



# Modeling of Sound Generation Mechanism During the Turning Process

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Nourizadeh Nesheli R.<sup>1</sup>,  
Zareinejad M.<sup>2</sup>,  
Rezaei S.M.<sup>1</sup>,  
Adibi H.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Nourizadeh Nesheli R, Zareinejad M, Rezaei S, Adibi H. Modeling of Sound Generation Mechanism During the Turning Process. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(08):529-539.

<sup>1</sup> Manufacturing group of Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> New Technologies Research Center (NTRC), Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Amirkabir University of Technology, Hafez Ave, Tehran, Iran.  
smrezaei@aut.ac.ir

### Article History

Received: December 05, 2021  
Accepted: April 18, 2022  
ePublished: June 17, 2022

## ABSTRACT

Tool wear has a significant influence on machining processes. Investigations on tool wear monitoring through various methods and sensors have been widely conducted to determine and predict the tool wear. In this study sound generation mechanisms during turning process have been investigated comprehensively and three sound generation sources have been determined and distinguished. Sound generation mechanisms which originated from tool vibration, deformation in the workpiece and vibration at the contact zones (friction), have been investigated and frequency range of the sound generated through each mechanism has been determined. Then the mechanism which is appropriate for tool condition monitoring has been studied and suggested. Then the relation between the sound generation mechanisms and chip formation has been studied during machining. Hence, a deep understanding about the machining process has been brought out. Findings could lead to an effective approach to monitoring the machining process, not only using mathematical signal processing methods, but also through a physical comprehension background. Experimental studies have been conducted to evaluate developed theories and models. Experimental results have shown effectiveness of the proposed approach.

**Keywords** Sound Generation Mechanism, Tool Wear, Machining, Frequency Analysis

## CITATION LINKS

[1] A review of machining monitoring systems. [2] Research on Thermal Monitoring for Finish Machining of... [3] Intelligent machining monitoring using sound signal processed with the wavelet method and a... [4] Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining. [5] Development of tool wear machining monitoring using novel statistical analysis method. [6] Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. [7] Smart machining: Monitoring of CFRP Milling using AE and IR. [8] Detection of accelerated tool wear in turning. [9] Tool condition monitoring in CNC end milling using wavelet neural network... [10] Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to... [11] Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling machining. [12] A neural-network approach for the on-line monitoring of the... [13] Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning. [14] An intelligent system for grinding wheel condition monitoring based on... [15] Application of the wavelet transform to acoustic emission signals for built-up edge monitoring in stainless steel machining. [16] Development of tool condition monitoring system in end milling process using wavelet features and Hoelder's exponent with machine learning algorithms. [17] Statistical monitoring and optimization of electrochemical machining using Shewhart Charts and response surface methodology. [18] Analysis of the structure of vibration signals for tool wear detection. [19] New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys. [20] The mechanism of chip formation with hard turning steel. [21] Experimental and numerical studies on chip formation mechanism and working performance of the milling tool with single abrasive grain. [22] Mechanism of chip formation and surface-defects in orthogonal cutting of soft-brittle potassium dihydrogen phosphate crystals. [23] A study of the effects of friction on flank wear and the role of friction in tool wear monitoring. [24] In situ analysis of flow dynamics and deformation fields in cutting and sliding of metals. [25] Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning. [26] Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication

## مدل‌سازی مکانیزم‌های تولید صوت در فرآیندهای تراشکاری

رضا نوری زاده نشلی

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

محمد زارعی نژاد

پژوهشکده فناوری‌های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

سید مهدی رضاعی\*

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

حامد ادیبی

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

فرسایش ابزار تأثیر به‌سزایی در فرآیندهای ماشین‌کاری دارد. بررسی‌های متعددی بر روی پایش فرسایش ابزار از طریق روش‌های متفاوت و با استفاده از حس‌گرهای مختلف، به‌منظور پیش‌بینی فرسایش ابزار انجام شده‌است. در این مقاله، مکانیزم‌های تولید صوت در حین فرآیند تراشکاری به‌طور جامعی بررسی شده‌اند و سه منبع اصلی تولید صوت تعیین و از یکدیگر متمایز شده‌اند. مکانیزم‌های تولید صوت با منشأ ارتعاشات ابزار، تغییر شکل در قطعه کار و ارتعاشات در سطوح تماس (اصطکاک) بررسی و محدوده‌ی فرکانسی صوت ایجادشده از طریق هر یک از این فرآیندها، مشخص شده‌اند. نشان داده شده است که مکانیزم‌های ذکرشده به ترتیب در محدوده‌ی چند ده هرتز، چند کیلوهرتز و چند مگاهرتز تولید صوت می‌نمایند. پس از آن مکانیزمی که برای پایش ابزار مناسب‌تر باشد بررسی و انتخاب شده‌است. سپس ارتباط بین آن مکانیزم تولید صوت و فرآیند تشکیل براده حین ماشین‌کاری مورد مطالعه قرار گرفته و درک عمیق‌تری از فرآیند ماشین‌کاری ایجاد شده است. یافته‌های این مقاله، نه‌تنها بر مبنای روش‌های پردازش سیگنال، بلکه بر اساس شناخت فیزیک و ذات فرآیند، می‌تواند به یک روش پایش فرآیند ماشین‌کاری مؤثر و قابل‌اتکا منجر شود. جهت صحت‌گذاری روابط توسعه داده‌شده و مدل‌های ایجادشده آزمون‌های تجربی انجام شده‌است و نتایج آزمون‌های تجربی کارایی مدل‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** فشار گرم، رفتار سیلانی، تبلور مجدد دینامیکی، سینوس هاپیرولیک، انرژی فعال‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹

\*نویسنده مسئول: smrezaei@aut.ac.ir

### ۱- مقدمه

اگرچه ماشین‌کاری یکی از قدیمی‌ترین فرآیندهای تولید است، اما اکنون نیز به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم در اغلب صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیشرفت و توسعه‌ی ماشین‌ابزارها، از ماشین‌های دست‌ساز به ماشین‌های کاملاً خودکار کنونی منجر به افزایش کارایی فرآیند ماشین‌کاری، کاهش هزینه‌های تولید و تولید قطعات با دقت ابعادی بالا شده است. اما این دسته از فرآیندها به دلیل مشخصات ذاتی و پیچیدگی فراوان، جزء

گران‌ترین فرآیندهای تولید می‌باشند و نیاز به نیروی کار بالایی دارند.

برای کاهش اتلاف منابع انسانی، مواد اولیه و انرژی مصرفی در فرآیندهای ماشین‌کاری و افزایش کیفیت قطعات، یک سامانه‌ی پایش مقاوم و قابل‌اعتماد موردنیاز است<sup>[1]</sup>. پژوهش‌های متعددی به پایش وضعیت ابزار با استفاده از حس‌گرهای دما<sup>[2]</sup>، صوت<sup>[3]</sup>، ارتعاش<sup>[4,5]</sup>، انتشار آکوستیک<sup>[6,7]</sup>، نیرو<sup>[8]</sup> و بینایی<sup>[9]</sup> و از طریق روش‌های هوش مصنوعی<sup>[10,3,12]</sup>، یادگیری عمیق<sup>[13,14]</sup>، پردازش سیگنال دیجیتال<sup>[15,16]</sup>، آماری<sup>[17]</sup> و تحلیل طیف تکینگی<sup>[18]</sup> اختصاص‌یافته‌اند. در این پژوهش‌ها با استفاده از داده‌های ذخیره‌شده از حس‌گرهای مختلف، تلاش‌هایی برای پیش‌بینی و تخمین هرگونه شرایط غیرعادی در حین فرآیند ماشین‌کاری صورت پذیرفته است. اما یک ارتباط فیزیکی روشن بین سیگنال‌های دریافت شده و مکانیزم‌های تشکیل براده ارائه نشده است. شناخت منشأ سیگنال و ارتباط آن با خواص مکانیکی قطعه کار و ابزار برشی در ناحیه‌ی برش می‌تواند منجر به درک بهتر پژوهشگران از این فرآیند و همچنین طراحی یک سیستم پایش مقاوم‌تر و قابل‌اعتمادتر شود. اگرچه مکانیزم‌های تشکیل براده در بسیاری از پژوهش‌ها<sup>[19-22]</sup> بررسی شده‌اند، اما ارتباط بین مکانیزم‌های ارائه‌شده و کمیت‌های اندازه‌گیری شده از طریق حس‌گرهای اشاره‌شده برای پایش فرآیند مشخص نشده است. این موضوع در هر وضعیت ماشین‌کاری که قرار است مورد پایش قرار گیرد منجر به اجبار در استفاده از سیگنال سالم به‌عنوان مبنایی برای مقایسه می‌شود. بنابراین در هر سرعت پیش روی، سرعت برشی، عمق براده برداری و غیره یک سیگنال سالم موردنیاز است که باید به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شود که این موضوع کارایی روش‌های پایش وضعیت ابزار در کاربردهای صنعتی را محدود می‌کند. در جدول ۱ فعالیت‌های پژوهشگران پیشین، اهداف و نتایج آن‌ها ذکر شده است.

