# ارتعاشات خمشي تير يكسرگيردار ميكروسكوپ نيروي اتمي و تأثير پارامترهاي ابعادي بر آن

انوشيروان فرشيديان فر[i]; محمد هادي مهدوي[ii]؛ حميد دلير[iii]

## چكيده

ميكروسكوپ نيروي اتمي (Atomic Force Microscope) يا به اختصار AFM، ابزاري قدرتمند و ضروري در نانوتكنولوژي است كه براي مطالعه، تصويربرداري و شناسايي مواد مختلف با تفكيك اتمي بكار مي‌رود و در سه مد تماسي، غير تماسي و كوبشي كار مي‌كند. در اين مقاله ارتعاشات خمشي تير يكسرگيردار مورد استفاده در اين دستگاه كه در مد غير تماسي نمونه هايي با سختي سطح متفاوت را اسكن مي‌كند بررسي مي‌شود. يافتن فركانسهاي طبيعي تير و تحليل فركانسي مجموعه مرتعش، از اهميت بسيار زيادي برخوردار است و طيف وسيعي از تحقيقات به آن مي‌پردازد. در اين مقاله ابتدا معادلات ارتعاش عرضي تير با در نظر گرفتن جرم و ممان اينرسي جرمي تيپ (Tip) انتهاي آن كه قبلاً از آن صرفنظر شده است به روش تحليلی دقيق و با استفاده از تئوري تير اولر - برنولي استخراج شده است. سپس ميزان تفاوت نتايج حاصل از معادلات محققين قبلي با معادلات اخير در مطالعه موردي بررسي شده است. نتايج حاصل نشان مي‌دهد كه اثر تيپ بسته به ابعاد آن، قابل ملاحظه بوده و بايستي براي رسيدن به تصويربرداري دقيق تر نمونه ها در هنگام طراحي منطق عملكردي دستگاه در نظر گرفته شود. در انتها ميزان تأثير زاويه تمايل تير نسبت به سطح و ارتفاع تيپ برفركانس هاي تشديد مجموعه بررسي مي‌شود.

## كلمات كليدي

ميكروسكوپ نيروي اتمي غير تماسي - تحليل فركانسي - جرم و اينرسي تيپ - تير اولر برنولي.

# *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.

[i] دانشيار، گروه مهندسي مكانيک، دانشكده فني و مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد؛Email: Farshid@um.ac.ir.

[ii] كارشناس ارشد، گروه مهندسي مكانيک، دانشكده فني و مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد؛ Email: Mahdavi.mhm@gmail.com.

[iii] دانشجوي دكترا، دانشگاه صنعتي توكيو، آزمايشگاه هوش مصنوعي و ابزار دقيق؛ Email: Dalir@pme.pi.titech.ac.jp.

***KEYWORDS***

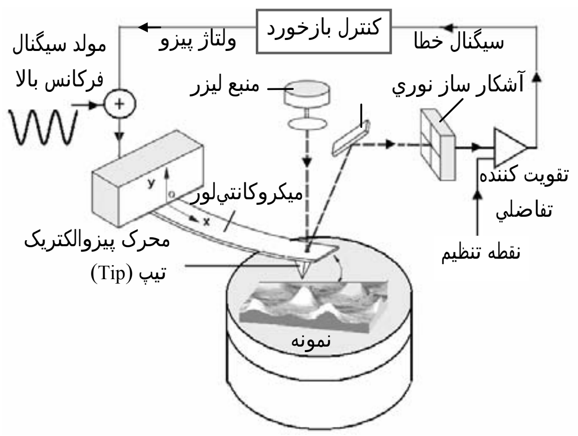
Non-contact AFM – Frequency Analysis – Mass and Rotary Inertia of Tip – Euler-Bernoulli Beam.

## ۱- مقدمه

ميكروسكوپ نيروي اتمي در سال ۱۹۸۶ اختراع شد [۱]. از آن زمان به بعد، AFM تبديل به يک ابزار قدرتمند و ضروري براي مطالعه، تصويربرداري و شناسايي مواد مختلف با تفكيك[1] اتمي شده است. AFM از خانوادة ميكروسكوپ پروب روبشي[2] (SPM) است. اين دستگاه با قابليت تصويربرداري و دستكاري سطح در مقياس نانو، در طراحي، تحليل و پياده سازي سيستم هاي نانو اهميت بنيادي دارد. سيستم نمونه‌برداري AFM از اصل برهم كنش نيروهاي بين اتمي براي تصويربرداري و توپوگرافي با تفكيك در مقياس نانومتر استفاده مي‌كند [۲]- [۵].

