



بررسی تحلیلی و تجربی واکنش ابزار برش و قطعه کار بر اثر پدیده لرزه در تراش کاری

مرتضی شنکایی^۱، محمدجواد ناطق^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، nategh@modares.ac.ir

چکیده

پدیده لرزه، ارتعاشات خودتحریکی است که در فرآیندهای ماشین کاری ظهور نموده و سبب کاهش صافی سطح، صدمه به ابزار و قطعه کار و در موارد شدیدتر آسیب به دستگاه و اپراتور می گردد. شناخت این پدیده می تواند سبب انتخاب صحیح پارامترهای ماشین کاری شود و از بروز آن اجتناب شود. یکی از روش های شناخت یک پدیده فیزیکی مدل سازی ریاضی آن است. در این مقاله سعی شده است پایه ای مستحکم برای شبیه سازی پدیده لرزه گذاشته شود. تعدادی آزمایش انجام شد که در آن پدیده لرزه رخ داده است. در آزمایش ها نیروهای برش و جابجایی ابزار و قطعه کار بدست آمد. به کمک تحلیل سیستم محیط پیوسته نیروهایی که باعث ایجاد جابجایی در ابزار و قطعه کار شده است به دست آمده و صحت آن با مقادیر ثبت شده توسط دینامومتر به اثبات رسیده است. نشان داده شده است که اندکی از انرژی وارده به قطعه کار به تغییر شکل خطی تبدیل شده و بیشتر آن قابل اندازه گیری مستقیم نبوده از این رو مدل سازی ابزار در پدیده لرزه در تراش کاری هم ساده تر و هم دقیق تر از مدل سازی قطعه کار است.

کلید واژگان: تراش کاری، لرزه، ارتعاشات سیستم های پیوسته، ارتعاشات ابزار

Analytical and experimental analysis of response of the cutting tool and the workpiece by the chatter phenomenon in turning

Morteza Shankayi, Mohammad Javad Nategh*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

ABSTRACT

Chatter phenomenon is self-excited vibrations in machining processes that reduces the surface finish, causes damages to the tool and workpiece and in severe cases can be detrimental to the machine and operator. Understanding this phenomenon leads to the right choice of machining parameters and helps avoiding it. One way to understand a physical phenomenon is through its modeling. In this paper, a strong base was built to simulate the chatter phenomenon. A number of tests were carried out where chatter phenomenon occurred. In the tests, cutting forces and displacements of tool and the workpiece were recorded. The forces that cause displacement in the tool and the workpiece were obtained by continuum system analysis and verified by the dynamometer records. It has been shown that the most part of machining energy is not sensible in workpiece and therefore the modeling of the tool in turning process is simpler and more accurate than the workpiece modeling.

Keywords: Chatter, Continuum system vibrations, Tool vibration Turning.

است برای بررسی ارتعاش آن می توان از ارتعاشات پیوسته تیرها بهره جست. چهار روش تحلیل ارتعاشی کلاسیک تیر عبارتند از: مدل اوپلر-برنولی، مدل تیر ریلی، مدل تیر برشی و مدل تیر تیموشینکو. در این روش ها دو مطلب مورد بحث است: ابتدا بدست آوردن مقادیر ویژه و دیگری حل ارتعاشات اجباری ناشی از نیروی برش کاری. در فرآیند تراش کاری، نیروی اجباری ابزار در حال پیشروی و تحرک است بنابراین علاوه بر دو مطلب بیان شده، شاخه دیگری از ارتعاشات یعنی نیروی متحرک به این مباحث مربوط می شود. اولسون [۲] در سال ۱۹۹۱ یکی از پایه گذاران اثر نیروی متحرک بر پاسخ دینامیکی تیر بود او برای سادگی از شرایط مرزی ساده در تحلیلش استفاده کرد. هان و زو [۳] در سال ۱۹۹۲ برای ساده کردن شرایط تحلیل و برای این که حل تیر تیموشینکو، حل بسته^۱ داشته باشد از ساده ترین شرایط مرزی استفاده کردند آن ها از جمله اولین افرادی بودند که از روش گسترش مودال^۲

