



# Simulation of Surface Profile in Internal Turning Using Acceleration Signal and Tool Insert Geometry Modelling

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Pordel A.<sup>1</sup> MSc,  
Abadi M.K.N.<sup>2</sup> PhD,  
Imani B.M.<sup>1</sup> PhD

### How to cite this article

Pordel A. Abadi M K N, Imani B M. Simulation of Surface Profile in Internal Turning Using Acceleration Signal and Tool Insert Geometry Modelling. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(6):389-402.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aerospace Engineering, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Phone: -

Fax: -

imani@um.ac.ir

### Article History

Received: December 12, 2018

Accepted: February 12, 2021

ePublished: May 21, 2021

## ABSTRACT

Although there have been many studies published in the field of simulating and predicting surface roughness of machining processes, they are chiefly related to turning and milling operations, and the number of studies concerning the internal turning process is excessively limited. Furthermore, the existing publications in this field have mostly implemented statistical approaches which not only lack generalizability, but also require a huge number of experiments. In the current research, a simulation method of surface roughness is developed by using kinematics and dynamics of the process. Despite the numerous applications of this approach in turning operations, it has not yet been used in the internal turning processes. The first stage of this approach is to measure the insert nose profile of the tool. Then, the surface profile consisting the periodical component of feed marks should get constructed. In the next step, the vibrations imposed by the long boring bar are measured by an accelerometer. In order to factor in the effect of vibration on the final profile, the recorded vibrations should then get twice integrated to attain the displacement signal and added to the periodical component of the roughness profile. Results obtained from internal turning experiments in order to validate this method revealed that the developed simulation approach has a maximum error of 19.3% in estimating roughness parameters which can be presumed as accurate enough.

**Keywords** Internal Turning, Roughness, Surface Profile, Vibrations, Simulation

## CITATION LINKS

[1] DIN4760: Form deviations; concepts; classification system [2] Prediction of surface roughness and dimensional deviation ... [3] Prediction of surface roughness and dimensional deviation of workpiece ... [4] Predicting surface roughness in machining: a review [5] Study on prediction of surface quality in machining process [6] Investigation of cutting parameter effects on surface roughness ... [7] Prediction of vibration amplitude and surface roughness ... [8] Investigation of cutting parameters effect for minimization of surface roughness ... [9] Prediction of cutting tool wear, surface roughness and vibration of work piece ... [10] Prediction of surface roughness based on machining condition and tool condition ... [11] Modeling and optimization of tool vibration and surface roughness in boring of steel using RSM, ANN and SVM [12] Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring ... [13] A study on the effects of vibrations on the surface finish ... [14] Simulation Approach for Surface Roughness Interval Prediction in Finish Turning [15] Effect of tool nose profile tolerance on surface roughness in finish turning [16] ISO I. 3685: tool-life testing with single-point turning tools [17] Determination of tool nose radii of cutting inserts using machine vision [18] Han S. Measuring displacement signal with an accelerometer [19] Real-time integration and differentiation of analog signals by means of digital filtering [20] Integrating time signals in frequency domain-Comparison with time domain integration [21] Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures [22] Notes on Autocorrelation [23] Identification of vibration level in metal cutting using undecimated wavelet transform and gray-level co-occurrence matrix texture features [24] Manufacturing Technology [25] Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems [26] A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model [27] ISO B. 15530-3: 2011: geometrical product specifications (GPS)... [28] Recent advances in separation of roughness, waviness and form [29] Fallah M. Chatter vibration control for stability improvement in deep internal turning

## شبیه‌سازی پروفیل سطح حاصل از فرآیند داخل‌تراشی به وسیله‌ی گردآوری سیگنال ارتعاشی و مدل هندسه‌ی ابزار

علی پردل MSc

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محمد کاظمی نصرآبادی PhD

استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

بهنام معتکف ایمانی \* PhD

استاد، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

در گذشته مقالات بسیار زیادی در زمینه‌ی شبیه‌سازی و پیش‌بینی زبری سطح در فرآیندهای ماشین‌کاری به خصوص تراش‌کاری و فرزکاری منتشر شده اما تعداد مقالات در مورد فرآیند داخل‌تراشی بسیار محدود بوده و همچنین پژوهش‌های موجود در این زمینه نیز اکثراً از روش‌های آماری استفاده نموده‌اند که تعمیم‌پذیری بالایی نداشته و نیاز به انجام آزمون‌های فراوانی دارند. در پژوهش پیش رو شبیه‌سازی زبری سطح در فرآیند داخل‌تراشی با استفاده از سینماتیک و دینامیک فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته که با وجود استفاده در فرآیندهای تراش‌کاری، تاکنون در مورد فرآیندهای داخل‌تراشی به کار برده نشده است. در روش ارائه شده در این پژوهش ابتدا پروفیل نوک ابزار توسط دستگاه CMM اندازه‌گیری شده و سپس از این پروفیل برای تولید سطح حاصل از سینماتیک فرآیند که مولفه تناوبی پروفیل زبری است، استفاده می‌شود. در قدم بعدی با توجه به این که در فرآیند داخل‌تراشی به دلیل طول بلند میله بورینگ ارتعاشات قابل توجهی وجود دارد، این ارتعاشات که در طول آزمایش توسط شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده به صورت جابه‌جایی ابزار نسبت به قطعه‌کار به پروفیل تناوبی زبری تشکیل شده در مرحله قبلی اضافه می‌گردد. نتایج آزمایش‌های صحت‌گذاری انجام شده نشان داده است که روش توسعه داده شده در این مقاله خطایی معادل با حداکثر ۱۹/۳٪ را برای پارامترهای زبری تولید می‌کند که با توجه به پیچیدگی‌های فراوان مبحث زبری می‌توان عملکرد روش ارائه شده در این پژوهش را مناسب و کاربردی ارزیابی نمود.

**کلیدواژه‌ها:** داخل‌تراشی، زبری، پروفیل سطح، ارتعاشات، شبیه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۴

\*نویسنده مسئول: imani@um.ac.ir

### ۱- مقدمه

رقابت شدید اقتصادی در دنیای مدرن امروز، توجه تولیدکنندگان را به ارتقای کیفیت محصولات تولیدی و همچنین قابلیت تولید، جلب کرده است. زبری سطح حاصل از یک عملیات ماشین‌کاری که در استاندارد<sup>[1]</sup> به عنوان مجموعه‌ای از انحرافات با مرتبه‌های مختلف از سطح اسمی تعریف شده، یکی از پرکاربردترین شاخص‌های کیفیت محصولات مکانیکی تولیدی می‌باشد. یک پرداخت سطح نسبتاً خوب در ارتقای ویژگی‌های عملکردی،

روان‌سازی، استحکام خستگی، مقاومت در برابر خوردگی و جذابیت زیبایی شناختی محصول بسیار موثر است<sup>[2]</sup>. از طرف دیگر پرداخت سطح بیش از حد نیاز می‌تواند هزینه بیشتری را برای تولید ایجاد کند که قابلیت تولید محصول مورد نظر را متأثر خواهد ساخت. بنابراین برای تضمین کیفیت بالای محصول و در عین حال قابلیت تولید بالای آن، بهترین استراتژی پرداخت سطح صرفاً تا مقدار مورد نیاز از طریق کنترل فرآیند می‌باشد. با این وجود زبری سطح دارای طبیعتی پیچیده و وابسته به فرآیند بوده و عوامل غیرقابل کنترل بیشماری بر آن تأثیر می‌گذارد که این موضوع دستیابی به زبری سطح مشخص را با مشکلاتی مواجه می‌سازد. برای فائق آمدن بر این مشکلات، مدل‌هایی پیشنهاد می‌شود که سعی در شبیه‌سازی شرایط در حین ماشین‌کاری داشته و روابط علت و معلولی را بین عوامل گوناگون و زبری محصول مورد نظر برقرار سازند.

توانایی شبیه‌سازی کیفیت سطح براساس متغیرهای ورودی مثل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برشی به تولیدکنندگان مزیت‌هایی به لحاظ صرفه‌جویی در هزینه، زمان چرخه کوتاه‌تر و دوباره‌کاری یا ضایعات کمتر ارائه می‌دهد. این قابلیت هم‌چنین اگر در ماشین‌های اتوماتیک قرار داده شود، می‌تواند به محصولات با کیفیت بهتر و افزایش تولید منجر شود. با در نظر گرفتن این مزیت‌ها، تحقیقات گسترده‌ای در سه دهه گذشته برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی کیفیت سطح قطعه‌کار با مجموعه‌ی داده شده‌ای از پارامترهای ماشین‌کاری و شرایط ابزار گزارش شده است<sup>[3]</sup>. مجموعه بعضی از این تحقیقات در مقاله Benardos و Vosniakos<sup>[4]</sup> گردآوری شده که در آن بیش از ۴۰ مقاله با موضوع پیش‌بینی و شبیه‌سازی زبری سطح مرور گشته‌اند. هم‌چنین یکی دیگر از مقاله‌هایی که روش‌های متفاوت در شبیه‌سازی پروفیل و زبری سطح را مرور کرده مقاله لیو<sup>[5]</sup> می‌باشد. او در ادامه نیز روش منحصر به فرد خود را معرفی کرده است. با این وجود به دلیل پیچیدگی‌های فرآیند تشکیل زبری هنوز پاسخ جامعی برای شبیه‌سازی زبری سطح در فرآیندهای ماشین‌کاری ارائه نشده است.

فرآیند بورینگ یا داخل‌تراشی ترکیبی از حرکت خطی ابزار و حرکت دورانی قطعه‌کار در داخل اسپیندل ماشین‌ابزار است. بورینگ یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین‌کاری بوده که برای افزایش قطر داخلی یک سوراخ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود اکثر مقالات نوشته شده در موضوع پیش‌بینی و شبیه‌سازی کیفیت سطح به فرآیندهای ماشین‌کاری مرسوم فرزکاری و تراش‌کاری پرداخته و پژوهش‌های بسیار محدودی این موضوع را در فرآیند داخل‌تراشی (بورینگ) مورد بررسی قرار می‌دهند. از جمله قدیمی‌ترین این پژوهش‌ها می‌توان به مقاله Beauchamp و همکارانش<sup>[6]</sup> اشاره کرد که در آن برای ارزیابی اثر شش متغیر مستقل بر زبری سطح از طراحی فول فاکتوریال (Full Factorial)

می‌آید. مزیت‌های مهم این روش نسبت به روش‌های آماری که در پژوهش‌های پیشین استفاده شده، شامل عدم نیاز به فعالیت‌های آزمایشگاهی فراوان و قابلیت تعمیم برای تمامی عملیات داخل-تراشی است. هم‌چنین به دلیل حضور ارتعاشات بسیار زیاد در فرآیند بورینگ استفاده از مدل ارتعاشات ابزار در حین عملیات ماشین‌کاری جهت شبه‌سازی پروفیل سطح حاصل می‌تواند مزیت دیگری برای این روش به شمار آید.