اگرچه در فعالیت‌های ذکرشده توسط پژوهشگران پیشین در جدول ۱ به موضوع پایش وضعیت در فرآیندهای ماشین‌کاری پرداخته شده است و یا مدل‌هایی برای توصیف این فرآیندها ارائه شده است، اما به یک نیاز اساسی پاسخ داده نشده است. برای شناخت یک فرآیند و ایجاد یک روش پایش وضعیت قابل‌اتکا، مقاوم و قابل‌اعتماد، لازم است تا ارتباط بین سیگنال‌های دریافتی توسط حس‌گرهای انتخاب‌شده و مکانیزم‌های فعال در حین براده برداری مدل‌سازی شود. در جهت پاسخگویی به این نیاز، در این مقاله یک مدل ریاضی برای صوت ایجادشده در حین فرآیند براده برداری ارائه شده است تا بتوان علاوه بر ایجاد امکان شناخت بیشتر ذات فرآیندهای ماشین‌کاری، روش‌های پایش وضعیت را از مدل‌های جعبه سیاه به سمت مدل‌های جعبه سفید سوق داد، چراکه یکی از الزامات مقاوم بودن و قابل‌اعتماد بودن روش‌های پایش وضعیت، اتکا به مدل‌های جعبه سفید است.

جدول (۱) فعالیت‌های پژوهشگران پیشین، اهداف و نتایج آن‌ها

شماره مرجع	اهداف و نتایج	وجه تمایز با پژوهش حاضر
۲	یک سامانه‌ی اندازه‌گیری دما طراحی و ساخته شده است و دمای قطعه کار در حین فرآیند اندازه‌گیری شده است.	روش‌های استفاده‌شده در این پژوهش‌ها، به‌جای اتکا بر علیت، مبتنی بر همبستگی است و یک روش مقام نیست. همچنین در این پژوهش‌ها مدل ریاضی از ارتباط بین سیگنال‌های دریافتی و عیب مورد نظر ارائه نشده است.
۳	با استفاده از هوش مصنوعی و سیگنال‌های صوتی، فرآیند ماشینکاری مورد پایش قرار گرفته است.	
۴	با استفاده از حس‌گر ارتعاش و روش‌های تبدیل موجک، صافی سطح در فرآیند ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفته است.	
۵	با استفاده از پیزوالکتریک ارتعاشات در فرآیند ماشینکاری اندازه‌گیری و سایش ابزار با اعمال یک فیلتر بررسی شده است.	
۶	با استفاده از روش انتشار صوت و شبکه‌ی عصبی، فرآیندهای مختلف ماشینکاری بررسی شده‌اند.	
۷	با استفاده از روش انتشار صوت، صافی سطح قطعه‌ی کامپوزیتی پلیمری فیبر کربنی بررسی شده است.	
۸	با استفاده از حس‌گر نیرو و تغییر در انحنای نمودارهای نیرو برحسب زمان، وضعیت ابزار در فرآیند ماشینکاری پایش شده است.	
۹	با استفاده از حس‌گر بینایی، فرآیند ماشینکاری با روش هوش مصنوعی موجک بررسی شده است.	
۱۰	با استفاده از روش هوش مصنوعی، موتور اسپیندل و ابزار برشی با رویکرد نگهداری پیش‌بین مورد بررسی قرار گرفته‌اند.	
۱۱	از شبکه عصبی تلفیق داده برای پایش وضعیت فرآیند فرزکاری استفاده شده است. از دینامومتر و شتاب سنج به‌عنوان حس‌گر استفاده شده است.	
۱۲	از شبکه‌ی عصبی برای پایش برخط فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی استفاده شده است.	
۱۳	حس‌گرهای متخلف برای پایش وضعیت فرآیند ماشینکاری بررسی و از روش یادگیری عمیق نیز استفاده شده است.	
۱۴	از روش یادگیری عمیق و حس‌گر صوتی برای پایش وضعیت در فرآیند سنگ‌زنی استفاده شده است.	
۱۵	از روش تبدیل موجک برای تحلیل داده‌های انتشار صوت استفاده شده است تا بتوان لبه انباشته را پایش کرد.	
۱۶	از روش‌های تبدیل موجک و الگوریتم یادگیری عمیق برای پایش وضعیت فرآیند فرزکاری استفاده شده است.	
۱۷	از جدول شوارت و روش سطح پاسخ برای پایش و بهینه‌سازی فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی به‌صورت آماری استفاده شده است.	
۱۸	در این پژوهش از روش تحلیل طیف تکینگی برای تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی جهت پایش وضعیت فرآیند ماشینکاری استفاده شده است.	
۱۹	در این پژوهش مکانیزم تشکیل براده در حین ماشینکاری آلیاژهای تیتانیوم گزارش شده‌اند.	
۲۰	در این مقاله، مکانیزم تشکیل براده در فرآیند ماشینکاری استیل بررسی و گزارش شده است.	
۲۱	در این پژوهش تشکیل براده در فرآیند فرزکاری با ابزار تک لبه مورد بررسی قرار گرفته است و شبیه‌سازی المان محدود نیز انجام شده است.	
۲۲	در این پژوهش مکانیزم تشکیل براده در براده برداری کریستال‌های پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات که در ساخت لیزر کاربرد دارند، مورد بررسی قرار گرفته است.	

بنابراین در این پژوهش تلاش شده است تا روش‌های پایش وضعیت در فرآیندهای ماشینکاری، از اتکا به تحلیل‌های مبتنی بر همبستگی به استدلال‌های مبتنی بر روابط علی هدایت شوند. حس‌گرهای پایش وضعیت باید ارزان و قابل‌اعتماد باشند و به‌راحتی قابلیت نصب بر روی ماشین‌ابزار را داشته باشند. این حس‌گرها باید کمیت‌هایی را اندازه‌گیری کنند که به‌خوبی فرآیند ماشینکاری را توصیف نماید. در این مقاله، حس‌گر صوتی برای پایش وضعیت فرآیند تراشکاری که عمومی‌ترین فرآیند ماشینکاری می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است و طی آن سه منبع ایجاد صوت مجزا در ناحیه‌ی برش مورد بررسی قرار گرفته است. منابع ذکرشده شامل مکانیزم‌های تولید صوت با منشأ ارتعاشات ابزار، تغییر شکل در قطعه کار و ارتعاشات در سطوح تماس (اصطکاک) می‌باشند که هر یک به‌طور جداگانه بررسی و مدل‌سازی شده‌اند. سپس محدوده‌ی فرکانسی صوت ایجادشده از طریق هر یک از این فرآیندها محاسبه، و نشان داده شده است که این بازه‌ها از یکدیگر فاصله‌دارند. پس‌از آن با بررسی نقاط ضعف و قوت هر یک از مکانیزم‌های پیشنهادشده، یک مکانیزم

