

## طراحی یک جاذب دینامیکی ارتعاش جدید برای کاهش ارتعاش ابزار داخل تراش

عباس رهی\*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، a\_rahi@sbu.ac.ir

علی رهی

کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، alirahi9931@gmail.com

### چکیده

در این مقاله یک جاذب دینامیکی ارتعاش جدید و قابل اجرا، برای کاهش ارتعاش ابزار داخل تراش با طول بلند معرفی می‌شود. این جاذب دینامیکی ارتعاش باعث کاهش ارتعاش عرضی ابزار در فرآیند داخل تراشی می‌شود. برای این منظور ابتدا ابزار داخل تراش در حالت مجهز به جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی مدل‌سازی می‌شود و سپس معادلات حاکم بر سیستم با محاسبه انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم و با استفاده از اصل همپلتون تعمیم یافته استخراج می‌شود. با توجه به اینکه ارتعاش اصلی ابزار داخل تراش در مود اول ظاهر می‌شود لذا برای طراحی و تعیین ابعاد و مشخصات فنی جاذب دینامیکی ارتعاش، سیستم ابزار داخل تراش و جاذب متصل به آن، به صورت یک مدل معادل دو درجه آزادی تقریب زده شده است. سپس سفتی و جرم معادل ابزار داخل تراش و جاذب استخراج می‌شود. در انتها تاثیر مقدار پارامترهای مختلف سیستم بر مقدار مشخصات فنی جاذب مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج به صورت نمودارهایی ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به فضای قابل استفاده برای جاذب دینامیکی ارتعاش لازم است که یک مصالحه برای تعیین ابعاد و مشخصه‌های فنی جاذب صورت پذیرد. نتایج حاصل می‌تواند پژوهشگران و مهندسان در صنعت را برای طراحی سیستم جاذب دینامیکی ارتعاش برای افزایش کیفیت در فرآیند داخل تراشی کمک کند.

**واژه‌های کلیدی:** جاذب دینامیکی ارتعاش، ابزار داخل تراش، سفتی، ارتعاش، مدل‌سازی، اصل همپلتون.

## Design of a new dynamic vibration absorber to reduce the vibration of the boring bar

A. Rahi

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

A. Rahi

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

This paper introduces a new and applicable dynamic vibration absorber to reduce the vibration of long-length of the boring bar. This dynamic vibration absorber reduces the transverse vibration of the tool in the machining process. For this purpose, firstly, the boring bar is modeled in the state equipped with the proposed dynamic vibration absorber. Then, the governing equations of the system are derived by calculating the kinetic energy and potential of the system and using the extended Hamilton's principle. Considering that the main vibration of the boring bar appears in the first mode, therefore, to design and determine the dimensions and technical specifications of the dynamic vibration absorber, the system of the boring bar and the absorber connected to it is approximated as a simple equivalent model of two degrees of freedom. Then, the stiffness equivalent and equivalent mass of the boring bar and the absorber are extracted. At the end, the effect of different system parameters on the amount of technical characteristics of the absorber is investigated and the results are presented in the form of graphs. The results show that according to the usable space for the dynamic vibration absorber, it is necessary to make a compromise to determine the dimensions and technical characteristics of the absorber. The results can help researchers and engineers in the industry to design a dynamic vibration absorber system to increase the quality of the machining process.

**Keywords:** Dynamic Vibration Absorber, Boring Bar, Stiffness, Vibration, modeling, Hamilton's Principle.

### ۱- مقدمه

دادند و نشان دادند که با افزایش سفتی و میرایی ابزار می‌توان از ایجاد پدیده نوسانات ناخواسته جلوگیری کرد. لی و وو [۵] با استفاده از جاذب‌هایی بر پایه میرایی ذرات توانستند مقدار دامنه ارتعاش ابزار را کاهش دهند. لیو و همکاران [۶] یک جاذب دینامیکی جدید با سفتی متغیر طراحی کردند به نحوی که سفتی جاذب دینامیکی ارتعاش با تغییر طول ابزار تغییر می‌کند و بدین ترتیب باعث کاهش دامنه ارتعاش ابزار می‌شود. هوک و همکاران [۷] با استفاده از جاذب دینامیکی ارتعاش، پایداری ابزار در حین عملکرد را افزایش دادند. بهینه‌سازی پارامترهای جاذب دینامیکی ارتعاش توسط روبیو و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفت. آنها مقادیر حداقل منحنی پایداری را تا حد امکان افزایش دادند و در نتیجه افزایش محسوس در پایداری فرآیند داخل تراشی ایجاد کردند. لازم به توضیح است که عدم سازگاری جاذب‌های دینامیکی ارتعاش با فرآیند به علت متغیر بودن پارامترهای

