

آنالیز حساسیت کلی پارامترهای نانوماشینکاری با استفاده از میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی

شاهین نصیری طوسی، کاوه اسماعیلی ترکانپوری*

گروه فنی و مهندسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۰

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۳۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸

کلمات کلیدی:

آنالیز حساسیت کلی

تحریک پایه

ارتعاشات حرارتی

نانوماشینکاری

میکروسکوپ روبشی حرارتی

خلاصه: در این تحقیق آنالیز حساسیت کلی پارامترهای نانوماشینکاری با استفاده از میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور مقطع یک نمونه نانوماشینکاری شده با جاروب کردن تیپ با شعاع‌های مختلف بر روی پاسخ ارتعاشی کل سیستم در سرعت و دماهای متفاوت شبیه سازی می‌شود. نشان داده می‌شود که با افزایش دما، عمق نانوماشینکاری کاهش و با افزایش شعاع تیپ، عمق نانوماشینکاری افزایش می‌یابد. همچنین اظهار می‌گردد که با افزایش سرعت حرکت پروب، صافی سطح نهایی نانوماشینکاری کاهش می‌یابد. سپس شاخص‌های سوپول برای میانگین عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. نشان داده می‌شود که، بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری تنها دما و شعاع تیپ اثر داشته و اثرات سرعت حرکت پروب و برهمکنش بین پارامترها ناچیز می‌باشد. همچنین اظهار می‌شود، علاوه بر تاثیر قابل توجه هر ۳ پارامتر بر روی صافی سطح نهایی نانوماشینکاری، برهمکنش بین این پارامترها بسیار اثرگذار می‌باشد. سپس شاخص‌های کل و شاخص‌های سوپول با یکدیگر مقایسه می‌گردند. بیان می‌شود، میزان شاخص‌های کل نسبت به شاخص‌های سوپول در رابطه با صافی سطح نهایی نانوماشینکاری به طور قابل توجهی بیشتر می‌باشد. در رابطه با میانگین عمق نانوماشینکاری، شاخص‌های کل و شاخص‌های سوپول برای دو پارامتر دما و شعاع تیپ تقریباً با هم برابرند و اثرات سرعت حرکت پروب بر روی عمق نانوماشینکاری بسیار ناچیز می‌باشد.

۱- مقدمه

میکروسکوپ‌ها برای نانوماشینکاری قطعات درمقیاس نانو استفاده کرد [۹]. در میکروسکوپ روبشی حرارتی، تیرک یا تیپ به حالت تماسی یا غیرتماسی [۱۰ و ۱۱] مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجائی که میکروسکوپ روبشی حرارتی زیر مجموعه‌ای از میکروسکوپ‌های نیروی اتمی است، ساختار آن‌ها تشابه‌های بسیاری با یکدیگر دارد. با توجه به این امر اخیراً با ایده‌گرفتن از نحوه کارکرد دینامیکی میکروسکوپ نیرو اتمی، نوع دینامیکی میکروسکوپ حرارتی روبشی به منظور ماشینکاری در مقیاس نانو معرفی گشته است [۱۲]. به طوری که با وجود یک تحریک هارمونیک در پایه میکروسکوپ، در فرکانسی نزدیک به فرکانس رزونانس مود اول تیرک، عملیات ماشینکاری در مقیاس نانو با وجود کنترل تقریبی بر روی عمق ماشینکاری صورت

میکروسکوپ‌های پروبی روبشی دارای انواع مختلفی است که هر یک نسبت به مکانیزمی که دارند برای رسیدن به اهداف مختلف طراحی شده‌اند. یکی از انواع این میکروسکوپ‌ها، میکروسکوپ روبشی حرارتی می‌باشد [۱]. از این نوع میکروسکوپ‌ها می‌توان جهت مشاهده و آنالیز ویژگی‌های مواد مانند تصویربرداری حرارتی [۲ و ۳]، تصویربرداری ضریب انتقال حرارتی [۴ و ۵]، اندازه‌گیری ضریب پخش حرارتی [۶ و ۷] و ضریب انتقال حرارتی [۸] استفاده نمود. به علت وجود مکانیزم حرارتی در این نوع میکروسکوپ‌ها و امکان استفاده از این ترم جهت ذوب نمونه، می‌توان از این نوع

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: torkanpouri@iaut.ac.ir



می‌گیرد [۱۲].

بر روی نحوه تحریک میکروسکوپ‌های نیروی اتمی تحقیقات بسیاری صورت گرفته است [۱۳ و ۱۴]. در قرن گذشته میکروسکوپ نیروی اتمی توسط بنیز و همکارانش اختراع شد [۱۵]. هنگامی که از میکروسکوپ نیروی اتمی دینامیکی برای دستیابی به توپوگرافی سطح استفاده شد، تحول قابل توجهی را تجربه کرد [۱۶ و ۱۷]. از آن زمان، روش‌های میکروسکوپ نیروی اتمی دینامیکی، به عنوان تکنیک‌های قدرتمند و همه کاره برای توصیف خصوصیات نمونه در مقیاس اتمی و نانو مورد استفاده قرار گرفت. با پیشرفت میکروسکوپ‌های نیروی اتمی دینامیکی علاوه بر دستیابی به توپوگرافی سطح با وضوح بهتر، امکان دستیابی به تصاویری با وضوح بالا از دی‌ان‌ای، پروتئین‌ها و پلیمرها در هوا و مایعات [۱۸-۲۰]، تصاویری با وضوح اتمی واقعی از سطوح نیمه هادی و عایق [۲۱]، تولید نقشه‌های خواص مواد مانند: مدول یانگ، میرایی سیستم، فرورفتگی یا دندان، نیروی حداکثر، ضریب چسبندگی و دیگر خواص نیز فراهم گردید [۲۲].

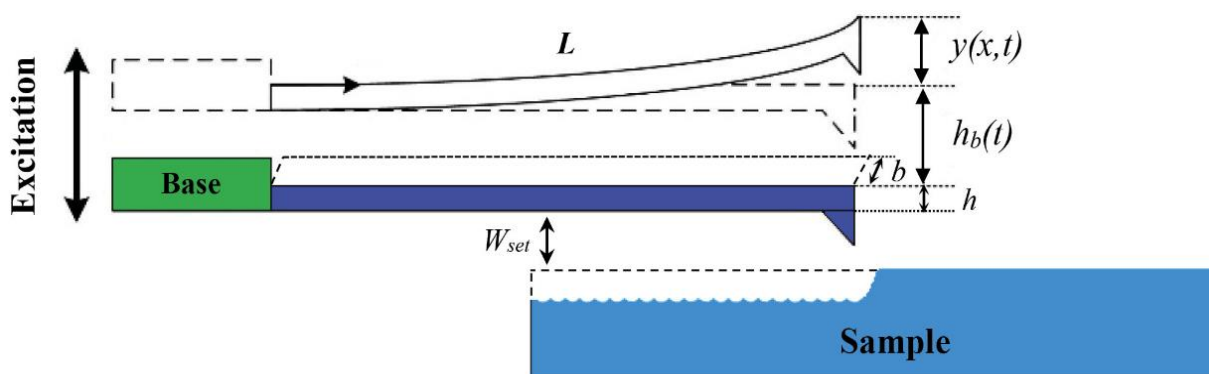
آنالیز حساسیت کلی^۱ بر روی نتایج بسیاری از تحقیقات بدست‌آمده با استفاده از میکروسکوپ‌های نیروی اتمی بررسی شده است [۲۵-۲۳]. آنالیز حساسیت کلی با هدف بررسی تأثیرات پارامترهای ورودی بر یک یا چند خروجی انجام شده است. وقتی تمام فاکتورهای ورودی به طور همزمان متغیر هستند، حساسیت کلی ارزیابی می‌شود و میزان حساسیت در کل محدوده هر عامل ورودی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این تجزیه و تحلیل می‌تواند سهم ورودی‌های مختلف را در نتایج خروجی شناسایی کند و میزان تاثیرگذاری هر یک از پارامترهای ورودی را هم به صورت مستقل و هم به صورت برهمکنش بین پارامتری بر روی خروجی سیستم مشخص کند. یکی از انواع روش‌های آنالیز حساسیت کلی، روش سوبول^۲ مبتنی بر واریانس است [۲۶]. در روش مبتنی بر واریانس، حساسیت خروجی به یک متغیر ورودی، با مقدار واریانس موجود در خروجی سیستم که ناشی از آن ورودی است اندازه گیری می‌شود. چنین روش‌هایی واریانس خروجی را به قسمتهایی که به متغیرهای ورودی منحصر به فرد و همچنین برهمکنش آن‌ها قابل انتقال است، تجزیه می‌کنند.

