

ارتعاشات خمشی تیر یکسرگیردار میکروسکوپ نیروی اتمی و تأثیر پارامترهای ابعادی بر آن

انوشیروان فرشیدیان^۱؛ محمد هادی مهدوی^۲؛ حمید دلیر^۳

چکیده

میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscope) یا به اختصار AFM، ابزاری قدرتمند و ضروری در نانوتکنولوژی است که برای مطالعه، تصویربرداری و شناسایی مواد مختلف با تفکیک اتمی بکار می‌رود و در سه مد تماسی، غیر تماسی و کوبشی کار می‌کند. در این مقاله ارتعاشات خمشی تیر یکسرگیردار مورد استفاده در این دستگاه که در مد غیر تماسی نمونه‌هایی با سختی سطح متفاوت را اسکن می‌کند بررسی می‌شود. یافتن فرکانسهای طبیعی تیر و تحلیل فرکانسی مجموعه مرتعش، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و طیف وسیعی از تحقیقات به آن می‌پردازد. در این مقاله ابتدا معادلات ارتعاش عرضی تیر با در نظر گرفتن جرم و ممان اینرسی جرمی تیپ (Tip) انتهای آن که قبلاً از آن صرف‌نظر شده است به روش تحلیلی دقیق و با استفاده از تئوری تیر اولر - برنولی استخراج شده است. سپس میزان تفاوت نتایج حاصل از معادلات محققین قبلی با معادلات اخیر در مطالعه موردی بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که اثر تیپ بسته به ابعاد آن، قابل ملاحظه بوده و بایستی برای رسیدن به تصویربرداری دقیق تر نمونه‌ها در هنگام طراحی منطق عملکردی دستگاه در نظر گرفته شود. در انتها میزان تأثیر زاویه تمایل تیر نسبت به سطح و ارتفاع تیپ بر فرکانس‌های تشدید مجموعه بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی

میکروسکوپ نیروی اتمی غیر تماسی - تحلیل فرکانسی - جرم و اینرسی تیپ - تیر اولر برنولی.

Flexural Vibration of Atomic Force Microscope Cantilever with Dimensional Effects

Anoshirvan Farshidianfar; Mohammad Hadi Mahdavi; Hamid Dalir

ABSTRACT

Atomic Force microscope (AFM) is one of the powerful and useful tools in nanoscale science and technologies with applications from surface characterization in material science, to the study of living biological systems in their natural environment. AFM operate in three modes of contact, non-contact and tapping mode. In this paper, by focusing on the development of a more comprehensive model of an AFM micro-cantilever beam, considering the effects of mass and rotary inertia of the tip using Euler-Bernoulli beam theory is considered. The comparison of the present results and the results of other investigators, which has been done in case studies, generally shows a very good agreement. The results show that the effect of mass and rotary inertia of the tip depending on its dimensions is important and should be considered. Finally, the effects of cantilever inclination and tip height on the resonance frequencies are also examined.

^۱ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Email: Farshid@um.ac.ir.

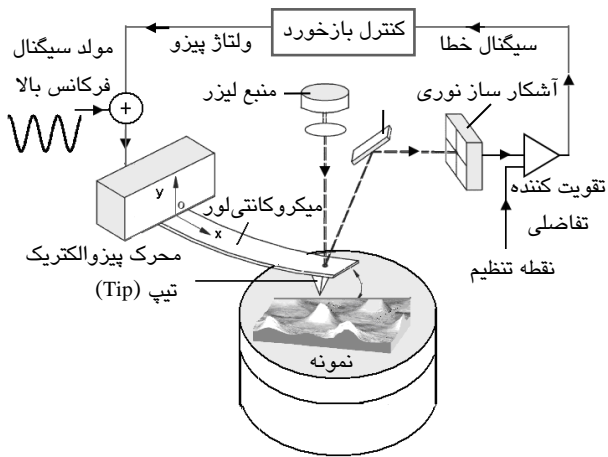
کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Email: Mahdavi.mhm@gmail.com.

^۲ دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی توکیو، آزمایشگاه هوش مصنوعی و ابزار دقیق؛ Email: Dalir@pme.pi.titech.ac.jp.

KEYWORDS

Non-contact AFM – Frequency Analysis – Mass and Rotary Inertia of Tip – Euler-Bernoulli Beam.

MEMS، ساخت ملکولی و ... استفاده می‌گردد. مد کوبشی ترکیبی از دو مد تماسی و غیرتماسی است، یعنی استخراج اطلاعات با ارتعاش تیر در فرکانس طبیعی در حالیکه تیپ می‌تواند به سطح نمونه برخورد کند [7]–[9].



شکل (۱): طرح شماتیک از عملکرد یک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) غیر تماسی در حال اسکن بر روی سطح نمونه. انحراف عمودی تیر با انحراف انعکاس نور لیزر از پشت تیر، آشکار می‌شود.

درک اساسی پایداری تصویربرداری و پاسخ ارتعاشی پروب نیاز به بررسی دقیق تر دینامیک تیریکسرگرددار دارد. از اینرو یافتن فرکانس های طبیعی و تحلیل فرکانسی مجموعه مرتعش، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و طیف وسیعی از تحقیقات به این موضوع می‌پردازد.

تا کنون کارهای فراوانی در زمینه تحلیل فرکانسی صورت گرفته است؛ Turner و همکارانش [۱۰]، پاسخ فرکانس بالای تیر را مطالعه و اثرات میرایی بین تیپ و نمونه مورد آزمایش را لحاظ کرده‌اند و در جایی دیگر، Wiehn و Turner [۱۱]، میزان حساسیت مدهای ارتعاشی تیر را به تغییرات سختی سطح نمونه، مورد مطالعه قرار داده‌اند. در همه مقالات فوق، برای راحتی تحلیل، فرض شده است که تیر به موازات سطح قرار گرفته در حقیقت زاویه تمایلی بین سطح و تیر وجود دارد که محاسبات را پیچیده می‌کند.

