به آن ناحیه با کرنش سخت‌شوندگی می‌گویند. این ناحیه بین مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی واقع شده است.

### ۳-۱- مدل جانسون کوک برای تعیین تنش تسلیم

رابطه‌ی جانسون کوک اثرات تغییر شکل سریع (نرخ کرنش) و دمای قطعه را بر تنش تسلیم در حالت استاتیک بررسی و یک تنش تسلیم جدید را معرفی کرده است. این تنش تسلیم جدید که به خاطر آهنگ کرنش و عامل دما تحت تاثیر قرار می‌گیرد در محاسبات مدلسازی استفاده شده است. تنش تسلیم معادل  $\bar{\sigma}$  به صورت رابطه‌ی (۱۱) محاسبه شده است.

نیروهای ماشینکاری که از نرم افزار المان محدود بدست آمد بصورت ورودی به سیم‌اسکیپ داده می‌شوند و نیروی متناسب با نیروهای مزاحم ماشینکاری که با استفاده از روابط ریاضی مقاومت مصالح بدست می‌آید به مدل لامپ فرز که در سیم‌اسکیپ متلب شبیه‌سازی شده اعمال می‌شود و نهایتاً مقدار جبران خطا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

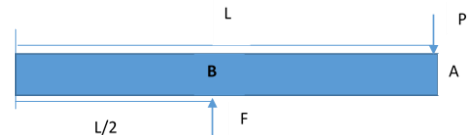
### ۲- روابط مقاومت مصالح

بمنظور بدست آوردن مقدار نیرویی که باید بر وسط ابزار اعمال شود از روابط مقاومت مصالح همانطور که در زیر می‌آید بهره برده می‌شود. بصورت تقریبی نیروی نوک ابزار بصورت نیروی متمرکز در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه تیغه فرز به همراه نگهدارنده آن بصورت تیر یکسرگیردار شبیه‌سازی شده است از روابط تیر یکسرگیردار استفاده می‌شود. مساله در جبران خطا بصورت دو نیروی اعمالی بر تیر یکسرگیردار مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود.

رابطه شیب و خیز تیر یکسرگیردار بصورت زیر می‌باشد:

$$y = \frac{PL^3}{3EI} \quad (۱)$$

$$\theta = \frac{PL^2}{2EI} \quad (۲)$$



شکل ۱) تیر یکسرگیردار با دو بارگذاری در انتها و وسط

$$\theta_B' = \frac{FL^2}{8EI} \quad (۳)$$

$$y_B' = \frac{F(\frac{L}{2})^3}{3EI} = \frac{FL^3}{24EI} \quad (۴)$$

$$y_A' = y_B' + \frac{L}{2} \theta_B' \quad (۵)$$

در حالتی که نیرو فقط در وسط تیر باشد:

$$y_A' = \frac{FL^3}{24EI} + \frac{FL^3}{16EI} = \frac{5FL^3}{48EI} \quad (۶)$$

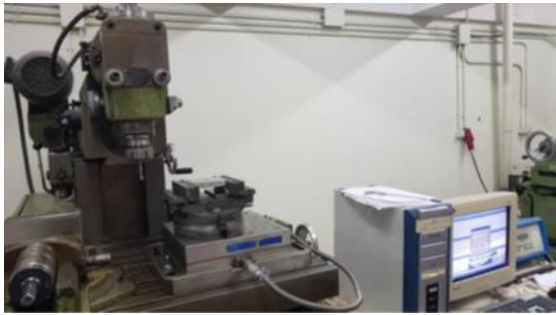
در حالتی که نیرو فقط در انتهای تیر باشد:

$$y_A'' = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (۷)$$

با استفاده از قضیه برهم نهی در حالتی که هر دو نیرو باشند داریم:

می‌شود. شکل ۲ ستاپ تجربی مورد استفاده را نشان می‌دهد. در رایانه، نرم افزار Dynoware پارامترهای ماشینکاری و ابزار و موقعیت قطعه کار تعریف می‌شود.

بعد از ماشینکاری عملیات شیارتراشی و پله‌زنی می‌توان انحراف ابزار را با کولیس مشاهده کرد که این کار طبق شکل ۳ برای جنس آلومینیوم 7075-t6 انجام شده است. با استفاده از دینامومتر نمودار نیرو بر حسب زمان ترسیم شده است که نمونه‌ای از آن در بخش نتایج با رنگ قرمز در نمودار مشخص شده است.



شکل ۲) ستاپ تجربی دینامومترکیسلر



شکل ۳) ماشینکاری آلومینیوم 7075-t6

#### ۴- شبیه سازی سه بعدی مدل انعطاف پذیر آباکوس

قطعه کار یک مکعب مستطیل به ابعاد ۶×۱۸×۱۸ و با ارتفاع ۴ میلی متر در نظر گرفته شده است. فرزند مورد استفاده در کار تجربی به قطر ۸ میلی متر از جنس فولاد تندبر M35 یا فولاد کبالتی است که با تحقیقی که در منابع به عمل آمد مشخصات جنس مشابه یعنی M2 که ۵ درصد کبالت نسبت به M35 کمتر دارد بدست آمد [19]. در این شبیه‌سازی چگالی برابر 8.16 kg/m<sup>3</sup> و نسبت پواسون 0.3 و مدول یانگ ۲۱۰ گیگا پاسکال که مشخصات M2 میباشد در نظر گرفته شد.