۱- مقدمه

لرزه معمولاً هنگامی اتفاق می افتد که یکی از مدهای سیستم ماشین ابزار-قطعه کار به وسیله نیروهای برش کاری تحریک شود [۱]. ارتعاشات ناخواسته ای که در یک فرآیند برش کاری ایجاد می شود، یک فضای ناپایدار از نظر دینامیکی ایجاد می کند که تحقیقات زیادی بر آن صورت گرفته و می گیرد. بررسی و تحلیل ارتعاش قطعه کار در فرآیندهای ماشین کاری می تواند برای حذف و یا کاهش اثرات مضر آن بر صافی سطح و توان مصرفی موثر باشد. پدیده های فیزیکی به طور کلی دارای پیچیدگی های بسیار زیادی است به همین دلیل برای تجزیه و تحلیل آن ها نیاز به شبیه سازی پدیده ها با مدل های ساده تر است. این ساده سازی منجر به از دست دادن قسمتی از اطلاعات می گردد. لیکن بدون آن نیز تحلیل پدیده ها بسیار مشکل و اغلب ناممکن است. در حقیقت بهترین شبیه سازی آن است که در آن با ساده ترین مدل ها بتوان دقیق ترین تحلیل ها را انجام داد. از آن جایی که قطعه کار یک جسم پیوسته

1. Closed form

2. Modal expansion technique

Please cite this article using:

M. Shankayi, M. J. Nategh, Analytical and experimental analysis of response of the cutting tool and the workpiece by the chatter phenomenon in turning, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 218-222, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

را مانند مرغک، ساده^۷ فرض کرده اند دلیل این امر اینست که اگر صلب^۸ در نظر بگیرند شکل مود پیچیده می شود و در تحلیل بعدی که تحلیل نیروی اجباری است مشکل ساز می شود. لازم به ذکر است که شکل مود تیرهایی که دو طرف آن ها شبیه به هم است بسیار ساده تر از تیرهایی است که دو طرف آن شرایط مرزی متفاوتی دارند.

در آزمایش، پدیده لرزه به کمک حسگرهایی ثبت میشود و دامنه ارتعاشات آن استخراج می گردد. در تحقیقات انجام شده حسگرهای مختلفی استفاده شده است مانند لیزر، صوتی، جریان گردابی و دینامومتر [۱۵] که در این میان حسگرهای لیزری و شتاب سنجها از بهترین ابزارها برای ثبت ارتعاشات ناشی از ماشین کاری است. حسگر آکوستیک مقادیر انرژی صوت در پیرامون خود را ثبت می نماید. این حسگر با زیاد شدن شدت صوت ناشی از پدیده لرزه اخطار وقوع لرزه را صادر می نماید. سنسورهای جریان گردابی، جابجایی ابزار یا قطعه کار را ثبت می نماید. لرزه سبب افزایش این دامنه ها می گردد.

در این مقاله ابتدا فرآیند تراش کاری و پدیده لرزه به صورت سیستم پیوسته مدل سازی شده است. سپس به کمک روش ریلی سیستم پیوسته به سیستم یک درجه آزادی تبدیل شده است. نشان داده شده است این تغییر در مدل سازی بسیار ساده تر و سریع تر از روش سیستم پیوسته بوده و نیز از دقت کافی برخوردار است.

۲- تحلیل حرکت در قطعه کار و ابزار

در این قسمت بهترین مدل برای شبیه سازی پدیده لرزه در تراش کاری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. معادلات پیوسته برای به دست آوردن رابطه حرکت قطعه کار و ابزار در اثر نیروی ماشین کاری بیان می گردد. اصل همیلتون بیان می دارد که معادله حرکت از حداقل نمودن انتگرال زمانی تفاضل انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل بدست می آید. به عبارت دیگر معادله حرکت هنگامی حاصل می شود که حاصل ضرب اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل در زمان حداقل گردد. ابزار و قطعه کار در فرآیند تراش کاری را می توان به صورت تیرهایی در نظر گرفت. همچنین فرضیات پایه ای ساخته شده بوسیله تمامی مدل های ارتعاشات تیرها به این صورت است. حرکت در یک بعد به روشنی بزرگتر از دو بعد دیگر است. ماده، الاستیک خطی است (قانون هوک). از اثر پواسون چشم پوشی شده است. سطح مقطع متقارن است بنابراین محورهای خنثی و مرکزی منطبق برهم هستند. صفحات عمود به محور خنثی بعد از تغییر شکل عمود باقی می ماند. زاویه گردش کوچک است بنابراین فرض زاویه کوچک را می توان استفاده نمود. اگر فرض شود تیری (با هر شرایط تکیه گاهی و با هر شکلی) در جهت عرضی^۹ بر اثر نیرو، ضربه یا هر روش دیگری تغییر شکلی دهد، برای بدست آوردن تغییر شکل این تیر در هر نقطه از آن و در هر زمان از روش نیوتن و حساب تغییرات و یا روش همیلتون استفاده می شود. در این روش، یک المان از تیر جدا می شود و تغییر شکل در آن بررسی می گردد و سپس در کل طول تیر از آن انتگرال گرفته می شود و یا تعمیم داده می شود.

