مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 77-84

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی پایداری فرآیند در تراش‌کاری ارتعاشی

مرتضی شنکایی[1]، محمدجواد ناطق[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 143-14115، nategh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 تیر 1395
پذیرش: 31 مرداد 1395
ارائه در سایت: 11 مهر 1395

کلید واژگان:
تراش‌کاری
لرزه
تراش‌کاری ارتعاشی
روش دورمند-پرینس

چکیده

ارتعاش لرزه که در این تحقیق بر روی آن تمرکز شده است، نوعی ارتعاش خود برانگیخته است که در فرآیندهای گوناگون ماشین‌کاری نظیر فرزکاری و تراش‌کاری به وجود می‌آید. این نوع از ارتعاشات بعد از ایجاد به سرعت رشد کرده و پروسه ماشین‌کاری را ناپایدار می‌کند. از عوارض این پدیده می‌توان به سر و صدای اضافی دستگاه، سطوح موج‌دار، براده‌های منقطع همچنین شکست ابزار و اجزای ماشین اشاره کرد. عمق برش مهمترین پارامتر بروز لرزه در فرآیند تراش‌کاری است. اجتناب از عمق برش بحرانی سبب اطمینان از پایداری فرآیند خواهد بود. از روش‌های به دست آوردن عمق برش بحرانی، مدل‌سازی فرآیند است. فرآیند تراش‌کاری ارتعاشی با مزیت های فراوان دارای ماهیتی متفاوت از تراش‌کاری سنتی است. در این مقاله به کمک مدل‌سازی این فرآیند و حل عددی آن، مقادیر عمق برش بحرانی به دست آمده و به کمک آزمایش و قیاس با تراش‌کاری سنتی صحت‌سنجی آن انجام شده است. در فرآیند تراش‌کاری ارتعاشی، هرچه نسبت زمان براده‌برداری به کل تناوب ارتعاش کمتر باشد، فرآیند پایداری بیشتری خواهد داشت. این نسبت با فرکانس و دامنه ارتعاش نسبت مستقیم و با سرعت برشی نسبت عکس دارد.

Stability Analysis of the Vibration-Assisted Turning Process

Morteza Shankayi, Mohammad Javad Netegh*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 July 2016
Accepted 21 August 2016
Available Online 02 October 2016

Keywords:
Turning
Chatter
vibration-assisted turning
Dormand-Prince method

ABSTRACT

Chattering is a kind of self-excited vibration encountered in different machining processes such as milling and turning. This type of self-excited vibration rapidly develops after commencement and destabilizes the whole process. This phenomenon leads to, among other issues, increased noise, wavy surface finishes, discontinuous chips, and failure in the tool or machine parts. The depth of cut is the main parameter in the occurrence of chattering in machining processes. Avoiding the critical depth of cut ensures the stability of the process. Process modeling is a way to obtain the critical depth of cut. The vibration-assisted turning process has many advantages and is of a different nature than the conventional machining. In this paper, the vibration-assisted turning process is modeled and numerically solved and the critical depth of cut is obtained. Validation of the results is performed using experimental data and comparison with conventional machining. In the vibration-assisted turning process, higher stability is obtained with lower ratios of cutting duration to the total vibration period. This ratio is directly proportional to vibration frequency and amplitude and is inversely proportional to the cutting speed.

1-مقدمه

ارتعاش لرزه، ارتعاشی خود برانگیخته است که در فرآیندهای ماشین‌کاری بروز می‌نماید. این ارتعاشات، یکی از فرکانس‌های طبیعی سیستم را تحریک نموده و باعث افزایش تدریجی دامنه ارتعاش می‌گردد [1]. افزایش دامنه ارتعاش سبب بروز عوامل نامطلوبی نظیر زیری سطح زیاد و خرابی قطعه‌کار و ابزار خواهد شد. مدل‌سازی و تحلیل این ارتعاشات پژوهشگران را کمک می‌کند تا درک بهتری از این پدیده داشته باشند و به کمک آن از بروز آن اجتناب نموده و یا آن را تحت کنترل درآورند. این مدل‌سازی همراه با پیچیدگی بسیار بوده و معمولا به روشهای عددی حل می‌گردد.

در سال 2000، بلاچاندرا، برای هر مرحله در فرزکاری نیرویی متفاوت تعریف نموده و به روش عددی حل کرده است [2]. دشپند و همکارانش در 2001، معادلات لرزه را برای تغییرات ضخامت براده به کمک برنامه‌ای کامپیوتری حل نموده است [3]. در سال 2007، لانگ با کمک همکارانش، به روش جداسازی متغیرها توانسته است مقادیر تغییر ضخامت و جدایش ابزار از قطعه‌کار را مدل نماید [4]. در سال 2009 نیز ولامارتینز و همکاران، معادلات لرزه در حوزه زمان را به روش اختلالات جزئی حل کرده است [5]. نایفه و همکارش به روش چند مقیاسی معادلات ارتعاشی را حل نموده و تأثیر آن را بر پارامترهای ماشین‌کاری در سال 2011، بررسی نموده است [6]. در همین سال یوسف و همکارانش، معادلات ارتعاش فرآیند سوراخ‌کاری را در حوزه زمان به روش جداسازی حل نموده و پارامتر زاویه مارپیچ را براساس آن بهینه نموده است [7]. در سال 2012، مرادی و همکارانش، منابع داخلی و دینامیک غیرخطی در پدیده لرزه را بررسی کرده است. همچنین عوامل دیگر نظیر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Shankayi, M. J. Netegh, Stability Analysis of the Vibration-Assisted Turning Process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 77-84, 2016 (in Persian)

نیروهای پایه و برشی غیرخطی نیز در فرزکاری در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر پدیده لرزه باززا پدیده جفت شدن مدها نیز در این فرآیند مدل شده است [8].

در تراش‌کاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، ارتعاشات فرکانس بالا به حرکت معمولی ابزار تراش‌کاری اضافه می‌شود. کاهش نیروهای متوسط ماشین‌کاری [9]، افزایش صافی سطح [10,9] و کاهش خطای قطری [12,11] از مزایای این فرآیند است. مهمترین پارامتر این فرآیند در کاهش نیرو [13]، کاهش دمای فرآیند [14] و خطای قطری [15] نسبت زمان برش به پریود ارتعاش است. محققان بر این باورند که دلیل اصلی کاهش نیروی برش در فرایند تراش‌کاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، جدایش ابزار از منطقه برش و اتصال دوباره می‌باشد [17,16]. همین جدایش ابزار سبب ایجاد پایداری بیشتر در برابر لرزه در تراش‌کاری ارتعاشی شده است.