تاکنون تحقیقات بسیاری با استفاده از میکروسکوپ‌های روبشی حرارتی صورت گرفته است؛ اولین تحقیقات در حوزه میکروسکوپ‌های

1 Global Sensitivity Analysis
2 Sobol Method

روبشی حرارتی توسط ویلیامز^۳ و ویکراماسینگ^۴ [۲۷] در سال ۱۹۸۶ انجام یافت. در این تحقیق یک پروفیل متر جدید با وضوح بسیار بالا نشان داده شد که اساس کار آن، به صورت غیرتماسی و در نزدیکی فاصله بین نمونه و نوک تیپ بود. پروب استفاده شده بر اساس موجودیت هوای مابین تیپ و نمونه به صورت سنسور ترموکوپلی عمل می‌کرد و نهایتاً از خروجی این سنسور یک سیگنال حرارتی به دست می‌آمد. در سال ۱۹۹۹ ماجومدار^۵ [۲۸]، جهت غلبه بر محدودیت‌های حاصل از میکروسکوپ‌های روبشی حرارتی اولیه، پیشنهاد استفاده از یک بازوی میکروسکوپ نیروی اتمی را که متشکل از یک جفت سیم فلزی غیرهمجنس بود مطرح کرد. دو سیم مزبور با یکدیگر یک اتصال ترموکوپلی در نوک تیپ تشکیل می‌دادند که در این روش علاوه بر آنکه از خود میکروسکوپ نیروی اتمی برای اندازه‌گیری توپوگرافی سطح استفاده می‌شد، در عین حال امکان نقشه برداری از توزیع گرمایی قطعات الکترونیکی، با دقت زیر میکرونی، ایجاد می‌گردید. در سال ۲۰۰۳ بای^۶ و همکارانش [۲۹]، با استفاده از پروب گرم، نانولیتوگرافی ترمومکانیکی را نشان داده و الگوهای خطی با مختصات ۴۰ نانومتر را از یک فیلم نازک پلی متیل متاکریلات^۷ به نمایش گذاشتند. در سال ۲۰۰۵ فانگ^۸ و چانگ^۹ [۳۰]، با ایده گرفتن از نحوه کارکرد استاتیکی میکروسکوپ نیروی اتمی، ایده ماشینکاری میکروحرارتی بر روی سطح پلی متیل متاکریلات را با استفاده از میکروسکوپ روبشی حرارتی بیان کردند و یک الگوی نامنظم را در ابعاد نانومتر به دست آوردند. در سال ۲۰۱۰ لی^{۱۰} و همکارانش [۹]، ارتعاشات پروب میکروسکوپ روبشی حرارتی را بر روی نانوماشینکاری با استفاده از تئوری تیر تیموشینکو بررسی کردند. اثرات اینرسی خمشی و تغییر شکل برشی را در این راستا تحلیل کردند. آن‌ها اثر ارتعاشات حرارتی را به عنوان نیروی محوری که وابسته به توزیع دما در پروب است، در نظر گرفتند و فرض بر این نهادند که دما بر طبق مدل‌های ثابت، خطی و درجه دوم در امتداد طول پروب توزیع می‌گردد. در سال ۲۰۱۹ سهرابی و ترکانپوری [۱۲]، با ایده گرفتن از نحوه کارکرد دینامیکی میکروسکوپ نیروی

3 Williams
4 Wickramasinghe
5 Majumdar
6 Bae
7 Polymethylmethacrylate
8 Fang
9 Chang
10 Lee



شکل ۱. شماتیک پیکربندی تیرک میکروسکوپ روبشی حرارتی با تحریک پایه و تعریف جابجایی نسبی تیرک میکروسکوپ

Fig. 1. Schematic of scanning thermal microscope probe configuration with base excitation and definition of relative displacement of microscope probe

به صورت یک نیروی محوری در طول پروب در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. در این تجزیه و تحلیل، توزیع درجه حرارت در طول تیرک با توجه به تابع توزیع حرارت خطی صورت می‌گیرد [۹]. با فرض تحریک پایه، مدل ریاضی نانوماشینکاری توسط پروب میکروسکوپ روبشی حرارتی، با استفاده از اصل همپلتون و معادله شکل مودها با استفاده از روش جداسازی متغیرها در وضعیت توزیع ثابت حرارت در ادبیات فن در دسترس است [۱۲]. لذا با استفاده از روش مودهای فرضی [۳۱] و فرض تعداد مودهای کافی، معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی به صورت تحلیلی [۳۲]، بر خلاف مقاله [۱۲] که به صورت عددی می‌باشد، برای یک مورد خاص حل می‌گردد. با حل این معادلات، فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته^۱ و نیز دامنه پاسخ در فرکانس تحریک و همچنین دامنه‌ها در فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته بدست می‌آیند. سپس مقطع یک نمونه نانوماشینکاری شده با جاروب کردن^۲ تپ با شعاع‌های مختلف بر روی پاسخ ارتعاشی مطلق سیستم در سرعت و دماهای متفاوت شبیه سازی و عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری مورد بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که در مقاله [۱۲] عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری بدون در نظر گرفتن اثرات شعاع تپ، در یک سرعت پیشروی خاص و به صورت تقریبی با استفاده از تکنیک پیک انولوپ^۳ شبیه‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از آنالیز حساسیت کلی، میزان تأثیرات مستقیم و

انمی، ایده‌ای را تحت عنوان نانوماشینکاری به وسیله میکروسکوپ روبشی حرارتی با تحریک پایه بیان کردند. آن‌ها با اعمال یک تحریک هارمونیک عمده بر روی پایه، پاسخ ارتعاشی سیستم را بدست آورده و بدون در نظر گرفتن اثرات شعاع تپ، در یک سرعت پیشروی خاص، اقدام به شبیه‌سازی نانوماشینکاری کردند و نشان دادند با اعمال این تحریک بر روی پایه تا اندازه‌ای می‌توان عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری را کنترل نمود.

بر این اساس در تحقیق کنونی ایده بررسی تأثیرات درجه حرارت، شعاع تپ و سرعت حرکت پروب در کنترل بهتر عمق نانوماشینکاری و افزایش صافی سطح نهایی نمونه نانوماشینکاری شده با الهام از تکنیک تحریک پایه پیشنهاد می‌گردد.

فرضیه‌های تحقیق بر این اساس استوار است که الف) افزایش شعاع تپ در نانوماشینکاری با تحریک پایه، سبب افزایش صافی سطح نمونه می‌شود. با افزایش شعاع تپ میزان براده برداری از نمونه افزایش یافته و میانگین عمق نانوماشینکاری نیز افزایش می‌یابد. ب) افزایش سرعت حرکت پروب سبب افزایش واریانس می‌شود و صافی سطح نهایی نمونه نانوماشینکاری شده را کاهش می‌دهد. ج) با افزایش درجه حرارت، به علت افزایش فرکانس، واریانس کاهش می‌یابد که این امر سبب افزایش صافی سطح با افزایش درجه حرارت می‌گردد.

در این تحقیق، اثرات اختلاف درجه حرارت نمونه (صفر الی ۸۰۰ درجه سانتیگراد)، تپ (۵ الی ۵۰ نانومتر) و سرعت حرکت پروب (۲۰۰ الی ۱۰۰۰ میکرومتر بر ثانیه) بر روی عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. اثر اختلاف درجه حرارت

1 Shifted resonance frequencies
2 Sweeping
3 Peak envelope

به صورت ذیل تعریف می‌گردد [۱۲و۹]:

$$P(x) = -\alpha EA \Delta T \theta(x). \quad (۶)$$

در معادله ۶، α ضریب انبساط حرارتی، ΔT اختلاف درجه حرارت بین تیپ و نمونه و $\theta(x)$ به عنوان تابع توزیع حرارت تعریف می‌شود. به علت انتقال حرارت هدایتی صورت گرفته از طریق پروب، توزیع درجه حرارت در حالتی که ΔT ثابت است می‌تواند تابعی از x باشد. $\theta(x)$ نشان می‌دهد که درجه حرارت در امتداد طول پروب توزیع می‌شود.

با توجه به نوع تحریک پایه که به شکل هارمونیک می‌باشد، h_b به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$h_b(t) = y_e \cos \omega_e t. \quad (۷)$$

y_e دامنه تحریک پایه و ω_e فرکانس تحریک پایه می‌باشد که ω_e تقریباً برابر با فرکانس رزونانسی مود اول در حالت عدم وجود بار حرارتی ($\Delta T = 0$) می‌باشد.

با استفاده از جداسازی متغیرها، شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته در حالتی که $\theta(x) = 1$ است با استفاده از معادلات مندرج در مقاله [۱۲] بدست می‌آید.

۲-۱- روش مودهای فرضی

جهت حل معادلات حاکم برای توزیع غیر خطی حرارت و نیز برای تحریک پایه، از روش مودهای فرضی [۳۱] استفاده می‌شود. شکل مودهای ذکر شده در [۱۲] به عنوان مودهای فرضی مساله استفاده می‌شود. هدف، بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته و دامنه‌های ارتعاشی پروب در فرکانس تحریک پایه و همچنین دامنه در فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته در تابع توزیع حرارت خطی به روش تحلیلی می‌باشد.

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^m Y_i(x) q_i(t). \quad (۸)$$

m یک عدد صحیح بوده و واضح است که افزایش m باعث دقت بهتر روش می‌شود. $Y_i(x)$ معادلات شکل مودها و $q_i(t)$ مختصات

همچنین برهمکنش هر یک از پارامترهای دما، شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب، بر روی دو خروجی میانگین عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری، به روش سوبول مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- مدل ریاضی

یک پروب میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی با تحریک پایه در حالت غیرتماسی و بسیار دورتر از سطح نمونه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پروب به شکل مستطیلی و یکنواخت (عرض b و ارتفاع h) با طول L فرض شده است که در آن نیروی محوری وابسته به توزیع درجه حرارت می‌باشد و یا به عبارت دیگر تغییرات درجه حرارت موجب ایجاد یک نیروی محوری در طول پروب می‌گردد [۱۲و۹]. شماتیک مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است.

