



تعیین سطح ارتعاشات ابزار با استفاده از تبدیل موجک و مشخصه‌های هارالیک در تصویر سطح قطعه کار

مه‌دی دانش^۱، خلیل خلیلی^{۲*} و عبدالرضا اوحدی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۰۹/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۰۴

چکیده

یکی از مشکلات اصلی در بهره‌وری فرآیندهای براده‌برداری، ارتعاشات ابزار براده برداری می‌باشد. بی‌نظمی ناشی از این ارتعاشات در حین فرآیند براده برداری موجب به وجود آمدن سطحی با کیفیت پایین، کاهش دقت ابعادی قطعه کار، کاهش عمر ابزار و آسیب دیدگی اجزاء ماشین افزار مانند یاتاقان‌ها، اسپیندل، موتور سروو و سایر اجزاء آن می‌شود. در این تحقیق با استفاده از اعمال تبدیل موجک بر روی تصویر سطح قطعه کار، تاثیر ارتعاشات ابزار بر روی سطح قطعه کار، از سایر عوامل تاثیر گذار بر بافت سطح قطعه (علائم پیشروی ابزار، سایش ابزار، عیوب سطح و غیره) فیلتر شده و با استفاده از بررسی مشخصه‌های هارالیک بر روی تصویر فیلتر شده‌ای که نشان دهنده تاثیر ارتعاشات ابزار می‌باشد، روشی مبتنی بر پردازش تصویر، جهت تعیین سطح ارتعاشات ابزار براده برداری ارائه شده است. سطح ارتعاشات ابزار، با استفاده از افزایش طول تعلق ابزار کنترل شده و مقدار بی‌نظمی ایجاد شده در سطح قطعه کار به عنوان معیار تعیین سطح ارتعاشات ابزار معرفی شده است. به منظور اعتبار سنجی نتایج، ارتعاشات ابزار در راستای مماسی با استفاده از شتاب سنج نصب شده بر روی بدنه ابزار اندازه‌گیری شده است.

کلمات کلیدی: ابزار براده برداری؛ ارتعاشات؛ بافت سطح؛ تبدیل موجک؛ مشخصه‌های هارالیک.

Determination of cutting tool vibration through wavelet transform and harallic features in surface image of workpiece

M. Danesh¹, K. Khalili^{2,*} and A.R. Ohadi³

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., The University of Birjand, Birjand, Iran

² Assoc. Prof., Mech. Eng., The University of Birjand, Birjand, Iran

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

One of the main obstacles of productivity in metal cutting processes is cutting tool vibration. The vibration in metal cutting leads to unsatisfactory surface finishes and poor dimensional quality. The cutting tool vibration also diminishes the useful life of the cutting tool and machine tool's bearings, spindle, motors, servos and the related components. This paper proposes a method based on wavelet transform and harallic texture features to determine the vibration level in metal cutting. Wavelet Transform is used to filter the effect of cutting tool vibration from other sources (e.g. feed marks, tool wear and surface defects) affecting the workpiece surface. The texture of filtered image in turn is analyzed using harallic features. The vibration level of the cutting tool is controlled by increasing the overhang of the tool and the subsequent irregularity of surface texture is introduced as a criterion to determine the cutting tool vibration. In order to validate the proposed vision based method, an accelerometer was attached to the shank of the cutting tool to measure the vibration in tangential direction.

Keywords: Cutting tool; Vibration; Surface texture; Wavelet transform; Harallic features.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۶۱-۲۵۰۲۰۴۹

آدرس پست الکترونیک: khalili@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

کار به عنوان شاخصی جهت تعیین سطح ارتعاشات ابزار در نظر گرفته شده است. ارتعاشات ابزار تراشکاری با استفاده از تغییر طول تعلیق ابزار کنترل شده، سپس علائم ارتعاشات ابزار بر روی سطح قطعه کار به کمک تبدیل موجک از سایر عوامل موثر بر سطح تفکیک شده و در تعیین سطح ارتعاشات ابزار مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت طول تعلیق ابزار خصوصاً در فرآیند تراشکاری تاثیر زیادی بر کیفیت سطح قطعه کار دارد. بر اساس روشهای تئوری و کاربردی، اینکه در بستن ابزار می بایست تا حد امکان طول تعلیق ابزار کوتاه در نظر گرفته شود تا کیفیت سطح مطلوب حاصل شود امری واضح و شناخته شده است اما در مواردی مانند داخل تراشی که نیازمند استفاده از ابزاری با طول بلند می باشد و یا در روتراشی قطعاتی که هندسه قطعه کار نیازمند بلند بستن ابزار می باشد، طول تعلیق ابزار به ناچار بلند در نظر گرفته می شود و همین موضوع موجب ارتعاشات خود برانگیخته^۴ و تخریب بافت سطح می شود. پدیده ارتعاشات خود برانگیخته عمدتاً بر اثر مدهای انعطاف پذیر در جهت های شعاعی و محوری باشد. اما در مواردی که طول تعلیق ابزار زیاد است پدیده ارتعاشات خود برانگیخته می تواند در اثر نوسانات دینامیکی ابزار در جهت برشی (مماسی) ایجاد شود [۲]. به دلیل اینکه در عملیات تراشکاری، ابزار در معرض خمش قرار می گیرد سر ابزار جابجا می شود و تاثیری منفی بر سطح قطعه کار می گذارد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است ابزار را می توان یک تیر یک سر گیر داری در نظر گرفت که نیروی برشی F_c بر محور آن وارد می شود. در این حالت مقدار جابجایی ابزار از رابطه ۱ محاسبه می شود.

$$\delta = -\frac{F_c L^3}{3EI} \quad (1)$$

که در آن F_c نیروی برشی، L طول تعلیق ابزار، E مدول الاستیسیته و I ممان اینرسی مقطع ابزار می باشد. تغییر شکل الاستیک ابزار با افزایش طول تعلیق افزایش می یابد. [۳] و موجب افزایش ارتعاشات و زبری سطح [۴ و ۵] و ناپایداری شکل براده می شود [۶]. مقدار زبری سطح قابل دستیابی به مقدار زیادی به سفتی ابزارگیر (نسبت طول تعلیق به قطر ابزار) بستگی دارد (شکل ۲).