که برای پایش ابزار مناسب‌تر باشد انتخاب شده است. با بررسی عمیق ارتباط بین آن مکانیزم تولید صوت و فرآیند تشکیل براده حین ماشینکاری و درک بهتری از فرآیند ماشینکاری ایجاد شده است به‌طوری‌که می‌تواند ابزاری مناسب برای پژوهشگران، برای مدل‌سازی فرآیند ماشینکاری و یا پایش وضعیت این فرآیند باشد. مدل‌های جعبه سفید، نوعی از مدل‌ها هستند که به‌روشنی نحوه‌ی عملکرد سیستم را توضیح می‌دهند و می‌توانند بر مبنای متغیرهای تأثیرگذار، پیش‌بینی نمایند. از سوی دیگر، مدل‌های جعبه سیاه، به‌طور ذاتی بسیار غیرخطی می‌باشند و به دلیل فقدان تفسیر فیزیکی، تبیین‌پذیری کمتری دارند. یک مدل جعبه سیاه قادر نیست تبیین نماید که یک سیستم به چه نحوی عمل می‌کند و علاوه بر آن، هر کاربردی که بر مبنای مدل جعبه سیاه توسعه یابد، نمی‌تواند قابل‌اعتماد و قطعی باشد. اما در ازای تفسیرپذیری کمتر، مدل‌های جعبه سیاه پیاده‌سازی راحت‌تری دارند. در صورتی‌که متغیرهای تأثیرگذار اصلی تعیین نشده باشند و رفتار سامانه با توجه به تغییرات در این متغیرهای مدل نشده

با توجه به مدل نشان داده شده در شکل ۱، دستگاه معادلات حرکت برای سیستم جرم بر روی تسمه به صورت زیر خواهد بود.

$$m\ddot{x} + C_x\dot{x} + K_x x = F_{cutting-x} + F_{contact-x} \quad (1)$$

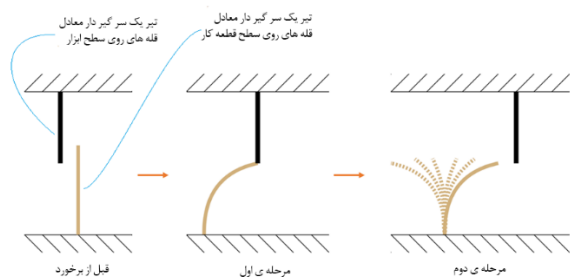
$$m\ddot{y} + C_y\dot{y} + K_y y = F_{cutting-y} + F_{contact-y} \quad (2)$$

که در روابط ۱ و ۲  $m$  جرم نگه‌دارنده‌ی ابزار برش،  $K_x$  و  $K_y$  ضرایب سختی فنر معادل،  $C_x$  و  $C_y$  ضرایب میرایی معادل،  $F_{cutting-x}$  و  $F_{cutting-y}$  مؤلفه‌های نیروی برشی برای ابزار تیز و  $F_{contact-x}$  و  $F_{contact-y}$  مؤلفه‌های نیروی تماسی می‌باشند.

پاسخ این مدل، فضای حالت ساده‌سازی شده‌ی جرم بر روی تسمه توسط [23] شبیه‌سازی شده‌اند و نتایج آن نشان می‌دهد فرکانس ارتعاش نگه‌دارنده‌ی ابزار کمتر از ۱۰ هرتز است. بنابراین، بخشی از مؤلفه‌های فرکانس پایین صدای تولید شده در فرآیند ماشین‌کاری از ارتعاشات نگه‌دارنده ابزار نشأت می‌گیرد که می‌تواند از حد شنوایی پایین گوش انسان، پایین‌تر باشد.

### ۲-۲- ارتعاشات در ناحیه‌ی تماس ابزار و قطعه کار

اصطکاک کلمب در ناحیه‌ی تماس ابزار و قطعه کار یکی دیگر از منابع تولید صوت در فرآیند براده برداری می‌باشد. با فرض کردن سرعت برشی ثابت و استحکام بالا برای ابزار برشی، ناحیه‌ی تماس می‌تواند همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است توصیف شود.



شکل ۲) مدل دو درجه آزادی برای نگه‌دارنده ابزار

با توجه به استحکام تسلیم بالای ابزار برش، تغییر شکل در قله‌های مربوط به سطح ابزار (تیر یک‌سرگیردار مشکی در شکل ۲) نادیده گرفته شده است. بنابراین، تغییر شکل در هر قله‌ی دلخواه در سطح قطعه کار می‌تواند به دو بخش تقسیم گردد. در بخش اول، به دلیل سرعت نسبی ثابت بین ابزار برش و قطعه کار، تغییر شکل اجباری پلاستیک و الاستیک اجباری اتفاق می‌افتد. سپس در بخش دوم، به محض عبور قله‌ها از یکدیگر، قله‌ی مربوط به سطح قطعه کار دچار ارتعاشات آزاد خواهد شد. بخش اول به سرعت برشی و صافی سطح بستگی دارد. در یک فرآیند تراشکاری با سرعت برشی ۲/۱ متر بر ثانیه و بیشینه ۲ میکرومتر انحراف در نوک قله، تغییر شکل پلاستیک قله با فرکانسی نزدیک به ۱ مگاهرتز اتفاق می‌افتد. با فرض کردن قله‌های روی سطح قطعه کار به‌عنوان تیرهای یک‌سرگیردار، بیشینه‌ی خیز این تیر تحت نیروی  $F$  معادل خواهد بود با:

باشد، هر نویز محیطی و یا هر ورودی رندم می‌تواند خطا و عیب در آموزش و تصمیم‌گیری، ایجاد کند. اما مدل جعبه سفید با استفاده از شفافیت ذاتی خود، بازنمایی سامانه را برای تصمیم‌گیری‌های داده محور قابل‌انکا می‌نماید.

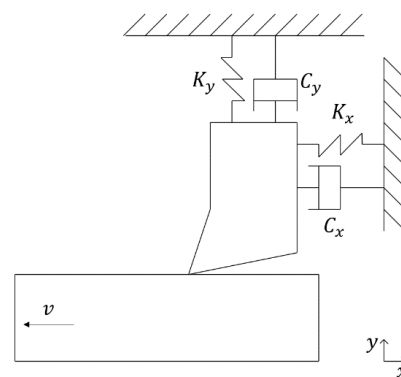
علاوه بر این، مدل‌های جعبه سفید، با پیش‌بینی به‌وسیله‌ی متغیرهای تأثیرگذار، فرآیند پیش‌بینی را کاملاً قابل وصف می‌نمایند. این موضوع زمانی که مدل ارائه شده، برای پیش فرآیند ماشین‌کاری باشد حائز اهمیت ویژه‌ای می‌شود، چراکه به‌طور مستقیم به هزینه‌ی تولید و کیفیت قطعات مرتبط است. همچنین در هر روش پیش لازم است برخی ویژگی‌ها، به‌عنوان شاخص‌های بحرانی برای سامانه تصمیم‌گیری استفاده شوند و توصیف‌پذیر بودن و قابل تفسیر بودن این ویژگی‌ها بسیار مهم است. لازمه‌ی توصیف‌پذیری این ویژگی‌ها، توسعه‌ی یک مدل جعبه سفید است. در این مقاله، مطالعه دقیقی برای توصیف فرآیند تراشکاری و مکانیزم‌های تولید صوت در حین فرآیند صورت گرفته است و یک مدل جعبه سفید بر مبنای روابط ریاضی ارائه شده است.

### ۲-۲- مکانیزم‌های تولید صوت در فرآیند تراشکاری

تشکیل براده در ماشین‌کاری یک مکانیزم پیچیده است که از تغییر شکل قطعه‌ی کار و ارتعاشات آزاد و اجباری در ناحیه‌ی تماس ابزار و قطعه کار تشکیل می‌شود که این ارتعاشات همان مدل دینامیکی از اصطکاک کلمب هستند. همچنین با در نظر گرفتن نگه‌دارنده ابزار به‌عنوان یک تیر یک‌سرگیردار، ارتعاشات ابزار نیز می‌تواند موج صوتی ایجاد نماید. بنابراین، منابع ایجاد صوت در تشکیل براده و برش فلزات می‌تواند به ارتعاشات نگه‌دارنده‌ی ابزار، ارتعاشات در محل تماس ابزار و قطعه کار و تغییر شکل فلز دسته‌بندی شود.