معادله حرکت و شرایط مرزی مساله که بر اساس تئوری تیر اوپلر- برنولی و اصل همیلتون استخراج شده است، به صورت زیر می‌باشد [۱۲]:

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + \rho A \frac{d^2 h_b}{dt^2} + EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \frac{\partial}{\partial x} \left(P(x) \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right) = 0. \quad (۱)$$

$$y(0, t) = 0. \quad (۲)$$

$$\frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = 0. \quad (۳)$$

$$\frac{\partial^2 y(L, t)}{\partial x^2} = 0. \quad (۴)$$

$$EI \left(\frac{\partial^3 y(L, t)}{\partial x^3} \right) + P(L) \left(\frac{\partial y(L, t)}{\partial x} \right) = 0. \quad (۵)$$

در معادلات بالا ρ جرم مخصوص پروب، A مساحت مقطع پروب، h_b تابع تحریک پایه، $y(x, t)$ جابجایی نسبی پروب نسبت به پایه، E مدول الاستیک و I ممان دوم سطح پروب می‌باشد که در آن $P(x)$

برای بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته و دامنه‌های ارتعاشی پروب با فرض توزیع حرارت خطی و همچنین گسترش معادله (۹) تا $l = 3$ ، به صورت زیر عمل می‌کنیم [۳۲]:
با دترمینان‌گیری و برابر صفر قراردادن معادله زیر، فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته در هر سه مود بدست می‌آیند:

$$K - M(\omega_{sh}^l)^2 = 0, \quad l = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

M و K به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}.$$

که مقادیر M_l و K_{li} در معادلات (۱۲) تعریف شده است. با توجه به ریشه‌های معادله (۱۳)، پاسخ عمومی سیستم به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$q_h^l = \sum_{i=1}^m A_i^l \cos(\omega_{sh}^l t + \phi_i), \quad l = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

A_i^l ، ϕ_i به ترتیب برابر با دامنه پاسخ q_h^l در ω_{sh}^l و فاز پاسخ q_h^l در ω_{sh}^l می‌باشد.

با توجه به معادله (۱۵) می‌توان هر یک از دامنه‌های پاسخ q_h^l در ω_{sh}^l را به صورت زیر تعریف نمود:

$$r_{ii} = \frac{A_i^l}{A_i^l}, \quad l = 1, 2, \dots, m, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

عمومی مسئله می‌باشند. Y_l شکل مود l ام می‌باشد که برای اعمال شرط تعامد در معادله ضرب شده است. از اعمال معادلات (۶ و ۷) در معادله (۱) و سپس جایگذاری آن در معادله (۸) و انجام یکسری محاسبات ریاضی که جزئیات بیشتر آن در مقاله [۱۲] آمده است، معادله زیر بدست می‌آید:

$$\int_0^L \rho A Y_l^2 \ddot{q}_i dx + \int_0^L EI Y_l \sum_{i=1}^m Y_i^{(4)} q_i dx - \alpha EA \Delta T \int_0^L Y_l dx = Y_l \left(\theta' \sum_{i=1}^m Y_i q_i + \theta \sum_{i=1}^m Y_i'' q_i \right) dx = \int_0^L Y_l A_0 dx \cos \omega_e t, \quad l = 1, 2, 3, \dots, m \quad (9)$$

که A_0 به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$A_0 = y_e \rho A (\omega_e)^2. \quad (10)$$

معادله (۹) را می‌توان به m معادله دیفرانسیل عادی کوپله درجه دوم غیرخطی گسترش داد که در آن m تعداد شکل مودهای تقریب زده شده برای اعمال روش مودهای فرضی در معادله (۸) است. با مرتب‌سازی معادله (۹) بر اساس $q_i q_i$ و نام‌گذاری ضرایب آن جهت فشرده‌سازی معادلات، معادله (۱۱) بدست می‌آید:

$$M_l D^2 q_l + \sum_{i=1}^m K_{li} q_i = F_l \cos \omega_e t, \quad l = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

در اینجا D^2 مشتق دوم نسبت به زمان بوده و F_l ، K_{li} ، M_l به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M_l = \int_0^L \rho A Y_l^2 dx,$$

$$K_{li} = \int_0^L EI Y_l Y_i^{(4)} dx - \alpha EA \Delta T \int_0^L Y_l (\theta' Y_i' + \theta Y_i'') dx, \quad (12)$$

$$F_l = \int_0^L Y_l A_{01} dx \quad l = 1, 2, \dots, m, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

فرکانس تحریک پایه برای هر سه مود بدست می‌آید:

$$A_e^l = [K - M(\omega_e)^2]^{-1} \times F. \quad (22)$$

در نهایت با جمع نظیر به نظیر دامنه‌های بدست‌آمده از معادله (۲۲) دامنه پاسخ در A_e به صورت زیر بدست می‌آید:

$$A_e = \sum_{l=1}^m A_e^l. \quad l=1,2,\dots,m \quad (23)$$

جواب کل سیستم q_t^l به صورت زیر خواهد بود:

$$q_t^l = q_h^l + q_p^l. \quad l=1,2,\dots,m \quad (24)$$

با توجه به اینکه پروب در لحظه صفر در وضعیت سکون است شرایط اولیه فیزیکی مسئله برای جابجایی و سرعت برابر صفر فرض می‌شود. با اعمال شرایط اولیه در معادله (۲۴) و حل دستگاه معادلات حاصله و در نهایت ضرب r_{il} مربوطه و جمع نظیر به نظیر دامنه‌های بدست‌آمده، دامنه پاسخ در فرکانس‌های طبیعی انتقال‌یافته مود l ام به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$A_{sh}^l = \sum_{i=1}^m r_{il} A_i^l. \quad l=1,2,\dots,m \quad (25)$$

اثرات سرعت حرکت پروب به صورت زیر نمایان می‌شود:

$$X = V * t. \quad (26)$$

در اینجا X طول نمونه، V سرعت حرکت پروب و t برابر با زمان می‌باشد.

معادلات ارتعاش نسبی، ارتعاش مطلق و نقطه تنظیم پروب به

با توجه به معادله (۱۶)، می‌توان معادله (۱۵) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$q_h^l = \sum_{i=1}^m r_{il} A_i^l \cos(\omega_{sh}^l t + \phi_i). \quad l=1,2,\dots,m, \quad i=1,2,\dots,m \quad (17)$$

با حل دستگاه معادله (۱۸)، مقدار عددی r_{il} محاسبه می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} K - M(\omega_{sh}^l)^2 \\ K_{11} - M_1(\omega_{sh}^l)^2 & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} - M_2(\omega_{sh}^l)^2 & k_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} - M_3(\omega_{sh}^l)^2 \end{bmatrix} [A] = 0; \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} A_l^1 \\ A_l^2 \\ A_l^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad l=1,2,\dots,m$$

جواب خصوصی سیستم به صورت زیر می‌باشد:

$$q_p^l = A_e^l \cos \omega_e t. \quad l=1,2,\dots,m \quad (19)$$

در اینجا A_e^l دامنه در فرکانس تحریک پایه در q_p^l می‌باشد که از معادله زیر بدست می‌آید:

$$[K - M(\omega_e)^2] A_e^l = F. \quad (20)$$

که F برابر است با:

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

با جایگذاری مقادیر مربوطه در معادله زیر و حل آن، دامنه در

جدول ۱. مشخصات تیرک میکروسکوپ روبشی حرارتی با تحریک پایه [۱۲]

Table 1. Characteristics of scanning thermal microscope probe with base excitation [12]

واحد	سایز	توضیح	نماد
μm	۱۲۰	طول پروب	L
Gpa	۱۷۰	مدول الاستیک	E
μm	۲۵	عرض پروب	b
μm	۵	ضخامت پروب	h
kg/m^{-3}	۲۳۰۰	جرم مخصوص پروب	ρ
μm^2	۱۲۵	مساحت پروب	A
μm^4	۲۶۰.۴۱۷	ممان دوم سطح	I
$1/^\circ\text{C}$	$۲/۶\text{e}-۶$	ضریب انبساط حرارتی	α
Hz	$\omega_e \cong 0/۸ \omega_1$	فرکانس تحریک پایه	ω_e
nm	۲۰	دامنه تحریک پایه	y_e
nm	[۵,۱۰,۲۰,۳۰,۴۰,۵۰]	شعاع تیپ	$*R_{tip}$
$\mu\text{m/s}$	[۲۰۰,۴۰۰,۶۰۰,۸۰۰,۱۰۰۰]	سرعت حرکت پروب	$*V$
nm	۱۵	نقطه تنظیم	$*w_{set}$
*: توسط نویسندگان اعمال شده است			

جدول ۲. جزئیات تابع توزیع حرارت خطی [۱۲]

Table 2. Details of the linear temperature distribution function [12]

مدل	$\theta(x)$
خطی	$0/۲ (x/L) + 0/۸$

صورت زیر تعریف می‌گردد:

۲-۲- آنالیز حساسیت کلی به روش سوبول

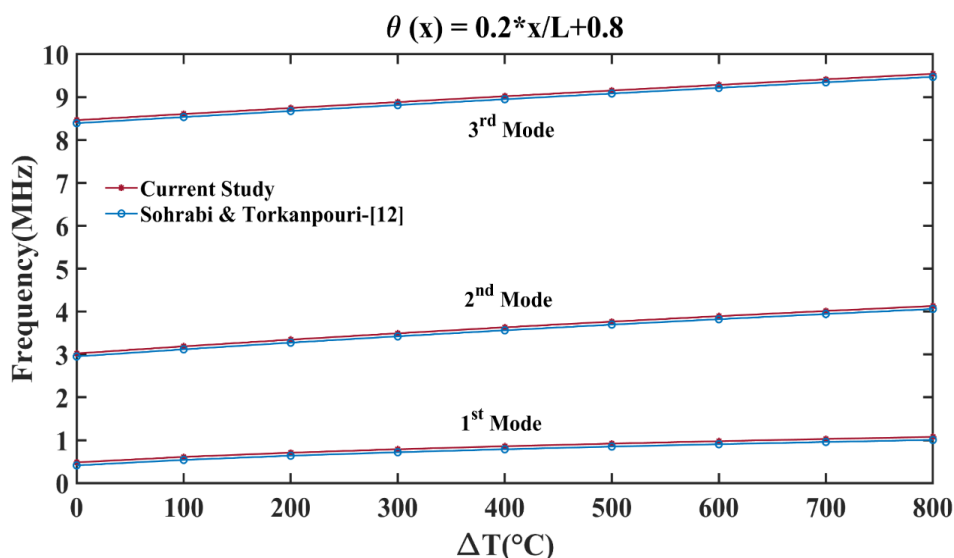
مدل ریاضی میکروسکوپ روبشی حرارتی با تحریک پایه، یک مدل با رفتار غیرخطی است و هنگامی که مدل غیرخطی است تجزیه واریانس خروجی برای تحلیل مساله، می‌تواند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳]. بردار ورودی مدل، برای Z به عنوان خروجی سیستم در معادله (۲۸) مشخص شده است. فرض بر این است که $Z = f(Y)$ یک تابع مربعی انتگرال‌پذیر است. این بدین معناست که می‌توان این تابع را به صورت جمع یک مقدار ثابت با توابع اصلی بیان نمود [۲۶].

$$y = \sum_{l=1}^m (q_h^l + q_p^l), \quad (27)$$

$$y_{total} = y + h_b,$$

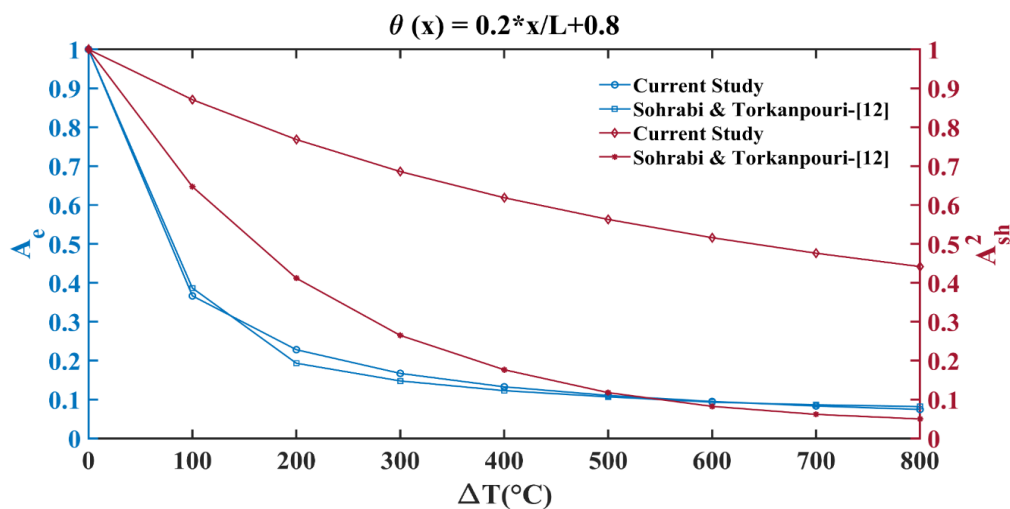
$$y_{set} = y_{total} + w_{set}, \quad l = 1, 2, \dots, m$$

که y ارتعاش نسبی، y_{total} ارتعاش مطلق و w_{set} نقطه تنظیم پروب می‌باشد.



شکل ۲. مقایسه فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته با تحریک پایه با نتایج مندرج [۱۲] در حالت توزیع حرارت خطی در مودهای اول تا سوم

Fig. 2. Comparison of shifted resonance frequencies with base excitation with the results [12] in the linear temperature distribution function in the 1st to 3rd modes



شکل ۳. مقایسه دامنه‌های پاسخ در فرکانس تحریک پایه () فرکانس طبیعی انتقال یافته مود دوم () با نتایج مندرج [۱۲] در حالت توزیع حرارت خطی

Fig. 3. Comparison of response amplitudes at the base excitation frequency (A_e) 2nd shifted resonance frequency () with the results [12] in the linear temperature distribution function

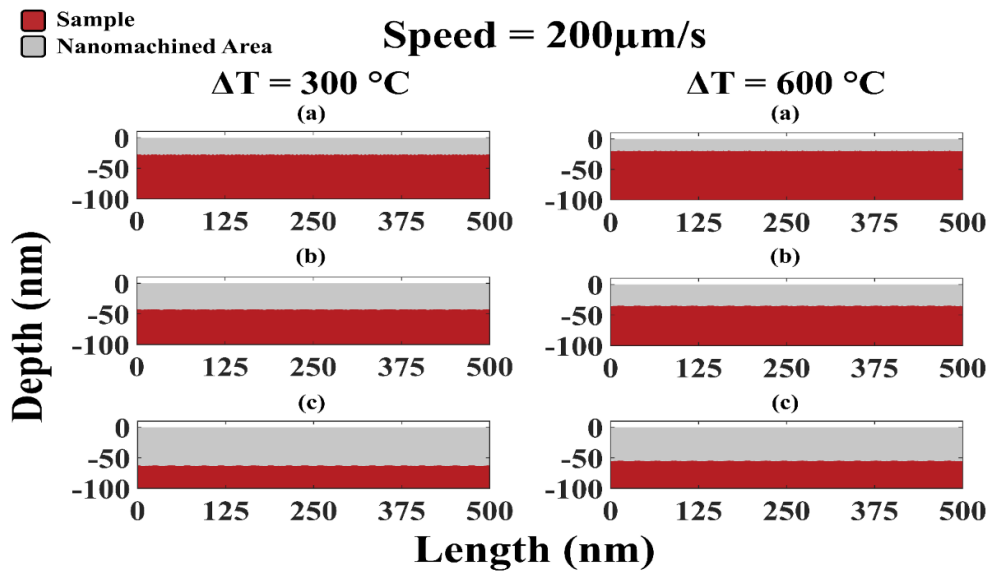
$$\bar{\Psi} = (\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_d) \in R^d. \quad (29)$$

در معادله (۲۸) Z خروجی سیستم، $\bar{\Psi}$ بردار ورودی سیستم و f_0 یک مقدار ثابت می‌باشد. این بسط از شرایط منحصر به فرد زیر

تبعیت می‌کند:

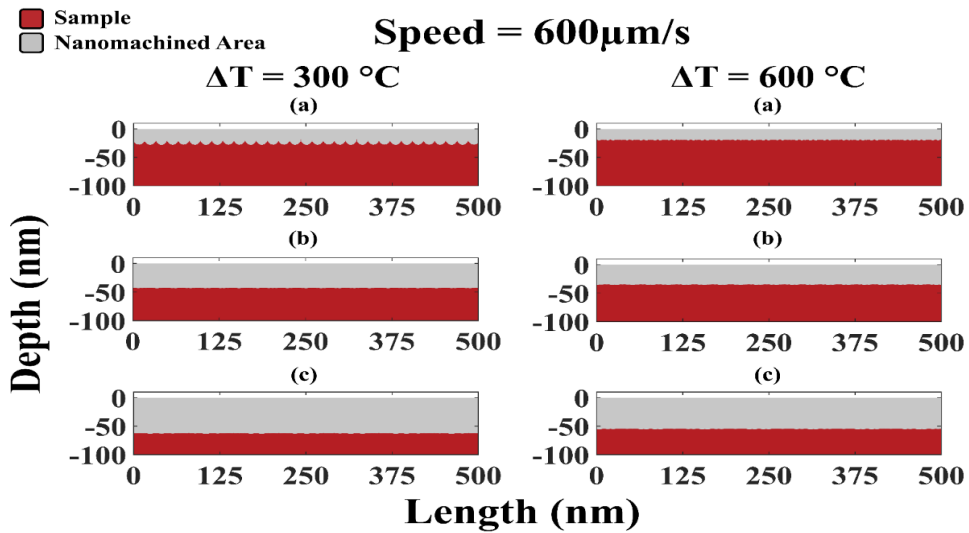
$$Z = f(\bar{\Psi}) \quad (28)$$

$$= f_0 + \sum_{i=1}^d f_i(\Psi_i) + \sum_{i<j}^d f_{ij}(\Psi_i, \Psi_j) + \dots + f_{123\dots d}(\bar{\Psi}).$$