Chang [۱۲] با در نظر گرفتن این زاویه تمایل، میزان تاثیر آن را روی پاسخ فرکانسی بررسی کرده و برای راحتی، میرایی بین تیپ و سطح ماده را لحاظ نکرده است. Rabe و همکارانش [۱۳] با در نظر گرفتن این میرایی و نیز زاویه تمایل بین تیپ و سطح ماده، یک مدل جرم متمرکز^۴ با یک درجه آزادی ارائه کرده‌اند و برهم‌کنش نیرویی بین تیپ و سطح را بصورت خطی

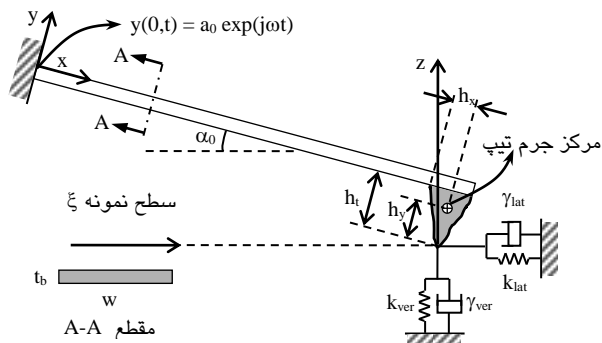
۱- مقدمه

میکروسکوپ نیروی اتمی در سال ۱۹۸۶ اختراع شد [۱]. از آن زمان به بعد، AFM تبدیل به یک ابزار قدرتمند و ضروری برای مطالعه، تصویربرداری و شناسایی مواد مختلف با تفکیک^۱ اتمی شده است. AFM از خانواده میکروسکوپ پروب روبشی^۲ (SPM) است. این دستگاه با قابلیت تصویربرداری و دستکاری سطح در مقیاس نانو، در طراحی، تحلیل و پیاده سازی سیستم های نانو اهمیت بنیادی دارد. سیستم نمونه برداری AFM از اصل برهم کنش نیروهای بین اتمی برای تصویربرداری و توپوگرافی با تفکیک در مقیاس نانومتر استفاده می‌کند [۲]–[۵]. انواع متداول AFM از یک تیر یکسرگرددار در ابعاد میکرو متر که در انتهای آن یک تیپ تیز قرار دارد و ابتدای آن بر روی یک محرک پیزوالکتریک سوار شده، منبع نور لیزر و آشکار ساز نوری^۳ تشکیل می‌شود. با پائین آوردن تیر روی سطح نمونه، نیروهای بین اتمی بین اتم های تیپ و اتم های سطح نمونه، تیپ AFM را در فاصله ثابتی از سطح نگه می‌دارد. تیر در طی روبش کردن سطح نمونه با استفاده از کریستال های پیزوالکتریک، هماهنگ با توپوگرافی سطح نمونه، بالا و پائین می‌رود. این حرکت عمودی پروب می‌تواند توسط انعکاس یک باریکه نور لیزر از پشت تیر با حساسیت بسیار زیاد اندازه گیری شود، شکل (۱). حساسیت این روش به میزانی است که انحرافات عمودی بسیار کمتر از ۰/۱ nm را هم می‌تواند آشکار کند [۶].

مدهای مختلف کاری AFM شامل مد تماسی^۴، مد غیر تماسی^۵ و مد کوبشی^۶ است. مد تماسی از طریق فرابینی^۷ نیروهای برهم‌کنش تیر و نمونه در حالیکه تیپ در تماس با سطح نمونه است، صورت می‌گیرد. کار در مد غیرتماسی با دور کردن تیر از سطح نمونه و ارتعاش در فرکانس طبیعی آن کار می‌کند و با اندازه‌گیری جابجایی در فرکانس طبیعی بخاطر برهم‌کنش^۸ با نمونه، اطلاعات توپوگرافی نمونه قابل استخراج است. از آنجا که نیروهای میان سطح نمونه و نوک تیپ در مد غیرتماسی بسیار ضعیف تر از این نیروها در مد تماسی می‌باشند، پس باید به تیپ حرکت نوسانی اندکی داده شود تا این نیروهای ضعیف از طریق اندازه گیری تغییرات در دامنه، فاز و یا فرکانس طبیعی تیر قابل آشکار سازی باشد. در این روش سطوح در حین توپوگرافی آلوده و یا خراب نمی‌شوند، به همین دلیل از آن در بسیاری از فرایندهای ساخت نظیر متروالوژی

در امتداد تیر و y در امتداد عمود بر تیر است و دستگاه دوم، $\{x, z\}$ ، که از دوران دستگاه اول به اندازه α_0 حاصل شده است و برهم‌کنش‌های افقی و عمودی تیر با سطح نمونه در این امتداد سنجیده می‌شود.

معادله حرکت برای ارتعاشات خمشی یک تیر با سطح مقطع ثابت، یک معادله دیفرانسیل مرتبه چهار به شکل رابطه (۱) است [۱۵]:



شکل (۲): مدل تیر الاستیک با تیبی به جرم m_i و ممان اینرسی جرمی J_i در انتهای آن که برهم‌کنش تیب و سطح نمونه با فنر و دمپر عمودی k_{ver} و γ_{ver} و فنر و دمپر جانبی k_{lat} و γ_{lat} مدل شده‌اند.

$$\frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

که $y(x, t)$ ، خیز هر نقطه تیر از موقعیت تعادل استاتیکی و $c^2 = EI/\rho A$ است.

فرکانس‌های طبیعی برای تیر یکسرگیردار عبارتند از:

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (2)$$

که $\beta^2 = \omega^2/c^2$ ، فرکانس تحریک و $n=(1,2,\dots)$ عدد مد بوده و دلالت بر حالت تشدید دارد.