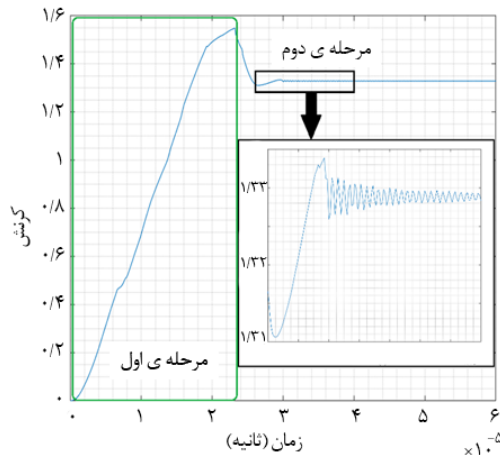
### ۲-۱- ارتعاشات نگه‌دارنده ابزار

نوسان و ارتعاش در نگه‌دارنده‌ی ابزار به‌عنوان یک سیستم جرم بر روی تسمه دو درجه آزادی مدل شده است [23] که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) مدل دو درجه آزادی برای نگه‌دارنده ابزار

کرنش در بالاترین نقطه‌ی قله‌ی مربوط به سطح قطعه کار در شکل ۴ نشان داده شده است.

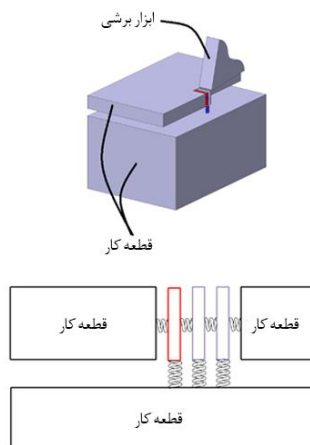


شکل ۴) کرنش در بالاترین نقطه‌ی قله‌ی مربوط به سطح قطعه کار

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که فرکانس تغییر شکل در مکانیزم اصطکاک کلمب صوت با فرکانس در محدوده‌ی مگاهرتز ایجاد می‌کند و بخش دوم ارتعاش تأثیر ناچیزی دارد که قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین نتایج شبیه‌سازی، یافته‌های تئوری را تأیید می‌نماید.

### ۳-۲- تولید صوت با منشأ تغییر شکل در قطعه کار

رفتار نوسانی در تغییر شکل ایجادشده در قطعه کار و ابزار برش نیز منجر به تولید صوت می‌شود. از طرفی تغییر شکل قطعه کار، نقش اساسی در انرژی مصرف‌شده در حین تشکیل براده بازی می‌کند. وجود تغییر شکل‌های بزرگ و جریان مواد در فرآیند براده برداری نشان داده شده است [24]. بررسی دقیق‌تر و ارائه‌ی مدلی جهت توصیف این تغییر شکل‌ها به بیان ارتعاشی، می‌تواند منجر به شناسایی دقیق مکانیزم تولید صوت با منشأ تغییر شکل در قطعه کار شود. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، برای مدل‌سازی این پدیده سیستم فنر معادل پیشنهادشده است.



شکل ۵) سیستم فنر معادل پیشنهادی برای توصیف صوت تولیدشده در تغییر شکل قطعه کار

$$\delta_{max} = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $l$  طول تیر یک‌سرگیردار،  $E$  مدول الاستیک و  $I$  ممان دوم سطح حول محور محول خنثی است. بنابراین، با در نظر گرفتن یک رابطه‌ی خطی بین نیرو و جابه‌جایی، ضریب سختی معادل تیر یک‌سرگیردار معادل است با:

$$F = K\delta_{max} \quad (4)$$

$$\Rightarrow F = K \frac{Fl^3}{3EI} \quad (5)$$

$$\Rightarrow K = \frac{3EI}{l^3} \quad (6)$$

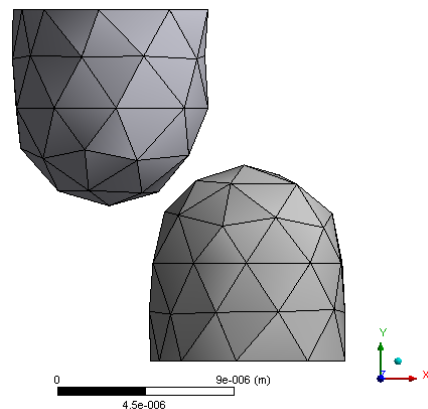
بنابراین با صرف‌نظر کردن از ضریب میرایی، معادله‌ی حرکت تیر یک‌سرگیردار برابر است با:

$$J\ddot{\theta} + Kl^2\theta = u \quad (7)$$

که در رابطه‌ی (۷)،  $u$  گشتاور خارجی است. بنابراین با در نظر گرفتن هر قله به صورت یک مکعب با ارتفاع  $l$ ، فرکانس طبیعی قله روی سطح قطعه کار برابر است با:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{Kl^2}{J}} = \sqrt{\frac{3E}{4 \times \rho \times l}} \quad (8)$$

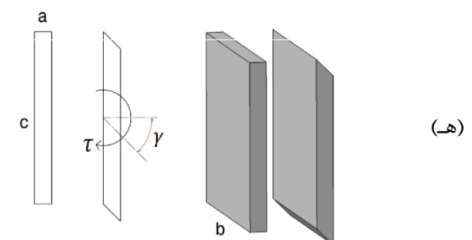
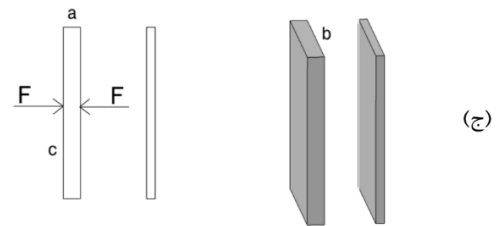
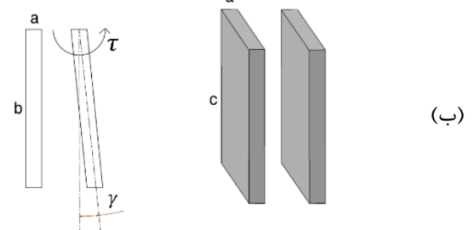
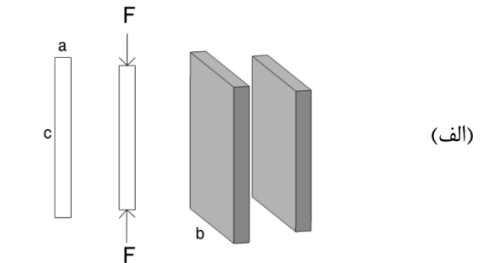
که در رابطه‌ی ۸،  $\rho$  نمایانگر چگالی قطعه کار می‌باشد. با فرض ارتفاع ۱۰ میکرون برای قله و با در نظر گرفتن جنس st37 برای قطعه کار، فرکانس طبیعی در این بخش از ارتعاش در ناحیه‌ی تماس قطعه کار و ابزار برابر با ۱۳ مگاهرتز خواهد بود. به بیان دیگر، در صفحات پهلو و براده یک صوت ۱ مگاهرتزی به دلیل تغییر شکل پلاستیک ایجاد می‌شود و صوتی با فرکانسی ۱۰ برابر بیشتر به دلیل تغییر شکل الاستیکی و ارتعاش آزاد ایجاد می‌شود. به دلیل اینکه اندازه‌ی تغییر شکل پلاستیکی در مقایسه با تغییر شکل الاستیک بسیار بیشتر است، فرکانس غالب در تولید صوت در قالب مکانیزم اصطکاک کلمب در محدوده‌ی فرکانسی ۱ مگاهرتز می‌باشد. به منظور صحت‌گذاری بررسی‌های فوق تغییر شکل و ارتعاشات قله‌ها در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده است. هندسه‌ی برخورد قله‌های روی سطح ابزار برش و قطعه کار در ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳) هندسه برخورد قله‌های روی سطح ابزار برش و قطعه کار

در این سیستم، هر المان (به عنوان مثال المان قرمز در شکل ۵) در معرض نیروهای فنر متعددی قرار دارد که در ادامه بررسی شده است.

