



بررسی کمی نیروها در فرایند داخل تراشی و ارائه روش جدید برای محاسبه نیروی نوک ابزار

مریم خلیلی گشنیگانی¹، منصور رفیعیان^{2*}، محمد مهدی ابوترابی³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* یزد، صندوق پستی 741-89195، rafeeyan@yazd.ac.ir

کلیدواژگان

چکیده

نیروی نوک ابزار
نیروی برش
داخل تراشی
دینامومتر

فرایند تراش کاری به دلیل دینامیک پیچیده‌ای که دارد همواره مورد توجه محققان علم ماشین کاری بوده و تلاش‌های زیادی برای تعیین نیروها در آن انجام گرفته است. روش‌های مختلف تجربی و نیمه تجربی برای محاسبه مقادیر نیروهای استاتیکی و دینامیکی برش استفاده شده است که معمولاً مبتنی بر ابعاد براده هستند و با استفاده از آن‌ها محدوده‌ی پایداری برش محاسبه می‌شود، اما هنوز این موضوع ابعاد ناشناخته‌ی زیادی دارد که هدف این مقاله روشن کردن یکی از آنها یعنی تعیین میزان تفاوت فرمول آلتینتاش (نیروی برش)، مقدار دینامومتر (نیروی انتهای ابزار) و مقداری است که از طریق ارائه‌ی یک روش جدید مبتنی بر معادله حاکم بر ارتعاش ابزار (نیروی نوک ابزار)، است. برای بررسی صحت نتایج، آزمون‌های عملی انجام می‌شوند. آزمون‌ها برای حالت داخل تراشی و با پارامترهای مختلف انجام می‌شوند و در آن‌ها به طور همزمان سیگنال نیرو در انتهای ابزار با استفاده از دینامومتر و روش جدید که از شتاب یک نقطه‌ی ابزار استفاده می‌کند، اندازه‌گیری و تعیین می‌شود. با استفاده از نتایج این دو سیگنال، پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه مؤلفه‌های نیرو در روش آلتینتاش و روش جدید استخراج می‌شوند. در نهایت برای دو آزمون، مؤلفه‌های شعاعی نیروی حاصل از دینامومتر و این دو روش محاسبه و مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که نیروی نوک ابزار، حاصل از روش جدید که اثر جابجایی و شتاب ابزار را در نظر گرفته است، بیشترین دامنه را برای نیرو به دست می‌آورد و پس از آن نیرو در انتهای ابزار که از دینامومتر گرفته می‌شود دامنه کمتری (در حدود 25% دامنه روش جدید) دارد و در نهایت نیروی حاصل از روش آلتینتاش که نیروی برش را فقط ضریبی از ابعاد براده در نظر گرفته است، کمترین مقدار دامنه (حدود 2% روش جدید) را دارد. بنابراین به دلیل وجود این تفاوت مهم نباید از این نیروها به جای یکدیگر استفاده کرد.

Quantitative analysis of forces in boring process and providing a new formula for calculation of tool-tip force

Maryam Khalili, Mansour Rafeeyan*, Mohammad Mehdi Abootorabi

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

* P.O.B. 89195- 741 Yazd, Iran, rafeeyan@yazd.ac.ir

Keywords

Tool-tip force
Cutting force
Internal turning
Dynamometer

Abstract

Due to its complex dynamics, turning process has always been of interest to machining researchers and much effort has been made to determine the forces. Various experimental and quasi-experimental methods are used to calculate the values of static and dynamic cutting forces. The methods are usually based on chip dimensions. Cutting stability amplitude is calculated using these methods. However, there are still a lot of unknown aspects about this subject and the aim of this paper is to clarify one of them which is to define the amount of difference between Altintas formula, dynamometer value, and the value which is obtained by providing a new method based on the equation governing the vibration of tools. Practical tests are done to verify the results. The tests are performed for boring state with different parameters and the force signal is simultaneously measured and determined at the end of the tool using a dynamometer and the new method in which the acceleration of one point of the tool is used. Using the results of these two signals, the parameters needed to calculate the force components in Altintas approach and the new method are derived. Finally, for the two tests, radial components of the derived force of dynamometer and these two methods are calculated and compared. The results show that the tool tip force, resulting from the new method which considered the effects of displacement and acceleration tool, obtains the greatest force amplitude. The force at the end of the tool which is derived by dynamometer has lower amplitude (about 25% of the amplitude in the new approach). Finally, the force resulting from Altintas approach has the lowest amplitude (about 2% of the amplitude in the new approach), in which the cutting force is only considered as a factor of chip dimensions. Therefore, because of their important differences, these forces should not be used interchangeably.

Please cite this article using:

M. Khalili, M. Rafeeyan, M. M. Abootorabi, Quantitative analysis of forces in boring process and providing a new formula for calculation of tool-tip force, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 10-23, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

در ماشین کاری، محاسبه نیروهای استاتیکی و دینامیکی تماس از دیرباز مورد توجه محققان این علم بوده است که می توان این تحقیقات را به دو دسته اصلی تقسیم کرد. محاسبه مقادیر نیرو به صورت تجربی و نیمه تجربی و تحلیل پایداری سیستم که معمولاً به صورت تحلیلی انجام می شود.

شبیه سازی فرایندهای ماشین کاری بیشتر بر مدل سازی هندسه فرایند و ارتباط دادن هندسه مدل شده با نیروهای ماشین کاری از طریق ثابت های برشی استوار است. ثابت های برشی را می توان برای یک جنس و یک هندسه از ابزار و قطعه کار به صورت تجربی به دست آورد. مزیت اصلی این روش دقت خوب در پیش بینی نیروهاست و عیب این روش، تعداد زیاد آزمایش های لازم است و ثابت های به دست آمده فقط برای یک هندسه و جنس ابزار و قطعه کار خاص کاربرد دارند. روش دوم، روش تشکیل بانک اطلاعاتی برش متعامد است. در این روش، با تعداد محدودی آزمایش و اندازه گیری نیرو و استفاده از روابط مشخص، بانک اطلاعاتی تشکیل می شود که برای هندسه ها، جنس ها و نوع تراش های مختلف ضرایب برشی را با دقت کمتری به دست می آورند [1].

سابرامانی و همکاران [2] برای قطعه کار فولادی و با استفاده از نتایج دینامومتر، ثابت های برشی و نیروی استاتیکی را محاسبه کردند. نتایج به دست آمده فقط برای حالت پایدار صادق بود.

کاستر [3] نتایج سابرامانی را بررسی کرد و دریافت که نیروهای استاتیکی به تنهایی نمی توانند ناپایداری سیستم را نشان دهند، بنابراین با تغییر دینامیکی ابعاد براده، مقدار نیروی دینامیکی را برای فرایند داخل تراشی به دست آورد و با محاسبه محدوده ی پایداری نشان داد که این تقریب برای تعیین نیروی دینامیکی در دو حالت پایدار و ناپایدار مناسب است. ضرایب ثابت در این تحقیق با استفاده از نیروهای اندازه گیری شده توسط دینامومتر محاسبه و با نتایج دینامومتر مقایسه شده اند.

آتابی و همکاران [4-6]، در فرایند داخل تراشی برای ابزار تک لبه و قطعه کار آلومینیومی، ابتدا هندسه براده را با استفاده از مشخصات ابزار مانند شعاع نوک ابزار، زوایای ابزار و مقدار پیشروی و عمق برش به دست آوردند. سپس مؤلفه های نیروی برشی را بر حسب مساحت براده و ضرایب برش که با استفاده از نتایج دینامومتر به دست آمده بود، محاسبه کردند. این روش برای ابزار با شعاع نوک زیاد مناسب است و برای هر دو تراش متعامد و مایل استفاده می شود. این روابط برای ابزار چند لبه گسترش یافت و سپس با محاسبه نیروی دینامیکی، شکل سطح

قطعه کار تخمین زده شد.

بوداک و اوزلو [7-9] ابتدا دینامیک ابزار را به صورت تابعی از شعاع نوک و هندسه ابزار قرار دادند و سپس بدون محاسبه ضرایب با استفاده از معادلات دو بعدی نیروی دینامیکی، محدوده پایداری را برای قطعه کار فولادی محاسبه کرده و با استفاده از یک میکروفون، نتایج پایداری را تأیید و تأثیر شعاع نوک ابزار را بر پایداری مشخص کردند.

یوسفیان و همکاران [10,1] در فرایند داخل تراشی با استفاده از یک منحنی منطبق شده بر نوک ابزار، هندسه براده را مشخص کردند و با استفاده از روش نیمه تجربی، با استفاده از دینامومتر، ضرایب برش و نیروی استاتیکی را برای قطعه کار آلومینیومی و ابزار کاربیدی به دست آوردند. سپس با استفاده از روابط نیروی استاتیکی و اعمال تغییر ضخامت براده، نیروهای دینامیکی را در داخل تراشی محاسبه کردند و در نهایت با اضافه کردن نیروی محوری روی ابزار، پایداری سیستم را افزایش دادند.

توتیس و همکاران [11-13] در فرایند داخل تراشی، با روش نیمه تجربی و انجام آزمایش هایی با استفاده از دینامومتر، ضرایب برشی نیروی دینامیکی را به دست آوردند. آن ها خواص دینامیکی سیستم را از نتایج آزمایش مودال ابزار به دست آورده و در نهایت با مدل کردن ارتعاش عرضی تیر با استفاده از تئوری تیموشینکو، نمودارهای پایداری را برای این فرایند به صورت تحلیلی به دست آوردند و سپس برای اجتناب از چتر، با استفاده از یک الگوریتم احتمال توانستند نسبت طول به قطر ابزار برای داشتن یک برش پایدار را بر حسب پارامترهای برش به دست آورند.