روش‌های شبه‌سازی مبتنی بر تئوری ماشین‌کاری که در آن‌ها مدل ارتعاشات ابزار به عنوان ورودی حضور دارد پیش از این نیز در مقالاتی برای فرآیند تراش کاری استفاده شده‌اند. به عنوان نمونه در مقاله Jang و همکارانش<sup>[12]</sup> مولفه ارتعاشی مشخصی از سیگنال ارتعاشات به پروفیل سینماتیک که به صورت مکانیکی تعریف شده است اضافه می‌گردد. هم‌چنین در مقاله Lin و Chang<sup>[13]</sup> اثر حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار در قالب فرکانس و دامنه ارتعاشات بر توپوگرافی سطح ایجاد شده توسط هندسه ابزار اعمال می‌گردد. Sung و همکارانش<sup>[14]</sup> نیز از تئوری ماشین‌کاری برای شبه‌سازی زبری سطح استفاده کرده‌اند. در روش پیشنهادی مقاله Sung پروفیل نوک ابزار با روش معرفی شده در مرجع<sup>[15]</sup> از تصاویر نوک اینسرت ابزار برشی استخراج گشته و با استفاده از آن پروفیل سطح ایده‌آل شامل اثرات به جا مانده از پیشروی، به دست می‌آید. هم‌چنین مقادیر جابه‌جایی عمودی حاصل از ارتعاشات شعاعی در حالت چتر (Chatter) نیز با انتگرال‌گیری از سیگنال سرعت که در حین عملیات ماشین‌کاری اندازه‌گیری شده، به دست آمده و در نهایت با افزودن این مقادیر به پروفیل سطح ایده‌آل حاصل از مرحله قبل پروفیل زبری سطح واقعی قابل دستیابی خواهد بود.

در مقاله حاضر برای اولین بار تئوری ماشین‌کاری جهت شبه‌سازی زبری سطح در فرآیند بورینگ به کار برده شده و از روشی مشابه با روش مقاله Sung برای این کار استفاده شده است. تفاوت‌های روش پیشنهادی با روش آن مقاله در این است که اولاً برای اندازه‌گیری سیگنال ارتعاشی در آن به جای حسگر سرعت از حسگر شتاب‌سنج استفاده شده که پهنای باند وسیع‌تری داشته و با وجود کارایی یکسان وزن بسیار کمتری دارد (بنابراین وزن حسگر تاثیر ناخواسته‌ای در سیستم نخواهد داشت) و ثانیاً انتگرال‌گیری در این روش نسبت به روش آن مقاله دارای محدودیت‌های کمتری است. استفاده از سیگنال ارتعاشی به صورت برخط (Online) در این روش شبه‌سازی، پتانسیل بالایی را جهت کاربرد در کنترل موثر میزان زبری سطح حاصل از عملیات بورینگ ایجاد می‌کند. پیاده‌سازی این روش شبه‌سازی در یک کنترلر به کاربر این امکان را می‌دهد که برای زبری حدود مشخصی تعیین نموده و در صورت تجاوز از این حدود، کنترلر با تنظیم پارامترهای برشی زبری سطح را به محدوده قابل قبول بازگرداند. هم‌چنین امکان اندازه‌گیری زبری سطح در زوایا و مسیرهای مختلف سطح شبه‌سازی شده قطعه‌کار و نیز در نظر گرفتن هندسه نوک ابزار شامل اثر زاویه تنظیم

استفاده شده است. نتایج مقاله آن‌ها نشان می‌دهد که برخلاف ابزارهای با طول کوتاه که در آن‌ها تنها ارتقای بسیار کمی در زبری سطح با کنترل مناسب پارامترهای برشکاری و یا جنس میله متصل به ابزار بورینگ، قابل دست یافتن است؛ در استفاده از ابزارهای بلندتر به دلیل وجود ارتعاشات متغیرهای برشکاری تبدیل به فاکتورهای مهمی برای ارتقای زبری سطح هستند و باید کنترل گردند.

از جمله مقالات دیگری که موضوع شبه‌سازی زبری سطح را در فرآیند بورینگ (داخل‌تراشی) مورد مطالعه قرار داده‌اند، مراجع<sup>[7]</sup> می‌باشند. در مقاله Yuvaraju و Nanda<sup>[7]</sup> اثر متغیرهای ورودی شامل سرعت، پیشروی و عمق برشی بر پاسخ‌های خروجی مانند دامنه ارتعاشی میله‌ی بورینگ و زبری سطح قطعه‌کار در عملیات بورینگ با استفاده از روش پاسخ سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاله Munawar و همکارانش<sup>[8]</sup> با بررسی اثر زاویه براده بر زبری سطح در فرآیند بورینگ، روش تاگوچی را برای به حداقل رساندن زبری سطح به کار برده است. Rao و همکارانش<sup>[9]</sup> سایش ابزار، زبری سطح و دامنه‌ی ارتعاشات قطعه‌کار را با کمک داده‌های ارتعاشی قطعه‌کار از یک ارتعاش‌سنج لیزری داپلر (Doppler) و نیز پردازش سیگنال‌های انتشار آکوستیک - اپتیک مربوط به این داده‌ها در یک تحلیل‌گر سرعت بالای FFT مورد مطالعه قرار داده و سپس داده‌های آزمایشگاهی را برای توسعه تکنیک‌های شبکه عصبی مصنوعی به کار برده‌اند. در مقاله Balamurugamohanraj و همکارانش<sup>[10]</sup>، هدف برقراری رابطه‌ای بین اثر پارامترهای برشی و زبری سطح در عملیات بورینگ خشک بوده است. در این مقاله یک طراحی فول فاکتوریال برای ارزیابی اثر چهار پارامتر مستقل به کار برده شده و نتایج در کنار ویژگی‌هایی استخراج شده از سیگنال ارتعاشات برای ساختن دو مدل پیش‌بینی زبری سطح استفاده شده است. این دو مدل شامل مدل‌های شبه‌ساز توانایی تشخیص ادراکی (Perceptron) چند لایه و درخت تصمیم‌گیری بوده‌اند که از بین آن‌ها مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی براساس حداکثر ضریب همبستگی و حداقل خطای ریشه‌ی میانگین مربعات معرفی گشته است. در نهایت در مقاله Rao و Murthy<sup>[11]</sup> نیز شبه‌سازی و بهینه‌سازی ارتعاشات ابزار و زبری سطح در بورینگ فولاد با استفاده از روش پاسخ سطح (Response Surface Methodology)، شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) و ماشین‌های بردار ساپورت (Support Vector Machines) مورد مطالعه قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

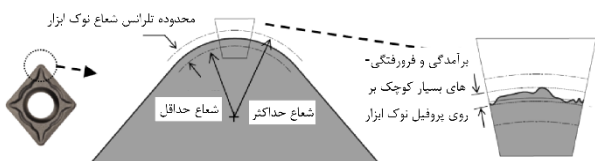
در مقاله پیش‌رو یک روش جدید مبتنی بر تئوری ماشین‌کاری و مدل‌سازی جهت شبه‌سازی زبری سطح در فرآیند بورینگ ارائه گردیده است. در این روش پروفیل سطح قطعه‌کار با افزودن مقادیر جابه‌جایی به دست آمده در جهت ارتعاشات شعاعی ابزار در حین عملیات ماشین‌کاری به اثرات به جا مانده از پیشروی به دست

مسافت طی شده ابزار تبدیل می‌گردد. مرحله چهارم شامل برداشت داده‌های معینی از سیگنال جابه‌جایی با فاصله‌ای برابر با یک دور ابزار است که در واقع مقادیر جابه‌جایی ابزار در یک خط مشخص محوری روی قطعه‌کار هستند. در مرحله پنجم اثر مقادیر استخراج شده به پروفیل تناوبی مورد انتظار اضافه گردیده و پروفیل نهایی سطح به وجود می‌آید. در مرحله نهایی پروفیل سطح حاصل برای به دست آوردن پروفیل زبری فیلتر شده و پارامترهای زبری از آن استخراج می‌گردند. این مراحل به تفصیل در ادامه این بخش توضیح داده می‌شوند.

## ۲-۱- استخراج پروفیل نوک ابزار

اغلب پژوهش‌های انجام شده که از پروفیل نوک ابزار به عنوان ورودی در الگوریتم شبیه‌سازی زبری سطح استفاده می‌کنند، براساس پروفیل نوک ابزار دایروی ایده‌آل انجام شده و در آنها از انحراف‌های تصادفی در این پروفیل چشم‌پوشی شده است. با این حال در یک مقاله<sup>[3]</sup> که به تازگی منتشر شده، ثابت شده که انحراف‌های بسیار کوچک نوک ابزار که در شکل ۲ نمایش داده شده است، می‌تواند اثر قابل توجهی بر روی زبری سطح قطعه‌کار داشته باشد. مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در این مقاله نشان داده است که تolerانس پروفیل نوک ابزار حتی اگر در محدوده تolerانس مجاز ۱۰٪ ارائه شده در مرجع<sup>[16]</sup> باشد، باز هم می‌تواند باعث تغییراتی به اندازه ۴۱/۸٪ در پارامتر  $R_t$ ، ۲۹/۳٪ در پارامتر  $R_a$  و ۲۴/۲٪ در پارامتر  $R_q$  گردد. به علاوه انحراف‌های کوچک پروفیل نوک ابزار، این پروفیل هم‌چنین به صورت تصادفی از یک پروفیل کاملاً دایروی انحراف پیدا می‌کند<sup>[17]</sup> که خود دلیل دیگری برای به وجود آمدن خطا در مدل‌های شبیه‌سازی که این پروفیل را در نظر نمی‌گیرند، خواهد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استخراج دقیق پروفیل نوک ابزار می‌تواند دقت شبیه‌سازی را به صورت قابل توجهی افزایش دهد.

