



بررسی پایداری فرآیند تراش کاری ارتعاشی

مرتضی شنکایی¹، 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

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 تیر 1395
پذیرش: 31 مرداد 1395
ارائه در سایت: 11 مهر 1395
کلید واژگان:
تراش کاری
لرزه
تراش کاری ارتعاشی
روش دورمند-پرنس

ارتعاش لرزه که در این تحقیق بر روی آن تمرکز شده است، نوعی ارتعاش خود برانگیخته است که در فرآیندهای گوناگون ماشین کاری نظیر فرز کاری و تراش کاری به وجود می‌آید. این نوع از ارتعاشات بعد از ایجاد به سرعت رشد کرده و پروسه ماشین کاری 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 تراش کاری 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 تراش کاری ارتعاشی با مزیت‌های فراوان دارای ماهیتی متفاوت از تراش کاری 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 تراش کاری سنتی صحت‌سنجی آن انجام شده است. در فرآیند تراش کاری 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

2001، معادلات لرزه را برای تغییرات ضخامت براده به کمک برنامه‌های 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 ماشین کاری در سال 2011، بررسی نموده است [6]. در همین سال یوسف و همکارانش، معادلات ارتعاش فرآیند سوراخ کاری 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

ارتعاش لرزه، ارتعاشی خود برانگیخته است که در فرآیندهای ماشین کاری 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 زبری 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 معمولاً به روش‌های عددی حل می‌گردد. در سال 2000، بلاچاندرا، برای هر مرحله در فرآیند نیرویی متفاوت تعریف نموده و به روش عددی حل کرده است [2]. دشپند و همکارانش در

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 تراش کاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، ارتعاشات فرکانس بالا به حرکت معمولی ابزار تراش کاری اضافه می‌شود. کاهش نیروهای متوسط ماشین کاری [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 بریود ارتعاش است. محققان بر این باورند که دلیل اصلی کاهش نیروی برش در فرآیند تراش کاری 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 تراش کاری ارتعاشی شده است. شیائو در سال 2002 [18] و ما در سال 2011 [19] با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به فرآیند ناپایدار تراش کاری سنتی، آنرا پایدار نمودند. جانگ در سال 2016 به بررسی علت رخداد لرزه در تراش کاری آلتراسونیک، با کمک تغییر زاویه در ابزار لرزه را در تراش کاری آلتراسونیک از بین برده است [20]. در این مقاله پدیده لرزه در تراش کاری ارتعاشی مدل‌سازی شده است و سپس با تحلیل این مدل‌سازی و حل معادلات به دست آمده به کمک روش عددی، نمودارهای پایداری برای فرآیند تراش کاری ارتعاشی به دست آمده است. سپس این نمودارها به کمک آزمایش صحت‌سنجی شده است.

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

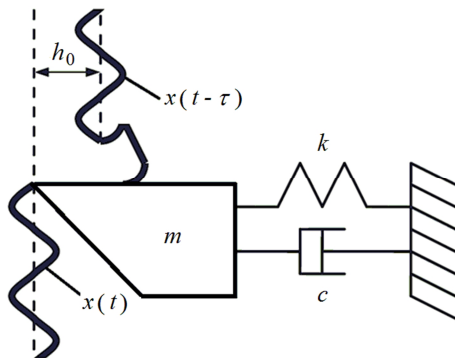


Fig. 1 Variations in chip thickness

شکل 1 تغییرات ضخامت براده

2- مدل‌سازی پدیده لرزه در تراش کاری ارتعاشی

از آنجا که در تراش کاری ارتعاشی از همان ابزار تراش کاری 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.

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

در این رابطه، m, c, k خواص دینامیکی و $P(t)$ نیروی فرآیند تراش کاری 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.

$$P(t) = P_0 + dP = k_f a h(t) = k_{f1} a h_0 + k_{f2} a [x(t - \tau) - x(t)] \quad (2)$$

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 تراش کاری سنتی به دست خواهد آمد.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = k_{f1} a h_0 + k_{f2} a [x(t - \tau) - x(t)] \quad (3)$$

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].