انواع متداول AFM از يك تير يكسرگيردار در ابعاد ميكرو متر كه در انتهاي آن يک تيپ تيز قرار دارد و ابتداي آن بر روي يک محرک پيزوالكتريک سوار شده، منبع نور ليزر و آشكارسازنوري[3] تشكيل مي‌شود. با پائين آوردن تير روي سطح نمونه، نيروهاي بين اتمي بين اتم هاي تيپ و اتم هاي سطح نمونه، تيپ AFM را در فاصله ثابتي از سطح نگه مي‌دارد. تير در طي روبش كردن سطح نمونه با استفاده از كريستال هاي پيزوالكتريك، هماهنگ با توپوگرافي سطح نمونه، بالا و پائين مي‌رود. اين حركت عمودي پروب مي‌تواند توسط انعكاس يك باريكه نور ليزر از پشت تير با حساسيت بسيار زياد اندازه گيري شود،شكل (۱). حساسيت اين روش به ميزاني است كه انحرافات عمودي بسيار كمتر از ۰/۱ nm را هم مي‌تواند آشكار كند [۶].

مدهاي مختلف كاري AFM شامل مد تماسي[4]، مد غير تماسي[5] و مد كوبشي[6] است. مد تماسي از طريق فرابيني[7] نيروهاي برهم‌كنش تير و نمونه در حاليكه تيپ در تماس با سطح نمونه است، صورت مي‌گيرد. كار در مد غيرتماسي با دور كردن تير از سطح نمونه و ارتعاش در فركانس طبيعي آن كار مي‌كند و با اندازه‌گيري جابجايي در فركانس طبيعي بخاطر برهم‌كنش[8] با نمونه، اطلاعات توپوگرافي نمونه قابل استخراج است. از آنجا كه نيروهاي ميان سطح نمونه و نوك تيپ در مد غيرتماسي بسيار ضعيف تر از اين نيروها در مد تماسي مي باشند، پس بايد به تيپ حركت نوساني اندكي داده شود تا اين نيروهاي ضعيف از طريق اندازه گيري تغييرات در دامنه، فاز و يا فركانس طبيعي تير قابل آشكارسازي باشد. در اين روش سطوح در حين توپوگرافي آلوده و يا خراب نمي‌شوند، به همين دليل از آن در بسياري از فرايندهاي ساخت نظير مترولوژي MEMS، ساخت ملكولي و ... استفاده مي‌گردد. مد كوبشي تركيبي از دو مد تماسي و غيرتماسي است، يعني استخراج اطلاعات با ارتعاش تير در فركانس طبيعي در حاليكه تيپ مي‌تواند به سطح نمونه برخورد كند [۷]- [۹].




شكل (۱): طرح شماتيک از عملكرد يک ميكروسكوپ نيروي اتمي(AFM) غير تماسي در حال اسكن بر روي سطح نمونه. انحراف عمودي تير با انحراف انعكاس نور ليزر از پشت تير، آشكار مي‌شود.

درک اساسي پايداري تصويربرداري و پاسخ ارتعاشي پروب نياز به بررسي دقيق تر ديناميک تيريكسرگيردار دارد. از اينرو يافتن فركانس هاي طبيعي و تحليل فركانسي مجموعه مرتعش، از اهميت بسيار زيادي برخوردار است و طيف وسيعي از تحقيقات به اين موضوع مي‌پردازد.

تا كنون كارهاي فراواني در زمينة تحليل فركانسي صورت گرفته است؛ Turner و همكارانش [۱۰]، پاسخ فركانس بالاي تير را مطالعه و اثرات ميرايي بين تيپ و نمونه مورد آزمايش را لحاظ كرده‌اند و در جايي ديگر، Turner و Wiehn [۱۱]، ميزان حساسيت مدهاي ارتعاشي تير را به تغييرات سختي سطح نمونه، مورد مطالعه قرار داده اند. در همه مقالات فوق، براي راحتي تحليل، فرض شده است كه تير به موازات سطح قرار گرفته در حقيقت زاويه تمايلي بين سطح و تير وجود دارد كه محاسبات را پيچيده مي‌كند.

Chang [۱۲] با در نظر گرفتن اين زاويه تمايل، ميزان تاثير آن را روي پاسخ فركانسي بررسي كرده و براي راحتي، ميرايي بين تيپ و سطح ماده را لحاظ نكرده است. Rabe و همكارانش [۱۳] با در نظر گرفتن اين ميرايي و نيز زاويه تمايل بين تيپ و سطح ماده، يک مدل جرم متمركز[9] با يک درجه آزادي ارائه كرده‌اند و برهم‌كنش نيرويي بين تيپ و سطح را بصورت خطي

فرض نموده و بر این اساس برهم‌کنش را بصورت فنرهاي خطي مدل کرده اند و در نهايت مقايسه اي بين مدل گسسته و پيوسته[10] انجام داده اند. Mahdavi و همکارانش [١٤] نيز علاوه بر در نظر گرفتن تمامي فرضيات مقاله فوق، اثر ميرايي هوا يا هر سيال ديگري که آزمايش در آن صورت مي‌گيرد و باعث غير خطي شدن معادله ارتعاشي مدل توزيع شده تير مي‌شود را به کمک مدل هاي جرم متمرکز با درجات آزادي بالاتر بررسي کردند. در همه مقالات فوق، در استخراج معادلات ارتعاشي، از جرم و ممان اينرسي جرمي تيپ صرفنظر شده است.