حال موقعیتی را در نظر بگیرید که محل تکیه گاه گیردار تیر ($x=0$) با دامنه $y(0, t) = A_0 \exp(j\omega t)$ به ارتعاش واداشته می‌شود؛ بنابراین شرایط مرزی تیر هنگامی که به سطح نزدیک شده شکل (۲) و برهم‌کنش بین تیب و سطح برقرار می‌شود، بصورت رابطه (۳) تا (۶) خواهد بود:

$$y(0, t) = a_0 \exp(j\omega t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x}(0, t) = 0 \quad (4)$$

$$EI \frac{\partial^2 y(L, t)}{\partial x^2} = -EI \frac{\partial^3 y(L, t)}{\partial x^3} h_x - J_i \frac{\partial^3 y(L, t)}{\partial t^2 \partial x} + F_z \sin \alpha_0 h_y - F_\xi \cos \alpha_0 h_y \quad (5)$$

$$EI \frac{\partial^3 y(L, t)}{\partial x^3} = F_\xi \sin \alpha_0 + F_z \cos \alpha_0 + m_t \frac{\partial^2 y(L, t)}{\partial t^2} \quad (6)$$

فرض نموده و بر این اساس برهم‌کنش را بصورت فنرهای خطی مدل کرده‌اند و در نهایت مقایسه‌ای بین مدل گسسته و پیوسته انجام داده‌اند. Mahdavi و همکارانش [۱۴] نیز علاوه بر در نظر گرفتن تمامی فرضیات مقاله فوق، اثر میرایی هوا یا هر سیال دیگری که آزمایش در آن صورت می‌گیرد و باعث غیر خطی شدن معادله ارتعاشی مدل توزیع شده تیر می‌شود را به کمک مدل‌های جرم متمرکز با درجات آزادی بالاتر بررسی کردند. در همه مقالات فوق، در استخراج معادلات ارتعاشی، از جرم و ممان اینرسی جرمی تیب صرف‌نظر شده است.

در این مقاله معادلات ارتعاش عرضی تیر با در نظر گرفتن جرم و ممان اینرسی جرمی تیب انتهای آن که قبلاً از آن صرف‌نظر شده است به روش دقیق و با استفاده از تئوری تیر اولر - برنولی استخراج می‌شود. سپس میزان تفاوت نتایج حاصل از معادلات قبلی با معادلات اخیر در مطالعه موردی بررسی شده و نشان داده می‌شود که اثر جرم و ممان اینرسی تیب بسته به ابعاد آن، ممکن است قابل ملاحظه بوده و بایستی در نظر گرفته شود. در پایان میزان تأثیر زاویه تمایل تیر نسبت به سطح و نیز ارتفاع تیب بر پاسخ فرکانسی مجموعه در بازه‌ای از تغییرات سختی سطح بررسی خواهد شد.

۲- حل تحلیلی تیر با در نظر گرفتن جرم و اینرسی دورانی تیب

کلی‌ترین حالت از موضع تیر و برهم‌کنش آن با سطح نمونه در شکل (۲) ارائه شده است. تیر یکسر گیرداری که در این پژوهش بررسی شده، از انواع متداول آن است که سطح مقطع مستطیلی دارد و در انتهای آن تیبی صلب با شکل دلخواه قرار گرفته که مرکز جرم آن مشخص شده است. تیر دارای طول L ، ضخامت t_b ، عرض w ، سطح مقطع $A = t_b w$ ، ممان اینرسی سطحی $I = wt_b^3/12$ ، چگالی ρ و مدول الاستیسیته E می‌باشد و در حالت کلی نسبت به سطح نمونه، دارای زاویه تمایل α_0 است. در انتهای تیر، تیبی به جرم m_t و ممان اینرسی جرمی J_i حول محور گذرنده از مرکز جرم تیب، عمود بر صفحه کاغذ قرار دارد. تیب دارای ارتفاع h_x است و فاصله مرکز جرم آن از نوک تیب h_y و فاصله مرکز جرم تیب از محل اتصال به تیر h_x است.

مشابه مدل‌سازی‌های سایر محققین [۱۱]-[۱۴] و بمنظور مقایسه دقت مدل ارائه شده در این پژوهش با آنها، برهم‌کنش بین تیب و سطح ماده بصورت فنر و دمپر خطی مدل می‌شود. دو مجموعه دستگاه مختصات انتخاب شده است؛ $\{x, y\}$ که

که در آن

$$H(\Omega) = \Omega^2 \left[1 + \cos \sqrt{\Omega} \cosh \sqrt{\Omega} \right] + \Omega^{\frac{3}{2}} P_2(\Omega) \left[\sin \sqrt{\Omega} \cosh \sqrt{\Omega} + \sinh \sqrt{\Omega} \cos \sqrt{\Omega} \right] + \Omega \left[P_1(\Omega) + S_2(\Omega) \right] \sin \sqrt{\Omega} \sinh \sqrt{\Omega} + \sqrt{\Omega} S_3(\Omega) \left[\sin \sqrt{\Omega} \cosh \sqrt{\Omega} - \sinh \sqrt{\Omega} \cos \sqrt{\Omega} \right] + \left[P_2(\Omega) S_3(\Omega) - P_1(\Omega) S_2(\Omega) \right] \left[1 - \cos \sqrt{\Omega} \cosh \sqrt{\Omega} \right] \quad (21)$$

رابطه (۲۱) در واقع همان معادله مشخصه است که ریشه های آن مقادیر فرکانس تشدید می باشند. چنانچه فرض شود تیر به موازات سطح قرار گرفته و اندرکنش آن با سطح فقط با یک فنر عمودی مدل شود و از اثرات جرم و اینرسی دورانی تیر نیز صرف نظر شود، $(\gamma_{ver} = \gamma_{lat} = k_{lat} = m_t = J_t = \alpha_0 = 0)$ ، (۲۱) به شکل رابطه (۲۲) خواهد شد:

$$H(\beta) = \Omega^{\frac{3}{2}} \left(1 + \cos \sqrt{\Omega} \cosh \sqrt{\Omega} \right) + K_{ver} \left(\sin \sqrt{\Omega} \cosh \sqrt{\Omega} - \cos \sqrt{\Omega} \sinh \sqrt{\Omega} \right) \quad (22)$$

که همان رابطه بدست آمده توسط Wiehn و Turner [۱۱] است.