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

در این رابطه a_{cri} عمق برش بحرانی و G قسمت حقیقی از تابع تبدیل

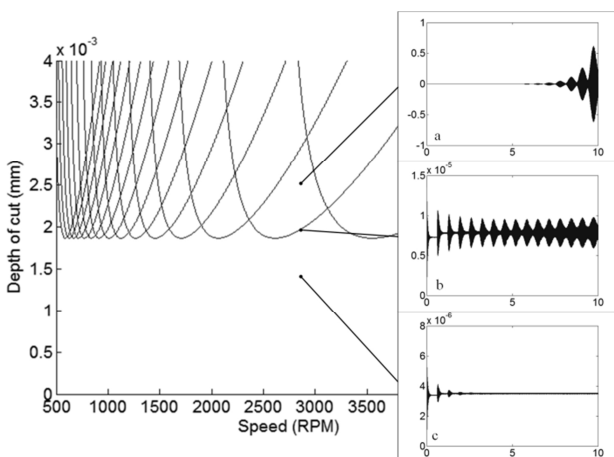


Fig. 2 Schematic figure of tool vibration in different depth of cut a) unstable b) margin of stability c) stable

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

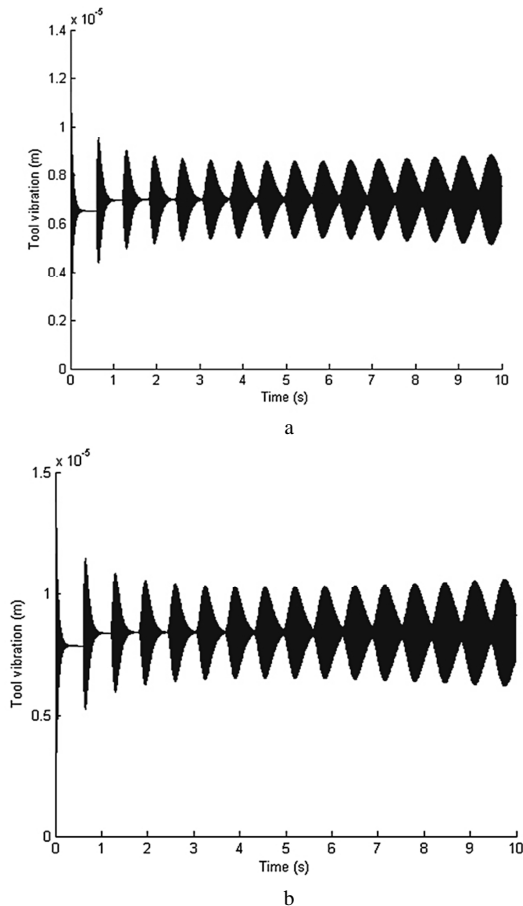


Fig. 3 Results of first model a) Conventional turning b) Vibrational turning

شکل 3 مقادیر به دست آمده در نتایج مدل اول (a) تراش کاری سنتی (b) تراش کاری 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 تراش کاری ارتعاشی با اغراق زیاد نشان داده شده است تا فیزیک کاهش ارتعاشات لرزه در تراش کاری ارتعاشی قابل لمس باشد. در "شکل 5" میزان ارتعاشات در تراش کاری سنتی (a) و ارتعاشی (b) را نشان می‌دهد.

1-2- 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-پرنس¹ 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،

$$P_{uat} = \frac{t_c}{T} P_{ct} + \frac{2P_{ct}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\omega t_c}{2} \cos n\omega\pi \quad (6)$$

در این رابطه، t_c زمان برش، T پریود ارتعاش و ω فرکانس زاویه‌ای ابزار ارتعاشی، P_{ct} نیروی برشی در تراش کاری 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 تراش کاری ارتعاشی به دست خواهد آمد.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = dP + P \\ = k_f a h_0 + k_f a [x(t-\tau) - x(t)] \\ + \left[\frac{t_c}{T} P_{ct} + \frac{2P_{ct}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\omega t_c}{2} \cos n\omega\pi \right] \quad (7)$$

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 تراش کاری و استفاده از روابط مرچنت به دست آمده است.

در "شکل 3-a" نتایج مربوط به تراش کاری سنتی می‌باشد. نمودار بیانگر آن است که عمق برش در حد بحرانی خود قرار گرفته است. در تراش کاری ارتعاشی (قسمت b) میانگین جابجایی ابزار زیادتر از تراش کاری سنتی بوده ولی هنوز در حد بحرانی است. جزئی که باعث پایداری بیشتر در تراش کاری 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.

$$f(t) = \begin{cases} 1, & nT < t < nT + t_c \\ 0, & nT + t_c < t < (n+1)T + t_c \end{cases} \quad (8)$$

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 تراش کاری ارتعاشی به دست آمده و می‌توان رابطه ارتعاشی فرآیند تراش کاری ارتعاشی را مطابق رابطه (9) نوشت.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = \{k_f a h_0 + k_f a [x(t-\tau) - x(t)]\} f(t) \quad (9)$$