همان طور که بیان شد، روش های محاسبه نیروی بین ابزار و قطعه کار روش های پیچیده ای هستند که نیاز به تعداد زیادی آزمایش و اندازه گیری نیرو توسط دینامومتر برای محاسبه ثابت های برشی دارند. در این مقاله، ابتدا با استفاده از معادلات ارتعاش عرضی ابزار، مؤلفه های شعاعی نیرو در نوک ابزار که همان نیروی بین ابزار و قطعه کار است، محاسبه و پارامترهای مؤثر بر آن با یکی از روش های قبلی (معروف به مدل آلتینتاش [14]) مقایسه می شود. سپس برای بررسی صحت نتایج، آزمون های عملی انجام می شود که خواص دینامیکی مجموعه دستگاه و ابزار مورد استفاده در آزمون های اصلی را مشخص می کند. آزمون های اصلی داخل تراشی با پارامترهای مختلف انجام می شود که در آن ها به طور هم زمان سیگنال نیرو در انتهای ابزار با استفاده از دینامومتر و سیگنال شتاب در یک

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\psi_r & -\cos\psi_r \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos\psi_r & -\sin\psi_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma \\ \cos\gamma \tan\beta_a \\ \cos\gamma \tan\beta_r \end{pmatrix} F_c \quad (1)$$

که در آن F_x, F_y, F_z مؤلفه‌های نیرو در سه راستای اصلی مطابق با شکل 2 و ψ_r زاویه تنظیم اصلی³ است.

$$F_c = K_c b h \quad (2)$$

$$\cos\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_{fc}}{K_{tc}}\right)^2 + \left(\frac{K_{rc}}{K_{tc}}\right)^2}} \quad (3)$$

$$\tan\beta_a = \frac{K_{fc}}{K_{tc}} \quad (4)$$

$$\tan\beta_r = \frac{K_{rc}}{K_{tc}} \quad (5)$$

که در آن‌ها، F_c نیروی برش، $K_c, K_{fc}, K_{rc}, K_{tc}$ ضرایب برشی هستند که با استفاده از آزمون و داشتن مقادیر نیروی استاتیکی محاسبه می‌شوند. b پهنای برش یا عرض براده⁴ و h ضخامت براده‌ی تغییر شکل نیافته⁵ می‌باشد.

2-2- ارتعاش در ابزار

قبل از شروع فرایند تراش، ابزار در اثر عوامل مختلفی مانند حرکت موتور دستگاه و غیره ارتعاش می‌کند که می‌توان مقادیر حاصل از این ارتعاش‌ها را قبل از شروع فرایند اندازه گرفت. یک نمونه از چنین ارتعاشی در شکل 3 آمده است که نشان می‌دهد مقادیر شتاب در این حالت ناچیزند ولی پس از شروع فرایند تراش، ارتعاش ناشی از برش نیز به مجموعه اضافه می‌شود که باعث می‌شود دامنه شتاب ابزار افزایش زیادی یابد. همچنین فرکانس غالب این سیگنال، فرکانس 578 Hz است.

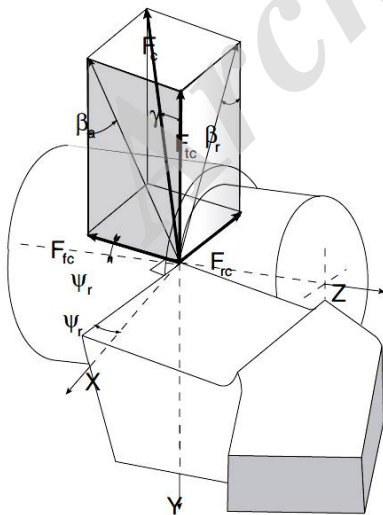


Fig. 2 Force component And main direction[14]

شکل 2 نمایش مؤلفه‌های نیرو و جهت‌های اصلی [14]

³ Side Cutting Edge Angle

⁴ Width of cut

⁵ Uncut chip thickness

نقطه از ابزار با استفاده از حسگر شتاب، اندازه‌گیری می‌شود. با دو بار انتگرال‌گیری از سیگنال شتاب، سیگنال جابجایی ابزار به دست می‌آید. با استفاده از مقادیر این سیگنال‌ها، پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه مؤلفه‌های نیرو در روش آلتینتاش محاسبه می‌شوند. مقادیر جابجایی، شتاب و خواص دینامیکی ابزار، نیز برای محاسبه نیروی نوک ابزار با روش جدید محاسبه می‌شوند. در نهایت برای دو آزمون یکی برش پایدار و دیگری برش ناپایدار، نیروی برش (با استفاده از روش آلتینتاش)، نیروی نوک ابزار (محاسبه شده با روش جدید) و نیروی انتهای ابزار (ثبت شده توسط دینامومتر) رسم و مقایسه می‌شوند و صحت کمی هر کدام مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

2- محاسبه نیروی تماس

به منظور بررسی ماهیت منطقه تغییر شکل در فرایند براده‌برداری فلزات، عموماً دو حالت صفحه برش ضخیم¹ نازک² (شکل 1-ب) فرض می‌شود.

دلیل استفاده از مدل صفحه برش نازک، ساده شدن روابط ریاضی حاکم بر مسئله است که موجب شده است در بسیاری از مدل‌سازی‌های فرایند براده‌برداری مورد استفاده قرار گیرد اما هیچ‌کدام از این مدل‌ها به طور کامل توسط نتایج آزمایشگاهی تأیید نشده‌اند [15].

2-1- مدل آلتینتاش

در این مدل، که از حالت صفحه برش نازک استفاده کرده است، مؤلفه‌های نیروی دینامیکی برش در سه راستای اصلی از رابطه (1) محاسبه می‌شوند [14]:

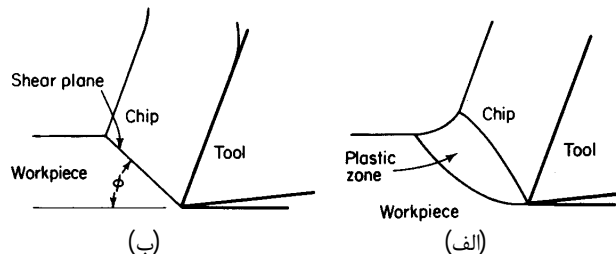


Fig. 1 Two models for studying the cutting area in the cutting process A- thick shear plane B- thin shear plane[15]

شکل 1 دو مدل در بررسی منطقه برش در فرایند براده‌برداری: (الف) صفحه برش ضخیم (ب) صفحه برش نازک [15]

¹ Thick shear plane

² Thin shear plane

با جایگذاری معادله (7) در معادله (6)، معادله (8) حاصل می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E(x) I(x) \frac{\partial^2 W_i(x)}{\partial x^2} \right) \eta_i(t) + \sum_{i=1}^{\infty} W_i(x) \frac{\partial^2 \eta_i(t)}{\partial t^2} \rho(x) A(x) = f(x, t) \quad (8)$$

از آنجا که مهم‌ترین مود و تأثیرگذارترین مود در این فرایند مود اول است [17]، لذا اگر فقط مود اول ارتعاشی برای این فرایند در نظر گرفته شود، با ضرب رابطه (8) در مود اول و انتگرال‌گیری در طول تیر، رابطه (9) حاصل می‌شود:

$$\int_0^l \sum_{i=1}^{\infty} W_1(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E(x) I(x) \frac{\partial^2 W_i(x)}{\partial x^2} \right) \eta_i(t) dx + \int_0^l \sum_{i=1}^{\infty} W_1(x) W_i(x) \frac{\partial^2 \eta_i(t)}{\partial t^2} \rho(x) A(x) dx = \int_0^l W_1(x) f(x, t) \delta(x - l) dx$$

با توجه به متعامد بودن مودها و با ساده کردن رابطه (9) می‌توان رابطه (10) را نوشت:

$$\frac{\omega_1^2}{W_1(s)W_1(l)} w(s, t) + \frac{1}{W_1(s)W_1(l)} a(s, t) = f(l, t) \quad (10)$$

که در آن $w(s, t)$ و $a(s, t)$ جابجایی و شتاب عرضی نقطه‌ای از تیر به فاصله s از انتهای آن، $f(l, t)$ نیروی نوک ابزار در راستای عرضی و ω_i فرکانس طبیعی در مود i می‌باشند. برای تیر با یک انتهای ثابت و یک انتهای آزاد (مطابق شکل 4) فرکانس طبیعی و شکل مودها از رابطه‌های (11) و (12) به دست می‌آیند:

$$\omega_i = (\beta_i l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad i = 1, 2, \dots \quad (11)$$

$$\beta_1 l = 1.8751, \quad \beta_2 l = 4.6941, \quad \beta_3 l = 7.8547, \quad \beta_4 l = 10.9956 \quad (12)$$

$$W_i(x) = \frac{(\cos \beta_i x - \cosh \beta_i x)(\sin \beta_i x + \sinh \beta_i x) - (\sin \beta_i x + \sinh \beta_i x)(\cos \beta_i x + \cosh \beta_i x)}{(\sin \beta_i x + \sinh \beta_i x) - \sinh \beta_i x} \quad (13)$$