ابزار در نرم افزار سالیدورک با قطر ۸ میلی متر شبیه سازی شده است که بصورت دو لبه مشابه نتایج تجربی و بصورت تک لبه در نظر گرفته شده است. سایر ویژگی‌های هندسی آن در جدول ۴ مشاهده می‌شود. در عمق های ۰/۳، ۰/۵ میلی متر در حالت دولبه و تک لبه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در دو سرعت پیشروی متفاوت ۲/۵ و ۳ میلی متر بر ثانیه و همچنین دو سرعت چرخشی مختلف ۳۸۰ و ۳۱۳ بر دقیقه در نظر گرفته شد. در مازول

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^{pln}] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 - \hat{\theta}^m) \quad (11)$$

در معادله‌ی جانسون کوک مجموعاً سه عبارت وجود دارد. عبارت اول از سمت چپ  $[A + B\bar{\epsilon}^{pln}]$  که در آن تنش تسلیم اولیه و اثر کرنش سختی وجود دارد. در عبارت بعدی  $[1 + C \ln \dot{\bar{\epsilon}}^{pl}]$  رفتار ویسکوزیته ماده و اثر نرخ کرنش بر تنش تسلیم ماده و در عبارت آخر  $[1 - \hat{\theta}^m]$  تاثیرات حرارت بر کاهش تنش تسلیم وجود دارند. در مدلسازی با آباکوس واحدها وجود ندارند و مقادیر پارامترها باید مطابق جدول ۲ با هم متناسب باشند که اصطلاحاً به آن واحدهای سازگار می‌گویند.

جدول ۲) ضرایب جانسون کوک آلومینیوم در آباکوس [18]

دمای ذوب ( $T_M$ ) سانتیگراد	M	N	C	B (مگا پاسکال)	A (مگا پاسکال)
۱۴۸۰	۱	۰/۳۸	۰/۰۳	۲۱۰	۴۷۳

#### ۳-۲- مدل جانسون کوک برای تعیین تنش برشی

این مدل در کنار مدل تنش‌ی جانسون کوک و به صورت مکمل مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل بر اساس محاسبه‌ی مقدار تنش برشی معادل در گره‌ها (نقاط اتصال المان‌ها) عمل کرده است. به این صورت که خرابی یا براده‌برداری المان‌ها وقتی اتفاق می‌افتد که پارامتر آسیب،  $\omega$ ، بیشتر از ۱ شود. به صورت (۱۲) تعریف شده است.

$$\omega = \sum \left( \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}^{pl}_f} \right) \quad (12)$$

که در آن  $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$  تغییر جزئی کرنش پلاستیک معادل و  $\bar{\epsilon}^{pl}_f$  کرنش شکست المان است که از رابطه‌ی (۱۳) به دست آمده است. که در آن  $p$  تنش فشاری،  $q$  تنش میسر،  $\dot{\epsilon}_0$  کرنش رفرنس در زمان شروع فرآیند و  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  پارامترهای بی‌بعد و مربوط به جنس ماده‌اند [18]. جدول ۳ این پارامترها را برای قطعه کار آلومینیومی نشان داده است.

$$\bar{\epsilon}^{pl}_f = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{p}{q} \right) \right] * \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta}) \quad (13)$$

جدول ۳) ضرایب جانسون کوک آلومینیوم در آباکوس (بدون بعد) [10]

نرخ کرنش مرجع	d1	d2	d3	d4	d5
۱	۰/۳۷	-۰/۱۲	-۱/۹۳	۰/۰۱	۱/۶

#### ۳-۳- تست تجربی دینامومتر و بررسی خمش ابزار با کولیس

کار تجربی مربوط به صحت‌سنجی نیروهای ماشینکاری وارد بر قطعه کار آلومینیومی می‌باشد که توسط دینامومتر این کار انجام

در نهایت با اصلاح روش mass scale و استفاده از روش اول که در آن چگالی کل جسم را بصورت مصنوعی زیاد می‌کند و استفاده از معیار تجربی که اگر نسبت انرژی جنبشی به انرژی درونی حدود ۱۰ درصد باشد مقدار استفاده شده در mass scale نتایج تاثیر بسیار کم و قابل قبولی خواهد داشت مقدار mass scale مطابق جدول ۵ به اندازه ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد.

جدول ۵) مقدار مقیاس جرمی

type	Frequency/Interval	Factor	Target Time Increment
factor	Beginning of Step	1000	None

نکته دیگری که در نتایج تاثیر داشت مساله مشربیزی بود که در قسمت های بعدی توضیح داده می‌شود. از نکات کلیدی در براده- برداری در قسمت field output این است که علاوه بر پیش فرض های خود آباکوس دو گزینه ( Damage irritation criteria و status some failure and plasticity models) هم باید تیک بخورد تا ماشینکاری بصورت صحیح انجام بشود.

در ماژول بعدی که برهم کنش‌ها را تعریف می‌کنیم نکته بسیار مهم دیگر این است که تماس‌ها بصورت فقط general در نظر گرفته می‌شود. در صورت تعریف تماس بصورت kinematic یا penalty نرم افزار در هنگام ران گرفتن دچار خطا می‌شود. در خصوص خواص بر هم کنش‌ها اصطکاک به مقدار ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود و در قسمت قیدگذار نقطه مرجع یا RP(Refrence Point) بر ابزار اینگونه تعریف می‌شود که رفرنس پوینت در ابتدای ابزار در سرگیردار و بر روی محور وسط تعریف می‌شود.

پارتیشنی در ۷/۷ میلی متری ابزار زده شود که نقش بخشی که در هولدر بسته شده است و در واقع نقش سرگیردار را ایفا می‌کند. این قسمت با قید tie به هولدر چسبانده می‌شود که همان حالت گیردار را ایجاد می‌کند. همچنین قسمت هولدر با قید rigid body به RP ابتدا مرتبط می‌شود.