شیائو در سال 2002 [18] و ما در سال 2011 [19] با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به فرآیند ناپایدار تراش‌کاری سنتی، آن‌را پایدار نمودند. جانگ در سال 2016 به بررسی علت رخداد لرزه در تراش‌کاری آلتراسونیک، با کمک تغییر زاویه در ابزار لرزه را در تراش‌کاری آلتراسونیک از بین برده است [20]. در این مقاله پدیده لرزه در تراش‌کاری ارتعاشی مدل‌سازی شده است و سپس با تحلیل این مدل‌سازی و حل معادلات به دست آمده به کمک روش عددی، نمودارهای پایداری برای فرآیند تراش‌کاری ارتعاشی به دست آمده است. سپس این نمودارها به کمک آزمایش صحت‌سنجی شده است.

2- مدل‌سازی پدیده لرزه در تراش‌کاری ارتعاشی

از آن‌جا که در تراش‌کاری ارتعاشی از همان ابزار تراش‌کاری سنتی استفاده می‌شود، خواص ارتعاشی (جرم، ضریب دمپینگ و فنریت) در هر دو مدل‌سازی یکسان خواهد بود. تفاوت این فرآیندها در تفاوت رفتار و مقدار نیروی تولید شده خواهد بود. در رابطه زیر معادله ارتعاشی برای یک سیستم یک درجه آزادی بیان شده است.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = P(t) = P_0 + dP \qquad (1)$$

در این رابطه، m, c, k خواص دینامیکی و $P(t)$ نیروی فرآیند تراش‌کاری است که شامل نیروی ثابت P_0 و نیروهای متغیر dP است. مهمترین عامل ایجاد نیروهای متغیر و ایجاد لرزه تغییرات ضخامت براده است. در رابطه زیر، ارتباط میان تغییر ضخامت براده و ایجاد نیروی متغیر نشان داده شده است.

$$P(t) = P_0 + dP = k_f a h(t) = k_f a h_0 + k_f a[x(t-\tau) - x(t)] \qquad (2)$$

در رابطه بالا، k_f ضریب برش، a عمق برش و $h(t)$ ضخامت براده در لحظه t است. این ضخامت شامل ضخامت براده نامی (h_0) که باعث ایجاد نیروی ثابت P_0 می‌شود و تغییرات ضخامت ناشی از مکان ابزار در لحظه t $(x(t))$ و دور قبل از t $(x(t-\tau))$ است که سبب ایجاد نیروی متغیر dP می‌شود. تغییرات ضخامت براده در "شکل 1" نشان داده شده است.

با جای‌گذاری رابطه (2) در رابطه (1) معادله حاکم بر فرآیند لرزه باززا در تراش‌کاری سنتی به دست خواهد آمد.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = k_f a h_0 + k_f a[x(t-\tau) - x(t)] \qquad (3)$$

این معادله ارتعاشی سیستم یک درجه آزادی است که دارای حل تحلیلی می‌باشد و به کمک آن مقادیر عمق برشی که سبب بروز لرزه می‌شود را در رابطه (4) بیان می‌کند [1].

$$a_{\mathrm{cri}} = \frac{-1}{2k_f G} \qquad (4)$$

در این رابطه a_{cri} عمق برش بحرانی و G قسمت حقیقی از تابع تبدیل سیستم تراش‌کاری است که در رابطه زیر بیان شده است [1]. k ضریب فنریت سیستم، ω_c فرکانس لرزه، ω فرکانس طبیعی سیستم و ξ نسبت میرایی در سیستم تراش‌کاری سنتی است.

$$G = \frac{1}{k}\left(\frac{1-(\omega_c/\omega)^2}{(1-(\omega_c/\omega)^2)^2 + (2\xi(\omega_c/\omega))^2}\right) \qquad (5)$$

با تغییر در سرعت چرخشی قطعه‌کار، فرکانس لرزه (ω_c) نیز تغییر کرده و با توجه به رابطه (5)، مقادیر مختلفی برای عمق برش بحرانی به دست –می‌آید. با کنار هم قرار دادن این سرعت چرخشی و عمق برش بحرانی، نمودار پایداری به دست می‌آید. این نمودار در "شکل 2" نشان داده شده است. اگر مقدار عمق برش، بیش از عمق برش بحرانی باشد، ارتعاشات ابزار رشد پیدا کرده و باعث ایجاد ناپایداری (لرزه) در فرآیند می‌گردد (شکل 2-a) و اگر عمق برش کمتر از عمق برش بحرانی باشد، ار تعاشات ابزار میرا شده و فرآیند پایدار می‌گردد (شکل 2-c). در عمق برش بحرانی ارتعاشات ناخواسته ابزار ثابت باقی خواهد ماند (شکل 2-b).

در تراش‌کاری ارتعاشی نیروی متغیر دیگری به سیستم تراش‌کاری سنتی اضافه می‌گردد. این نیروی متغیر می‌تواند باعث ایجاد تغییرات در دامنه ارتعاشی ابزار گردد. در تراش‌کاری سنتی درصد زیادی از نیرو ثابت بوده و مقدار ناچیزی متغیر است. این در حالیست که در تراش‌کاری ارتعاشی مقدار زیادی از نیرو متغیر است. مقدار نیروی تراش‌کاری ارتعاشی از رابطه زیر به دست می‌آید [22,21].

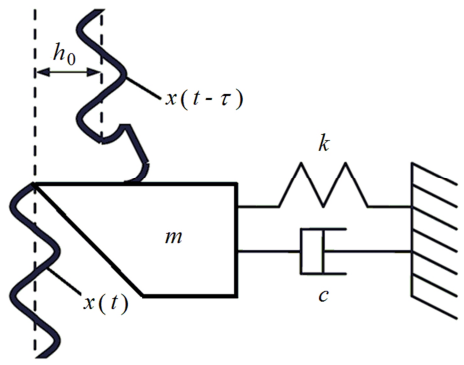


Fig. 1 Variations in chip thickness

شکل 1 تغییرات ضخامت براده

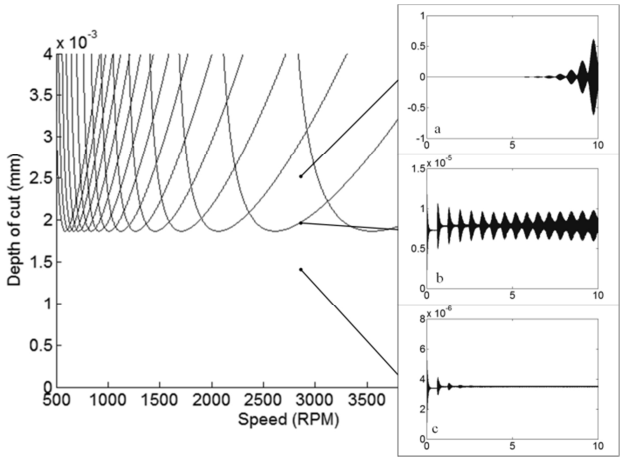


Fig. 2 Schematic figure of tool vibration in different depth of cut a) unstable b) margin of stability c) stable

شکل 2 نمودار شماتیک ارتعاشات ابزار در شرایط مختلف عمق برش a) ناپایدار b) مرزپایداری c) پایدار

$$P_{\mathrm{uat}} = \frac{t_c}{T}P_{\mathrm{ct}} + \frac{2P_{\mathrm{ct}}}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\sin\frac{n\omega t_{\mathrm{c}}}{2}\cos n\omega\pi \tag{6}$$