فرآیند ماشینکاری یکی از فرآیندهای تولید است که عوامل مختلفی مانند پارامترهای ماشینکاری، جنس و هندسه ابزار، و جنس قطعه کار بر آن تاثیر گذار است. یکی از عوامل تاثیر گذار در فرآیند ماشینکاری، سفتی سیستم ماشین افزار (ماشین افزار، ابزار و قطعه کار) می باشد. این موضوع یک مشکل بحرانی خصوصاً در تراشکاری قطعات نازک و بلند، بورینگ سوراخهای عمیق و فرزکاری شیارهای عمیق قطعات نازک و ماشینکاری با ابزاری با طول تعلیق زیاد می باشد. ارتعاشات ناشی از عدم سفتی سیستم ماشین افزار موجب به وجود آمدن کیفیت سطح پایین در قطعه کار و آسیب دیدگی اجزاء ماشین افزار می شود. ارتعاشی که در فرآیند ماشینکاری ایجاد می شود تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند سازه ماشین افزار، جنس و هندسه ابزار و ابزارگیر، جنس قطعه کار و پارامترهای برش قرار دارد و به طور کلی ترکیب ارتعاشات ماشینکاری بسیار پیچیده می باشد. روش های تحلیلی در پیش بینی پایداری ماشینکاری شامل روشهای نمودار لوبهای پایداری^۱ (SLD)، منحنی های نایکوئیست^۲ و تحلیل اجزاء محدود^۳ (FEM) می باشد. نتایج بدست آمده از روش تحلیلی SLD وابسته به ماشین افزار، جنس قطعه کار و هندسه ابزار می باشد. در نتیجه استفاده از SLD در کاربردهای عملی مشکل می باشد. از روش تحلیلی منحنی های نایکوئیست نیز تنها می توان در تعیین پایداری شرایط برش استفاده نمود. محدودیت مدل FEM نیز این است که نمی تواند خواص اتصال بین قطعات درگیر در ماشین افزار را در نظر بگیرد. زیرا توصیف ریاضی این خواص مشکل است. وضعیت ابزار را می توان با استفاده از سیگنالهای نیرو، ارتعاشات و انتشار صوت مورد پایش قرار داد [۱]. روش تجربی متداول در جلوگیری از ارتعاشات در فرآیند ماشینکاری تنظیم محتاطانه پارامترهای برش (سرعت برشی، پیشروی و عمق) می باشد. در این روش ها معمولاً یافتن پارامترهای برش مناسب، مبتنی بر آزمایش و آزمون و خطا می باشد. در این تحقیق اثرات ارتعاشات ابزار بر سطح قطعه

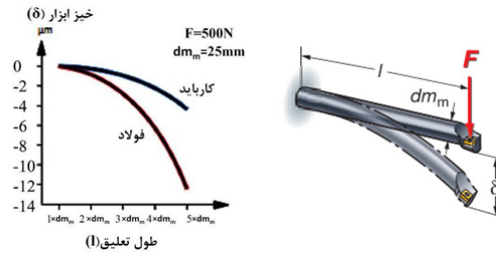
¹ Stability Lobes Diagram

² Nyquist Plots

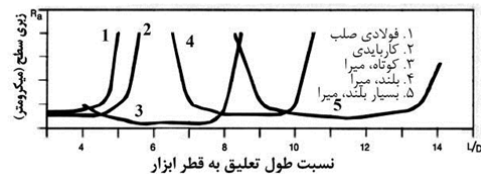
³ Finite Element Method

⁴ Chatter Vibration

ارتعاشات (O) بدست می آید. به طور کلی پیش بینی ارتعاشات ابزار با در نظر گرفتن کلیه جوانب بسیار پیچیده به نظر می رسد. در مقاله حاضر صرف نظر از تئوری های مطرح شده در ارتعاشات ابزار، روشی جهت تشخیص مقدار ارتعاشات ابزار با استفاده از پردازش تصویر بافت قطعه کار ارائه شده است. به طور کلی استفاده از تکنیکهای پردازش تصویر در تحلیل بافت سطح تا کنون با چهار هدف مختلف مورد استفاده قرار گرفته است: تشخیص عیوب سطحی قطعه کار [۱۰]، اندازه گیری زبری سطح قطعه کار [۱۱،۱۲]، ارزیابی سایش ابزار [۱۳،۱۴] و تشخیص ارتعاشات خود برانگیخته [۱۵]. با توجه به اینکه هر گونه ارتعاش ابزار تاثیر مستقیمی بر بافت سطح قطعه کار دارد می توان با مطالعه تصویر بافت سطح قطعه کار به بروز و چگونگی ارتعاش ابزار در فرآیند پی برد. نظر به اینکه وجه تمایز بافت سطح ماشینکاری شده با بافت سایر سطوح، وجود علائم پیشروی ابزار بر روی آن می باشد و به هنگام ارتعاش ابزار، این علائم در بافت سطح دچار بی نظمی می شوند می توان از این ویژگی در تحلیل بافت تصویر سطح قطعه و تشخیص ارتعاشات ابزار کار بهره برد. از آنجایی که تصویر بافت سطح قطعه کار تاثیر کلیه عوامل موثر بر بافت سطح قطعه (ارتعاشات ابزار، علائم پیشروی ابزار، سایش ابزار، عیوب سطح و غیره) را نشان می دهد، حتی به کمک روشهای تحلیل بافت متداول نیز نمی توان با دقت مطلوبی تاثیر عوامل مختلف بر سطح قطعه کار از جمله ارتعاشات ابزار را بررسی نمود. در این تحقیق به منظور تعیین سطح ارتعاشات ابزار از روی تصویر بافت سطح قطعه کار، از تبدیل موجک^۳ جهت تجزیه تصویر بافت سطح قطعه کار استفاده شده و سپس بافت سطح با استفاده از محاسبه مشخصه های هارالیک در تصویری که توسط تبدیل موجک فیلتر شده و نمایانگر تاثیر ارتعاشات ابزار می باشد بررسی شده است. به منظور اعتبار سنجی نتایج، ارتعاشات ابزار در راستای مماسی (برشی)، با استفاده از شتاب سنج نصب شده بر روی بدنه ابزار اندازه گیری شده است. تعیین سطح ارتعاشات ابزار با استفاده از تبدیل موجک و مشخصه های هارالیک در تصویر سطح قطعه کار، در سه مرحله انجام شده است. در مرحله اول با افزایش طول تعلیق ابزار و افزایش



شکل ۱- تاثیر طول تعلیق ابزار (l) بر جابجایی لبه ابزار (δ) تحت تاثیر نیروی برشی (F) [۷]



شکل ۲- تغییرات زبری سطح با افزایش نسبت طول تعلیق به قطر ابزار در انواع مختلف ابزار [۸]