الف) اعمال نیروی فشاری به المان در راستای عمودی (شکل ۶-الف). با در نظر گرفتن المان به عنوان فنر، داریم:



شکل ۶) نیروهای اعمال شده به هر المان دلخواه الف) نیروی فشاری در راستای عمودی ب) تغییر شکل عرضی ج) نیروی فشاری در راستای عرضی د) تغییر شکل عمودی المان در صفحه bc ه) تغییر شکل عمودی المان در صفحه ac

$$F = K_{cv}\Delta c \quad (۹)$$

از سویی دیگر، رابطه‌ی تنش-کرنش برای این المان برابر است با:

$$\frac{F}{A_1} = \sigma = E\epsilon = E \frac{\Delta c}{c} \quad (۱۰)$$

که در رابطه‌ی ۱۰،  $\sigma$  تنش،  $\epsilon$  کرنش و  $E$  مودول یانگ می‌باشد. با مقایسه‌ی رابطه‌های ۹ و ۱۰ داریم:

$$A_1 E \frac{\Delta c}{c} = K_{cv}\Delta c \quad (۱۱)$$

بنابراین:

$$K_{cv} = \frac{A_1 E}{c} \quad (۱۲)$$

ب) تغییر شکل عرضی (شکل ۶-ب). با فرض یک تغییر شکل  $\gamma$  در المان، رابطه‌ی تنش-کرنش برابر خواهد بود با:

$$\frac{F}{A_2} = \tau = G\gamma \quad (۱۳)$$

از سوی دیگر، تغییر شکل  $\gamma$  منجر به جابه‌جایی عرضی  $b \times \gamma$  در سطح المان می‌شود. بنابراین، نیروی معادل در سطح برابر خواهد بود با:

$$F = K_{dl} b \gamma \quad (۱۴)$$

با ترکیب روابط (۱۳) و (۱۴) ضریب سختی معادل فنر برابر خواهد بود با:

$$K_{dl} = \frac{G A_2}{b} \quad (۱۵)$$

ج) نیروی فشاری در راستای عرضی بر روی المان (شکل ۶-ج). در این شرایط، ضریب سختی معادل می‌تواند همانند روش ارائه‌شده برای حالت الف (نیروی فشاری در راستای عمودی) محاسبه شود. بنابراین:

$$K_{cl} = \frac{A_2 E}{a} \quad (۱۶)$$

د) تغییر شکل عمودی المان در صفحه bc (شکل ۶-د). همانند تغییر شکل عرضی، ضریب سختی معادل برابر است با:

$$K_{dcb} = \frac{G A_3}{b} \quad (۱۷)$$

ه) تغییر شکل عمودی المان در صفحه ac (شکل ۶-ه). مجدداً همانند تغییر شکل عرضی، ضریب سختی معادل برابر است با:

$$K_{dca} = \frac{G A_2}{a} \quad (۱۸)$$

که در آن:

$$A_1 = ab ; A_2 = bc ; A_3 = ac \quad (۱۹)$$

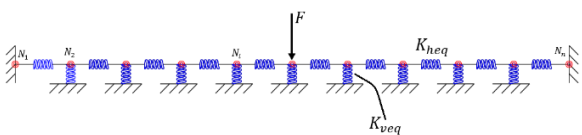
در رابطه‌ی ۱۸،  $G$  مودول برشی است. بنابراین، ضریب سختی برای فنر عمودی معادل برابر است با:

$$K_{veq} = K_{cv} + K_{dcb} + K_{dca} = \frac{A_1 E}{c} + \frac{G A_3}{b} + \frac{G A_2}{a} \quad (۲۰)$$

و ضریب سختی برای فنر افقی معادل برابر است با:

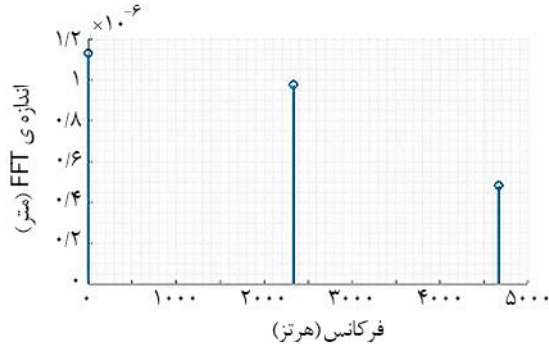
$$K_{heq} = K_{cl} + K_{dl} = \frac{A_2 E}{a} + \frac{G A_2}{b} \quad (۲۱)$$

در شکل ۷، بازنمایی شماتیک مسئله المان محدود نشان داده شده است.



شکل ۷) بازنمایی شماتیک مسئله المان محدود

با در نظر گرفتن سرعت برشی، تبدیل فوریه سریع صوت ایجادشده از طریق تغییر شکل نشان داده شده در شکل ۹، در شکل ۱۰ رسم شده است. بنابراین انتظار می‌رود هر داده‌ی صوتی که از فرآیند تراشکاری با شرایط شرح داده‌شده دریافت شود، دارای فرکانس غالبی برابر با  $2/3$  کیلوهرتز باشد.



شکل ۱۰) تبدیل فوریه سریع صوت ایجادشده از طریق تغییر شکل نشان داده شده در شکل ۹

هر تغییری در شرایط ابزار براده برداری منجر به عوض شدن پیشینه‌ی تغییر شکل در ناحیه‌ی بررسی شده خواهد شد. بنابراین انتظار می‌رود، یک ابزار برشی دارای فرسایش، در شرایط سرعت برشی و جنس ماده قطعه کار یکسان، منجر به دامنه‌ی صوتی بلندتری در فرکانس ذکرشده گردد. بنابراین، مقایسه و تحلیل دامنه‌ی صوت در این فرکانس، می‌تواند به یک معیار تشخیص خطای مناسب و قابل اطمینان منتج شود. علاوه بر این، با بررسی مجدد مسئله و فرمول‌بندی آن که پیش‌تر ارائه شده است، بدیهی است که فرکانس غالب، با سرعت برشی متناسب است.

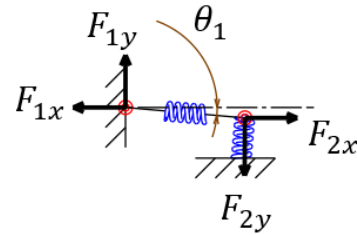
فرکانس صوتی که از طریق مکانیزم تغییر شکل در قطعه کار تولید می‌شود به سرعت برشی و جنس قطعه کار وابسته است و اندازه‌ی سیگنال در آن فرکانس، به میزان فرسایش ابزار مرتبط است. این فرکانس با روش ارائه‌شده در این مقاله به‌صورت تحلیلی قابل محاسبه است.

### ۳- انتخاب مکانیزم تولید صوت مؤثر با رویکرد شناسایی

#### عیب

در این مقاله تاکنون سه مکانیزم اصلی تولید صوت بررسی شده‌اند و برای هر یک از آنها، روش مناسب برای مدل‌سازی و تشخیص فرکانس‌های غالب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده شده است، محدوده‌ی فرکانسی هر یک از این مکانیزم‌ها باهم اختلاف زیادی دارد و دارای هم‌پوشانی نمی‌باشد. از طرفی در تحلیل داده‌های صوتی در فرآیند ماشین‌کاری لازم است مکانیزمی انتخاب شود که علاوه بر اینکه اطلاعات غنی از فرآیند در اختیار قرار می‌دهد، قابلیت پیاده‌سازی برخط را نیز دارا باشد. پس از انتخاب مکانیزم مناسب لازم است تا متناسب با محدوده‌ی فرکانسی آن، حس‌گر مناسب نیز تهیه شود.

با توجه به دیاگرام آزاد نشان داده‌شده در شکل ۸، و با برقراری تعادل در راستاهای طولی، عرضی و دورانی، روابط زیر استخراج شده‌اند:



شکل ۸) دیاگرام آزاد المان دلخواه

$$F_{1y} + F_{ny} = F \quad (22)$$

$$F_{2y} - F_{2x} \sin(\theta_1) = K_{veq} \times \sin(\theta_1) \times \frac{L}{n-1} \quad (23)$$

$$F_{1y} = F_{2y} = F_{iy} \quad (24)$$

$$F_{1x} = F_{2x} = F_{ix} \quad (25)$$

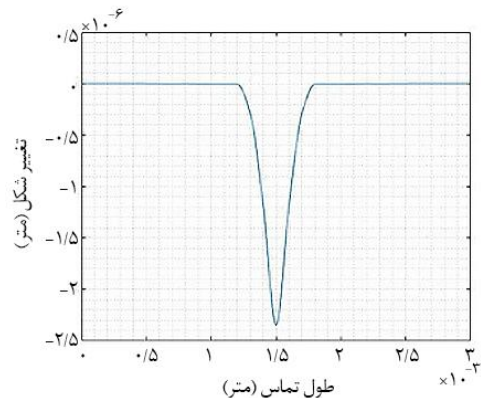
$$F_{2x} \times \frac{L}{n-1} \times \sin(\theta_1) = F_{2y} \frac{L}{n-1} \times \cos(\theta_1) \quad (26)$$

$$F_{2x} + F_{2y} \sin(\theta_1) = K_{heq} \times (1 - \cos(\theta_1)) \times \frac{L}{n-1} \quad (27)$$

در این مدل ارائه‌شده، فرض شده است که نود میانی تحت تغییر شکل پلاستیک خواهد رفت و از معیار تسلیم ترسکا برای تعیین نیروی موردنیاز استفاده شده است. رابطه‌ی (۲۸)، کمترین تنش برشی که منجر به تغییر شکل پلاستیک در نود میانی می‌شود را نشان می‌دهد.

