



Analysis of Transient Tip-Sample Interactions in High Speed Tapping Mode Atomic Force Microscopy with the Purpose of Damage Prevention

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Fada H.¹ MSc,
Soleimani A.*¹ PhD,
Sadeghian H.² PhD

How to cite this article

Fada H, Soleimani A, Sadeghian H. Analysis of Transient Tip-Sample Interactions in High Speed Tapping Mode Atomic Force Microscopy with the Purpose of Damage Prevention. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):1827-1836.

ABSTRACT

High speed atomic force microscopy (HS-AFM) is one of the widely used techniques in nanotechnology applications due to high resolution and the ability of 3D imaging. Despite its advantages and although it is known as a nondestructive technique, tip or sample damage can occur if maximum repulsive force is higher than the failure stress of the sample or tip, as a result of tip-sample interactions. Several studies in understanding the peak repulsive forces in tapping mode AFM have been carried out, but mostly in steady state situations. In transient situation when tip encounters a sudden steep upward step, the repulsive force can be much higher than that in the steady state situation and, consequently, damage could happen. Therefore, if appropriate parameters' values are not tuned, the tip-sample stress may exceed yield stress of the tip or the sample. This paper presents the comparison of maximum transient interaction forces in time periods of net attractive and repulsive forces and the effects of important scanning parameters on maximum transient stress of compliant samples with the elastic modulus in the range of 2GPa together with lateral resolution and scanning speed diagrams, using theoretical analysis as a novelty of this paper, so that selecting cantilever stiffness in the range of 0.1-1N/m, free air amplitude 60-100nm, amplitude ratio 0.8-0.9, quality factor 50-100, tip radius 10-40 nm, and scanning speed 0.1-0.3mm/s relative to required lateral resolution indeed leads to safe high speed microscopy.

Keywords High Speed AFM; Tip-sample Interactions; Peak Repulsive Force; Transient Situation; Damage

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Mechanical Engineering Department, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
Phone: +98 (31) 42292882
Fax: +98 (31) 42291016
soleimani@pmc.iaun.ac.ir

Article History

Received: October 12, 2018
Accepted: January 15, 2019
ePublished: August 12, 2019

CITATION LINKS

[1] Atomic force ... [2] Atomic resolution with atomic ... [3] Atomic force microscopy as a tool for ... [4] Nano manipulation with rectangular cantilever ... [5] Molecular dynamic modeling ... [6] A comparative study on utility of Scanning ... [7] Nanofabrication with atomic force ... [8] Nanografting for surface physical ... [9] Development of a detachable high speed ... [10] High-throughput atomic force microscopes ... [11] Atomic force microscopy: A powerful tool ... [12] Sub-50 nm metrology on ... [13] Development of the metrology and imaging of ... [14] High-speed atomic force microscopy for nano ... [15] Probing structural dynamics of an artificial ... [16] High performance feedback for fast scanning ... [17] A miniaturized, high frequency mechanical scanner ... [18] Transient Tip-Sample Interactions in High ... [19] High-speed AFM for 1x node metrology ... [20] A review of atomic force microscopy ... [21] Imaging of soft matter with tapping-mode atomic ... [22] Peak forces in high-resolution imaging of soft ... [23] Peak forces and lateral resolution in amplitude ... [24] Analytical formulas and scaling laws for peak interaction ... [25] Practical method to limit tip-sample contact ... [26] Tip motion in amplitude modulation ... [27] Attractive and repulsive tip-sample ... [28] Large deformations of a rubber sphere under diametral ... [29] Extensive theory of force-approach ... [30] Surface and interfacial ... [31] Contact ... [32] Dynamic atomic force microscopy ... [33] Noncontact atomic force ... [34] Simultaneous AFM nano-patterning and imaging ... [35] Quantitative measurement of tip-sample interaction ...

تحلیل برهمکنش گذرای نمونه- سوزن در میکروسکوپ نیروی اتمی پرسرعت ضربه‌ای به منظور جلوگیری از آسیب نمونه‌های نرم

حامد فداء MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده دانشکده فنی مهندسی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

علی سلیمانی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده دانشکده فنی مهندسی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

حامد صادقیان PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی آیندهوون، آیندهوون، هلند

چکیده

میکروسکوپ نیروی اتمی پرسرعت (HS-AFM) به دلیل دقت بالا و قابلیت تصویربرداری سه‌بعدی یکی از پرکاربردترین تکنیک‌های مورد استفاده در فناوری نانو است. علی‌رغم مزیت‌ها و غیرمخرب شناخته‌شدن این تکنیک، اگر ماکزیمم نیروی دافعه برهمکنش بیشتر از تنش شکست نمونه یا سوزن باشد آسیب نمونه یا سوزن محتمل خواهد بود. تاکنون مطالعات زیادی در مورد نیروهای دافعه در حالت ضربه‌ای انجام شده اما اکثراً در حالت پایدار بوده است. برای مواد نرم و در حالت گذرا هنگامی که سوزن ناگهان با یک پله رو به بالا مواجه می‌شود نیروی دافعه می‌تواند از حالت پایدار بیشتر بوده و در نتیجه باعث ایجاد آسیب به نمونه شود. بنابراین اگر مقادیر پارامترها به‌طور مناسب انتخاب نشود تنش نمونه- سوزن ممکن است از تنش تسلیم نمونه تجاوز کند. در این مقاله ماکزیمم نیروی برهمکنش گذرا در دو بازه زمانی جاذبه و دافعه با یکدیگر مقایسه و تحلیل اثر پارامترهای مهم اسکن روی ماکزیمم تنش گذرای مواد نرم در میکروسکوپ نیروی اتمی پرسرعت در شرایط گذرا به صورت تئوری انجام شده و نمودارهای دقت جانبی و سرعت اسکن نیز ارائه شده که از نوآوری‌های این تحقیق است به‌طوری که در میکروسکوپ پرسرعت نمونه‌های نرم با مدول الاستیسیته در محدوده ۲ گیگاپاسکال به منظور پیشگیری از آسیب نمونه، استفاده از سفتی فنر در رنج ۱-۱/۱۰ نیوتون بر متر، دامنه آزاد ۱۰۰-۶۰ نانومتر، نسبت دامنه ۰/۸-۰/۹، فاکتور کیفیت ۱۰۰-۵۰، شعاع سوزن ۴۰-۱۰ نانومتر و سرعت اسکن ۰/۳-۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه نسبت به رزولوشن مورد نظر توصیه می‌شود تا فرآیند اسکن به‌صورت ایمن و با نتایج دقیق انجام شود.

کلیدواژه‌ها: میکروسکوپ نیروی اتمی پرسرعت، برهمکنش نمونه- سوزن، ماکزیمم نیروی دافعه، شرایط گذرا، آسیب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵

* نویسنده مسئول: soleimani@pmc.iaun.ac.ir

۱- مقدمه

میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM) در سال ۱۹۸۶ میلادی توسط آقای ببینگ و همکاران به‌عنوان روشی جدید برای اندازه‌گیری نیروهای ذرات به کوچکی اتم توسعه یافت [1, 2]. میکروسکوپ نیروی اتمی، میکروسکوپ اسکن‌کننده توسط پروب است که پروب آن از یک سوزن و یک میکروتیبر یکسرگیردار تشکیل شده است. هنگامی که سوزن پروب به‌طور کامل به سطح نمونه نزدیک می‌شود اتم‌های سوزن و نمونه با یکدیگر برهمکنش خواهند داشت که با پایش این برهمکنش‌ها می‌توان به توپوگرافی سطح دست یافت. به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی می‌توان به ویژگی‌هایی از مواد نظیر خواص الکتریکی، مکانیکی و حرارتی در مقیاس نانو دست یافت. با استفاده از سوزن در اندازه نانو و نانوموقعیت‌دهی دقیق این امکان وجود دارد که مواد را در مقیاس نانو دستکاری نمود [3, 4]. همچنین از میکروسکوپ نیروی اتمی برای اندازه‌گیری خواص ویروس‌ها و پروتئین‌ها [5]، نانوالیاف‌ها [6]، سلول‌ها [7] و کاربردهای دیگر نظیر

نانولیتوگرافی [8]، نانو فابریکیتینگ [9]، نانو گرفتینگ [10] و مترولوژی [11, 12] استفاده می‌شود.