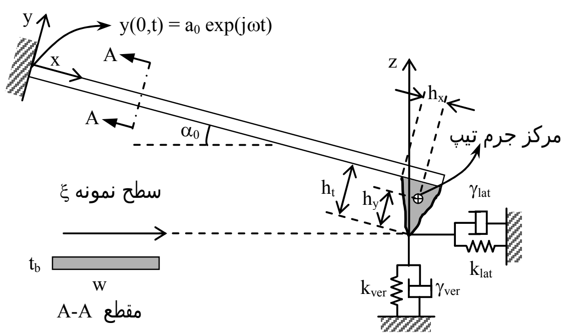
در اين مقاله معادلات ارتعاش عرضي تير با در نظر گـرفتن جـرم و ممـان اينرسـي جرمـي تيـپ انتهـاي آن کـه قـبلا" از آن صرفنظر شده است به روش دقيق و با اسـتفاده از تئـوري تيـر اولر - برنولي استخراج مـي‌شـود. سـپس ميـزان تفـاوت نتـايج حاصل از معادلات قبلي بـا معـادلات اخيـر در مطالعـه مـوردي بررسي شده و نشان داده مي‌شود که اثر جرم و ممان اينرسـي تيپ بسته به ابعاد آن، ممکن است قابل ملاحظه بوده و بايـستي در نظر گرفته شود. در پايان ميزان تأثير زاويه تمايل تير نسبت به سطح و نيز ارتفاع تيپ بر پاسخ فرکانسي مجموعـه در بـازه اي از تغييرات سختي سطح بررسي خواهد شد.

## ٢- حل تحليلي تير با در نظر گرفتن جرم و اينرسي دوراني تيپ

کلي‌ترين حالت از موضع تير و برهم‌کنش آن با سطح نمونه در شکل (٢) ارائه شده است. تير يکسر گيرداري که در اين پژوهش بررسي شده، از انواع متداول آن است که سطح مقطع مستطيلي دارد و در انتهاي آن تيپي صلب با شکل دلخواه قرار گرفته که مرکز جرم آن مشخص شده است. تير داراي طول $L$، ضخامت $t_b$، عرض $w$، سطح مقطع $A=t_b w$، ممان اينرسي سطحي $I=wt_b^3/12$، چگالي $\rho$ و مدول الاستيسيته $E$ مي‌باشد و در حالت کلي نسبت به سطح نمونه، داراي زاويه تمايل $\alpha_0$ است. در انتهاي تير، تيپي به جرم $m_t$ و ممان اينرسي جرمي $J_t$ حول محور گذرنده از مرکز جرم تيپ, عمود بر صفحه کاغذ قرار دارد. تيپ داراي ارتفاع $h_t$ است و فاصله مرکز جرم آن از نوک تيپ $h_y$ و فاصله مرکز جرم تيپ از محل اتصال به تير $h_x$ است.

مشابه مدلسازي هاي ساير محققين [١١]- [١٤] و بمنظور مقايسه دقت مدل ارائه شده در اين پژوهش با آنها، برهم‌کنش بين تيپ و سطح ماده بصورت فنر و دمپر خطي مدل مي‌شود. دو مجموعه دستگاه مختصات انتخاب شده است؛ $\{x,y\}$ که $x$ در امتداد تير و $y$ در امتداد عمود بر تير است و دستگاه دوم، $\{\xi,z\}$، که از دوران دستگاه اول به اندازه $\alpha_0$ حاصل شده است و برهم‌کنش هاي افقي و عمودي تيپ با سطح نمونه در اين امتداد سنجيده مي‌شود.

معادله حرکت براي ارتعاشات خمشي يک تير با سطح مقطع ثابت، يک معادله ديفرانسيل مرتبه چهار به شکل رابطه (١) است [١٥]:




شکل (٢): مدل تير الاستيک با تيپي به جرم $m_t$ و ممان اينرسي جرمي $J_t$ در انتهاي آن که برهم‌کنش تيپ و سطح نمونه با فنر و دمپر عمودي $k_{ver}$ و $\gamma_{ver}$ و فنر و دمپر جانبي $k_{ver}$ و $\gamma_{ver}$ مدل شده‌اند.

$$\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4}+\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}=0 \qquad (١)$$

که $y(x,t)$، خيز هر نقطـه تيـر از موقعيـت تعـادل اسـتاتيکي و $c^2=EI/\rho A$ است.