نتایج سورتینو^۱ و همکارانش در بررسی تاثیر جنس ابزارگیر، هندسه ابزارگیر، هندسه لبه برش، جنس قطعه کار و پارامترهای برش بر پایداری فرآیند داخل تراشی نشان داد پایداری فرآیندی، مستقل از پارامترهای برش بیشتر به نسبت طول تعلق به قطر ابزار (L/D) وابسته است [۹]. بر اساس یافته های یوربیکاین^۲ و همکارانش [۲]، اگر چه محاسبه مقدار جابجایی استاتیکی با استفاده از فرمول تیر یک سرگیر دار در علم مقاومت مصالح به راحتی قابل محاسبه است اما برای ایجاد نمودارهای پایداری نیاز به پارامتری دینامیکی که کاملاً با مقدار استاتیکی متفاوت است می باشد. آنها جابجایی دینامیکی ابزار را که مقداری بی بعد است و نه تنها به مشخصه های دینامیکی سیستم بلکه به هندسه ابزار نیز بستگی دارد به صورت زیر تعریف نمودند:

$$v = \frac{k}{k_{cy} \cdot b} \left[\left(\frac{\omega_c}{\omega_n} \right)^2 - 1 \right] \quad (2)$$

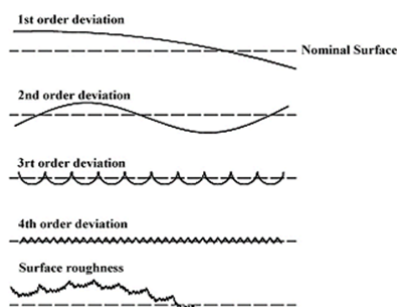
در حقیقت فاکتور جابجایی دینامیکی ابزار از سفتی مودال (k)، فرکانس طبیعی سیستم (ω_n)، نیروی برشی ویژه (k_{cy})، طول درگیری ابزار (b) در حین ماشینکاری و فرکانس

³ Wavelet Transform

¹ Sortino

² Urbikain

زبری سطح ایده آل که تنها تابعی از پیشروی و هندسه ابزار می باشد بهترین پرداخت سطح قابل دستیابی برای هندسه ابزار و پیشروی داده شده می باشد. زبری سطح ایده آل تنها در صورت حذف کامل ارتعاشات خود برانگیخته، لبه انباشته و بی دقتی در حرکات ماشین ابزار قابل دستیابی است. زبری سطح طبیعی نتیجه بی نظمی در فرآیند ماشینکاری می باشد. ارتفاع، شکل، ترتیب و جهت این بی نظمی های سطحی به عواملی مانند: متغیرهای ماشینکاری، هندسه ابزار، سایش ابزار، تشکیل لبه انباشته، ترکیب جنس ابزار و قطعه کار و خواص مکانیکی آنها و ارتعاشات بین قطعه، ابزار برشی و ماشین ابزار بستگی دارد [۱۷]. در واقع زبری سطح انحراف از سطح اسمی با مرتبه سه تا شش می باشد (شکل ۴). مرتبه انحراف در استاندارد بین المللی تعریف شده است. انحراف مرتبه اول و دوم به ترتیب مربوط به فرم و موجی بودن سطح می باشد و به سبب خطاهای ماشین ابزار، اعوجاج قطعه کار و ناهمگنی جنس قطعه کار ایجاد می باشد. انحرافات مرتبه سه و چهار مربوط به شیارهای تناوبی علائم پیشروی ابزار، شرایط ابزار برش، تشکیل براده و سینماتیک فرآیند می باشد. انحرافات مرتبه پنج و شش مربوط به ساختار جنس قطعه کار است و مرتبط با مکانیزمهای شیمیایی- فیزیکی (لغزش، نفوذ، اکسیداسیون، تنش های پس ماند و غیره) در مقیاس دانه و شبکه می باشد. انحرافات با مرتبه مختلف رو هم قرار گرفته و پروفیل زبری سطح را تشکیل می دهند [۱۸].



شکل ۴- انحرافات فرم سطح [۱۸]

۲-۲- تأثیر ارتعاشات ابزار بر بافت سطح تراشکاری

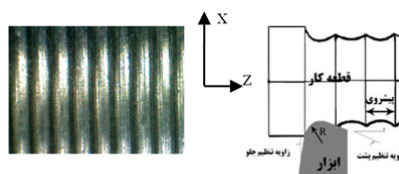
شده

در فرآیند ماشینکاری سه نوع مختلف از ارتعاشات مکانیکی به سبب عدم صلبیت سیستم ماشین ابزار (ابزار، ابزارگیر،

سطح ارتعاشات ناشی از آن، سیگنالهای ارتعاشات ابزار در حوزه زمان و فرکانس مورد تحلیل قرار گرفته است. در مرحله دوم، با استفاده از اعمال تبدیل موجک بر روی تصویر بافت سطح قطعه کار، تحلیل بافت بر روی تصویری تجزیه شده که تنها اثرات ناشی از ارتعاشات ابزار بر سطح قطعه را نشان می دهد انجام شده است. در مرحله سوم، مشخصه های بدست آمده از تصویر بافت سطح قطعه و سیگنال ارتعاشات ابزار مقایسه شده و مشخصه هایی از بافت سطح که مرتبط با افزایش ارتعاشات می باشند به عنوان شاخصی جهت تعیین سطح ارتعاشات ابزار معرفی شده اند.

۲- بافت سطح قطعه کار در فرآیند تراشکاری

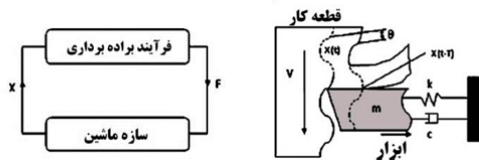
در فرآیند تراشکاری، براده با استفاده از ابزار تک لبه از قطعه استوانه ای در حال دوران جدا می شود. در حین فرآیند تراشکاری، با عبور ابزار بر روی سطح قطعه کار، یک پروفیل مارپیچی بر روی سطح قطعه ایجاد می شود که به آن علائم پیشروی گفته می شود. وجه تمایز بافت سطح ایجاد شده در فرآیند ماشینکاری نسبت به سایر سطوح، تشکیل علائم پیشروی ابزار بر سطح قطعه کار می باشد (شکل ۳). در حالت کلی، بافت به مشخصات سطحی و ظاهری یک شیء با استفاده از اندازه، شکل، دانسیته، ترتیب و تناسب اجزاء بنیادی آن گفته می شود. عبارت بافت سطح به صورت بی نظمی هایی که به دفعات در سرتاسر سطح تکرار می شود و تمایل به ایجاد الگو یا بافت دارد تعریف می شود. لازم به ذکر است روشهای زبری و بافت قابل تفکیک نیستند و به طور مشابهی مکمل یکدیگر هستند [۱۶].