استخراج پروفیل نوک اینسرت ابزار در مقاله‌ی Sung و همکارانش از طریق عکس‌برداری از اینسرت انجام شده است. در این مقاله به جای استخراج پروفیل نوک از عکس‌ها، این پروفیل به صورت مستقیم و از طریق برداشت این نقاط توسط دستگاه CMM تشکیل می‌شود. پروفیل استخراج شده توسط دستگاه CMM را می‌توان به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دوران داده و در زاویه تنظیم مناسب و برابر با مقدار واقعی مدل سازی نمود. در شکل ۳ نمونه‌ای از پروفیل استخراج شده نوک ابزار که در نرم‌افزار MATLAB با هدف دستیابی به زاویه تنظیم واقعی دوران داده شده، نشان داده شده است.



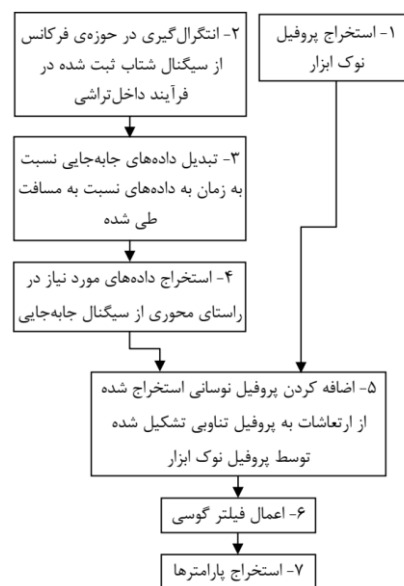
شکل ۲) پروفیل نوک ابزار نشان دهنده انحرافات بسیار کوچک آن [۱۲]

(Setting Angle)، شعاع نوک ابزار، انحرافات کوچک نوک ابزار و نقص در دایروی بودن کامل آن؛ دقت بسیار بالایی را برای این روش شبیه‌سازی به ارمغان آورده است.

در بخش دوم این مقاله مراحل مختلف شبیه‌سازی با کمک روش پیشنهادی به صورت کامل توضیح داده شده است. قسمت اول این بخش لزوم استفاده از پروفیل واقعی نوک ابزار جهت شبیه‌سازی را تبیین نموده و در قسمت دوم همین بخش نیز جهت دستیابی به مقادیر جابه‌جایی از سیگنال شتاب اندازه‌گیری شده توسط شتاب‌سنج یک روش حذف خطای جدید برای انتگرال‌گیری در حوزه‌ی فرکانس برای اولین بار توسعه داده شده است. سایر قسمت‌های این بخش نیز به تئوری‌های به کار برده شده جهت دستیابی به پروفیل واقعی سطح با استفاده از پروفیل نوک ابزار و مقادیر جابه‌جایی، می‌پردازد. در بخش سوم آزمایش‌هایی که با هدف صحت-گذاری روش پیشنهادی طراحی و اجرا گردیده و نیز نتایج آن‌ها گزارش شده است. نهایتاً بخش چهارم نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و معرفی میزان کارایی و دقت روش ارائه شده اختصاص دارد.

## ۲- تئوری و متدولوژی مورد استفاده در شبیه‌سازی زبری سطح

شبیه‌سازی زبری سطح در روش پیشنهادی این مقاله همانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل ۶ مرحله می‌باشد. در مرحله اول پروفیل نوک ابزار توسط دستگاه CMM استخراج می‌گردد. سپس در مرحله دوم از سیگنال‌های شتاب شعاعی اندازه‌گیری شده در حین فرآیند با هدف دستیابی به سیگنال جابه‌جایی در راستای شعاع در حوزه فرکانس انتگرال‌گیری می‌شود. در مرحله سوم با استفاده از روابط ریاضی ساده‌ای این سیگنال که نسبت به زمان اندازه‌گیری شده، به سیگنال تازه‌ای نسبت به



شکل ۱) الگوریتم روش استفاده شده در پژوهش

جمله این فیلترها می‌توان فیلترهای IIR (Infinite Impulse Response) را نام برد. Brandt و Brincker [20] نشان داده‌اند که فیلترهای IIR دقت بسیار مشابهی با روش انتگرال‌گیری حوزه فرکانس دارند و می‌توان از آنها نیز برای سیگنال‌های با فرکانس بالا استفاده نمود. با این وجود در این مقاله به دلیل پیاده‌سازی آسان‌تر روش حوزه فرکانس با توجه به توانایی در درک مستقیم آن، کاربرد این روش ترجیح داده شده است.

انتگرال‌گیری در حوزه فرکانس شامل محاسبه DFT (که البته در نرم‌افزارهای محاسباتی توسط تابع FFT محاسبه می‌گردد) و سپس ضرب نتیجه در تابع پاسخ فرکانسی  $H(f)=1/j\omega$  و در نهایت به دست آوردن پاسخ زمانی سیگنال انتگرال‌گیری شده توسط گرفتن تبدیل فوریه معکوس از حاصل ضرب است [20]. این روش انتگرال‌گیری سیگنال‌ها نیز مانند روش‌های حوزه زمان دارای خطاهایی خواهد بود. این خطاها شامل تراوش (Leakage) - هنگامی که فرکانس سیگنال دقیقاً بین دو خط طیفی تبدیل فوریه قرار گیرد [21]، کانولوشن دایروی و خطای تشخیص فرکانس سیگنال (Circular convolution and aliasing) - خطای ناشی از ضرب دو نتیجه DFT در حوزه فرکانس [21] و همچنین خطاهای مرتبط با فاکتور مقیاس (Scale factor) - اهمیت یافتن اشتباهی سیگنال‌های نویز با فرکانس کم؛ می‌باشد [18].

روش استفاده شده برای انتگرال‌گیری از سیگنال شتاب در این پژوهش مبتنی بر انتگرال‌گیری در حوزه فرکانس بوده که تمهیداتی برای جبران خطاهای توضیح داده شده در آن در نظر گرفته شده است. مراحل انتگرال‌گیری در این روش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

۱- ضریب فوریه  $X(k)$  برای هر نقطه داده  $x(r)$  مانند رابطه (۱) محاسبه شود.

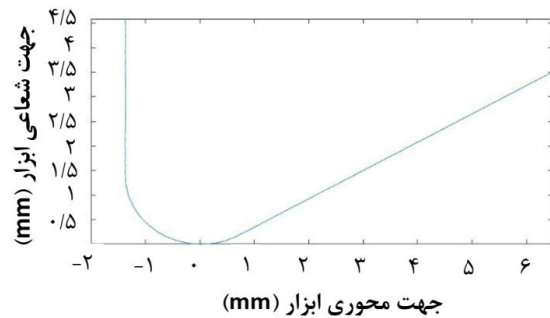
$$X(k) = \sum_{r=0}^{N-1} x(r)e^{-j(2\pi kr/N)} \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (1)$$

۲- مقادیر پاسخ فرکانسی  $H(k)$  که در معادله (۲) تعریف شده است محاسبه گردند. همان‌طور که گفته شد، این روش محاسبات با استفاده از ویژگی‌های انتگرال در حوزه فرکانس استخراج شده است و فرکانس‌ها در رابطه (۲) در واقع فرکانس‌های DFT هستند  $(\omega_k = 2\pi kf_s/L)$ .

$$H(k) = \begin{cases} 1/(j\omega_k)^2 & k = 1, 2, \dots, L-1 \\ 0 & k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

۳- حاصل ضرب  $Y(k) = 2X(k)H(k)$  با  $L$  مقدار محاسبه می‌گردد که مشابه با انتگرال‌گیری در حوزه فرکانس است. ضریب دو سمت راست این رابطه پس از انجام آزمون‌های فراوان بر روی سیگنال‌های تحلیلی به دست آمده که با وجود آن پاسخ‌های به مراتب بهتری حاصل گردیده است.

۴- مقادیر تبدیل معکوس  $y(r)$  مانند معادله (۳) محاسبه می‌گردد.



شکل ۳) پروفیل استخراج شده نوک ابزار توسط دستگاه CMM

## ۲-۲- انتگرال‌گیری از سیگنال شتاب اندازه‌گیری شده

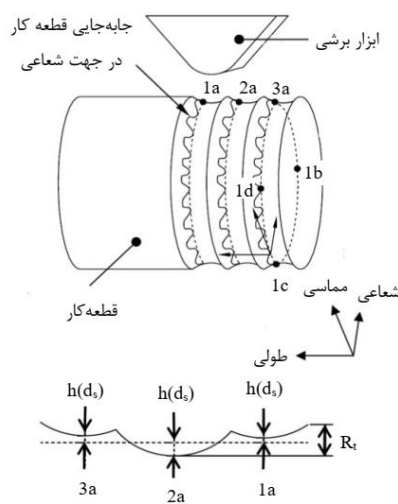
همان‌گونه که در مقدمه عنوان شد، شتاب‌سنج‌ها به دلایلی از جمله پهنای باند وسیع، وزن کم و قیمت مناسب پرکاربردترین مبدل‌ها (Transducers) برای اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی سازه‌ها هستند و در این مقاله نیز از آن‌ها برای اندازه‌گیری سیگنال ارتعاشی استفاده شده است. با این حال در مقاله پیش‌رو هدف از اندازه‌گیری سیگنال شتاب، صرفاً دستیابی به سیگنال جابه‌جایی با انتگرال‌گیری از شتاب قرائت شده است. در حالی که استخراج اطلاعات مولفه‌های فرکانسی و مقادیر دامنه‌های سرعت و جابه‌جایی از سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده تقریباً آسان است، بازسازی سیگنال‌های زمانی مربوطه پاسخ‌های سازه‌ای در فرم سرعت و جابه‌جایی کاری نسبتاً دشوار می‌باشد. دشواری این مسئله به این دلیل است که سیگنال شتاب در واقع به صورت مجموعه‌ای از نقاط گسسته در رایانه ذخیره می‌گردد و بنابراین برای انتگرال‌گیری از آن باید از روش‌های عددی استفاده نمود. در مورد انتگرال‌گیری این سیگنال‌های دیجیتال شده به صورت کلی دو راه برای تبدیل تاریخچه زمانی سیگنال شتاب اندازه‌گیری شده به سیگنال جابه‌جایی وجود دارد که شامل انتگرال‌گیری مستقیم سیگنال ارتعاشی در حوزه‌ی زمانی و یا تقسیم سیگنال شتاب تبدیل فوریه‌ی گسسته شده بر فاکتور  $\omega^2$  - و گرفتن تبدیل فوریه‌ی معکوس آن است.