۳- مطالعه موردی و بحث

برای اینکه میزان تأثیر جرم و ممان اینرسی جرمی تیر مشخص شود، نتایج بخش قبلی بر دو نمونه مختلف از تیرها و تیپ های تجاری معمول اعمال می شود. در هر دو مورد، سطح مقطع تیر، مستطیلی، و شکل تیپ، هرمی است؛ تنها تفاوت آنها، نسبت جرم تیپ به جرم تیر (m_{tip}/m_{beam}) یا همان پارامتر بی بعد M است که در اولی کم (حدود ۱/۱۷٪) و در دومی بالاست (حدود ۶/۶۳٪). با این روند، اینکه اثرات m_t و J_t چقدر مهم هستند و چه موقع بایستی لحاظ شوند مشخص می شود. مشخصات این دو نمونه در جدول (۱) آورده شده است.

حساسیت مدها و فرکانس های تشدید یک تیر AFM با تغییر در برهم کنش تیپ و سطح نمونه مشخص می شود. در این مطالعه فرض می شود که تیر مرتعش در برهم کنش نیرویی خطی با سطوح مختلف نرم^{۱۱} و سخت^{۱۲} قرار گرفته است. همچنین فرض شده است که سختی جانبی $k_{lat} = 0.85k_{ver}$ و زاویه انحراف تیر $\alpha_0 = 15^\circ$ است [۱۳] و [۱۴].

در ابتدا، مقادیر محاسبه شده پنج فرکانس تشدید اول تیر مرتعش، در شرایط مرزی انتهایی آزاد $(k_{ver} = \gamma_{ver} = \gamma_{lat} = k_{lat} = 0)$ با مقادیر پیش بینی شده در [۱۳]، همانطور که در شکل (۳) مشخص شده، مقایسه می شود. نحوه ترسیم نمودارها به این صورت است که محور افقی از تقسیم فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی اول تیر یکسرگیردار بدون در نظر گرفتن m_t و J_t ، در حالت ارتعاش با انتهایی آزاد $(\omega/\omega_{n,1})$ نرمالیزه شده است؛ محور عمودی نیز دامنه ارتعاش اجباری خیز انتهایی تیر

$$F_z = zk_{ver} + \frac{dz}{dt} \gamma_{ver} \quad (7)$$

$$F_\xi = \xi k_{lat} + \frac{d\xi}{dt} \gamma_{lat} \quad (8)$$

و ξ و z به ترتیب تغییر مکان انتهایی تیپ به موازات و عمود بر سطح نمونه است. حل معادله دیفرانسیل (۱) با استفاده از روش جداسازی متغیرها صورت می گیرد، یعنی:

$$y(x, t) = y(x) \exp(j\omega t) \quad (9)$$

اکنون برای ساده سازی روابط، از پارامترهای بی بعد استفاده می شود:

$$X = x/L, \quad Y = y/L, \quad A_0 = a_0/L$$

$$H_x = h_x/L, \quad H_y = h_y/L, \quad H_t = h_t/L$$

$$M = m_t/\rho AL, \quad J = J_t/\rho AL^3, \quad \Omega^2 = \rho A \omega^2 L^4/EI$$

$$\Lambda_{ver} = L^3(k_{ver} + j\omega\gamma_{ver})/EI, \quad \Lambda_{lat} = L^3(k_{lat} + j\omega\gamma_{lat})/EI$$

با اعمال (۹) و پارامترهای فوق، معادله حرکت (۱) خواهد شد:

$$\frac{d^4 Y}{dX^4} - \Omega^2 Y = 0 \quad (10)$$

و شرایط مرزی مسئله (معادلات (۳) تا (۶)) خواهد شد:

$$Y(0) = A_0 \quad (11)$$

$$\frac{dY(0)}{dX} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^2 Y(1)}{dX^2} = - \left(P_1(\Omega) Y(1) + P_2(\Omega) \frac{dY(1)}{dX} \right) \quad (13)$$

$$\frac{d^3 Y(1)}{dX^3} = \left(S_3(\Omega) Y(1) + S_2(\Omega) \frac{dY(1)}{dX} \right) \quad (14)$$

که

$$P_1(\Omega) = H_x S_3(\Omega) + \frac{H_y}{H_t} S_2(\Omega) \quad (15)$$

$$P_2(\Omega) = S_1(\Omega) + H_x S_2(\Omega) \quad (16)$$

$$S_1(\Omega) = H_t H_y (\Lambda_{ver} \sin^2 \alpha_0 + \Lambda_{lat} \cos^2 \alpha_0 - \frac{\Omega^2 J}{H_t H_y}) \quad (17)$$

$$S_2(\Omega) = H_t (\Lambda_{lat} - \Lambda_{ver}) \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 \quad (18)$$

$$S_3(\Omega) = \Lambda_{ver} \cos^2 \alpha_0 + \Lambda_{lat} \sin^2 \alpha_0 - M \Omega^2 \quad (19)$$

حال با استفاده از چهار شرط مرزی (۱۱) تا (۱۴)، حل (۱۰)

به صورت رابطه (۲۰) خواهد بود:

$$Y(1, \Omega) = \frac{A_0 \Omega}{H(\Omega)} \left[\Omega (\cos \sqrt{\Omega} + \cosh \sqrt{\Omega}) + \sqrt{\Omega} P_2(\Omega) (\sin \sqrt{\Omega} + \sinh \sqrt{\Omega}) + S_2(\Omega) (\cosh \sqrt{\Omega} - \cos \sqrt{\Omega}) \right] \quad (20)$$

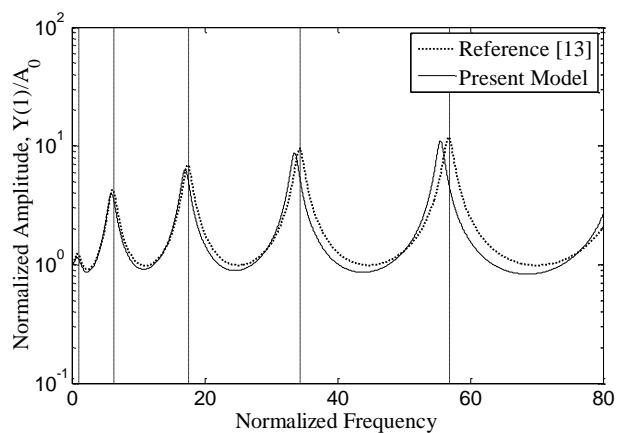
که در واقع همان دامنه ارتعاش خیز انتهایی تیر است و در آن

است که با (۲۰) محاسبه می‌شود. این محور که با A_0 نرمالیزه شده است، در مقیاس لگاریتمی نمایش داده می‌شود. خطوط عمودی خطچین، بیانگر پنج فرکانس طبیعی اول تیر یکسرگیردار، بدون در نظر گرفتن m_t و J_t در حالت ارتعاش با انتهای آزاد است.