فرکانس هاي طبيعي براي تير يکسرگيردار عبارتند از:

$$\omega_n=(\beta_n L)^2\sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \qquad (٢)$$

که $\beta^2=\omega/c$، $\omega$ فرکانس تحريک و $n=(1,2,\ldots)$ عـدد مـد بـوده و دلالت بر حالت تشديد دارد.

حال موقعيتي را در نظر بگيريد که محل تکيه گاه گيردار تير (x=0) با دامنه $y(0,t)=A_0\exp(j\omega t)$ به ارتعاش واداشته مي‌شود؛ بنابراين شرايط مرزي تير هنگامي که به سطح نزديک شده شکل (٢) و برهم‌کنش بين تيپ و سطح برقرار مي‌شود، بصورت رابطه (٣) تا (٦) خواهد بود:

$$y(0,t)=a_0\exp(j\omega t) \qquad (٣)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x}(0,t)=0 \qquad (٤)$$

$$EI\frac{\partial^2 y(L,t)}{\partial x^2}=-EI\frac{\partial^3 y(L,t)}{\partial x^3}h_x - J_t\frac{\partial^3 y(L,t)}{\partial t^2\partial x} + F_z\sin\alpha_0 h_y - F_\xi\cos\alpha_0 h_y \qquad (٥)$$

$$EI\frac{\partial^3 y(L,t)}{\partial x^3}=F_\xi\sin\alpha_0+F_z\cos\alpha_0+m_t\frac{\partial^2 y(L,t)}{\partial t^2} \qquad (٦)$$

که در آن

$$F_z = z k_{ver} + \frac{dz}{dt}\gamma_{ver} \qquad (۷)$$

$$F_\xi = \xi k_{lat} + \frac{d\xi}{dt}\gamma_{lat} \qquad (۸)$$

و $\xi$ و $z$ به ترتيب تغيير مكان انتهاي تيپ به موازات و عمود بـر سطح نمونه است. حل معادله ديفرانسيل (۱) با استفاده از روش جداسازي متغيرها صورت مي‌گيرد، يعني:

$$y(x,t) = y(x)\exp(j\omega t) \qquad (۹)$$

اكنون براي ساده سازي روابط، از پارامترهاي بي بعد اسـتفاده مي شود:

$$X = x/L, \quad Y = y/L, \quad A_0 = a_0/L$$
$$H_X = h_x/L, \quad H_Y = h_y/L, \quad H_t = h_t/L$$
$$M = m_t/\rho AL, \quad J = J_t/\rho AL^3, \quad \Omega^2 = \rho A\omega^2 L^4/EI$$
$$\Lambda_{ver} = L^3\left(k_{ver} + j\omega\gamma_{ver}\right)/EI, \quad \Lambda_{lat} = L^3\left(k_{lat} + j\omega\gamma_{lat}\right)/EI$$

با اعمال (۹) و پارامترهاي فوق، معادله حركت (۱) خواهد شد:

$$\frac{d^4Y}{dX^4} - \Omega^2 Y = 0 \qquad (۱۰)$$

و شرايط مرزي مسئله (معادلات (۳) تا (٦)) خواهد شد:

$$Y(0) = A_0 \qquad (۱۱)$$

$$\frac{dY(0)}{dX} = 0 \qquad (۱۲)$$

$$\frac{d^2Y(1)}{dX^2} = -\left(P_1(\Omega)Y(1) + P_2(\Omega)\frac{dY(1)}{dX}\right) \qquad (۱۳)$$

$$\frac{d^3Y(1)}{dX^3} = \left(S_3(\Omega)Y(1) + S_2(\Omega)\frac{dY(1)}{dX}\right) \qquad (١٤)$$

که

$$P_1(\Omega) = H_X S_3(\Omega) + \frac{H_Y}{H_t}S_2(\Omega) \qquad (۱۵)$$

$$P_2(\Omega) = S_1(\Omega) + H_X S_2(\Omega) \qquad (١٦)$$

$$S_1(\Omega) = H_t H_Y\left(\Lambda_{ver}\sin^2\alpha_0 + \Lambda_{lat}\cos^2\alpha_0 - \frac{\Omega^2 J}{H_t H_Y}\right) \qquad (۱۷)$$

$$S_2(\Omega) = H_t\left(\Lambda_{lat} - \Lambda_{ver}\right)\sin\alpha_0\cos\alpha_0 \qquad (۱۸)$$

$$S_3(\Omega) = \Lambda_{ver}\cos^2\alpha_0 + \Lambda_{lat}\sin^2\alpha_0 - M\Omega^2 \qquad (۱۹)$$