انتگرال‌گیری در حوزه زمان معمولاً به وسیله اعمال تکنیک‌های کلاسیک (مانند Runge Kutta) انجام می‌شود. در مرجع [18] نشان داده شده است که برای استفاده از این روش انتگرال‌گیری لازم است بالاترین مولفه فرکانسی موجود در سیگنال بسیار کوچکتر از فرکانس Nyquist اندازه‌گیری باشد و این شرط در حالت نیاز به دو بار انتگرال‌گیری بحرانی‌تر نیز خواهد شد. از آن‌جا که در سیگنال‌های شتاب مربوط به فرآیندهای ماشین‌کاری، مولفه‌های ارتعاشی فرکانس بالا حضور دارند؛ می‌توان نتیجه گرفت که در فرآیندهای ماشین‌کاری، انتگرال‌گیری در حوزه زمان روش مناسبی برای دستیابی به سیگنال جابه‌جایی از سیگنال شتاب نمی‌باشد. روش دوم انتگرال‌گیری در حوزه زمان متشکل از اعمال فیلترهای دیجیتال است که برای تطبیق هرچه نزدیک‌تر با ویژگی دامنه و فاز داده شده در داخل باند فرکانسی دلخواه طراحی می‌شوند [19]. از

مسافت پیموده شده نوک ابزار اندازه‌گیری شده‌اند. بنابراین برای شبیه‌سازی پروفیل سطح با استفاده از این داده‌ها لازم است داده‌های جابه‌جایی عمودی واقع بر یک خط موازی با محور قطعه-کار از داده‌های اولیه استخراج گردند. در شکل ۵ روش انجام این کار نشان داده شده است. ابتدا یک نقطه به عنوان مبدا روی سطح قطعه‌کار که متناظر با مقادیر به دست آمده برای مسافت طی شده و جابه‌جایی عمودی در سیگنال ارتعاشات در یک نقطه داده است، انتخاب شده و مقادیر مربوط به آن در سیستم ذخیره می‌گردد. سپس به مقدار مسافت طی شده، مقداری معادل با مسافت طی شده در یک دور ابزار اضافه می‌گردد. مقدار مسافت طی شده در یک دور ابزار از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$S = \sqrt{(\pi \times D)^2 + (f)^2} \quad (5)$$

در مرحله بعد نقطه جدیدی که دارای نزدیک‌ترین مولفه مسافت طی شده به مسافت محاسبه شده در گام پیشین است به دست آمده و مقادیر مولفه‌های جابه‌جایی عمودی و مسافت طی شده در این نقطه نیز در سیستم ذخیره می‌گردد. سپس دوباره مقدار مسافت طی شده در یک دور ابزار به مسافت طی شده جدید اضافه شده و به این ترتیب نقطه بعدی به دست می‌آید. این فرآیند تا زمانی که مسافت طی شده جدید در بازه مسافت طی شده در داده‌ها (یا به تعداد دور اسپیندل در حین فرآیند) قرار گیرد، تکرار می‌شود. در نتیجه انجام این فرآیند مقادیر جابه‌جایی عمودی ابزار در راستای یک محور فرضی بر روی قطعه‌کار به دست آمده و از آنها می‌توان در پیش‌بینی پروفیل و زبری سطح قطعه‌کار استفاده نمود. باید به این نکته توجه شود که انتخاب نقطه مبدا برای شروع ثبت مقادیر جابه‌جایی‌ها اختیاری است. این موضوع به کاربر این امکان را می‌دهد که از نقاط مختلف بر روی سطح آغاز کرده و ارتعاشات را در راستای محورهای گوناگونی که از این نقاط می‌گذرند، ثبت کند. با اضافه کردن مقادیر ارتعاشات برای شروع از هر نقطه به پروفیل تناوبی که در بخش بعد نحوه به دست آوردن آن توضیح



شکل ۵ روش استخراج داده‌های مورد نیاز [۱۲]

$$H(k) = \begin{cases} 1/(j\omega_k)^2 & k = 1, 2, \dots, L-1 \\ 0 & k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

۵- میانگین و شیب سیگنال خروجی  $y(t)$  برای جلوگیری از خطاهایی که ممکن است به دلیل تراوش و یا فاکتور مقیاس در فرآیند DFT/IDFT به وجود آیند، از آن حذف می‌گردند. به این عمل در پردازش سیگنال Detrending گفته می‌شود که در این مقاله با استفاده از فیت کردن یک Spline بر نمودار سیگنال و سپس کم کردن آن از نمودار انجام می‌پذیرد [22].

### ۲-۳- تبدیل سیگنال نسبت به زمان به سیگنال نسبت به مسافت

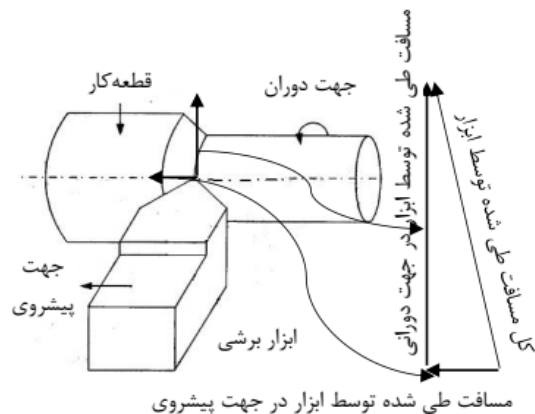
در این مرحله سیگنال به دست آمده در مرحله قبل که نسبت به زمان بوده به سیگنالی نسبت به مسافت طی شده ابزار تبدیل می‌گردد. این عمل با ضرب زمان در سرعت برشی قابل انجام است. تغییر متغیر ارائه شده در رابطه (۴) سیگنال نسبت به زمان را به سیگنال نسبت به مسافت طی شده تبدیل می‌نماید.

$$s = \sqrt{\left(\frac{t \times \pi \times D \times \Omega}{60}\right)^2 + \left(\frac{t \times f \times \Omega}{60}\right)^2} \quad (4)$$

در این رابطه  $\Omega$  برابر با سرعت اسپیندل برحسب دور بر دقیقه،  $f$  نرخ پیشروی در هر دور یا واحد میلی‌متر،  $t$  زمان برحسب ثانیه و  $D$  برابر قطر برحسب میلی‌متر می‌باشد. جواب حاصل از این رابطه برای مسافت نیز برحسب میلی‌متر خواهد بود. نحوه به دست آوردن این رابطه در شکل ۴ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است، هر حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار شامل یک مولفه در راستای مماسی و یک مولفه در جهت پیشروی می‌باشد که اولی برابر با حاصل ضرب تعداد دوران-های قطعه‌کار در محیط مقطع عرضی آن بوده و دومی معادل مقدار حرکت ابزار در جهت پیشروی است. بنابراین کل مسافت طی شده برابر با فرآیند این دو بردار جابه‌جایی خواهد بود.

### ۲-۴- برداشت داده‌های مورد نیاز

پروفیل سطح یک قطعه ماشین‌کاری شده همواره در راستای محوری اندازه‌گیری می‌شود. از طرف دیگر داده‌های جابه‌جایی به دست آمده در مرحله قبل در راستای سرعت برشی بوده و نسبت به



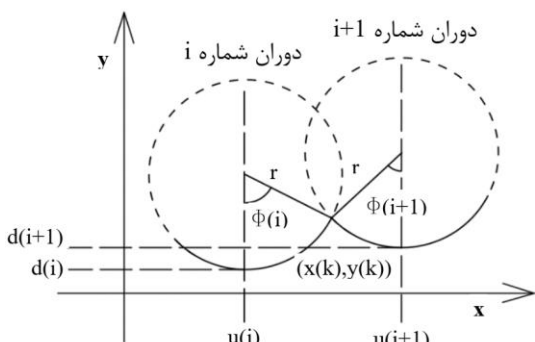
شکل ۴ روش به دست آوردن مقدار مسافت طی شده در زمان مشخصی از فرآیند

فاکتور اصلی ارتعاشات هستند، جابه‌جایی ابزار برشی نسبت به قطعه‌کار را می‌توان برای مطالعه‌ی ارتعاشات در فرآیند تراش کاری به کار برد. هنگامی که شعاع نوک ابزار برشی به همراه ارتعاشات نسبت به قطعه‌کار در جهت شعاعی به عنوان مسئول هندسه سطح نهایی فرض گردند، پروفیل سطح بین چرخش  $i$ -ام و  $(i+1)$ -ام قطعه‌کار هنگام برشکاری را می‌توان مانند شکل ۸ نمایش داد.

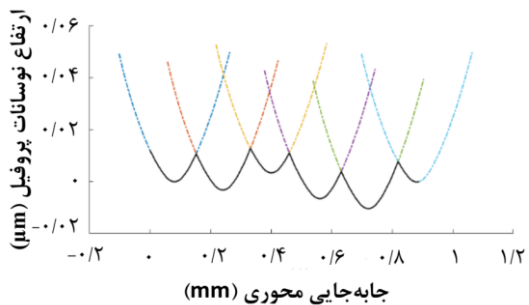
برای ایجاد پروفیل تناوبی باید به تعداد دورهای پیموده شده توسط ابزار پروفیل‌های نوک ابزار را با فاصله افقی به اندازه نرخ پیشروی در کنار یکدیگر قرار داده و برای هر دو پروفیل کنار هم مقادیر داده بعد از نقطه‌ی تقاطع برای پروفیل اول و مقادیر داده-ی قبل از این نقطه برای پروفیل دوم را حذف نمود. برای اضافه کردن اثر ارتعاشات کافی است قبل از حذف نقاط داده هر پروفیل را به اندازه جابه‌جایی متناظر به دست آمده در مرحله قبل در جهت عمودی جابه‌جا نمود. در شکل ۹ نحوه تشکیل پروفیل سطح در شش دور ابزار نشان داده شده است.

#### ۲-۶- استفاده از فیلتر برای دستیابی به پروفیل نهایی زبری

به دلیل این‌که پروفیل ایجاد شده در مرحله قبل دربرگیرنده‌ی فرم، اعوجاج و زبری سطح است، در مرحله‌ی ششم یک فیلتر گوسی<sup>[27]</sup> برای استخراج پروفیل زبری استفاده می‌شود. ضرورت استفاده از فیلترهای با پهنای باند یکسان در این است که مقایسه پارامترهای به دست آمده مانند زبری میانگین از ابزارهای مختلف اندازه‌گیری بافت سطح قابل انجام باشد.