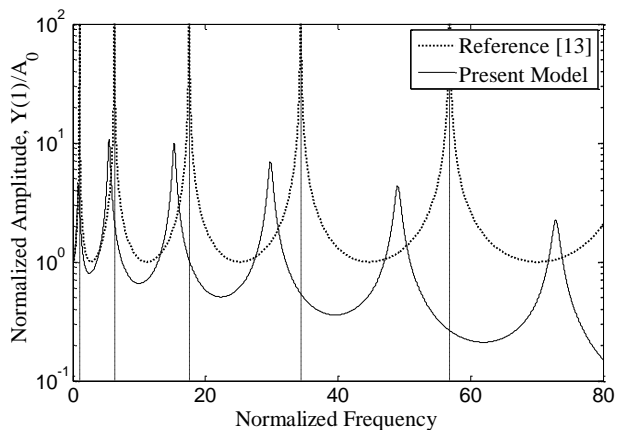
جدول (۱): مشخصات دو نمونه از تیرهای معمول AFM [۱۶]

نمونه	L (μm)	w (μm)	t_b (μm)	E (GPa)	h_t (μm)	$\frac{m_{tip}}{m_{beam}}$
اول	۲۰۰	۲۰	۰/۶	۱۶۹	۳/۵	۱/۱۷٪
دوم	۱۲۵	۴۰	۷	۱۶۹	۲۰	۶/۶۳٪

(الف)



(ب)



شکل (۳): طیف ارتعاشی تیر با انتهای آزاد ($k_{ver} = \gamma_{ver} = \gamma_{lat} = k_{lat} = 0$)، (الف) تیر مورد اول، (ب) تیر مورد دوم.

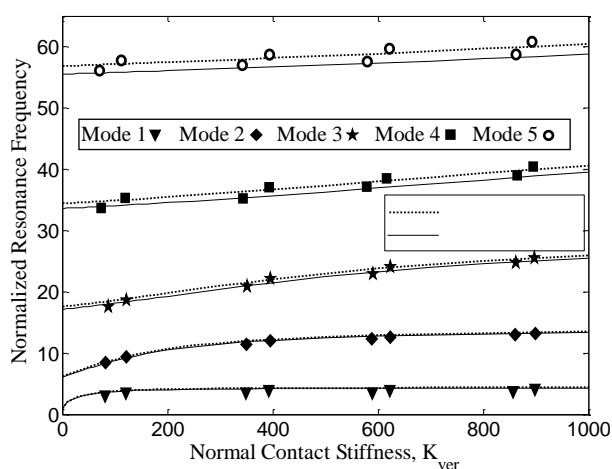
همانگونه که در شکل (۳-الف) برای تیر مورد اول به وضوح مشخص شده است، فرکانس های طبیعی که با مدل اخیر پیش‌بینی شده از ۲/۳۱٪ در مد اول تا ۲/۶۶٪ در مد پنجم کمتر است از آنچه که در [۱۳] پیش‌بینی شده است، در حالیکه این اختلاف برای تیر مورد دوم در همان شرایط، همانگونه که در شکل (۳-ب) مشاهده می‌شود، از ۱۲/۵٪ تا ۱۳/۷۲٪ به

ترتیب در مدهای اول تا پنجم تغییر می‌کند.

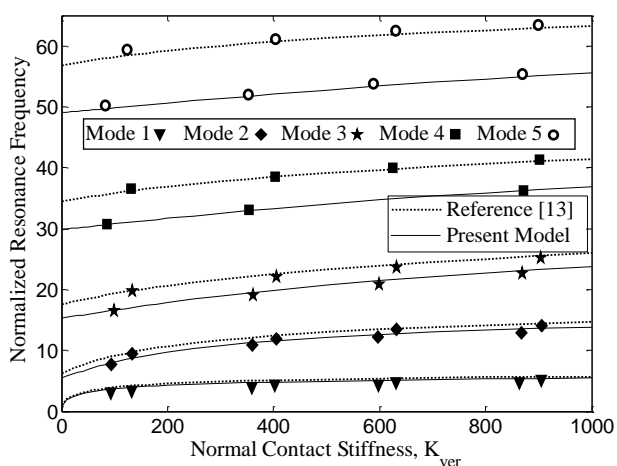
مقادیر فرکانس های تشدید نرمالیزه شده که از (۲۱) بدست می‌آید نسبت به مقادیر مختلف سختی سطح برای تیر مورد اول و دوم به ترتیب در شکل های (۴-الف) و (۴-ب) نشان داده شده است. با توجه به این شکلها، مشاهده می‌شود که موقعیت فرکانس تشدید به مقادیر کمتری نسبت به مدل [۱۳]، بویژه در مدهای بالاتر، جابجا می‌گردد.

همانطور که انتظار می‌رفت، نتایج مدل اخیر با آنچه که در [۱۳] گزارش شده است، برای تیر مورد اول به دلیل نسبت جرمی کم به یکدیگر نزدیک است، اما اختلاف بین نتایج با افزایش نسبت جرمی، چشمگیرتر می‌شود و دلیل آن تنها صرفنظر کردن از جرم و ممان اینرسی تیپ در مدل [۱۳] است.