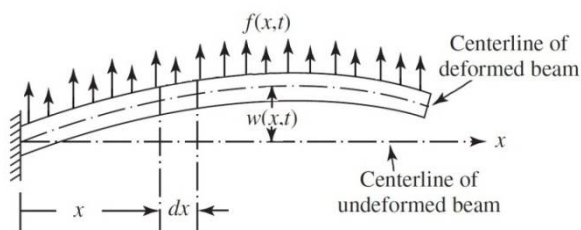
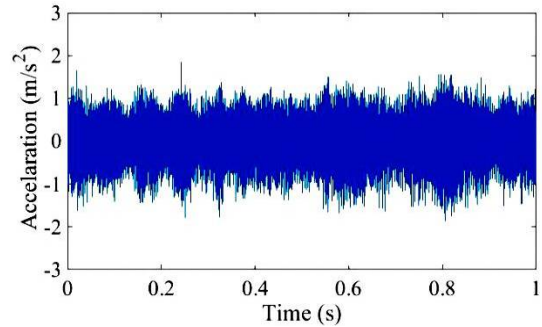
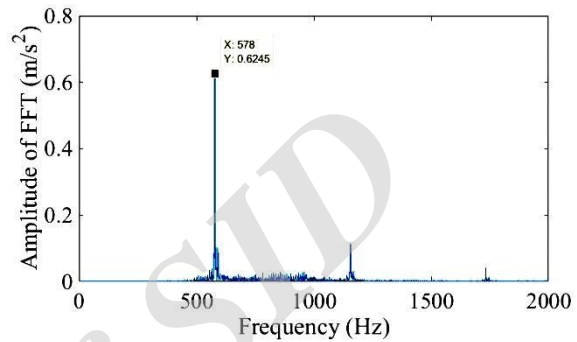


Fig. 4 The transverse motion of the beam with fix and free supports [16]
 شکل 4 حرکت عرضی تیر با یک انتهای ثابت و یک انتهای آزاد [16]



الف- در حوزه زمان



ب- در حوزه فرکانس

Fig. 3 Result of acceleration signal before starting the internal turning process. A-In time domain. B-in frequency domain.

شکل 3 سیگنال شتاب قبل از شروع فرایند داخل تراشی

3-2- روش جدید بر مبنای معادلات ارتعاشی ابزار

از آنجایی که ابزار در ارتعاش عرضی رفتاری شبیه به تیر دارد، از معادلات ارتعاش عرضی تیر در این بخش استفاده شده است که برای استفاده از این معادلات فرض شده است که مجموعه ابزار و تیغچه یک میله با سطح مقطع و چگالی یکنواخت است. همچنین از اثر اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی چشم پوشی شده است. معادله دیفرانسیلی حرکت در ارتعاش عرضی تیر، با استفاده از تئوری اویلر برنولی، از رابطه (6) است [16]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E(x) I(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right) + \rho(x) A(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = f(x, t) \quad (6)$$

که در آن، $w(x, t)$ جابجایی عرضی هر نقطه از تیر، $f(x, t)$ نیروی عرضی بر واحد طول تیر، $\rho(x)$ چگالی ابزار، $A(x)$ مساحت سطح، $E(x)$ مدول الاستیسیته و $I(x)$ ممان دوم سطح مقطع تیر می‌باشند.

حل ارتعاش آزاد معادله (6) با استفاده از روش جداسازی متغیرها طبق رابطه (7) است:

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} W_i(x) \eta_i(t) \quad (7)$$

که در آن $W_i(x)$ مود نرمال یا تابع مشخصه در مود i ام و $\eta_i(t)$ تابع وابسته به زمان است.

- ماشین تراش مدل TN50B که ساخت شرکت ماشین سازی تبریز است.

مشخصات ابزار و قطعه کار استفاده شده در این تحقیق در شکل 1 ارائه شده است.

ابزار از دو قسمت بدنه ابزار و تیغچه تشکیل شده است. خواص مکانیکی مربوط به این دو قسمت شکل 2 داده شده است.

3-2- مراحل انجام آزمون

پس از نصب حسگر اندازه گیری شتاب بر روی ابزار داخل تراشی، مطابق شکل 8، ابزار بر روی دینامومتر نصب می شود.

Table 1 Specification of tool and workpiece

جدول 1 مشخصات ابزار و قطعه کار	
PARIS-S20R SDUCL 11	مدل ابزار گیر
200	طول کل ابزار (mm)
20	قطر بدنه ابزار (mm)
125	فاصله نوک ابزار تا هولدر (mm)
45	فاصله حسگرها تا هولدر، s (mm)
STORM DCGT070202-H01	مدل تیغچه
لوزی شکل	هندسه تیغچه
0/4	شعاع نوک تیغچه (mm)
آلومینیم 7075	جنس قطعه کار
63 برای آزمون شماره 1	قطر داخلی قطعه کار (mm)
68 برای آزمون شماره 2	قطر خارجی قطعه کار (mm)
80	طول قطعه کار (mm)

Table 2 Mechanical specification of tool [1]

جدول 2 خواص مکانیکی ابزار [1]				
نوع	جنس	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (N/mm ²)	ضریب پواسون
ابزار گیر	Alloy Steel	7850	2/09×10 ⁵	0/3
تیغچه	Tungsten carbide	15800	2/09×10 ⁵	0/28

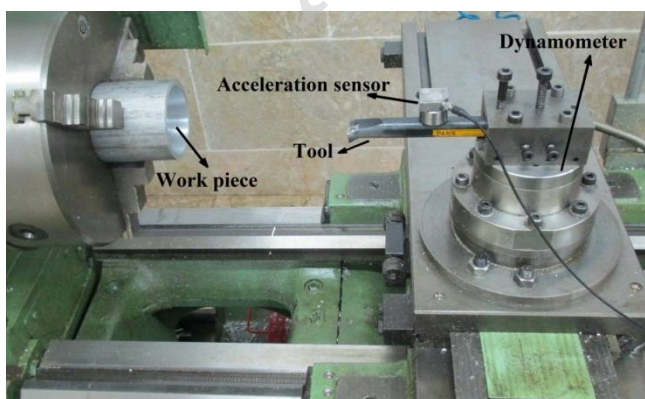


Fig. 8 Positions of the accelerometer and dynamometer in setup

شکل 8 موقعیت شتاب سنج و دینامومتر بر روی دستگاه

با استفاده از رابطه (10) می توان با داشتن شتاب و جابجایی هر نقطه از تیر، مقدار نیرو در نوک ابزار را محاسبه کرد. رابطه (10) نشان می دهد نیرو از حاصل جمع دو پارامتر که یکی وابسته به جابجایی و دیگری وابسته به شتاب عرضی ابزار است، به دست می آید. نیرو وابسته به مشخصات هندسی و جنس ابزار، قطعه کار و غیره است. شتاب نیز وابسته به همین مشخصات است و با وجود شتاب در رابطه، به صورت عملی تأثیر این پارامترها نیز در نظر گرفته شده است.

3- آزمون های عملی

3-1- تجهیزات مورد استفاده در آزمون ها

- حسگر شتاب سنج مورد استفاده در این آزمون ها با نام AP2082M-100 ساخت شرکت AP tech آمریکا (شکل 5) که شتاب را در سه راستای نشان داده شده، اندازه گیری می کند.

- دستگاه پالس، مدل 3560-B-020 ساخت شرکت B&K دانمارک، رابط بین حسگرها و محیط نرم افزار است (شکل 6).

- دینامومتر CH-8408، مدل 9272 ساخت شرکت KISTLER است (70) که نیرو را در سه راستا اندازه گیری می کند.



Fig. 5 Accelerometer AP2082M-100

شکل 5 حسگر شتاب سنج



Fig. 6 Pulse system

شکل 6 دستگاه پالس



Fig. 7 KISTLER CH-8408 Dynamometer

شکل 7 دینامومتر

طبیعی ابزار و مجموعه نگهدارنده آن به دست آمده است و بنابراین فرض صلبیت انتهای ابزار با واقعیت مطابقت ندارد.

با شروع هر آزمون، به طور خودکار داده‌های حسگر شتاب و دینامومتر ثبت می‌شوند.

3-3- آزمون‌های عملی برای محاسبه خواص دینامیکی ابزار

ابتدا آزمون‌هایی برای تعیین ضریب سختی و نرخ میرایی ابزار انجام می‌شود. برای این کار، ابزار بر روی دینامومتر و سپس حسگر شتاب بر روی ابزار نصب می‌شوند. در چند مرحله، ضربه‌هایی در سه راستای اصلی (مطابق شکل 9) به ابزار وارد و سیگنال‌های شتاب دریافتی از شتاب‌سنج‌ها ذخیره می‌شود. با استفاده از تبدیل فوریه این سیگنال، می‌توان فرکانس با میرایی مجموعه ماشین و ابزار را به دست آورد.

همچنین با داشتن کاهش لگاریتمی دامنه می‌توان نرخ میرایی را برای این ابزار محاسبه کرد. برای کاهش خطاهای اندازه‌گیری، هر آزمون چندین بار تکرار شده است. یک نمونه از سیگنال‌های دریافتی در راستای محور y در شکل 10 و در راستای محور z در شکل 11 در حوزه زمان و فرکانس نشان داده و نتایج به دست آمده در جدول 3 ارائه شده‌اند.

