



اختلاف پتانسیل در یک محیط دی‌الکتریک قرار می‌گیرند و با ایجاد میدان الکتریکی، الکترون‌های آزاد تحت تأثیر نیروهای الکترواستاتیکی قرار می‌گیرند و با افزایش سرعت به سمت قطعه کار حرکت می‌کنند. این برخورد بین الکترون‌ها و مولکول‌های دی‌الکتریک، جرقه‌هایی را ایجاد می‌کند و الکترون‌های پرسرعت با قطعه کار برخورد کرده و انرژی حرکت آنها به گرما تبدیل شده و ماده کار ذوب و تبخیر می‌شود. ماشینکاری تخلیه الکتریکی به دلیل عدم اعمال نیرو و کاهش منطقه متأثر از ماشینکاری از دقت بسیار بالایی در ماشینکاری مواد سخت با هندسه‌های پیچیده برخوردار است که در صنایع مدرن مانند هوافضا، هسته‌ای، زیست پزشکی و غیره کاربرد پیدا می‌کند. [۵-۳]. از مزیت‌های این روش به عدم نیاز به نیروی مکانیکی، امکان ماشینکاری در جهت‌های مختلف و عدم وابستگی به سختی ماده می‌توان اشاره کرد [۶]. این نوع ماشینکاری دارای انواع مختلفی از جمله تخلیه الکتریکی سیمی، تخلیه الکتریکی مخلوط پودری و تخلیه الکتریکی دای سینک می‌باشد. تفاوت ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی با نوع معمولی آن در استفاده از یک سیم نازک به قطر  $0/3$  میلی‌متر و یا کمتر به عنوان الکترود می‌باشد [۷]. نوع دای سینک این ماشینکاری نیز کاربردهای بسیاری در زمینه ساخت قالب‌های تزریقی و دیاکاست دارد [۸].

مطالعات نظری و تجربی صورت گرفته در زمینه پرداخت سطوح نشان می‌دهد کیفیت سطوح ماشینکاری شده تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله ماشین‌آلات و تجهیزات، شرایط برش، سایش ابزار، همچنین پارامترهای فرایند ماشینکاری شامل سرعت، عمق برش، هندسه ابزار و غیره قرار می‌گیرند [۹]. ابزارها به جهت شرایط کاری آنها همیشه تحت تأثیر فشار و دماهای مختلف در معرض خطرانی چون، شکستگی، بریدگی، خستگی و سایش قرار می‌گیرند. از این رو، صنایع، نیازمند استفاده از ابزاری با استحکام بیشتر می‌باشند. از سوی دیگر، تنظیم نادرست پارامترهای ماشینکاری می‌تواند منجر به شکست قطعات، ایجاد خراش، زبری سطح نامناسب و در نتیجه کیفیت سطح نامطلوب شود. بنابراین، پرداخت سطح در راستای دستیابی به کیفیت سطح مطلوب برای رفتار عملکردی قطعه از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۰]. بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه پرداخت سطح، تخمین پروفیل زبری سطح و بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری در جهت کاهش زبری سطح می‌باشد [۱۱].

هر سطح ماشینکاری شده از سه بخش اصلی زبری سطح، موج سطح و فرم سطح تشکیل می‌شود که وجه تمایز آنها از یکدیگر طول موج آنهاست. زبری سطح به ناهمواری‌های روی سطح اطلاق می‌گردد و کوتاه‌ترین طول موج‌ها را در بر می‌گیرد. به همین ترتیب پروفیل موج سطح ناهمواری‌هایی با طول موج‌های بلندتر را نسبت به زبری سطح شامل می‌شود. و فرم سطح به بلندترین طول موج سطح گفته می‌شود [۱۲].

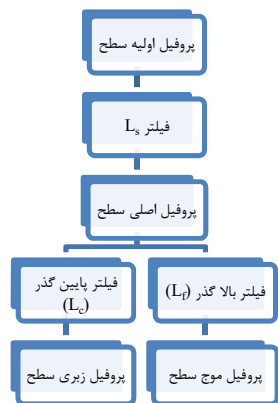
در این راستا، زبری سطح به عنوان یکی از مهمترین موضوعات در پرداخت سطح، به دلیل اهمیت آن در مسائل مختلف از جمله اصطکاک، تغییر شکل تماس، رسانش گرما، جریان الکتریکی و سفتی اتصالات تماس برای چندین دهه موضوع پژوهش‌های تجربی و نظری بوده است. در این مطالعات، روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری زبری یک سطح ارائه شده است که به دو روش کلی روش‌های تماسی و غیرتماسی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۳]. در روش تماسی، ایجاد پروفیل

سطح به وسیله‌ی یک قلم انجام می‌شود که به صورت عمودی بر روی سطح کشیده می‌شود و با توجه به حرکت آن، پروفیل سطح و مقادیر پارامترهای زبری سطح را ثبت می‌کند. اولین مورد ابزار قلم در سال ۱۹۳۳ مورد استفاده قرار گرفت و در ادامه در سال ۱۹۳۹ تجاری‌سازی شد. از مشکلات اصلی این روش می‌توان به فشار تماس قلم اشاره کرد که ممکن است باعث ایجاد خراش‌هایی روی سطح گردد [۱۰]. در همین راستا و با پیشرفت فناوری برای غلبه بر مشکلات روش تماسی، روش‌های غیرتماسی معرفی شدند که عمدتاً بر پایه نور یا صوت می‌باشند. در سال ۱۹۸۳، یک پروفیل نوری غیرتماسی بر اساس اصل تداخل سنجی نوری دو پرتو ساخته شد [۱۴]. کامگوم و همکاران امکان استفاده از میکروسکوپ نوری برای تشخیص زبری سطح قطعات بدون تماس را نشان دادند [۱۵]. پونتس و همکاران با معرفی یک روش براساس شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به تخمین زبری سطح پرداختند که بطور قابل ملاحظه‌ای در کاهش خطای تخمین زبری سطح موثر بود [۱۶]. گوپتا و رامان زبری سطح یک قطعه کار را با استفاده از تصاویر نور لیزر منعکس شده از قطعه کار اندازه‌گیری کردند [۱۷]. رانگشنگ و همکاران زبری یک سطح را با بهره‌گیری از توزیع شدت پراکندگی نور لیزر بدست آوردند [۱۸].