۲-۱- مدل تغییر شکل قطعه کار در هنگام بروز پدیده لرزه

شرایط مرزی بدین صورت در نظر گرفته می شود که قطعه کار تنها به یک سه نظام بسته شده (از مرغک استفاده نشده) و شرایط اولیه صفر است. شکل زیر

استفاده کردند و برای جلوگیری از اثر نیروی محوری در تحلیل، به یکی از شرایط مرزی، درجه آزادی در جهت محوری داده اند. یوانگ و وانگ [۴] در سال ۲۰۰۷ نشان دادند که ممان ناشی از نیروی محوری سطحی بر پاسخ دینامیکی یک تیر تحت نیروهای سطحی متحرک، موثر است البته نتیجه گیری آن ها در شرایط غیرواقعی تراش کاری انجام شد چرا که سه نظام صلب تر از مرغک است و آن ها به دلیل شکل مود ساده تر از شرایط مرزی ساده- ساده در تحلیل استفاده کردند. لی [۵] سال ۲۰۰۸ روش جدیدی را برای حل ارتعاشات آزاد تیرهای تیموشینکو با استفاده از تحلیل استاتیک بنا نهاد. یوانگدر سال ۲۰۱۱ [۶] فعالیت هایی که در مسائل دینامیکی با نیروی متحرک انجام شده بود را جمع آوری و بررسی کرد، چند نمونه مسئله با شرایط مرزی ساده را نیز مورد مطالعه قرار داد. لی [۷] در سال ۱۹۹۵ مهمترین و نزدیک ترین فعالیت به فرآیند تراش کاری در زمینه تیرهای دورانی را انجام داد و با بررسی اثر سرعت دورانی تیر دو سر ساده و سرعت حرکت نیروی متحرک نشان داد که افزایش سرعت دورانی محور اثر کمی بر تغییر شکل محور در جهت نیروی اعمالی دارد ولی موجب افزایش تغییر شکل محور در جهت عمود بر جهت نیرو می شود. لازم به ذکر است که چون ممان اینرسی دورانی در تیرهای تیموشینکو در نظر گرفته می شود در تحلیل محور دورانی، تغییر شکلی در جهت غیر از نیرو ایجاد می شود. همچنین نتیجه گرفتند که نیروی فشاری محوری موجب تغییر شدید تغییر شکل به خصوص برای نیروهای متحرک اعمالی با سرعت کم می شود.

مقالات بررسی شده بر نیروی ثابت متحرک متمرکز شده بودند. گرینی [۸] در سال ۲۰۰۶ با بررسی دینامیک تیر ساده تحت نیروی هارمونیک نشان داد که فاز و فرکانس ارتعاش در مقدار تغییر شکل موثرند. شیمشک و کوکاتورک [۹] در سال ۲۰۰۹ اثر نیروی هارمونیک متحرک را در تحلیل یک تیر اویلر- برنولی با شرایط مرزی ساده و تحت پیش تنش بررسی کردند. آنان فرض کردند که تیر از هندسه ای غیرخطی برخوردار است بنابراین ممان اینرسی دورانی^۱ و جابه جایی محوری^۲ و اینرسی محوری^۳ به رابطه اضافه شد. آنان نشان دادند که سرعت حرکت نیرو و فرکانس تحریک و غیر هم مرکزی نیروی پیش بار^۴ در رفتار دینامیکی موثر می باشد. البته آن ها قبلا در سال ۲۰۰۶ [۱۰] به همین نتایج رسیده بودند. آن ها در کار دیگر [۱۱] به همین نتایج برای یک تیر درجه بندی تابعی^۵ رسیدند. شیمشک [۱۲] هر دو کار را در سال ۲۰۱۰ ترکیب کرد و در حقیقت همان نتایج را برای تیر غیرخطی گرفت. خلیلی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۰ این بررسی را با روش ترکیب ریتز- دی کیو انجام دادند و نشان دادند که روش آن ها نسبت به کارهای قبلی موثرتر است و قابلیت بهبود بیشتری دارد. شیمشک و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۲ دینامیک یک تیر درجه بندی تابع محوری^۶ اویلر برنولی با شرایط ساده- ساده و تحت نیروی هارمونیک متحرک را بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند که توزیع مواد، سرعت حرکت بار و فرکانس تحریک در تحلیل مهم می باشد.