حال با استفاده از چهار شرط مرزي (۱۱) تا (١٤)، حل (۱۰) به صورت رابطه (۲۰) خواهد بود:

$$Y(1,\Omega) = \frac{A_0\Omega}{H(\Omega)}\Big[\Omega\left(\cos\sqrt{\Omega} + \cosh\sqrt{\Omega}\right) + \sqrt{\Omega}P_2(\Omega)\left(\sin\sqrt{\Omega} + \sinh\sqrt{\Omega}\right) + S_2(\Omega)\left(\cosh\sqrt{\Omega} - \cos\sqrt{\Omega}\right)\Big] \qquad (۲۰)$$

كه در واقع همان دامنه ارتعاش خيز انتهاي تير است و در آن

$$\begin{aligned} H(\Omega) = {} & \Omega^2\left[1 + \cos\sqrt{\Omega}\cosh\sqrt{\Omega}\right] \\ & + \Omega^{\frac{3}{2}}P_2(\Omega)\left[\sin\sqrt{\Omega}\cosh\sqrt{\Omega} + \sinh\sqrt{\Omega}\cos\sqrt{\Omega}\right] \\ & + \Omega\left[P_1(\Omega) + S_2(\Omega)\right]\sin\sqrt{\Omega}\sinh\sqrt{\Omega} \\ & + \sqrt{\Omega}S_3(\Omega)\left[\sin\sqrt{\Omega}\cosh\sqrt{\Omega} - \sinh\sqrt{\Omega}\cos\sqrt{\Omega}\right] \\ & + \left[P_2(\Omega)S_3(\Omega) - P_1(\Omega)S_2(\Omega)\right]\left[1 - \cos\sqrt{\Omega}\cosh\sqrt{\Omega}\right] \end{aligned} \qquad (۲۱)$$

رابطه (۲۱) در واقع همان معادله مشخصه اسـت كـه ريـشه هاي آن مقادير فركانس تشديد مي‌باشند. چنانچـه فـرض شـود تير به موازات سطح قرار گرفته و اندركنش آن با سطح فقـط بـا يک فنر عمودي مدل شود و از اثرات جرم واينرسي دوراني تيپ نيز صرفنظر شود، ($\gamma_{ver}=\gamma_{lat}=k_{lat}=m_t=J_t=\alpha_0=0$)، (۲۱) به شـكل رابطه (۲۲) خواهد شد:

$$\begin{aligned} H(\beta) = {} & \Omega^{\frac{3}{2}}\left(1 + \cos\sqrt{\Omega}\cosh\sqrt{\Omega}\right) \\ & + K_{ver}\left(\sin\sqrt{\Omega}\cosh\sqrt{\Omega} - \cos\sqrt{\Omega}\sinh\sqrt{\Omega}\right) \end{aligned} \qquad (۲۲)$$

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

## ۳- مطالعه موردي و بحث

براي اينكه ميزان تأثير جرم و ممان اينرسي جرمي تيپ مشخص شود، نتايج بخش قبلي بر دو نمونه مختلف از تيرها و تيپ هاي تجاري معمول اعمال مي‌شود. در هر دو مورد، سطح مقطع تير، مستطيلي، و شكل تيپ، هرمي است؛ تنها تفاوت آنها، نسبت جرم تيپ به جرم تير ($m_{tip}/m_{beam}$) يا همان پارامتر بي‌بعد M است كه در اولي كم (حدود ۱/۱۷%) و در دومي بالاست (حدود ٦/٦٣%). با اين روند، اينكه اثرات $m_t$ و $J_t$ چقدر مهم هستند و چه موقع بايستي لحاظ شوند مشخص مي‌شود. مشخصات اين دو نمونه در جدول (۱) آورده شده است.

حساسيت مدها و فركانس هاي تشديد يک تير AFM با تغيير در برهم‌كنش تيپ و سطح نمونه مشخص مي‌شود. در اين مطالعه فرض مي‌شود كه تير مرتعش در برهم‌كنش نيرويي خطي با سطوح مختلف نرم[۱۱] و سخت[۱۲] قرار گرفته است. همچنين فرض شده است كه سختي جانبي $k_{lat}=0.85k_{ver}$ و زاويه انحراف تير $\alpha_0 = 15^o$ است [۱۳] و [١٤].