برای محاسبه‌ی نرخ میرایی از رابطه (14) استفاده شده است.

$$\ln\left(\frac{x_{i+1}}{x_i}\right) = -\xi \omega_n (t_{i+1} - t_i) \quad (14)$$

که در آن، x_i دامنه قله موج i ام، ξ ضریب میرایی و t_i زمان قله موج i ام می‌باشند.

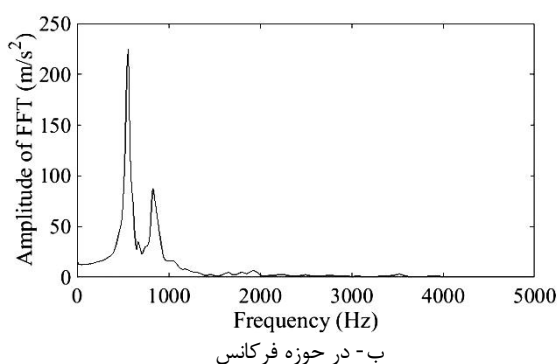
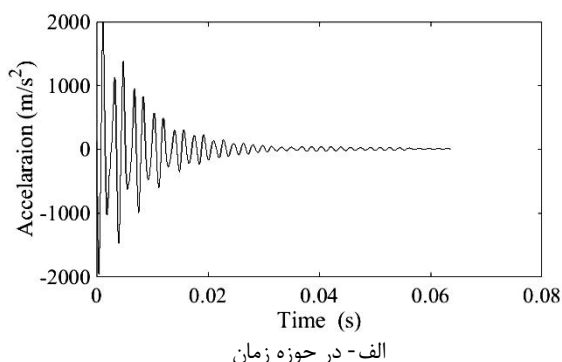


Fig. 10 The acceleration signal of impact test in y direction. A- In time domain B- In frequency domain

شکل 10 سیگنال شتاب آزمون ضربه در راستای y

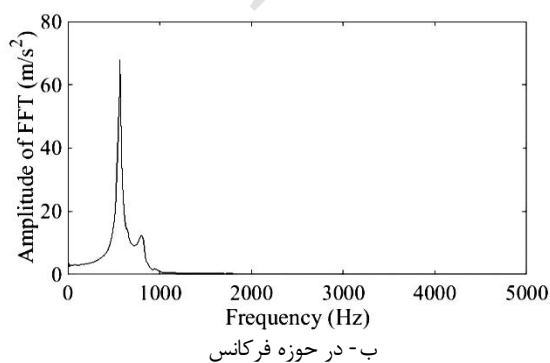
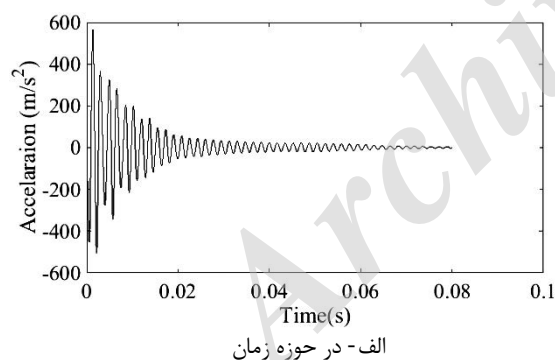


Fig. 11 The acceleration signal of impact test in z direction. A- In time domain B- In frequency domain

شکل 11 سیگنال شتاب آزمون ضربه، در راستای z

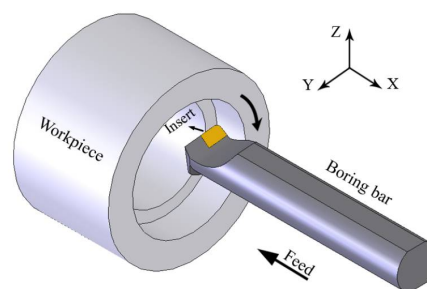


Fig. 9 Cchematic of tool and workpiece and direction of intercept[4]

شکل 9 شماتیک ابزار و قطعه کار و جهت محورهای مختصات [4]

Table 3 Vibration specification of tool in two reduce direction, z and y

جدول 3 خواص ارتعاشی ابزار در دو راستای شعاعی y و z

ضریب میرایی	فرکانس طبیعی با میرایی اول (Hz)	راستای محور
0/2	560	y
0/16	568	z

مقدار فرکانس حاصل از آزمون‌ها با فرکانس حاصل از رابطه (11) متفاوت است که دلیل آن این است که در معادله، انتهای ابزار صلب در نظر گرفته شده است ولی در آزمایش‌ها، فرکانس

برای اندازه‌گیری نیرو در فرایندهای تراش از دینامومتر استفاده می‌شود. هولدر ابزار روی دینامومتر نصب می‌شود. از آنجا که فرایند تراش یک فرایند دینامیکی است و در طول فرایند ابزار دچار ارتعاش می‌شود و بدنه ابزار دارای شتاب است، بنابراین نیروی دینامیکی حاصل از دینامومتر با نیروی دینامیکی نوک ابزار برابر نیست و نمی‌توان از آن به عنوان نیروی نوک ابزار یا نیروی برش استفاده کرد. زیرا با استفاده از قانون دوم نیوتن مجموع دو نیروی انتها و نوک ابزار باید با نیروی حاصل از شتاب روی ابزار برابر باشد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از دینامومتر که در شکل 13 نشان داده شده است، مقادیر نیرو شامل اعداد مثبت و منفی است که نشان می‌دهد جهت نیرو تغییر کرده است.

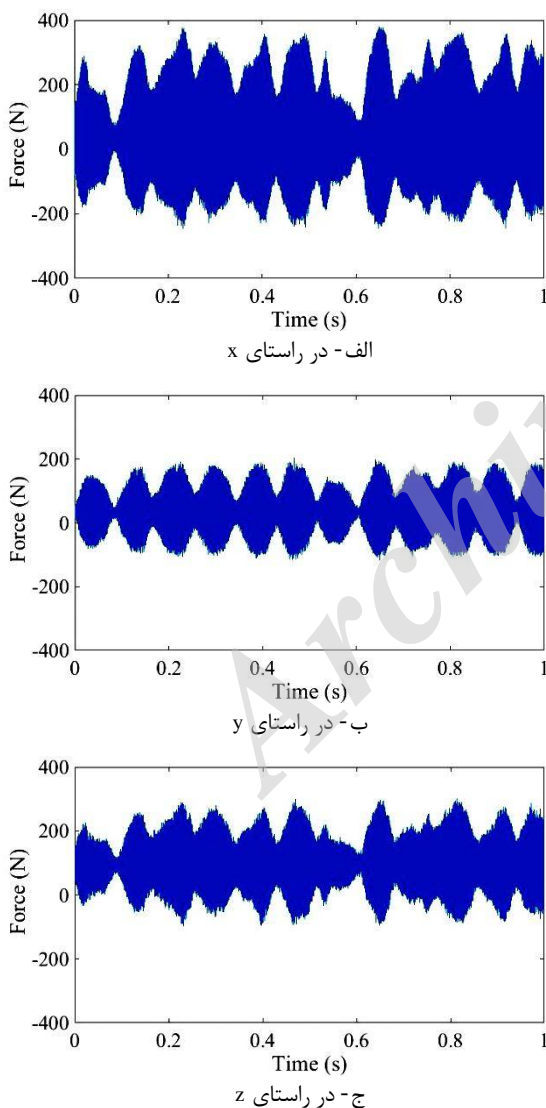


Fig. 13 Recorded force signals of dynamometer, test No. 1 (sampling rate= 25000 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 13 سیگنال‌های نیروی دینامومتر (رخ نمونه‌برداری 25000 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 1

همچنین همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است، فرکانس غالب سیگنال، فرکانس 578 Hz است که نزدیک به فرکانس طبیعی محاسبه شده در جدول 3 است و باعث می‌شود پدیده ضربان اتفاق افتد.

از آنجا که نرخ نمونه‌برداری حسگر شتاب برابر با 65536 نمونه در ثانیه است، حداکثر می‌تواند فرکانس 32768 هرتز را اندازه‌گیری کند، بنابراین نمی‌توان فرکانس در راستای طولی را که در حدود 51360 هرتز است، اندازه‌گیری کرد. به همین دلیل، محاسبات در راستای طولی انجام نشده است.

3-4- طرح‌ریزی آزمون‌های اصلی

آزمون‌های داخل تراشی زیادی با پارامترهای مختلف انجام شده است که برای جلوگیری از طولانی شدن مطالب، فقط دو آزمون با مشخصات شکل 4 برای نمایش انتخاب شده است. همه آزمون‌ها نتایج بیان شده در این مقاله را تأیید می‌کنند. سطح مقطع قطعه‌کار برای دو آزمون شماره 1 و 2 در شکل 12 نشان داده شده است.

4- نتایج و بحث بر روی نتایج

برای بررسی معادلات نیاز به مقادیر نیرو، شتاب و جابجایی ابزار در سه راستای اصلی x ، y و z (مطابق شکل 09) است. بنابراین نتایج شتاب و نیرو برای هر آزمون در ده ثانیه یادداشت و سرعت و جابجایی محاسبه شده‌اند که یک ثانیه از این نتایج برای نمایش و اعمال معادلات انتخاب شده است.

Table 4 The variable parameter of tests.