در ادامه با ابداع فناوری فیلتر کردن، روش‌های مختلف این فناوری در زمینه استخراج و اندازه‌گیری زبری سطوح ماشینکاری شده به کار برده شد که از مهمترین آنها می‌توان به فیلتر گاوسی، فیلتر اسپیلاین، فیلتر موجک و غیره اشاره کرد [۱۹]. اساس کار روش‌های فیلتر کردن بر پایه طول موج و فرکانس می‌باشد. بطوری که این روش‌ها به استخراج پروفیل زبری سطوح با جداسازی طول موج‌های بلند از طول موج‌های کوتاه سطح می‌پردازند [۲۰]. از چندین دهه پیش تا کنون فناوری فیلتر کردن بیشترین کاربرد را در جداسازی و اندازه‌گیری زبری سطوح به خود اختصاص داده است. در سال ۱۹۷۵ فیلترهای 2RC ارائه شده در اولین ویرایش استاندارد ISO3274 برای جداسازی اجزای مختلف سطح اعمال شد که به دلیل غیرخطی بودن خود فیلتر نتیجه مطلوبی در انعکاس بافت سطح نداشت [۲۱]. در سال ۱۹۷۹ راجا و همکاران تبدیل فوریه سریع و فیلتر گاوسی سنتی را به منظور استخراج زبری سطح معرفی کردند [۲۲]. در سال ۱۹۹۶ کریستک یک الگوریتم تلفیق سریع را بر اساس رابطه بازگشتی توابع وزن پیشنهاد کرد که موجب سرعت بخشیدن فرایند استخراج زبری سطح توسط فیلترهای گاوسی شد [۲۳]. اگرچه فیلترهای گاوسی رایج‌ترین فیلترهای مورفولوژی سطح می‌باشند ولی با این حال، این فیلترها توانایی حذف اثرات اعوجاج نقاط ابتدایی و انتهایی پروفیل سطح را ندارند. در سال ۱۹۹۹ چن و همکاران با ارائه تبدیل موجک به ارزیابی خصوصیات یک سطح پرداختند که تحت عنوان تبدیل موجک متداول مطرح شد [۲۴]. در ادامه جیانگ و همکاران با استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر موجک، برتری تبدیل موجک را در استخراج زبری سطح نسبت به سایر فیلترها اثبات کردند [۲۵]. در میان فیلترهای ارائه شده، فیلتر گاوسی و تبدیل موجک از توانایی بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردارند. با این حال هر دو روش دارای محدودیت‌هایی هستند که مهمترین آنها الزامی بودن استفاده از توابع از پیش تعیین شده در این روش‌ها می‌باشد [۱۲]. در سال‌های اخیر روش‌های مبتنی بر بینایی ماشین به دلیل دقت بسیار بالای آنها مورد توجه پژوهشگران حوزه

ماشینکاری شده، اصلی‌ترین بخش آن یعنی زبری سطح مورد بررسی قرار می‌گیرد که این امر از طریق محاسبه پارامترهای زبری سطح صورت می‌پذیرد. پارامترهای زبری یک سطح، توصیف کننده ساختار و ویژگی‌های نامنظمی‌های موجود روی سطح می‌باشند و در سه دسته کلی پارامترهای دامنه، پارامترهای مکان‌مند و پارامترهای ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند. پارامترهای دامنه انحرافات عمودی سطح را دربر می‌گیرند و از اهمیت بسیار بالاتری نسبت به سایر پارامترها برخوردارند. از مهمترین پارامترهای دامنه می‌توان به میانگین حسابی ارتفاع سطح، ریشه میانگین مربعات ارتفاع سطح، بیشینه ارتفاع کلی سطح، خمیدگی سطح و کشیدگی سطح اشاره کرد. پارامترهای مکان‌مند در اندازه‌گیری ویژگی‌های افقی انحرافات پروفیل کاربرد دارند و پارامترهای ترکیبی، ترکیبی از ویژگی‌های دو نوع پارامتر دیگر می‌باشند [۲۹].

همانطور که پیش‌تر بیان شد روش‌های متنوعی برای استخراج زبری سطح و پارامترهای آن وجود دارند. اغلب روش‌های مذکور برای جداسازی زبری سطح از موج سطح معیارهای ارائه شده در استانداردهای بین‌المللی را مورد استفاده قرار می‌دهند که در این پژوهش نیز بر این مبنا عمل خواهد شد. الگوریتم استخراج پروفیل زبری سطح و پارامترهای آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- الگوریتم استخراج پروفیل زبری و موج از پروفیل اولیه سطح

مطابق آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، بعد از انجام عملیات پرداخت سطح توسط ماشین‌آلات براده‌برداری، بافت سطح بدست آمده به عنوان سطح اولیه در نظر گرفته می‌شود و به همین ترتیب پروفیل‌های دو بعدی استخراج شده از این سطح نیز پروفیل‌های اولیه محسوب می‌شوند. فیلترهای مختلفی با طول موج‌های متفاوت روی سطوح اولیه ماشینکاری شده اعمال می‌شوند که هرکدام به جداسازی بخش‌های مختلفی از بافت سطح می‌پردازند. فیلترهایی با طول موج‌های بسیار کم ( $L_s$ ) با هدف حذف نویزهای سطح بر روی پروفیل اولیه اعمال می‌شوند. در گام‌های بعد با عبور پروفیل اصلی از فیلترهای پایین‌گذر ( $L_c$ ) و بالا گذر ( $L_f$ ) با طول موج قطع مناسب، به ترتیب پروفیل‌های زبری سطح و موجی سطح استخراج می‌شوند. انتخاب طول موج قطع مناسب به میزان اطلاعات موردنیاز دریافتی از سطح و نوع عملیات ماشینکاری بستگی دارد. اگر طول موج قطع انتخابی مقدار بسیار کوچک یا بسیار بزرگی داشته باشد توانایی جداسازی اجزای تشکیل‌دهنده بافت سطح از یکدیگر را به درستی نخواهد داشت. از

پرداخت سطح قرار گرفته است [۱۱]. کادیرگاما و همکاران با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌های استاتیکی و ریاضی به مدل‌سازی تخمینی زبری سطح و بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری یک قطعه آلایژ آلومینیومی پرداختند [۲۶]. پال و همکاران با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی مدل پیش‌بینی زبری سطح را در عملیات ماشینکاری توسعه بخشیدند [۲۷]. سانجی و همکاران با مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی زبری سطح در صنعت حفاری پرداختند و نتایج بدست آمده را با نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی مقایسه کردند [۲۸].

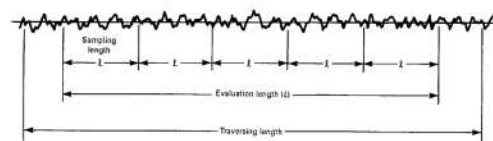
با پیشرفت علم و ظهور پردازش سیگنال، به تدریج مطالعات در زمینه پرداخت و استخراج زبری سطوح با روش‌های مختلف آن گسترش یافت که از جمله مهمترین آنها روش تجزیه مود تجربی می‌باشد. در سال ۲۰۲۱ مارکووا و همکاران با استفاده از روش تجزیه مود تجربی پروفیل میانگین و زبری سطوح ماشینکاری شده را استخراج کرده و نتایج بدست آمده را با نتایج فیلتر موجک و فیلتر گاوسی اعمال شده مقایسه کردند [۱۲].