در این رابطه، t_{c} زمان برش، T پریود ارتعاش و ω فرکانس زاویه‌ای ابزار ارتعاشی، P_{ct} نیروی برشی در تراش‌کاری سنتی است. با قراردادن رابطه فوق در رابطه (1)) و نیز اضافه نمودن پارامترهای دیگر نوسانی (نوسان در مقدار عرض براده) معادله ارتعاش ابزار برای تراش‌کاری ارتعاشی به دست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) &= dP + P \\ &= k_{\mathrm{f}}ah_0 + k_{\mathrm{f}}a[x(t-\tau) - x(t)] \\ &+ \left[\frac{t_c}{T_{\mathrm{vc}}}P_{\mathrm{ct}} + \frac{2P_{ct}}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\sin\frac{n\omega t_c}{2}\cos n\omega\pi\right] \end{aligned} \tag{7}$$

حل معادله فوق از روش‌های تحلیلی ممکن نبوده و بایستی به کمک روش‌های عددی حل گردد. نتایج حاصل از حل این معادله به کمک روش‌های عددی برای مقادیر خواص دینامیکی دستگاه تراش CNC-TME40 (جدول 1 و جدول 2) در "شکل 3" آمده است. خواص دینامیکی دستگاه تراش CNC-TME40 به کمک آزمایش به دست آمده است، بدین ترتیب که مقادیر عمق برش بحرانی، فرکانس لرزه با انجام چندین آزمایش به دست آمده است و سپس به کمک روابط (4) و (5)خواص دینامیکی ماشین ابزار محاسبه شده است. به دست آوردن خواص دینامیکی حین بروز لرزه از مزایای این روش است. ضریب برش نیز برای جنس قطعه‌کار AL7075 به کمک آزمایش و با اندازه‌گیری نیروهای تراش‌کاری و استفاده از روابط مرچنت به دست آمده است.

در "شکل 3-a" نتایج مربوط به تراش‌کاری سنتی می‌باشد. نمودار بیانگر آن است که عمق برش در حد بحرانی خود قرار گرفته است. در تراش‌کاری ارتعاشی (قسمت b) میانگین جابجایی ابزار زیادتر از تراش‌کاری سنتی بوده ولی هنوز در حد بحرانی است. جزئی که باعث پایداری بیشتر در تراش‌کاری ارتعاشی می‌باشد تغییرات مقدار نیروی برشی نخواهد بود بلکه جدایش ابزار از قطعه‌کار خواهد بود. برای مدل نمودن این پدیده تابع زمانی زیر معرفی می‌شود.

$$f(t) = \begin{cases} 1, & nT < t < nT + t_{\mathrm{c}} \\ 0, & nT + t_{\mathrm{c}} < t < (n+1)T + t_{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{8}$$

در رابطه فوق، T دوره تناوب ابزار ارتعاشی، t_c زمان برش و n عددی صحیح می‌باشد. این تابع در سمت راست رابطه (3) ضرب می‌گردد تا تغییرات نیروی معادل در تراش‌کاری ارتعاشی به دست آمده و می‌توان رابطه ارتعاشی فرآیند تراش‌کاری ارتعاشی را مطابق رابطه (9) نوشت.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = \{k_{\mathrm{f}}ah_0 + k_{\mathrm{f}}a[x(t-\tau) - x(t)]\}f(t) \tag{9}$$

با توجه به رابطه بالا هنگامی‌که فرآیند برش انجام می‌گردد، ارتعاش ابزار همانند تراش‌کاری سنتی رو به رشد است ولی زمانی‌که فرآیند برش قطع می‌گردد (برگشت ابزار ارتعاشی)، سیستمی با ارتعاشات آزاد به وجود آمده که دمپینگ مثبت سیستم باعث کاهش دامنه ارتعاش لرزه ابزار می‌گردد.

جدول 1 خواص دینامیکی دستگاه تراش CNC-TME40

Table 1 Dynamic properties of CNC-TME40 lathe

خواص ارتعاشی ابزار		
k (N/m)	c (Ns/m)	m (kg)
618150	2764.8	36

جدول 2 پارامترهای فرآیند

Table 2 Cutting parameter of turning process

پارامترهای برش	
k_f (N/mm^2)	h_0 (mm)
250.46	0.1

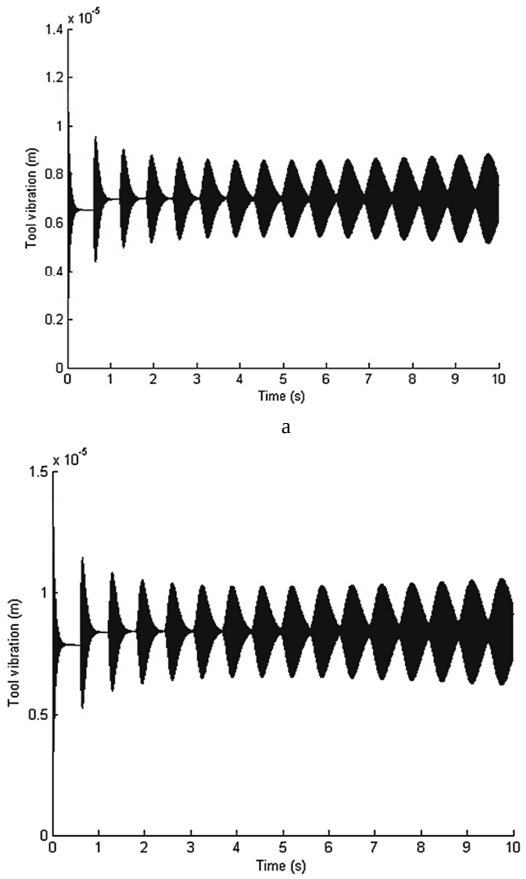


Fig. 3 Results of first model a) Conventional turning b) Vibrational turning

شکل 3 مقادیر به دست آمده در نتایج مدل اول a) تراش‌کاری سنتی b) تراش‌کاری ارتعاشی

Depth of cut=2.3 mm, Spindle speed =200 rpm,
Feed rate=0.1 mm/rev, Frequency =20 kHz, Amplitude =1 mm

رابطه (9) به کمک روش عددی حل شده و مقدار جابجایی ابزار در فاصله زمانی 0 تا 10 ثانیه در شکل‌های (4) و (5) نشان داده شده است. در "شکل 4" فرآیند تراش‌کاری ارتعاشی با اغراق زیاد نشان داده شده است تا فیزیک کاهش ارتعاشات لرزه در تراش‌کاری ارتعاشی قابل لمس باشد. در "شکل 5" میزان ارتعاشات در تراش‌کاری سنتی (a) و ارتعاشی (b) را نشان می‌دهد.