جاذب‌های دینامیکی ارتعاش در صنایع مختلفی برای کاهش ارتعاشات مورد استفاده قرار می‌گیرند. ارتعاش ابزار در فرآیند داخل تراشی، به دلیل طول بلند ابزار، یکی از مشکلات رایج است که تلاش‌های متعددی در سالیان اخیر برای کنترل و کاهش ارتعاش آن انجام می‌شود [۱]. در برخی از مواقع در فرآیند داخل تراشی نیاز به ابزار با طول بلند است که باعث می‌شود سفتی ابزار و در نتیجه فرکانس طبیعی آن کاهش یابد. با نزدیک شدن فرکانس طبیعی ابزار به فرکانس نیروی خارجی، پدیده تشدید رخ می‌دهد و باعث پایین آمدن کیفیت تراش سطح می‌شود [۲]. شیا و همکاران [۳] یک ابزار داخل تراش کامپوزیتی ساختند و نشان دادند که در شرایط یکسان با افزایش فرکانس طبیعی، دامنه ارتعاش ابزار کاهش می‌یابد. تونک و بوداک [۴] پدیده نوسانات ناخواسته را در فرآیند داخل تراشی مورد بررسی قرار

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a\_rahi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش: ۲۰/۱۱/۲۰

براده‌برداری یکی از مشکلات در این فرآیند است.

ابل و همکاران [۹] یک ابزار داخل‌تراش طول بلند با کنترل فعال طراحی کردند و به بررسی الزامات و پارامترهای آن پرداختند. چن و حنیف‌زادگان [۱۰] میرایی فعال برای کنترل ارتعاش ابزار داخل تراش با استفاده از محرک مغناطیسی را مطالعه کردند. ماتسوبارا و همکاران [۱۱] از یک محرک پیزوالکتریک بر روی داخل‌تراش برای کاهش ارتعاش ابزار استفاده کردند. آنها یک مدار سلف و مقاومت به عنوان جاذب دینامیکی طراحی کردند و به وسیله آن به مقدار قابل توجهی پدیده نوسانات ناخواسته را کنترل کردند. رهی و حسین‌پور [۱۲] ارتعاش جانبی یک ابزار داخل تراش مجهز به جاذب دینامیکی ارتعاش را مورد بررسی قرار دادند. آنها تاثیر پارامترهای مختلف جاذب دینامیکی ارتعاش همانند موقعیت جاذب، سفتی جاذب و طول جاذب، بر روی ارتعاش ابزار داخل تراش را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که اضافه شدن جاذب دینامیکی ارتعاش، باعث افزایش فرکانس طبیعی ابزار می‌شود و هر چه جاذب به نوک ابزار نزدیک‌تر باشد عملکرد بهتری دارد.

پاتل و همکاران [۱۳] برای بهبود عملکرد ابزار داخل تراش یک راه حل میرایی هیبریدی ارائه کردند. مستهلک کننده هیبریدی آنها از یک جاذب تشکیل شده است که به همراه یک مستهلک کننده جریان گردابی کار می‌کند. یک آهنربای دائمی توسط یک فنر و مستهلک کننده در قسمت مسی از ابزار داخل تراش تعبیه شده است که آهنربای دائمی به عنوان یک جاذب عمل می‌کند و حرکت نسبی بین میله مسی رسانا و میدان مغناطیسی جریان‌های گردابی را القا می‌کند که مانع حرکت ارتعاشی ابزار داخل تراش می‌شود. جیلین و همکاران [۱۴] ارتعاش ابزار داخل‌تراش تحت تحریک هارمونیک خارجی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با اضافه کردن جاذب دینامیکی و چاه انرژی می‌توان دامنه ارتعاش سیستم را کاهش داد. آن‌ها با صرف نظر کردن از عوامل غیرخطی در سیستم ابزار داخل تراش، معادله حرکت سه درجه آزادی سیستم ابزار داخل تراش متصل به جاذب ارتعاش دینامیکی خطی و چاه انرژی غیرخطی را مورد بررسی قرار دادند. ذبیح حسینیان و همکاران [۱۵] از جاذب دینامیکی فعال به منظور میراشدن ارتعاشات ناخواسته ابزار داخل تراش که منجر به کاهش صافی سطح می‌شود، استفاده کردند. آنها در مطالعه خود از دو حسگر شتاب آنالوگ و دیجیتال به همراه جاذب دینامیکی فعال نصب شده بر روی ابزار داخل تراش به طول ۷۲۰ میلی‌متر استفاده کردند و به کمک روش پسخور سرعت، ارتعاشات ناشی از تحریک خارجی سیستم را مورد مطالعه قرار دادند. یاداو و همکاران [۱۶] یک روشی ارائه کردند که می‌تواند با استفاده از یک نوع جاذب دینامیکی در داخل ابزار داخل تراش و به دور از انتهای آزاد آن، ارتعاش آن را کاهش دهد. روش‌های کنترل فعال برای کاهش ارتعاش ابزار داخل تراش در مقایسه با روش غیرفعال، سازگاری بیشتری با توجه به تغییر پارامترهای فرآیند داخل‌تراشی از خود نشان می‌دهد. ولی به دلیل اینکه از تجهیزات گران‌قیمت‌تری استفاده می‌کند، از دیدگاه اقتصادی به صرفه نیست و استفاده از آن برای بیشتر مصرف‌کنندگان در صنعت مقدور نمی‌باشد به همین دلیل روش‌های غیرفعال برای کاهش ارتعاش ابزار داخل تراش همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است.