(الف)



(ب)



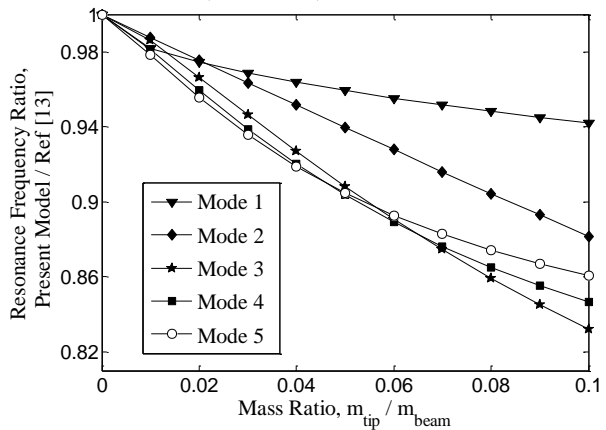
شکل (۴): فرکانس تشدید نرمالیزه تیر بر حسب سختی سطح.

(الف) تیر مورد اول، (ب) تیر مورد دوم.

برای بررسی دقیق تر این موضوع، میزان تفاوت فرکانس تشدید تیر بر حسب مقادیر مختلف نسبت جرمی تیپ به تیر در

شکل (۵) نشان داده شده است. محور عمودی در این شکل، نسبت فرکانس تشدید از مدل اخیر به فرکانس تشدید از مدل [۱۳] را که در آن $m_{tip}/m_{beam}=0$ را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۵) مشخص می‌شود، با افزایش نسبت جرمی تیپ به تیر، از دقت مدل Rabe [۱۳] در پیش‌بینی فرکانس تشدید کاسته می‌شود بطوریکه در نسبت جرمی ۰/۱، کاهش در حدود ۶٪ تا ۱۷٪ در مدهای مختلف مشاهده می‌شود.

نکته مهم دیگری که از شکل (۴) برداشت می‌شود این است که در یک سختی مشخص، همه مدها به یک اندازه تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند، به بیان دقیق‌تر، مدهای بالاتر در برهم‌کنش با یک سختی معلوم، بیشتر تغییر می‌کنند. همچنین مدهای خمشی یک تیر مشخص بر روی یک سطح نرم تر در مقایسه با یک سطح سختتر حساسیت بیشتری دارند. بطور مثال، در مد دوم شکل (۴-ب)، در مقادیر سختی کم (سطح نرم) با اندکی افزایش



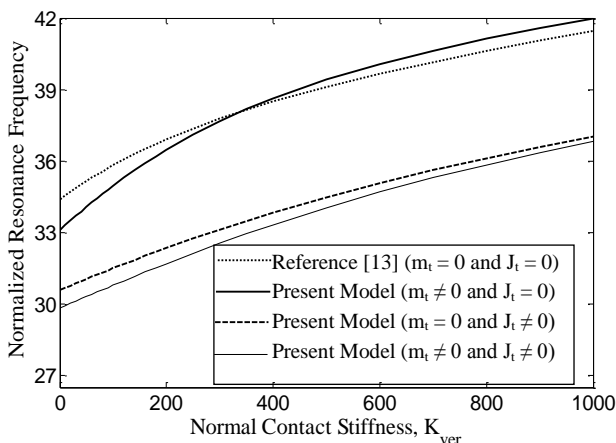
شکل (۵): فرکانس تشدید تیر بر حسب نسبت جرمی تیپ به تیر

در مقدار سختی سطح شاهد تغییر چشمگیر فرکانس تشدید بوده اما در مقادیر سختی بالا (سطح سخت) با اندکی افزایش در مقدار سختی سطح، تغییر جزئی در فرکانس تشدید رخ خواهد داد که این نکته مشابه با نتایجی است که Chang [۱۲] بدست آورده است.

تا کنون، اثرات m_t و J_t بطور همزمان بررسی شدند، اما اینکه کدامیک تاثیر بیشتری بر پاسخ فرکانسی دارد روشن نیست. از اینرو در این بخش، اثرات آنها بطور مجزا بررسی می‌شود. در شکل (۴) مشاهده شد که در مدهای پایین تر، مقادیر فرکانس تشدید پیش‌بینی شده با هر دو مدل به هم نزدیکند؛ اما این مقادیر در مدهای بالاتر اختلاف بیشتری دارند. شکل (۶)، فرکانس تشدید مد چهارم تیر مورد دوم را بر حسب تغییرات سختی سطح نشان می‌دهد. در مقایسه با منحنی های قبلی، دو نمودار دیگر به این شکل اضافه شده است بطوریکه منحنی پیوسته پررنگ، فرکانس تشدید تیر را در شرایطی که $m_t \neq 0$

را نشان می‌دهد، و منحنی خط چین پررنگ نشان دهنده حالتی است که $m_t = 0$ و $J_t \neq 0$. با توجه به این شکل واضح است که فرکانس محاسبه شده در حالتیکه از J_t صرفنظر شده است، بسیار نزدیک به مقادیری است که هر دوی J_t و m_t در مدل جدیدمان در نظر گرفته شده اند. به بیان دیگر اثر J_t در مقایسه با m_t خیلی کم و قابل صرفنظر کردن است.

در ادامه تأثیر زاویه تمایل تیر نسبت به سطح (α_0) و ارتفاع تیپ (H_t) بر مقدار فرکانس تشدید در مدهای اول و پنجم که به ترتیب کمترین و بیشترین تغییرات را دارند، با استفاده از مدل اخیر بررسی خواهد شد. شکل (۷)، تأثیر زاویه تمایل تیر (α_0) بر جابجایی فرکانس تشدید را برای مدهای اول و پنجم نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش α_0 از صفر تا 25° ، فرکانس تشدید به مقدار بزرگتری جابجا شده که این میزان جابجایی در مدهای بالاتر و سطوح با سختی بیشتر، بزرگتر است. هرچند با افزایش زاویه تمایل تیر، شاهد بالارفتن مقدار فرکانس تشدید بوده، اما این روند افزایش با بزرگتر شدن α_0 ، کندتر می‌شود؛ به عبارت دیگر در زوایای تمایل بزرگتر، از وابستگی فرکانس تشدید به تغییر در اندازه α_0 کاسته می‌شود.