در ماژول Load قسمت شرایط مرزی سرعت خطی پیشروی و سرعت چرخشی فرز تعیین می‌شود که سرعت پیشروی دو مقدار ۳ و ۲/۵ میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است و سرعت چرخشی ۳۸۰ و ۳۱۳ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است که به تبدیل آن‌ها به رادیان بر ثانیه سرعت‌ها وارد می‌شود. همچنین دیواره‌های قطعه کار در این قسمت بصورت Encaster می‌شود.

در ماژول بعدی که مربوط به مش بندی است ابتدا قطعه و تیغه فرز باید پارتیشن بندی بشود. در پارتیشن زنی از ابزار قدرتمند virtual topology combine face بهره گرفته شد که قسمت هایی که قابل ادغام می‌باشد را با هم ترکیب می‌کند. با کمک گرفتن از این ابزار و ساده سازی، در نهایت مش قدرتمندتر sweep حاصل شد که به جواب اجرای کامل منجر شد. مش بندی نوک ابزار بصورت اختصاصی و جداگانه زده شد.

پارت قطعه کار با ابعاد ۱۸ در ۶۰ میلیمتر و ضخامت ۴ میلیمتر در نظر گرفته شد.

جدول ۴) ویژگی‌های هندسی ابزار

زاویه آزاد (درجه)	زاویه براده (درجه)	زاویه پیش (درجه)	قطر (میلیمتر)	طول برنده (میلیمتر)	طول کل (میلیمتر)
۸	۷	-	۸	۴۰	۸۷/۷

در مرحله بعد در ماژول property خواص قطعه کار آلومینیومی به همراه ضرایب جانسون کوک و ابزار با جنس فولاد تندبر M2 تعریف شد. در استپ متد ALE که در آن حجم کنترل و جرم کنترل بصورت همزمان در نظر گرفته شده است، مشخصات فرکانس ۳ و مش مجدد ۲ در نظر گرفته می‌شود.

در قسمت استپ حلگر از نوع dynamic explicit انتخاب می‌شود و مقدار پریود زمانی با توجه به سرعت خطی و مسیر ماشینکاری مشخص می‌شود. سپس برای آن مقیاس جرمی یا اینکریمنت زمانی انتخاب می‌شود که اگر از این مقدار تجاوز کرد جرم بصورت مصنوعی مقیاس دهی بشود که در این پروژه ابتدا از حالت دوم بهره گرفته شده است که نتایج اشتباه دریافت شد و معلوم شد مقدار نیروها نسبت به مقالات مشابه به صورت محسوس زیادتر است.

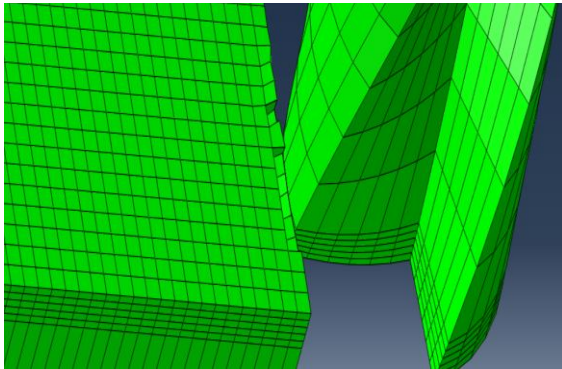
در نهایت با بررسی ابعاد مختلف مسئله از جمله هندسه ابزار و مش ابزار و مقدار mass scale مشخص گردید که ایراد اصلی از همین قسمت mass scale ناشی شده است به اینصورت که چگالی بیش از حد بصورت مصنوعی زیاد شده ضمن اینکه در این حالت چگالی می تواند در قسمت هایی از جسم زیاد شود که همگن بودن آن را با مشکل رو به رو می‌کند.

Mass scale در نرم افزار آباکوس در تحلیل دینامیک صریح به این منظور استفاده می‌شود که مدت زمان ران گرفتن نرم افزار که در بعضی مواقع بسیار طولانیست کاهش دهد. درمورد این مقدار باید یک عدد بهینه پیدا کرد که هم مقدار Run time تا جای ممکن کاهش پیدا کند و هم نتایج دچار تغییر محسوس نشود. در حل به روش دینامیک صریح که یک روش با پایداری مشروط است باید مقدار اینکریمنت زمانی از یک مقدار حداقل بیشتر باشد که این مقدار با نسبت طول مشخصه المان به سرعت صوت در ماده رابطه مستقیم دارد [20].

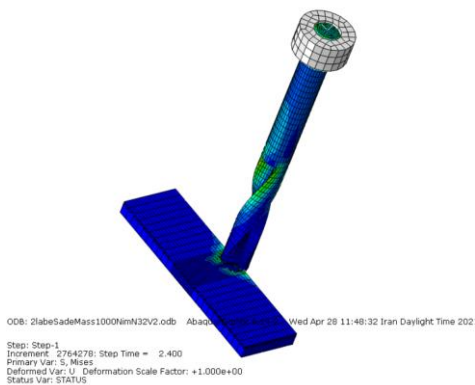
$$\Delta t_{\min} = \frac{L_{\min}}{C} \quad (14)$$

$$C = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\rho}} \quad (15)$$

$$\left(\frac{\Delta t}{L_i}\right)^2 = \frac{(1-\nu^2)\rho_i}{E} \xrightarrow{\rho_{cr}} \rho_i = \frac{E(\Delta t)^2}{L_i^2(1-\nu^2)} \quad (16)$$



شکل ۴) براده برداری قطعه کار



شکل ۵) لحظه ورود ابزار به قطعه کار

در نوک ابزار باکس نیرویی را تعریف میکنیم که از فایل آباکوس بواسطه نرم افزار اکسل فرخوانی می‌شود. در مرحله بعد برای جبران خطا از روابط مقاومت مصالح که شرح آن گذشت استفاده کرده و در جهت معکوس و ۳/۲ برابر تابع را به وسط ابزار که بعد از جرم دوم می‌شود اعمال می‌نماییم

بمنظور جبران خطا از دو روش در سیمولینک می‌توان بهره برد روش اول اینکه مانند آنچه برای نیروهای ماشینکاری انجام شد با استفاده از باکس from workspace نیروی جبران کننده به جرم وسط اعمال شود.