در این مقاله با روشی جدید و بدون نیاز به تغییر در ساختار ابزار

داخل تراش، و تنها با اضافه کردن یک جاذب دینامیکی ارتعاش توخالی به ابزار داخل‌تراش سنتی، عملکرد ارتعاشی ابزار بهبود می‌یابد. به این منظور ابتدا یک ابزار داخل‌تراش رایج در حالت مجهز به جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی مدلسازی می‌شود. سپس با استفاده از اصل همیلتون تعمیم یافته و با محاسبه انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل سیستم، معادلات حاکم استخراج می‌شود. در ادامه برای ساده‌سازی سیستم، ابزار داخل تراش متصل به جاذب به صورت یک مدل ساده دو درجه آزادی تقریب زده می‌شود و سپس سفتی و جرم معادل ابزار تراش و جاذب استخراج می‌شود. با استفاده از شرط جاذب دینامیکی ارتعاش رابطه حاکم بر سیستم برای داشتن بهترین عملکرد جاذب استخراج می‌شود و در انتها تاثیر پارامترهای مختلف سیستم بر مقدار مشخصات فنی جاذب مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به صورت نمودارهایی ارائه می‌شوند. نتایج حاصل می‌تواند محققان و مهندسان را برای طراحی سیستم جاذب دینامیکی ارتعاش برای ابزار داخل‌تراش یاری کند.

## ۲- مدل‌سازی و استخراج معادلات حاکم

شکل ۱، یک فرآیند داخل تراشی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در فرآیند داخل‌تراشی قطعه روی دستگاه تراش دوران کرده و از داخل توسط ابزار داخل‌تراش براده‌برداری می‌شود. همچنین شکل ۲ نمونه‌هایی از ابزار داخل تراش را نشان می‌دهد.

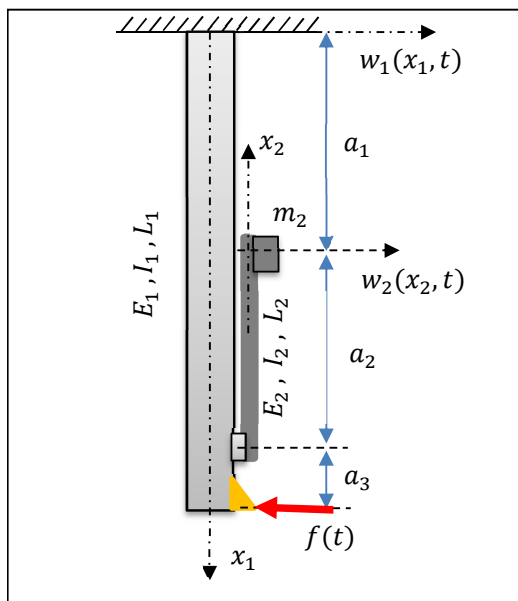


شکل ۱- نمایی از ابزار داخل‌تراش در حال براده‌برداری



شکل ۲- نمونه‌هایی از ابزار داخل‌تراش بدون جاذب دینامیکی ارتعاش

$$T = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \rho_1 A_1 \left( \frac{\partial w_1}{\partial t} \right)^2 dx_1 + \frac{1}{2} \int_0^{L_2} \rho_2 A_2 \left( \frac{\partial w_2(L_1, t)}{\partial t} \right)^2 dx_2 + \frac{1}{2} m_2 \left( \frac{\partial w_1(L_1, t)}{\partial t} \right)^2 + \frac{1}{2} m_2 \left( \frac{\partial w_2(L_2, t)}{\partial t} \right)^2 \quad (2)$$