علی‌رغم مزیت‌های تشریح‌شده مهم‌ترین عیب AFM سرعت بسیارکند آن است به این صورت که فرآیند اندازه‌گیری زمان‌بر بوده و موجب محدودشدن کاربردهای AFM در فرآیندهایی مانند مترولوژی نیمه‌هادی‌ها [9, 13] و پایش فرآیند دینامیکی در علوم زیستی شده است [14, 15]. تاکنون مطالعات زیادی توسط چند گروه تحقیقاتی در جهت افزایش سرعت AFM انجام شده که این افزایش به‌صورت مکترونیک و بهبود پهنای باند کنترلر بوده است [16, 17]. در حالت کلی AFM در چند حالت عمل می‌کند که بین آنها حالت ضربه‌ای پرکاربردترین حالت است زیرا دارای سرعت بالا، پایداری [18]، دقت تصویر عمودی و جانبی مناسب، نیروی عمودی و جانبی کم، زمان تماس کم و دامنه نسبتاً بزرگ در مقایسه با سایر حالت‌ها است [19]. تصویربرداری نمونه‌های نرم توسط حالت‌های تماسی بسیارمشکل و همراه با نتایج نادرست است بنابراین حالت ضربه‌ای امکان تصویربرداری نمونه‌های نرم با دقت بالا را فراهم کرده به‌طوری که بر مشکلاتی مانند اصطکاک و چسبندگی که از مشکلات رایج در دیگر میکروسکوپ‌های نیروی اتمی هستند غلبه کرده است. در حالت ضربه‌ای میکروتیبر یکسرگیردار در فرکانس رزونانس یا نزدیک به آن نوسان می‌کند [20] و در نتیجه زمان تماس کم شده و در این حالت نیروی برشی وارده شده به نمونه نیز بسیارکم بوده و از این‌رو امکان آسیب به نمونه کاهش می‌یابد. اما با این حال حتی در حالت ضربه‌ای نیز هنگامی که سوزن با یک پله تیز رو به بالا مواجه می‌شود احتمال آسیب به نمونه‌های نرم وجود خواهد داشت. از آنجایی که AFM روشی تماسی یا شبه‌تماسی است، وابسته به حالت انتخابی، نیروی برهمکنش بسیارقوی بین سوزن و ناهمواری‌های سطح نمونه وجود خواهد داشت. به دلیل اینکه اندازه سوزن در مقیاس نانو است ناحیه تماس سوزن با نمونه بسیارکوچک بوده که منجر به تنش‌های بسیار زیاد هرتز خواهد شد [19]. در میکروسکوپی نیروی اتمی پرسرعت، بازه زمانی که در آن سوزن با تغییر ناهمواری‌های سطح نمونه مواجه می‌شود ممکن است بسیارکمتر از زمان پاسخ میکروتیبر یکسرگیردار باشد [18]. بنابراین اگر پارامترهای اسکن به‌درستی تنظیم نشوند سوزن ممکن است به ناهمواری‌های سطح آسیب زده و تصویربرداری درستی از سطح ارایه نشود.

یانگ و همکاران [21] روی نیروهای اعمالی از سوزن به نمونه‌های نرم در AFM با مدولاسیون دامنه (AM-AFM) و مدولاسیون فرکانس (FM-AFM) تحقیق کردند. گازمن و همکاران [22, 23] نیز نیروهای ماکزیمم در تصویربرداری با دقت بالای نمونه‌های نرم در محیط مایع را محاسبه نموده و پاسخ مکانیکی نمونه را با استفاده از مدل‌های مکانیک تماس تاتارا و هرتز شبیه‌سازی نمودند. هو و رامن [24] نیز روش حل تحلیلی برای ماکزیمم نیروهای برهمکنش ارایه کردند که به‌صورت عددی مقادیر شبیه‌سازی شده برای مدولاسیون دامنه را تحت شرایط تجربی تقریب می‌زند. وحدت و کارپیک [25] نشان دادند که با استفاده از فرمول و تحلیل، انتخاب برخی از مقادیر پارامترها باعث آسیب شدید سوزن می‌شود. بنابراین روش آنها انتخاب میکروتیبرهای AM-AFM و پارامترهای تجربی را فراهم می‌کند تا از بدون آسیب باقی‌ماندن سوزن و نمونه در بازه‌های زمانی زیاد اطمینان حاصل شود. در تحقیقات مرورشده تحلیل برهمکنش سوزن و نمونه در حالت پایدار بررسی شده است ولی در شرایطی که سوزن با یک پله ناگهانی تیز رو به بالا مواجه شود حالت گذرا اتفاق می‌افتد که ماکزیمم نیروهای دافعه بسیار بحرانی بوده و احتمال آسیب بیشتری نسبت به شرایط پایدار خواهند داشت.

نظر گرفته شده است که $\omega = 2\pi f$ بوده و f برابر با فرکانس تشدید میکروتیر بر حسب هرتز است:

$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = \frac{HR}{6(d)^2} - \frac{4E_{eff}\sqrt{R}}{3} (\delta)^{3/2} + F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

در این معادله q, m, c, k, H و R به ترتیب جابه‌جایی سوزن، جرم موثر میکروتیر، ضریب میرایی، ثابت فنر میکروتیر، ثابت همگر و شعاع سوزن هستند.

با فرض تحریک میکروتیر در فرکانس تشدید، نیروی F_0 با تحلیل معادلات [34] از معادله (۲) و ضریب میرایی از معادله (۳) قابل محاسبه است.

$$F_0 = \frac{kA_{free}}{Q} \quad (2)$$

$$c = \frac{\sqrt{mk}}{Q} \quad (3)$$

در معادله (۲) پارامتر Q فاکتور کیفیت است و A_{free} دامنه آزاد میکروتیر در حالتی است که سوزن با سطح نمونه تماس ندارد و در حالتی که اولین تماس با سطح ایجاد می‌شود مقدار دامنه از A_{free} طبق رابطه $A = A_r \times A_{free}$ به مقدار تنظیمی A کاهش می‌یابد که در این رابطه A_r نسبت دامنه است. در معادله (۱) پارامتر d مجموع فاصله بین حالت تعادل سوزن (g) و جابه‌جایی سوزن (q) است و E_{eff} الاستیسیته موثر بین سوزن و نمونه بوده که از معادله (۴) قابل محاسبه است.

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{1 - \nu_t^2}{E_t} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s}$$

در این معادله ν_s و ν_t به ترتیب نسبت‌های پواسون سوزن و نمونه و E_s و E_t نیز به ترتیب مدول الاستیسیته سوزن و نمونه هستند. میزان تغییر شکل در سطح نمونه توسط سوزن δ به کمک تابع هوی‌ساید به صورت معادله (۵) تعریف می‌شود:

$$\delta = (a_0 + q - g_0)H(a_0 + q - g_0) \quad (5)$$

در معادله (۵)، a_0 فاصله بین مولکولی سوزن و نمونه است. قبل از این فاصله با نزدیک شدن سوزن به نمونه نیروی برهمکنش جاذبه شروع شده و با کم شدن فاصله سوزن و نمونه به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. با نزدیک شدن هرچه بیشتر سوزن به سطح نمونه نیروی برهمکنش دافعه شروع شده که با ایجاد ماکزیمم تغییر فرم در سطح نمونه به ماکزیمم مقدار خود خواهد رسید. بنابراین هنگامی که سوزن هیچگونه تماسی با نمونه ندارد فرورفتگی δ صفر است و هنگامی که سوزن در سطح نمونه تغییر فرم ایجاد می‌کند ماکزیمم نیروی دافعه غالب بوده و مقدار فاصله d با مقدار a_0 یکسان در نظر گرفته می‌شود. با دور شدن سوزن از نمونه نیروهای دافعه کاهش و نیروهای جاذبه افزایش می‌یابد تا اینکه مجموع نیروهای برهمکنش به صفر رسیده و سیکل پایان یابد و در ادامه سیکل جدید شروع شود. در میکروسکوپی نیروی اتمی ماکزیمم نیروی دافعه مهم‌ترین نقش را در آسیب نمونه و یا سوزن ایفا می‌کند [18]، بنابراین در بخش (۳) نیروی دافعه و تنش حاصل از آن در شرایط گذرا تحلیل خواهد شد.