در پژوهش حاضر یک روش نوین با استفاده از روش تجزیه مود تجربی و تبدیل فوریه برای استخراج و تخمین پارامترهای زبری سطوح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی ارائه شده است. از آنجایی که سطوح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی دارای هیچگونه الگوی مشخص در بافت اولیه سطح نمی‌باشند، جداسازی پروفیل زبری سطح از پروفیل موج سطح به سختی امکان‌پذیر است. از طرفی در تمامی روش‌های پیشین ارائه شده بر مبنای تجزیه مود تجربی هیچگونه معیار کمی مشخصی برای جدا کردن تعداد توابع مود ذاتی تشکیل‌دهنده پروفیل زبری از سایر پروفیل‌های سطح ارائه نشده است. از این رو در این پژوهش برای برطرف کردن دو مشکل بیان شده یک معیار کمی معین با بهره‌گیری از تبدیل فوریه، جهت تعیین پروفیل سطوح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی ارائه می‌شود. بر این اساس، ابتدا روش استاندارد استخراج پروفیل زبری یک سطح و پارامترهای مربوط به آن برای پروفیل استاندارد بدست آمده از یک سطح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه یک فیلتر گاوسی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB روی پروفیل مورد مطالعه اعمال شده و نتایج آن با نتایج مرجع ارائه شده مقایسه شده است. در بخش چهارم روش تجزیه مود تجربی به طور کامل ارائه شده و توابع پایه تشکیل‌دهنده پروفیل مورد مطالعه بدست آمده است. در بخش پنجم روش پیشنهادی استخراج پروفیل زبری توصیف و نحوه‌ی اعمال آن روی پروفیل مطالعه شده است و در بخش آخر، به منظور صحت‌سنجی عملکرد روش پیشنهادی در استخراج پروفیل زبری سطوح، این روش بر روی پروفیل‌های استاندارد بدست آمده از سطوح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی اعمال شده و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از فیلتر گاوسی و نتایج مرجع ارائه شده برای این پروفیل‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- استخراج زبری سطح و پارامترهای آن

با توجه به اهمیت کیفیت سطوح ماشینکاری شده در صنایع مختلف، تلاش و رقابت برای دستیابی به یک سطح با پرداخت مطلوب در این صنایع ادامه دارد. بنابراین، برای پی بردن به کیفیت یک سطح

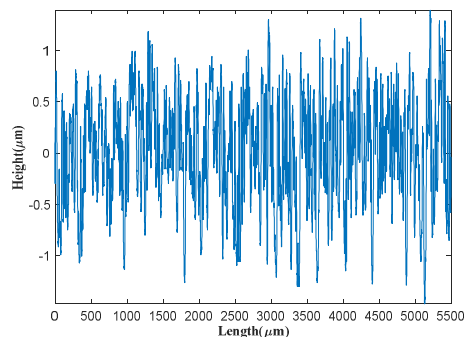
جمله راهکارهای ارائه شده در این زمینه، روش پیشنهادی سازمان استاندارد مهندسیین مکانیک آمریکا به عنوان یکی از متداولترین روشها می باشد که در اکثر پژوهش های ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق این روش برای مطالعه هر پروفیل سطح، طول ارزیابی<sup>۱</sup> و طول پیمایش<sup>۲</sup> پروفیل بصورت جداگانه تعریف می شوند. طول ارزیابی بخشی از طول پیمایش پروفیل می باشد که برای محاسبه پارامترهای سطح بعد از حذف ابتدا و انتهای طول پیمایش در نظر گرفته می شود. علاوه بر این طول نمونه برداری<sup>۳</sup> معمولاً یک پنجم طول ارزیابی در محاسبه پارامترهای زبری سطح در نظر گرفته می شود که در شکل ۲ نشان داده شده است [۳۰].



شکل ۲- طرحواره طول های ردیابی، ارزیابی و نمونه برداری برای یک پروفیل سطح [۲۱]

همچنین مطابق آنچه در استاندارد ISO3274 [۲۱] آمده است، انتخاب طول موج قطع متناسب با طول نمونه برداری انجام می پذیرد، به عبارت دیگر، طول موج قطع در نظر گرفته شده نباید از طول نمونه برداری کمتر باشد زیرا در این صورت عمل فیلتر کردن و جداسازی زبری پروفیل به درستی انجام نخواهد شد. طول موج قطع پیشنهادی سازمان استانداردسازی در بازه ۰/۸ تا ۸ میلی متر می باشد که از رایج ترین آنها به ۰/۲۵، ۰/۸ و ۲/۵ میلی متر می توان اشاره کرد [۲۱].

پروفیل مورد مطالعه در پژوهش حاضر که در شکل ۳ نمایش داده شده است، یک پروفیل بدست آمده از یک سطح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی است. این پروفیل توسط محققین دانشگاه هادرسفیلد ارائه شده که با یک پروفیل استاندارد با پارامتر زبری میانگین ارتفاع حسابی متوسط ۰/۴ میکرومتر کالیبره شده است [۳۱].



شکل ۳- پروفیل مورد مطالعه [۳۱]

این پروفیل دارای طولی به اندازه ۵۵۰۰ میکرومتر بوده و بازه ارتفاع برای آن بین ۲- تا ۲ میکرومتر متغیر است. همچنین یک فیلتر گاوسی با طول موج قطع ۰/۸ میلی متر بر روی این پروفیل اعمال شده و نتایج بدست آمده برای پارامترهای زبری این پروفیل ارائه شده است که در ادامه با نتایج روش پیشنهادی مقایسه خواهد شد. با توجه به اینکه در میان پارامترهای زبری، پارامترهای  $R_a$  و  $R_q$  از اهمیت بالاتری نسبت به سایر پارامترها برخوردارند و در اکثر مطالعات این پارامترها اندازه گیری و مورد مطالعه قرار گرفته اند، در این پژوهش نیز تمرکز اصلی روی محاسبه این دو پارامتر خواهد بود. پارامتر میانگین حسابی ارتفاع که تحت عنوان خط میانگین مرکزی شناخته می شود از جمله رایج ترین پارامترهای پروفیل زبری سطح محسوب می شود. این پارامتر میانگین ارتفاع مطلق پروفیل از خط میانگین را در طول نمونه برداری نشان می دهد. تعریف ریاضی برای این پارامتر بصورت ذیل می باشد.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (1)$$

دیگر پارامتر مهم یک پروفیل زبری سطح، پارامتر ریشه میانگین مربعات آن پروفیل می باشد و رابطه ریاضی آن بصورت زیر مطرح می گردد.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z(x)^2 dx} \quad (2)$$

در روابط فوق،  $z(x)$  نقاط ارتفاع بصورت تابعی از موقعیت مکانی  $x$  و  $L$  طول نمونه برداری سطح می باشد.