شکل ۴- مدل ریاضی سیستم برای جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی

که در آن  $\rho_1$  و  $A_1$  به ترتیب جرم حجمی و سطح مقطع ابزار داخل تراش،  $\rho_2$  و  $A_2$  به ترتیب جرم حجمی و سطح مقطع جاذب دینامیکی ارتعاش، و  $w_1$  و  $w_2$  به ترتیب تغییر شکل ارتعاشی ابزار داخل تراش و جاذب دینامیکی ارتعاش می‌باشد.

انرژی پتانسیل ( $\pi$ ) و کار انجام شده توسط نیروهای ناپایستار ( $W$ ) بر روی سیستم، از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\pi = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} E_1 I_1 \left( \frac{\partial^2 w_1(x_1, t)}{\partial x_1^2} \right)^2 dx_1 + \frac{1}{2} \int_0^{L_2} E_2 I_2 \left( \frac{\partial^2 w_2(x_2, t)}{\partial x_2^2} \right)^2 dx_2 \quad (3)$$

$$W = f(t) \cdot w_1(L_1, t)$$

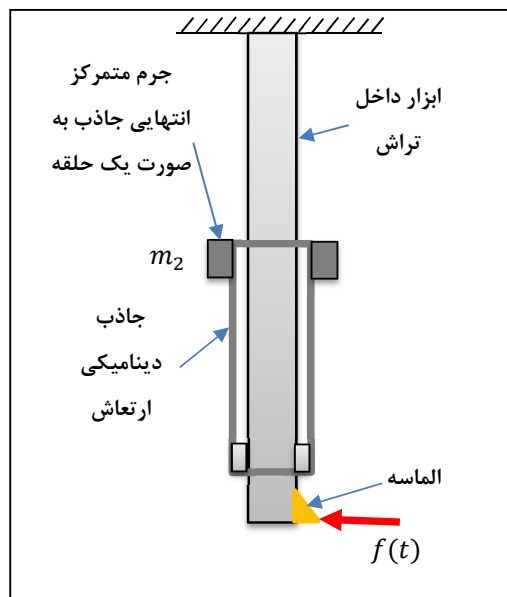
که در آن  $E_1 I_1$  و  $E_2 I_2$  به ترتیب سختی خمشی ابزار داخل تراش و جاذب دینامیکی ارتعاش می‌باشد.

اصل همپلتون تعمیم یافته به صورت زیر است.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - \pi + W) dt = 0 \quad (4)$$

که در آن  $T$  انرژی جنبشی سیستم،  $\pi$  انرژی پتانسیل و کرنشی سیستم، و  $W$  کار نیروهای خارجی ناپایستار است.

با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطه (۴) و ساده سازی آن، معادلات



شکل ۳- جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی برای کاهش ارتعاش ابزار داخل تراش

معمولا در فرآیند داخل تراشی، کیفیت سطح قطعه کار یکی از شاخص‌ها می‌باشد که در صورت وجود ارتعاش در ابزار داخل تراش، کاهش می‌یابد.

در این مقاله یک جاذب دینامیکی ارتعاش کاربردی مطابق شکل ۳ معرفی می‌شود که با استفاده از آن می‌توان ارتعاش ابزار داخل تراش را کاهش داد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود جاذب دینامیکی ارتعاش به صورت یک استوانه توخالی است که از سمت الماسه به ابزار داخل تراش متصل است و در انتهای دیگر آن آزاد است و در انتهای آزاد جاذب جرم متمرکز  $m_2$  قرار دارد. ایده فوق را می‌توان به صورت شکل ۴ مدل‌سازی ریاضی کرد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ابزار داخل تراش و جاذب دینامیکی ارتعاش به ترتیب طول، ممان اینرسی سطح مقطع و مدول یانگ  $E_1, I_1, L_1$  به ترتیب طول، ممان اینرسی سطح مقطع و مدول یانگ جاذب دینامیکی ارتعاش داخل تراش و  $m_2$  جرم متمرکز متصل شده به انتهای جاذب دینامیکی ارتعاش می‌باشد. معمولا در عمل می‌توان مکان اتصال جاذب دینامیکی ارتعاش به ابزار داخل تراش را طوری در نظر گرفت که مقدار  $a_3$  در مقابل مقدار  $(a_1 + a_2)$  کوچک باشد و بتوان از آن صرف نظر کرد. لذا می‌توان نوشت:

$$L_1 \approx a_1 + a_2 \quad (1)$$

حال می‌توان با استفاده از اصل همپلتون تعمیم یافته، معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی سیستم را استخراج کرد. برای این منظور ابتدا انرژی جنبشی سیستم به صورت زیر استخراج می‌شود.