در نظر گرفتن شرایط مرزی صحیح برای رسیدن به یک مدل تغییر شکل قطعه کار درست از اهمیت خاصی برخوردار است. در مراجع اشاره شده چند موردی که بحث تراش کاری را به عنوان کاربرد مقالاتشان آورده اند، سه نظام

1. Rotary inertia
2. Axial displacement
3. Axial inertia
4. Eccentricity of the prestress load
5. Functionally graded
6. Axially functionally graded

7. Hinged

8. Fixed

9. lateral or transverse or flexural or bending

باشد. در این صورت برای هر سیستم یک درجه آزادی می توان تصور نمود. برای استفاده از روش ریلی لازم است شکلی برای مود اول فرض شود. این شود. این شکل به صورت $\varphi(y)$ و مقادیر دامنه حرکت به صورت $x(y)$ فرض می گردد. می توان نشان داد بهترین انتخاب برای $\varphi(y)$ همان تابع تغییر شکل استاتیکی است. برای یک تیر یک سر گیردار این تابع به صورت رابطه (۳) است.

$$\varphi(y) = \frac{3}{2} \left(\frac{y}{l} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l} \right)^3 \quad (3)$$

با انتگرال گیری مقدار جرم موثر برابر $\frac{3}{8}$ جرم کل به دست خواهد آمد. همین طور مقدار سختی موثر نیز برابر با $\frac{3EI}{l^3}$ خواهد شد.

۲-۴- نتایج تحلیل

معادلات به کمک نرم افزار میپل ۱۷ به صورت تحلیلی حل گردید. مقادیر استفاده شده برای خواص فیزیکی در جدول ۱ بیان شده است.

با داشتن مقادیر جابجایی، پارامترهای فیزیکی و حل معادلات ارتعاشات پیوسته اجباری، مقادیر نیروهای ابزار و قطعه کار به دست آمد. در جدول ۲ این مقادیر نشان داده شده است.

جدول ۲ نشان می دهد که مقدار نیرویی که توسط ابزار تحمل می گردد بسیار بیشتر از قطعه کار است.

۲-۳- آزمایش تجربی

از دستگاه تراش CNC ساخت ماشین سازی تبریز برای انجام آزمایش ها استفاده شد. پارامترهای این فرآیند در جدول ۳ آمده است.

جدول ۱ مقادیر فیزیکی در معادلات تحلیلی			
پارامتر فیزیکی	مقدار	واحد	
مدول الاستیسیته	2.0×10^{11}	پاسکال	
چگالی	7.8×10^3	kg/m ³	
	۷۸۰۰		
	۲۷۷۰		

جدول ۲ مقادیر نیروهای ابزار و قطعه کار			
سرعت دورانی	طول قطعه کار	نیروی ابزار	نیروی قطعه کار
(rpm)	(mm)	(N)	(N)
۳۰۰	۵۰۰	۲۸۰	۲۶
۵۰۰	۵۰۰	۴۱۰	۸
۳۰۰	۲۵۰	۲۰	۱
۵۰۰	۲۵۰	۲۱۰	۲.۵

جدول ۳ شرایط آزمایش			
سرعت اسپیندل	rpm	۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰	شرایط برش
سرعت برشی	m/min	۱۹، ۵۶، ۹۴	
سرعت پیشروی	mm/rev	۰/۱	
زاویه براده α_0 و زاویه آزاد γ	$\alpha_0 = 5^\circ, \gamma_0 = 0^\circ$		هندسه ابزار
جنس ابزار	کارباید		قطعه کار
شعاع گوشه	mm	۰/۴	
جنس	AL 7075		
قطر	mm	۶۰	
طول	mm	۵۰۰-۲۵۰	