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{\sigma_y}{2} \quad (28)$$

در رابطه‌ی ۲۸،  $\sigma_x$  تنش ایجادشده توسط فنر معادل افقی می‌باشد و  $\tau_{xy}$  مقدار تنشی است از طریق فنر معادل عمودی ایجاد شده است. همچنین  $\sigma_y$  استحکام تسلیم است. برای یک قطعه با جنس st37 و تحت شرایط تراشکاری با سرعت برشی  $2/1$  متر بر ثانیه و عمق برش  $1$  میلی‌متر، مدل ارائه‌شده محاسبه و نتیجه‌ی شبیه‌سازی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹) تغییر شکل در ناحیه‌ی تماس برای یک قطعه با جنس st37 و تحت شرایط تراشکاری با سرعت برشی  $2/1$  متر بر ثانیه و عمق برش  $1$  میلی‌متر

جهت اندازه‌گیری سیگنال صوتی، از یک حس‌گر صوتی مبتنی بر حسگر پیزوالکتریک استفاده شده است که خروجی آن به صورت آنالوگ می‌باشد. برای جلوگیری از خطای دگرنامی، فرکانس داده‌برداری ۵۰ کیلوهرتز تعریف شده است. حس‌گر موردنظر بر روی ابزار تعبیه شده است تا همواره فاصله‌ی آن از محل براده‌برداری یکسان باقی بماند. جهت بررسی کارایی این روش در شرایط مختلف، آزمایش‌هایی با متغیرهای مستقل سرعت برشی، سرعت پیش روی و وضعیت ابزار تعریف شده است. هر یک از این متغیرهای مستقل در دو وضعیت متفاوت تعریف شده‌اند و به این ترتیب ۸ آزمایش طراحی شده است. با توجه به [25] مقادیر مناسب برای پارامترهای ماشین‌کاری در این آزمایش‌ها انتخاب شده‌اند. شرایط تراشکاری در هر یک از آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. در کلیه این آزمایش‌ها، قطعه کار دارای قطر ۴ سانتی‌متر می‌باشد و از ابزار مدل DNMG 15 06 04 ساخت شرکت SANDVIK استفاده شده است.

جدول ۲) شرایط تراشکاری

شماره آزمایش	سرعت دورانی اسپیندل (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دور)	وضعیت ابزار
آزمایش ۱	۱۰۰۰	۰/۰۹	ابزار تیز
آزمایش ۲	۱۰۰۰	۰/۱۸	ابزار تیز
آزمایش ۳	۳۵۵	۰/۰۹	ابزار تیز
آزمایش ۴	۳۵۵	۰/۱۸	ابزار تیز
آزمایش ۵	۱۰۰۰	۰/۰۹	ابزار دارای فرسایش
آزمایش ۶	۱۰۰۰	۰/۱۸	ابزار دارای فرسایش
آزمایش ۷	۳۵۵	۰/۰۹	ابزار دارای فرسایش
آزمایش ۸	۳۵۵	۰/۱۸	ابزار دارای فرسایش

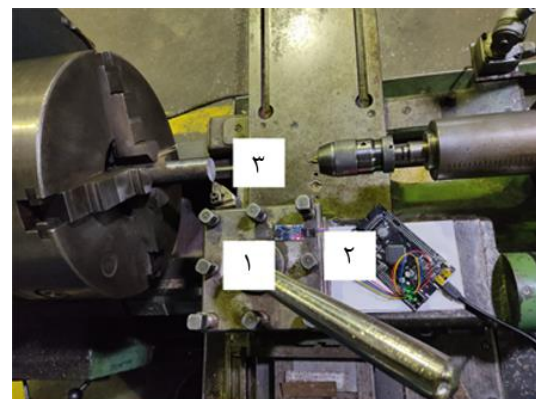
برای ارزیابی روش تئوری پیشنهاد شده و مدل ارائه شده به صورت تجربی، سایش دیواره جانبی که متداول‌ترین نوع مکانیزم سایش ابزار در تراشکاری و شروع‌کننده برخی دیگر از انواع سایش‌ها می‌باشد، بررسی شده است. این نوع از سایش ابزار، به صورت پیش‌رونده‌ایی لبه‌ی برنده را مورد سایش قرار می‌دهد. معمولاً منطقه‌ی ساییده شده، الگوی یکنواختی بر روی لبه‌ی برنده دارد و در حقیقت ابعاد هندسی ابزار را تغییر می‌دهد. در حین فرآیند ماشین‌کاری، وجود این نوع سایش، باعث افزایش قابل‌توجه حرارت و آسیب بیش‌تر به ابزار و قطعه‌کار می‌شود. حدود ابعاد در نظر گرفته شده برای این نوع سایش مطابق با نتایج ارائه شده در [26] انتخاب شده است. وضعیت ابزار در شکل ۱۲ تبیین شده است.

پس از ایجاد خوردگی در ابزار دارای فرسایش، از ۵ نقطه از لبه برنده ابزار، با فواصل یکنواخت اندازه‌گیری شده است و انحراف معیار آن ۰/۰۱۳ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین این میزان انحراف معیار نشان‌دهنده کم بودن عدم یکنواختی است به طوری که می‌توان از آن صرف‌نظر نمود.

با توجه به فرکانس بسیار پایین اولین مکانیزم مورد مطالعه، یعنی ارتعاش در نگه‌دارنده‌ی ابزار، در صورت داده‌برداری در این محدوده‌ی فرکانسی، اگرچه پردازش اطلاعات با سرعت بالا قابل پیاده‌سازی است و امکان پیاده‌سازی سامانه‌های پایش عیب برخط وجود دارد، اما اطلاعات ناچیزی از فرآیند نمایان خواهد شد و به همین دلیل تشخیص عیب با ملاک قرار دادن این مکانیزم نمی‌تواند با اطمینان کافی همراه باشد. به‌عکس با توجه به فرکانس بسیار بالای دومین مکانیزم مورد مطالعه، یعنی ارتعاشات در محل تماس ابزار و قطعه کار، پردازش اطلاعات با محدودیت همراه است. با در نظر گرفتن پدیده‌ی دگرنامی، حداقل فرکانس داده‌برداری باید از دو برابر بیشینه‌ی فرکانس سیگنال بیشتر باشد. بنابراین داده‌برداری با سرعت چند مگاهرتز و پردازش آن با روش‌های پردازش سیگنال، تشخیص عیب را برای کاربردهای برخط، با چالش مواجه می‌نماید. اگرچه با توجه به فرکانس بالای سیگنال، می‌توان انتظار داشت که سیگنال دریافت شده، غنی‌تر باشند. محدوده فرکانس غالب در سومین مکانیزم تولید صوت مطالعه شده (چند کیلوهرتز)، یعنی صوت تولید شده به دلیل تغییر شکل قطعه کار، نشان می‌دهد که این صوت تولید شده توسط این مکانیزم، علاوه بر اینکه می‌تواند رفتار سیستم را به خوبی نمایان سازد، قابلیت پیاده‌سازی بالاتری نیز دارد.