شکل ۸) روش به دست آوردن پروفیل سطح در دو دور اسپیندل<sup>[14]</sup>



شکل ۹) پروفیل نوک ابزار در شش دور متوالی (خط چین) به همراه پروفیل سطح حاصل از این شش دور با در نظر گرفتن اثر ارتعاشات (خط ممتد) و پیشروی  $0.08 \text{ mm/rev}$  (با استفاده از داده‌های واقعی شتاب در آزمایش‌ها)

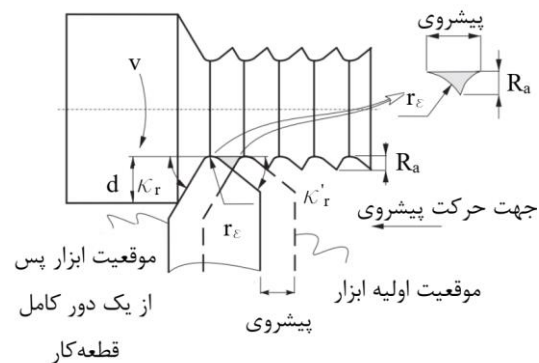
داده شده، می‌توان پروفیل‌های سطح متفاوتی را به دست آورد که متناظر با برداشت پروفیل سطح توسط دستگاه زبری سنج در محل‌های متفاوتی از قطعه‌کار است.

#### ۲-۵- اضافه کردن مقادیر استخراج شده به پروفیل تناوبی

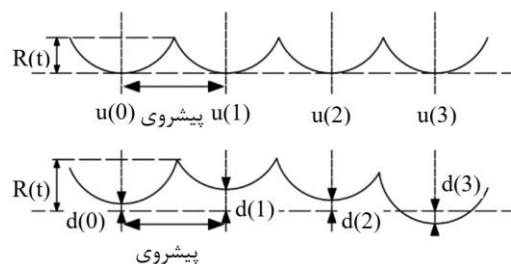
در حین یک فرآیند تراش کاری تک نقطه‌ای، با حرکت ابزار به دور قطعه‌کار، یک پروفیل مارییج بر روی سطح ماشین کاری شده ایجاد می‌شود که اثر به جا مانده از پیشروی نام دارد. وجه تمایز بین بافت سطح ماشین کاری شده و سطوح دیگر در واقع تشکیل همین اثرات به جا مانده از پیشروی است<sup>[23]</sup>. این اثرات به جا مانده از پیشروی برای شرایط ایده‌آل تعیین کننده زبری سطح نیز هستند و در فرآیند داخل‌تراشی (بورینگ) نیز وجود دارند. در شکل ۶ اثرات به جا مانده از پیشروی در یک قطعه‌ی تراش-کاری شده نشان داده شده است.

یک پرداخت سطح ایده‌آل در بیشتر عملیات ماشین کاری به دلیل فاکتورهای مربوط به ماده سازنده قطعه‌کار و چگونگی واکنش آن با ابزار به سادگی قابل دستیابی نیست<sup>[25]</sup>. بافت سطح تشکیل شده در فرآیند بورینگ مانند فرآیند تراش کاری نتیجه تکرار حرکت نوک ابزار برشی به دور قطعه‌کار است. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است پروفیل‌های سطح حاصل از یک فرآیند ماشین کاری به دلیل ارتعاشات نسبی بین ابزار برشی و قطعه‌کار دچار انحراف می‌شود.

از آن جا که در تراش کاری با ابزارهای با طول آزاد زیاد (دقیقا مانند میله بورینگ طویل در فرآیند داخل تراشی) تغییر شکل‌های ابزار



شکل ۶) نحوه تشکیل اثر به جا مانده از پیشروی در فرآیند تراش کاری<sup>[24]</sup>



شکل ۷) نحوه اضافه شدن اثر ارتعاشات به زبری سطح. الف: زبری سطح ایده‌آل با چشم پوشی از ارتعاشات - ب: زبری سطح با وجود ارتعاشات<sup>[26]</sup>

بنابراین جهت مشاهده تاثیر این پارامتر بر دقت شبیه‌سازی کافی است اینسرت‌هایی با شعاع‌های گوناگون اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج واقعی مقایسه گردند. هم‌چنین باید توجه داشت که اندازه‌گیری این پروفیل پیش از انجام هر آزمون می‌تواند به در نظر گرفتن انحرافات واقعی روی ابزار پیش از آزمون منجر شده و دقت روش پیشنهادی را بسیار بالاتر ببرد.

به جز شعاع نوک ابزار پارامترهای برشی مهم دیگر شامل نرخ پیشروی، عمق برشی و سرعت اسپیندل می‌باشند. نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل از دیگر ورودی‌های الگوریتم شبیه‌سازی بوده و عمق برشی نیز از طریق تاثیر بر سیگنال ارتعاشی بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی اثرگذاری می‌کند. با این حال در مقالات متعددی نشان داده شده است که سرعت اسپیندل تاثیر بسیار کمی روی زبری سطح داشته و نیازی به در نظر گرفتن آن به عنوان یک متغیر وجود ندارد. با توجه به این نکات در این مقاله دو پارامتر عمق برشی و نرخ پیشروی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و دقت روش شبیه‌سازی برای دو سطح از هر پارامتر اندازه‌گیری شده است. در جدول ۱ شرایط برشی برای آزمایش‌های انجام شده ارائه شده است.

سیگنال شتاب در این آزمایش‌ها توسط شتاب‌سنج‌های بر پایه پیزوالکتریک که روی میله بورینگ محکم شده‌اند، اندازه‌گیری گشته و مقادیر مربوط به آن‌ها به صورت یک فایل متنی شامل مقادیر شتاب در زمان‌های مختلف در کامپیوتر ذخیره می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در سیستم موجود در آزمایشگاه برای این آزمون سه حسگر مختلف وجود دارند اما تنها یکی از آن‌ها برای استخراج نتایج این آزمون استفاده شده و بقیه آن‌ها از مطالعات قبلی بر روی سیستم به جا مانده و موضوع این تحقیق نیستند. در جدول ۲ مشخصات حسگر مورد استفاده برای اندازه‌گیری سیگنال شتاب شعاعی ارائه شده است. پیش از انجام آزمایش‌ها باید به این نکته توجه شود که به دلیل محدودیت‌های دستگاه زبری‌سنج موجود، با وجود معتبر بودن این روش از نظر تئوری در داخل‌تراشی همراه با حضور ارتعاشات چتر توسعه نیافته، برای اندازه‌گیری زبری قطعه‌کارهایی که در یک

در مرجع [28] توضیحات کاملی در مورد فیلترهای مختلف که با هدف تفکیک پروفیل سطح استفاده می‌شوند، داده شده است. فیلتر گوسی گسترده‌ترین فیلتر مورد استفاده کنونی است. تابع وزن برای فیلتر پایین‌گذر گوسی در رابطه‌ی (۶) داده شده است:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} \exp\left(-\pi\left(\frac{x}{\alpha\lambda_c}\right)^2\right) \quad (6)$$

که در آن  $\alpha = \sqrt{\ln 2 / \pi} = 0.4697$ ،  $\lambda$  برابر طول موج پروفیل‌های سینوسی مختلف روی سطح،  $\lambda_c$  مقدار طول cutoff و  $x$  برابر با فاصله از مرکز (بیشینه) تابع وزن می‌باشند [28].

پروفیل زبری را می‌توان به عنوان تفاوت بین پروفیل اصلی  $y(x)$  و خط میانی  $W(x)$  که با کانولوشن قابل محاسبه است، به دست آورد. در رابطه (۷) معادله خط میانی ارائه شده است [28].

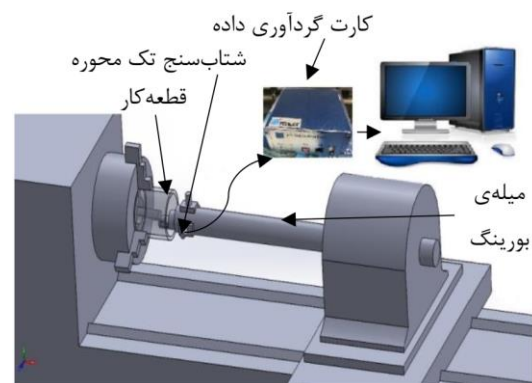
$$W(x) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\xi)S(x-\xi)d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} S(\xi)y(x-\xi)d\xi \quad (7)$$

پس از اعمال فیلتر گوسی دیگر پروفیل زبری از پروفیل سطح جدا شده و پروفیل زبری جهت محاسبه پارامترهای آن در دسترس خواهد بود.

### ۳- صحنه‌گذاری به وسیله‌ی انجام آزمون‌های داخل‌تراشی

برای اطمینان از درستی روش مطرح شده در بخش قبل لازم است این روش با آزمون‌های عملی صحنه‌گذاری گردد. انجام این کار مستلزم انجام عملیات داخل‌تراشی در شرایط برشی مشخص با هدف دست‌یابی به سیگنال ارتعاشی می‌باشد. در شکل ۱۰ شماتیک نحوه نصب اجزای مختلف آزمایش‌ها نشان داده شده است. قطعه‌کار به کار برده شده در این آزمون‌ها از جنس آلومینیوم AI 6063T6 بوده و از ابزاری با اینسرت دارای هندسه TNMG6 استفاده شده است.

پیش از شروع آزمون‌ها لازم است پروفیل نوک ابزار توسط دستگاه CMM اندازه‌گیری شده و ابر نقاط حاصل به نرم‌افزار متلب (Matlab) وارد گردد. با اندازه‌گیری این پروفیل و استفاده از آن به عنوان یک ورودی در الگوریتم شبیه‌سازی اثر پارامتر مهم شعاع نوک ابزار بر زبری سطح حاصل از شبیه‌سازی اعمال می‌گردد.



شکل ۱۰ شماتیک کلی تنظیمات دستگاه تراش برای انجام آزمون‌های برشی داخل‌تراشی

جدول ۱) مقدار پارامترهای برشی در آزمایش‌های انجام شده

شماره‌ی آزمایش	نرخ پیشروی (mm/rev)	عمق برشی mm	سرعت اسپیندل rpm	نسبت طول به قطر میله‌ی بورینگ
۱	۰/۱۶	۰/۵	۵۰۰	۸
۲	۰/۰۸	۰/۵	۵۰۰	۸
۳	۰/۱۶	۱	۵۰۰	۸
۴	۰/۰۸	۱	۵۰۰	۸

جدول ۲) مشخصات حسگر شتاب به کار برده شده در آزمون‌ها

نوع و مدل حسگر استفاده شده در آزمون واحد حساسیت دامنه محدوده فرکانسی
حسگر شتاب تک محوره متصل به کنترلر TL122A50
g ۴۸/۵ mV/g ±۱۰۰ g ۰/۵ تا ۰۰۰۰ Hz



در شکل ۱۲ سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده برای این آزمون‌ها ارائه شده است.