2-1- رسم نمودارهای پایداری

به دلیل پیچیدگی مدل حل معادلات به صورت تحلیلی میسر نشده است. به همین دلیل از روش عددی برای رسم نمودارهای پایداری استفاده شده است. برای حل معادلات از روش دورمند-پرینس[1] استفاده شده است. در این روش که بر مبنای روش رانج-کوتا توسعه یافته، با داشتن تنها یک نقطه قبلی، نقطه بعدی محاسبه خواهد شد. در این روش استپ زمانی متغیر بوده و نیز هر نقطه با محاسبه 6 معادله دیگر به دست خواهد آمد و باعث افزایش پایداری معادلات و سرعت محاسبات شده است. خطای حل معادلات در مقیاس $O(h^5)$ خواهد بود.

برای به دست آوردن عمق برش بحرانی، مقداری برای آن حدس زده می‌شود و رابطه ارتعاشی حل می‌گردد. در صورتی که فرآیند پایدار باشد،

[1] Dormand–Prince (RKDP) method

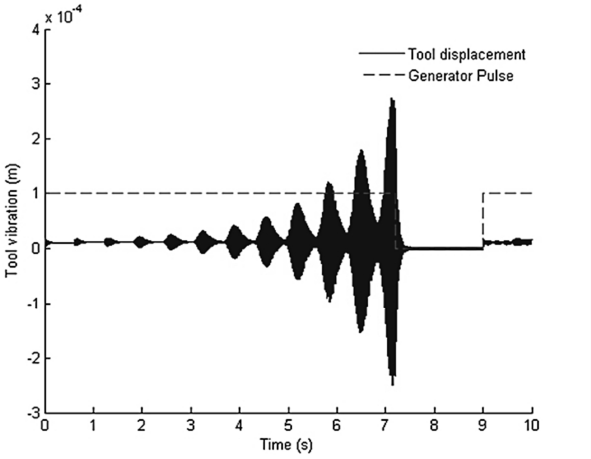
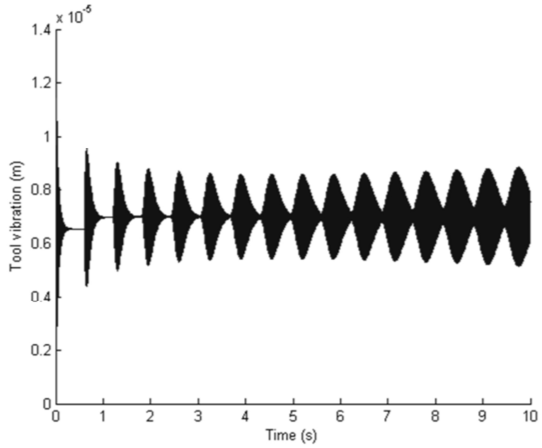


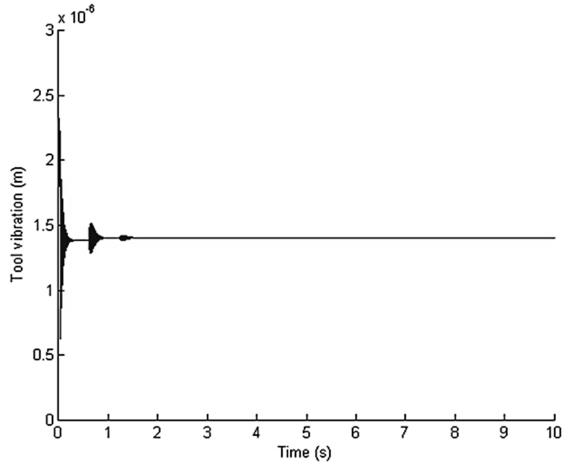
Fig. 4 Tool separation and stability increase in vibrational turning

شکل 4 جدایش ابزار و افزایش پایداری در تراش‌کاری ارتعاشی

Depth of cut=2.75 mm, Spindle speed =400 rpm,
Feed rate=0.1 mm/rev, Frequency =0.11 Hz, Amplitude =1 mm



a



b

Fig. 5 Results of second model a) Conventional turning b) Vibrational turning

شکل 5 مقادیر به دست آمده در نتایج مدل دوم a) تراش‌کاری سنتی b) تراش‌کاری ارتعاشی

Depth of cut=2.3 mm, Spindle speed =200 rpm,
Feed rate=0.1 mm/rev, Frequency =20 kHz, Amplitude =1 mm

مقادیر y (ارتعاش ابزار) محدود بوده و در غیر این صورت مقادیری رو به رشد خواهد داشت(شکل 2) با تکرار حدس‌ها و استفاده از روش نصف کردن[1] مقدار عمق بحرانی برش با دقت موردنظر پیدا خواهد شد.

برای تشخیص درست بودن مدل‌سازی انجام شده، رابطه (4) و (5) که بیانگر عمق برش بحرانی در تراش‌کاری ارتعاشی است و با استفاده از مقادیر جدول 1 و 2 حل شده و نمودار پایداری مطابق "شکل 6" به‌دست آمده است. همچنین با استفاده از رابطه (8) و (9) و نیز استفاده از جداول 1 و 2 و اعمال شرایط تراش‌کاری سنتی ($t_c = T$) مقادیر عمق برش بحرانی در سه سرعت دورانی 400 rpm، 500 و 600 به کمک مدل‌سازی به‌دست می‌آید که با نشانه‌های مربع نشان داده شده است و مشاهده می‌گردد که بر یکدیگر منطبق هستند.

لازم به توضیح است که در سرعت‌های دورانی پایین به‌دلیل وجود عوامل غیرخطی از جمله میرایی فرایندی و ایجاد لبه انباشته، مقادیر عمق برش بحرانی در فرایند تجربی به شدت افزایش پیدا می‌کند [23-25]. این افزایش به حدی است که عمق پیش‌بینی شده بدون در نظر گرفتن عوامل غیرخطی 0.4 mm پیش‌بینی شده است اما در آزمایشات به عمق بیش از 1.2 mm بدون ناپایداری دست یافته شده است [25].

3- آزمایش به دست آوردن عمق برش بحرانی

برای حصول دقت در آزمایشات، توجه به حذف و تقلیل خطاهای سیستماتیک و اتفاقی الزامی است. شناخت خطاهای سیستماتیک و حذف آن ها، قبل از آزمایش، هنگام انجام آن و بعد از انجام آزمایش ممکن است. اما خطاهای اتفاقی تنها با تکرار زیاد است که به آزمایش قابلیت اطمینان می‌بخشد. تکرار در آزمایشات، زمان و هزینه بر خواهد بود. روش تاگوچی، از روش‌های مبتنی بر آرایه‌های متعامد، ضمن کاهش آزمایشات، تأثیر هر آرایه را بر پارامترهای خروجی، به طور کامل بیان می‌کند. هندسه ابزار نیز به گونه‌ای در نظر گرفته شده تا به کمک طراحی هورن ارتعاش دهنده، شرایط تراش‌کاری عمودی را مهیا سازد. جنس قطعه‌کار از آلیاژی پر مصرف در صنایع نظامی و هوافضا انتخاب گردیده است و قطر آن نیز برای رسیدن به حداکثر دامنه کاری تراش‌کاری ارتعاشی (محدودیت در سرعت بحرانی) از مقاطع موجود در بازار انتخاب شده است.

