(یادداشت فنی)
تأثیر پارامترهای ارتعاشی بر پایداری فرآیند تراشکاری در حوزه زمان

مرتضی شنکایی[1]، محمد جواد ناطق[*1]، حمید سلیمانی‌مهر[2]

۱. دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس

۲. شرکت فناور تکنیک کار مهر، مرکز رشد دانشگاه تربیت مدرس

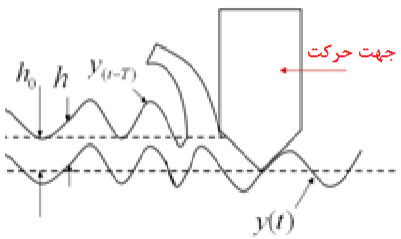
چکیده

فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات با بسامد کیلوهرتز به دلیل مزایای زیاد از قبیل کاهش نیروی ماشینکاری و زبری سطح به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. ارتعاش لرزه، نوعی ارتعاش خود-برانگیخته است که در فرآیندهای گوناگون ماشینکاری به وجود می‌آید. این نوع از ارتعاشات بعد از ایجاد به سرعت رشد کرده و فرآیند ماشینکاری را ناپایدار می‌کند. لرزه اثرات نامطلوب دیگری نظیر افت کیفیت سطح، کاهش عمر ابزار و حتی آسیب دیدن قطعه کار و دستگاه نیز دارد. در این مقاله نظریه‌ای پیشنهاد شده است تا این پدیده را در تراشکاری ارتعاشی مورد بررسی قرار داده و بتواند مرز پایداری فرآیند را پیشگویی نماید. نظریه در حوزه زمان بوده و به کمک روش‌های عددی حل گردیده است. اثر پارامترهای بسامد ارتعاش و نسبت زمان برش بررسی شد و نشان داده شدند که اثر بسامد ناچیز بوده و نسبت زمان برش مؤثر است.

کلید واژه‌ها: ارتعاشات، بسامد، کیلوهرتز، برشکاری

۱. مقدمه

پدیده خود-تحریک ارتعاش لرزه (چتر)[1] یک پدیده ناپایداری دینامیکی در فرآیندهای ماشینکاری است. این پدیده اصلی‌ترین محدودکننده کارایی ماشین ابزار است [۱]. ارتعاشات لرزه (چتر) از اندرکنش فرآیند براده‌برداری و سازه ماشین ابزار ناشی می‌شود که به سبب باززایی سطحی موجی بر قطعه ایجاد می‌شود. هنگامی‌که ابزار قابل انعطاف در فرآیند ماشینکاری با نیروهای ماشینکاری مواجه می‌شود، ارتعاشات ناخواسته‌ای در سامانه به وجود می‌آیند که منجر به کاهش دقت و کیفیت سطح ماشینکاری شده و کاهش عمر ابزار و ماشین ابزار را سبب می‌گردند. ارتعاشات لرزه می‌توانند فرآیند ماشینکاری را به سرعت به سمت ناپایداری برند. در چنین حالت‌هایی نه تنها کیفیت سطح قطعه کار تولیدی به شدت کاهش می‌یابد، بلکه امکان صدمات شدید به ساختار دستگاه ماشینکاری نیز وجود دارد [۲].



شکل ۱ سازوکار باززایی.

ارتعاشات باززا مخرب‌ترین نوع ارتعاشات می‌باشند و زمانی اتفاق می‌افتند که سختی سازه ماشین ابزار اجازه جابجایی لبه برش را در اثر نیروهای برشی می‌دهد و در این حالت مسیر ابزار بر روی قطعه کار، بر روی مسیر قبلی قرار نمی‌گیرد. سفتی ماشین ابزار نقش بسیار مهمی در افزایش عمق برش بحرانی دارد [۳]. مهم‌ترین مسئله در بوجود آمدن ارتعاش لرزه، انتخاب پارامترهای نامناسب ماشین‌کاری و به خصوص

* نویسنده پاسخگو: nategh@modares.ac.ir

[1] Chatter

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.7.0]