با اجرای برنامه در ابتدا از سیگنال شتاب مورد آزمون با هدف دستیابی به سیگنال جابه‌جایی دو بار انتگرال گرفته می‌شود. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب سیگنال‌های سرعت و جابه‌جایی حاصل از انتگرال‌گیری سیگنال‌های شتاب مربوط آزمون‌ها نمایش داده شده است.

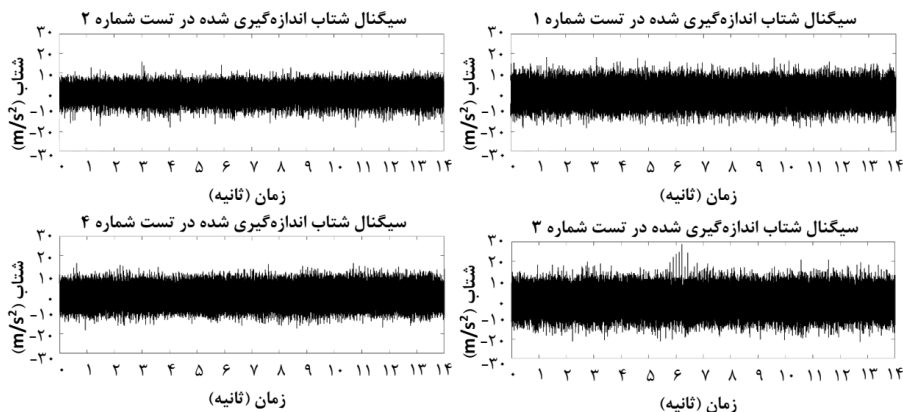
در مرحله بعدی اجرای برنامه و پس از وارد کردن پروفیل نوک ابزار به عنوان ورودی، پروفیل سطح شبیه‌سازی شده ایجاد می‌گردد.



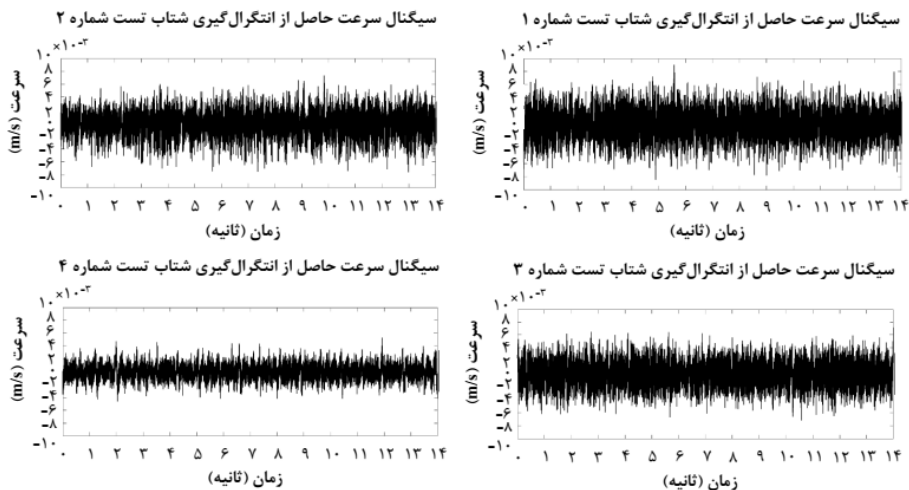
شکل ۱۱) ساختار سیستم برای انجام آزمون

فرآیند داخل تراشی همراه با این ارتعاشات به وجود آمده‌اند، دشواری‌هایی وجود دارد. با توجه به این مطلب باید آزمون‌ها به گونه‌ای باشند که در آن‌ها ارتعاشات چتر حتی‌المقدور وجود نداشته و یا مقدار دامنه آن بسیار کم باشد. بنابراین به دلیل طول آزاد بلند میله متصل به ابزار بوری‌نگ استفاده شده (نسبت طول به قطر = ۸) در آزمون‌ها و نیز شرایط برشی در نظر گرفته شده، با توجه به احتمال بالای وجود چتر، در تست‌های اندازه‌گیری سیگنال ارتعاشی با هدف حذف چتر با دامنه بالا از کنترلر موجود در آزمایشگاه استفاده می‌شود. این کنترلر از نوع PID با ساختار بازخورد بوده که در رساله مرجع [29] به طور کامل معرفی شده است. سیگنال شتاب شعاعی مورد استفاده در فرآیند شبیه‌سازی زبری در واقع همان سیگنال ورودی کنترلر خواهد بود. در شکل ۱۱ نمایی از ساختار استفاده شده در این آزمون‌ها ارائه شده است.

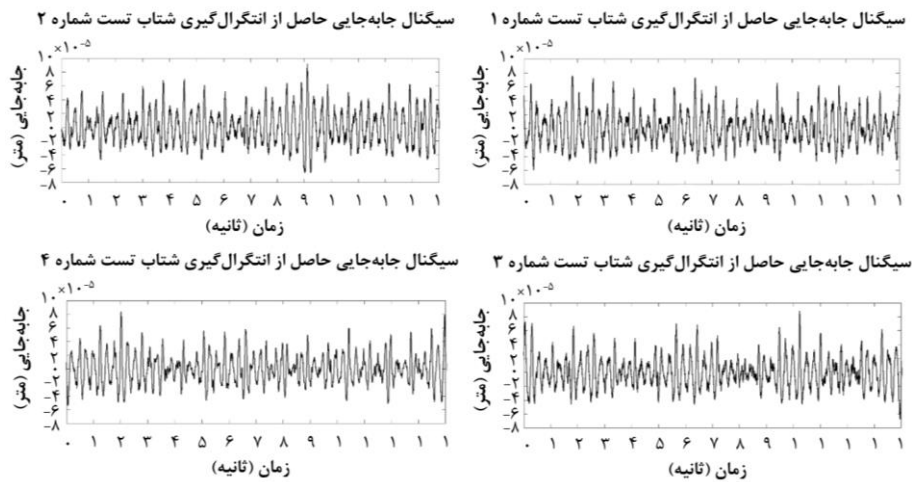
پس از اندازه‌گیری شتاب، کابل‌های موجود داده‌ها را به سیستم گردآوری داده TENLEE Dynamic Data Acquisition (Model: TL 9004) و از آن‌جا به رایانه منتقل کرده و این داده‌ها به صورت یک فایل متنی در رایانه ذخیره می‌گردند. این فایل متنی به همراه پروفیل به دست آمده از نوک ابزار به عنوان ورودی برنامه‌ای که بتواند پروفیل سطح را شبیه‌سازی کند، مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱۲) سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده برای تست‌های اول تا چهارم



شکل ۱۳) سیگنال‌های سرعت مربوط به آزمون‌ها پس از انتگرال‌گیری از سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده



شکل ۱۴) سیگنال‌های جابه‌جایی مربوط به آزمون‌ها پس از دو بار انتگرال‌گیری از سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده

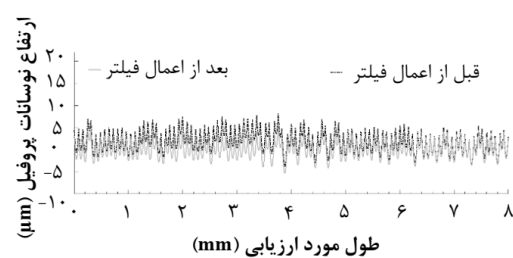
اندازه‌گیری زبری یک سطح روش‌های مختلفی وجود دارد. در روش مورد استفاده در این مقاله از دستگاه زبری‌سنج TaylorHubson Surtronic S25 استفاده شده که در آن یک پروب مخروطی شکل الماسی با شعاع نوکی در حدود 0/005mm و زاویه tip 90 درجه در طول سطح تست با سرعت ثابت پایین حرکت می‌کند. پروب در حین حرکت به صورت افقی، می‌تواند حرکتی را نیز به صورت عمودی با هدف دنبال کردن انحرافات سطح انجام دهد. حرکت عمودی به یک سیگنال الکترونیک تبدیل می‌شود که توپوگرافی سطح را ارائه می‌دهد. خروجی، نمایشی از نقشه کانتور سطح در طول خطی است که توسط پروب پیموده شده است. در شکل ۱۶ نمایی از این دستگاه در حال برداشت پروفیل از سطح ماشین‌کاری شده ارائه گردیده است.

دستگاه زبری‌سنج استفاده شده در این آزمایش‌ها، توانایی اتصال به کامپیوتر را داشته و داده‌های برداشت شده از آن می‌توانند برای تحلیل به نرم‌افزار ارائه شده همراه با دستگاه منتقل شوند. برای این کار تنها لازم است اتصالات مربوطه را انجام داده و دستگاه را را اعمال نموده و پروفیل زبری سطح را به دست آورد. سپس این پروفیل به صورت یک فایل متنی ذخیره شده و با بارگذاری در نرم‌افزار متلب می‌توان آن را ترسیم نمود. در شکل ۱۷ این پروفیل زبری اندازه‌گیری شده توسط دستگاه زبری‌سنج به همراه پروفیل

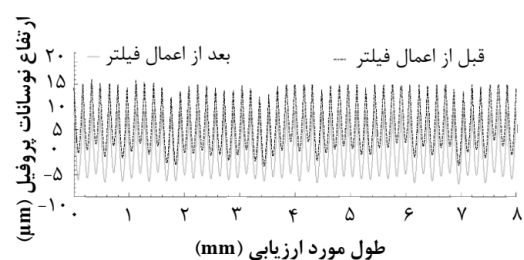
همان‌گونه که در بخش‌های قبلی گفته شد، جهت محاسبه پارامترهای زبری لازم است، اعوجاج از این پروفیل تفکیک گردد. برای این کار در برنامه یک فیلتر گوسی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۵ عملکرد فیلتر گوسی برای پروفیل سطح آزمون اول نشان داده شده است.