حاکم به صورت زیر استخراج می‌شود.

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x_1^4} + \rho_1 A_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 w_2}{\partial x_2^4} + \rho_1 A_1 \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} = 0$$

همچنین شرایط مرزی را نیز می‌توان به صورت زیر استخراج کرد.

$$w_1(0, t) = \frac{\partial w_1(0, t)}{\partial x_1} = 0$$

$$E_1 I_1 \frac{\partial^2 w_1(0, t)}{\partial x_1^2} = 0$$

$$E_1 I_1 \frac{\partial^3 w_1(L_1, t)}{\partial x_1^3} = f(t) \quad (6)$$

$$w_2(0, t) = w_1(L_1, t)$$

$$\frac{\partial w_2(0, t)}{\partial x_2} = 0$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^3 w_2(L_2, t)}{\partial x_2^3} = m_2 \frac{\partial^2 w_2(L_2, t)}{\partial t^2}$$

که در آن  $f(t)$  نیروی براده‌برداری در فرآیند داخل تراشی است.

برای ساده کردن مدلسازی و حل معادلات و همچنین با در نظر گرفتن مود اول ارتعاشی، مدل ریاضی سیستم شکل ۴، برای حالت دو درجه آزادی به صورت شکل ۵ قابل بیان است که در آن  $K_{eq1}$  و  $m_{eq1}$  به ترتیب سفتی خمشی و جرم معادل ابزار داخل تراش،  $K_{eq2}$  و  $m_{eq2}$  به ترتیب سفتی خمشی و جرم معادل جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی است. سفتی و جرم معادل ابزار داخل تراش و همچنین جاذب دینامیکی ارتعاش متصل به آن را می‌توان از روابط زیر استخراج کرد:

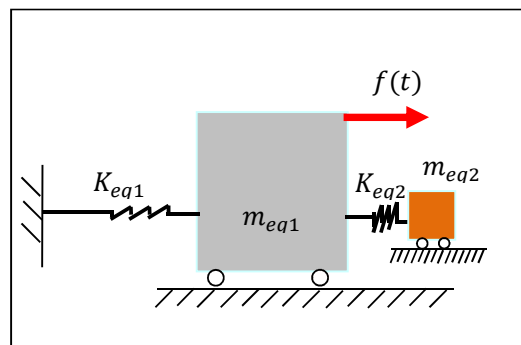
$$K_{eq1} = \frac{3E_1 I_1}{L_1^3}$$

$$m_{eq1} = \frac{33}{140} \rho_1 A_1 L_1 \quad (7)$$

$$K_{eq2} = \frac{3E_2 I_2}{L_2^3}$$

$$m_{eq2} = m_2 + \frac{33}{140} \rho_2 A_2 L_2$$

که در آن  $L_1, A_1, \rho_1, E_1 I_1$  به ترتیب سفتی خمشی، جرم حجمی، سطح مقطع و طول ابزار تراش، و  $L_2, A_2, \rho_2, E_2 I_2$  به ترتیب سفتی خمشی، جرم حجمی، سطح مقطع و طول جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی است.



شکل ۵- مدل دو درجه آزادی سیستم برای جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی

برای داشتن بهترین حالت برای سیستم جاذب دینامیکی ارتعاش

پیشنهادی بایستی رابطه زیر برقرار باشد.

$$\sqrt{\frac{K_{eq2}}{m_{eq2}}} = \sqrt{\frac{K_{eq1}}{m_{eq1}}} = \bar{B} \quad (8)$$

با جایگذاری روابط (۷) در رابطه (۸)، داریم:

$$\frac{33}{140} \rho_2 A_2 L_2^4 + m_2 L_2^3 = \frac{3E_2 I_2}{\bar{B}^2} \quad (9)$$

با استفاده از رابطه (۹) می‌توان با توجه به مشخصات فنی ابزار داخل تراش، ابعاد و اندازه مربوط به جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی را محاسبه کرد.