عمق باردهی زیاد می‌باشد [۴]. در چنین شرایطی فرآیند ضریب میرایی (دمپینگ) منفی پیدا نموده و در اثر آن هر لحظه دامنه نوسان ابزار افزایش می‌یابد [۵]. تحت این شرایط سامانه ترجیح می‌دهد در بسامدی نزدیک به یکی از بسامدهای طبیعی خود ارتعاش کند. مطالعات جدید روی ارتعاش سامانه‌های ماشین‌ابزار و پایداری آن‌ها بر یکی از راه‌حل‌های تحلیل سامانه ماشینکاری به عنوان یک سامانه خطی حلقه بسته در دامنه بسامد و تحلیل سامانه ماشینکاری در حوزه زمان استوار است.

روش اول سامانه ارتعاشی را با یک سامانه حلقه بسته الگوسازی می‌کند. در این روش معادلات سامانه ماشینکاری خطی‌سازی می‌شوند و پایداری سامانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. پایداری سامانه همان پایداری فرآیند است.

در روش حوزه زمانی، معادلات حاکم بر سامانه به دست آمده و به صورت مستقیم حل می‌گردند. چون معمولاً معادلات شامل جمله‌های غیرخطی است، حل تحلیلی به ندرت و معمولاً با ساده‌سازی همراه است. به همین دلیل در این حوزه حل‌های عددی بسیار دیده می‌شوند.

در یکی از مطالعات [۶] برای هر مرحله در فرزکاری نیرویی متفاوت تعریف شده و معادلات به روش عددی حل شده و نمودارهای پایداری رسم گردیده‌اند. معادلات غیرخطی ارتعاش لرزه در مطالعات دیگر [۷] برای تغییرات ضخامت براده به کمک برنامه‌ای رایانه‌ای حل شده است. محققین نشان داده‌اند که تراشکاری ارتعاشی پایدارتر از تراشکاری سنتی است و در آن معادلات ارتعاشی را به صورت عددی حل نموده‌اند [۸]. با کمک روش جداسازی متغیرها [۹] توانسته است مقادیر تغییر ضخامت و جدایش ابزار از قطعه‌کار را الگو نماید. در شرایط ناپایداری ارتعاش لرزه (چتر) باززا را در حوزه زمان به روش اختلالات جزئی به دست آورده‌اند [۱۰]. با کمک روش چندمقیاسی نیز [۱۱] توانسته‌اند معادلات ارتعاشی را حل نموده و تأثیر آن را بر پارامترهای ماشینکاری بررسی نماید. در یکی از مطالعات [۱۲] معادلات ارتعاش فرآیند سوراخکاری در حوزه زمان به روش جداسازی حل شده و پارامتر زاویه مارپیچ براساس آن بهینه شده است. نهایتاً تمامی مطالعات حاکی از پایداری بیش‌تر تراشکاری ارتعاشی نسبت به تراشکاری سنتی است [۱۳].

۲. نظریه (تئوری) پایداری در تراشکاری سنتی

ضخامت براده دینامیکی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$h(t) = h_{.} - [y(t) - y(t-T)] \quad (۱)$$

که در آن $h_{.}$ ضخامت براده نامی و معادل نرخ پیشروی در یک دور در عملیات تراشکاری می‌باشد. مقادیر y، سطح قطعه کار بعد و قبل از تراشکاری است.

اگر سامانه تراشکاری بصورت یک سامانه با یک درجه آزادی در نظرگرفته شود، می‌توان نوشت:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_f(t) \quad (۲)$$

F_f نیروی تراشکاری می‌باشد که می‌تواند مطابق رابطه زیر تعریف گردد.

$$F_f(t) = k_f a h(t) = k_f a[h_{.} - y(t) + y(t-T)] \quad (۳)$$

که در آن k_f مقدار ثابت برشی بوده و a نیز عمق برش است.