روش دوم استفاده از مدار هیدرولیکی می‌باشد که مطابق شکل مدار هیدرولیکی مدار به دو قسمت مدار قدرت و فرمان تقسیم می‌شود که در قسمت مدار قدرت منبع تولید قدرت که اختلاف فشار ایجاد می‌کند انتخاب می‌شود.

روغن هیدرولیک را انتخاب کرده و سیلندر و پیستون از نوع double برگزیده می‌شود. بمنظور کنترل حرکت پیستون از شیرکنترل جهت ۴ راهه استفاده می‌شود.

در قسمت مدار فرمان، سیگنال‌های ورودی مشخص می‌شود. به منبع اختلاف فشار فشاری متناسب با همان نیروی جبران کننده ماشینکاری که ۳/۲ برابر نیروهای ماشینکاری بود

بمنظور مش ریزی دقیق‌تر و همچنان بالا نرفتن مقدار ران تایم بخش‌های مورد هدف مانند نوک ابزار و مسیر براده‌برداری در قطعه کار مش‌های ریزتر و قسمت‌های دیگر تا جای ممکن از مش‌های درشت‌تر استفاده شده است. برای پیدا کردن نقطه‌ای واقعی بر روی وسط نوک ابزار پارتیشن‌بندی در حالت تک لبه و دوبله طوری انجام شده است که این نقطه حاصل شود و در قسمت نتیجه گیری بتوان از این نقطه خروجی گرفت. نکته حائز اهمیت دیگر این است که در انتخاب نوع مش باید گزینه element deletion بر روی حالت yes فعال باشد. در شکل ۴ دو نما از لحظه برخورد ابزار با قطعه کار و براده‌برداری آن نشان داده می‌شود. در قدم بعدی با سیم‌اسکیپ متلب مدلسازی لامپ تیغه‌فرز (گسسته سازی تیغه فرز به قسمت های یکسان) انجام شد و اجرام بصورت استوانه ای با مفاصل کاسه و ساچمه معادل ( فنریت و دمپینگ ) بین جرم‌ها تعریف شد. در این شبیه سازی که دیاگرام آن در شکل ۵ نشان داده شده است، فنر بصورت پیچشی در نظر گرفته می‌شود.

روابط زیر را می‌توان جهت بدست آوردن مقدار فنر و دمپر بین جرم‌ها استفاده کرد:

$$T = k \Delta\theta \rightarrow PL = k \frac{PL^2}{2EI} \rightarrow k = \frac{2EI}{L} = \frac{2E \left(\frac{\pi d^4}{64}\right)}{L} \quad (17)$$

$$k = \frac{2 * (190 * 10^9) * \left(\frac{\pi * 8^4 * 10^{-12}}{64}\right)}{87.7 * 10^{-3}} = 871.19$$

اگر پنج جرم داشته باشیم برای هر جرم داریم:

$$k = 5 * 871.19 = 4355.95$$

برای دمپر داریم:

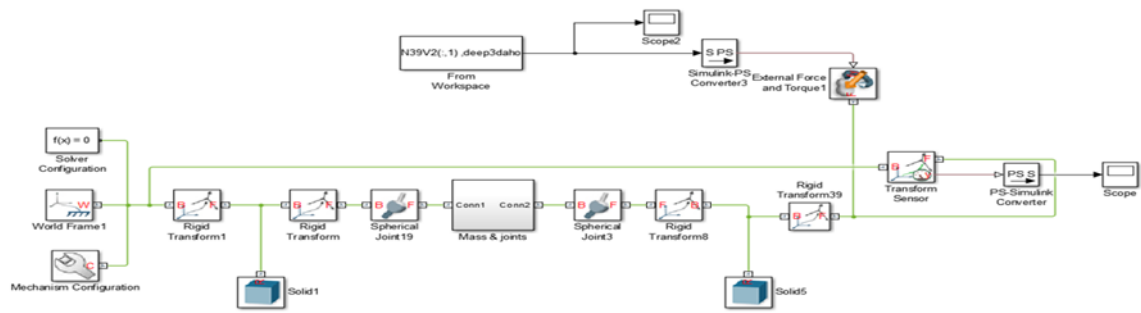
$$\xi = 0.02 \xi_{cr} \rightarrow \frac{c}{c_c} = 0.02 \rightarrow c = 0.02 c_c = 0.02 * 2 * \sqrt{km}$$