شکل (۶): میزان تأثیرگذاری m_t و J_t بر فرکانس تشدید

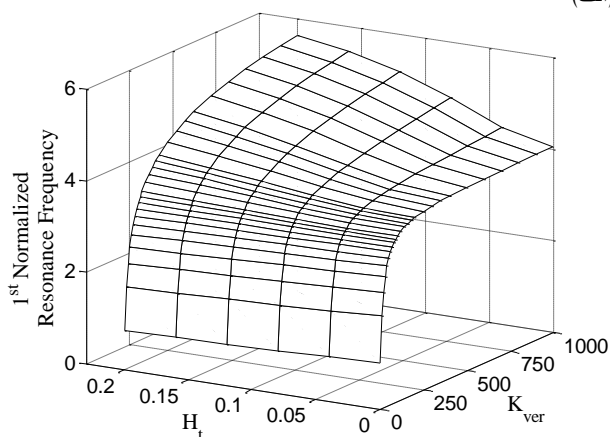
تأثیر ارتفاع تیپ بر فرکانس تشدید تیر در شکل (۸) بررسی می‌شود. این شکل، تغییرات فرکانس تشدید تیر در مد اول و پنجم را بر حسب نسبت ارتفاع تیپ به تیر (h_t/L) که همان پارامتر بی بعد H_t است، نشان می‌دهد. در مد اول، تغییر در فرکانس تشدید تیر وابستگی چندانی به ارتفاع تیپ بویژه در سختی سطح کم، ندارد و در سختی بالا، با افزایش ارتفاع تیپ، به مقدار فرکانس تشدید افزوده می‌شود. این در حالیست که در مدهای بالاتر، با افزایش نسبت h_t/L در تمامی مقادیر سختی سطح، از مقدار فرکانس تشدید کاسته می‌شود که این روند در نسبت های h_t/L کمتر، شدیدتر است.

۴- نتیجه گیری

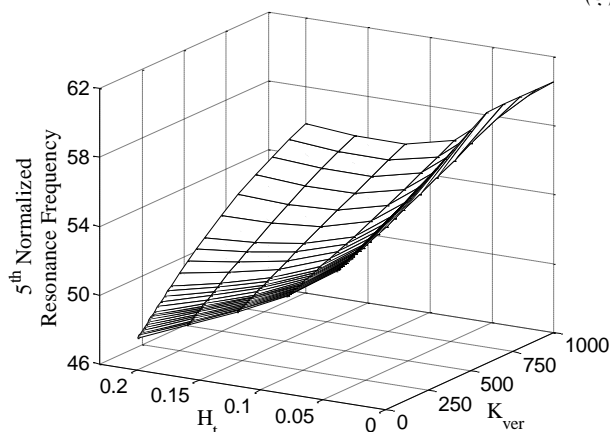
قرار نمی‌گیرند و تغییرات فرکانس تشدید در مدهای بالاتر، بیشتر است. همچنین مدهای خمشی یک تیر مشخص بر روی یک سطح نرمتر حساسیت بیشتری دارند تا بر روی یک سطح سختتر که مشابه نتایجی است که Chang [۱۲] بدست آورده است. علاوه بر این نشان داده شده است که اثر اینرسی دورانی تیپ در مقایسه با جرم آن بر فرکانس تشدید خیلی کم و قابل چشم پوشی است.

در ادامه تأثیر زاویه تمایل تیر نسبت به سطح (α_0) بر مقدار فرکانس تشدید با استفاده از مدل اخیر بررسی شد. نتایج نشان داد که در مد اول با افزایش زاویه تمایل تیر، شاهد بالارفتن مقدار فرکانس تشدید، بویژه در مدهای بالاتر و سطوح با سختی بیشتر، بوده، اما این روند افزایشی با بزرگتر شدن زاویه تمایل، کندتر می‌شود، به عبارت دیگر در زوایای تمایل بزرگتر، از وابستگی فرکانس تشدید به تغییر در اندازه زاویه تمایل تیر کاسته می‌شود.

(الف)



(ب)



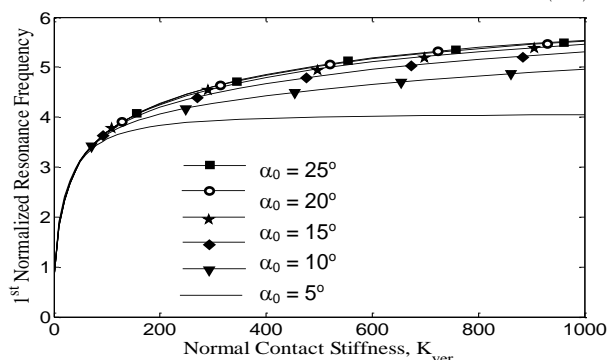
شکل (۸): حساسیت فرکانس تشدید به ارتفاع تیپ به تیر (H_t), (الف) مد اول، (ب) مد پنجم.

در پایان حساسیت فرکانس تشدید به ارتفاع تیپ بررسی شد و مشخص شد که در مدهای پایین با افزایش ارتفاع تیپ، به

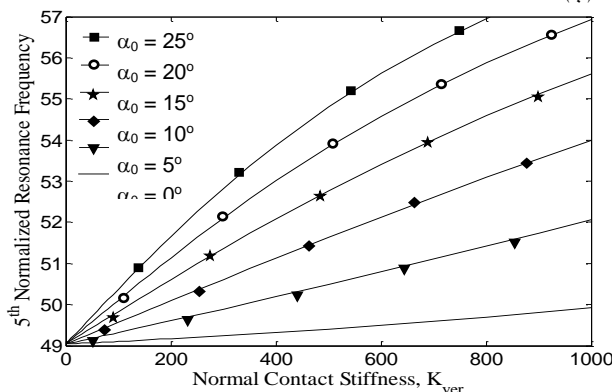
در این مقاله پاسخ فرکانسی تیر AFM مورد بررسی قرار گرفته است. در مقایسه با روش های مدل سازی مورد استفاده قبلی، از مدل سازی پیوسته تیر اولر - برنولی که اثرات جرم و اینرسی دورانی تیپ را در نظر گرفته، استفاده شده است. ابتدا، یک حل تحلیلی دقیق برای ارتعاشات خمشی تیر دارای تیپ استخراج شده است. سپس این حل در مطالعه موردی بر دو تیر تجاری مختلف که سطوح نمونه مختلفی را اسکن می‌کنند، اعمال شده و در نهایت نتایج آن با حل مدل های قبلی مقایسه شده است.