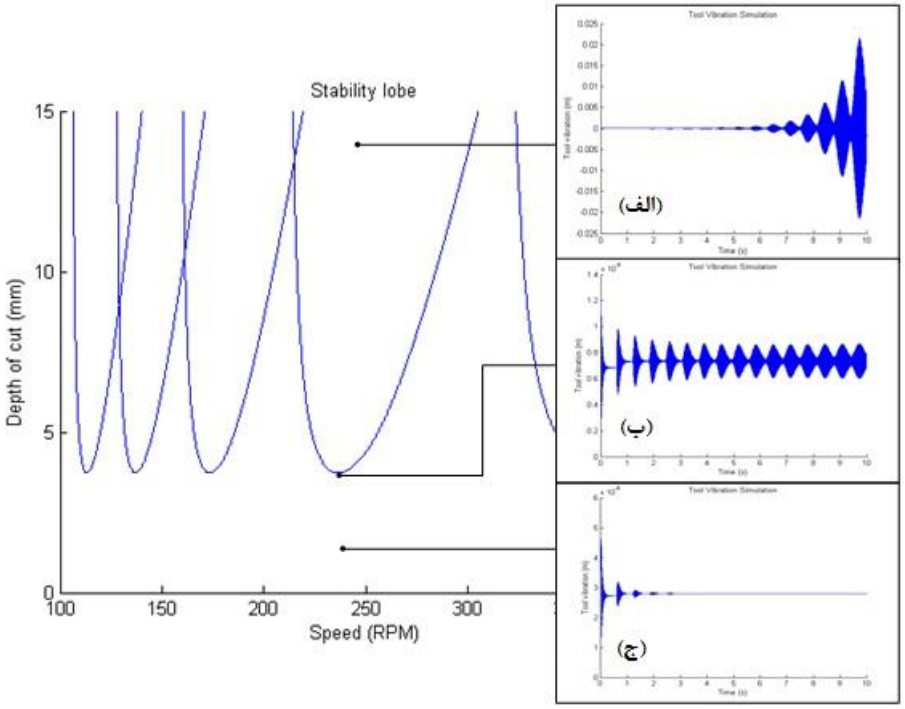
برای عمق برش که مهم‌ترین عامل در ناپایداری است مقداری حدس زده می‌شود. رابطه ارتعاشی به کمک روش رونگ-کوتا حل می‌گردد. در صورتی که فرآیند پایدار باشد، مقادیر y محدود بوده و در غیر این صورت مقادیری رو به رشد خواهد داشت.

با میانیابی و به دست آوردن مقدار عمق برش حدی، نمودارهای پایداری برای مقادیر مختلف عمق برش به ازای سرعت‌های دورانی مختلف به دست خواهد آمد. در شکل ۳ نمودار پایداری که از این روش حاصل‌شده، نشان داده شده است.

۳. نظریه (تئوری) پایداری در تراشکاری ارتعاشی

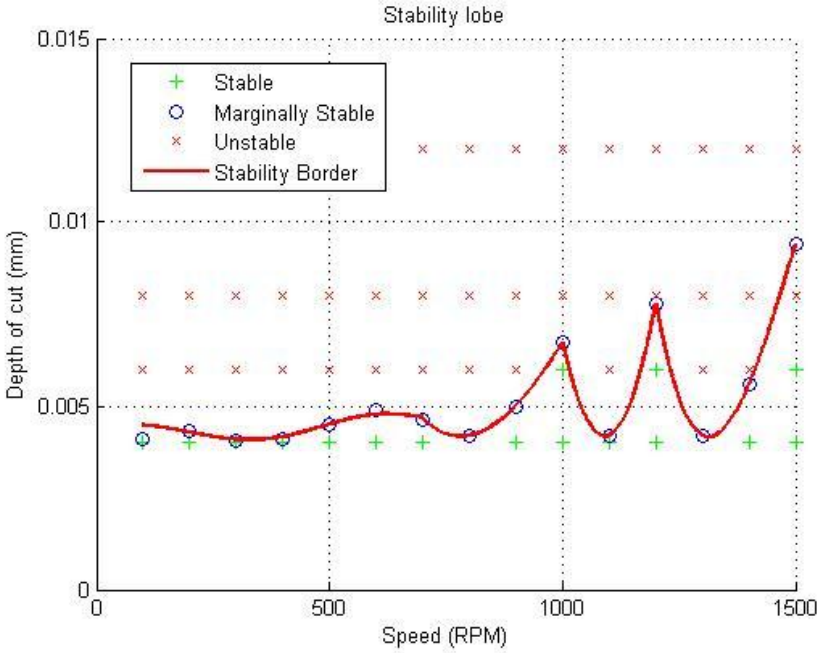
در تراشکاری ارتعاشی، با قطع و وصل جریان براده، نیروی تراشکاری نیز قطع و وصل خواهد شد. بدین

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.7.0]



الف) ناپایدار ب) پایدار ج) مرزپایداری

شکل ۲ نمودار ارتعاشات ابزار بر حسب زمان برای مقادیر مختلف عمق برش.