$$c = 0.02 * 2 * \sqrt{871.19 * 27.44 * 0.001} = 0.196$$

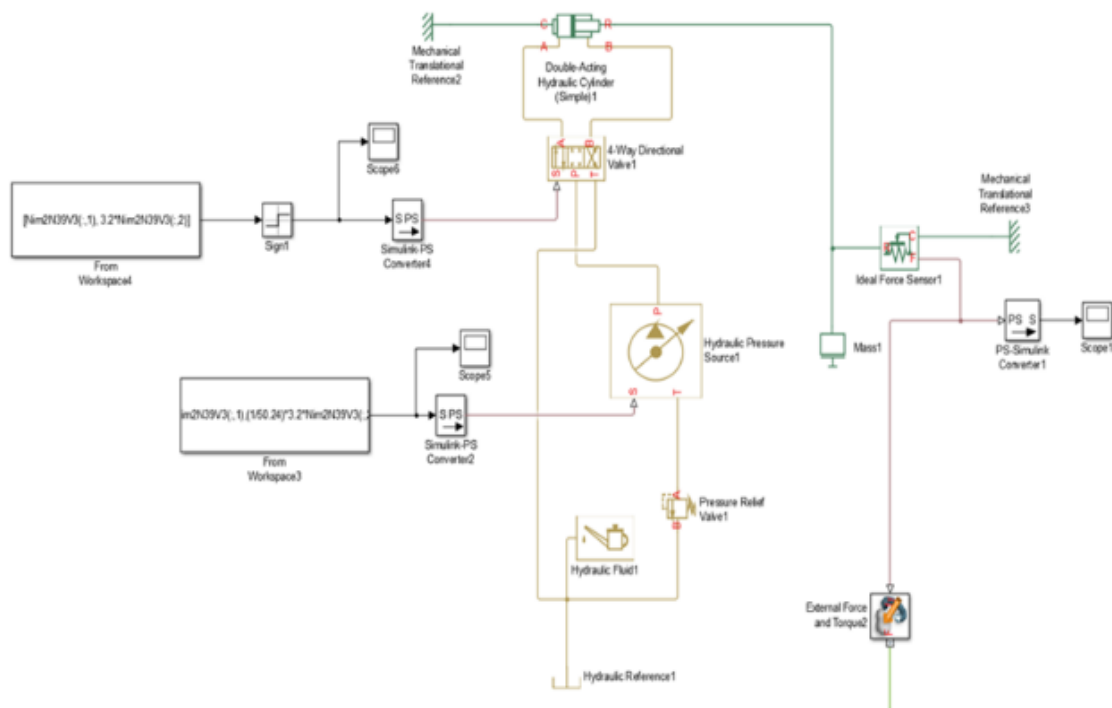
اگر پنج عدد جرم داشته باشیم برای هر جرم داریم:

$$c_{eachMass} = 5 * 0.196 = 0.98$$

البته دلیل اینکه یکسری پارامترها ساده‌سازی شده است مقدار سختی ممکن است کمی با مقدار تئوری بدست آمده متفاوت باشد و در واقع از مقدار تئوری به عنوان حدس اولیه استفاده شده است. در نهایت برای سختی مقدار ۱۰۰۰۰ اتخاذ گردید.



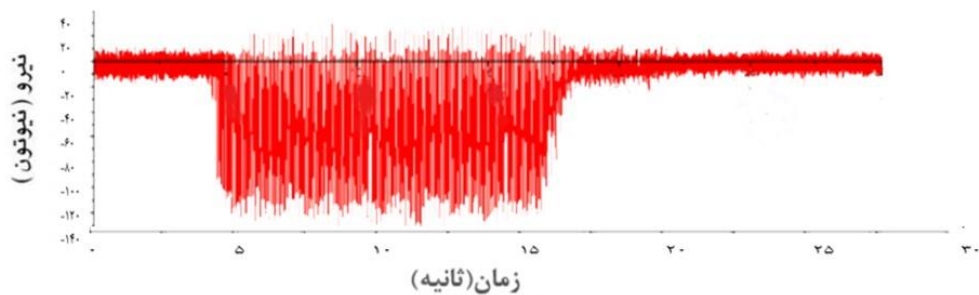
شکل ۶) نمای کلی مدار سیم اسکوپ در حالت بدون جبران خطا



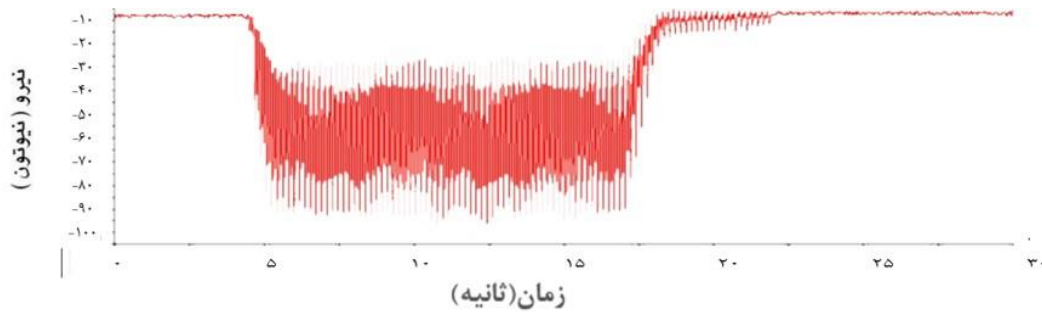
شکل ۷) مدار هیدرولیکی جبران خطا

یک سر سیلندر باید به یک دیواره مکانیکی ثابت شده باشد و سر دیگر آن به جرم کل تیغه فرز وارد بشود تا جابه‌جایی ناشی از آن را بصورت خروجی بدهد. مدار هیدرولیک پیشنهادی در شکل ۷ قابل مشاهده است.

وارد می‌شود که این نیرو بر سطح مقطع پیستون تقسیم می‌شود. برای شیر کنترل جهت همین سیگنال به تابع sign ریاضی یا همان تابع علامت داده می‌شود که خروجی آن ۱ یا منفی ۱ بسته به علامت ورودی می‌شود. از این تابع بمنظور رفت یا برگشت پیستون استفاده شده است. به منظور تبدیل جابه‌جایی پیستون به نیرو از یک نیروسنج بعد از سیلندر استفاده شده است.