### ۳- فیلتر گاوسی

پربکاربردترین فیلتر استفاده شده در جداسازی پروفیل زبری سطوح، فیلتر گاوسی می باشد که توسط سازمان بین المللی استانداردسازی مورد تأیید قرار گرفته است. این فیلتر که به عنوان یک فیلتر پایین گذر شناخته می شود، داده های فیلتر شده را با استفاده از یک تابع وزن دهی گاوسی و انجام عملیات تلفیق بدست آورده و روی پروفیل در هر موقعیت اعمال می کند. تابع وزن دهی گاوسی برای یک پروفیل بصورت زیر تعریف می شود [۳۲].

$$h(x) = \frac{1}{\omega_c} e^{-\pi \left(\frac{x}{\omega_c}\right)^2} \quad (3)$$

که در این رابطه  $h(x)$  تابع وزن دهی،  $x$  فاصله از نقطه مرکزی تابع وزن دهی گاوسی و  $\omega_c$  طول موج قطع فیلتر را نشان می دهند و  $\alpha$  به عنوان یک ضریب با مقدار ثابت ۰/۴۶۹۷، برای انتقال ۵۰٪ تابع توزیع گاوسی به عنوان طول موج قطع، تعریف می شود [۳۲]. با اعمال این فیلتر پروفیل موج سطح از داده های فیلتر شده بدست می آید و اختلاف بین پروفیل اصلی و پروفیل موج سطح، موجب تشکیل پروفیل زبری سطح می گردد. در این پژوهش یک فیلتر گاوسی با طول موج قطع ۸۰۰ میکرومتر با استفاده از نرم افزار MATLAB بر روی پروفیل مورد بررسی اعمال شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Evaluation Length  
<sup>2</sup> Traversing Length  
<sup>3</sup> Sampling Length

می‌شود. اگر مقدار بدست آمده برای  $h_k(t)$  شروط مورد نیاز توابع مود ذاتی را برآورده سازد به عنوان اولین تابع مود ذاتی انتخاب می‌شود.

$$c_i(t) = h_k(t) \quad (4)$$

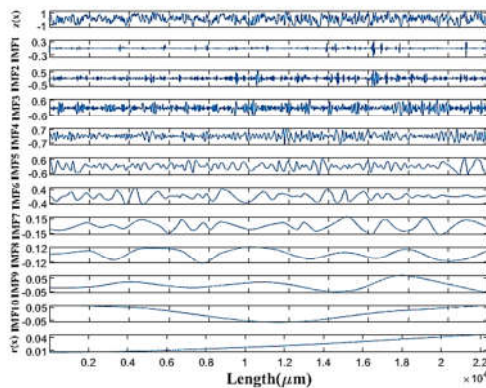
اگر شروط بیان شده توسط  $h_k(t)$  ارضا نشود در این صورت سیگنال به عنوان سیگنال اصلی در نظر گرفته شده و فرایند غربال مطابق رابطه (۵) ادامه می‌یابد.

$$h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t) \quad (5)$$

برای تعیین توابع مود ذاتی براساس رابطه ۵ و با استفاده از فرایند غربال، یک معیار توقف با تعریف ذیل به کار گرفته می‌شود.

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2(t)} \quad (6)$$

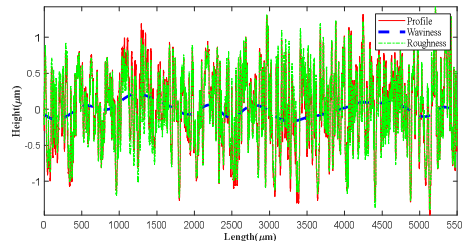
با مقایسه مقادیر بدست آمده برای معیار توقف و مقدار پیش فرض تعیین شده نتیجه روش تجزیه مود تجربی نمایان می‌شود. بدین صورت که اگر مقدار پیش فرض از مقدار معیار توقف بیشتر باشد فرایند تعیین توابع مود ذاتی متوقف شده و مرحله بعدی فرایند غربال آغاز می‌گردد. در این مطالعه، از نرم‌افزار MATLAB برای اعمال روش تجزیه مود تجربی بر روی پروفیل مورد مطالعه استفاده شده است. با استفاده از روش تجزیه مود تجربی برای پروفیل نشان داده شده در شکل ۳، یازده تابع مود ذاتی بدست آمده است که در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. ترتیب قرارگیری آنها از بالا به پایین بصورت پروفیل اصلی، توابع مود ذاتی به دست آمده در مراحل مختلف فرایند غربال و باقیمانده می‌باشد.



شکل ۵- پروفیل اصلی به همراه توابع مود ذاتی و باقیمانده بدست آمده برای پروفیل سطح نشان داده شده در شکل ۳

#### ۵- استخراج زبری سطح با تجزیه مود تجربی

مطابق آنچه بیان شد، جداسازی اجزای مختلف بافت یک سطح براساس طول موج‌های آنها انجام می‌گردد. با توجه به رابطه‌ی بین طول موج و فرکانس و تعاریف ارائه شده برای زبری سطح می‌توان دریافت از دید حوزه فرکانسی، پروفیل تشکیل‌دهنده زبری یک سطح دارای فرکانس‌های بالاتر نسبت به سایر اجزای سطح می‌باشند. با در نظر گرفتن این نکته و همچنین بررسی توابع مود ذاتی بدست آمده در شکل ۵ برای پروفیل مورد مطالعه، می‌توان بطور کیفی و شهودی بیان کرد که تجمیع کدام یک از توابع مود ذاتی منجر به تشکیل پروفیل



شکل ۴- فیلتر گاوسی اعمال شده روی پروفیل سطح با طول موج قطع ۰.۸۰۰μm. پروفیل سطح اصلی، پروفیل موج سطح، -، -، پروفیل زبری سطح، -، -، -.

در ادامه نتایج پارامترهای زبری بدست آمده برای فیلتر اعمال شده با نتایج ارائه شده توسط مرجع مقایسه شده‌اند که در جدول ۱ نمایش داده شده است. اختلاف نتایج دو فیلتر اعمالی برای پارامتر زبری  $R_a$  و  $R_q$  به ترتیب ۰.۰۸٪ و ۰.۰۹٪ می‌باشد که این اختلاف جزئی می‌تواند ناشی از محاسبات عددی در استخراج پروفیل ارزیابی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB باشد.

جدول ۱- پارامترهای زبری بدست آمده با فیلتر گاوسی اعمال شده با نرم‌افزار MATLAB و نتایج مرجع [۳۱]

روش	$R_q$ (μm)	$R_a$ (μm)
مرجع [۳۱]	۰/۵۳۹۰	۰/۴۴۹۶
فیلتر گاوسی	۰/۵۴۴۳	۰/۴۵۳۴

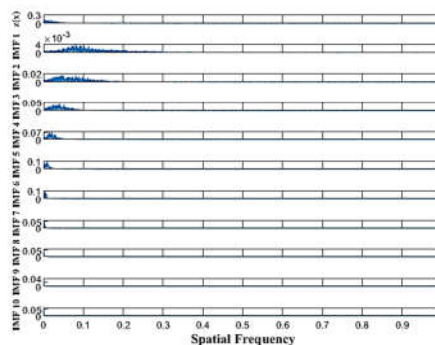
#### ۴- تجزیه مود تجربی

هوانگ و همکارانش در سال ۱۹۹۸ بخش اصلی تبدیل هیلبرت-هوانگ را تحت عنوان روش تجزیه مود تجربی معرفی کردند. این روش یکی از پرکاربردترین روش‌ها در زمینه پردازش سیگنال محسوب می‌شود و کاربردهای متنوعی از جمله عیب‌یابی ماشین‌آلات صنعتی و کاهش نویز در صنایع مهندسی دارد [۳۳].