شکل ۳- شکل گیری علائم پیشروی بر روی سطح قطعه کار در فرآیند تراشکاری

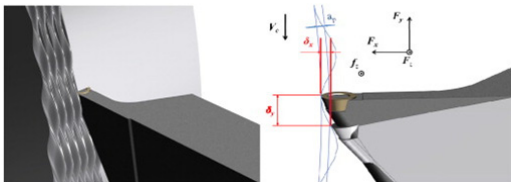
۲-۱- عوامل موثر بر بافت سطح ماشینکاری شده

برآیند زبری سطح ایجاد شده توسط ماشینکاری ترکیبی از دو مقدار مستقل زبری ایده آل و زبری طبیعی می باشد.



شکل ۵- برهم کنش فرآیند براده برداری و سازه ماشین افزار و مکانیزم باز زایی

در بیشتر موارد ابزار در جهت پیشروی ارتعاش می کند که به آن ارتعاشات خود برانگیخته نوع A گفته می شود. ارتعاشات خود برانگیخته نوع A در مواردی که طول تعلیق ابزار کوتاه و نسبت طول به قطر قطعه کار زیاد باشد اتفاق می افتد. در نوع دیگری از ارتعاشات خود برانگیخته که در اثر بلند بودن طول تعلیق ابزار ایجاد می شود و به آن ارتعاشات خود برانگیخته نوع B گفته می شود لبه برش در راستای برشی ارتعاش می کند و یا مولفه ای در این جهت دارد [۲۱،۲]. شکل ۶ نحوه تاثیر ارتعاشات ابزار در راستای برشی (مماسی) بر بافت سطح قطعه کار را نشان می دهد.



شکل ۶- تاثیر ارتعاشات خود برانگیخته ابزار در راستای مماسی بر بافت سطح قطعه در عملیات رو تراشی [۲]

شکل ۷ تاثیر ارتعاشات ناشی از افزایش طول تعلیق ابزار بر بافت سطح قطعه کار را نشان می دهد. در شکل (الف) طول تعلیق ابزار کوتاه ($L=40$) و در شکل (ب) طول تعلیق ابزار بلند ($L=110$) بسته شده است. همانطور که مشاهده می شود در شکل (ب) بافت سطح قطعه کار به علت ارتعاشات ابزار در راستای مماسی دچار بی نظمی شده است.



(الف) طول تعلیق ابزار $L=40\text{mm}$ (ب) طول تعلیق ابزار $L=110\text{mm}$
قطر ۲۰ میلیمتر $n=1000\text{Rev/min}$ ، $a_p=1\text{mm}$ و $f=0.20\text{ mm/Rev}$

شکل ۷- تاثیر ارتعاشات ناشی از افزایش طول تعلیق ابزار بر بافت سطح قطعه کار

قطعه کار و ماشین ابزار) وجود دارد. این ارتعاشات عبارتند از ارتعاشات اجباری، ارتعاشات آزاد و ارتعاشات خود برانگیخته. ارتعاشات آزاد به علت شوک و ارتعاشات اجباری ناشی از تاثیرات عدم تعادل در اجزاء ماشین ابزار مانند چرخ دنده ها، یاتاقان ها، اسپیندل و غیره ایجاد می شود. ارتعاشات آزاد و اجباری را می توان به سادگی تشخیص و حذف نمود. اما ارتعاشات خود برانگیخته به سبب طبیعت پیچیده آن هنوز به طور کامل درک نشده است [۱]. این نوع ارتعاشات گر چه می تواند در همه فرآیند های ماشینکاری به دلیل عدم سفتی کامل سیستم ماشین ابزار وجود داشته باشد ولی این موضوع یک مشکل ویژه در عملیاتی مانند تراشکاری با ابزار با طول تعلیق زیاد، قطعات نازک و بلند، بورینگ سوراخهای عمیق و فرزکاری شیارهای عمیق قطعات نازک می باشد. در چنین شرایطی ادامه عملیات به علت ارتعاشات خود برانگیخته مشکل می باشد [۱۹]. ارتعاشات خود برانگیخته به سبب رفتار ناپایدارش که باعث جابجایی نسبی زیاد بین ابزار و قطعه کار می شود نقش تعیین کننده تری در پرداخت سطح و عمر ابزار دارد [۲۰]. این نوع ارتعاشات مضرترین نوع برای هر نوع فرآیند ماشینکاری می باشد. ارتعاشات خود برانگیخته به دو دسته ارتعاشات خود برانگیخته اولیه و ارتعاشات خود برانگیخته ثانویه تقسیم می شود [۲]. ارتعاشات خود برانگیخته اولیه به سبب اصطکاک بین ابزار و قطعه کار، اثرات ترمومکانیکی و یا توسط کوپل شدن مودها^۱ ایجاد می شود و ارتعاشات خود برانگیخته ثانویه یا باز زا^۲ از برهم کنش فرآیند براده برداری و سازه ماشین ابزار ناشی می شود و سبب باز زایی^۳ سطحی موجی بر قطعه ایجاد می شود. شکل ۵ مکانیزم باز زایی را نشان می دهد. ارتعاشات باز زا، مخرب ترین نوع ارتعاشات می باشد و زمانی اتفاق می افتد که عدم صلبیت کافی در سازه ماشین ابزار موجب غلبه یافتن نیروی برشی و در نتیجه جابجایی لبه ابزار در جهت عمود بر سطح برش می شود [۱۹]. در چنین حالتی علائم پیشروی ابزار دچار تغییر شده و بافتی نامنظم و موجی حاصل می شود.

¹ Mode Coupling

² Regenerative

³ Regeneration



شکل ۸- تجهیزات به کار رفته در آزمایشهای تجربی

۳- آزمایشهای تجربی

آزمایشهای تجربی به منظور تعیین سطح ارتعاشات ابزار با استفاده از تبدیل موجک و مشخصه های هارالیک در تصویر سطح قطعه کار، توسط ماشین تراش افقی و در شرایط خشک انجام شده است. شکل ۸ تجهیزات تجربی به کار رفته را نشان می دهد. سنسور ارتعاشات بر روی بدنه ابزار نصب شده و سیگنال شتاب در حوزه زمان با نرخ ۴۸۰۰۰ نمونه بر ثانیه، توسط سیستم داده برداری و در محیط برنامه نویسی لب ویو پردازش شده است. تصویر بافت سطح قطعه نیز با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال نصب شده بر روی میز دستگاه، گرفته شده و در محیط برنامه نویسی لب ویو پردازش شده است. به منظور اطمینان از عدم تشکیل لبه انباشته و تاثیر آن بر بافت سطح قطعه کار، از قطعاتی از جنس برنج استفاده شده است. تعداد هشت قطعه با ابعاد یکسان توسط ابزاری با طول تعلیق مختلف و اینسرت های نو ماشینکاری شده و سیگنال ارتعاشات برای هر مورد ثبت شده است. تصویر برداری از نقطه ای مشخص (فاصله ثابت از سه نظام) بر روی قطعات انجام شده است. مشخصات تجهیزات به کار رفته و پارامترهای ماشینکاری در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- تجهیزات و پارامترهای ماشینکاری به کار رفته در آزمایشهای تجربی