۳- تحلیل شرایط گذرا

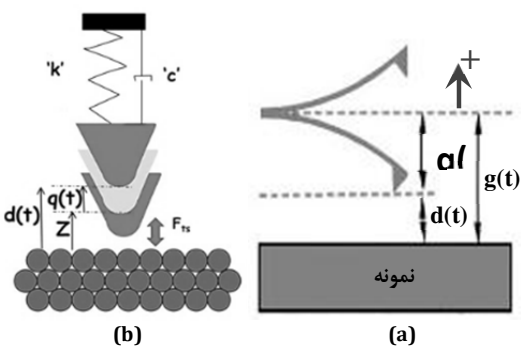
همان‌طور که پیش‌تر گفته شد در میکروسکوپی نیروی اتمی و در

کیوانی و همکاران [18] نیروها و تنش‌های تماسی را با در نظر گرفتن پله و بدون آن با استفاده از مدل المان محدود محاسبه نموده و ماکزیمم سرعت اسکن ایمن بدون ایجاد آسیب به یک نمونه سیلیکونی را ارایه کردند. صادقان و همکاران [19] نیز روی موضوع آسیب در میکروسکوپی نیروی اتمی پرسرعت برای مترولوژی و بازرسی ویفرسیلیکون بدون روکش و با روکش SU8 تحقیق کردند. اما در این تحقیقات نیز شرایط گذرا به صورت مطالعه موردی تحلیل شده و اثر زمان نشست، دقت تصویر، سرعت اسکن نسبت به پارامترهای موثر نظیر فاکتور کیفیت و ثابت فنر تحلیل نشده است. در ده سال اخیر صنعت نیمه هادی‌ها و میکروسکوپی نیروی اتمی پرسرعت پیشرفت بسیار سریعی داشته‌اند. از آنجایی که نیاز دستیابی به توپوگرافی دقیقی از سطوح در شرایط گذرا با حداقل آسیب یا بدون آن مطرح است، در این مقاله به منظور تحلیل برهمکنش حالت گذرای نمونه- سوزن فرض می‌شود هنگامی که سوزن در حال اسکن یک نمونه است به‌طور ناگهانی با یک پله تیز رو به بالا مواجه می‌شود. بنابراین با استفاده از مدل پرکاربرد جرم- فنر- نشست، سرعت اسکن و دقت جانبی تحلیل شده و مقادیر پارامترهای موثر به منظور دستیابی به اسکن ایمن و بدون آسیب ارایه شده است.

بخش‌های این مقاله به این صورت سازماندهی شده است که در بخش بعدی مدل برهمکنش گذرای سوزن- نمونه، در بخش سوم تحلیل شرایط گذرا، در بخش ۴ اثر پارامترهای عملیاتی و پروب AFM، در بخش ۵ تحلیل اثر پارامترهای اسکن روی ماکزیمم تنش گذرا، در بخش ۶ نتایج و در بخش ۷ جمع‌بندی نتایج ارایه خواهد شد.

۲- مدل برهمکنش سوزن- نمونه

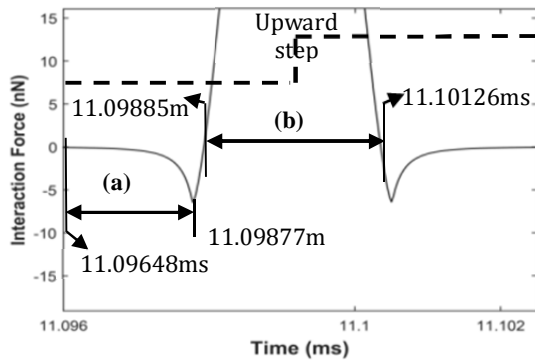
از پرکاربردترین مدل‌های مکانیک تماسی به منظور تحلیل مدل‌های تاتارا [28, 29] و هرتز [30, 31] هستند. در مدل تاتارا نمونه محدود بوده و برای نمونه‌های نرم نیروهای ماکزیمم آن دوبرابر کوچکتر از نیروهای مدل هرتز است [24]. همچنین در این مدل فاکتور ایمنی ۱/۴ بیشتر از مدل هرتز است [19]. بنابراین در این مقاله مدل هرتز به عنوان مدل مورد نظر برای تحلیل بدترین شرایط انتخاب شده است. معادله دیفرانسیل حرکت سیستم میکروتیر یکسر گیردار- سوزن با در نظر گرفتن مدل جرم- فنر- میراکننده با استفاده از برخی مطالعات [18, 19] مطابق شکل ۱ و اثر نیروی واندروالس در معادله (۱) ارایه شده است.



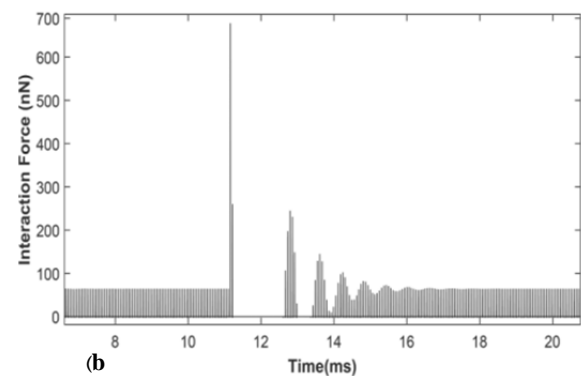
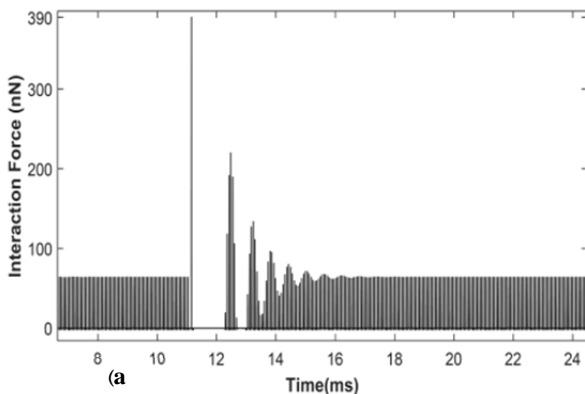
شکل ۱ (a) تعریف فاصله سوزن نسبت به سطح نمونه [32]؛ (b) مدل جرم- فنر- میراکننده برای پروب دستگاه AFM [33]

تحریک به صورت یک نیروی هارمونیک با دامنه F_0 و فرکانس ω در

با مقایسه نمودارهای $a-3$ و $b-3$ می‌توان دریافت که در بازه زمانی (a) ماکزیمم نیرو ۳۹۰ نانونیوتن و در بازه زمانی (b) ماکزیمم نیرو ۶۹۰ نانونیوتن است و حدود ۷ میلی‌ثانیه طول می‌کشد که شرایط گذرا به شرایط پایدار تبدیل شود. با توجه به اینکه ماکزیمم نیرو در بازه زمانی (b) بسیار بیشتر از بازه زمانی (a) است بنابراین در این مقاله فرض می‌شود که تغییر توپوگرافی به صورت پله رو به بالا در بازه زمانی (b) و محل ماکزیمم نیروی دافعه رخ خواهد داد تا بدترین شرایط تحلیل شود.



نمودار ۲ (a) بازه زمانی نیروهای جاذبه خالص (b) بازه زمانی نیروهای دافعه خالص



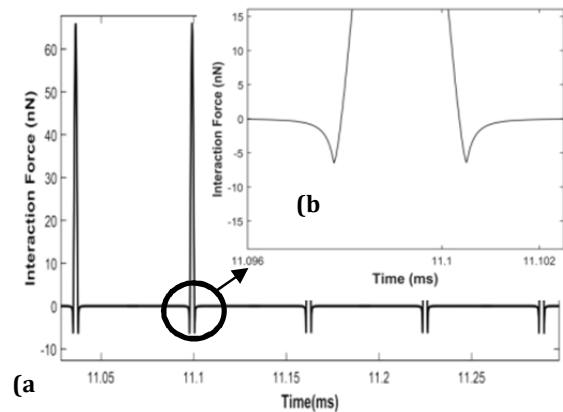
نمودار ۳ (a) تغییرات نیروی برهمکنش نسبت به زمان در بازه زمانی (a); (b) تغییرات نیروی برهمکنش نسبت به زمان در بازه زمانی (b)

۴- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی و روش به کار رفته در این مقاله، با استفاده از پارامترهای استفاده شده توسط هو و رامان [24]، نیروی برهمکنش به دست آمده که در نمودار ۴-b نیز نمودار نیرو- زمان ترسیم شده است. با مقایسه این نمودار با نتایج مطالعه‌ای [24] که

حالت ضربه‌ای ماکزیمم نیروی برهمکنش اعمالی به نمونه نیروی دافعه است که می‌تواند باعث آسیب نمونه شود اما میزان این آسیب در هنگام مواجهه سوزن با یک پله تیز رو به بالا بسیار بیشتر خواهد بود که در این مقاله این شرایط گذرا نامیده شده است. برای تحلیل شرایط گذرا معادلات (۱) تا (۵)، روابط و پارامترهای مربوطه در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده و نحوه مواجهه شدن سوزن با پله به صورت تغییر ارتفاع آنی مقدار g در زمان دلخواه تعریف شده است. نواحی دافعه و جاذبه نیز با تعریف تغییر ارتفاع سوزن نسبت به سطح و فاصله بین مولکولی سوزن و سطح با تابع هوی‌ساید تعریف شده است و پارامترهای مورد نظر با استفاده از روش عددی رانچ کوتای مرتبه چهار با بازه زمانی ۱۰ نانوثانیه تحلیل شده است.