تراش کاری یک قطعه کار یک سر گیردار را نشان می دهد. در این شکل $F(t)$ ، نیروی ماشین کاری وارد بر قطعه کار و l ، طول قطعه کار بیرون از سه نظام است. در هنگام بروز لرزه باززا نیروهای ماشین کاری به صورت نوسانی می باشد و با زمان تغییر می کند. بنابراین در شکل نیرو $F(t)$ است یعنی مستقل از مکان خواهد بود. چون نیروهای لرزه باززا به صورت نوسانی هستند به صورت $F(t) = F \cos \omega_c t$ بیان می گردد که ω_c فرکانس ارتعاش ابزار ناشی از لرزه است.

رابطه تغییر شکل قطعه کار بر اثر نیروی $F(t)$ به صورت رابطه (۱) است.

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[EI \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] = F(t) \quad (1)$$

که E ، مدول الاستیسیته، m ، جرم l ، ممان اینرسی و w ، تغییر شکل است

۲-۲- حل ارتعاشات پیوسته اجباری قطعه کار غیر میرا

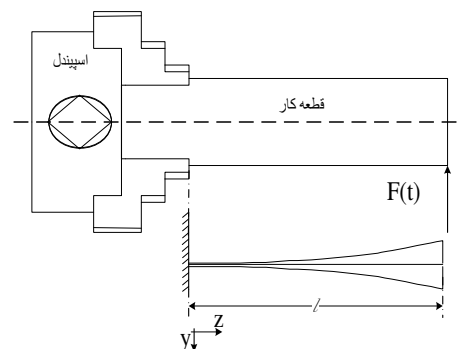
برای تحلیل تغییر شکل عرضی قطعه کار بر اثر نیروهای ماشین کاری (w) رابطه (۱)، از طریق تحلیل مودال حل می شود. ابتدا نیرو برداشته می شود زیرا نیرو در شکل مود موثر نیست. برای حل از روش جداسازی متغیرها^۱ استفاده شده است، در این روش دو متغیر (z و t) به صورت دو تابع اختیاری ($\phi(z)$ و $q(t)$) از یکدیگر جدا می شوند. یعنی می توان تابع دو متغیره w را به صورت ضرب دو تابع یک متغیره به صورت رابطه (۲) نوشت.

$$w(z, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \phi_j(z) q_j(t) \quad (2)$$

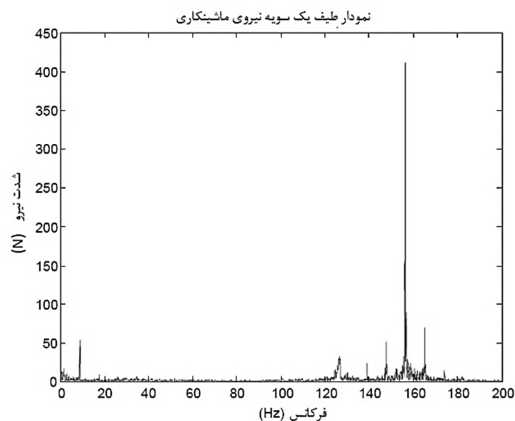
شرایط مرزی نیز با توجه به روابط و درک فیزیکی از مساله (شکل ۱) عبارتند از: در موقعیت اسپیندل ($z=0$) تکیه گاه صلب در نظر گرفته می شود و بنابراین در این موقعیت مقدار جابجایی عرضی و شیب قطعه کار صفر است و در سر آزاد قطعه کار ($z=l$)، از شرط مرزی آزاد استفاده می شود بنابراین در این موقعیت نیروی برشی و ممان صفر است.