TN50B	ماشین تراش
برنج با قطر ۲۰ میلیمتر	قطعه کار
کاربیدی بدون پوشش	نوع اینسرت
Global Test AP98	سنسور ارتعاشات
Advantech 4704	سیستم داده برداری
Insize	میکروسکوپ دیجیتال
	زبری سنج
MarSurf M 300 C (برش ۰/۸ و طول ارزیابی ۴ میلیمتر)	
عمق برش = ۱ میلیمتر	
دوران اسپندل = ۱۰۰۰ دور بر دقیقه	پارامترهای ماشینکاری
پیشروی = ۰/۲۰ میلیمتر بر دور	
۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰	طول تعلیق ابزار (میلیمتر)

۴- بررسی ارتعاشات ناشی از افزایش طول تعلیق

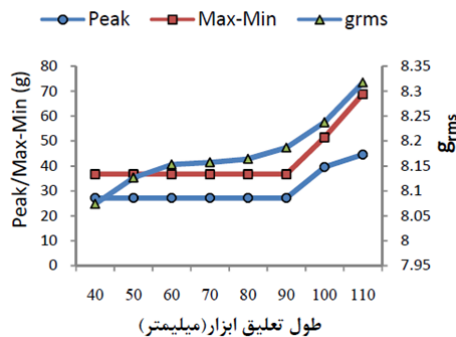
ابزار ابزار در راستای مماسی

ارتعاشات سیگنال ارتعاشات در حوزه زمان بر اساس شتاب ریشه میانگین مربع (g_{rms})، حداکثر (Peak) و اختلاف حداکثر و حداقل (Max-Min) سیگنال ارتعاشات محاسبه شده است. سطح RMS سیگنال شتاب پیوسته از زمان t_1 تا t_2 با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می شود:

$$g_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} g^2(t) dt} \quad (3)$$

که در آن t_1 تا t_2 زمان انتگرال گیری یا زمان اندازه گیری می باشد.

شکل ۹ تغییرات سطح ارتعاشات در جهت مماسی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش طول تعلیق ابزار، سطح ارتعاشات آن افزایش می یابد.

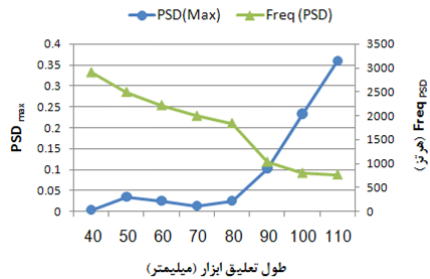


شکل ۹- تغییرات سطح ارتعاشات ابزار در جهت مماسی با افزایش طول تعلیق ابزار

در حوزه فرکانس مشخصات سیگنالهای ارتعاشات با استفاده از چگالی طیفی توان^۱ (PSD) بررسی شده است.

¹ Power Spectral Density

کاهش فرکانس طبیعی ابزار موجب افزایش جابجایی دینامیکی آن می‌شود.



شکل ۱۱- تغییرات مقدار حداکثر چگالی طیف توان (PSD_{max}) و فرکانسی که در آن حداکثر مقدار چگالی طیف توان ($Freq_{psd}$) اتفاق افتاده است بر حسب طول تعلیق ابزار

۵- تعیین سطح ارتعاشات ابزار با استفاده از تبدیل موجک و مشخصه‌های هارالیک در بافت سطح قطعه کار

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر طول تعلیق ابزار بر بافت سطح قطعه از تبدیل موجک و مشخصه‌های هارالیک استفاده شده است. ابتدا تصویر سطح با استفاده از تبدیل موجک تجزیه شده و سپس مشخصه‌های هارالیک در تصویر تجزیه شده‌ای که نمایانگر تاثیر ارتعاشات ابزار است محاسبه شده است. مشخصه‌هایی که با افزایش پارامترهای ارتعاشات ناشی از افزایش طول تعلیق ابزار مرتبط هستند به عنوان معیاری جهت تشخیص مقدار ارتعاشات ابزار از تصویر سطح قطعه کار در نظر گرفته شده‌اند.

۵-۱ تجزیه تصویر بافت سطح قطعه با استفاده از تبدیل موجک

برای اعمال تبدیل موجک بر روی تصاویر، از موجک دو بعدی استفاده می‌شود. به منظور اعمال تبدیل دوبعدی بر روی تصویر، تبدیل یک بعدی ابتدا بر روی سطرها و سپس بر روی ستون‌ها اعمال می‌شود. ثابتهای تقریب^۱ در بالاترین سطح و ثابتهای جزئیات^۲ در همه سطوح سیگنال یک بعدی

PSD یک سیگنال تصادفی $x(t)$ چگونگی توزیع توان یک سیگنال در فرکانسهای مختلف را نشان می‌دهد [۲۲]. چگالی طیفی توان یک سیگنال تصادفی $x(t)$ از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

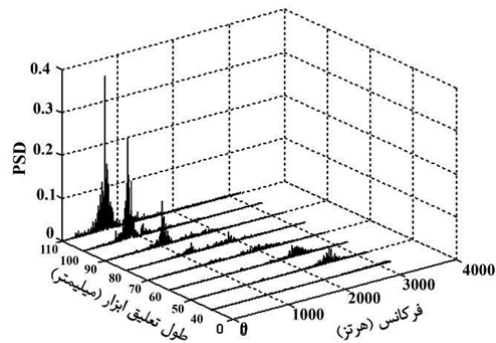
$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(f)|^2}{T} \quad (4)$$

که در آن $X_T(f)$ تبدیل فوری سیگنال می‌باشد:

$$X_T(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

مقدار PSD شاخص قابل اطمینانی جهت تشخیص ارتعاشات ابزار می‌باشد [۲۳ و ۲۴].

شکل ۱۰ تاثیر افزایش طول تعلیق ابزار بر ارتعاشات ابزار در حوزه فرکانس را نشان می‌دهد. با افزایش طول تعلیق ابزار مقدار چگالی طیف توان (PSD) سیگنال ارتعاشات افزایش می‌یابد.