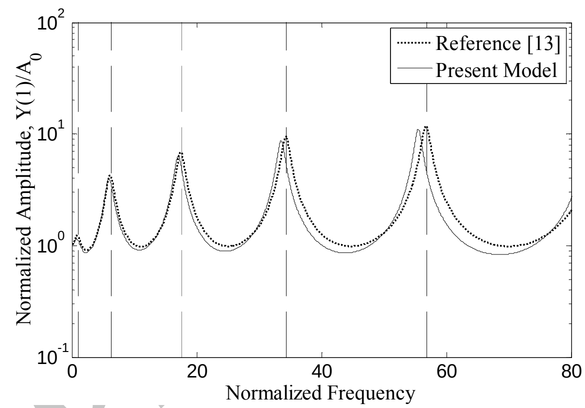
در ابتدا، مقادير محاسبه شده پنج فركانس تشديد اول تير مرتعش، در شرايط مرزي انتهاي آزاد ($k_{ver}=\gamma_{ver}=\gamma_{lat}=k_{lat}=0$) با مقادير پيش‌بيني شده در [۱۳]، همانطور كه در شكل (۳) مشخص شده، مقايسه مي‌شود. نحوه ترسيم نمودار ها به اين صورت است كه محور افقي از تقسيم فركانس تحريک به فركانس طبيعي اول تير يكسرگيردار بدون در نظر گرفتن $m_t$ و $J_t$ ، در حالت ارتعاش با انتهاي آزاد ($\omega/\omega_{n,1}$) نرماليزه شده است؛ محور عمودي نيز دامنه ارتعاش اجباري خيز انتهاي تير

است که با (۲۰) محاسبه مي‌شود. اين محور که با $A_0$ نرماليزه شده است، در مقياس لگاريتمي نمايش داده مي‌شود. خطوط عمودي خطچين، بيانگر پنج فرکانس طبيعي اول تير يکسرگيردار، بدون در نظر گرفتن $m_t$ و $J_t$ در حالت ارتعاش با انتهاي آزاد است.

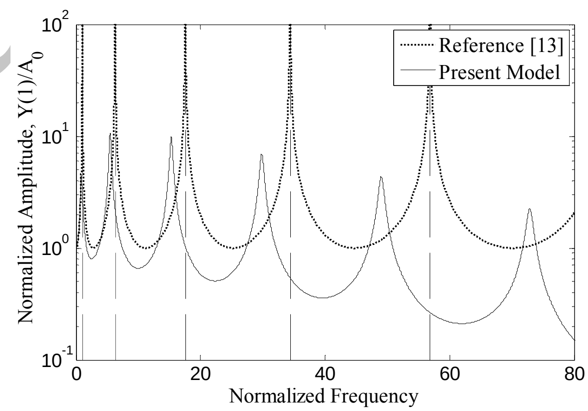
جدول (۱): مشخصات دو نمونه از تيرهاي معمول AFM [۱۶]

| 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)



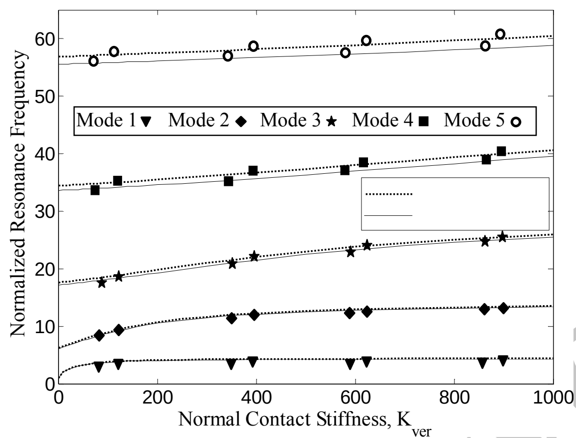

شکل (۳): طيف ارتعاشي تير با انتهاي آزاد ($k_{ver}=\gamma_{ver}=\gamma_{lat}=k_{lat}=0$)، (الف) تير مورد اول، (ب) تير مورد دوم.

همانگونه که در شکل (۳- الف) براي تير مورد اول به وضوح مشخص شده است، فرکانس هاي طبيعي که با مدل اخير پيش‌بيني شده از ۲/۳۱% در مد اول تا ۲/٦٦% در مد پنجم کمتر است از آنچه که در [۱۳] پيش‌بيني شده است، در حاليکه اين اختلاف براي تير مورد دوم در همان شرايط، همانگونه که در شکل (۳- ب) مشاهده مي‌شود، از۱۲/۵% تا ۱۳/۷۲% به ترتيب در مدهاي اول تا پنجم تغيير مي‌کند.