شکل ۳ نمودار پایداری و نقاط پایدار و ناپایدار.

منظور تابعی متناوب به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$f(t)=\begin{cases}1 & nT<t<nT+t_c\\ 0 & nT+t_c<t<(n+1)T+t_c\end{cases} \quad (۴)$$

با در نظر گرفتن تابع زمانی فوق معادله حاکم بر سامانه تراشکاری ارتعاشی به صورت رابطه زیر در خواهد آمد.

$$m\ddot{y}(t)+c\dot{y}(t)+ky(t)=k_f a h(t) f(t) \quad (۵)$$

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.7.0]

با حل این رابطه به کمک روش‌های عددی، نمودار پایداری برای تراشکاری ارتعاشی نیز به دست خواهد آمد. برای حل معادلات و قابلیت مقایسه از مشخصات حقیقی در جدول ۱ و جدول ۲ استفاده شده است.

جدول ۱ پارامترهای تراشکاری.

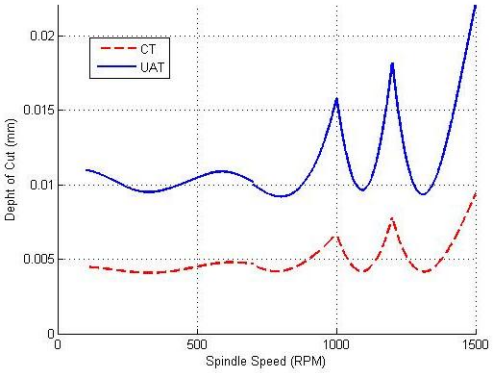
	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
خواص ارتعاشی ابزار	۵۰	۲۰۰۰	۲×۱۰^{۷}

جدول ۲ پارامترهای فرآیند.

پارامترهای برش	k_f (N/M²)	h.(mm)
	$۳/۵\times۱۰^{۸}$	۰/۱

۴. نتایج

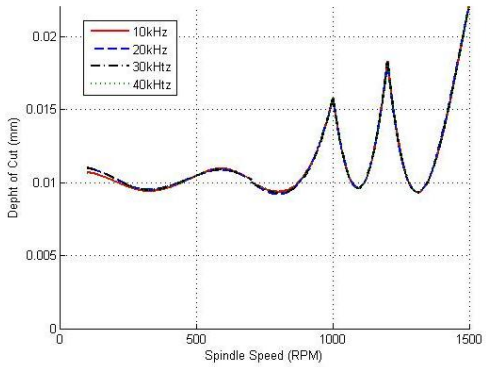
در شکل ۴ نمودار پایداری برای تراشکاری سنتی و تراشکاری ارتعاشی برای بسامد ۲۰ کیلوهرتز و نسبت t_c/T برابر ۰/۴ رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شرایط تراشکاری ارتعاشی، حد پایداری بسیار بالاتر از تراشکاری سنتی است.



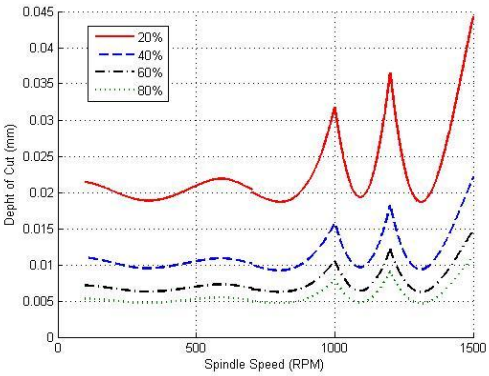
شکل ۴ نمودار پایداری در تراشکاری سنتی (سی‌تی) و تراشکاری ارتعاشی (یوای‌تی).