از مهمترین ویژگی‌های این روش، تجزیه سیگنال‌های غیرخطی و ناپایا، تطبیق پذیری در تجزیه سیگنال بدون نیاز به توابع اولیه و امکان بازسازی سیگنال اصلی بدون دست دادن هیچگونه داده‌ای را می‌توان نام برد. در این روش با تجزیه سیگنال اصلی به توابع پایه تشکیل‌دهنده آن که توابع مود ذاتی نامیده می‌شوند، به تحلیل و بررسی اطلاعات دریافتی برای سیگنال اصلی پرداخته می‌شود. برای تجزیه سیگنال به توابع مود ذاتی که به فرایند غربال نیز معروف است برقراری دو شرط مهم ضروری است، شرط نخست، برابر بودن تعداد اکستریم‌ها با تعداد گذر از صفرها در طول سیگنال می‌باشد و به عنوان شرط دوم میانگین پوش‌های بالایی و پایینی تعیین شده توسط بیشینه‌ها و کمینه‌های سیگنال باید صفر باشد. فرایند غربال به شرح ذیل صورت می‌پذیرد [۳۴].

در گام نخست با استفاده از اسپیلاین مکعبی، بیشینه‌ها و کمینه‌های محلی سیگنال به منظور استخراج پوش‌های بالا و پایین سیگنال جداسازی می‌شوند. سپس با احتساب میانگین پوش‌های بدست آمده میانگین محلی سیگنال بدست می‌آید. در ادامه از اختلاف بین میانگین محلی بدست آمده و سیگنال اصلی مقدار  $h_k(t)$  محاسبه

زبری سطح می‌گردد. با این حال ارائه یک معیار کمی برای تعیین تعداد توابع تشکیل‌دهنده زبری سطوح امری ضروری است. از این رو، در روش پیشنهادی یک معیار قطع کمی و عددی برای انتخاب دقیق تعداد توابع مود ذاتی تشکیل‌دهنده زبری سطح ارائه می‌شود که از مهمترین نکات این روش محسوب می‌شود. به منظور ارائه یک راهکار مناسب جهت انتخاب این معیار، روش پیشنهادی به سه بخش کلی تقسیم‌بندی می‌شود. در بخش اول با استفاده از روش تجزیه مود تجربی، پروفیل موردنظر به توابع مود ذاتی تشکیل‌دهنده آن مطابق شکل ۵ تجزیه می‌گردد. در ادامه با اعمال تبدیل فوریه سریع روی توابع مود ذاتی، محتوای فرکانس توابع مود ذاتی بدست می‌آید که در شکل ۶ نمایش داده شده است.

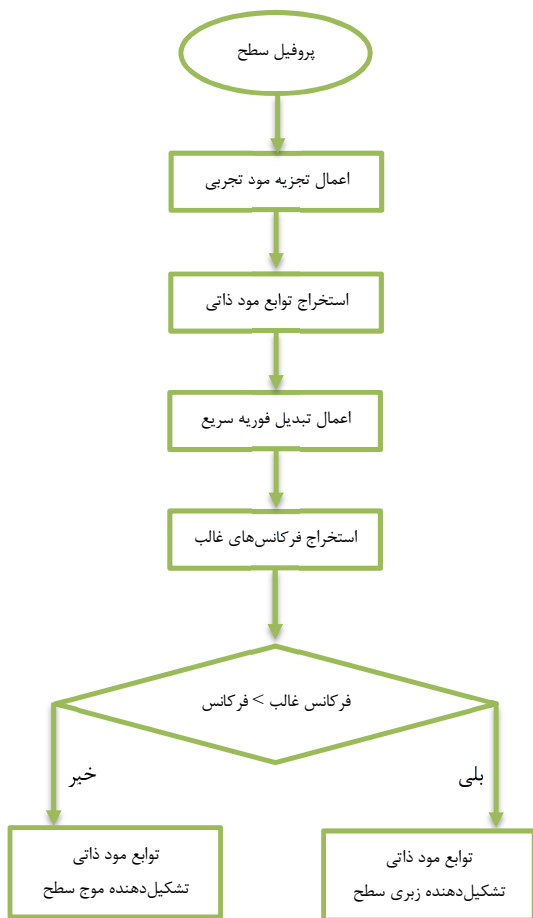


شکل ۶- تبدیل فوریه پروفیل اصلی و توابع مود ذاتی بدست آمده برای پروفیل سطح

در گام بعدی به محاسبه فرکانس قطع موردنیاز برای جداسازی پروفیل زبری سطح از سایر پروفیل‌ها پرداخته می‌شود که با معکوس کردن طول موج قطع انتخاب شده، این فرکانس برای نمونه مورد مطالعه بدست می‌آید که مقدار  $0.00125 (1/\mu\text{m})$  می‌باشد. همچنین از محتوای فرکانسی توابع مود ذاتی، فرکانس غالب هر تابع مود ذاتی براساس نتایج به دست آمده از تبدیل فوریه سریع تعیین می‌گردد که در جدول ۲ ارائه شده است. این فرکانس‌های غالب براساس بیشینه دامنه فرکانس‌های بدست آمده از تبدیل فوریه سریع اعمالی می‌باشند.

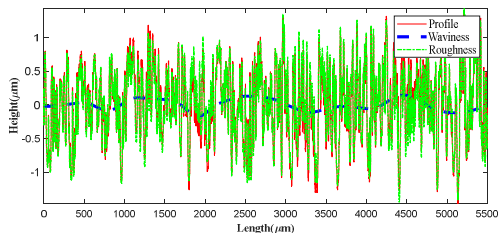
جدول ۲- فرکانس غالب بدست آمده برای توابع مود ذاتی به همراه

دامنه آنها		
تابع مود ذاتی	فرکانس غالب ( $1/\mu\text{m}$ )	بیشینه دامنه ( $\mu\text{m}$ )
۱	۰/۰۸۳	۰/۰۰۳۱
۲	۰/۰۴۶	۰/۰۱۶
۳	۰/۰۳۹	۰/۰۳۱
۴	۰/۰۲۱	۰/۰۷۲
۵	۰/۰۰۸	۰/۰۹۹
۶	۰/۰۰۳	۰/۰۹۹
۷	۰/۰۰۲	۰/۰۵۶
۸	۰/۰۰۰۹	۰/۰۴۷
۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۹
۱۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۳۹

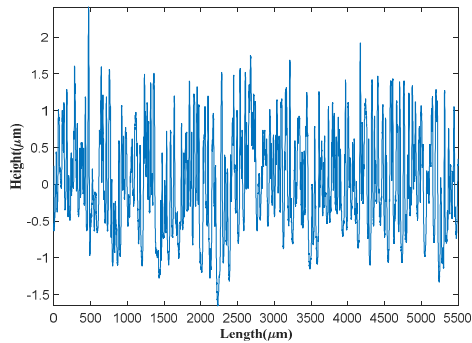


شکل ۷- فلوچارت پیشنهادی برای استخراج زبری سطح بر مبنای تجزیه مود تجربی

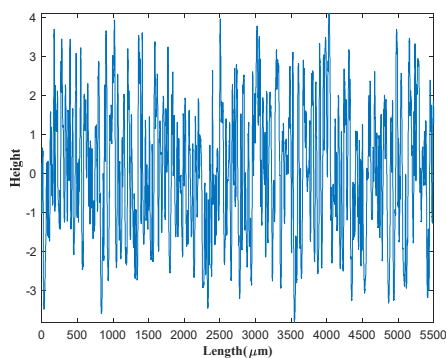
در بخش تجزیه پروفیل سطح به توابع مود ذاتی، علاوه بر این توابع یک باقیمانده نیز بدست می‌آید. از این باقیمانده به دلیل اینکه اطلاعات مفیدی از سیگنال در اختیار ندارد، صرف نظر می‌گردد. همچنین در بخش استخراج فرکانس‌های غالب، این فرکانس‌ها براساس بیشینه دامنه هریک از توابع مود ذاتی انتخاب می‌شوند.