همان‌طور که در نمودار $a-1$ مشاهده می‌شود نیروهای جاذبه نیروهایی با مقدار کم و بازه زمانی زیاد و نیروهای دافعه نیروهای بسیار زیاد و در بازه زمانی کم هستند. از جمله پارامترهای موثر بر نیروی برهمکنش، فاکتور کیفیت Q و دامنه نوسان است که همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد دامنه نوسان میکروتیر در حالت آزاد A_{free} و در زمان درگیری A است. نسبت دامنه درگیری به دامنه آزاد، نسبت دامنه A_r نامیده می‌شود که در بخش‌های بعدی تحلیل خواهند شد. در شرایط گذرا باید زمانی که سوزن با پله رو به بالا مواجه می‌شود تحلیل شود، بنابراین دو بازه زمانی مختلف در نظر گرفته شده که یکی از نوآوری‌های این تحقیق است. اولین بازه در نمودار ۲ با حرف a نشان داده شده که در آن نیروی برهمکنش بین سوزن و نمونه جاذبه است و سوزن به نزدیک شدن خود به سطح نمونه ادامه می‌دهد تا نیروی دافعه شروع شود. بازه زمانی دوم زمانی است که در آن نیروی دافعه خالص وجود دارد که با حرف b نشان داده شده است.



نمودار ۱ (a) نمودار نیروی برهمکنش نسبت به زمان (b) بخش بزرگنمایی شکل (a); $\omega=100\text{kHz}$, $R=10\text{nm}$, $A_{free}=40\text{nm}$, $A_r=0.8$, $k=5\text{N/m}$ and $Q=40$

در نمودار ۲ بازه زمانی (a) از ۱۱/۰۹۶۴۸ میلی‌ثانیه شروع شده و به ۱۱/۰۹۸۷۷ میلی‌ثانیه خاتمه می‌یابد. اگر در این بازه یک پله ۲ نانومتر رو به بالا در نظر گرفته شود تغییرات نیرو نسبت به زمان به صورت نمودار $a-3$ می‌باشد. به همین ترتیب تغییرات نیرو نسبت به زمان برای پله ۲ نانومتر رو به بالا برای بازه (b) نیز در نمودار $b-3$ نشان داده شده با این تفاوت که پله در محل ماکزیمم نیروی دافعه یعنی زمان ۱۱/۱۰۰۰۵ میلی‌ثانیه انتخاب شده است.

با مقایسه نمودار نمودار b-5 با نتایج تجربی مرجع [35] که در نمودار a-5 ترسیم شده، مشاهده می‌شود که ماکزیمم نیروی دافعه در نمودار a-5، حدود ۵/۳ نانونیوتن است اما ماکزیمم نیروی دافعه در نمودار b-5 حدود ۷۵/۳ نانونیوتن محاسبه شده بنابراین ماکزیمم نیروی دافعه در نمودار b-5 حدود ۲۰ نانونیوتن بیشتر از نتایج تجربی است که این اختلاف دور از انتظار نیست زیرا حل تئوری برحسب مدل هرترز انجام شده است ولی در حالت تجربی تنش به صورت فون میز به نمونه اعمال می‌شود و تغییر شکل نمونه در تمام جهات است بنابراین تنش نهایی هرترز حدود ۱/۶ برابر بیشتر از تنش حاصل از یک نیروی عمودی در فرمول تنش میز است [19] زیرا تنش هرترز تنش ناشی از اعمال نیروی عمودی بر سطح مقطع تغییر فرم است بنابراین حل تئوری انجام شده تقریب نسبتاً خوبی از نتایج تجربی ارائه نموده و در بررسی آسیب نمونه مطلوب خواهد بود زیرا ماکزیمم تنش محاسبه شده حدود ۱/۴ برابر تنش تجربی است.

۵- تحلیل اثر پارامترهای اسکن روی ماکزیمم تنش گذرا

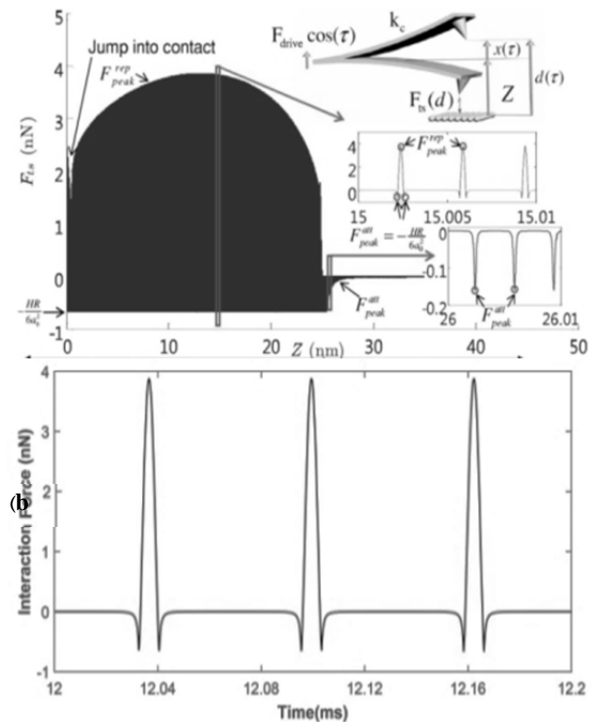
در میکروسکوپی نیروی اتمی پرسرعت ثابت فنر و فاکتور کیفیت میکروتیر از جمله پارامترهای مهم و تاثیرگذار روی تنش ناحیه تماس سوزن با نمونه هستند که به منظور بررسی اثر این دو پارامتر، نمودار تنش برحسب ثابت فنر و فاکتور کیفیت به ترتیب در نمودارهای a-6 و b-6 برای پله ۲ نانومتر و فرکانس تشدید یک‌مگاهرتز $f=1$ ترسیم شده است.

همان‌طور که در نمودار a-6 مشاهده می‌شود افزایش ثابت فنر میکروتیر از ۱/۱ نیوتن بر متر به ۲۰ نیوتن بر متر و مدول یانگ نمونه از یک‌گیگاپاسکال به ۵۰ گیگاپاسکال باعث افزایش تنش گذرا می‌شود زیرا مدول یانگ و ثابت فنر نسبت مستقیم با نیروی برهمکنش دارند. در مورد نمودار b-6 نیز می‌توان گفت افزایش فاکتور کیفیت موجب کاهش تنش گذرا خواهد شد زیرا فاکتور کیفیت با نیروی F_0 رابطه معکوس دارد. اما باید دقت نمود که شعاع سوزن نیز تاثیر مهمی در مقدار تنش دارد به طوری که در نمودار b-6 نشان داده شده برای فاکتور کیفیت ۱۶۰ و شعاع سوزن ۵۰ نانومتر مجموع نیروهای برهمکنش جاذبه بود و نیروی دافعه وجود نخواهد داشت بنابراین باید دقت شود هنگامی که از سوزن با شعاع زیاد استفاده می‌شود در انتخاب فاکتور کیفیت نیز دقت شود زیرا افزایش فاکتور کیفیت و شعاع سوزن هر دو منجر به کاهش نیروهای برهمکنش شده و ممکن است حالت اسکن را از حالت ضربه‌ای به غیرتماسی تغییر دهد. از دیگر پارامترهای موثر بر تنش گذرا، دامنه آزاد میکروتیر و نسبت دامنه است که نسبت دامنه تعیین‌کننده مقدار دامنه در زمان تماس سوزن با سطح نمونه است. در نمودار a-7 نمودار ماکزیمم تنش گذرا بر حسب دامنه آزاد A_{free} و در نمودار b-7 ماکزیمم تنش گذرا برحسب نسبت دامنه A_r ترسیم شده است.