نتایج در مقایسه با نتایج مطالعات دیگران در تطابق خوبی است. همانطور که انتظار می‌رفت، فرکانس های تشدید پیش‌بینی شده با مدل اخیر کمتر از مدل های قبلی است. بویژه در شرایطی که نسبت جرمی تیپ به تیر بالا و در حدود ۱۰٪ باشد،

(الف)



(ب)



شکل (۷): حساسیت فرکانس تشدید به زاویه تمایل تیر (α_0), (الف) مد اول، (ب) مد پنجم.

اختلاف بین مقادیر فرکانس های تشدید پیش‌بینی شده با مدل اخیر و مدل های قبلی بسیار قابل ملاحظه و در حدود ۶٪ تا ۱۷٪ در پنج مد اول ارتعاشی است. علاوه بر این، مشاهده شد که در یک سختی مشخص، همه مدها به یک اندازه تحت تأثیر

Tsurimoto T.; "Atomic Force Microscopy with Carbon Nanotube Probe Resolves the Subunit Organization of Protein Complexes", J. of Electron Microscopy, vol. 74, p.p. 4061-4068, 2000.

Colton R. J.; "Nanoscale Measurement and Manipulation", J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 22, p.p. 1-11, 2004.

Jalili N.; Dadfarnia M.; Dawson D. M.; "A Fresh Insight into the Microcantilever-sample Interaction Problem in Non-contact Atomic Force Microscopy", ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control., vol. 126, p.p. 327-335, 2004.

Turner J. A.; Hirsekorn S.; Rabe U.; Arnold W.; "High-Frequency of Atomic-force Microscope Cantilevers", J. Appl. Phys., vol. 82, p.p. 967-979, 1997.

Turner J. A.; Wiehn J. S.; "Sensitivity of Flexural and Torsional Vibration Modes of Atomic Force Microscope Cantilevers to Surface Stiffness Variations", J. Nanotechnology, vol. 12, p.p. 322-330, 2001.

Chang W. J.; "Sensitivity of Vibration Modes of Atomic Force Microscope Cantilevers in Continuous Surface Contact", Nanotechnology, vol. 13, p.p. 510-514, 2002.

Rabe U.; Turner J. A.; and Arnold W.; "Analysis of the Frequency Response of Atomic Force Microscope Cantilevers", J. Appl. Phys. A, vol. 66,

p.p. 277-282, 1998.

Mahdavi M. H.; Farshidianfar A.; Dalir H.; "High Frequency Analysis of a Non-contact Atomic Force Microscopy Microcantilever", Proc. of Int. Conf. on Mechanical Engineering Conference, Isfahan, Iran, 2006.

Stokey W. F.; *Vibration of Systems Having Distributed Mass and Elasticity*, in Shock and Vibration Handbook, 5th Edition. by Harris C. M. and Piersol A. G.; McGraw-Hill, 2002.

وبسایت محصولات شرکت سازنده:

www.veeco.com

مقدار فرکانس تشدید افزوده می‌شود هرچند تغییر در فرکانس تشدید تیر وابستگی چندانی به ارتفاع تیپ ندارد. این در حالیست که در مدهای بالاتر، فرکانس تشدید تیر به میزان زیاد به ارتفاع تیپ وابسته بوده و با افزایش ارتفاع تیپ، از مقدار فرکانس تشدید کاسته می‌شود و روند کاهشی آن در ارتفاع تیپ کمتر، شدیدتر است.

از آنجا که محاسبه فرکانس تشدید و دامنه تیر و اندازه گیری جابجایی آن از فرکانس طبیعی بعنوان سیگنال اندازه گیری AFM بسیار اهمیت دارد، بنابراین با توجه به نتایج این مطالعه، بنظر می‌آید که در طراحی سیستم بایستی جرم و اینرسی دورانی تیپ در نظر گرفته شوند.

۵- مراجع

- [۱] Binnig G.; Quate C. F.; Gerber C.; "Atomic Force Microscope", Phys. Rev. Lett., vol. 56, p.p. 930-933, 1986.
- [۲] Tortonese M.; Barrett R. C.; Quate C. F.; "Atomic Resolution with an Atomic Microscope Using Piezoresistive Detection", Appl. Phys. Lett., Vol. 62, p.p. 834-836, 1993.
- [۳] Giessibl F. J.; "High-Speed Force Sensor for Force Microscopy and Profilometry Utilizing a Quartz Tuning Fork", Appl. Phys. Lett., vol 73, p.p. 3956-3958, 1998.
- [۴] Rogers B.; York D.; hisman N.; Jones M.; Murray K.; "Tapping Mode Atomic Force Microscopy in Liquid with an Insulated Piezoelectricmicro-Actuator", Rev. Sci. Instrum., vol. 73, p.p. 3242-3244, 2002.
- [۵] Lin S.; Chen J. L.; Huang. L. S; Lin H. W.; "Measurements of the Forces in Protein Interactions with Atomic Force Microscopy", J. Current Proteomics, vol. 2, p.p. 55-81, 2005.
- [۶] Bradbury S.; Bracegirdle B.; *Introduction to Light Microscopy*, Royal Microscopical Society Handbook, Number 42, Oxford Press, 1998.
- [۷] Hohmura K. I.; Itokazu Y.; Yoshimura S. H.; Mizuguchi G.; Masamura Y.; Takeyasu K.; Shiomi Y.;

زیر نویس ها

- ^۱ Resolution
- ^۲ Scanning Probe Microscope
- ^۳ Photo detector
- ^۴ Contact Mode
- ^۵ Non-contact Mode
- ^۶ Tapping Mode
- ^۷ Monitoring
- ^۸ Interaction
- ^۹ Lumped Model
- ^{۱۰} Distributed Model
- ^{۱۱} Soft
- ^{۱۲} Stiff