شکل ۸) نمودار نیرو (نیوتون) - زمان دینامومتر



شکل ۹) نمودار نیرو ( نیوتون) - زمان دینامومتر فیلتر شده بر اساس فرکانس نیروهای ماشینکاری

### ۵- نتایج و بحث

جهت خروجی گرفتن نیرو عمود بر پیشروی بر حسب زمان در آباکوس از نقطه ای که در محور مته فرز و در نوک آن می باشد استفاده شده است. مقایسه داده های دینامومتر با نتایج آباکوس در شکل ۱۰ و مقایسه نتایج آباکوس و متلب در شکل ۱۱ ارائه شده است. همچنین می توان دو وضعیت خیز ابزار با جبران خطا و بدون آن را در شکل ۱۲ مقایسه نمود.

نمودار های شکل های ۱۳ تا ۱۵ به ترتیب مربوط به حالت پله زنی و همچنین مقایسه خیز آن با شیار تراشی در حالت دولبه، عمق ۰/۱، سرعت ۳ میلی متر بر ثانیه، ۳۸۰ دور بر دقیقه می باشد. در نهایت باید توجه داشت که نیروی جبران کننده خطا می تواند باعث کمتر شدن عمر ابزار بشود که پیشنهاد می شود جهت جلوگیری از این مشکل نیرو ترجیحا به قسمت بالای طول برنده وارد شود که در متن همانطور که اشاره شده طول برنده ۴۰ میلی متر و طول کل ۸۷ میلی متر است که وسط ابزار حدودا در ۴۳ میلی متری و بالای قسمت برنده می باشد.

نتایج دینامومتر، مدلسازی سه بعدی انعطاف پذیر آباکوس و مدلسازی توده ای در آباکوس در حالت های زیر ران گرفته شد:

تعداد لبه های مختلف: تک لبه و دولبه

عمق های مختلف: ۰/۳ و ۰/۵ میلی متر

سرعت پیشروی های ۲/۵ و ۳ میلی متر بر ثانیه

دور های مختلف: ۳۸۰ و ۳۱۳ دور بر دقیقه

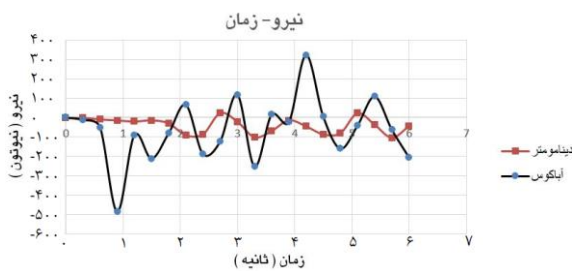
پارامترهای انتخابی را باید بر اساس شرایط قطعه کار، ابزار، دستگاه فرز و تست تجربی مربوطه انتخاب نمود.

جمعا ۱۶ حالت شیار تراشی مختلف برای حالت بدون جبران خطا و ۸ حالت با جبران خطا شیار تراشی و یک حالت پله زنی می شود (که برای حالات مختلف با دینامومتر هم آزمایش تجربی علاوه بر شبیه سازی انجام شده است). نتایج نمونه ای از آن ها، در ادامه برای نیروی عمود بر پیشروی و خیز انتهای تیر آمده است (شکل ۸). توجه داریم که دینامومتر نیروهای وارد بر قطعه کار را به صورت خروجی نمایش می دهد ولی با توجه به اینکه در تست تجربی محور Y فرز و دینامومتر در جهت عکس هم در نظر گرفته شد می توان نمودارهای خروجی را برای ابزار در نظر گرفت.

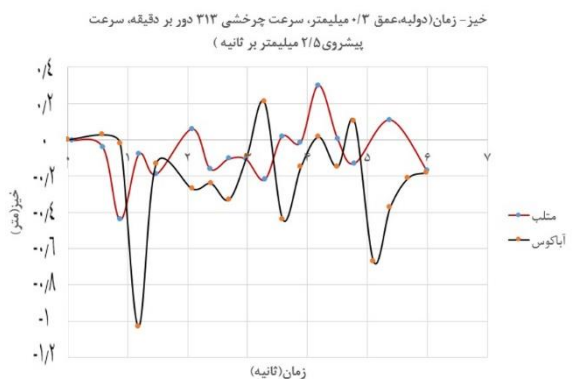
در نمودارهای دینامومتر به علت اینکه نقاط خروجی بسیار زیاد تعریف شده است نمودار دارای نوسان زیادی می باشد که با ابزار Smooth یا filter در نرم افزار دینامومتر کیسلر بنام Dynaware این داده ها می تواند از فیلتر رد شده و مثلا فقط نیروهای ناشی از ابزار دولبه در نظر گرفته بشود و نیروهایی که بر اثر ارتعاشات دستگاه و خطاهای دستگاه اتفاق می افتد در نظر گرفته نشود. برای اینکار باید فرکانس ناشی از ابزار دولبه بدست آید و با ابزار فیلتر تعریف شود که فرکانس های کمتر از این عدد فقط بصورت خروجی نشان داده شود. مثلا برای محاسبه فرکانس ابزار دولبه با چرخش ۳۱۵ rpm در فرزکاری داریم:

$$315RPM * 2flute = 630 \rightarrow 630 \frac{rev}{min} * \frac{1min}{60s} = 10.5Hz$$

بعد از اعمال فیلتر که فقط نیروهایی که فرکانس کمتر از این عدد دارند نشان داده بشود نیروهای دیگر که ناشی از ارتعاشات جوانب دیگر هستند تا حد خوبی حذف می شوند (شکل ۹).