با توجه به رابطه بالا هنگامی که فرآیند برش انجام می‌گردد، ارتعاش ابزار همانند تراش کاری سنتی رو به رشد است ولی زمانی که 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

¹ Dormand-Prince (RKDP) method

خواهد داشت (شکل 2) با تکرار حدس‌ها و استفاده از روش نصف کردن¹ 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 تراش کاری ارتعاشی است و با استفاده از مقادیر جدول 1 و 2 حل شده و نمودار پایداری مطابق "شکل 6" به دست آمده است. همچنین با استفاده از رابطه (8) و (9) و نیز استفاده از جداول 1 و 2 و اعمال شرایط تراش کاری سنتی ($t_c = T$) مقادیر عمق برش بحرانی در سه سرعت دورانی 400، 500 و 600 rpm به کمک مدل‌سازی به دست 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 به دلیل 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 آن‌ها، 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 تراش کاری 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 تراش کاری ارتعاشی (محدودیت در سرعت بحرانی) از مقاطع موجود در بازار انتخاب شده است.

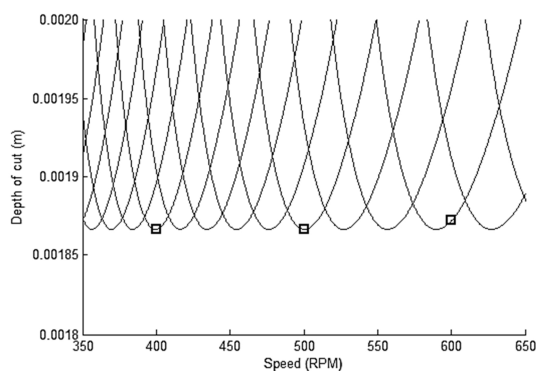


Fig. 6 Depth of cut resulted from modeling (square marker) vs. closed form solution of stability lobe (solid line) in conventional turning of CNC-TME40 lathe machine

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

Feed rate=0.1 mm/rev

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

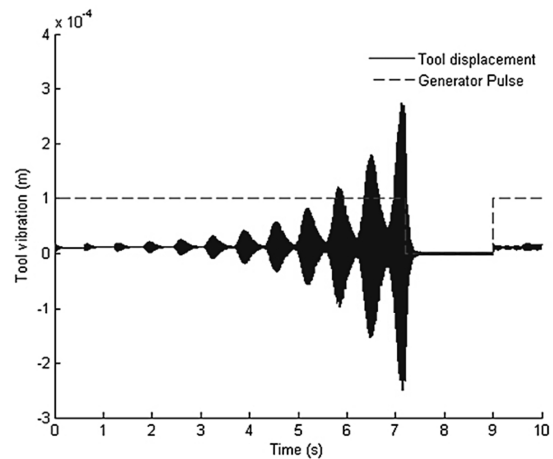
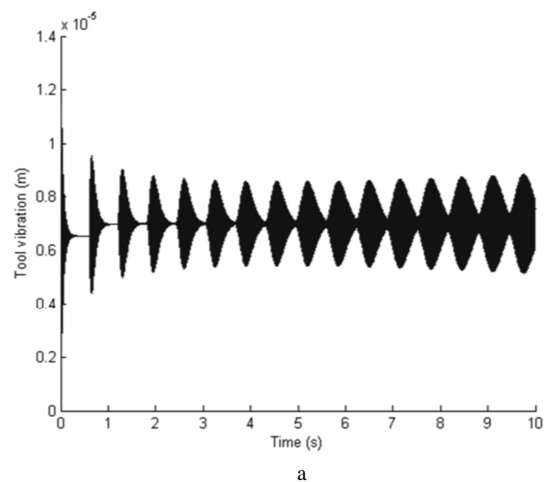
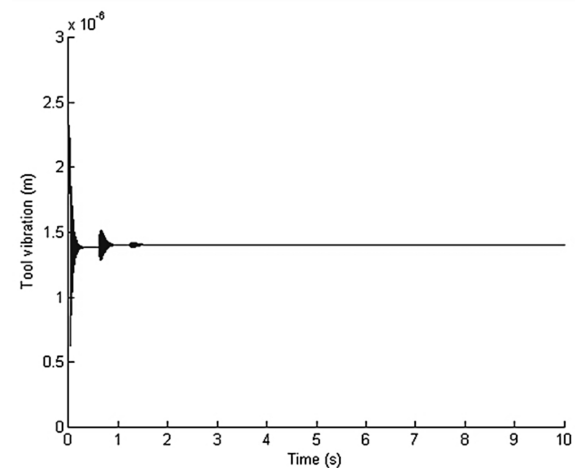