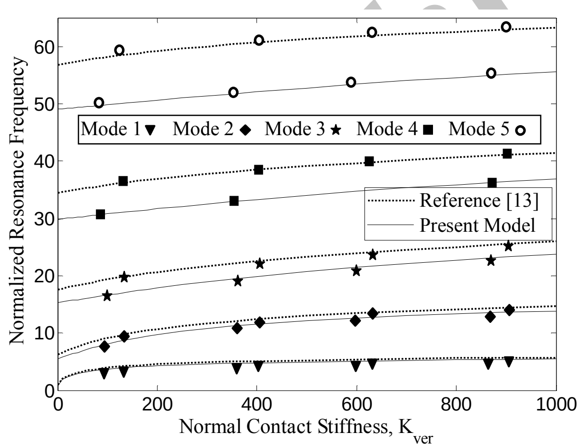
مقادير فرکانس هاي تشديد نرماليزه شده که از (۲۱) بدست مي‌آيد نسبت به مقادير مختلف سختي سطح براي تير مورد اول و دوم به ترتيب در شکلهاي (٤- الف) و (٤- ب) نشان داده شده است. با توجه به اين شکلها، مشاهده مي‌شود که موقعيت فرکانس تشديد به مقادير کمتري نسبت به مدل [۱۳]، بويژه در مدهاي بالاتر، جابجا مي گردد.

همانطور که انتظار مي‌رفت، نتايج مدل اخير با آنچه که در [۱۳] گزارش شده است، براي تير مورد اول به دليل نسبت جرمي کم به يکديگر نزديک است، اما اختلاف بين نتايج با افزايش نسبت جرمي، چشمگيرتر مي‌شود و دليل آن تنها صرفنظر کردن از جرم و ممان اينرسي تيپ در مدل [۱۳] است.

(الف)




(ب)



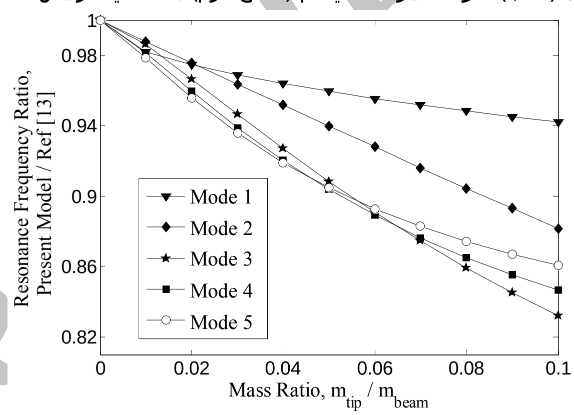

شکل (۴): فرکانس تشديد نرماليزه تير بر حسب سختي سطح، (الف) تير مورد اول، (ب) تير مورد دوم.

براي بررسي دقيق تر اين موضوع، ميزان تفاوت فرکانس تشديد تير بر حسب مقادير مختلف نسبت جرمي تيپ به تير در

شکل (۵) نشان داده شده است. محور عمودي در اين شکل، نسبت فرکانس تشديد از مدل اخير به فرکانس تشديد از مدل [۱۳] را که در آن $m_{tip}/m_{beam}=0$ را نشان مي‌دهد.

همانطور که از شکل (۵) مشخص مي‌شود، با افزايش نسبت جرمي تيپ به تير، از دقت مدل Rabe [۱۳] در پيش‌بيني فرکانس تشديد کاسته مي‌شود بطوريکه در نسبت جرمي ۰/۱، کاهشي در حدود ٦% تا ١٧% در مدهاي مختلف مشاهده مي‌شود.

نکته مهم ديگري که از شکل (٤) برداشت مي‌شود اين است که در يک سختي مشخص، همه مدها به يک اندازه تحت تاثير قرار نمي‌گيرند، به بيان دقيق‌تر، مدهاي بالاتر در برهم‌کنش با يک سختي معلوم، بيشتر تغيير مي‌کنند. همچنين مدهاي خمشي يک تير مشخص بر روي يک سطح نرم تر در مقايسه با يک سطح سختتر حساسيت بيشتري دارند. بطور مثال، در مد دوم شکل (٤-ب)، در مقادير سختي کم (سطح نرم) با اندکي افزايش



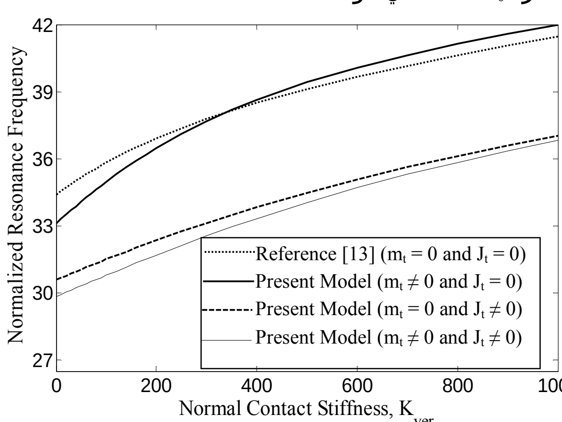

شکل (۵): فرکانس تشديد تير بر حسب نسبت جرمي تيپ به تير

در مقدار سختي سطح شاهد تغيير چشمگير فرکانس تشديد بوده اما در مقادير سختي بالا (سطح سخت) با اندکي افزايش در مقدار سختي سطح، تغيير جزئي در فرکانس تشديد رخ خواهد داد که اين نکته مشابه با نتايجي است که Chang [۱۲] بدست آورده است.