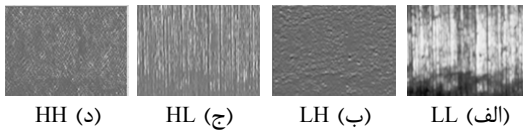
شکل ۱۰- تاثیر افزایش طول تعلیق ابزار بر چگالی طیف توانی (PSD) سیگنال ارتعاشات

در شکل ۱۱ تغییرات مقدار حداکثر چگالی طیف توان (PSD_{max}) و فرکانسی که در آن حداکثر مقدار چگالی طیف توان ($Freq_{psd}$) اتفاق افتاده است بر حسب طول تعلیق ابزار رسم شده است. این دو نمودار که از نمودار آبخاری شکل ۱۰ بدست آمده است نشان می‌دهد با افزایش طول تعلیق ابزار مقدار حداکثر چگالی طیف توان افزایش ولی فرکانس آن کاهش می‌یابد. نتایج بررسی انجام شده بر روی ارتعاشات تیر یک سر گیر دار نیز نشان داده است با افزایش طول تیر، فرکانس طبیعی آن کاهش می‌یابد [۲۵]. طبق رابطه (۲)

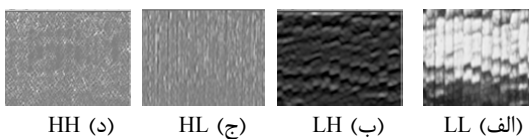
¹ Approximation Coefficients

² Detail Coefficients

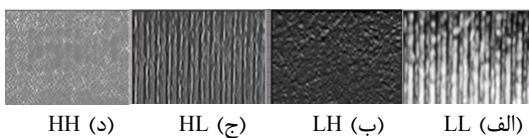
در شکل ۱۳ تبدیل موجک سه سطحی بر روی تصویر ۷- الف و در شکل ۱۴ تبدیل موجک سه سطحی بر روی تصویر ۷- ب اعمال شده است. همانطور که مشاهده می شود زیر- تصویر HL علائم پیشروی ابزار بر روی تصویر سطح قطعه کار را که به صورت عمودی قرار گرفته اند نمایان می سازد (شکل های ۱۳- ج و ۱۴- ج). زیر- تصویر LH (شکل های ۱۳- ب و ۱۴- ب) نیز علائم ارتعاشات ابزار بر روی سطح قطعه کار را که در راستای افقی قرار گرفته است به خوبی نمایان می سازد. مقایسه شکل ۱۲ و ۱۳ نشان می دهد زیر- تصویر LH نشان دهنده تاثیر ارتعاشات ابزار بر بافت سطح قطعه است و می توان از آن جهت تحلیل بافت و تعیین مقدار ارتعاشات ابزار در مرحله بعدی استفاده نمود. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود در مواردی که اینسرت دچار سایش می شود علائم پیشروی ابزار در تصویر HL تغییر می کند و می توان مجدداً از تصویر LH جهت تعیین سطح ارتعاشات ابزار بهره برد.



شکل ۱۳- اعمال تبدیل موجک بر تصویر بافت سطح قطعه کار (طول تعلیق ابزار $L=40\text{mm}$)

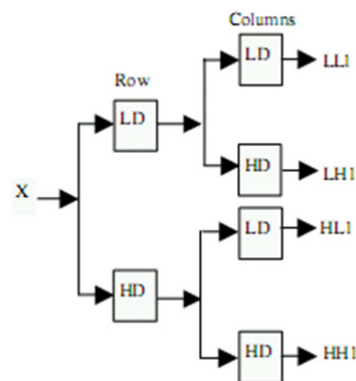


شکل ۱۴- اعمال تبدیل موجک بر تصویر بافت سطح قطعه کار (طول تعلیق ابزار $L=110$)



شکل ۱۵- اعمال تبدیل موجک بر تصویر بافت سطح قطعه کار ماشینکاری شده با اینسرت ساییده (طول تعلیق ابزار $L=110$)

ورودی محاسبه شده و سپس ثابتهای تقریب و ثابتهای جزئیات همه سطوح سیگنال دو بعدی بدست آمده است [۲۶]. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است با استفاده از تبدیل موجک، تصویر سطح قطعه کار به چهار زیر تصویر^۱ جداگانه به نام های LL1، HL1، LH1 و HH1 تجزیه می شود. تصویر LL از اعمال فیلتر پایین گذر بر روی تصویر در جهت های افقی و عمودی بدست می آید و شباهت زیادی با تصویر اصلی دارد و به آن زیر- تصویر تقریب^۲ گفته می شود. به سایر زیر- تصویرهای HL، LH و HH مولفه های جزئی^۳ گفته می شود. زیر- تصویر HL از اعمال فیلتر پایین گذر در جهت عمودی و فیلتر بالا گذر در جهت افقی بدست می آید. جزئیات قابل مشاهده در این زیر- تصویر دارای جهت گیری عمودی هستند زیرا جهت آنها عمود بر جهت فیلتر بالا گذر است و به آنها جزئیات عمودی می گویند. به طور مشابه LH از اعمال فیلتر پایین گذر در جهت افقی و فیلتر بالا گذر در جهت عمودی ایجاد می شود و دارای جزئیات افقی است. HH نیز حاصل فیلتر بالا گذر در جهت های عمودی و افقی می باشد و تنها شامل جزئیات قطری می باشد. به منظور تجزیه تصویر در سطوح بالاتر می توان تبدیل موجک را به صورت پی در پی بر روی زیر- تصویر تقریب اعمال نمود.

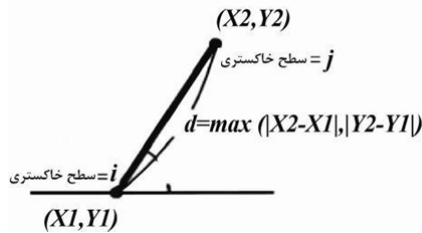


شکل ۱۲- ساختار تجزیه تصویر با استفاده از تبدیل موجک دو بعدی

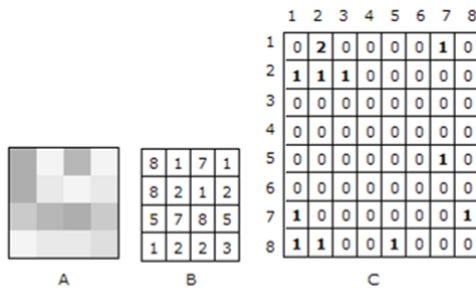
³ Sub-band Image

⁴ Approximated Sub-band Image

⁵ Detailed Components



شکل ۱۶- جفت پیکسل $(x1, y1)$ و $(x2, y2)$ در تصویر که با فاصله d و زاویه θ نسبت به محور افقی جدا شده است



شکل ۱۷- استخراج GLCM در جهت صفر درجه

بی نظمی^۱:

$$Entropy = -\sum_i \sum_j p(i, j) \log(p(i, j)) \quad (6)$$

گشتاور دوم زاویه ای یا انرژی^۲:

$$Energy = \sum_i \sum_j p(i, j)^2 \quad (7)$$

هم سنجی^۳:

$$Contrast = \sum_i \sum_j |i - j|^2 p(i, j) \quad (8)$$

گشتاور اختلاف معکوس یا همگنی^۴:

$$Homogeneity = \sum_i \sum_j \frac{p(i, j)}{1 + (i - j)^2} \quad (9)$$

همبستگی^۵:

$$Correlation = \sum_i \sum_j \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)p(i, j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (10)$$

¹ Entropy

² Energy

³ Contrast

⁴ Homogeneity

⁵ Correlation

پس از تجزیه تصویر بافت سطح با استفاده از تبدیل موجک و بدست آمدن تصویر مناسب که نمایانگر تاثیر ارتعاشات ناشی از افزایش طول تعلیق ابزار است، با استفاده از مشخصه های هارلیک بافت سطح مورد تحلیل قرار گرفته است.