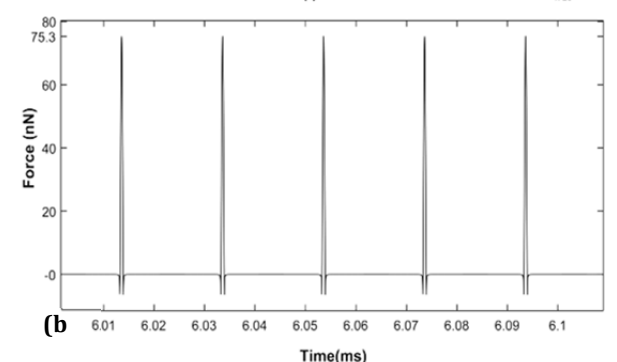
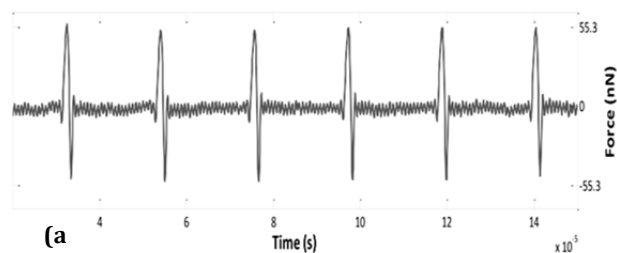
در نمودار a-7 مشاهده می‌شود برای ثابت فنر ۱/۱ نیوتن بر متر و دامنه آزاد کمتر از ۵۰ نانومتر نیروها جاذبه بوده زیرا همان‌طور که در نمودار a-7 ملاحظه می‌شود نمودار از این نقطه شروع شده به این معنی که قبل از آن نیروی دافعه وجود نداشته و نیروها کاملاً جاذبه است و سوزن با سطح تماس نخواهد داشت، همچنین این موضوع برای ثابت فنر ۳/۳ نیوتن بر متر و دامنه کمتر از ۴۰ نانومتر و نیز ثابت فنر ۳/۳ نیوتن بر متر و دامنه کمتر از ۶۳۰ نانومتر صادق است بنابراین در انتخاب پارامترهای ثابت فنر و دامنه باید دقت نمود تا نیروها در محدود جاذبه قرار نگیرند زیرا در این صورت

در نمودار a-4 بیان شده است، مشخص می‌شود که در هر دو نمودار ماکزیمم نیروی دافعه حدود ۴ نانونیوتن است. بنابراین مدل‌سازی و روش به‌کارگرفته شده در این مقاله، صحیح بوده و نتایج آن نیز معتبر است.

همچنین برای اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده در این مقاله با نتایج تجربی، به کمک پارامترهای تاسر و همکاران [35]، نیروی برهمکنش برحسب زمان به دست آمده و در نمودار b-5 ترسیم شده است.

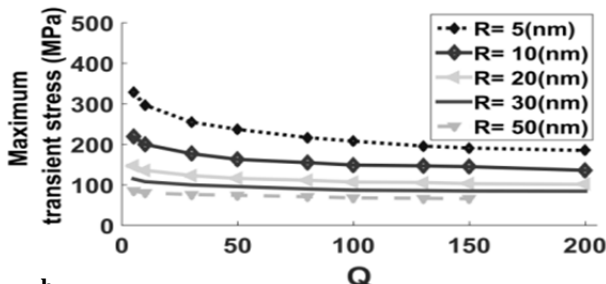
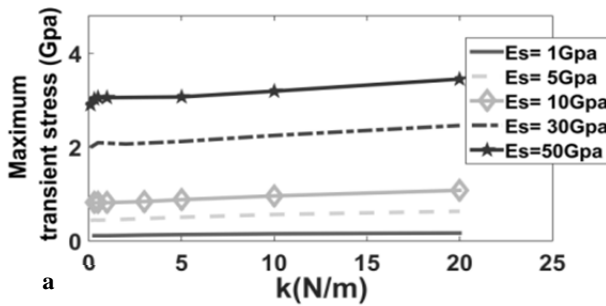


نمودار (4) (a) نمودار تحلیلی هو و رامان [24] (b) نمودار تغییرات نیروی برهمکنش نسبت به زمان با استفاده از پارامترهای مرجع [24]

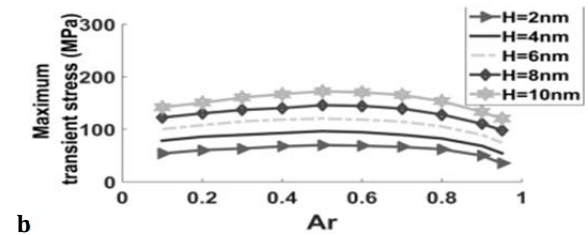
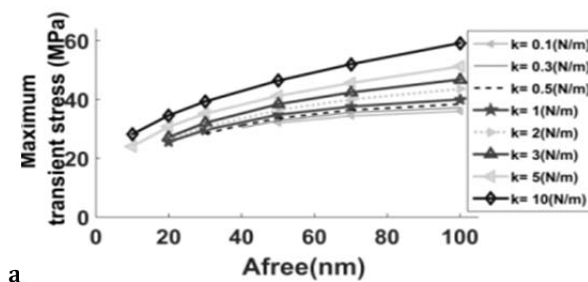


نمودار (5) (a) نمودار تجربی تاسر و همکاران [35]، (b) نمودار تغییرات نیروی برهمکنش نسبت به زمان با استفاده از پارامترهای مرجع [35]

می‌یابد که نتیجه آن افزایش زمان میراشدن سیستم است بنابراین با افزایش فاکتور کیفیت زمان پاسخ میکروتیر افزایش می‌یابد. برای فاکتور کیفیت ۲۵۰ در ارتفاع ۲ نانومتر زمان نشست ۰/۲۳۵ میلی‌ثانیه و در ارتفاع ۱۰ نانومتر زمان نشست ۰/۳۸ میلی‌ثانیه است که این زمان روی اسکن سطح و توپوگرافی حاصل تاثیرگذار است به طوری که هرچه زمان نشست بیشتر باشد دقت تصویر حاصل کمتر خواهد بود مگر اینکه سرعت تصویربرداری به گونه‌ای باشد که ضربه بعدی سوزن پس از اتمام حالت گذرا و نشست به سطح نمونه وارد شود. با تحلیل نمودار b-۱۰ می‌توان دریافت که با افزایش ضریب فنر میکروتیر، زمان نشست میکروتیر کاهش می‌یابد زیرا ضریب فنر میکروتیر طبق معادله (۳) با ضریب میرایی نسبت مستقیم دارد و همچنین از آنجایی که با افزایش ضریب فنر سفتی میکروتیر بیشتر می‌شود بنابراین در زمان کمتری میرا می‌شود، اما ضریب فنر بسیار زیاد باعث افزایش نیروی برهمکنش و در نتیجه احتمال آسیب به نمونه خواهد شد بنابراین مقدار آن باید در محدوده مناسب انتخاب شود.



نمودار ۶ (a) نمودار ماکزیمم تنش گذرا برحسب ثابت فنر، (b) نمودار ماکزیمم تنش گذرا برحسب فاکتور کیفیت؛ $f=1\text{MHz}$, $A_{free}=50\text{nm}$, $A_r=0.9$

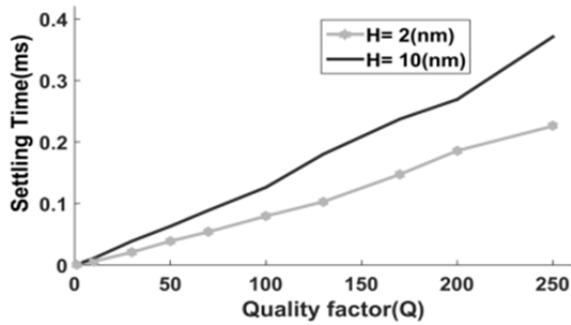


نمودار ۷ (a) نمودار ماکزیمم تنش گذرا برحسب (a) دامنه آزاد، (b) نسبت دامنه؛ $f=1\text{MHz}$, $R=20\text{nm}$, $Q=100$, $E_s=2\text{GPa}$