### ۳- نتایج و بحث

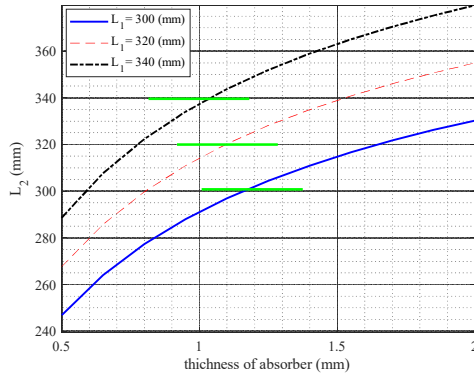
برای شبیه‌سازی عددی، مشخصات فنی ابزار داخل تراش، مطابق با مشخصات فنی ارائه شده استاندارد جدول ۱، در نظر گرفته می‌شود. هولدر ابزار داخل تراش از جنس فولاد ۴۱۴۰ و ابزار از جنس الماس DCMT می‌باشد که ابعاد و اندازه آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات ابزار داخل تراش استفاده شده برای شبیه سازی

نام ابزار داخل تراش	قطر بدنه (mm)	طول کل (mm)	طول آویز $L_1$ (mm)
S32T SDUCR11	۳۲	۴۰۰	۳۰۰

جرم انتهایی جاذب دینامیکی ارتعاشی پیشنهادی، می‌تواند از یک جسم ثانویه با ماده‌ای چگال‌تر مثل کارباید با چگالی ۱۹۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شود تا حداقل فضای ممکن را اشغال نماید. چگالی ابزار  $(\rho_1)$  ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ  $(E_1)$  ۲۰۰ گیگا پاسکال، و طول آویزان  $(L_1)$  آن ۳۰۰ میلی‌متر است. همچنین چگالی جاذب  $(\rho_2)$  ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ  $(E_2)$  ۲۰۰ گیگا پاسکال، و قطر داخلی آن ۳۴ و قطر خارجی آن ۳۶ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۶ مقدار تغییرات فرکانس طبیعی اول ابزار داخل تراش بر حسب طول آویز آن و برای قطرهای مختلف ابزار را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار فرکانس طبیعی اول ابزار داخل تراش به طور غیر خطی با افزایش طول آن کاهش می‌یابد. این رفتار با معادلات تحلیلی حاکم مطابقت دارد.

همچنین مقدار طول مورد نیاز جاذب دینامیکی ارتعاش بر حسب مقدار جرم جاذب برای طول‌های مختلف آویز ابزار داخل تراش در شکل ۷ ارایه شده است. همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود هرچه مقدار جرم متمرکز در انتهای جاذب کمتر باشد مقدار طول جاذب بیشتری مورد نیاز است و این رفتار به صورت غیر خطی تغییر می‌کند. شکل ۸، مقدار تغییرات طول جاذب دینامیکی ارتعاش بر حسب مقدار طول ابزار داخل تراش به ازای مقادیر مختلف جرم جاذب را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار طول جاذب دینامیکی ارتعاش با افزایش طول ابزار داخل تراش به صورت خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۹- مقدار طول جاذب دینامیکی ارتعاش بر حسب ضخامت بدنه استوانه‌ای جاذب برای مقادیر مختلف طول ابزار داخل تراش

#### ۴- شبیه سازی ارتعاشی

معادله حاکم بر ارتعاش سیستم معادل نشان داده شده در شکل ۵، به صورت زیر قابل بیان است:

$$[m] \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

که در آن  $[m]$  ماتریس جرم و  $[K]$  ماتریس سفتی سیستم،  $f(t)$  نیروی براده‌برداری فرآیند داخل تراشی است که به صورت زیر بدست می‌آید:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{eq1} & 0 \\ 0 & m_{eq2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{eq1} + K_{eq2} & -K_{eq2} \\ -K_{eq2} & K_{eq2} \end{bmatrix}$$

با در نظر گرفتن نیروی براده‌برداری به صورت هارمونیک، داریم:

$$f(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (12)$$

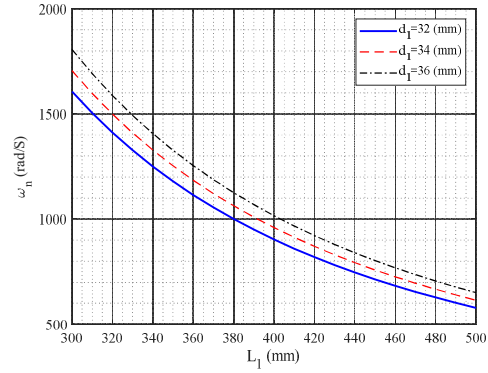
که در آن  $\omega$  فرکانس نیروی براده‌برداری فرآیند داخل تراشی می‌باشد. برای حل معادلات (۱۰)، پاسخ حالت دائم سیستم را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} \sin(\omega t) \quad (13)$$