#### ۴- آزمایش تجربی

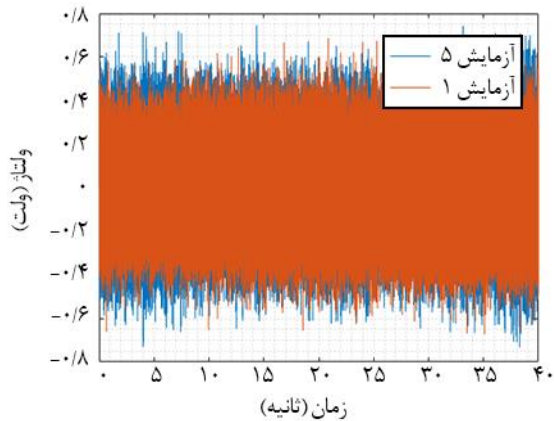
در این مقاله، منابع تولید سیگنال‌های صوتی در طی فرآیند تراشکاری بررسی و مدل‌سازی شده و مکانیزم تولید صوت به دلیل تغییر شکل قطعه کار به‌عنوان مکانیزم مؤثر در تشخیص عیب در حین فرآیند انتخاب شده است. جهت صحت‌گذاری روابط تئوری ارائه شده، مجموعه‌ای از آزمون‌های تجربی طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند. تجهیزات موردنیاز برای آزمون‌های تجربی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



۱: سنسور صدا  
۲: بورد داده برداری  
۳: قطعه و ابزار

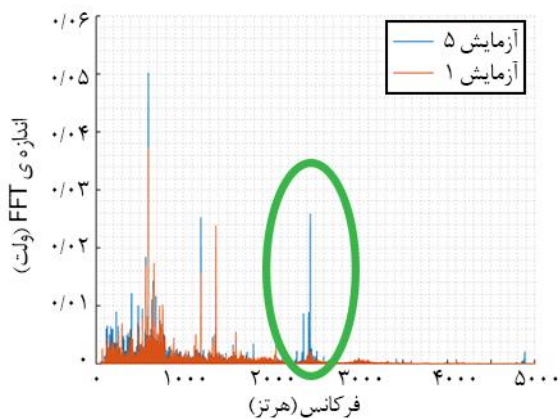
شکل (۱۱) تجهیزات موردنیاز برای آزمون‌های تجربی





شکل ۱۳) سیگنال زمانی آزمایش های ۱ و ۵

همچنین محتوای فرکانسی این سیگنال ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با مقایسه سیگنال های زمانی، یافتن رویه و یا هر ویژگی که بر مبنای آن بتوان عیب را تشخیص داد به راحتی امکان پذیر نیست و رفتار سیگنال ها در حوزه ی زمان شباهت بسیار زیادی به یکدیگر دارند. اما در حوزه ی فرکانسی مطابق با پیش بینی صورت گرفته در بخش قبل و با توجه به مدل تئوری ارائه شده، در همسایگی یک فرکانس خاص، بین دو سیگنال تفاوت معنادار وجود دارد و تأیید می کند که تغییر شکل فلز در ناحیه براده برداری با تغییر وضعیت ابزار، منجر به بروز رفتار متفاوت و در نتیجه صوتی با اندازه ی فرکانس غالب متفاوت می شود.

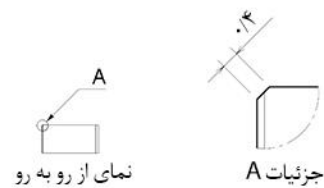


شکل ۱۴) محتوای فرکانس سیگنال های زمانی حاصل از آزمایش های ۱ و ۵

با افزایش فرسایش در ابزار به دلیل افزایش دامنه ی تغییر شکل در سطح قطعه کار، افزایش دامنه صوت در فرکانس غالب اتفاق خواهد افتاد که این موضوع نیز در مقایسه نشان داده شده در شکل ۱۴، مشاهده شده است. بنابراین فرسایش ابزار منجر به اندازه ی محتوای فرکانسی در مجاورت فرکانس غالب در مکانیزم تولید صوت به وسیله ی تغییر کل در قطعه کار، خواهد شد. با در نظر گرفتن محتوای فرکانسی آزمایش ۱ به عنوان



(الف)



(ب)

شکل ۱۲) وضعیت ابزار الف) ابزار تیز ب) ابزار دارای فرسایش

علاوه بر این همان طور که پیش تر نیز نشان داده شده است، در صورت وجود عدم یکنواختی در خوردگی ایجاد شده، اندازه ی تبدیل فوریه سریع در فرکانس غالب تغییر خواهد کرد و تأثیری بر فرکانس غالب نخواهد داشت که در این صورت شناسایی فرسایش ابزار به درستی صورت خواهد پذیرفت. خوردگی در ابزار دارای فرسایش با استفاده از سنگ زنی ایجاد شده است. برای انجام آزمایش، سایر تجهیزات و دستگاه های آزمایشگاه در حالت خاموش قرار داشته اند و قبل از انجام آزمایش شدت صوت محیط کمتر از ۴۰ دسی بل بوده است. قبل از شروع آزمایش ها، دستگاه تراش به مدت ۱۵ دقیقه در حالت بی بار روشن بوده و پس از آن یک میله با قطر ۴۵ میلی متر روتراشی شده و به قطر ۴۰ میلی متر رسانده شده است. همچنین کلیه ی آزمون ها، سه بار تکرار شده اند.

اولین آزمایش نشان داده شده در جدول ۲ به عنوان سیگنال سالم و آزمایش پنجم به عنوان سیگنال ناسالم مربوط به آزمایش ۱ با ابزار دارای فرسایش در نظر گرفته شده است. این سیگنال ها در شکل ۱۳ در حوزه ی زمان نشان داده شده اند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مکانیزم‌های متفاوت تولید صوت در طی فرآیند تراشکاری مورد بررسی قرار گرفته است و پس از مدل‌سازی و شبیه‌سازی نشان داده شده است که صوت تولیدشده از طریق مکانیزم ارتعاش نگه‌دارنده‌ی ابزار، منجر به ایجاد صوت با فرکانس پایین می‌شود. درحالی‌که در شبیه‌سازی و مدل‌سازی صوت تولید شده به دلیل ارتعاش در محل تماس ابزار و قطعه کار نشان داده شده است که دو نوع تغییر شکل پلاستیک (اجباری) و الاستیک (آزاد) اتفاق می‌افتد که هر یک در محدوده‌ی فرکانس معینی تولید صوت می‌نمایند به‌طوری‌که تغییر شکل پلاستیک در این مکانیزم منجر به تولید صوتی با فرکانس در محدوده‌ی یک مگاهرتز و با دامنه‌ی بالاتر و تغییر شکل الاستیک در این مکانیزم باعث تولید صوت با فرکانس در محدوده‌ی ده مگاهرتز و دامنه‌ی کوچک‌تر می‌شود. اما صوت ایجادشده از طرق تغییر شکل در قطعه کار، یک سیگنال با فرکانس متوسط تولید می‌نماید که یک مدل ریاضی برای توصیف و تبیین آن ارائه شده است. با استفاده از این مدل مشخص شده است که فرکانس سیگنال‌های صوتی ناشی از این مکانیزم در محدوده‌ی چند کیلوهرتز قرار می‌گیرند. همچنین، نشان داده شده است که استفاده از صوت تولیدشده بر اساس مکانیزم تغییر شکل قطعه کار، می‌تواند برای تشخیص عیب و پایش وضعیت در فرآیند ماشین‌کاری مؤثرتر و کارا تر باشد.

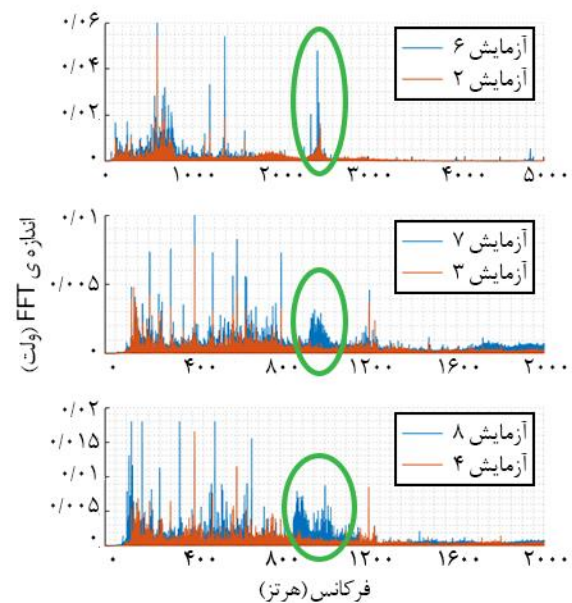
با توجه به مکانیزم انتخاب‌شده و مدل ارائه‌شده، فرکانس غالب صوت تولیدشده از طریق مکانیزم تغییر شکل قطعه کار محاسبه شده است. برای این منظور، یک مدل ریاضی ارائه شده است که طی آن صوت تولیدشده از طریق تغییر شکل قطعه کار تبیین شده است. جهت ارزیابی روش تئوری ارائه‌شده از طریق آزمون‌های تجربی، سیگنال‌های صوتی در شرایط تراشکاری متفاوت اندازه‌گیری و ذخیره و سیگنال‌های حوزه‌ی زمانی به سیگنال‌های حوزه‌ی فرکانس تبدیل شده‌اند. سپس فرکانس‌های غالب که تغییرات شرایط ماشین‌کاری را نشان می‌دهند استخراج شده‌اند. آزمون‌های صورت گرفته، کارایی و دقت روش تئوری ارائه‌شده را نشان داده‌اند.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان تعهد می‌نمایند که نتایج علمی بیان شده حاصل فعالیت‌های پژوهشگران مقاله می‌باشد.