Fig. 4 Tool separation and stability increase in vibrational turning

شکل 4 جدایش ابزار و افزایش پایداری در تراش کاری 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) تراش کاری سنتی (b) تراش کاری ارتعاشی

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

مقادیر γ (ارتعاش ابزار) محدود بوده و در غیر این صورت مقادیری رو به رشد

¹ Bisection method

نیروی بزرگی با فرکانس حدود 150 هرتز، در تراش کاری قطعات اتفاق افتاده است. این فرکانس که به هیچکدام از فرکانس‌های ماشین کاری (مانند فرکانس ناشی از لنگی قطعه کار) قابل ارتباط نبوده و در نزدیکی فرکانس لرزه ماشین است، تنها خبر از وجود لرزه در تراش کاری را می‌دهد.

با تکه کردن نیروهای تراش کاری 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 مدل سازی و آزمایش‌ها

4-1- نتایج مدل سازی

معادلات مدل سازی 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.

همان گونه 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 مدل سازی به دست آمده نشان داده شده است. این نمودار در محدوده پارامترهای ورودی آزمایش‌های تجربی رسم شده است. همان گونه 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 آنجایی که فرآیند تراش کاری به صورت لوله تراشی 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 حالی که براده بدون لرزه با سطحی براق در "شکل 11-b"، به نمایش در آمده است.

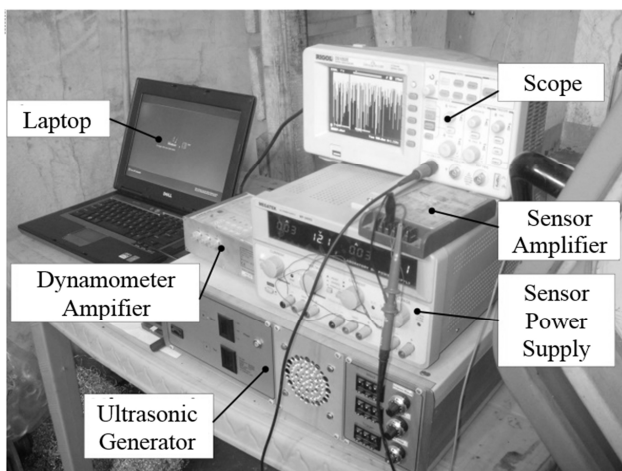


Fig. 8 Experimental setup (Instruments, Generators, Scopes, etc.)

شکل 8 نحوه چیدمان ژنراتور آلتراسونیک و مبدل‌های حسگر جریان گردابی و دینامومتر و رایانه در تحلیل تاگوچی مقادیر میانگین در ازای هر یک از سطوح ورودی به دست

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 بدین وسیله تنها جابجایی ابزار در اثر پدیده لرزه را ثبت نماید. زاویه خروج براده‌ها به صورت عمود بر جهت پیشروی است که نشان‌دهنده تراش کاری عمودی می‌باشد.

3-1- به دست آوردن عمق برش بحرانی

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

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

50,100,200,300,400	rpm	سرعت اسپیندل	
4.7,9.4,19,28,37	m/min	سرعت برشی	شرایط برش
0.05,0.1,0.15,0.2,0.25	mm/rev	سرعت پیشروی	
$\alpha_0 = 5^\circ$		زاویه براده	هندسه
$\gamma_0 = 0^\circ$		زاویه آزاد γ	ابزار
کارباید		جنس ابزار	
AL 7075		جنس	
30	mm	قطر	قطعه کار
300	mm	طول	
0.0,0.4,7,10,13	□m	دامنه	ارتعاش ابزار
20±0.5	kHz	فرکانس	

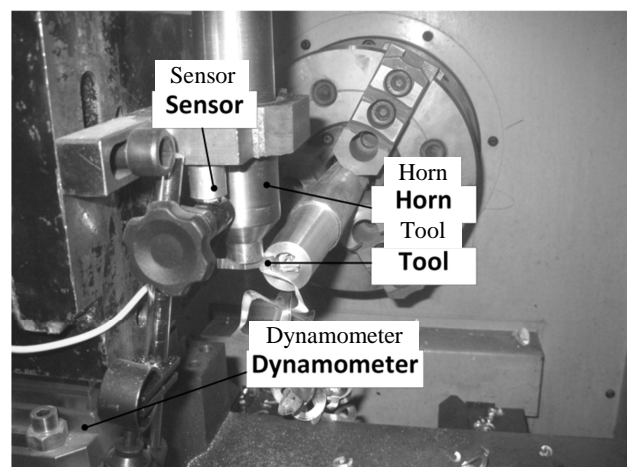


Fig. 7 Experimental setup (Work-piece, Tool, Instruments, etc.)