با جایگذاری معادله (۱۳) در معادله (۱۰) و ساده‌سازی آن داریم:

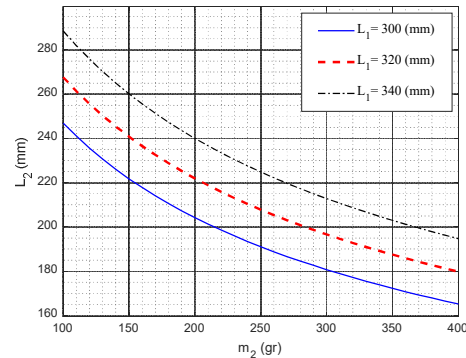
$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \frac{F_0}{\det(-[m]\omega^2 + [K])} \begin{Bmatrix} m_{eq2} \omega^2 + K_{eq2} \\ K_{eq2} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

با استفاده از مقادیر عددی ارائه شده برای پارامترهای سیستم در بخش قبل (جدول ۱) و با در نظر گرفتن نیروی خارجی ناشی از فرآیند داخل تراش (مطابق شکل ۱۰)، مقدار دامنه ارتعاش ابزار داخل تراش در دو

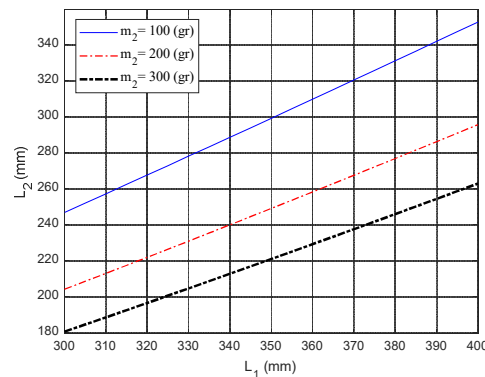


شکل ۶- فرکانس طبیعی اول ابزار داخل تراش بر حسب طول آویز ابزار داخل تراش برای قطرهای مختلف ابزار

شکل ۹، مقدار طول جاذب دینامیکی ارتعاش مورد نیاز بر حسب تغییر ضخامت بدنه استوانه‌ای جاذب و برای مقادیر مختلف طول ابزار داخل تراش را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود مقدار طول جاذب دینامیکی ارتعاش مورد نیاز به صورت غیرخطی با افزایش مقدار ضخامت بدنه استوانه‌ای جاذب، افزایش می‌یابد. با توجه به محدودیت فضا، مقدار طول جاذب نمی‌تواند از مقدار طول ابزار داخل تراش بیشتر باشد. این محدودیت با خطوط سبز در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۷- مقدار طول مورد نیاز جاذب دینامیکی ارتعاش بر حسب مقدار جرم جاذب برای طول‌های مختلف آویز ابزار داخل تراش

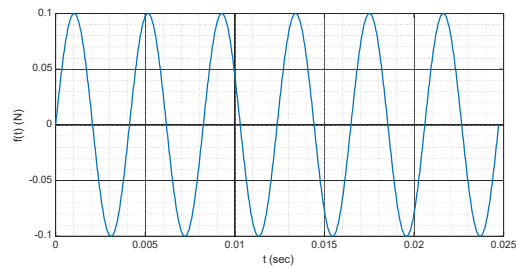


شکل ۸- مقدار طول جاذب دینامیکی ارتعاش بر حسب مقدار طول آویز ابزار داخل تراش برای مقادیر مختلف جرم جاذب