در مرحله نهایی آزمون‌ها باید پارامترهای زبری پروفیل شبیه‌سازی شده را با پارامترهای به دست آمده از دستگاه زبری‌سنج مقایسه نمود. برای این کار قطعات به دست آمده در پایان هر آزمایش زبری سنجی شده و سپس پروفیل به دست آمده از دستگاه زبری سنج برای استخراج پارامترهای زبری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت نیز پارامترهای به دست آمده از پروفیل سطح با پارامترهای خروجی برنامه‌ی شبیه‌سازی متلب مقایسه می‌گردند. برای

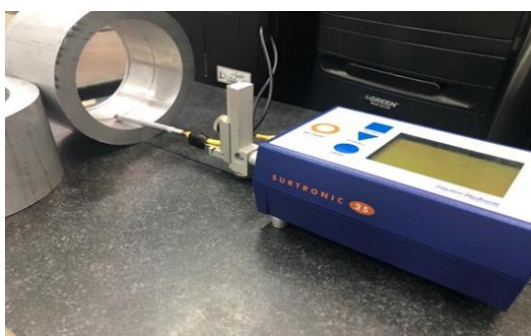
تاثیر فیلتر گوسی بر پروفیل سطح شبیه سازی شده تست شماره ۲



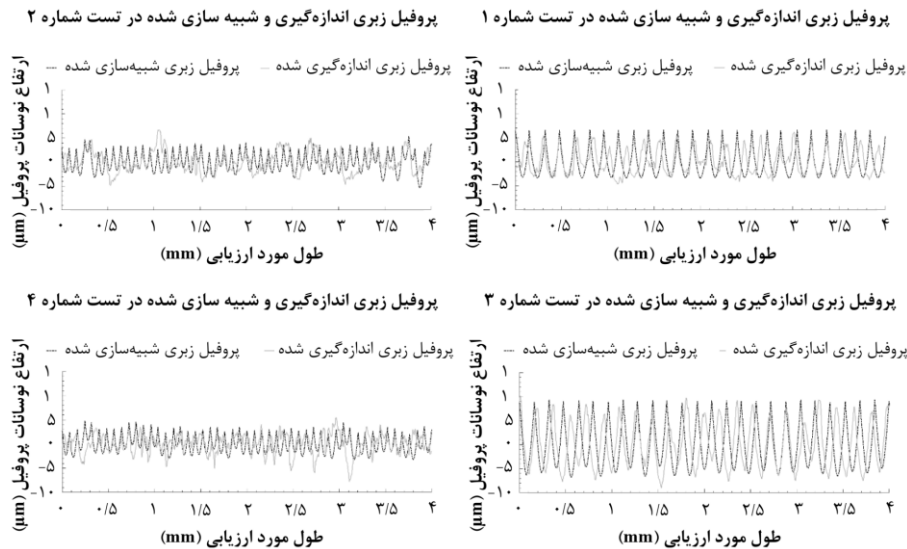
تاثیر فیلتر گوسی بر پروفیل سطح شبیه سازی شده تست شماره ۳



شکل ۱۵) نحوه تاثیر فیلتر گوسی بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی پروفیل سطح در تست‌های دوم و سوم



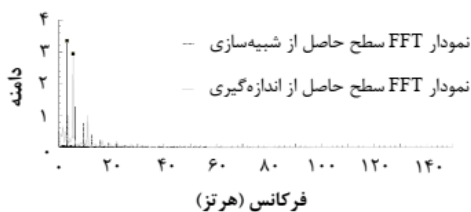
شکل ۱۶) دستگاه زبری‌سنج TaylorHubson در حال اندازه‌گیری پروفیل



شکل ۱۷) پروفیل زبری اندازه‌گیری شده (خط ممتد) به همراه پروفیل زبری شبه‌سازی شده (خط چین) برای آزمون‌ها (feed=0.08mm/rev, DOC=1mm)

مقایسه فرکانس و دامنه سطح به دست آمده از شبه‌سازی و

اندازه‌گیری در تست شماره ۱



شکل ۱۸) نمودار DFT مربوط به پروفیل زبری اندازه‌گیری شده (خط ممتد و روشن) به همراه پروفیل زبری شبه‌سازی شده (خط چین و تیره) برای تست اول (feed=0.16mm/rev, DOC=0.5mm)

و ۳/۳۴ هستند و اگر مقادیر مرتبط با پروفیل اندازه‌گیری شده به عنوان مرجع در نظر گرفته شود، خط‌هایی به ترتیب برابر با ۴۳ و ۱۳ درصد در شبه‌سازی فرکانس و دامنه پروفیل زبری سطح در این آزمون وجود دارند.

پس از دستیابی به پروفیل‌های شبه‌سازی شده زبری سطح برای محاسبه پارامترهای آن در متلب از روابط (۹) و (۱۰) استفاده می‌گردد.

$$R_a = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (y_i - \bar{y}) \quad (9)$$

$$R_t = \max(y_i) - \min(y_i) \quad (10)$$

در این روابط  $y_i$  برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی انحراف سطح در پروفیل زبری بوده و  $\bar{y}$  مساوی میانگین این انحرافات است. هم‌چنین  $L$  برابر با تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

در جدول ۳ مقادیر اندازه‌گیری شده و شبه‌سازی شده برای پارامترهای زبری در چهار آزمایش انجام شده به همراه میزان خطای موجود در هر آزمون و برای هر یک از پارامترها به صورت درصدی ارائه شده است. در این جدول مقادیر زبری حاصل از شبه‌سازی در واقع میانگین زبری به دست آمده از پروفیل‌های

شبه‌سازی شده با روش این مقاله برای چهار آزمایش انجام شده ارائه گشته است. باید توجه داشت که همان‌گونه که در بخش دوم عنوان شد، در برنامه شبه‌سازی نوشته شده می‌توان نقطه‌ی شروع برای به دست آوردن پروفیل سطح را تغییر داد و بنابراین پروفیل‌های مختلفی برای هر آزمون به دست آورد. با این حال در این بخش برای هر آزمون یک پروفیل به عنوان نمونه آورده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، نوسانات پروفیل زبری در نمودارهای شبه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای هر آزمون از هم‌خوانی بالایی برخوردار هستند. این موضوع در شکل ۱۸ برای آزمون اول با استفاده از انتقال نمودارها به حوزه فرکانس مورد بررسی قرار گرفته است. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که دامنه و فرکانس نوسانات در پروفیل زبری شبه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده تا حد زیادی به یکدیگر نزدیک می‌باشند. جهت محاسبه DFT در این نمودارها 1mm متناظر با یک ثانیه در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که از آن‌جا که دستگاه در طول ارزیابی ۴ میلی‌متر تعداد ۸۰ هزار داده برداشت می‌کند، می‌توان نرخ برداشت داده برای دستگاه را ۲۰ هزار داده بر میلی‌متر در نظر گرفت. هم‌چنین در این آزمون نرخ پیشروی برابر با 16/0mm/rev بوده و بنابراین در هر میلی‌متر، ۶/۲۵ اثر از پیشروی باید وجود داشته باشد؛ بنابراین فرکانس انحراف‌های روی سطح در فضای مکانی (Spatial) برابر با همین مقدار است. اما همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود در پروفیل اندازه‌گیری شده توسط دستگاه زبری سنج فرکانس و بزرگی دامنه به ترتیب برابر با ۵/۵ هرتز ۲/۹۴۳ هستند و فرکانس کمتر از حد مورد انتظار است. این موضوع ممکن است به دلیل ارتعاشات محوری و یا خطای دستگاه اندازه‌گیری اتفاق افتاده باشد. از طرف دیگر فرکانس و دامنه‌ی مرتبط با پروفیل شبه‌سازی شده نیز به ترتیب برابر با ۳/۱۵۶ هرتز

جدول ۳) مقدار پارامترهای زبری به دست آمده از شبیه سازی و اندازه گیری و مقادیر خطای مربوط به هر پارامتر

شماره آزمایش	$R_{am}^{(*)}$	$R_{im}$	$R_{as}^{(**)}$	$R_{is}$	خطای محاسبه $R_s$	خطای محاسبه $R_t$
۱	۲/۱۴	۱۰/۸	۲/۱۹	۱۰/۶	۲/۳	۱/۹
۲	۱/۷۳	۱۱/۵۹	۱/۵۹	۱۰/۷۱	۸/۱	۷/۴
۳	۳/۹۵	۱۹/۱	۳/۷۷	۱۷/۳۲	۴/۶	۹/۳
۴	۱/۵۷	۱۳/۲	۱/۴۷	۹/۳	۶/۴	۲۹/۵

شبیه سازی شده مختلف هستند. دلایل وجود اختلاف در مقادیر حاصل از شبیه سازی و نیز اندازه گیری را می توان علاوه بر خطاهای عددی در موارد زیر برشمرد:

۱- برخی خطاها در سیگنال شتاب اندازه گیری شده موجود هستند که عمدتاً مرتبط با نویزهای موجود در عملیات ماشین کاری بوده و به آسانی قابل حذف نمی باشند.

۲- همان گونه که در مورد مرجع [15] در بخش ۱-۲ توضیح داده شد، انحرافات موجود در پروفیل نوک ابزار تاثیر بسزایی روی پارامترهای زبری دارند. این انحرافات بسیار ریز با استفاده از دستگاه CMM موجود قابل اندازه گیری نبوده و برای به دست آوردن پروفیل واقعی نوک ابزار استفاده از عکس های دوبعدی نوک اینسرت و استخراج پروفیل از آن توصیه می شود.

۳- دستگاه زبری سنج نیز خود ممکن است دارای خطاهایی بوده و بنابراین مقادیر اندازه گیری شده با آن نیز ممکن است به اندازه کافی دقیق نباشند.

۴- پروفیل نوک ابزار در هر دور در جهت افقی به دلیل ارتعاشات محوری منحرف می گردد و این موضوع می تواند بر زبری سطح تاثیرگذار باشد.

۵- به دلیل ناهمگن بودن ساختار قطعه کار و هم چنین انحرافات موجود در سطح آن تغییرات ناگهانی در سیگنال شتاب ایجاد می گردد. این موضوع باعث بروز خطاهایی در انتگرال گیری عددی شتاب اندازه گیری شده می گردد. هم چنین در صورت وجود ذرات بسیار ریز در سطح قطعه کار و کنده شدن آن ها در حین عملیات ماشین کاری، انحراف به وجود آمده در سطح در سیگنال شتاب اندازه گیری شده ثبت نخواهد شد.