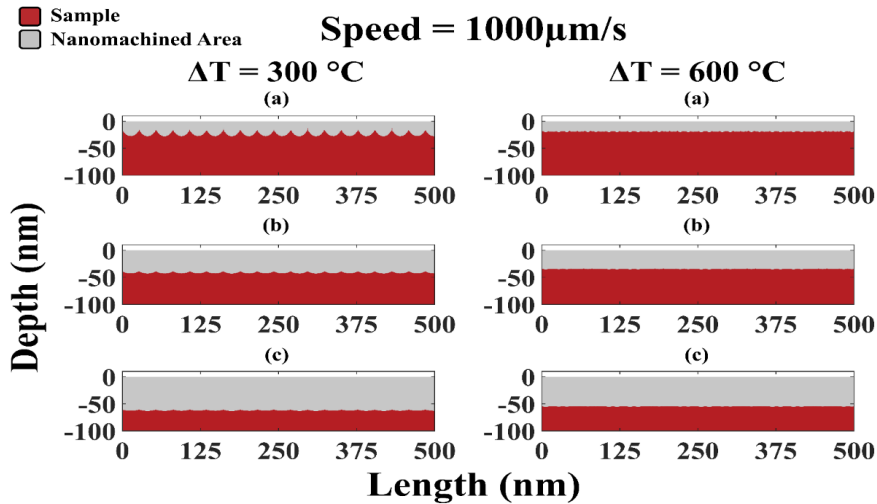
شکل ۴. مقایسه سطح نهایی نانوماشینکاری شده با تحریک پایه در دمای 300°C و 600°C ، در شعاع تیپ (a) 5nm ، (b) 20nm ، (c) 40nm و در سرعت 200

Fig. 4. Comparison of nanomachined final surface with base excitation at 300°C and 600°C at tip radius (a) 5nm , (b) 20nm , (c) 40nm and at speed of 200



شکل ۵. مقایسه سطح نهایی نانوماشینکاری شده با تحریک پایه در دمای 300°C و 600°C ، در شعاع تیپ (a) 5nm ، (b) 20nm ، (c) 40nm و در سرعت 600

Fig. 5. Comparison of nanomachined final surface with base excitation at 300°C and 600°C at tip radius (a) 5nm , (b) 20nm , (c) 40nm and at speed of 600



شکل ۶. مقایسه سطح نهایی نانوماشینکاری شده با تحریک پایه در دمای ۳۰۰°C و ۶۰۰°C، در شعاع تیپ (a) ۵nm، (b) ۲۰nm، (c) ۴۰nm و در سرعت ۱۰۰۰

Fig. 6. Comparison of nanomachined final surface with base excitation at 300 °C and 600 °C at tip radius (a) 5nm, (b) 20nm, (c) 40nm and at speed of 1000

که E به عنوان یک سمبل ریاضی تعریف می‌گردد. برای بدست آوردن برهمکنش مرتبه‌های بالاتر، فرایند ریاضی مشابه معادلات (۳۲) و (۳۳) استفاده می‌شود و بدین طریق شاخص‌های سوپول یا شاخص‌های حساسیت مبتنی بر واریانس [۲۶] بدست می‌آید. این شاخص‌ها سهم واریانس Z را که به دلیل ترکیب ورودی یا ورودی‌های مشخص است، بیان می‌کنند.

$$S_i = \frac{D_i(Z)}{Var(Z)}, S_{ij} = \frac{D_{ij}(Z)}{Var(Z)}, \dots \quad (34)$$

که S_i و S_{ij} به ترتیب برابر با شاخص سوپول ورودی i ام و شاخص برهمکنش ورودی‌ها می‌باشند. تعداد اندیس‌های قابل تعریف برابر $2^d - 1$ است. شاخص‌های کل یا اثرات کل به شرح زیر معرفی می‌شوند:

$$S_{(i)}^{tot} = S_i + \sum_{j \neq i} S_{ij} + \sum_{j \neq i, j \neq k, j < k} S_{ijk} + \dots = \sum_{l \in \#i} S_l. \quad (35)$$

$$\int_0^1 f_{i_1 i_2 \dots i_s}(\Psi_{i_1}, \Psi_{i_2}, \dots, \Psi_{i_s}) d\Psi_{i_k} = 0, \quad (30)$$

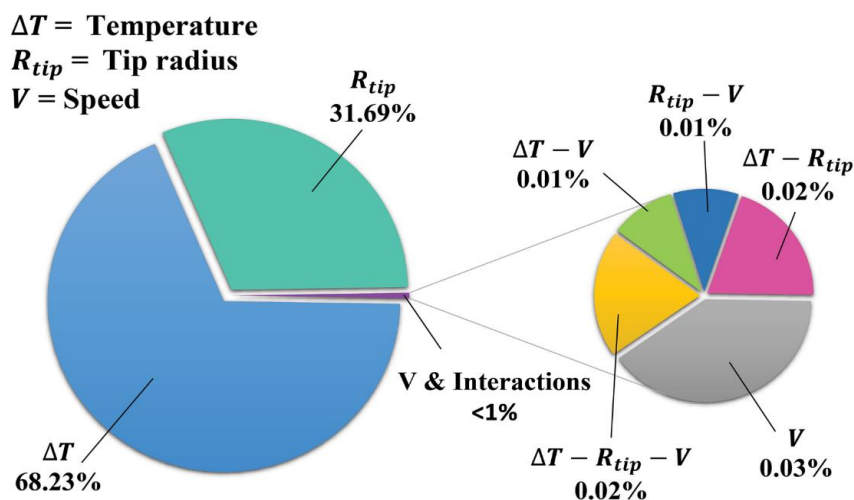
$$1 \leq k \leq s, \{i_1, \dots, i_s\} \subseteq \{1, 2, \dots, d\}.$$

تابع تجزیه واریانس برای خروجی به صورت زیر در دسترس است، که به آن تابع آنالیز عددی گفته می‌شود.

$$Var(Z) = f_0 + \sum_{i=1}^d D_i(Z) + \sum_{i < j}^d D_{ij}(Z) + \dots + D_{123 \dots d}(Z). \quad (31)$$

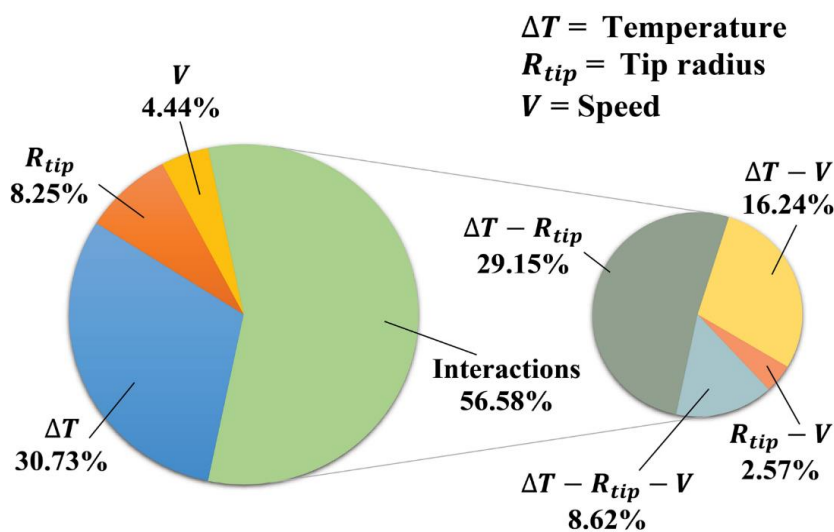
$$D_i(Z) = Var[E(Z | \Psi_i)]. \quad (32)$$

$$D_{ij}(Z) = Var[E(Z | \Psi_i, \Psi_j)] - D_i(Z) - D_j(Z). \quad (33)$$



شکل ۷. شاخص‌های سوبول بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری به عنوان خروجی میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی با تحریک پایه

Fig. 7. Sobol indices on the average depth of nanomachining as the output of a dynamic scanning thermal microscope with base excitation



شکل ۸. شاخص‌های سوبول بر روی صافی سطح نهایی نانوماشینکاری به عنوان خروجی میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی با تحریک پایه

Fig. 8. Sobol indices on the final surface of nanomachining as the output of dynamic scanning thermal microscope with base excitation

مورد حساسیت مدل بدست می‌آید. اختلاف مقدار بین شاخص کل با شاخص سوبول به معنی وجود رفتار غیرخطی و نیز برهمکنش بین پارامترهاست. به عبارت دیگر، در صورتی که مقدار شاخص کل با شاخص سوبول برای یک پارامتر ورودی برابر باشد، یعنی پارامتر مربوطه هیچ برهمکنشی با سایر پارامترها ندارد و خود به صورت

نشان‌دهنده شاخص کل برای ورودی i ام می‌باشد که از مجموع شاخص سوبول ورودی با شاخص برهمکنش ورودی‌ها بدست می‌آید. $i\#$ شامل تمام زیر مجموعه‌های پارامتر ورودی و برهمکنش آن با سایر پارامترها است. هنگامی که d بزرگ است فقط اثرات اصلی و کل اثرات محاسبه می‌شوند، بنابراین اطلاعات خوبی در

مستقیم و خطی بر خروجی مساله تاثیر دارد. در صورتی که مقدار شاخص کل برای یک پارامتر ورودی صفر باشد یعنی مساله از آن پارامتر مستقل است [۲۳ و ۲۶].