۵-۲ تحلیل تصویر بافت سطح قطعه با استفاده از محاسبه مشخصه های هارلیک در تصویر تجزیه شده توسط تبدیل موجک

هارلیک و همکارانش [۲۸،۲۷] مشخصه هایی آماری مرتبه دوم بر اساس ماتریس هم اتفاقی سطح خاکستری^۱ یا GLCM را جهت تحلیل بافت تعریف نمودند. در حال حاضر نیز این پارامترها به طور وسیعی جهت تحلیل بافت مورد استفاده قرار می گیرد. این روش اطلاعاتی در مورد احتمال اتصال یک جفت پیکسل که می تواند شرایط خاصی را ارضاء کند فراهم می کند. به منظور استخراج مشخصه های هارلیک ابتدا ماتریس GLCM از تصویر بافت $I(x, y)$ ایجاد می شود.

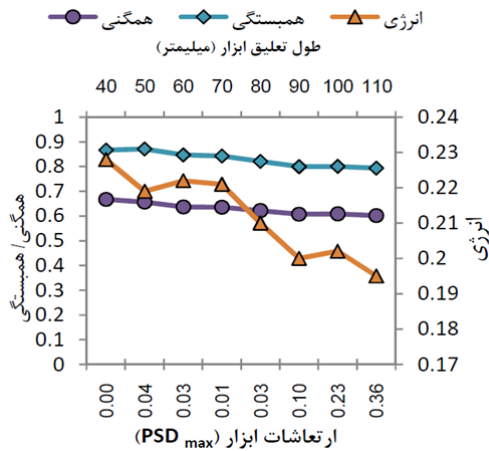
GLCM بر اساس سه پارامتر تشکیل می شود. این پارامترها عبارتند از: شرایطی که ارتباط بین یک پیکسل خاص و پیکسل های همسایه اش ارزیابی می شود، جهتی که این شرایط ارزیابی می شود و فاصله یک پیکسل خاص و پیکسل های همسایه اش (شکل ۱۶). در این تحقیق، فاصله d برابر با ۱ پیکسل و θ نود درجه در نظر گرفته شده است که در آن GLCM یک ماتریس $P(i, j)$ است که تعداد دفعاتی که مقدار پیکسل i در سمت راست پیکسل j رخ داده است را نشان می دهد. به عنوان مثال در نمونه بافت نشان داده شده در شکل ۱۷ مقدار پیکسل ۲ دو مرتبه در سمت راست مقدار پیکسل ۱ قرار گرفته است. بنا بر این $P(1, 2) = 2$ و به طور مشابه $P(8, 1) = 1$ زیرا تنها یک بار مقدار پیکسل ۱ در سمت راست مقدار پیکسل ۸ قرار گرفته است.

پس از تشکیل ماتریس GLCM مشخصه های هارلیک از این ماتریس استخراج می شود. مشخصه های هارلیک استفاده شده در ادامه توضیح داده می شود.

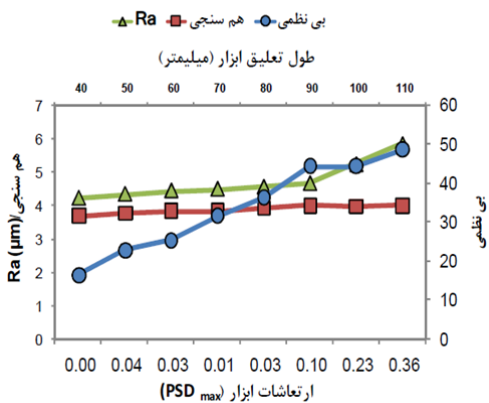
اگر $\phi(i, j)$ آیین آرایه در ماتریس GLCM باشد

مشخصه های هارلیک به صورت زیر تعریف می شود:

¹ Gray Level Co occurrence Matrix



شکل ۱۸- تاثیر ارتعاشات ابزار بر مشخصه های انرژی، همبستگی و همگنی تصویر بافت سطح قطعه کار



شکل ۱۹- تاثیر ارتعاشات ابزار بر زبری سطح و مشخصه های بی نظمی و هم سنجی تصویر بافت سطح قطعه کار

مستقل از سایر عوامل موثر بر بافت سطح مورد بررسی قرار داد. تحلیل بافت سطح قطعه کار با استفاده از مشخصه های هارالیک در تصویر تجزیه شده توسط تبدیل موجک که نمایانگر تاثیر ارتعاشات ابزار می باشد (شکل های ۱۸ و ۱۹) نشان می دهد با افزایش طول تعلیق ابزار و ارتعاشات ناشی از آن مشخصه های انرژی، همبستگی و همگنی بافت سطح کاهش و مشخصه های بی نظمی و هم سنجی افزایش می یابد، که همگی نشان دهنده افزایش بی نظمی و تخریب سطح می باشد. مشخصه بی نظمی دارای حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات بافت سطح در اثر افزایش ارتعاشات ابزار

که در آن μ_x و μ_y میانگین ها و σ_x و σ_y واریانسهای ماتریس هم اتفاقی می باشد.

همگنی میزان یکنواخت بودن توزیع المانهای GLCM در قطر آن می باشد. این بدان معناست که اگر المانهای GLCM به صورت قطری توزیع شده باشد یکنواختی بیشتر است زیرا در این حالت $|z - \bar{z}|$ کمتر است. هم سنجی عدم تشابه بین جفت پیکسل ها در کل تصویر است. عناصر بافت در صورتی همسان خواهند بود که عناصر ماتریس آن مشابه باشند. به منظور ارزیابی تشابه از هم سنجی استفاده می شود.