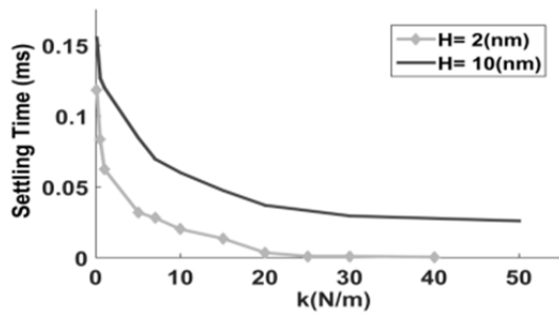
سوزن با سطح تماس نداشته و در اسکن ضربه‌ای توپوگرافی صحیحی ارایه نخواهد شد. در نمودار a-۷ مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه آزاد و ثابت فنر ماکزیمم تنش گذرا نیز افزایش می‌یابد زیرا سوزن با میزان نیرو و سفتی بیشتری با نمونه تماس خواهد داشت. در نمودار b-۷ نیز با افزایش نسبت دامنه از مقدار ۰/۱ ماکزیمم تنش گذرا نیز به تدریج افزایش یافته تا در نسبت دامنه ۰/۵ به ماکزیمم مقدار خود رسیده است و از این مقدار به بعد یعنی از نسبت دامنه ۰/۵ تا ۰/۹ ماکزیمم تنش گذرا کاهش یافته است. محدوده مناسب برای انتخاب نسبت دامنه ۰/۸ تا ۰/۹ است زیرا در این محدود ماکزیمم تنش گذرا مقدار کمتری داشته و میزان دامنه نوسان نیز در حدی خواهد بود نیروهای دافعه نیز ایجاد شود زیرا اگر نسبت دامنه در محدود ۰/۱ تا ۰/۳ انتخاب شود با اینکه ماکزیمم تنش گذرا کم خواهد بود اما اگر پارامترهای دیگر مثل شعاع در رنج بالا انتخاب شود نیروها در بازه جاذبه خالص قرار خواهد گرفت. در نمودار b-۷ نمودارهای تنش گذرا برای پله‌هایی با ارتفاع مختلف ترسیم شده است که نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع پله ماکزیمم تنش گذرا نیز افزایش خواهد یافت زیرا نیروی بیشتری به نمونه اعمال خواهد شد. شعاع سوزن از جمله پارامترهایی است که مستقیماً بر تنش گذرا تاثیر گذاشته و بایستی در انتخاب آن دقت شود. در نمودار a-۸ نمودار ماکزیمم تنش حالت گذرا برحسب تغییر شعاع سوزن و در نمودار b-۸ نیز نمودار ماکزیمم تنش حالت گذرا بر حسب تغییر ارتفاع پله که سوزن به طور ناگهانی با آن برخورد می‌کند ترسیم شده است. در نمودار a-۸ برای ثابت فنر ۰/۱ نیوتن بر متر با افزایش مقدار شعاع تا ۳۰ نانومتر، مقدار تنش کاهش می‌یابد اما از این مقدار به بعد با افزایش مقدار شعاع، نیروی برهمکنش جاذبه خالص است که حالت اسکن به غیرتماسی تبدیل می‌شود. در حالت کلی می‌توان مشاهده نمود با افزایش شعاع سوزن مقدار ماکزیمم تنش حالت گذرا کاهش می‌یابد زیرا نیرو بر سطح بیشتری وارد می‌شود اما نکته مهم این است که با افزایش شعاع سوزن دقت اسکن و تصویربرداری کاهش می‌یابد. با تحلیل نمودار b-۸ نیز می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع پله از مقدار یک نانومتر تا ۱۰ نانومتر مقدار ماکزیمم تنش حالت گذرا افزایش یافته و همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شعاع سوزن ماکزیمم تنش حالت گذرا کاهش می‌یابد زیرا نیرو بر سطح بیشتری اعمال می‌شود اما با افزایش شعاع سوزن مقدار دقت تصویر کاهش می‌یابد بنابراین برای نمونه‌های نرم بهترین بازه برای شعاع، ۱۰ نانومتر- تا ۵۰ نانومتر پیشنهاد می‌شود. در ادامه اثر فاکتور کیفیت و ثابت فنر روی زمان نشست بررسی خواهد شد.

در این مقاله به دلیل حساسیت نتایج برای بررسی زمان نشست حالت گذرا از تکران ۲٪ استفاده شده است. در نمودار a-۹ تکران ۲٪ انیروی برهمکنش در حالت پایدار محاسبه شده و به صورت دو خط افقی موازی مشخص شده و در نمودار b-۹ نیز زمان نشست حالت گذرا ۰/۱۵۹۳ میلی‌ثانیه محاسبه شده است.

در نمودار a-۱۰ نمودار تغییر زمان نشست برحسب فاکتور کیفیت و در نمودار b-۱۰ نمودار تغییر زمان نشست برحسب ثابت فنر میکروتیر برای دو ارتفاع پله ۲ نانومتر و ۱۰ نانومتر ترسیم شده است. در نمودار a-۱۰ با افزایش فاکتور کیفیت از مقدار یک تا ۲۵۰ زمان نشست نیز افزایش می‌یابد زیرا فاکتور کیفیت با زمان پاسخ میکروتیر نسبت مستقیم و طبق معادله (۳) با ضریب میرایی میکروتیر نسبت عکس دارد به طوری که با افزایش فاکتور کیفیت ضریب میرایی میکروتیر کاهش و از این رو نسبت میرایی (نسبت ضریب میرایی به ضریب میرایی بحرانی) کاهش

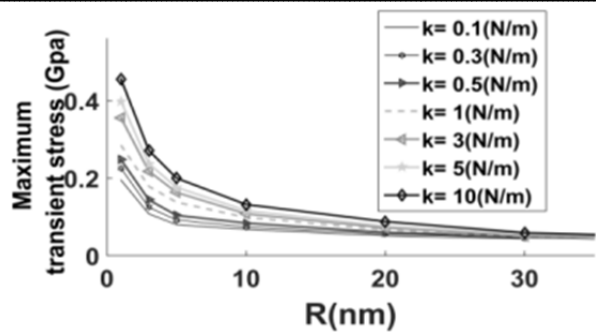


a

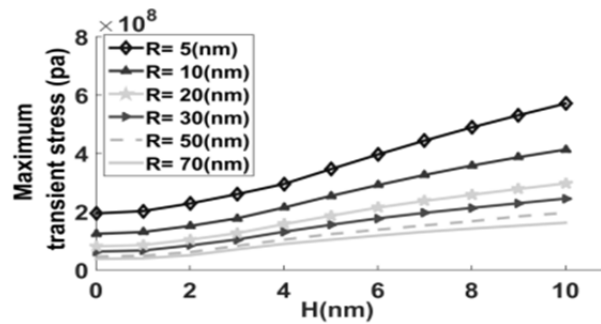


b

نمودار ۱۰) نمودار زمان نشست حالت گذرا برحسب (a) فاکتور کیفیت و (b) ثابت فنر برای پله های ۲ نانومتر و ۱۰ نانومتر؛ $f=1\text{MHz}$, $A_{free}=50\text{nm}$, $A_r=0.9$, $Q=100$, $E_s=2\text{GPa}$, $R=20\text{nm}$



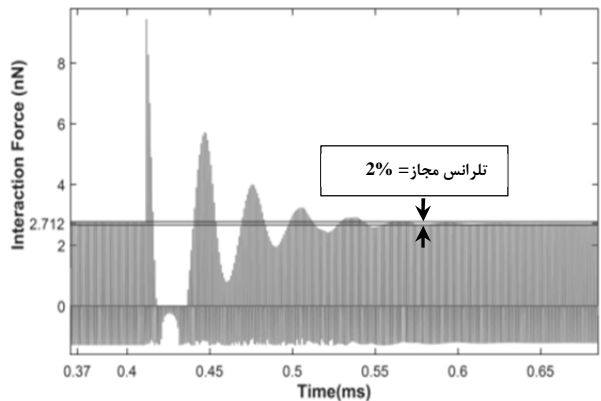
a



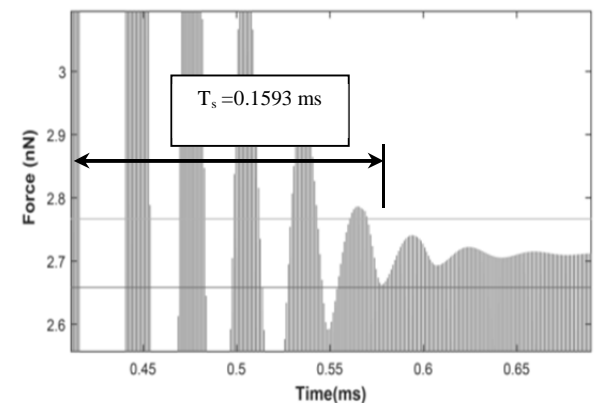
b

نمودار ۸) نمودار ماکزیمم تنش گذرا برحسب (a) شعاع سوزن (b) ارتفاع پله. $f=1\text{MHz}$, $A_{free}=40\text{nm}$, $A_r=0.8$, $Q=100$, $E_s=2\text{GPa}$

a



b



نمودار ۹) (a) محاسبه تولرانس ۲٪ برای نیروی برهمکنش، (b) محاسبه زمان نشست در حالت گذرا؛ $A_r=0.9$, $Q=100$, $E_s=2\text{GPa}$, $f=1\text{MHz}$, $A_{free}=50\text{nm}$, $k=0.5\text{N/m}$

برای دستیابی به تصویری با دقت و کیفیت مناسب سایز و محدوده اسکن انتخابی، تعداد خطوط اسکن، سرعت اسکن، مقدار آفست و میزان جابه جایی عرضی از جمله پارامترهای مهمی است که باید قبل از شروع اسکن در نرم افزار دستگاه انتخاب شود. بنابراین با توجه به توضیحات ارائه شده نمودار دقت جانبی تصویر برای عبور از پله ۲ نانومتر بر حسب فاکتور کیفیت و برای سرعت های اسکن مختلف و با استفاده از نتایج نمودار ۱۰-a و ۱۰-b در نمودار ۱۱-b ترسیم شده است.