۳- نتایج و بحث

مشخصات پروب میکروسکوپ روبشی حرارتی جهت نانوماشینکاری که به عنوان بررسی موردی در این تحقیق استفاده می‌گردد، در جدول شماره ۱ آورده شده است. پارامترهای موجود در این جدول از منبع [۱۲] گرفته شده است مگر پارامترهایی که در جدول مربوطه با علامت ستاره مشخص شده‌اند. اختلاف درجه حرارت از ۰ تا ۸۰۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. در این قسمت میزان حساسیت نتایج به تعداد مودهای فرضی مورد مطالعه قرار می‌گیرد که نتایج حاصله نشان می‌دهند که اختلاف بین نتایج ۳ مود فرضی با ۴ مود فرضی ناچیز است. بنابراین ۳ مود فرضی به علت دارا بودن دقت کافی در نظر گرفته می‌شود.

معادلات به صورت تحلیلی و به وسیله کدنویسی در متلب حل می‌شوند. سپس فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته و دامنه پاسخ در فرکانس تحریک پایه و همچنین در فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته برای توزیع حرارت خطی بدست می‌آیند. جزئیات تابع توزیع حرارت برای مدل نام برده شده در جدول شماره ۲ ذکر شده است. نرمال سازی فرکانس‌ها و دامنه‌ها با تقسیم پاسخ‌های هر مود بر پاسخ همان مود در حالت بدون وجود بار حرارتی ($\Delta T = 0$) انجام می‌شود.

شکل ۲ نشان دهنده افزایش فرکانس‌های طبیعی پروب، نسبت به افزایش اختلاف درجه حرارت در تابع توزیع حرارت خطی در مودهای اول تا سوم می‌باشد. اختلاف جزئی موجود بین نتایج بدست آمده برای فرکانس‌های طبیعی انتقال یافته، به علت حل معادلات حرکت به روش تحلیلی می‌باشد و با توجه به تحلیلی بودن حل معادلات، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج بدست آمده در این تحقیق از دقت بیشتری برخوردار است.

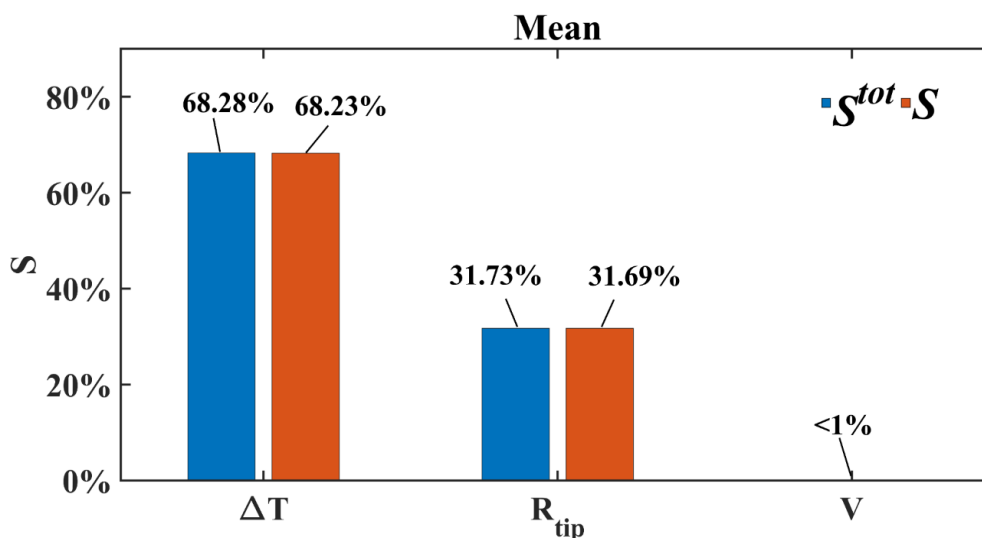
شکل ۳ نشان دهنده کاهش دامنه پروب در انتهای تیر، نسبت به افزایش اختلاف درجه حرارت در فرکانس تحریک پایه و فرکانس طبیعی انتقال یافته مود دوم در تابع توزیع حرارت خطی می‌باشد. اختلاف موجود در دامنه پاسخ بدست آمده در فرکانس طبیعی انتقال یافته مود دوم، به دلیل حل تحلیلی معادلات حرکت است.

نتایج در مقاله [۱۲]، از حل معادلات به روش عددی و از طریق تبدیل فوریه سریع^۱ که یکی از الگوریتم‌های مورد استفاده در پردازش سیگنال و آنالیز داده می‌باشد، بدست آمده است. به علت افزایش فرکانس در مودهای بالا، عملاً تبدیل فوریه سریع نتوانسته پاسخ‌های دقیق را با دقت Hz5 بدست آورد و نتایج با دقت پایین بیان شده است. در نتیجه، نتایج بدست آمده در این تحقیق به علت حل تحلیلی، دقیق تر می‌باشند.

شکل‌های ۴ تا ۶ شبیه سازی مقطع نانوماشینکاری شده یک نمونه به ضخامت ۱۰۰ nm را در حالت تحریک پایه با توزیع حرارت خطی نشان می‌دهند. این شبیه سازی در دو دمای متفاوت و با اعمال اثرات شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب بر نانوماشینکاری صورت می‌گیرد. سرعت حرکت پروب $\mu\text{m/s}$ (۲۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰) V، شعاع تیپ R_{tip} (۴۰، ۲۰، ۵) nm و نقطه تنظیم از سطح نمونه برابر ۱۵ nm فرض شده است. با در نظر گرفتن طول نمونه به اندازه ۵۰۰ nm و جایگذاری سرعت‌های مختلف در معادله (۲۴)، زمان مورد نیاز برای پیمودن طول نمونه حاصل می‌شود. با اعمال زمان بدست آمده در معادله (۲۵)، پاسخ ارتعاشی مطلق سیستم بدست می‌آید که با جاروب کردن شعاع تیپ بر روی این پاسخ، پروفیل شبیه سازی شده نانوماشینکاری نشان داده می‌شود. معیار عمق نانوماشینکاری میانگین و صافی سطح، واریانس می‌باشد. نتایج حاصله بیان می‌کند که با افزایش شعاع تیپ صافی سطح نهایی افزایش می‌یابد. علاوه بر آن کاملاً واضح است که با افزایش شعاع تیپ به علت براده برداری بیشتر از سطح نمونه، عمق نانوماشینکاری نیز افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش سرعت حرکت پروب، به علت افزایش واریانس پاسخ ارتعاشی مطلق، صافی سطح نهایی کاهش می‌یابد.

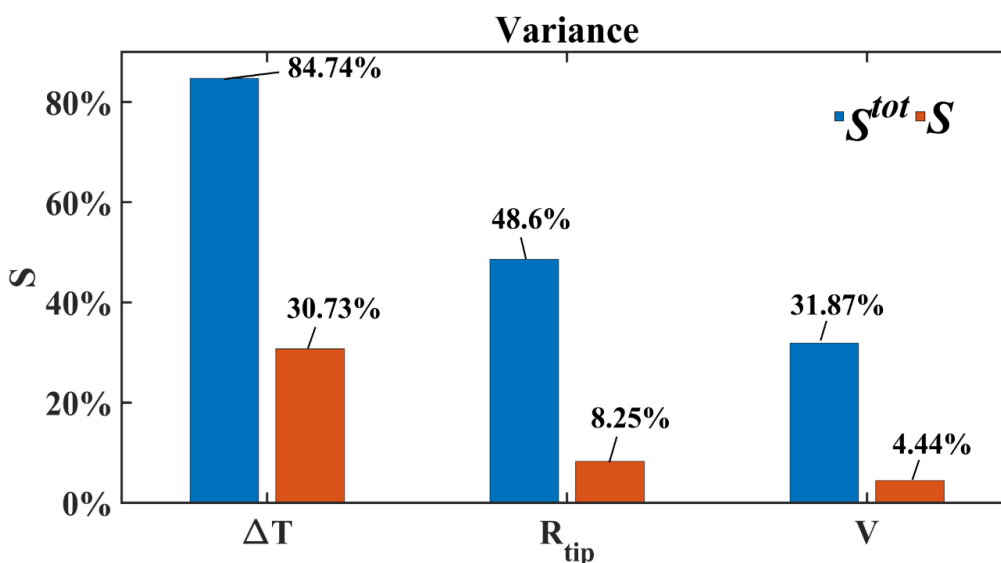
طبق نتایج مندرج در منبع [۱۲] انتظار می‌رفت که با افزایش درجه حرارت و کاهش واریانس پاسخ ارتعاشی، صافی سطح نهایی نانوماشینکاری شده افزایش یابد اما با اعمال اثرات شعاع تیپ بر روی پاسخ ارتعاشی و بررسی نتایج حاصله مشخص گردید که به علت بالا بودن فرکانس، عملاً تاثیرات بخشی از پاسخ ارتعاشی که در محدوده کوچک تر از شعاع تیپ قرار داشته و دامنه‌های کوچک تری دارد، بر روی سطح نهایی نانوماشینکاری، حذف می‌گردد. در نتیجه می‌توان گفت که صافی سطح نهایی نانوماشینکاری وابسته

1 Fast Fourier Transform (FFT)



شکل ۹. مقایسه تاثیرات شاخص‌های کل و شاخص‌های سوپول بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری به عنوان خروجی میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی با تحریک پایه

Fig. 9. Comparison of the effects of total indices and Sobol indices on the average depth of nanomachining as dynamic scanning thermal microscope output with base excitation



شکل ۱۰. مقایسه تاثیرات شاخص‌های کل و شاخص‌های سوپول بر روی صافی سطح نهایی نانوماشینکاری به عنوان خروجی میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی با تحریک پایه

Fig. 10. Comparison of the effects of total indices and Sobol indices on the final surface of nanomachining as dynamic scanning thermal microscope output with base excitation

نانوماشینکاری شده بیان گردد. در نتیجه همانطور که در شکل‌های فوق مشخص گردید علاوه بر درجه حرارت، تاثیرات شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب بر روی صافی سطح بسیار حائز اهمیت بوده و می‌توانند به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر روی صافی سطح نهایی نانوماشینکاری محسوب گردند.