جدول 4 پارامترهای متغیر آزمون				
شماره آزمون	سرعت برشی (m/s)	نرخ پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	حالت
1	2/4257	0/12	1/5	ناپایدار
2	0/9032	0/24	1/0	پایدار

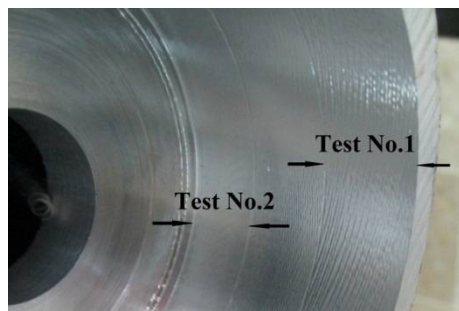


Fig. 12 The surface of workpiece in test No.1 (unstable) and test No.2 (stable)

شکل 12 سطح قطعه‌کار در دو آزمون شماره 1 و 2

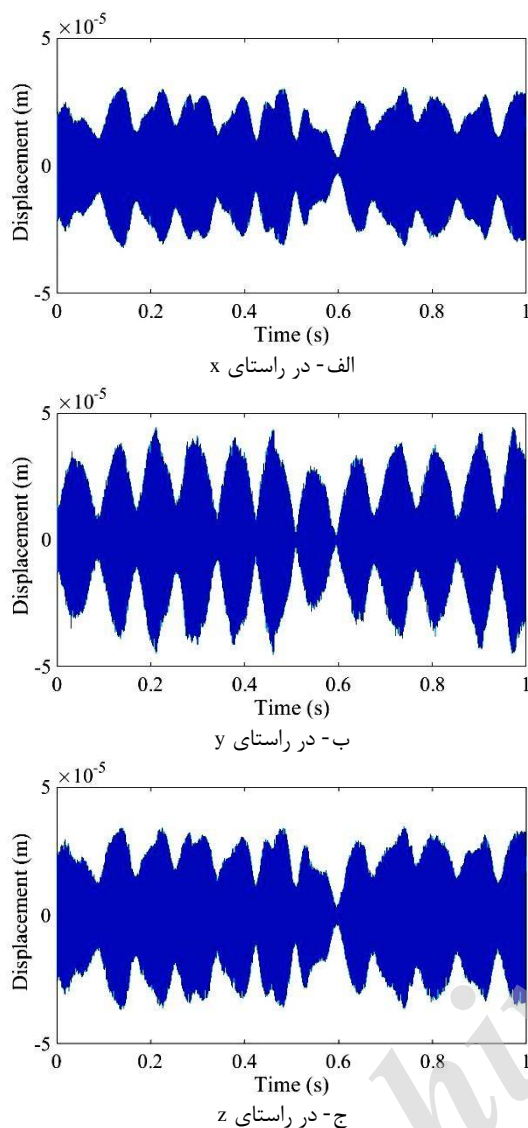


Fig 15 Displacement signals in test No. 1 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 15 سیگنال‌های جابجایی (نرخ نمونه‌برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 1

همان‌طور که شکل 14 نشان می‌دهد، مقادیر عددی شتاب بسیار بزرگ است و قابل چشم‌پوشی نیست. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است، کمتر از یک درصد از این مقدار حاصل از ارتعاشات دستگاه و محیط است و بیشتر از 99% از آن ناشی از ارتعاش ابزار است که در زمان انجام فرایند و ناشی از نیروی بین ابزار و قطعه‌کار به وجود می‌آید. با توجه به عددی بودن مقدار انتگرال در دو مرحله محاسبه سرعت و جابجایی، برای بررسی صحت نتایج جابجایی حاصل از این انتگرال‌های عددی، پس از انجام برخی از آزمون‌ها، قطعه کار بریده شد و زبری سطح (Ra) با زبری‌سنج اندازه‌گیری و با نتایج حاصل از جابجایی در راستای y برای همان آزمون مقایسه شد، که نتایج حاصل همدیگر را تأیید می‌کردند.

اگر نیروی نوک ابزار فقط تابعی از ابعاد براده در نظر گرفته شود نیروی صفر نشان‌دهنده براده با عرض صفر است و تغییر علامت نیرو از مثبت به منفی و بالعکس، بدون معنی است. درست است که طبق نظر آلتینتاش نیروی دینامیکی لازم برای برش تابعی از مساحت براده است اما نیروی نوک ابزار با این مقدار برابر نیست و در طراحی ابزار نیروی وارده به نوک ابزار باید در نظر گرفته شود.

مقادیر شتاب، توسط شتاب‌سنج نصب شده در فاصله s مقادیر (شکل 1) از انتهای ابزار گرفته شده و مقادیر جابجایی با دوپار انتگرال‌گیری عددی از مقادیر شتاب، در فاصله s از انتهای ابزار محاسبه می‌شوند. سیگنال‌های شتاب و جابجایی برای سه راستای اصلی (محورهای x، y و z مطابق با شکل 9) در شکل‌های 14 و 15 نمایش داده شده‌اند.

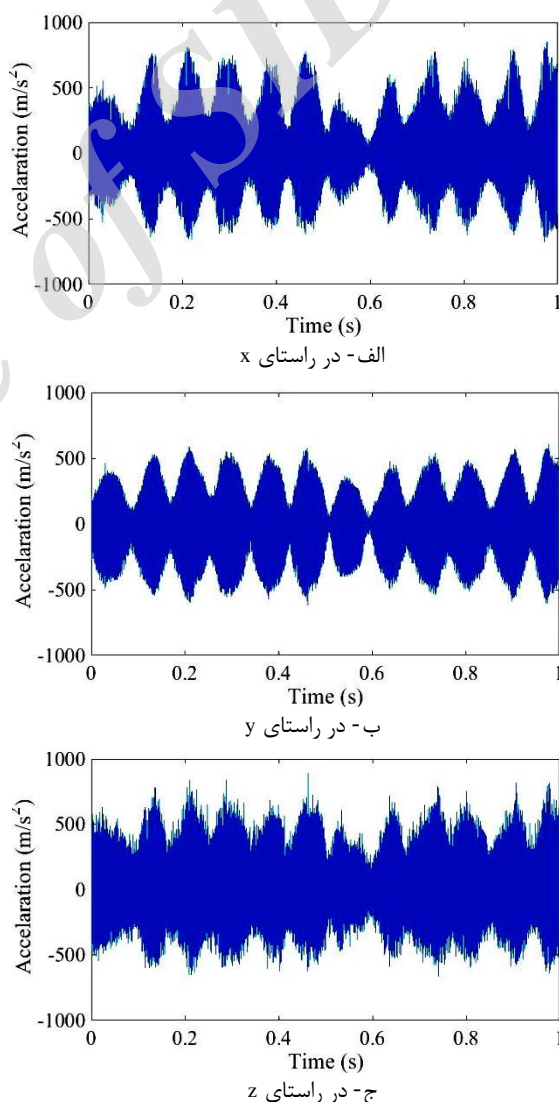


Fig 14 Acceleration signals measured in test No. 1 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 14 سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده (نرخ نمونه‌برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 1

$9/5 \times 10^7$ $4/8 \times 10^7$ 2

نتایج نیروی دینامیکی حاصل از روابط آلتینتاش در شکل 16 نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نیروی استاتیکی در نظر گرفته نشده است.

2-4- روش جدید

با قرار دادن مقادیر جدول 3 در رابطه (10) برای دو راستای y و z مؤلفه‌های نیرو در این روش محاسبه می‌شوند. برای اینکه بتوان تأثیر جابجایی و شتاب ابزار را به طور جداگانه در مقدار نهایی نیرو بررسی کرد، ابتدا این دو مقدار در دو نمودار جداگانه رسم شده‌اند که یکی وابستگی نیرو به جابجایی (شکل 17) و دیگری وابستگی نیرو به شتاب را نشان می‌دهد (شکل 18). مقادیر نهایی نیروی دینامیکی که حاصل جمع این دو مقدار است، شکل 19 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های 16 و 17 نشان داده شده است، مقادیر عددی مؤلفه نیرو ناشی از جابجایی ابزار در دو جهت y و z تقریباً با نیروی محاسبه شده از روش آلتینتاش در این دو راستا نزدیک است. در روش آلتینتاش برای محاسبه ضرایب برش باید آزمون‌های عملی انجام شود که در آن‌ها نیروی استاتیکی با استفاده از دینامومتر اندازه‌گیری می‌شود و محاسبه آن فرایندی مشکل و طولانی است که هندسه تیغچه و تراش را نیاز دارد.

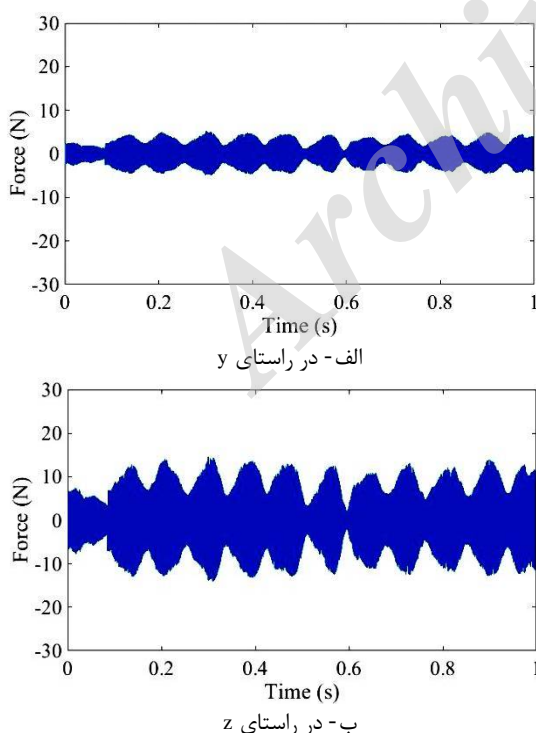


Fig 16 Calculated dynamic forces of Altintas method, test No. 1 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 16 نیروی دینامیکی محاسبه شده از روش آلتینتاش (نرخ)

4-1- نتایج حاصل از روش آلتینتاش

برای استفاده از روابط در این روش ابتدا نیاز به محاسبه‌ی ضرایب برش مربوط به هر مؤلفه نیرو است. ضرایب برشی برای نیروی دینامیکی در دو راستای شعاعی که با استفاده از مقادیر نیروی استاتیکی محاسبه شده‌اند، در جدول 5 داده شده است.