در شکل ۱۸ تاثیر افزایش ارتعاشات ناشی از افزایش طول تعلیق ابزار بر مشخصه های انرژی، همبستگی و یکنواختی تصویر بافت سطح قطعه کار نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش طول تعلیق ابزار و ارتعاشات ناشی از آن مشخصه های انرژی، همبستگی و یکنواختی کاهش می یابد. در شکل ۱۹ تاثیر طول تعلیق ابزار بر مشخصه های بی نظمی و هم سنجی تصویر بافت و همچنین زبری سطح قطعه کار نشان داده شده است. با افزایش ارتعاشات ابزار بی نظمی و هم سنجی بافت سطح افزایش می یابد.

۶- بحث و نتیجه گیری

نتایج بررسی انجام شده در این تحقیق بر روی تعیین سطح ارتعاشات ابزار با استفاده از تبدیل موجک و مشخصه های هارالیک در تصویر سطح قطعه کار نشان می دهد تبدیل موجک می تواند علائم ارتعاش ابزار بر روی سطح قطعه کار را به خوبی از علائم پیشروی و سایش ابزار، تفکیک و برجسته سازی نماید. با توجه به شکل ۹ با افزایش طول تعلیق ابزار، مقدار حداکثر، اختلاف حداقل و حداکثر و مربع میانگین ریشه سیگنال شتاب افزایش می یابد و علاوه بر این شیب تغییرات آنها نیز افزایش چشمگیری دارد. به طور مشابه نتایج تحلیل در حوزه فرکانس در شکل های ۱۰ و ۱۱ نیز نشان داد با افزایش طول تعلیق ابزار، مقدار حداکثر چگالی طیف توان افزایش می یابد ولی این افزایش در فرکانس کمتری اتفاق می افتد. بررسی انجام شده در تحلیل بافت سطح قطعه کار نیز نشان داد با استفاده از اعمال تبدیل موجک بر روی تصویر بافت سطح قطعه کار، می توان اثرات ناشی از ارتعاشات ابزار بر روی بافت سطح قطعه کار را به صورت

- based on image amplitude parameters of machined surfaces-an experimental approach. *Journal of metrology society of India* 23(1): 35-54.
- [14] Shahabi HH, Ratnam MM (2009) In-cycle monitoring of tool nose wear and surface roughness of turned parts using machine vision. *Int J Adv Manuf Technol* 40: 1148-1157.
- [15] Szydłowski M, Powalka B (2012) Chatter detection algorithm based on machine vision. *Int J Adv Manuf Technol* 62: 517-528.
- [16] Myshkin NK, Grigoriev AY, Chizhik SA, Choi KY, Petrokovets MI (2003) Surface roughness and texture analysis in microscale. *Wear* 254: 1001-1009.
- [۱۷] بوٹ روید جفری، نایت وینستون ای (۱۳۸۷) مبانی ماشینکاری و ماشینهای ابزار. ترجمه محمد رضا خوتی و محمد رضا افضل، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی: ۱۷۴-۱۸۱.
- [18] Lu C (2008) Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of material processing technology* 205: 439-450
- [19] Childs T (2000) *Metal machining theory and applications*. Arnold: 281-283.
- [20] Kayhan M, Budak E (2009) An experimental investigation of chatter effects on tool life, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, Part B. Journal of Engineering Manufacture* 223: 1455-1463.
- [21] Urbikain G, Lacalle LN, Campa FJ, Fernandez A, Elias A (2012) Stability prediction in straight turning of a flexible workpiece by collocation method. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 54(5): 73-81.
- [22] Howard RM (2002) *Principles of random signal analysis and low noise design: The power spectral density and its applications*. Wiley-IEEE Press, 1st edition.
- [23] Tsai SY, Eman KF, Wu SM (1980) Chatter suppression in turning, *NAMRC proceedings*: 389-402.
- [24] Dimla E Dimla S (2000) Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40: 1073-1098
- [25] Sanpreet SA (2012) Study of vibration characteristics of cantilever beams of different materials, *MSc Thesis, Thapar University*: 47-71.
- [26] Strickland RN, Member S, Hahn H (1997) Wavelet transform methods for object detection and recovery, *IEEE transactions on image processing* 6(5): 724-735.
- [27] Haralick R (1978) Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*: 45-69.
- [28] Haralick R, Shanmugam K, Dinstein I (1973) Textural features for image classification. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 3(6): 610-621.
- می باشد و می توان از آن به عنوان معیاری جهت تشخیص مقدار ارتعاشات ابزار استفاده نمود.
- ### مراجع
- [1] Siddhpura M, Paurobally R (2012) A review of chatter vibration in turning. *International Journal of Machine Tool & Manufacture* 51: 27-47.
- [2] Urbikain G, Fernandez A, Lopez de Lacalle LN, Gutierrez ME (2013) Stability lobes for general turning operations with slender tools in the tangential direction. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 67: 35-44.
- [3] Kiyak M, Kaner B, Sahin I, Aldemir B, Cakir O (2010) The dependence of tool overhang on surface quality and tool wear in the turning process. *Int J Adv Manuf Technol* 51: 431-438.
- [4] Kassab SY, Khoshnaw YK (2007) The effect of cutting tool vibration on surface roughness of workpiece in dry turning operation. *Eng Tech* 25(7): 879-889.
- [5] Kotaiah KR, Srinivas J, Sekar M (2009) Prediction of optimal stability states in inward-turning operation using neurogenetic algorithms. *Int J Adv Manuf Technol* 45: 679-689.
- [6] Nurul Amin AKM, Nashron FR, Zubaire WWD (2006) Role of the frequency of secondary serrated teeth in chatter formation during turning of carbon steel AISI 1040 and stainless steel. *Proc 1st Int. Conf & 7th AUN/SEED-Net, Fieldwise Semin Manuf Mater Process*: 181-186.
- [7] Sandvic (2005) Switch to hard-part turning http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Hard_part_turning/C-1040-069.pdf
- [8] Sandvic, Toolholder selection, http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Metalworking_Products_061/tech_a_4.pdf.
- [9] Sortino M, Totis G, Prospero F (2012) Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 61: 58-70.
- [10] Blackledge J, Dubovitskiy D (2008) A surface inspection machine vision system that includes fractal texture analysis. *International Society for Advanced Science and Technology, Journal of Intelligent Systems* 3(2): 76-89.
- [11] Dhanasekar B, Ramamoorthy B (2006) Evaluation of surface roughness using an image processing and machine vision system. *Journal of metrology society of India* 21(1): 9-15.
- [12] Danesh M, Khalili K (2012) Vision based statistical analysis of turned surface for roughness measurement. *Science Series Data Report* 4(12): 60-70.
- [13] Prasad BS, Sarca MMM (2008) Measurement of cutting tool condition by surface texture analysis