به پاسخ‌های ارتعاشی با دامنه بزرگ می‌باشد. از این رو با توجه به متفاوت بودن شکل کلی پاسخ ارتعاشی در درجه حرارت‌های مختلف و همچنین پراکنده بودن محل پیک‌های بزرگ در طول پاسخ ارتعاشی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درجه حرارت نمی‌تواند به تنهایی به عنوان یک معیار قطعی برای افزایش صافی سطح نهایی

تاثیر دارند و برهم‌کنشی بین هیچ یک از پارامترهای ورودی وجود ندارد. علاوه بر آن تاثیرات سرعت حرکت پروب بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری بسیار ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر می‌باشد. نتایج موجود در شکل ۹ نشان می‌دهد که شاخص‌های کل از شاخص‌های سوپول بیشتر می‌باشند که این امر بیان‌گر وجود برهمکنش بین هر یک از پارامترهای ورودی و روند غیرخطی تاثیرات پارامترهای موجود بر روی صافی سطح نهایی نانوماشینکاری می‌باشد. به عنوان مثال موردی، شاخص سوپول دما با داشتن $30/73\%$ تاثیر و شاخص کل دما با $84/74\%$ تاثیر، بیان می‌کند که دما بصورت مستقل $30/73\%$ بر روی صافی سطح نهایی تاثیر داشته و 51% تحت تاثیر برهمکنش بین درجه حرارت و سایر پارامترها می‌باشد. این تحلیل برای هر دو پارامتر شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب نیز قابل ارائه است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آنالیز حساسیت کلی پارامترهای نانوماشینکاری با استفاده از میکروسکوپ روبشی حرارتی دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفت. معادلات کوپله غیرخطی حرکت با استفاده از روش موده‌های فرضی به صورت تحلیلی و به کمک نرم افزار متلب حل گردید. از حل تحلیلی معادلات، فرکانس‌های طبیعی انتقال‌یافته و دامنه‌ها در فرکانس تحریک پایه و فرکانس طبیعی انتقال‌یافته مود دوم در دماهای مختلف با توزیع حرارت خطی برای میکروسکوپ روبشی حرارتی با تحریک پایه با ادبیات فن اعتبارسنجی شد. بیان گردید که به علت بالابودن فرکانس در مود دوم و عدم توانایی تبدیل فوریه سریع در بدست آوردن نتایج به صورت دقیق، دامنه در فرکانس طبیعی انتقال‌یافته مود دوم با نتایج مندرج در [۱۲] متفاوت می‌باشد. در نتیجه اظهارگردید که دلیل حل تحلیلی معادلات حرکت در این تحقیق، نتایج بدست‌آمده از دقت بیشتری برخوردار می‌باشند. سپس مقطع یک نمونه نانوماشینکاری شده با جاروب کردن تیپ با شعاع‌های مختلف بر روی پاسخ ارتعاشی مطلق سیستم در سرعت و دماهای متفاوت شبیه‌سازی شد. نشان داده شد که با افزایش دما عمق نانوماشینکاری کاهش می‌یابد. همچنین افزایش شعاع تیپ به علت براده‌برداری بیشتر از سطح نمونه، سبب افزایش عمق نانوماشینکاری می‌گردد. بیان شد که با افزایش سرعت حرکت پروب به علت افزایش واریانس پاسخ ارتعاشی، صافی سطح نهایی نانوماشینکاری کاهش

در این بخش، شاخص‌های سوپول و شاخص‌های کل برای میانگین عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری تعیین می‌گردند. هدف از بررسی این شاخص‌ها، دستیابی به میزان تاثیرات مستقیم و همچنین برهم‌کنش هر یک از پارامترهای ورودی دما، شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب، بر روی دو خروجی میانگین عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری می‌باشد. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهند که ۲ پارامتر دما و شعاع تیپ بر روی میانگین عمق و هر ۳ پارامتر دما، شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب بر روی صافی سطح نهایی نانوماشینکاری، تاثیرات جدی دارند.

شکل ۷ شاخص‌های سوپول را برای میانگین عمق نانوماشینکاری به عنوان خروجی بیان می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که دما و شعاع تیپ به ترتیب موثرترین شاخص‌ها در رابطه با میانگین عمق نانوماشینکاری می‌باشند. پارامتر سرعت و برهمکنش بین هر ۳ شاخص، با داشتن مقدار کمتر از 10% بیان می‌کند که سرعت حرکت پروب تاثیری بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری نداشته و برهم‌کنش بین هر ۳ پارامتر بسیار ناچیز و در حد صفر می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که رفتار هر یک از پارامترهای دما و شعاع تیپ بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری به صورت نسبتاً خطی می‌باشد.

شکل ۸ شاخص‌های سوپول را برای صافی سطح نهایی نانوماشینکاری نشان می‌دهد. نتایج بیان می‌کند که صافی سطح نهایی نانوماشینکاری به ترتیب تحت تاثیر دما، شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب می‌باشد. اما برهم‌کنش موجود بین پارامترها با داشتن بیش از 56% سهم، نشان می‌دهد که رفتار سیستم نسبت به پارامترهای مورد بررسی به شدت غیرخطی می‌باشد. در میان برهمکنش‌های بین پارامترها، بیشترین تاثیر مربوط به برهمکنش بین دما و شعاع تیپ می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که برهمکنش بین دما و شعاع تیپ می‌تواند صافی سطح نهایی نانوماشینکاری را به صورت قابل‌توجهی تحت تاثیر قرار دهد.

شکل‌های ۹ و ۱۰ تاثیرات هر یک از پارامترهای دما، شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب را هم به صورت فردی و هم به صورت مجموع تاثیرات فردی با برهمکنش بین پارامتری، برای هر دو خروجی میانگین عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری نشان می‌دهند. در شکل ۱۰ بیان می‌گردد که با وجود اختلاف جزئی در نتایج دما و شعاع تیپ، این دو پارامتر تنها به صورت مستقل بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری

L	طول پروب، μm
$P(x)$	نیروی محوری ناشی از حرارت
$q(t)$	مختصات عمومی سیستم
q_h^i	پاسخ عمومی سیستم در مود i ام
q_p^i	پاسخ خصوصی سیستم در مود i ام
q_t^i	پاسخ کل سیستم در مود i ام
R_{tip}	شعاع تیپ، nm
S_i	شاخص سوپول پارامتر i ام
S_i^{tot}	شاخص کل پارامتر i ام
t	زمان، s
V	سرعت حرکت پروب، $\mu\text{m/s}$
w_{set}	نقطه تنظیم، nm
$Y(x)$	معادله شکل مودها
$y(x, t)$	جابجایی نسبی پروب نسبت به پایه، nm
y_{total}	جابجایی مطلق پروب نسبت به پایه، nm
y_e	دامنه تحریک پایه در مود اول، nm
	علائم یونانی
α	ضریب انبساط حرارتی، $1/^\circ\text{C}$
ρ	جرم مخصوص پروب، kg/m^{-3}
ΔT	اختلاف درجه حرارت، $^\circ\text{C}$
$\theta(x)$	تابع توزیع حرارت
ϕ_i	فاز پاسخ q_h^i در ω_{sh}^i
ψ	پارامتر ورودی
ω_e	فرکانس تحریک پایه در مود اول، Hz
ω_{sh}^i	فرکانس طبیعی انتقال یافته مود i ام، Hz

مراجع

- [1] T. Lui, B. Yang, Thermography techniques for integrated circuits and semiconductor devices, Sensor Review, 27 (2007) 289-309.
- [2] J. Juszczak, A. Kaźmierczak-Bałata, P. Firek, J. Bodzenta, Measuring thermal conductivity of thin films by Scanning Thermal Microscopy combined with thermal spreading resistance analysis, Ultramicroscopy, 175 (2017) 81-86.
- [3] T.P. Nguyen, E. Lemaire, S. Euphrasie, L. Thiery, D.