برای محاسبه نیروی دینامیکی از روش آلتینتاش برای این آزمون‌ها نیاز به پهنای برش یا عرض براده و ضخامت براده تغییرشکل نیافته است. از آنجا که برش انجام شده متعامد است، لذا این دو پارامتر با داشتن جابجایی نوک ابزار در سه جهت اصلی، از رابطه (15) محاسبه می‌شوند [14]:

$$\begin{aligned} h &= -[x(t) - x(t - T)] \\ b &= -[y(t) - y(t - T)] \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن، x جابجایی نوک ابزار در راستای محور x ، y جابجایی نوک ابزار در راستای محور y و T زمان یک دور چرخش قطعه‌کار بر حسب ثانیه است که از رابطه (16) محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{60}{N} \quad (16)$$

که در آن، N سرعت دورانی قطعه‌کار بر حسب دور بر دقیقه است.

لازم به ذکر است که در رابطه (15)، محورهای اصلی مطابق شکل 9 در نظر گرفته شده است که با محورهای در نظر گرفته شده در شکل 2 متفاوت است.

با استفاده از مود اول ارتعاشی می‌توان با داشتن جابجایی یک نقطه از ابزار به فاصله s از انتهای آن، مقدار جابجایی طولی و عرضی در نوک ابزار را از رابطه (17) و (18) محاسبه کرد:

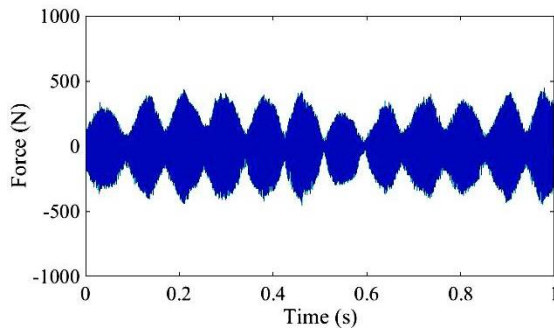
$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} u(l, t) &= U_1(l)\eta_1(t) \\ u(s, t) &= U_1(s)\eta_1(t) \end{aligned} \right\} \rightarrow u(l, t) = \frac{U_1(l)}{U_1(s)} u(s, t) \quad (17) \\ \left. \begin{aligned} w(l, t) &= W_1(l)\eta_1(t) \\ w(s, t) &= W_1(s)\eta_1(t) \end{aligned} \right\} \rightarrow w(l, t) = \frac{W_1(l)}{W_1(s)} w(s, t) \quad (18) \end{aligned}$$

که در آن، $U_1(x)$ اولین شکل مود در ارتعاش طولی برای تیر با یک انتهای گیردار و یک انتهای آزاد در فاصله x از انتهای ابزار و در زمان t [16] و $u(x, t)$ جابجایی نوک ابزار در راستای طولی (محور x) در فاصله x از انتهای ابزار و در زمان t [16] می‌باشند.

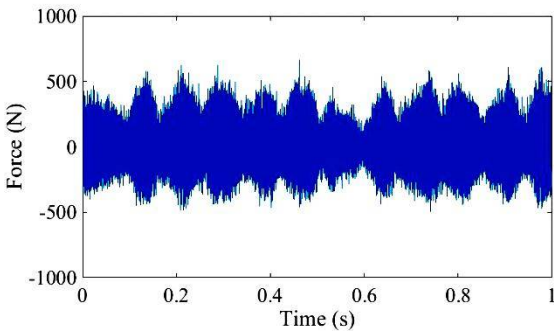
Table 5 Cutting constant of dynamic force

جدول 5 ثابت‌های برشی نیروی دینامیکی		
شماره آزمون	K_y	K_z
1	$5/4 \times 10^7$	$1/5 \times 10^8$

65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 1



الف - در راستای y



ب - در راستای z

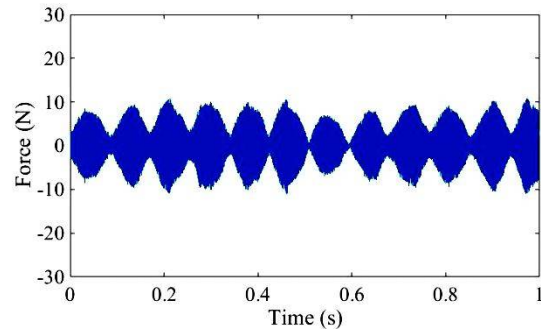
Fig 19 Calculated forces in new method, test No. 1 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 19 سیگنال نیروی دینامیکی، محاسبه شده از روش جدید (نرخ نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 1

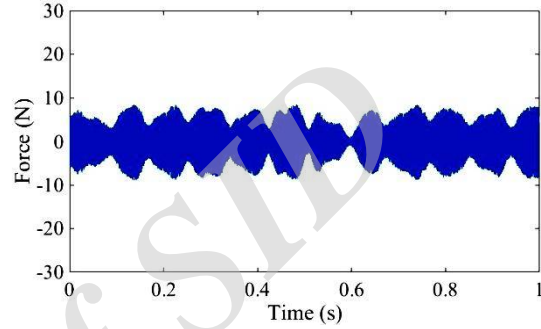
برای محاسبه این نیرو در روش جدید فقط نیاز به مشخصات هندسی و مکانیکی ابزار است که به راحتی در دسترس است. همان طور که در شکل 18 دیده می شود، مقادیر نیروی نوک ابزار که وابسته به شتاباند، مقادیر بزرگی هستند. بنابراین مقادیر نیروی کل در روش جدید بیشتر از مقادیر نیرو در روش آلتینتاش به دست می آید که نشان می دهد نیرو در نوک ابزار که معمولاً باعث به وجود آمدن ارتعاش در ابزار می شود، بسیار بزرگتر از نیروی حاصل از برش است.

در شکل های 13، 16 و 19 مقایسه مقادیر نیروی حاصل از دینامومتر، روش آلتینتاش و روش جدید در دو راستای شعاعی، مشاهده می شود که مقادیر نیروی دینامیکی در روش آلتینتاش (نیروی برش) کوچکترین مقدار دامنه را دارد و پس از آن مقادیر حاصل از دینامومتر (نیروی در انتهای ابزار) و در نهایت مقادیر محاسبه شده از روش جدید (نیروی در نوک ابزار) بیشترین مقدار دامنه را دارد. بنابراین استفاده از هر کدام از این نیروها به جای دیگری از نظر کمی نادرست است. بنابراین نمی توان از نیروی دینامیکی حاصل از دینامومتر به عنوان نیروی دینامیکی برش استفاده کرد و همچنین نمی توان از نیروی دینامیکی برش به

نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 1



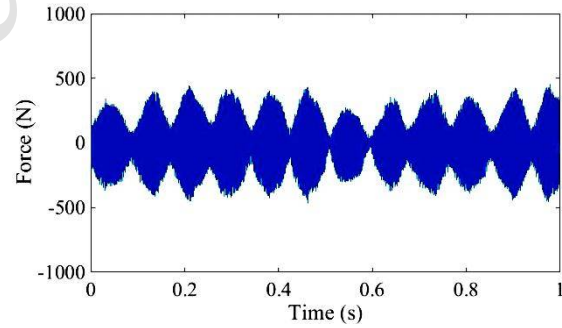
الف - در راستای y



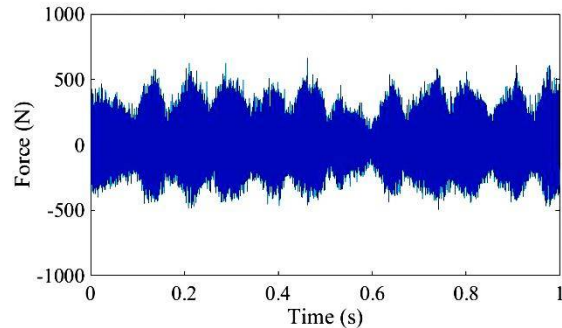
ب - در راستای z

Fig 17 Calculated force of displacement signals in new method, test No. 1 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 17 نیرو، محاسبه شده از سیگنال جابجایی در روش جدید (نرخ نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 1



الف - در راستای y



ب - در راستای z

Fig 18 Calculated forces of acceleration signals in new method, test No. 1 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

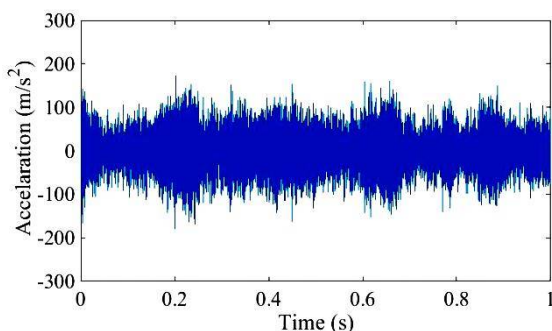
شکل 18 نیروی محاسبه شده از شتاب در روش جدید (نرخ نمونه برداری

ارتعاش ابزار بسیار کم است اما همان طور که در شکل 21 نشان داده شده است، دامنه شتاب در هر سه جهت قابل ملاحظه است که باعث می شود فرایند تراش دینامیکی باشد و نتایج حاصل از آزمون شماره 1 در این آزمون و تمام آزمون های مشابه برای هر دو حالت پایدار و ناپایدار برقرار باشد.