همان گونه که در جدول ۳ ارائه شده، خطای اندازه گیری پارامترها برای تمام آزمون ها به استثنای یک مورد همگی مقداری پایین تر از ده درصد است. این خطا در تست چهارم و برای پارامتر  $R_t$  مقداری برابر با ۲۹/۵٪ دارد و زیاد بودن آن نسبت به سایر خطاها می تواند به علت سطح ناهمگن قطعه کار و یا خطاهای اندازه گیری پروفیل سطح باشد. با این وجود حتی با در نظر گرفتن بیشترین خطا و مقایسه آن با خطای سایر روش های شبیه سازی پیشنهادی در پژوهش های گذشته می توان نتیجه گرفت که روش ارائه شده در این مقاله از دقت بسیار بالایی برخوردار است. هم چنین باید توجه داشت که زبری سطح پارامتر بسیار حساسی بوده و متأثر از

متغیرهای مختلفی است و بنابراین خطاهای عددی به وجود آمده در هر فرآیند شبیه سازی با هدف دستیابی به این پارامتر، بر روی دقت محاسبه آن بسیار تاثیرگذار هستند. وجود این مسئله و نیز عدم قطعیت های فراوان در مکانیزم تشکیل زبری سطح، محدودیت زیادی را در مسیر توسعه روش های شبیه سازی با دقت بالاتر ایجاد کرده و خطایی در حدود مقدار این مقاله را برای دستیابی به پارامترهای زبری از طریق شبیه سازی، در محدوده قابل قبول قرار می دهد.

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در پژوهش انجام شده در این مقاله یک روش برای شبیه سازی پروفیل زبری حاصل از فرآیند داخل تراشی توسعه داده شد. روش توسعه داده شده در این پژوهش بر پایه مدل سازی توپوگرافی سطح با استفاده از سینماتیک ماشین کاری و گردآوری سیگنال ارتعاشی بوده که برای اولین بار در مورد فرآیند داخل تراشی مورد استفاده قرار گرفته است. در گام اول این روش ابر نقاط مربوط به پروفیل نوک ابزار با استفاده از دستگاه CMM اندازه گیری شده و به صورت یک فایل متنی ذخیره گردیده است. سپس این فایل متنی در نرم افزار متلب بارگذاری شده و با استفاده از روش های توضیح داده شده پروفیل سطح متناوب که تنها شامل اثر به جا مانده از پیشروی می باشد، ایجاد گشته است. در مرحله بعد با توجه به اهمیت ارتعاشات در فرآیند داخل تراشی به دلیل طول بلند میله بورینگ، سیگنال ارتعاشی به عنوان یکی دیگر از منابع تولید سطح به الگوریتم ورود پیدا کرده و گام های بعدی شبیه سازی به استخراج اطلاعات لازم از سیگنال ارتعاشی شتاب (پس از تبدیل به سیگنال جابه جایی) و اضافه کردن اثر آن به پروفیل متناوب سطح اختصاص یافته است. به صورت کلی مزیت های استفاده از روش توسعه داده شده در این مقاله برای شبیه سازی زبری سطح در فرآیندهای داخل تراشی را می توان در موارد زیر خلاصه نمود:

استخراج دقیق پروفیل نوک ابزار و بنابراین در نظر گرفتن اثر نقابص موجود در این پروفیل در نظر گرفتن پارامترهای زاویه تنظیم و شعاع نوک ابزار به صورت مستقیم و دقیق در پروفیل استخراج شده از نوک ابزار امکان استفاده از سیگنال ارتعاشی (با توجه به طول بلند میله بورینگ استفاده از آن توصیه می شود). در نظر گرفتن اثر بسیاری از پارامترهای موثر بر زبری سطح در قالب ارتعاشات شعاعی و اضافه نمودن مستقیم این اثرات به پروفیل سطح تشکیل شده

عدم نیاز به داده های آزمایشگاهی فراوان نسبت به روش های آماری و هوش مصنوعی

دست یافتن به پروفیل های زبری مختلف برای یک سطح ماشین کاری شده با شروع از نقاط مختلف برای برداشت داده های

- 4- Benardos PG, Vosniakos GC. Predicting surface roughness in machining: a review. *International journal of machine tools and manufacture*. 2003; 43(8):833-44.
- 5- Lu C. Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of materials processing technology*. 2008;205(1-3):439-50.
- 6- Beauchamp Y, Thomas M, Youssef YA, Masounave J. Investigation of cutting parameter effects on surface roughness in lathe boring operation by use of a full factorial design. *Computers & industrial engineering*. 1996;31(3-4):645-51.
- 7- Yuvaraju BA, Nanda BK. Prediction of vibration amplitude and surface roughness in boring operation by response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(2):6906-15.
- 8- Munawar M, Chen JC, Mufti NA. Investigation of cutting parameters effect for minimization of surface roughness in internal turning. *International journal of precision engineering and manufacturing*. 2011; 12(1):121-7.
- 9-Rao KV, Murthy BS, Rao NM. Prediction of cutting tool wear, surface roughness and vibration of work piece in boring of AISI 316 steel with artificial neural network. *Measurement*. 2014; 51:63-70.
- 10- Balamurugamohanraj G, Vijaiyendiran K, Mohanaraman P, Sugumaran V. Prediction of surface roughness based on machining condition and tool condition in boring stainless steel-304. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016;9(47):1-6.
- 11- Rao KV, Murthy PB. Modeling and optimization of tool vibration and surface roughness in boring of steel using RSM, ANN and SVM. *Journal of intelligent manufacturing*. 2018;29(7):1533-43.
- 12- Jang DY, Choi YG, Kim HG, Hsiao A. Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1996;36(4):453-64.
- 13- Lin SC, Chang MF. A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1998;38(7):763-82.
- 14- Sung AN, Loh WP, Ratnam MM. Simulation Approach for Surface Roughness Interval Prediction in Finish Turning. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*. 2016;15(1).
- 15- Sung AN, Ratnam MM, Loh WP. Effect of tool nose profile tolerance on surface roughness in finish turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;76(9-12):2083-98.
- 16- ISO I. 3685: tool-life testing with single-point turning tools. *International Organization for Standardization (ISO)*: Geneva, Switzerland. 1993.
- 17- Chian GJ, Ratnam MM. Determination of tool nose radii of cutting inserts using machine vision. *Sensor Review*. 2011.
- 18- Han S. Measuring displacement signal with an accelerometer. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010;24(6):1329-35.
- 19- Pintelon R, Schoukens J. Real-time integration and differentiation of analog signals by means of digital

جابه‌جایی و بنابراین فراهم کردن امکان گرفتن میانگین برای پارامترهای زبری شبه‌سازی شده توانایی روش در شبه‌سازی زبری در فرآیندهای دارای ارتعاشات چتر توسعه نیافته (در فرآیندهایی که ارتعاشات چتر به صورت توسعه یافته وجود دارند مسائل دیگری مانند نیروهای شخم‌زنی موجود هستند که بر پروفیل سطح تشکیل شده تاثیر گذار خواهند بود؛ اما در مورد ارتعاشات چتر توسعه نیافته به خوبی می‌توان پروفیل سطح را از برآیند دو پروفیل سینماتیکی و دینامیکی به دست آورد).

لازم به ذکر است که جهت تبدیل سیگنال ارتعاشی شتاب به سیگنال جابه‌جایی در این پژوهش از روش جدیدی برای حذف خطای انتگرال‌گیری در حوزه فرکانس برای اولین بار استفاده گردیده است که می‌تواند دستاوردی دیگر برای این مقاله تلقی گردد. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که این روش خطایی معادل با حداکثر ۲۹/۵٪ برای پارامترهای زبری  $R_a$  و  $R_t$  تولید می‌نماید و خطا در طیف فرکانسی نیز حداکثر ۳۹٪ خواهد بود. هم‌چنین در اکثر آزمون‌ها این خطا کوچکتر از ده درصد است. با توجه به این که در اغلب فرآیندهای صنعتی، مقدار دقیق زبری مد نظر نبوده و برای آن حدود مشخصی تعیین می‌گردد و نیز پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های فراوان در مکانیزم تشکیل زبری، خطای حاصل از روش پیشنهادی برای شبه‌سازی پروفیل زبری را می‌توان در حد قابل قبولی در نظر گرفت که نشان از دقت بالای روش پیشنهادی در شبه‌سازی دارد. به علاوه مقایسه نتایج این مقاله با مقالات دیگر منتشر شده در زمینه شبه‌سازی زبری سطح نیز بر دقیق بودن این روش دلالت دارد. از طرف دیگر برای افزایش دقت این روش همچنان کارهای بسیار زیادی (مانند به دست آوردن پروفیل دقیق نوک ابزار و یا اضافه نمودن اثر سیگنال ارتعاشی در راستای محوری به پروفیل متناوب سطح) را می‌توان انجام داد که خود یکی دیگر از مزیت‌های روش ارائه شده است. با توجه به این مطالب می‌توان استفاده از این روش شبه‌سازی را در کنترل فعال زبری سطح در فرآیند بورینگ توصیه نمود که می‌تواند موضوع مطالعات بعدی باشد.

## منابع

- 1- DIN4760: Form deviations; concepts; classification system. Deutches Institut Fuer Normung, e.V., 1982.
- 2- Risbood KA, Dixit US, Sahasrabudhe AD. Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;132(1-3):203-14.
- 3- Shahabi HH, Ratnam MM. Prediction of surface roughness and dimensional deviation of workpiece in turning: a machine vision approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010;48(1-4):213-26.

- filtering. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1990;39(6):923-7.
- 20- Brandt A, Brincker R. Integrating time signals in frequency domain-Comparison with time domain integration. Measurement. 2014 1;58:511-9.
- 21- Brandt A. Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures. John Wiley & Sons; 2011.
- 22- Meko DM. Notes on Autocorrelation - Note5 - GEOS585A - 2005 [Internet]. University of Arizona: Laboratory of Tree-Ring Research; [Cited 2018 December 3]. Available from <https://www.ltrr.arizona.edu/~dmeko/geos585a.html>
- 23- Khalili K, Danesh M. Identification of vibration level in metal cutting using undecimated wavelet transform and gray-level co-occurrence matrix texture features. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2015;229(2):205-13.
- 24- Marinov V. Manufacturing Technology. 5th edition. London: Pearson Education Inc; 2006.
- 25- Groover MP. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. John Wiley & Sons; 2020.
- 26- Suresh PV, Rao PV, Deshmukh SG. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002;42(6):675-80.
- 27- ISO B. 15530-3: 2011: geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM). Technique for determining the uncertainty of measurement. Use of calibrated workpieces or measurement standards. British Standards Institute. 2011.
- 28- Raja J, Muralikrishnan B, Fu S. Recent advances in separation of roughness, waviness and form. Precision Engineering. 2002;26(2):222-35.
- 29- Fallah M. Chatter vibration control for stability improvement in deep internal turning [Dissertation]. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad. 2018.