شکل 7 نحوه چیدمان ابزار، حسگر جریان گردابی و قطعه کار شده و با تحلیل نیروهای به دست آمده از ماشین کاری مشاهده می‌گردد،

سرعت پیشروی مقدار عمق برش بحرانی کاهش یافته است این کاهش عمق بحرانی به دلیل 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.

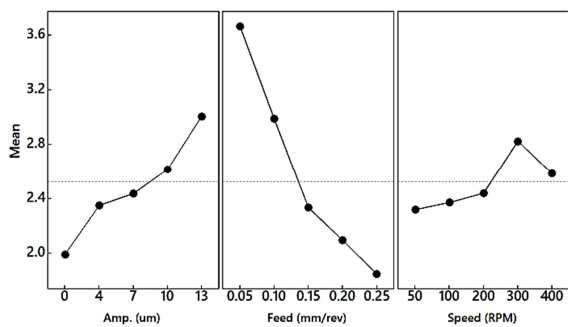


Fig. 12 Mean values of depth of cut vs. input parameter levels

شکل 12 مقادیر میانگین داده‌ها نسبت به سطوح ورودی

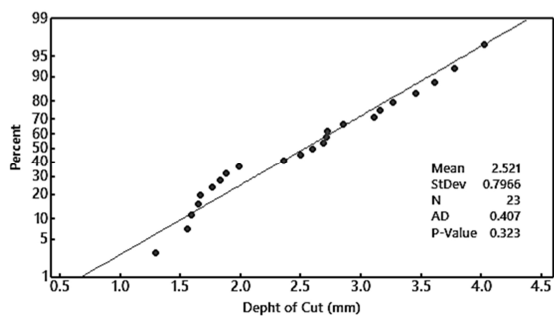


Fig. 13 Probability plot shows normality of errors

شکل 13 نمودار نرمال بودن خطاها

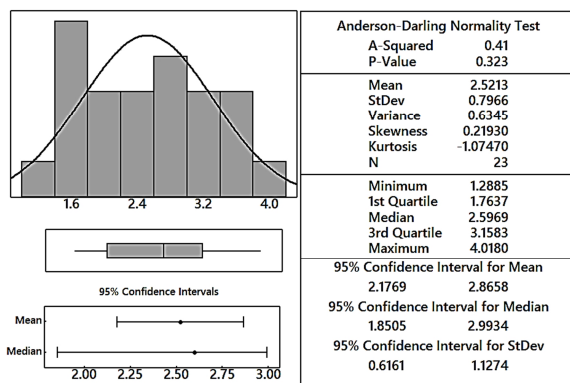


Fig. 14 Errors are normal

شکل 14 نمودار نرمال بودن خطاها

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.