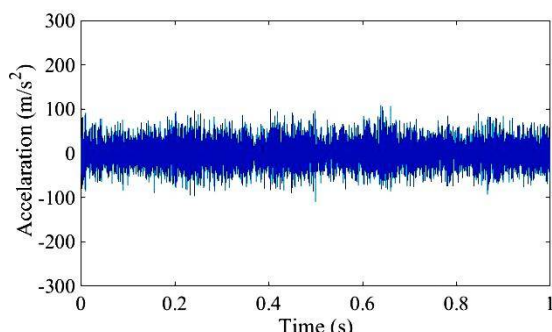
عنوان نیروی دینامیکی نوک ابزار استفاده کرد.

3-4- نتایج آزمون دوم

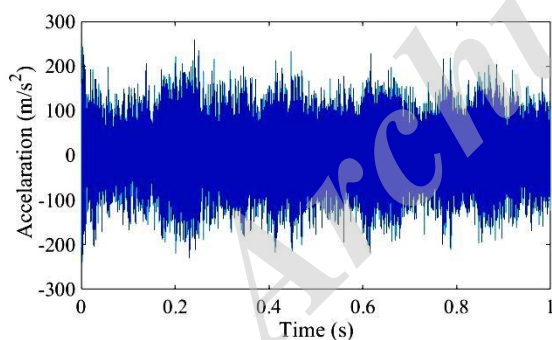
مشابه با آزمون اول، برای آزمون شماره 2 نیز اندازه گیری ها و محاسبات انجام شده است که نمودارهای حاصل از آن در شکل های 20 تا 26 آمده اند.



الف - در راستای x



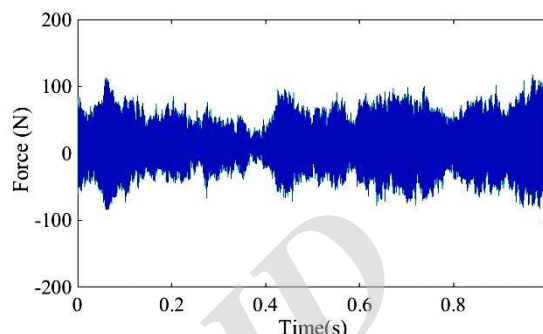
ب- در راستای y



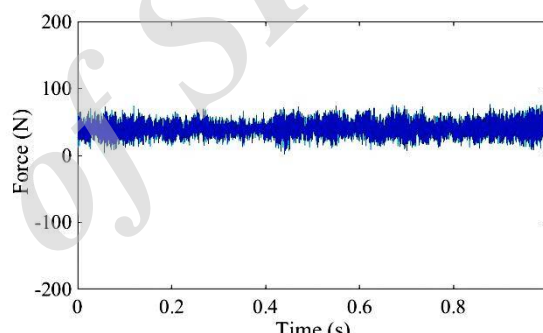
ج- در راستای z

Fig 21 Acceleration signals measured in test No. 2 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

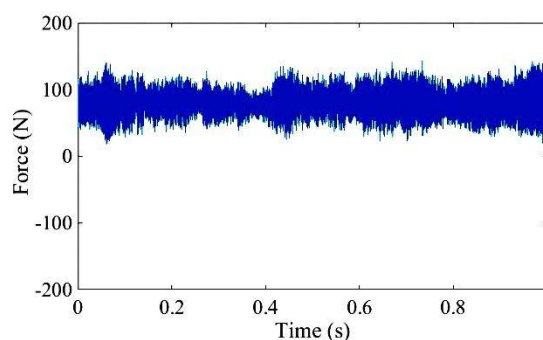
شکل 21 سیگنال شتاب حاصل از شتاب سنج (نرخ نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 2



الف - در راستای x



ب- در راستای y



ج- در راستای z

Fig 20 force signals measured by Dynamometer, test No. 2 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 20 سیگنال نیروی حاصل از دینامومتر (نرخ نمونه برداری 25000 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 2

5- نتیجه گیری

با توجه به موارد بیان شده در این مقاله می توان نتیجه گرفت که:

- دامنه سیگنال شتاب ابزار در هر دو فرایند پایدار و ناپایدار، مقادیر قابل توجهی است، لذا نمی توان از سیگنال نیروی دینامیکی حاصل از دینامومتری که در انتهای ابزار نصب می شود، به عنوان

همان طور که در این شکل ها نیز مشخص است، در این آزمون نیز نتایج مشابه آزمون شماره 1 به دست می آید که نشان می دهد مقادیر نیروی دینامیکی حاصل از دینامومتر، روش آلتینتاس و روش جدید با هم متفاوت هستند.

در آزمون شماره 2 با اینکه فرایند پایدار است و دامنه

آزمون شماره 2

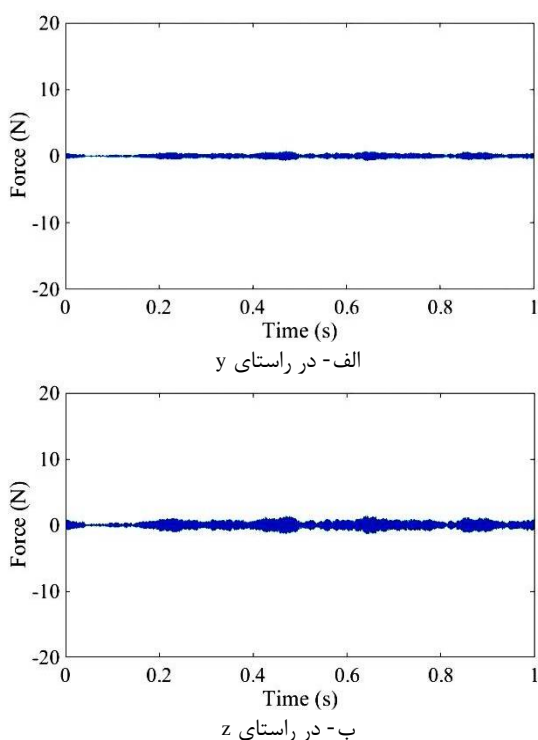


Fig. 23 Calculated dynamic forces of Altintas method, test No. 2 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 23 سیگنال نیروی دینامیکی محاسبه شده از روش آلتینتاش (نرخ نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) بر حسب زمان در آزمون شماره 2

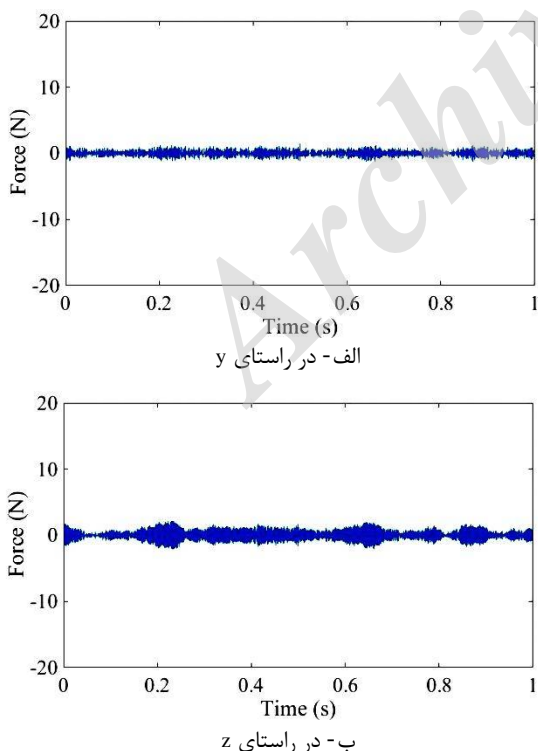


Fig. 24 Calculated forces of displacement signals in new method, test No. 2 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C- In z direction

نیروی برش یا نیروی نوک ابزار استفاده کرد، بلکه فقط می توان از میانگین مقادیر سیگنال نیرو به عنوان نیروی استاتیکی بین ابزار و قطعه کار استفاده کرد.

- معادله ارتعاش عرضی ابزار به عنوان یک تیر با یک انتهای گیردار و یک انتهای آزاد، نشان می دهد که نیروی نوک ابزار در هر راستا وابسته به دو پارامتر جابجایی و شتاب نوک ابزار در همان راستا است که با داشتن این دو پارامتر در هر راستا می توان مقدار نیرو در نوک ابزار را محاسبه کرد.

- نمی توان با استفاده از روش های محاسبه نیروی برشی که فقط مبتنی بر ابعاد براده هستند، مانند روش آلتینتاس، مقادیر نیروی بین نوک ابزار و قطعه کار را محاسبه کرد.