تغییر در بسامد تراشکاری در شکل ۵ نشان داده شده است. میزان تغییر در اثر تغییر بسامد در محدوده کیلوهرتز بسیار ناچیز است.

میزان تغییر در نسبت برش (t_c/T) در شکل ۶ نشان داده شده است. هرچه این میزان کم‌تر باشد، پایداری آن بیشتر است. در صورتی که نسبت زمان برش کم باشد، ابزار زمان کم‌تری با ضریب میرایی منفی درگیر بوده و پایداری بیشتر می‌گردد. البته تعیین میزان نسبت برش به آسانی قابل اعمال نیست. این پارامتر تابعی از سرعت دوران، بسامد ارتعاش، دامنه ارتعاش و قطر قطعه‌کار است.



شکل ۵: نمودار پایداری برای بسامدهای مختلف تراشکاری ارتعاشی.



شکل ۶ نمودارهای پایداری برای زمان برش‌های مختلف در تراشکاری ارتعاشی.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

ارتعاش لرزه (چتر) به سبب تأثیر مخرب آن بر کیفیت سطح، هزینه ماشینکاری، دقت ماشینکاری، عمر ابزار، یاتاقان‌های ماشین ابزار و عمر ماشین ابزار پدیده‌ای نامطلوب می‌باشد. اعمال ارتعاشات بسامد بالا به ابزار مزایای زیادی را از قبیل صافی سطح و دقت ابعادی به همراه دارد. در این مقاله نشان داده شد که با افزودن ارتعاش به حرکت معمولی ابزار، پایداری فرآیند افزایش می‌یابد که خود علت افزایش صافی سطح می‌تواند باشد. اثر پارامترهای بسامد و اثر نسبت زمان برش ماشینکاری بررسی شدند و نشان داده شد که

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.7.0]

پایداری در تراشکاری ارتعاشی بسیار بالاتر از تراشکاری سنتی است. بیش‌ترین تأثیر در این فرآیند نسبت زمان برش است. تعیین درست این مقدار پایداری فرآیند را بسیار بالا خواهد برد. هم‌چنین نشان داده شد که افزایش ارتعاش ابزار تأثیری ناچیز در پایداری فرآیند تراشکاری ارتعاشی دارد.

۶. فهرست منابع

[1] H.E. Merritt, "Theory of self-excited machine tool chatter," Journal of Engineering for Industry, vol. 87, pp. 447–454, 1965.
[2] S.A. Tobias, "Machine-tool vibration. J. Wiley, 1965.
[3] J. Tlusty, "Dynamics of high-speed milling," In Handbook of High-Speed Machining Technology, R.I. King, Ed., pp. 48–153, Chapman and Hall, New York, 1985.
[4] Y. Altintas, M. Weck, "Chatter stability of metal cutting and grinding," CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 53, no. 2, pp. 619–642, 2004.
[5] G. Sweeney, S.A. Tobias, "Survey of basic machine tool chatter research," International Journal of Machine Tool Design and Research, vol. 9, pp. 217-238, 1969.
[6] B. Balachandran, M.X. Zhao, "A mechanics based model for study of dynamics of milling operations," Meccanica, vol. 35, pp. 89-109, 2000.
[7] N. Deshpande, M.S. Fofana, "Nonlinear regenerative chatter in turning," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 17, pp. 107-112, 2001.
[8] M. Xiao, S. Karube, T. Soutome, K. Sato, "Analysis of chatter suppression in vibration cutting," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 42, pp. 1677-1685, 2002.
[9] X.H. Long, B. Balachandran, "Stability analysis for milling process," Nonlinear Dynamics, vol. 49, pp. 349-359, 2007.
[10] 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, pp. 427-415, 2009.
[11] A.H. Nayfeh, N.A. Nayfeh, "Analysis of the cutting tool on a lathe," Nonlinear Dynamics, vol.63, pp. 395-416, 2011.
[12] 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, pp. 133-141, 2011.
[13] 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, pp. 329-338, 2011.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.7.0]