شکل ۸- پروفیل زبری بدست آمده برای نمونه مورد مطالعه به روش تجزیه مود تجربی، پروفیل سطح اصلی، پروفیل موج سطح بدست آمده از تجمیع توابع مود ذاتی هشتم تا دهم، -، پروفیل زبری سطح بدست آمده از تجمیع توابع مود ذاتی اول تا هفتم، -، -



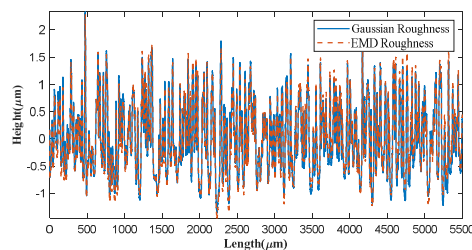
شکل ۹- پروفیل استاندارد شماره ۲ کالیبره شده با  $R_a = 0.8 \mu\text{m}$  [۳۱]



شکل ۱۰- پروفیل استاندارد شماره ۲ کالیبره شده با  $R_a = 1 \mu\text{m}$  [۳۱]

## ۶- نتایج

با اعمال روش پیشنهادی روی پروفیل استاندارد شماره ۱ و استخراج زبری، در ادامه این روش روی دو پروفیل استاندارد دیگر نیز اعمال می‌گردد. پروفیل‌های دو بعدی استاندارد جدید از سطوحی که با فرایند تخلیه الکتریکی تولید شده‌اند، بدست آمده‌اند.



شکل ۱۱- نتایج زبری بدست آمده برای پروفیل استاندارد شماره ۲ با استفاده از تجزیه مود تجربی و فیلتر گاوسی، پروفیل زبری بدست آمده با فیلتر گاوسی، - تجزیه مود تجربی، -

شکل ۱۱ نتایج زبری بدست آمده برای پروفیل استاندارد شماره ۲ با هر دو روش تجزیه مود تجربی و فیلتر گاوسی را نمایش می‌دهد. همانگونه که مشخص است پروفیل زبری بدست آمده با تجزیه مود تجربی کاملاً منطبق بر پروفیل زبری حاصل از فیلتر گاوسی می‌باشد. بنابراین،

مطابق آنچه در شکل ۸ نشان داده شده است، در پژوهش حاضر برای پروفیل استاندارد شماره ۱، توابع مود ذاتی هشتم به بعد فرکانس‌های غالب کمتر از فرکانس قطع موردنظر دارند. بنابراین، از ادغام توابع مود ذاتی اول تا هفتم پروفیل زبری سطح نمونه مورد مطالعه ایجاد می‌شود. همچنین با ادغام توابع مود ذاتی هشتم تا دهم پروفیل موج سطح ایجاد می‌شود.

با تحلیل کیفی شکل ۸ می‌توان دریافت که روش ارائه شده عملکرد قابل‌قبولی در جداسازی پروفیل زبری سطح دارد. همچنین نتایج عددی بدست آمده برای پارامترهای زبری پروفیل مورد بررسی با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با نتایج فیلتر گاوسی اعمال شده روی پروفیل، تأییدی بر عملکرد روش بیان شده دارند که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳- پارامترهای زبری بدست آمده برای روش تجزیه مود تجربی

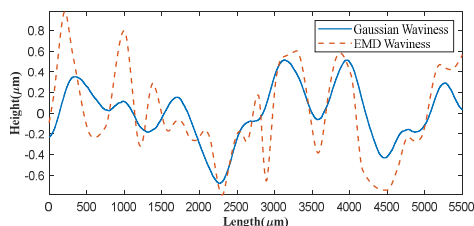
روش	$R_q$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
مرجع [۳۱]	۰/۵۳۹۰	۰/۴۴۹۶
تجزیه مود تجربی	۰/۵۵۳۹	۰/۴۵۸۵

تحلیل نتایج جدول ۳، تفاوت ۱/۹۷٪ و ۲/۷۶٪ را به ترتیب برای پارامترهای زبری  $R_q$  و  $R_a$  نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج بدست آمده برای روش پیشنهادی اعمال شده روی پروفیل مورد مطالعه پیداست، روش بیان شده در جداسازی پروفیل زبری سطح نمونه مورد بررسی عملکرد مناسب و قابل‌قبولی داشته است.

در گام‌های بعدی به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد روش استخراج پیشنهادی، دو پروفیل استاندارد دیگر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این پروفیل‌ها نیز همانند نمونه نخست از سطوح ماشینکاری شده توسط فرایند تخلیه الکتریکی بدست آمده‌اند که دارای الگوی مشخصی برای ماشینکاری نمی‌باشند. میانگین زبری برای پروفیل‌های استاندارد دوم و سوم نیز به ترتیب ۰/۸ و ۱/۶ میکرومتر می‌باشد که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که در مرجع استفاده شده پروفیل‌های استاندارد دیگری نیز وجود دارند. دلیل انتخاب پروفیل‌های استاندارد حاصل از فرایند تخلیه الکتریکی در این پژوهش، نبود الگوی مشخص ماشینکاری برای این نوع فرایند می‌باشد. پروفیل‌های استاندارد جدید دارای طولی یکسان به اندازه ۵۰۰ میکرومتر می‌باشند. دامنه ارتفاع برای این پروفیل‌ها به ترتیب بین ۲- تا ۲ میکرومتر برای پروفیل استاندارد دوم و ۳- تا ۴ میکرومتر برای پروفیل استاندارد سوم می‌باشد. هر کدام از این پروفیل‌ها در آزمایشگاه دانشگاه هادرسفیلد تحت شرایط و تنظیمات مختلف دستگاه ماشینکاری تخلیه الکتریکی از سطوحی با زبری‌های مختلف بدست آمده‌اند. از بررسی پروفیل‌های استاندارد نشان داده شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان دریافت با افزایش میانگین زبری در سطوح براده‌برداری شده به روش تخلیه الکتریکی میزان دامنه ارتفاع آنها نیز افزایش می‌یابد.

می‌توان گفت روش تجزیه مود تجربی در جداسازی پروفیل زبری این سطح عملکرد بسیار خوبی داشته است. شکل ۱۲ موج سطح بدست آمده برای پروفیل استاندارد شماره ۲ را با هردو روش تجزیه مود تجربی و فیلتر گاوسی نشان می‌دهد. موج سطح برای پروفیل استاندارد شماره ۲ از تجمیع توابع مود ذاتی هشتم و نهم بدست آمده است. با بررسی شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که در بازه طولی ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ میکرومتر و همچنین بازه ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میکرومتر دقت روش تجزیه مود تجربی در تشخیص نوسانات پروفیل موج سطح بهتر از فیلتر گاوسی می‌باشد.