۲-۳- تبدیل مدل سازی سیستم پیوسته به یک درجه آزادی (روش ریلی)

استفاده اصلی از روش ریلی برای سیستم هایی متشکل از اجسام صلب یا سیستم هایی با الاستیسیته پیوسته می باشد که می توان بدون نوشتن معادلات حرکت به فرکانس طبیعی دست یافت. در سیستم های متشکل از اجسام صلب، محدودیت یک شکل تغییر مکان، غالباً نتیجه تکیه گاه ها و شرایط مرزی است که امکان می دهد تغییر مکان هر نقطه براساس هر نقطه دیگر قابل بیان



شکل ۱ اعمال نیروی لرزه بر قطعه کار



(ب)

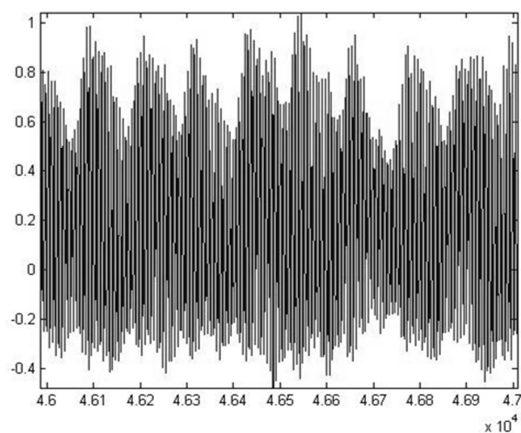
شکل ۳ شدت فرکانسی الف) جابجایی ابزار و ب) نیروی برش در ۵۰۰ rpm در جهت Z

در آزمایش با سرعت دورانی ۱۰۰ rpm لرزه‌ای به ثبت نرسیده است. به همین دلیل از میان داده‌های دیگر کنار گذاشته خواهد شد. میزان جابجایی ابزار و قطعه کار و نیروی برشی در آزمایش‌ها در جدول ۴ آمده است.

با مقایسه مقدار نیروی اندازه‌گیری شده (جدول ۴) با مقدار نیروی به دست آمده از روش تحلیلی (جدول ۲) می‌توان به صحت روابط تحلیلی پی برد. نیروی اندازه‌گیری شده دقیقاً همان نیرویی است که توسط ابزار تحمل می‌شود. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که ابزار برای رفتن به مود دوم ارتعاشی نیاز به فرکانس تحریکی بیش از ۵۰۰ هرتز و قطعه کار نیاز به فرکانسی بیش از ۲۵۰ هرتز دارد. شکل ۴ مقایسه جابجایی ابزار در نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تطابق خوبی میان این دو از نظر دامنه ارتعاش وجود دارد.

جدول ۴ نتایج آزمایش‌های تجربی

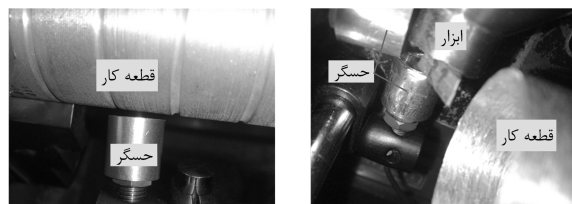
سرعت دورانی (rpm)	طول قطعه کار (mm)	جابجایی در قطعه کار (mm)	جابجایی در ابزار (mm)	نیرو (N)
۳۰۰	۵۰۰	۰/۰۰۱۰۰	۰/۱۵۷	۳۰۲
۵۰۰	۵۰۰	۰/۰۰۲۸۰	۰/۲۲۴	۴۱۱
۳۰۰	۲۵۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۳۶	۲۰/۸
۵۰۰	۲۵۰	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۲۶	۲۱۶



الف)

از دو حسگر دینامومتر برای ثبت نیروهای ماشین کاری و نیز جریان گردابی برای ثبت جابجایی ابزار و قطعه کار استفاده شد. با توجه به این که اطلاعات خروجی از حسگر جریان گردابی در حین آزمایش قابل مشاهده است، باعث می‌گردد تا بتوان از خروجی آن برای تشخیص زمان وقوع لرزه استفاده نمود. اطلاعات این حسگر و دینامومتر قابل تحلیل و تطبیق در مرحله بعد از آزمایش است. تعداد درجات آزادی ابزار در فرآیند تراش کاری ۲ درجه در راستای Z و Y است. بر روی قطعه کار هم یک درجه آزادی وجود دارد که در راستای عمود بر محور دورانی قطعه کار است. با نصب سه حسگر جابجایی تمامی درجات آزادی فرآیند تراش کاری قابل ثبت خواهد بود. حسگر نصب شده بر روی قطعه کار دارای دامنه بیشتر (۲ میلی‌متر) و دقت ۰/۲ mm/v و دو حسگر ابزار دارای دامنه کمتر ۱ میلی‌متر و دقت ۱ mm/v هستند. نحوه جاسازی دو حسگر جابجایی در اطراف ابزار و قطعه کار در شکل ۲ نشان داده شده است.