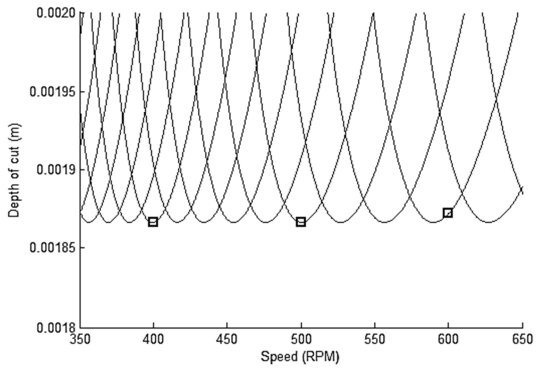


Fig. 6 Depth of cut resulted from modeling (square marker) vs. closed form solution of stability lobe (solid line) in conventional turning of CNC-TME40 lathe machine

شکل 6 مقادیر عمق برش به دست آمده از مدل‌سازی (مربع توخالی) در مقایسه با حل تحلیلی دقیق در تراش‌کاری سنتی (خططوط پر) برای دستگاه تراش CNC-TME40

Feed rate=0.1 mm/rev

به دلیل آنکه تغییرات عمق برش بحرانی، نسبت به سرعت دورانی اسپیندل

[1] Bisection method

غیر خطی و نوسانی است، از 5 سطح برای انجام آزمایشات استفاده شده است. انتخاب سطوح هر فاکتور با توجه به محدودیت‌های ابزار اندازه‌گیری، دستگاه و فرآیند به دست آمده‌اند که در جدول 3 نشان داده شده است. دیگر پارامترهای فرآیند نیز در جدول 4 نشان داده شده است.

چیدمان آزمایش در "شکل 7 و 8" نشان داده شده است. حسگر جریان گردابی در نزدیکی گره ارتعاشی ابزار قرار گرفته است تا بدین‌وسیله تنها جابجایی ابزار در اثر پدیده لرزه را ثبت نماید. زاویه خروج براده‌ها به صورت عمود بر جهت پیشروی است که نشان‌دهنده تراش‌کاری عمودی می‌باشد.

3-1- به دست آوردن عمق برش بحرانی

به دلیل نویزهای حاصل از حرکت در دستگاه تراش و نیز ارتعاش ابزار در تراش‌کاری ارتعاشی، جابجایی ابزار به‌علت لرزه با استفاده از حسگر جریان گردابی قابل تشخیص نبود. به همین دلیل تمامی قطعات تا انتها تراش‌کاری

جدول 3 فاکتورهای ورودی آزمایش و سطوح آن

Table 3 Input factors of experimental test and its levels

نام فاکتور	سطوح	واحد
دامنه ارتعاش ابزار	0,0.4,7,10,13	□m
سرعت اسپیندل	50,100,200,300,400	rpm
سرعت پیشروی	0.05,0.1,0.15,0.2,0.25	mm/rev

جدول 4 شرایط آزمایش

Table 4 Experimental test conditions

شرایط برش	سرعت اسپیندل	rpm	50,100,200,300,400
	سرعت برشی	m/min	4.7,9.4,19,28,37
	سرعت پیشروی	mm/rev	0.05,0.1,0.15,0.2,0.25
هندسه ابزار	زاویه براده α_0		α_0 = 5°
	زاویه آزاد γ		γ_0 = 0°
	جنس ابزار		کارباید
	جنس		AL 7075
قطعه‌کار	قطر	mm	30
	طول	mm	300
ارتعاش ابزار	دامنه	□m	0,0.4,7,10,13
	فرکانس	kHz	20±0.5

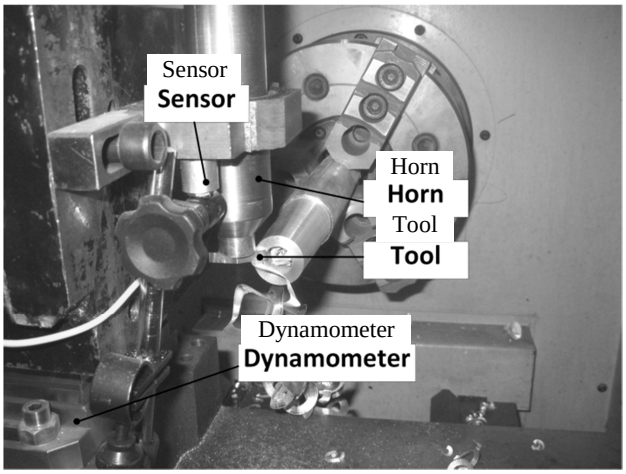


Fig. 7 Experimental setup (Work-piece, Tool, Instruments, etc.)

شکل 7 نحوه چیدمان ابزار، حسگر جریان گردابی و قطعه‌کار

شده و با تحلیل نیروهای به دست آمده از ماشین‌کاری مشاهده می‌گردد، نیروی بزرگی با فرکانس حدود 150 هرتز، در تراش‌کاری قطعات اتفاق افتاده است. این فرکانس که به هیچکدام از فرکانس‌های ماشین‌کاری (مانند فرکانس ناشی از لنگی قطعه‌کار) قابل ارتباط نبوده و در نزدیکی فرکانس لرزه ماشین است، تنها خبر از وجود لرزه در تراش‌کاری را می‌دهد.

با تکه کردن نیروهای تراش‌کاری به بازه‌های 1 ثانیه‌ای و تحلیل هر ثانیه، زمانیکه فرآیند دچار لرزه گردیده است مشخص می‌گردد. با داشتن زمان شروع لرزه و نیز مشخص بودن مقدار سرعت دورانی و پیشروی، موقعیت ابزار در آن لحظه و نیز عمق برشی در آن هنگام مشخص خواهد شد. این روش در حداکثر مقادیر سرعت دورانی و پیشروی حدود 1% خطا به ازای هر ثانیه خواهد داشت.

4- نتایج مدل‌سازی و آزمایش‌ها

4-1- نتایج مدل‌سازی

معادلات مدل‌سازی برای پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌ها برای دستگاه تراش CNC-TME40 مطابق رابطه 8 و 9 حل شده است و مقادیر به دست آمده برای عمق بحرانی برش در "شکل 9" نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سرعت‌های دورانی بالا نمودارها بر هم منطبق شده و نشان‌دهنده گذر سرعت برشی از سرعت بحرانی است. در "شکل 10" مقادیر عمق برش بحرانی که با حل مدل‌سازی به دست آمده نشان داده شده است. این نمودار در محدوده پارامترهای ورودی آزمایش‌های تجربی رسم شده است. همان‌گونه که مشخص است در دامنه‌های ارتعاشی بالاتر، نمودار پایداری در موقعیت بالاتری قرار گرفته است که نشان دهنده پایداری بیشتر فرآیند در دامنه‌های بالاتر ارتعاش ابزار است. دامنه ارتعاش 13 میکرونی ابزار ارتعاشی سبب ایجاد بهترین پایداری می‌گردد.