مود تجربی در محدوده طولی ۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد و دامنه نوسانات موج سطح را بهتر تخمین می‌زند.



شکل ۱۴- نتایج موج سطح بدست آمده برای پروفیل استاندارد شماره ۲ با استفاده از تجزیه مود تجربی و فیلتر گاوسی، پروفیل موج بدست آمده با فیلتر گاوسی، - تجزیه مود تجربی، -

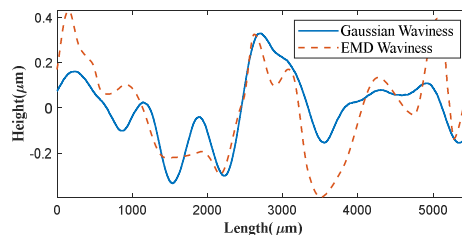
مطابق شکل، فیلتر گاوسی در محدوده آغازین عمل جداسازی موج سطح را بصورت مناسب انجام نداده است که این موضوع با توجه به روش اعمال فیلتر گاوسی می‌تواند در استخراج زبری سطح به وسیله این روش نیز مشکل‌ساز باشد.

در ادامه کار، دو پارامتر مهم زبری  $R_a$  و  $R_q$  برای نتایج بدست آمده با روش تجزیه مود تجربی اندازه‌گیری شده و با نتایج ارائه شده توسط استاندارد مقایسه شده‌اند که در جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشد. پارامتر  $R_a$  میانگین زبری و پارامتر  $R_q$  ریشه میانگین مربعات پروفیل زبری برای سه پروفیل استاندارد را نشان می‌دهد.

جدول ۴- پارامترهای زبری بدست آمده برای پروفیل‌های استاندارد با روش پیشنهادی

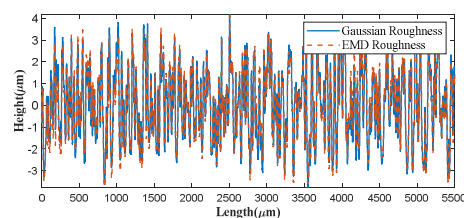
پروفیل استاندارد	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )		$R_q$ ( $\mu\text{m}$ )	
	تجزیه مود تجربی	استاندارد [۳۱]	تجزیه مود تجربی	استاندارد [۳۱]
پروفیل شماره ۱	۰/۴۵۸۵	۰/۴۴۹۶	۰/۵۵۳۹	۰/۵۳۹۰
پروفیل شماره ۲	۰/۵۵۲۹	۰/۵۵۶۱	۰/۶۶۸۱	۰/۶۶۱۱
پروفیل شماره ۳	۱/۴۰۵	۱/۴۲۱۷	۱/۶۷	۱/۶۷۵۰

با بررسی نتایج عددی ارائه شده در جدول ۴، تفاوت نتایج بدست آمده میان روش پیشنهادی و نتایج استاندارد برای پروفیل‌های استاندارد اول، دوم و سوم برای پارامتر  $R_a$  به ترتیب ۱/۹۷٪، ۱/۵۷٪ و ۱/۱۷٪ و برای پارامتر  $R_q$  به ترتیب ۲/۷۶٪، ۱/۰۵٪ و ۰/۲۹٪ می‌باشد که حاکی از عملکرد بسیار خوب روش پیشنهادی در استخراج پروفیل زبری سطح و تخمین پارامترهای زبری می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش زبری سطوح، از عملکرد روش پیشنهادی کاسته نشده و این روش برای سطوح با میانگین زبری‌های مختلف عملکرد بسیار خوبی دارد. علاوه بر این بصورت کیفی مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی در تخمین پروفیل موج سطوح استاندارد و دامنه نوسانات آنها عملکرد بهتری نسبت به فیلتر گاوسی دارد.



شکل ۱۲- نتایج موج سطح بدست آمده برای پروفیل استاندارد شماره ۲ با استفاده از تجزیه مود تجربی و فیلتر گاوسی، پروفیل موج بدست آمده با فیلتر گاوسی، - تجزیه مود تجربی، -

در ادامه، روش پیشنهادی استخراج زبری سطح روی سومین پروفیل استاندارد اعمال می‌گردد. این پروفیل دارای بیشترین زبری نسبت به سایر پروفیل‌های استاندارد بوده و میانگین زبری برای این پروفیل، ۱/۶ میکرومتر می‌باشد. نتایج زبری و موج سطح بدست آمده برای پروفیل استاندارد شماره ۳ به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳- نتایج زبری بدست آمده برای پروفیل استاندارد شماره ۳ با استفاده از تجزیه مود تجربی و فیلتر گاوسی، پروفیل زبری بدست آمده با فیلتر گاوسی، - تجزیه مود تجربی، -

شکل ۱۳، پروفیل زبری بدست آمده با تجزیه مود تجربی و مقایسه آن با نتیجه حاصل از فیلتر گاوسی اعمال شده را نشان می‌دهد. زبری سطح بدست آمده برای این پروفیل با روش پیشنهادی، از تجمیع توابع مود ذاتی اول تا هفتم ایجاد شده است. بررسی شکل ۱۳، انطباق بسیار زیاد پروفیل زبری حاصل از روش پیشنهادی با فیلتر گاوسی اعمال شده توسط استاندارد را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است پروفیل زبری سطح به روش تجزیه مود تجربی بسیار خوب از پروفیل موج سطح جدا شده است. همچنین در جداسازی موج سطح پروفیل استاندارد شماره ۳ مطابق آنچه در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد، تجزیه