شکل ۱۰) نمودار مقایسه ای دینامومتر- آباکوس



شکل ۱۱) نمودار خیز ناشی از نیروهای ماشینکاری



### ۶- نتیجه گیری

در این پروژه که هدف آن کاهش میزان خطای ناشی از خیز تیغه-فرز در حین انجام ماشینکاری بود پروژه در دو مرحله مورد بررسی قرار گرفت. مرحله اول شناسایی نیروی مزاحم ماشینکاری بود که این شناسایی با نرم افزار المان محدود آباکوس و همچنین بوسیله تست تجربی دینامومتر صورت گرفت. در قسمت المان محدود مشخص شد که فاکتور Mass scale که بمنظور کمتر شدن میزان زمان ران نرم افزار مورد استفاده قرار می گیرد اهمیت زیادی داشته و باید مقدار بهینه ای برای آن اتخاذ کرد که از طرفی میزان ران تایم تا حد ممکن کاهش یابد و از طرفی جواب ها انحراف قابل توجهی نشان ندهد و قابل قبول باشند. فاکتور دیگری که در این بخش المان محدود اهمیت داشت نوع مش ریزی بود که قسمت های هدف باید مش های ریزتر و قسمت های دیگر بمنظور کاهش ران تایم تا حد ممکن از مش بزرگ استفاده کرد.

در مرحله اول که خیز ناشی از نیروی ماشینکاری عمود بر مسیر پیشروی مزاحم شناسایی میشود بوسیله متلب سیم اسکپ این شناسایی با سرعت بالاتری نسبت به المان محدود ولی در دقت پایین تری انجام می شود به طوری که با نرم افزار آباکوس برای ۶ ثانیه ماشینکاری این زمان ران در حدود یک روز برای هر حالت ولی با نرم افزار متلب در حدود دوساعت انجام می شود.

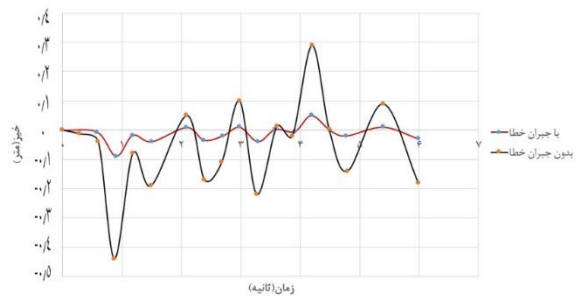
در مرحله دوم که مربوط به جبران خطای این نیروی مزاحم عمود بر پیشروی بود با نرم افزار متلب این جبران با سیستم هیدرولیکی و به صورت مستقیم با داده های جدولی نیرو با توجه به روابط مقاومت مصالح که توضیح داده شد به اندازه ۳/۲ برابر نیروهای ماشینکاری مزاحم به وسط ابزار و در خلاف جهت اعمال گردید که مشاهده می شود این خطا در مواردی حتی تا ۹۰ درصد هم می تواند کاهش پیدا بکند.

بعنوان پیشنهاد در بخش المان محدود می توان این آزمایشات را برای تعداد لبه های دیگر و همچنین سرعت و دور و عمق های دیگر انجام داد و نیروی جبران کننده را در نرم افزار المان محدود آباکوس هم اعمال کرد. همچنین می توان ستاپ تجربی نیروی جبران کننده با مکانیزم هیدرولیکی را با توجه به مدار هیدرولیکی آمده در قسمت سیم اسکپ متلب اجرا کرد.

### فهرست علائم

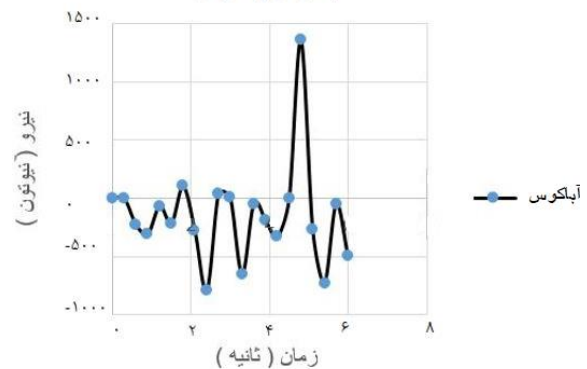
نیرو	F
سرعت حرکت نوک ابزار	V
دور ابزار	N
مدول یانگ	E
ممان اینرسی	I
خیز سر آزاد تیر	y
خیز نقطه B	y <sub>B</sub>
خیز نقطه A ناشی از نیروی وسط تیر	y <sub>A</sub>

خیز- زمان (دولبه، عمق ۰/۳ میلیمتر، سرعت چرخشی ۳۱۳ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۲/۵ میلیمتر بر ثانیه)



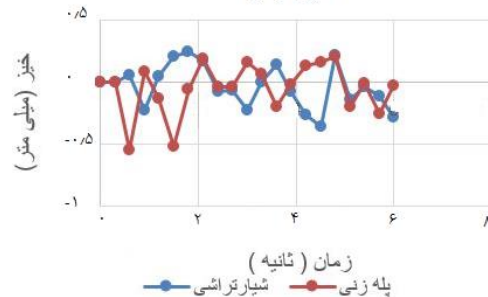
شکل ۱۲) نمودار مقایسه ای در حالت جبران خطا و بدون آن

### آباکوس پله زنی



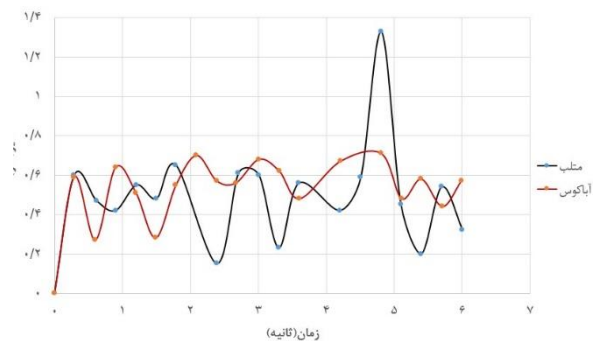
شکل ۱۳) نمودار نیروهای ماشینکاری

### خیز- زمان



شکل ۱۴) شمار تراشی و پله زنی

خیز- زمان (دولبه، عمق ۰/۳ میلیمتر، سرعت چرخشی ۳۱۳ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۲/۵ میلیمتر بر ثانیه)



شکل ۱۵) نمودار خیز ناشی از نیروهای ماشینکاری پله زنی

5- Soori M, Arezoo B, Habibi M. Tool deflection error of three-axis computer numerical control milling machining system. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2016 1;138(8).