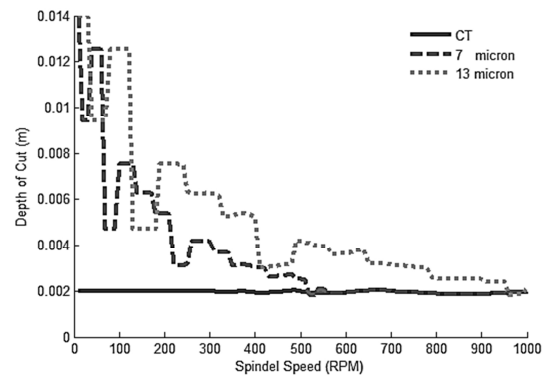


Fig. 9 Stability border in conventional and vibrational turning

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

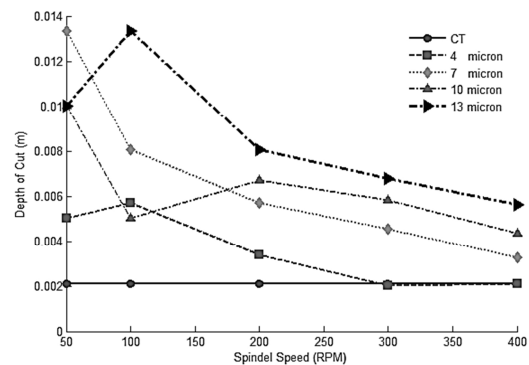


Fig. 10 Modeling results for critical depth of cut

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

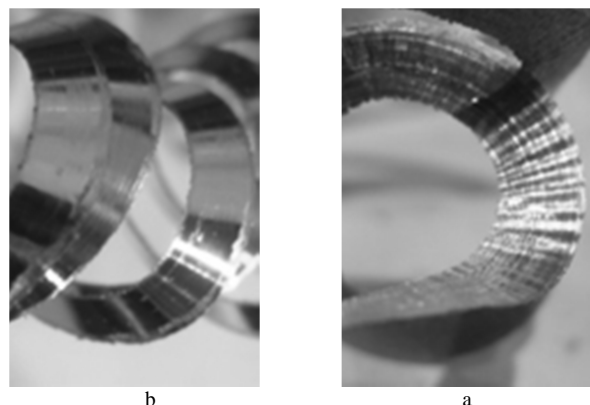


Fig. 11 Chips a) with chatter mark b) without chatter

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

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

3-4- 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 به دلیل عیوبی که بر فرآیند وارد می‌آورد، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است و بدین منظور مدل‌سازی و تحلیل‌هایی بر روی آن انجام شده است. به دلیل پیچیدگی روابط به دست آمده، حل به روش عددی در این مدل‌سازی‌ها بسیار شایع است. تراش کاری ارتعاشی، فرآیندی جدید در تراش کاری 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 تراش کاری ارتعاشی ارائه شد و روابط حاکم بر آن به کمک روش دورمند-پرینس حل شد، همین‌طور پایداری تراش کاری 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 تراش کاری سنتی کمتر از 2 میلی‌متر است، برای تراش کاری 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 تراش کاری سنتی حدود 2 میلی‌متر، می‌باشد، 3 و 5 میلی‌متر برای تراش کاری 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.

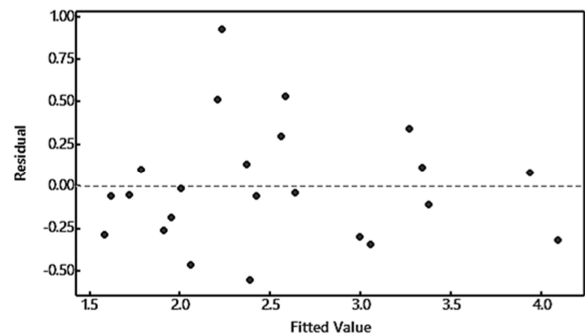


Fig. 15 Residuals are in a random pattern

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 حالی که تفاوت مقادیر به دلیل رفتارهای غیرخطی ناشی از میرایی فرآیندی است.

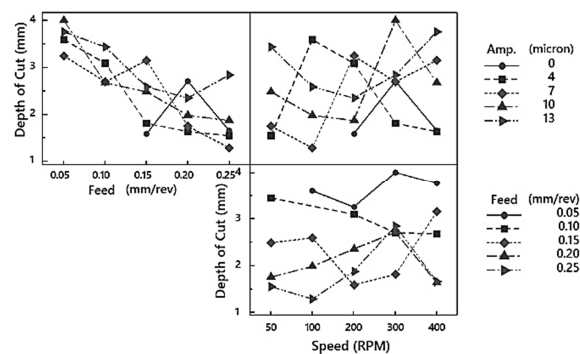


Fig. 16 Interaction plot for depth of cut vs. input parameter levels

شکل 16 اثر متقابل فاکتورهای ورودی بر عمق برش بحرانی

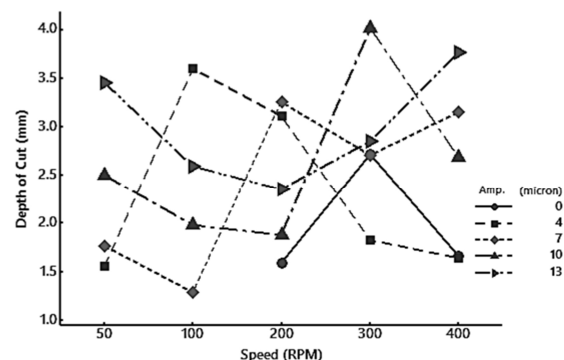


Fig. 17 Depth of cut vs. spindle speeds and different tool vibration amplitude

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 دامنه سرعت سرعت عمق برش عمق برش خطا

- 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 Edition, pp. 135-149, New York: Cambridge University Press, 2012.
- [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-