4-2- نتایج آزمایش‌ها

از آن‌جایی‌که فرآیند تراش‌کاری به صورت لوله‌تراشی بوده است، زبری ناشی از ارتعاش ابزار در اثر لرزه بر روی شکل براده خود را نشان داده است. در "شکل 11-a"، براده‌ای که دچار لرزه شده است، دارای سطحی خشن بوده در حالی‌که براده بدون لرزه با سطحی براق در "شکل 11-b"، به نمایش در آمده است.

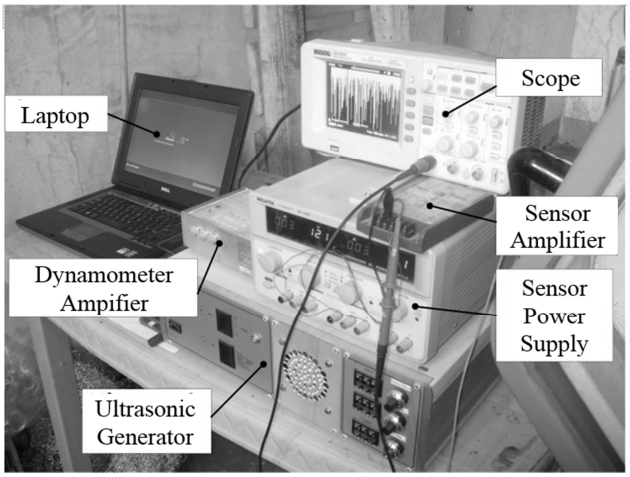


Fig. 8 Experimental setup (Instruments, Generators, Scopes, etc.)

شکل 8 نحوه چیدمان ژنراتور آلتراسونیک و مبدل‌های حسگر جریان گردابی و دیناموتر و رایانه

در تحلیل تاگوچی مقادیر میانگین در ازای هر یک از سطوح ورودی به دست

آمده است. این مقادیر در "شکل 12" نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، بیشترین تأثیر را بر روی عمق برش بحرانی ابتدا سرعت پیشروی و سپس دامنه ارتعاشات آلتراسونیک دارد. بهترین دامنه ارتعاشی، سطح 5 (13 میکرون) بهترین سرعت پیشروی، سطح 1 (0.05 میلی‌متر بر دور) و بهترین سرعت دورانی، سطح 4 (300 دوربردقیقه) است.

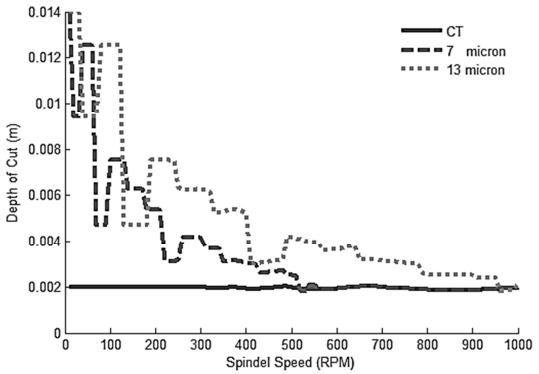


Fig. 9 Stability border in conventional and vibrational turning

شکل 9 نمودار پایداری در تراش‌کاری ارتعاشی و سنتی به کمک مدل‌سازی
Feed rate=0.1 mm/rev, f=20 kHz

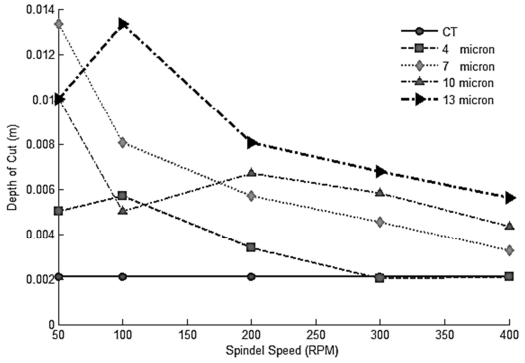
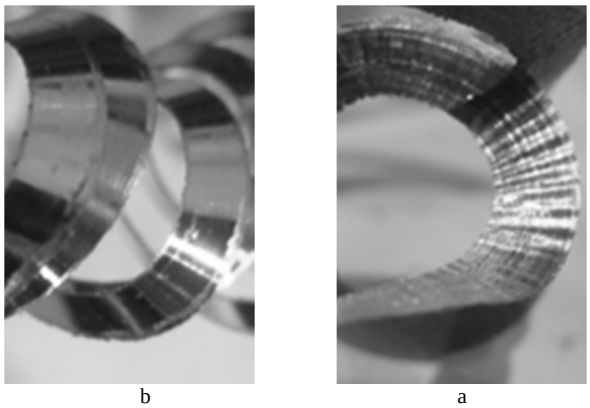


Fig. 10 Modeling results for critical depth of cut

شکل 10 مقادیر عمق برش بحرانی در نتایج مدل‌سازی
Feed rate=0.1 mm/rev, f=20 kHz



b a

Fig. 11 Chips a) with chatter mark b) without chatter

شکل 11 ایجاد براده در برابر لرزه a) آثار لرزه بر براده b) براده براق بدون لرزه

با افزایش مقدار دامنه ارتعاشات آلتراسونیک مقدار عمق برش بحرانی افزایش یافته است. این روند در مورد سرعت پیشروی معکوس بوده و با افزایش سرعت پیشروی مقدار عمق برش بحرانی کاهش یافته است این کاهش عمق بحرانی به‌دلیل کاهش میرایی فرآیندی است که ماهیتی غیرخطی دارد. در مورد سرعت دورانی باید گفت نمودار نشان داده شده در حقیقت برشی از نمودار پایداری می‌باشد که خود دلیلی بر صحت آزمایش‌های صورت گرفته است.

نمودار نرمال بودن خطاها در "شکل 13 و 14" نشان داده شده است. عدد P-Value نشان دهنده آن است که شرط نرمال بودن خطاها به درستی تحقق یافته است. در "شکل 15" توزیع خطاها در اطراف منحنی برازش شده نشان داده شده است. تصادفی بودن چینش خطاها نشان از مستقل بودن آنها دارد.