6- Shimana K, Kondo E, Shigemori D, Yamashita S, Kawano Y, Kawagoishi N. An approach to compensation of machining error caused by deflection of end mill. *Procedia CIRP*. 2012 1;1:677-8.

7- Denkena B, Boess V, Nespore D, Rust F, Floeter F. Approaches for improving cutting processes and machine tools in re-contouring. *Procedia CIRP*. 2014 1;22:239-42.

8- Zhang X, Ehmman KF, Yu T, Wang W. Cutting forces in micro-end-milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016 1;107:21-40.

9- Dow TA, Miller EL, Garrard K. Tool force and deflection compensation for small milling tools. *Precision engineering*. 2004 1;28(1):31-45.

10- Denkena B, Litwinski KM, Boujnah H. Detection of tool deflection in milling by a sensory axis slide for machine tools. *Mechatronics*. 2016 1;34:95-9.

11- Denkena B, Dahlmann D, Boujnah H. Tool deflection control by a sensory spindle slide for milling machine tools. *Procedia CIRP*. 2017 Jan 1;62:329-34.

12- Denkena B, Boujnah H. Feeling machines for online detection and compensation of tool deflection in milling. *CIRP Annals*. 2018 1;67(1):423-6.

13- Saffar RJ, Razfar MR. Simulation of end milling operation for predicting cutting forces to minimize tool deflection by genetic algorithm. *Machining Science and Technology*. 2010 26;14(1):81-101.

14- Altintas Y, Tuysuz O, Habibi M, Li ZL. Virtual compensation of deflection errors in ball end milling of flexible blades. *Cirp Annals*. 2018 1;67(1):365-8.

15- Denkena B, Bergmann B, Stoppel D. Tool deflection compensation by drive signal-based force reconstruction and process control. *Procedia CIRP*. 2021 1;104:571-5.

16- Ferdinand P. Bear, E. Russell Johnston, JR., John T. DeWolf, David F. Mazurek, *Mechanics of materials ed. 6th*, 2003 .

17- AZoM, "M2 Molybdenum High Speed Tool Steel," 13 September 2012. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6174#3>.

18- یوسفوند، دکتر سید مهدی رضاعی، دکتر رسول فشارکی فرد، محمد عزیزی، جبران خطای ماشینکاری ناشی از خیز ابزار با مکانیزم سروو، ۲۰۱۸.

19- hssmetal, "HSS M35 HIGH SPEED STEEL," 2021]. Available: <https://hssmetal.com/hss-m35.php>.

20- "Mass Scale Abaqus", Available: <http://www.abaquscenter.com../>

21- Zhang DN, Shangguan QQ, Xie CJ, Liu F. A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015 15;619:186-94.

22- Nghiep TN, Sarhan AA, Aoyama H. Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy. *Measurement*. 2018 1;125:476-95.

خیز نقطه A ناشی از نیروی انتهای تیر	$y_A''$
خیز نقطه A ناشی از نیروی انتها و وسط تیر	$y_A$
اینکریمنت زمانی	$\Delta t_{min}$
طول مشخصه المان	$L_{min}$
سرعت صوت در ماده	C
فنریت	k
دمپر	c
پیچش یا خمش	T

کرنش پلاستیک معادل	$\varepsilon^{pl}$	علایم یونانی
بی بعد شده دما	$\hat{\theta}$	
دمای ذوب	$\theta_m$	
کرنش رفرنس	$\varepsilon_0$	
نرخ کرنش معادل	$\dot{\varepsilon}^{pl}$	
شیب سر آزاد	$\theta$	
شیب نقطه B ناشی از نیروی وسط تیر	$\theta_B'$	
نسبت پواسون	$\nu$	
چگالی	$\rho$	
نسبت میرایی	$\xi$	
کرنش پلاستیکی	pl	بالانویس ها
بحرانی	cr	زیرنویس ها

**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری چاپ نشده است.  
**تعارض منافع:** این مقاله تعارض منافی با نتایج سایر محققان ندارد.  
**منابع مالی:** منابع مالی در این پژوهش استفاده نشده است.

### مراجع

1- Campa FJ, de Lacalle LL, Lamikiz A, Bilbao E, Calleja A, Peñafiel J. Tool deflection on peripheral milling. *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building*. 2009 8;27:169-74.

2- Tansel IN, Arkan TT, Bao WY, Mahendrakar N, Shisler B, Smith D, McCool M. Tool wear estimation in micro-machining.: Part I: tool usage-cutting force relationship. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000 1;40(4):599-608.

3- رازفر، رضا جلیلی صفار، محمدرضا، "فرآیند فرزکاری با تیغ فرز انگشتی برای پیش بینی نیروهای ماشینکاری و خطای حاصل از خمش ابزار"، ISME، 5، p. 5، 2007.

4- Nghiep TN, Sarhan AA, Aoyama H. Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy. *Measurement*. 2018 1;125:476-95.