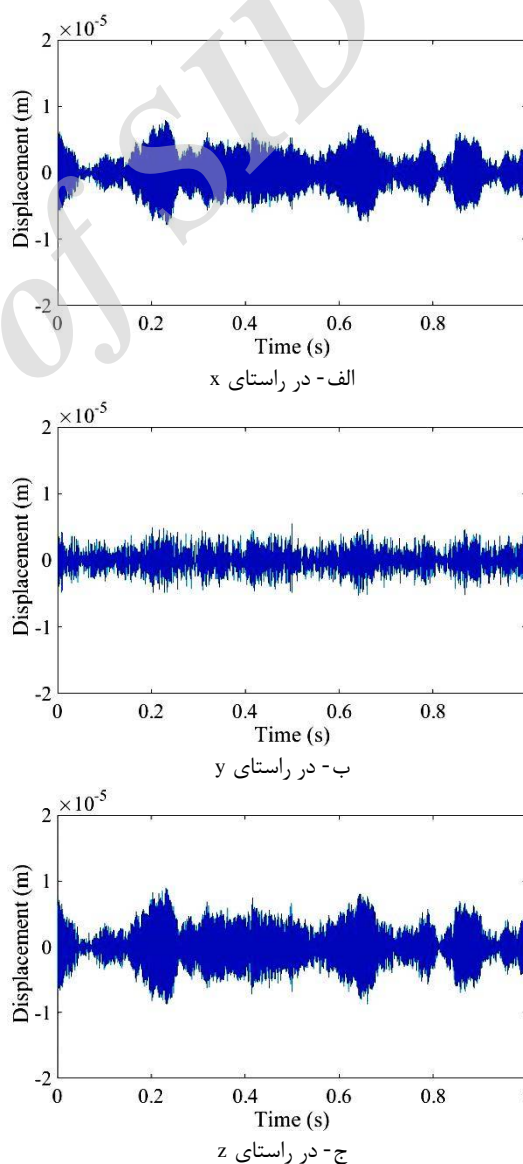


Fig. 22 Displacement signal in test No. 2 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction for x, y and z directions.

شکل 22 سیگنال جابجایی (نرخ نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) در

شکل 26 سیگنال نیروی کل در روش جدید (نرخ نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 2

- در روش جدید با داشتن مشخصات هندسی و مکانیکی ابزار، که معمولاً در کاتالوگ آن وجود دارد، به راحتی با اندازه گیری سیگنال شتاب می توان نیروی بین نوک ابزار و قطعه کار را محاسبه کرد، در حالی که در روش آلتینتاس باید برای محاسبه ضرایب برش حتماً تعداد زیادی آزمایش عملی انجام شود.

- در روش جدید می توان مقادیر منفی نیرو در نتایج دینامومتر یا نیرو در نوک ابزار را توجیه کرد که این مقادیر ناشی از مقادیر منفی شتاب بدنه ابزار هستند. اما در روش آلتینتاس که نیرو تابعی از ابعاد براده است، مقادیر منفی نشان دهنده جدا شدن ابزار از قطعه کار هستند که وقتی تماسی برقرار نیست باید مقدار نیرو صفر نشان داده شود.

- مقادیر محاسبه شده از روش آلتینتاس، مقدار نیروی لازم برای برش ابزار را نشان می دهد که مقادیر کوچکی هستند، مقادیر گرفته شده از دینامومتر، مقدار نیرو در تکیه گاه گیردار ابزار را نشان می دهد و مقادیر حاصل از روش جدید مقدار نیرو در سر آزاد ابزار را نشان می دهد که همان نیروی بین نوک ابزار و قطعه کار است. از آنجایی که شتاب در این روش تاثیر زیادی دارد، لذا دامنه این مقادیر بسیار بزرگتر از دو مقدار دیگر است.

6- مراجع

- [1] Yussefian, B. Moetakef-Imani, H. El-Mounayri, The prediction of cutting force for boring process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 1387– 1394, 2008.
- [2] G. Subramani, R. Suvada, S.G. Kapoor, R.G. DeVor and W. Meingast, A model for the prediction of force system for cylinder boring process, *Proceedings of the XV NAMRC*, pp. 439–446, 1987.
- [3] F. Kuster, Cutting dynamics and stability of boring bars, *Annals of CIRP* 39, pp. 361–366, 1990.
- [4] F. Atabey, I. Lazoglu and Y. Altintas, Mechanics of boring processes—Part I, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 463–476, 2003.
- [5] F. Atabey, I. Lazoglu and Y. Altintas, Mechanics of boring processes—Part II—multi-insert boring heads, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 477–484, 2003.
- [6] I. Lazoglu, F. Atabey and Y. Altintas, Dynamics of boring processes: Part III-time domain modeling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1567–1576, 2002.

شکل 24 مؤلفه نیرو، محاسبه شده از سیگنال جابجایی در روش جدید (نرخ نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 2

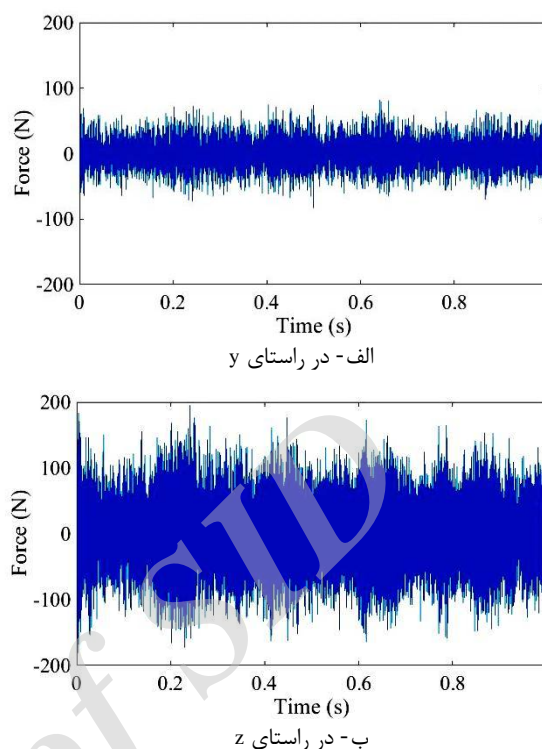


Fig. 25 Calculated force of acceleration signals in new method, test No. 2 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

شکل 25 مؤلفه نیرو، محاسبه شده از سیگنال شتاب در روش جدید (نرخ نمونه برداری 65536 نمونه در ثانیه) در آزمون شماره 2

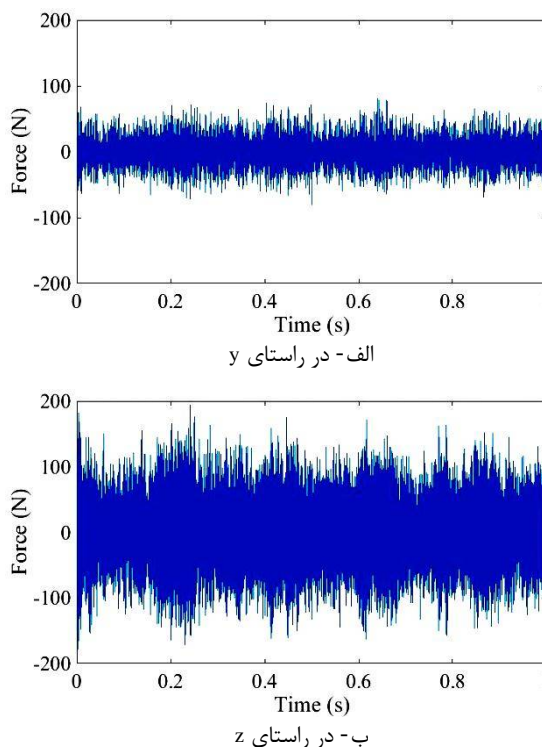


Fig. 26 Total forces in new method, test No. 2 (sampling rate=65536 Hz). A-In x direction B- In y direction C-In z direction

- of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 61, pp. 58–70, 2012.
- [13] G. Totis and M. Sortino, Robust analysis of stability in internal turning, *Procedia Engineering*, Vol. 69, pp. 1306 – 1315, 2014.
- [14] Y. Altintas, Manufacturing Automation, Cambridge University Press, 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA, 2012.
- [15] H. Tavari, M. M. Jalili and M. R. Movahhedy, Nonlinear analysis of chatter in turning process using dimensionless groups, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 37, pp. 1151–1162, 2015.
- [16] S. Rao, Vibration of Continuous Systems, *University of Miami, Coral Gables, Florida*, 2007.
- [17] E. I. Rivin and H. Kang, Enhancement of dynamic stability of cantilever tooling structures, *International Journal Math. Tools Manufacture*. Vol. 32, No. 4, pp.539-561, 1992.
- [7] E. Budak and E. Ozlu, Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations: multidimensional approach, *Annals of the CIRP 53*, pp. 401–404, 2007.
- [8] E. Budak and E. Ozlu, Analytical Modeling of Chatter Stability in Turning and Boring Operations—Part I: Model Development, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol.129, pp. 726–732, 2007.
- [9] E. Budak and E. Ozlu, Analytical Modeling of Chatter Stability in Turning and Boring Operations—Part II: Experimental Verification, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 129, pp. 733–739, 2007.
- [10] B. Moetakef-Imani, N. Z. Yussefian, Dynamic simulation of boring process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 1096–1103, 2009.
- [11] G. Totis, M. Sortino, E. Kuljanic, F. Prosperi, Identification of machining system dynamics in internal turning, *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Manufacturing Systems AMST'11*, June16–17, Mali Losinj, Croatia, 2011.
- [12] M. Sortino, G. Totis and F. Prosperi, Development