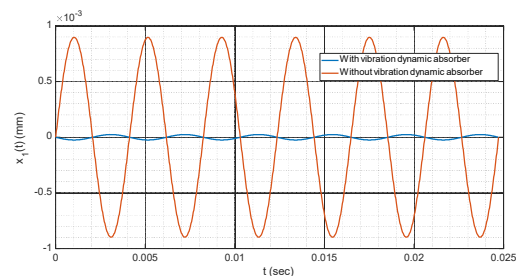
## ۶- مراجع

- [1] Siddhpura M, Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012; 61, 27-47.
- [2] Hendrowati W, Guntur HL, Daman AAA, Lestari H. Analytical and experimental study of translational vibration response's reduction on aluminum (Al) drilling process using translational mass vibration absorber (TMVA) system. *AIP Conference Proceedings*, 2019; Vol. 2187.
- [3] Xia F, Liu Z, Song Q. Boring bar with constrained damping. *Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*. 2014 Sep; 35, 9: 2652-2659.
- [4] Tunç LT, Budak E. Effect of cutting conditions and tool geometry on process damping in machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012 Jun; 57: 10-19.
- [5] Lei X, Wu C. Investigating the Optimal Damping Performance of a Composite Dynamic Vibration Absorber with Particle Damping. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2018; 6, 6: 503-511.
- [6] Liu X, Liu Q, Wu S, Li R, Gao H. Analysis of the vibration characteristics and adjustment method of boring bar with a variable stiffness vibration absorber. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; 98,1-4: 95-105.
- [7] Houck L, Schmitz TL, Scott Smith K. A tuned holder for increased boring bar dynamic stiffness. *Journal of Manufacturing Processes*. 2011; 13,1: 24-29.
- [8] Rubio L, Loya JA, Miguélez MH, Fernández-Sáez J. Optimization of passive vibration absorbers to reduce chatter in boring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013;41,1-2: 691-704.
- [9] Abele E, Haydn M, Grosch T. Adaptronic approach for modular long projecting boring tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2016; 65,1: 393-396.
- [10] Chen F, Hanifzadegan M, Altintas Y, Lu X. Active damping of boring bar vibration with a magnetic actuator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015; 20,6: 2783-2794.
- [11] Matsubara A, Maeda M, Yamaji I. Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014; 63,1: 373-376.
- [12] Rahi A, Hosseinpour M. Investigation of dynamic absorber parameters to improve the vibration behavior of boring bar. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022;9,7: 1-8.
- [13] Patel A, Yadav A, Law M, Bhattacharya B, Wahi P. Damped Chatter Resistant Boring Bar Integrated with an Absorber Working in Conjunction with an Eddy Current Damper. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2022 Sep, doi: 10.1007/s42417-022-00684-9.
- [14] Jialin L, Jiangchuan N, Yongjun S, Shaopu Y. Vibration control of linear boring bar by dynamic vibration absorber combined with nonlinear energy sink. *Lixue Xuebao/Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2021 Nov; 53,11: 3124-3133. doi: 10.6052/0459-1879-21-475.
- [15] Zabieh Hosenian N, Fatemiyani SM, Moatakef Emami B. Reducing the vibrations of the tool inside the lathe with the help of an active dynamic absorber. *The second national conference on machining and advanced machine tools*. 2022.
- [16] Yadav A, Talaviya D, Bansal A, Law M. Design of chatter-resistant damped boring bars using a receptance coupling approach. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2020; 4,2: 53.

حالت با و بدون جاذب دینامیکی ارتعاش، به صورت شکل ۱۱ بدست آمده است.



شکل ۱۰- مدلسازی نیروی خارجی ناشی از فرآیند داخل تراشی



شکل ۱۱- ارتعاش ابزار داخل تراش در دو حالت با و بدون جاذب دینامیکی ارتعاش

نتایج به دست آمده در شکل ۱۱، به خوبی تاثیر جاذب دینامیکی ارتعاش بر کاهش دامنه ارتعاش نقطه انتهایی ابزار داخل تراش را نشان می‌دهد.

همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود برای ابزار داخل تراش با مشخصات معرفی شده در جدول ۱، مشخصات جاذب دینامیکی ارتعاش به صورت  $m_2 = 100 \text{ gr}$ ,  $L_2 = 247 \text{ mm}$  قطر داخلی ۳۴ میلی‌متر و ضخامت جداره ۰.۵ میلی‌متر می‌باشد.

## ۵- جمع بندی

در این مقاله یک جاذب دینامیکی ارتعاش قابل اجرا، برای کاهش ارتعاش ابزار داخل تراش و در نتیجه افزایش کیفیت سطح براده‌برداری ارائه شد. به این منظور ابتدا یک ابزار داخل تراش در حالت مجهز به جاذب دینامیکی ارتعاش پیشنهادی مدلسازی شد و با استفاده از اصل همپلتون تعمیم یافته معادلات حاکم استخراج گردید. برای طراحی و استخراج ابعاد و مشخصات فنی جاذب دینامیکی ارتعاش، سیستم ابزار داخل تراش متصل به جاذب به صورت یک مدل معادل دو درجه آزادی تقریب زده شد و سپس سفتی و جرم معادل ابزار تراش و جاذب استخراج گردید. در انتها تاثیر مقدار پارامترهای مختلف سیستم بر مقدار مشخصات فنی جاذب، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت نمودارهایی ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به فضای قابل استفاده برای جاذب دینامیکی ارتعاش، بایستی یک مصالحه برای تعیین ابعاد و مشخصه‌های فنی جاذب صورت پذیرد که این موضوع در نمودارها ارائه شده است.