- [7] Tosun N, Cogun C. An investigation on wire wear in WEDM. *Journal of materials processing technology*. 2003 Mar 20;134(3):273-8.
- [8] Khan MA, Rahman MM, Noor MM, Kadirgama K, Maleque MA. Current research trends on dry, near-dry and powder mixed electrical discharge machining. *Advanced Materials Research*. 2011 Jul 21; 264:956-61.
- [9] Lu C. Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of materials processing technology*. 2008 Aug 26;205(1-3):439-50.
- [10] Persson U. Surface roughness measurement on machined surfaces using angular speckle correlation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006 Dec 1;180(1-3):233-8.
- [11] Prabhakar DV, Kumar MS, Krishna AG. A Novel Hybrid Transform approach with integration of Fast Fourier, Discrete Wavelet and Discrete Shearlet Transforms for prediction of surface roughness on machined surfaces. *Measurement*. 2020 Nov 1; 164:108011.
- [12] Markova LV, Kong H, Han HG. A Method for Extracting the Surface Roughness Profile Based on Empirical Mode Decomposition. *Journal of Friction and Wear*. 2021 Dec;42(6):415-21.
- [13] Chen W, Zou B, Li Y, Huang C. A study of a rapid method for detecting the machined surface roughness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021 Dec; 117:3115-27.
- [14] Bhushan B. Surface roughness analysis and measurement techniques. In *Modern tribology handbook*, two volume set 2000 Dec 28 (pp. 79-150). CRC press.
- [15] Kamguem R, Tahan SA, Songmene V. Evaluation of machined part surface roughness using image texture gradient factor. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013 Feb; 14:183-90.
- [16] Pontes FJ, Amorim GF, Balestrassi PP, Paiva AP, Ferreira JR. Design of experiments and focused grid search for neural network parameter optimization. *Neurocomputing*. 2016 Apr 19; 186:22-34.
- [17] Gupta M, Raman S. Machine vision assisted characterization of machined surfaces. *International Journal of Production Research*. 2001 Jan 1;39(4):759-84.
- [18] Lu RS, Tian GY. On-line measurement of surface roughness by laser light scattering. *Measurement Science and Technology*. 2006 May 8;17(6):1496.
- [19] Zhang Z, Zhang Y, Zhu Y. A new approach to analysis of surface topography. *Precision Engineering*. 2010 Oct 1;34(4):807-10.
- [20] Zhang H, Liu SB. An Algorithm for Generating EMD Mixed Mean Line Used to Extract Roughness Profile from Engineering Surfaces. In *Software Engineering and Information Technology: Proceedings of the 2015 International Conference on Software Engineering and Information Technology (SEIT2015) 2016* (pp. 216-221).
- [21] ISO 3274, "Geometric product specifications (GPS) - surface texture: profile method - nominal characteristics of contact (stylus) instruments", 1996.
- [22] Raja J, Radhakrishnan V. Digital filtering of surface profiles. *Wear*. 1979 Nov 1;57(1):147-55.
- [23] Krystek M. A fast Gauss filtering algorithm for roughness measurements. *Precision Engineering*. 1996 Oct 1;19(2-3):198-200.
- [24] Chen Q, Yang S, Li Z. Surface roughness evaluation by using wavelets analysis. *Precision Engineering*. 1999 Jul 1;23(3):209-12.
- [25] Jiang XQ, Blunt L, Stout KJ. Lifting wavelet for three-dimensional surface analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001 Oct 1;41(13-14):2163-9.
- [26] Kadirgama K, Noor MM, Rahman MM, Rejab MR, Haron CH, Abou-El-Hossein KA. Surface roughness

## ۷- نتیجه گیری

زبری سطح یک قطعه‌ی ساخته شده ارتباط نزدیکی با فرایند تولیدی مورد استفاده برای ساخت آن دارد. فرایندهای مختلف تولید مانند ماشینکاری، ریخته‌گری، آهن‌گری یا ساخت افزایشی می‌توانند منجر به ایجاد زبری‌های سطح متفاوتی گردند که عمدتاً روی اتصال قطعات، مقاومت در برابر خوردگی، سفتی تماس، مقاومت در برابر خستگی و ظاهر قطعه تاثیر می‌گذارد. بنابراین استخراج و ارزیابی زبری سطح نقش مهمی در قابلیت اطمینان و پایداری قطعات، کاهش ضریب اصطکاک، بهبود دقت کار و حساسیت ماشین آلات و کاهش سایش سطح قطعات دارد. در پژوهش حاضر در راستای توسعه روش‌های استخراج پروفیل زبری سطح، یک روش جدید با استفاده از روش تجزیه مود تجربی و تبدیل فوریه سریع ارائه شده است. بدین منظور ابتدا راهکار پیشنهادی روی یک پروفیل بدست آمده از یک سطح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی اعمال شده و نتایج آن با نتایج مرجع ارائه شده مقایسه شده است. در ادامه سیگنال‌های استاندارد دیگری نیز مورد مطالعه قرار گرفته است که مطابق نتایج بدست آمده روش پیشنهادی حاضر عملکرد قابل‌قبولی داشته و توانایی بالایی در جداسازی پروفیل زبری سطوح مختلف دارد. مزیت روش نوین ارائه شده نسبت به سایر روش‌های استخراج زبری سطح، عدم نیاز این روش به توابع پیش‌فرض تعیین شده می‌باشد که قابلیت به کارگیری آن در استخراج زبری سطح برای سطوح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی را بسیار افزایش می‌دهد. به همین دلیل روش پیشنهادی توانایی زیادی در تعیین موج سطح برای سطوح ماشینکاری شده بدون الگوی مشخص دارد. با توجه به عملکرد مناسب روش تجزیه مود تجربی پیشنهادی در جداسازی پروفیل زبری سطح، می‌توان از این روش در حوزه‌های مختلف مهندسی ساخت و تولید به خصوص اندازه‌شناسی سطح بهره برد.

## ۸- مراجع

- [1] Davim JP, Jain VK. Advanced (non-traditional) machining processes. *Machining: Fundamentals and recent advances*. 2008:299-327.
- [2] Ho KH, Newman ST. State of the art electrical discharge machining (EDM). *International journal of machine tools and manufacture*. 2003 Oct 1;43(13):1287-300.
- [۳] اقبهی س، سلیمانی ف، عیوضی ه، مطالعه قابلیت ماشینکاری سرامیک نارسای  $Si_3N_4$  به روش فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با الکتروود کمکی، *مجله مهندسی ساخت و تولید ایران*، ۱۴۰۱، د. ۹، ش. ۵، ص. ۱۳-۲۲.
- [4] Banu A, Ali MY. Electrical discharge machining (EDM): a review. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*. 2016 Sep 3;1(1):3-10.
- [5] Mohanty S, Routara BC. A review on machining of metal matrix composites using nanoparticle mixed dielectric in electro-discharge machining. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2016 Sep 1;13(2):3518-39.
- [6] Jabbaripour B, Motallebpouralishahi M. Experimental study of material removal rate, surface roughness and topography in electrical discharge machining of Titanium Aluminum intermetallic compound. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*. 2016; 3(3):29-39.

- prediction model of 6061-T6 aluminum alloy machining using statistical method. 2009; 25(2): 250-256.
- [27] Pal SK, Chakraborty D. Surface roughness prediction in turning using artificial neural network. *Neural Computing & Applications*. 2005 Dec; 14:319-24.
- [28] Sanjay C, Jyothi C.J. A study of surface roughness in drilling using mathematical analysis and neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006 Jul; 29:846-52.
- [29] Gadelmawla ES, Koura MM, Maksoud TM, Elewa IM, Soliman HH. Roughness parameters. *Journal of materials processing Technology*. 2002 Apr 10;123(1):133-45.
- [30] Asme-B461 "Surface texture-surface-roughness-waviness-and-lay", 1995.
- [31] "[http://resource.npl.co.uk/softgauges/Masterpiece\\_Measure.htm](http://resource.npl.co.uk/softgauges/Masterpiece_Measure.htm)"
- [32] ISO 11562, "Sd geometric product specifications (GPS) - surface texture: profile method metrological characteristics of phase correct filters", 1996.
- [33] Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih HH, Zheng Q, Yen NC, Tung CC, Liu HH. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*. 1998 Mar 8;454(1971):903-95.
- [34] Rezaee M, Taraghi Osguei A. Improving empirical mode decomposition for vibration signal analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2017 Jun;231(12):2223-34.