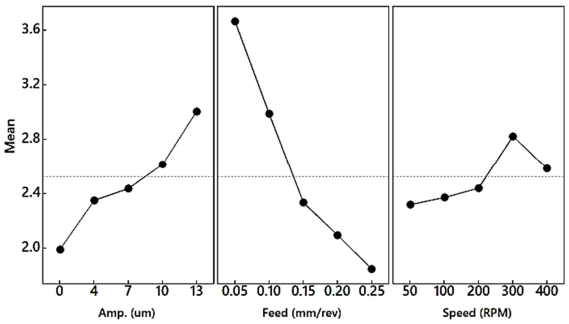


Fig. 12 Mean values of depth of cut vs. input parameter levels

شکل 12 مقادیر میانگین داده‌ها نسبت به سطوح ورودی

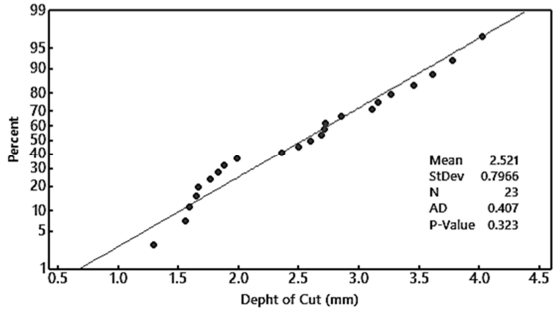


Fig. 13 Probability plot shows normality of errors

شکل 13 نمودار نرمال بودن خطاها

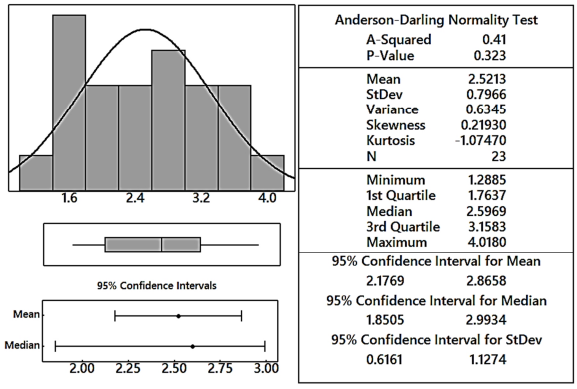


Fig. 14 Errors are normal

شکل 14 نمودار نرمال بودن خطاها

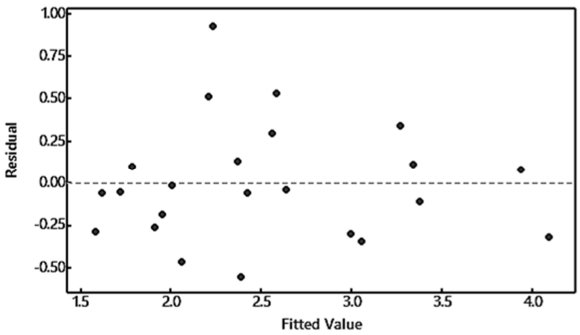


Fig. 15 Residuals are in a random pattern

شکل 15 نمودار فاصله خطاها از مقدار برازش شده

به کمک آنالیز واریانس می‌توان تأثیر متقابل پارامترهای ورودی بر روی عمق برش بحرانی را مشاهده نمود. این نمودار در "شکل 16" نشان داده شده است. نمودار دامنه در مقابل سرعت که در "شکل 17" نشان داده شده است را می‌توان قسمت‌هایی از نمودارهای پایداری دانست. همان‌طور که مشخص است دامنه‌های بیشتر دارای لوب بالاتری نیز هستند. این لوب‌ها با تغییر دامنه در محور افقی نیز دچار تغییر می‌گردند. با مقایسه "شکل 17" و "شکل 10" می‌توان به همگرایی نتایج مدل‌سازی و نتایج تجربی رسید. روند نمودارها و جایگاه آن‌ها نسبت به یکدیگر در آزمایش و مدل‌سازی همسان می‌باشد. در حالی‌که تفاوت مقادیر به دلیل رفتارهای غیرخطی ناشی از میرایی فرآیندی است.

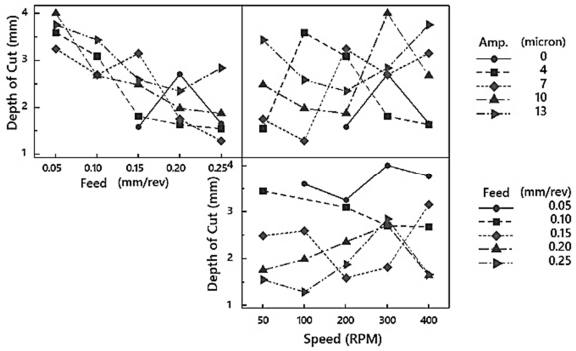


Fig. 16 Interaction plot for depth of cut vs. input parameter levels

شکل 16 اثر متقابل فاکتورهای ورودی بر عمق برش بحرانی

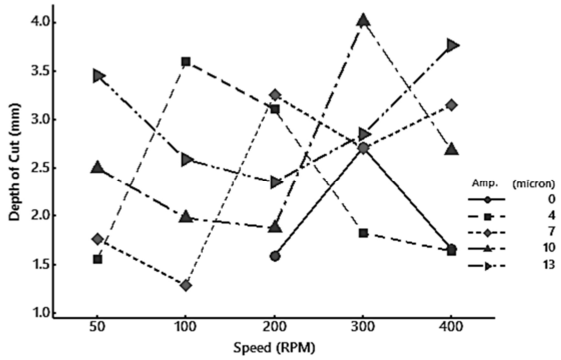


Fig. 17 Depth of cut vs. spindle speeds and different tool vibration amplitude

شکل 17 مقادیر عمق برش بحرانی در سرعت و دامنه ارتعاش‌های متفاوت

جدول 5 مقایسه مقادیر عمق برش بحرانی در آزمایش و مقادیر برازش شده

Table 5 Predicted and experimental test depth of cut

شماره آزمایش	دامنه ارتعاش (mm)	سرعت پیشروی (mm/rev)	سرعت دورانی (rpm)	عمق برش برازش شده (mm)	عمق برش آزمایش (mm)	خطا (%)
1	4	0.15	400	2.1426	2.6310	18.5
2	10	0.20	200	2.0236	1.8480	9.5
3	13	0.15	300	3.0389	2.0873	45

4-3- صحت سنجی آزمایش‌ها

آزمایش‌های صورت گرفته برای تأیید صحت تحلیل‌های آماری و نیز مقادیر برازش شده در جدول 5 آمده است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای آزمایش‌های 1 و 2 مقادیر پیش‌بینی شده و آزمایش شده دارای تقریب مناسبی هستند. خطا در آزمایش 3 نیز می‌تواند از مقادیر آزمایش صحت سنجی باشد، زیرا نسبت به آزمایشات اصلی هم دارای مخروط با شیب تندتری است و هم آنکه یک‌بار انجام شد است.