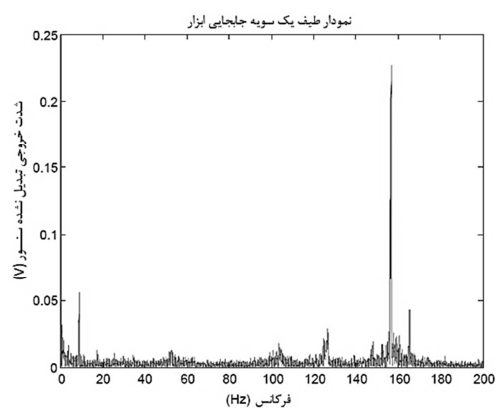
نیروهای ماشین کاری در ابزار و قطعه کار نیروی عمل و عکس العمل است از این رو بایستی مساوی هم باشند. با کمک نمودارهای فرکانسی می‌توان میزان نیروی تحمل شده و جابجایی به دلیل لرزه تنها را، از بقیه نیروها و جابجایی‌ها جدا نمود. با توجه به آن که معادلات به صورت خطی بوده و نیز خطی بودن در تمام مراحل فرض شده است، می‌توان این‌گونه بیان نمود که تنها نیروهای حاصل از لرزه سبب جابجایی ابزار و قطعه کار در همان فرکانس می‌گردد. به کمک جابجایی ثبت شده توسط حسگرها می‌توان به نیرویی که به هر کدام از ابزار و قطعه کار اعمال شده است پی برد. همواره یک سیگنال در حوزه زمان را می‌توان در حوزه فرکانس نیز بیان نمود. در این حوزه مقادیر پارامتر در فرکانس‌های خاص بیان می‌گردد. در حقیقت میزان تأثیر هر فرکانس بر پارامتر بیان می‌گردد. به طور مثال شکل ۳ شدت فرکانسی را در جابجایی ابزار و در نیروی برش در سرعت دورانی ۵۰۰ rpm و در جهت Z که از آزمایش بدست آمده را نشان می‌دهد. فرکانس لرزه حدود ۱۵۸ هرتز به دست آمده است.



(ب)

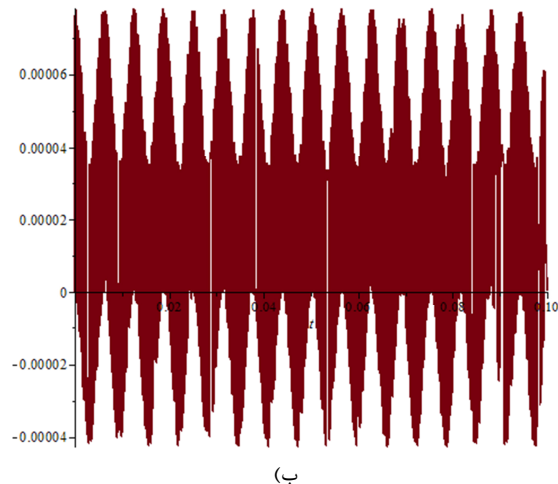
الف)

شکل ۲ جاسازی دو حسگر جابجایی در مقابل الف) ابزار، ب) قطعه کار



الف)