در نمودار ۱۱-a مشاهده می شود که با افزایش فاکتور کیفیت دقت تصویر کاهش می یابد که علت آن افزایش زمان نشست با افزایش فاکتور کیفیت است. بنابراین با توجه به دقت تصویر مورد نظر می توان میزان سرعت اسکن و فاکتور کیفیت را انتخاب نمود. نمودار ۱۱-a را می توان به این صورت تشریح کرد که برای پله ۲ نانومتر، فاکتور کیفیت ۵۰ و سرعت اسکن ۰/۱ میلی متر بر ثانیه اگر فاصله ضربه اول سوزن تا ضربه دوم سوزن (دقت جانبی) ۷/۷۸ نانومتر باشد سوزن از زمان نشست ناشی از عبور از پله ۲ نانومتر خواهد گذشت بنابراین توپوگرافی سطح از کیفیت مطلوبی برخوردار بوده و صحیح است. در نمودار ۱۱-b نیز با افزایش ثابت فنر میکروتیر دقت تصویر افزایش یافته است اما باید دقت شود که افزایش ثابت فنر منجر به افزایش تنش گذرا نیز خواهد شد، بنابراین مقادیر ثابت فنر و سرعت اسکن باید با توجه به دقت مورد نظر انتخاب شود. در تشریح نمودار ۱۱-b نیز می توان گفت که برای پله ۲ نانومتر، ضربه فنر یک نیوتن بر متر و سرعت اسکن ۰/۱ میلی متر بر ثانیه اگر فاصله ضربه اول سوزن تا ضربه دوم سوزن ۱۲/۴۷ نانومتر باشد سوزن از زمان نشست ناشی از عبور از پله ۲ نانومتر خواهد گذشت بنابراین توپوگرافی سطح از کیفیت مطلوبی برخوردار بوده و صحیح است.

تصویربرداری خواهد شد بنابراین مقدار فاکتور کیفیت باید با در نظر گرفتن تمام موارد فوق انتخاب شود.

۳) دامنه آزاد و نسبت دامنه پارامترهایی هستند که مقدار آنها تاثیر مستقیمی بر میزان نیروی اعمالی از طرف سوزن به نمونه دارد. دامنه آزاد و نسبت دامنه تعیین کننده مقدار دامنه نوسان تنظیمی در زمان تماس میکروتیر با سطح نمونه هستند. برای انتخاب دامنه آزاد و نسبت دامنه بهتر است کاربران دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی نسبت به خصوصیات سطح از جمله آماده سازی نمونه و حدود ماکزیمم قله و ناهمواری های سطح نمونه مورد آزمایش اطلاعات لازم را داشته باشند تا بتوانند دامنه آزاد میکروتیر را با توجه به نمودارهای ارائه شده در این مقاله به طور مناسب انتخاب نمایند و از این رو سوزن بتواند از پله های روی سطح عبور کرده، با پله ها برخورد نداشته باشد و اسکن دقیقی انجام دهد زیرا اگر مقدار دامنه تنظیمی بسیار زیاد باشد اسکن نتایج دقیقی نخواهد داشت و نیروی زیادی به سطح نمونه وارد می شود و اگر مقدار آن بسیار کم باشد باعث افزایش احتمال چسبیدن سوزن به نمونه یا برخورد سوزن با پله ها، آسیب نمونه و نتایج نادرست خواهد شد.

۴) در مورد شعاع سوزن نیز پیشنهاد می شود حتماً نسبت به میزان دقت تصویر مورد نظر انتخاب شود زیرا شعاع زیاد موجب افزایش بسیار زیاد نیروی جاذبه و چسبیدن سوزن به نمونه و نیز کاهش دقت اسکن می شود و شعاع بسیار کم نیز باعث افزایش نیروی اعمالی به سطح نمونه و افزایش تنش خواهد شد و ممکن است باعث آسیب نمونه شود. بنابراین شعاع سوزن باید در محدوده مناسب انتخاب شود.

۵) با تحلیل نمودارهای ترسیم شده در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ می توان نتیجه گرفت انتخاب سرعت اسکن وابسته به ارتفاع پله های نمونه، زمان نشست، فاکتور کیفیت میکروتیر، ضریب فنر میکروتیر و دقت تصویر مورد نظر است. سرعت اسکن بسیار کم منجر به افزایش زمان اسکن و سرعت اسکن زیاد منجر به آسیب نمونه خواهد شد بنابراین سرعت اسکن باید به گونه ای انتخاب شود که بتوان کمترین تنش و دقت تصویر مناسبی داشت. دقت تصویر نیز وابسته به ثابت فنر، فاکتور کیفیت، زمان نشست و سرعت اسکن است بنابراین برای دستیابی به تصویری دقیق و بدون آسیب به سطح نمونه تمام پارامترها باید به طور صحیح انتخاب شوند. در بخش جمع بندی مقادیر مناسب برای پارامترهای مهم اسکن حالت گذرا نمونه های نرم با مدول الاستیسیته ۲ گیگاپاسکال ارائه شده است.

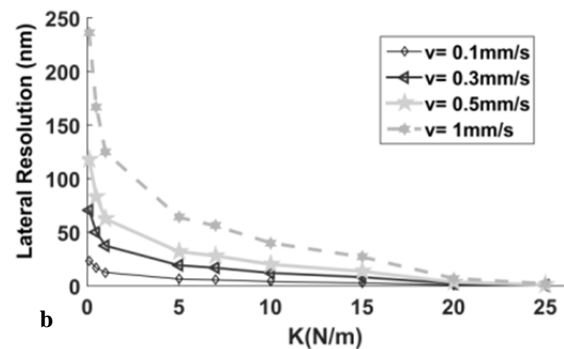
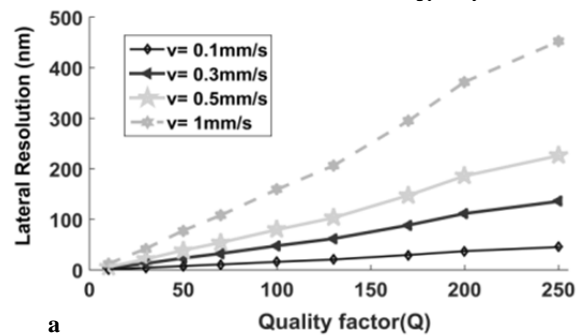
۷- جمع بندی

با توجه به نتایج این تحقیق برای کارهای تحقیقاتی و آزمایشگاهی به کاربران دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی توصیه می شود به منظور اسکن پرسرعت با فرکانس تشدید یکمگاهرتز برای نمونه هایی با مدول الاستیسیته ۲ گیگاپاسکال به منظور پیشگیری از آسیب نمونه در حین اسکن و دستیابی به تصویری با دقت مناسب از میکروتیر با سفتی فنر ۰/۱ تا یک نیوتن بر متر، نسبت دامنه ۰/۸ تا ۰/۹، دامنه آزاد ۶۰ تا ۱۰۰ نانومتر، فاکتور کیفیت ۵۰ تا ۱۰۰، سوزن با شعاع ۱۰ تا ۴۰ نانومتر و سرعت اسکن در محدوده ۰/۱ تا ۰/۳ میلی متر بر ثانیه استفاده نمایند.

تشکر و قدردانی: از جناب آقای دکتر علی اصغر کیوانی تشکر و قدردانی می شود.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.



نمودار (۱۱) نمودار دقت جانبی تصویر در حالت گذرا بر حسب (a) فاکتور کیفیت و (b) ثابت فنر

۶- نتایج

در این تحقیق بدترین شرایط اسکن در نظر گرفته شده است که از جمله در نظر گرفتن مدل هرتز به جای تاتارا و در نظر گرفتن شرایط گذرا در بازه نیروهای دافعه (بازه زمانی (b) است. در مدل تاتارا فاکتور ایمنی ۱/۴ برابر بیشتر از تئوری هرتز است. همچنین تنش هرتز ۱/۶ برابر بیشتر از تنش فون میزز است زیرا این تنش ناشی از اعمال نیرو در راستای عمود بر سطح نمونه است بنابراین در این تحقیق از تنش هرتز برای تحلیل بحرانی ترین شرایط و بیشترین میزان نیروی اعمالی به سطح نمونه استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق می توان گفت در حالت تجربی و شرایط گذرا تنش اعمالی به نمونه حداقل حدود ۱/۴ برابر کمتر از مقادیر محاسبه شده است.