5- نتیجه گیری

شناخت پدیده لرزه به‌دلیل عیوبی که بر فرآیند وارد می‌آورد، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است و بدین منظور مدل‌سازی و تحلیل‌هایی بر روی آن انجام شده است. به‌دلیل پیچیدگی روابط به دست آمده، حل به روش عددی در این مدل‌سازی‌ها بسیار شایع است. تراش‌کاری ارتعاشی، فرآیندی جدید در تراش‌کاری می‌باشد که با نوسان دادن ابزار سبب قطع و وصل منظم جریان براده می‌گردد و مزایایی نظیر کاهش نیروهای فرآیند و افزایش صافی سطح را به همراه دارد. با مدل‌سازی انجام شده در این مقاله، مدلی برای تراش‌کاری ارتعاشی ارائه شد و روابط حاکم بر آن به کمک روش دورمند-پرینس حل شد، همین‌طور پایداری تراش‌کاری ارتعاشی در مقابل لرزه بررسی شد و نشان داده شد که عمق برش بحرانی رابطه مستقیمی با دامنه ارتعاش دارد. با افزایش دامنه ارتعاش از 7 میکرون به 13 میکرون، عمق برش بحرانی نیز افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی، عمق برش بحرانی در سرعت دورانی نزدیک 100 rpm که برای تراش‌کاری سنتی کمتر از 2 میلی‌متر است، برای تراش‌کاری ارتعاشی، به ترتیب بیش از 7 و 12 میلی‌متر برای 7 و 13 میکرون ارتعاش ابزار است. همین‌طور در سرعت 400 rpm، عمق برش بحرانی که برای تراش‌کاری سنتی حدود 2 میلی‌متر، می‌باشد، 3 و 5 میلی‌متر برای تراش‌کاری ارتعاشی و برای 7 و 13 میکرون ارتعاش ابزار ارتعاشی است. از نتایج آزمایش‌ها این‌گونه نتیجه می‌شود که برای داشتن فرآیندی با بیشترین پایداری x، بهترین دامنه ارتعاشی، سطح 5 (13 میکرون) بهترین سرعت پیشروی، سطح 1 (0.05 میلی‌متر بر دور) و بهترین سرعت دورانی، سطح 4 (300 دور بر دقیقه) است.

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها

با تشکر فراوان از آقای دکتر حمید سلیمانی مهر که در انجام آزمایشات نویسندگان را همراهی نموده‌اند.

7- مراجع

[1] K. Cheng, Machining Dynamics (Fundamentals, Applications and Practices), pp. 21-89, London: Springer, 2009.
[2] B. Balachandran, M. X. Zhao, A Mechanics based model for study of dynamics of milling operations, Meccanica, Vol. 35, No, 2, pp. 89-109, 2000.
[3] N. Deshpande, M. S. Fofana, Nonlinear regenerative chatter in turning, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Vol. 17, No. 2-1, pp. 107-112, 2001.

[4] X. H. Long, B. Balachandran, Stability analysis for milling process, Nonlinear Dynamics, Vol. 49, No. 3, pp. 349-359, 2007.
[5] L.Vela-Martínez, J. C. Jáuregui-Correa, O. M. González-Brambila, G. Herrera-Ruiz, A. Lozano-Guzmán, Instability conditions due to structural nonlinearities in regenerative chatter, Nonlinear Dynamics, Vol. 56, No. 4, pp. 415-427, 2009.
[6] A. H. Nayfeh, N. A. Nayfeh, Analysis of the cutting tool on a lathe, Nonlinear Dynamics, Vol 63, No. 3, pp. 395-416, 2011.
[7] A.R. Yusoff, N.D. Sims, Optimisation of variable helix tool geometry for regenerative chatter mitigation. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 51, No. 2, pp. 133-141, 2011.
[8] H. Moradi, M. R. Movahhedy, G. Vossoughi, Dynamics of regenerative chatter and internal resonance in milling process with structural and cutting force nonlinearities. Journal of Sound and Vibration, Vol. 331, No. 16, pp. 3844-3865, 2012.
[9] H. Soleimanimehr, M. J. Nategh, S. Amini, Analysis of diametrical error of machined workpieces in ultrasonic vibration assisted turning, Advanced Materials Research, Vols. 264-265, No. 1, pp. 1079-1084, 2011.
[10] V. Ostasevicius, R. Gaidys, J. Rimkeviciene, R. Dauksevicius, An approach based on tool mode control for surface roughness reduction in high-frequency vibration cutting, Journal of Sound and Vibration, Vol. 329, No. 23, pp. 4866–4879, 2010.
[11] H. Soleimanimehr, M. J. Nategh, H. Jamshidi, Mechanistic model of work-piece diametrical error in conventional and ultrasonic assisted turning, Materials and Manufacturing Technologies XIV, Vol. 445, No.1, pp. 911-916, 2012.
[12] H. Soleimanimehr, M. J. Nategh, An Investigation on the Influence of Cutting-Force's Components on the Work-piece Diametrical Error in Ultrasonic-Vibration-Assisted Turning, AIP Conference Proceedings, Vol. 1315, No. 1, pp. 1145-1150, 2011.
[13] A. S. Adnan, S. Subbiah, Experimental investigation of transverse vibration-assisted orthogonal cutting of AL-2024, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 50, No. 3, pp. 294–302, 2010.
[14] J. L. Overcash, J. F. Cuttino, In-process modeling of dynamic tool-tip temperatures of a tunable vibration turning device operating at ultrasonic frequencies, Precision Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 505–515, 2009.
[15] H. Soleimanimehr, M. J. Nategh, B. Gholamzadeh, Experimental Analysis of Work-piece's Diametrical Error in Ultrasonic-Vibration-Assisted Turning, AIP Conference Proceedings, Vol. 1315, No. 1, pp. 1175-1180, 2011.
[16] N. Ahmed, A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, Analysis of forces in ultrasonically assisted turning, Journal of Sound and Vibration, Vol. 308, No. 3-5, pp. 845–854, 2007.
[17] D.E. Brehl, T.A. Dow, Review of vibration-assisted machining, Precision Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 153–172, 2008.
[18] M. Xiao, S. Karube, T. Soutome, K. Sato, Analysis of chatter suppression in vibration cutting, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, No. 15, pp. 1677-1685, 2002.
[19] C. Ma, J. Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, Analysis of regenerative chatter suppression with adding the ultrasonic elliptical vibration on the cutting tool. Precision Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 329-338, 2011.
[20] H. Jung, T. Hayasaka, E. Shamoto, Mechanism and suppression of frictional chatter in high-efficiency elliptical vibration cutting, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 65, No. 1, pp. 369-372, 2016.
[21] C. Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, L. Wang, Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, No. 12-13, pp. 1305–1310, 2004.
[22] C. Maa, E. Shamoto, T. Moriwaki,Y. Zhang, L. Wang, Suppression of burrs in turning with ultrasonic elliptical vibration cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, No. 11, pp. 1295–1300, 2005.
[23] S. A. Tajalli, Mohammad R. Movahhedy, J. Akbari, Investigation of the effects of process damping on chatter instability in micro end milling, Procedia CIRP, Vol. 1, pp. 156-161, 2012.
[24] Y. kurata, S. D. Merdol, Y. Altintas, N. Suzuki, E. Shamoto, Chatter stability in turning and milling with in process identified process damping, Journal Of Advanced Mechanical Design, System, And Manufacturing, Vol. 4, No. 6, pp. 1107-1118, 2010.
[25] Y. Altintas, Manufacturing Automation, Second Edittion, pp. 135-149, New York: Cambridge University Press, 2012.