- [7] H. P. Lee, Dynamic response of a rotating timoshenko shaft subject to axial forces and moving loads, *Journal of Sound and Vibration*, 181 (1995) 169-177
- [8] A. Garinei, Vibrations of simple beam-like modelled bridge under harmonic moving loads, *International Journal of Engineering Science*, 44 (2006) 778-787
- [9] M. Şimşek & T. Kocatürk, Nonlinear dynamic analysis of an eccentrically prestressed damped beam under a concentrated moving harmonic load, *Journal of Sound and Vibration*, 320 (2009) 235-253
- [10] T. Kocatürk & M. Şimşek, Vibration of viscoelastic beams subjected to an eccentric compressive force and a concentrated moving harmonic force, *Journal of Sound and Vibration*, 291 (2006) 302-322
- [11] M. Şimşek & T. Kocatürk, Free and forced vibration of a functionally graded beam subjected to a concentrated moving harmonic load, *Composite Structures*, 90 (2009) 465-473
- [12] M. Şimşek, Non-linear vibration analysis of a functionally graded Timoshenko beam under action of a moving harmonic load, *Composite Structures*, 92 (2010) 2532-2546
- [13] S.M.R. Khalili, A.A. Jafari, S.A. Eftekhari, A mixed Ritz-DQ method for forced vibration of functionally graded beams carrying moving loads, *Composite Structures*, 92 (2010) 2497-2511
- [14] M. Şimşek, T. Kocatürk, Ş.D. Akbaş, Dynamic behavior of an axially functionally graded beam under action of a moving harmonic load, *Composite Structures*, 94 (2012) 2358-2364
- [15] Guillem Quintana, Joaquim Ciurana, Chatter in machining processes: A review, *Machine Tools & Manufacture*, 51 (2011) 363-376
- [16] S. Rao, *vibration of continuous systems*, John Wiley & Sons, 2007
- [17] L. Meirovitch, *Analytical methods in vibrations*, Macmillan company, 1967
- [18] Singiresu S. Rao, *Mechanical Vibration*, Addison-Wesley Publishing Company, 1995
- [19] M. Nikkhah Bahrami, *Theory of vibrations with applications in engineering*, Tehran: Tehran University Press, 2002. (in Persian)
- [20] H. soleimanimehr, M.J. Nategh, Machining error due to spring-back of work-piece in conventional and ultrasonic vibration assisted turning, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 27-42, 2011. (In Persian)



شکل ۴ نتایج جابجایی ابزار در جهت Z (جابجایی به متر در مقابل زمان به ثانیه)
الف) آزمایش، ب) تحلیل

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج تجربی و تحلیلی این نتایج حاصل شد: مقدار نیرویی که توسط ابزار تحمل می‌گردد بسیار بیشتر از قطعه کار به دست آمده است. از آنجا که نیروی بین ابزار و قطعه کار به صورت عمل و عکس العمل است و طبق قوانین نیوتن بایستی این نیروها مساوی باشد، می‌توان به این نتیجه رسید که بیشتر نیرو در قطعه کار به صورت‌های دیگر از جمله پیچش قطعه کار، نمود پیدا خواهد نمود. برای به دست آوردن مقدار دقیق نیرو در قطعه کار علاوه بر نیاز به سنسورهای دیگر نیاز به تحلیل پیچیده‌تری نیز می‌باشد. این درحالی است که تحلیل ابزار بسیار ساده‌تر و دارای دقت مطلوب خواهد بود. لذا برای دوری از پیچیدگی روابط بهتر است از مدل ابزار تنها استفاده گردد. طول قطعه کار تاثیر ناچیزی بر فرکانس لرزه دارد. بنابراین استفاده از قطعه کار کوتاه برای پرداختن به آزمایشات تجربی مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. فرکانس لرزه متاثر از فرآینده تراش کاری است که در آن ابزار، قطعه کار و حتی ماشین به صورت کم دخیل هستند. با توجه به آن‌که در مدل سازی پیوسته و یک درجه آزادی تفاوتی مشاهده نشد، برای سادگی در روابط استفاده از مدل یک درجه آزادی پیشنهاد می‌گردد.

۵- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها

با تشکر فراوان از آقای دکتر حمید سلیمانی مهر بابت زحماتی که در انجام آزمایشات تجربی کشیده‌اند.

۶- مراجع

- [1] Kai Cheng, *Machining Dynamics (Fundamentals, Applications and Practices)*, Springer, London 2009
- [2] M. Olsson, On the fundamental moving load problem, *Journal of Sound and Vibration*, 145 (1991) 299-307
- [3] R. P. S. Han and J. W.-Z. Zu, Modal analysis of rotating shafts: a body-fixed axis formulation approach, *Journal of Sound and Vibration*, 156 (1992) 1-16
- [4] Huajiang Ouyang & Minjie Wang, A dynamic model for a rotating beam subjected to axially moving forces, *Journal of Sound and Vibration*, 308 (2007) 674-682
- [5] X.-F. Li, A unified approach for analyzing static and dynamic behaviors of functionally graded Timoshenko and Euler-Bernoulli beams, *Journal of Sound and Vibration*, 318 (2008) 1210-1229
- [6] Huajiang Ouyang, Moving-load dynamic problems: A tutorial (with a brief overview), *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25 (2011) 2039-2060