**تعارض منافع:** نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافی بین هر یک از عوامل مشارکت‌کننده در تولید این مقاله وجود ندارد.

**منابع مالی:** تأمین هزینه‌های این پژوهش توسط دانشگاه صنعتی امیرکبیر و پژوهشگران صورت گرفته است.

سیگنال سالم، محتوای فرکانسی آزمایش شماره ۵ در مجاورت فرکانس ۲/۵ کیلوهرتز، فرسایش ابزار را نشان می‌دهد. در بخش قبلی با توجه به شرایط ماشین‌کاری ذکرشده برای آزمایش‌های ۱ و ۵ نشان داده شده است که فرکانس غالب برای جنس قطعه کار st37 برابر با ۲/۳ کیلوهرتز خواهد بود. بنابراین نتایج تجربی مطابقت مناسبی با پیش‌بینی تئوری نشان داده‌اند. همچنین با توجه به سرعت برشی در آزمایش‌های ۳ و ۷، فرکانس غالب در صوت ایجادشده توسط مکانیزم تغییر شکل در قطعه کار باید در مجاورت ۸۱۵ هرتز باشد. نتایج داده‌های تجربی برای سیگنال‌های سالم و معیوب برای آزمون‌های ۲ تا ۴ و ۶ تا ۸ در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵) نتایج داده‌های تجربی برای سیگنال‌های سالم و معیوب برای آزمون‌های ۲ تا ۴ و ۶ تا ۸

در آزمایش‌های ۱ و ۵، آزمایش‌های ۲ و ۶، آزمایش‌های ۳ و ۷ و آزمایش‌های ۴ و ۸ خطای پیش‌بینی محل وقوع فرکانسی که در آن اندازه‌ی مقدار تبدیل فوری‌ی سریع آزمونی که با ابزار تیز انجام شده و آزمونی که با ابزار دارای فرسایش انجام شده است، اختلاف فراوانی داشته باشد، بین روش تئوری پیشنهادشده در این مقاله و آزمون‌های تجربی، به ترتیب ۹، ۱۳، ۱۰ و ۱۷ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌های تجربی مطابقت مناسبی با مدل تئوری ارائه‌شده نشان می‌دهند و فرکانس‌های غالبی که در مدل تئوری پیش‌بینی شده بودند، در آزمایش‌های تجربی نیز تأیید شده‌اند. بنابراین با استفاده از این روش، ابزار مناسبی برای پایش وضعیت فرآیند ماشین‌کاری فراهم شده است به‌طوری‌که در پایش وضعیت، محدوده‌ی فرکانسی‌ای که بررسی می‌شود اولاً مشخص است و ثانیاً دارای تعبیر فیزیکی است و می‌توان به‌عنوان مدل جعبه سفید اقدام به شناسایی عیوب نمود.

- 15- Ahmed YS, Arif AF, Veldhuis SC. Application of the wavelet transform to acoustic emission signals for built-up edge monitoring in stainless steel machining. *Measurement*. 2020 Mar; 154:107478.
- 16- Mohanraj T, Yerchuru J, Krishnan H, Aravind RN, Yameni R. Development of tool condition monitoring system in end milling process using wavelet features and Hoelder's exponent with machine learning algorithms. *Measurement*. 2021 Mar; 173:108671.
- 17- Maged A, Haridy S, Shamsuzzaman M, Alsyouf I, Zaied R. Statistical monitoring and optimization of electrochemical machining using Shewhart Charts and response surface methodology. *International journal of engineering materials and manufacture*. 2018 Jun; 3(2):68-77.
- 18- Alonso FJ, Salgado DR. Analysis of the structure of vibration signals for tool wear detection. *Mechanical systems and signal processing*. 2008 Apr; 22(3):735-48.
- 19- Komanduri R, Von Turkovich BF. New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys. *Wear*. 1981 Jun; 69(2):179-88.
- 20- Shaw MC, Vyas A. The mechanism of chip formation with hard turning steel. *CIRP Annals*. 1998 Jan; 47(1):77-82.
- 21- Che J, Wang H, Zhang Y, Liu Y, Du M, Ma S. Experimental and numerical studies on chip formation mechanism and working performance of the milling tool with single abrasive grain. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020 Dec; 195:107645.
- 22- Liu Q, Liao Z, Cheng J, Xu D, Chen M. Mechanism of chip formation and surface-defects in orthogonal cutting of soft-brittle potassium dihydrogen phosphate crystals. *Materials & Design*. 2021 Jan; 198:109327.
- 23- Siddhpura A, Paurobally R. A study of the effects of friction on flank wear and the role of friction in tool wear monitoring. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2012 Jan; 10(2):141-56.
- 24- Guo Y, Compton WD, Chandrasekar S. In situ analysis of flow dynamics and deformation fields in cutting and sliding of metals. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015 Jun; 471(2178):20150194.
- 25- Kuntoğlu M, Sağlam H. Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning. *Measurement*. 2019 Jul; 140:427-36.
- 26- Priarone PC, Robiglio M, Settineri L, Tebaldo V. Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication. *Procedia Cirp*. 2014 Jan; 24:62-7.
- 1- Kovač P, Mankova I, Gostimirović M, Sekulić M, Savković B. A review of machining monitoring systems. *Journal of production engineering*. 2011;14(1):1-6.
- 2- WU D. Research on Thermal Monitoring for Finish Machining of Near Net Shape Parts (Doctoral dissertation, 室蘭工業大学 (Muroran Institute of Technology)).
- 3- Nasir V, Cool J, Sassani F. Intelligent machining monitoring using sound signal processed with the wavelet method and a self-organizing neural network. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019 Jul; 4(4):3449-56.
- 4- Plaza EG, López PN, González EB. Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019 Aug 1;44:145-57.
- 5- Ahmad MA, Nuawi MZ, Abdullah S, Wahid Z, Karim Z, Dirhamsyah MJ. Development of tool wear machining monitoring using novel statistical analysis method, I-kaz™. *Procedia Engineering*. 2015 Jan; 101:355-62.
- 6- Inasaki I. Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. *Ultrasonics*. 1998 Feb; 36(1-5):273-81.
- 7- Oliveira TL, Zitoune R, Ancelotti Jr AC, da Cunha Jr SS. Smart machining: Monitoring of CFRP Milling using AE and IR. *Composite Structures*. 2020 Oct; 249:112611.
- 8- Bombiński S, Kossakowska J, Jemielniak K. Detection of accelerated tool wear in turning. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022 Jan; 162:108021.
- 9- Ong P, Lee WK, Lau RJ. Tool condition monitoring in CNC end milling using wavelet neural network based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Sep;104(1):1369-79.
- 10- Lee WJ, Wu H, Yun H, Kim H, Jun MB, Sutherland JW. Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data. *Procedia Cirp*. 2019 Jan; 80:506-11.
- 11- Chen SL, Jen YW. Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling machining. *International journal of machine tools and manufacture*. 2000 Feb; 40(3):381-400.
- 12- Kao JY, Tarn YS. A neural-network approach for the on-line monitoring of the electrical discharge machining process. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997 Sep; 69(1-3):112-9.
- 13- Serin G, Sener B, Ozbayoglu AM, Unver HO. Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Jul;109(3):953-74.
- 14- Lee CH, Jwo JS, Hsieh HY, Lin CS. An intelligent system for grinding wheel condition monitoring based on machining sound and deep learning. *IEEE Access*. 2020 Mar; 8:58279-89.