می‌یابد. سپس مشخص شد که افزایش دما لزوماً صافی سطح نمونه را بهبود نمی‌بخشد و دما به تنهایی پارامتر تاثیرگذار بر این موضوع نمی‌باشد. پس از آن شاخص‌های سوپول برای میانگین عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری بیان گردید. نشان داده شد که، بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری تنها دما و شعاع تیپ اثر داشته و اثرات سرعت حرکت پروب و برهمکنش بین پارامترها در حد صفر می‌باشد و قابل صرف‌نظر است. همچنین اظهار شد علاوه بر تاثیر قابل توجه هر ۳ پارامتر دما، شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب بر روی صافی سطح نهایی نانوماشینکاری، برهم‌کنش موجود بین این پارامترها بسیار اثرگذار می‌باشد. در نهایت تاثیرات هر یک از پارامترهای دما، شعاع تیپ و سرعت حرکت پروب هم به صورت فردی و هم به صورت مجموع تاثیرات فردی با برهم‌کنش بین پارامتری، برای هر دو خروجی میانگین عمق و صافی سطح نهایی نانوماشینکاری، مقایسه گردید. بیان شد که به طور کلی، میزان شاخص‌های کل نسبت به شاخص‌های سوپول در رابطه با صافی سطح نهایی نانوماشینکاری به طور قابل توجهی بیشتر می‌باشد که این نشان‌دهنده برهم‌کنش شدید بین پارامترها است. اما در رابطه با میانگین عمق نانوماشینکاری، شاخص‌های کل و شاخص‌های سوپول برای دو پارامتر دما و شعاع تیپ، تقریباً برابر و برای سرعت حرکت پروب بسیار ناچیز می‌باشد که این امر بیانگر عدم تاثیر سرعت حرکت پروب و برهم‌کنش بین پارامترها بر روی میانگین عمق نانوماشینکاری می‌باشد.

فهرست علائم

A	مساحت مقطع پروب، μm^2
A_e	دامنه شتاب تحریک پایه
A_e^i	دامنه در فرکانس تحریک پایه، nm
A_i^i	دامنه پاسخ q_h^i در ω_{sh}^i
A_e	دامنه پاسخ در فرکانس تحریک پایه، nm
A_{sh}^i	دامنه پاسخ در فرکانس طبیعی انتقال یافته مود i ام، nm
b	عرض پروب، μm
E	مدول الاستیک، GPa
h	ضخامت پروب، μm
h_b	تابع تحریک پایه
I	ممان دوم سطح پروب، μm^4

- microscopy methods, [Synthetic Metals](#), 232 (2017) 72-78.
- [12] M. Sohrabi, K.E. Torkanpouri, Vibration analysis of dynamic mode scanning thermal microscope nanomachining probe, *Results in Physics*, 13 (2019) 102164.
- [13] M. Damircheli, Geometrical Parameters of Rectangular AFM Cantilevers Producing Highest Sensitivity in Excitation of Second Mode in Air Environment, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 10(3) (2017) 51-58.
- [14] R. Potekin, S. Dharmasena, D.M. Mcfarland, L.A. Bergman, A.F. Vakakis, H. Cho, Cantilever dynamics in higher-harmonic atomic force microscopy for enhanced material characterization, *International Journal of Solids and Structures*, 110-111 (2017) 332-339.
- [15] G. Binnig, C.F. Quate, Ch. Gerber, Atomic Force Microscope, *Physical Review Letters*, 56 (1986) 930.
- [16] Y. Martin, C.C. Williams, H.K. Wickramasinghe, Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale, *Journal of Applied Physics*, 61 (1987) 4723.
- [17] T.R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, D. Rugar, Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity, *Journal of Applied Physics*, 69 (1991) 668.
- [18] S. Horstmeier, V. Walhorn, D. Anselmetti, Dynamic AFM force spectroscopy of DNA using FM mode with constant excitation, *Europhysics Letters*, 117(3) (2017) 38005.
- [19] SH. LeBlanc, H. Wilkins, Z. li, P. Kaur, H. Wang, D.E. Erie, Chapter Nine - Using Atomic Force Microscopy to Characterize the Conformational Properties of Proteins and Protein-DNA Complexes That Carry Out DNA Repair, [Methods in Enzymology](#), 592 (2017) 187-212.
- [20] M. Kocun, A. Labuda, A. Gannepalli, R. Proksch, Contact resonance atomic force microscopy imaging in air and water using photothermal excitation, [Review of Scientific Instruments](#), 86 (2015) 083706.
- [21] Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Perez, S. Morita, O. Custance, Chemical identification of individual surface atoms by atomic force microscopy, *Nature*, 446 (2007) 64-67.
- Teysieux, D. Briand, P. Vairac, Microfabricated high temperature sensing platform dedicated to Scanning Thermal Microscopy (SThM), [Sensors and Actuators A: Physical](#), 275 (2018) 109-118.
- [4] M. Timofeeva, A. Bolshakov, P.D. Tovee, D.A. Zeze, V.G. Dubrovskii, O.V. Kolosov, Scanning thermal microscopy with heat conductive nanowire probes, *Ultramicroscopy*, 162 (2016) 42-51.
- [5] A.M. Massoud, J.M. Bluet, V. Lacaten, M. Haras, J.F. Robillard, P.O. Chapuis, Native-oxide limited cross-plane thermal transport in suspended silicon membranes revealed by scanning thermal microscopy, *Applied Physics Letters*, 111 (2017) 063106.
- [6] A. Dawson, M. Rides, A.S. Maxwell, A. Cuenat, A.R. Samano, Scanning thermal microscopy techniques for polymeric thin films using temperature contrast mode to measure thermal diffusivity and a novel approach in conductivity contrast, *Polymer Testing*, 41 (2015) 198-208.
- [7] D. Varandani, KH. Agarwal, J. Brugger, R.B. Mehta, Scanning thermal probe microscope method for the determination of thermal diffusivity of nanocomposite thin films, *Review of Scientific Instruments*, 87 (2016) 084903.
- [8] S.W. Poon, J. Spiece, A.J. Robson, O.V. Kolosov, S. Thompson, Probing thermal transport and layering in disk media using scanning thermal microscopy, in *International Magnetism Conference*, Dublin, Ireland: IEEE (2017) 2150-4601.
- [9] H.L. Lee, SH.SH. Chu, W.J. Chang, Vibration analysis of scanning thermal microscope probe nanomachining using Timoshenko beam theory, *Current Applied Physics*, 10 (2010) 570-573.
- [10] A.A. Wilson, TH.T. Borca, Quantifying non-contact tip-sample thermal exchange parameters for accurate scanning thermal microscopy with heated microprobes, [Review of Scientific Instruments](#), 88 (2017) 074903.
- [11] D.R. Trefon, J. Juszczyk, A. Fleming, N. Horny, J.A. Stéphane, M. Chirtoc, A.B. Kaźmierczak, J. Bodzenta, Thermal characterization of metal phthalocyanine layers using photothermal radiometry and scanning thermal microscopy, *Applied Physics Letters*, 101 (2012) 113101.

- Mathematics and Computers in Simulation, 55 (2001) 271-280.
- [27] C.C. Williams, H.K. Wickramasinghe, Scanning thermal profiler, *Microelectronic Engineering*, 5(1-4) (1986) 509-513.
- [28] A. Majumdar, SCANNING THERMAL MICROSCOPY, *Annual Review of Materials Science*, 29 (1999) 505-585.
- [29] J.H. Bae, T. Ono, M. Esashi, Boron-doped diamond scanning probe for thermo-mechanical nanolithography, *Diamond and Related Materials*, 12 (2003) 2128-2135.
- [30] T.H. Fang, W.J. Chang, Microthermal machining using scanning thermal microscopy, *Applied Surface Science*, 240 (2005) 312-317.
- [31] S.S. Rao, *Vibration of Continuous Systems*, 2nd ed., Wiley, New Jersey, 2019.
- [32] S.S. Rao, *Mechanical Vibrations in SI Units*, 6th ed., Wiley, New Jersey, 2017.
- [33] W. Hoeffding, A class of statistics with asymptotically normal distributions, *The Annals of Mathematical Statistics*, 19 (1948) 293-325.
- 67.
- [22] E.T. Herruzo, A.P. Perrino, R. Garcia, Fast nanomechanical spectroscopy of soft matter, *Nature Communications*, 5 (2014) 3126.
- [23] K.E. Torkanpouri, H. Zohoor, M.H. Korayem, Global sensitivity analysis of backside coating parameters on dynamic response of AM-AFM, *Mechanical Technologies*, 22 (2017) 282-290.
- [24] M.H. Korayem, A. Amanati, Sensitivity Analysis of Load Carrying Capacity in AFM-based Manipulation, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(6) (2010) 7692-7693.
- [25] M.H. Korayem, Z. Mahmoodi, M. Mohammadi, 3D investigation of dynamic behavior and sensitivity analysis of the parameters of spherical biological particles in the first phase of AFM-based manipulations with the consideration of humidity effect, *Journal of theoretical Biology*, 436 (2018) 105-119.
- [26] I.M. Sobol, Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Sh.N. Toossi, K.E. Torkanpouri, *Global sensitivity analysis of nanomachining parameters by using dynamic scanning thermal microscope*, *AmirKabir J. Mech Eng.*, 53(4) (2021) 2367-2384.

DOI: [10.22060/mej.2020.17509.6607](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17509.6607)