در این مقاله اثر پارامترهای مهم اسکن روی ماکزیمم تنش گذرا در میکروسکوپ نیروی اتمی پرسرعت ضربه ای برای مواد نرم با مدول الاستیسیته ۲ گیگاپاسکال (نظیر فتورزیست) تحلیل شده است به طوری که با توجه به نمودارهای ارائه شده نتایج زیر حاصل شده است:

۱) انتخاب ثابت فنر با مقدار کم ماکزیمم تنش گذرا را کاهش می دهد اما زمان میرایی افزایش خواهد یافت بنابراین سرعت اسکن را می توان به گونه ای انتخاب نمود که ضربه اول با توجه به کم بودن ثابت فنر به نمونه آسیب نرساند و ضربه دوم از بازه زمان نشست گذشته باشد.

۲) فاکتور کیفیت میکروتیر از جمله پارامترهای موثر بر ماکزیمم تنش حالت گذرا است که افزایش آن باعث کاهش ماکزیمم تنش گذرا می شود اما اگر مقدار فاکتور کیفیت میکروتیر بسیار زیاد باشد، زمان نشست سیستم نیز زیاد خواهد بود و حتی منجر به تغییر نیروها از دافعه به جاذبه خالص خواهد شد. همچنین زیاد بودن مقدار فاکتور کیفیت باعث کاهش دقت جانبی خواهد شد زیرا زمان نشست افزایش می یابد که برای جبران این عیب سرعت اسکن باید کاهش یابد که کاهش سرعت اسکن منجر به افزایش زمان

biomolecular processes. *Progress in Surface Science*. 2008;83(7-9):337-437.

15- Imamura M, Uchihashi T, Ando T, Leifert A, Simon U, Malay AD, et al. Probing structural dynamics of an artificial protein cage using high-speed atomic force microscopy. *Nano Letters*. 2015;15(2):1331-1335.

16- Schitter G, Menold P, Knapp HF, Allgower F, Stemmer A. High performance feedback for fast scanning atomic force microscopes. *Review of Scientific Instruments*. 2001;72:3320-3327.

17- Herfst R, Dekker B, Witvoet G, Crowcombe W, de Lange D, Sadeghian H. A miniaturized, high frequency mechanical scanner for high speed atomic force microscope using suspension on dynamically determined points. *Review of Scientific Instruments*. 2015;86:113703.

18- Keyvani A, Sadeghian H, Goosen H, Keulen FV. Transient Tip-Sample Interactions in High-Speed AFM Imaging of 3D nano structures. *Proceedings of SPIE 9424: International Conference on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIX*, 22-26 February 2015, San Jose, California, USA. Bellingham: SPIE; 2015.

19- Sadeghian H, van den Dool TC, Uziel Y, Bar Orc R. High-speed AFM for 1x node metrology and inspection: Does it damage the features?. *Proceedings of SPIE 9424: International Conference on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIX*, 19 March 2015, San Jose, California, USA. Bellingham: SPIE; 2015.

20- Jalili N, Laxminarayana K. A review of atomic force microscopy imaging systems: Application to molecular metrology and biological sciences. *Mechatronics*. 2004;14(8):907-945.

21- Yang CW, Hwang IS, Chen YF, Chang CS, Tsai DP. Imaging of soft matter with tapping-mode atomic force microscopy and non-contact-mode atomic force microscopy. *Nanotechnology*. 2007;18(8):084009.

22- Guzman HV, Perrino AP, Garcia R. Peak forces in high-resolution imaging of soft matter in liquid. *ACS Nano*. 2013;7(4):3198-3204.

23- Guzman HV, Garcia R. Peak forces and lateral resolution in amplitude modulation force microscopy in liquid. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2013;4:852-859.

24- Hu S, Raman A. Analytical formulas and scaling laws for peak interaction forces in dynamic atomic force microscopy. *Applied Physics Letters*. 2007;91(12):123106.

25- Vahdat V, Carpick RW. Practical method to limit tip-sample contact stress and prevent wear in amplitude modulation atomic force microscopy. *ACS Nano*. 2013;7(11):9836-9850.

26- Rodríguez TR, García R. Tip motion in amplitude modulation (tapping-mode) atomic-force microscopy: Comparison between continuous and point-mass models. *Applied Physics Letters*. 2002;80(9):1646-1648.

27- García R, San Paulo A. Attractive and repulsive tip-sample interaction regimes in tapping-mode atomic force microscopy. *Physical Review B*. 1999;60(7):4961.

28- Tatara Y. Large deformations of a rubber sphere under diametral compression: Part 1: Theoretical analysis of press approach, contact radius and lateral extension. *JSME International Journal, Series A, Mechanics and Material Engineering*. 1993;36(2):190-196.

29- Tatara Y. Extensive theory of force-approach relations of elastic spheres in compression and impact.

سهم نویسندگان: حامد فداء (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ علی سلیمانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)؛ حامد صادق‌ان (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۱۵٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

1- Binnig G, Quate CF, Gerber Ch. Atomic force microscope. *Physical Review Letters*. 1986;56(9):930-933.

2- Binnig G, Gerber Ch, Stoll E, Albrecht TR, Quate CF. Atomic resolution with atomic force microscope. *Europhysics Letters*. 1987;3(12):1281-1286.

3- Custance O, Perez R, Morita S. Atomic force microscopy as a tool for atom manipulation. *Nature Nanotechnology*. 2009;4(12):803-810.

4- Korayem MH, Esmaeilzadehha S, Rahmani N, Shahkarami M. Nano manipulation with rectangular cantilever of atomic force microscope in a virtual reality environment. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 2012;7(2):435-445.

5- Habibnejad Korayem M, Estaji M, Homayooni A. Molecular dynamic modeling of bioparticles nanomanipulation based on AFM: Investigating substrate effects. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(3):437-445. [Persian]

6- Naderi Sohi A, Naderimanesh H, Soleimani M. A comparative study on utility of Scanning Electron Microscopy and Atomic Force Microscopy for topological investigation of electrospun nanofibers as the cell culture scaffolds. *Modares Journal of Biotechnology*. 2016;7(2):40-50. [Persian]

7- Tang Q, Shi SQ, Zhou L. Nanofabrication with atomic force microscopy. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2004;4(8):948-963.

8- Liu M, Amro NA, Liu GY. Nanografting for surface physical chemistry. *Annual Review of Physical Chemistry*. 2008;59:367-386.

9- Sadeghian H, Herfst R, Winters J, Crowcombe W, Kramer G, van den Dool T, et al. Development of a detachable high speed miniature scanning probe microscope for large area substrates inspection. *Review of Scientific Instruments*. 2015;86(11):113706.

10- Sadeghian H, Herfst R, Dekker B, Winters J, Bijnagte T, Rijnbeek R. High-throughput atomic force microscopes operating in parallel. *Review of Scientific Instruments*. 2017;88(3):033703.

11- Borionettia G, Bazzalia A, Orizioa R. Atomic force microscopy: A powerful tool for surface defect and morphology inspection in semiconductor industry. *The European Physical Journal Applied Physics*. 2004;27(1-3):101-106.

12- Maas DJ, Fliervoet T, Herfst R, van Veldhoven E, Meessen J, Vaenkatesan V, Sadeghian H. Sub-50 nm metrology on extreme ultra violet chemically amplified resist-A systematic assessment. *Review of Scientific Instruments*. 2015;86(10):103702.

13- Postek MT, Vladár A, Dagata J, Farkas N, Ming B, Wagner R, Raman A, Moon RJ, Sabo R, Wegner TH, Beecher J. Development of the metrology and imaging of cellulose nanocrystals. *Measurement Science and Technology*. 2010;22(2): 024005.

14- Andoa T, Uchihashi T, Fukuma T. High-speed atomic force microscopy for nano-visualization of dynamic

34- Keyvani A, Tamer MS, van Es MH, Sadeghian H. Simultaneous AFM nano-patterning and imaging for photomask repair. Proceedings of SPIE 9778: International Conference on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXX, 8 March 2016, San Jose, California, USA. Bellingham: SPIE; 2016.

35- Tamer MS, Sadeghian H, Keyvani A, Goosen JFL, van Keulen F. Quantitative measurement of tip-sample interaction forces in tapping mode atomic force microscopy. 13th International Workshop on Nanomechanical Sensing, 22 - 24 June, 2016, Delft, Netherlands. Delft: NMC; 2016. pp.199-200.

Journal of Engineering Materials and Technology. 1989;111(2):163-168.

30- Butt HJ, Kappl M. Surface and interfacial forces. Weinheim: Wiley; 2010. pp. 120-125.

31- Johnson KL. Contact Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press; 1985.

32- García R, Pérez R. Dynamic atomic force microscopy methods. Surface Science Reports. 2002;47(6-8):197-301.

33- Morita S, Giessibl FJ, Meyer E, Wiesendanger RE. Noncontact atomic force microscopy. 3rd Volume. Berlin: Springer; 2015.