تا کنون، اثرات $m_t$ و $J_t$ بطور همزمان بررسي شدند، اما اينکه کداميک تاثير بيشتري بر پاسخ فرکانسي دارد روشن نيست. از اينرو در اين بخش، اثرات آنها بطور مجزا بررسي مي شود. در شکل (٤) مشاهده شد که در مدهاي پايين تر، مقادير فرکانس تشديد پيش‌بيني شده با هر دو مدل به هم نزديکند؛ اما اين مقادير در مدهاي بالاتر اختلاف بيشتري دارند. شکل (٦)، فرکانس تشديد مد چهارم تير مورد دوم را بر حسب تغييرات سختي سطح نشان مي‌دهد. در مقايسه با منحني هاي قبلي، دو نمودار ديگر به اين شکل اضافه شده است بطوريکه منحني پيوسته پررنگ، فرکانس تشديد تير را در شرايطي که $m_t \neq 0$ و $J_t = 0$ را نشان مي دهد، و منحني خط چين پررنگ نشان دهنده حالتي است که $m_t = 0$ و $J_t \neq 0$ . با توجه به اين شکل واضح است که فرکانس محاسبه شده در حالتيکه از $J_t$ صرفنظر شده است، بسيار نزديک به مقاديري است که هر دوي $J_t$ و $m_t$ در مدل جديدمان در نظر گرفته شده اند. به بيان ديگر اثر $J_t$ در مقايسه با $m_t$ خيلي کم و قابل صرفنظر کردن است.

در ادامه تأثير زاويه تمايل تير نسبت به سطح ($\alpha_0$) و ارتفاع تيپ ($H_t$) بر مقدار فرکانس تشديد در مدهای اول و پنجم که به ترتيب کمترين و بيشترين تغييرات را دارند، با استفاده از مدل اخير بررسي خواهد شد.

شکل (۷)، تأثير زاويه تمايل تير ($\alpha_0$) بر جابجايي فرکانس تشديد را براي مدهاي اول و پنجم نشان مي‌دهد. واضح است که با افزايش $\alpha_0$ از صفر تا ۲۵°، فرکانس تشديد به مقدار بزرگتري جابجا شده که اين ميزان جابجايي در مدهاي بالاتر و سطوح با سختي بيشتر، بزرگتر است. هرچند با افزايش زاويه تمايل تير، شاهد بالارفتن مقدار فرکانس تشديد بوده، اما اين روند افزايش با بزرگتر شدن $\alpha_0$، کندتر مي‌شود؛ به عبارت ديگر در زواياي تمايل بزرگتر، از وابستگي فرکانس تشديد به تغيير در اندازه $\alpha_0$ کاسته مي‌شود.




شکل (۶): ميزان تأثيرگذاري $m_t$ و $J_t$ بر فرکانس تشديد

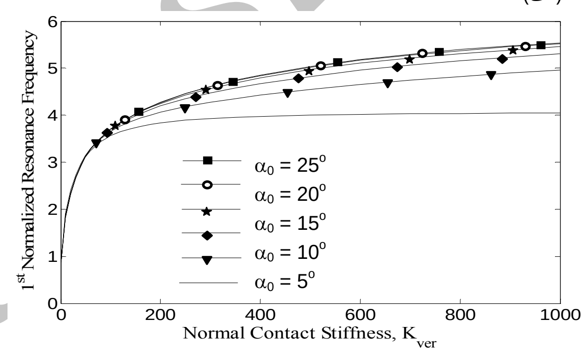
تأثير ارتفاع تيپ بر فرکانس تشديد تير در شکل (۸) بررسي مي‌شود. اين شکل، تغييرات فرکانس تشديد تير در مد اول و پنجم را بر حسب نسبت ارتفاع تيپ به تير ($h_t/L$) که همان پارامتر بي بعد $H_t$ است، نشان مي‌دهد. در مد اول، تغيير در فرکانس تشديد تير وابستگي چنداني به ارتفاع تيپ بويژه در سختي سطح کم، ندارد و در سختي بالا، با افزايش ارتفاع تيپ، به مقدار فرکانس تشديد افزوده مي‌شود. اين در حاليست که در مدهاي بالاتر، با افزايش نسبت $h_t/L$ در تمامي مقادير سختي سطح، از مقدار فرکانس تشديد کاسته مي‌شود که اين روند در نسبت هاي $h_t/L$ کمتر، شديدتر است.

## ۴- نتیجه‌گیري

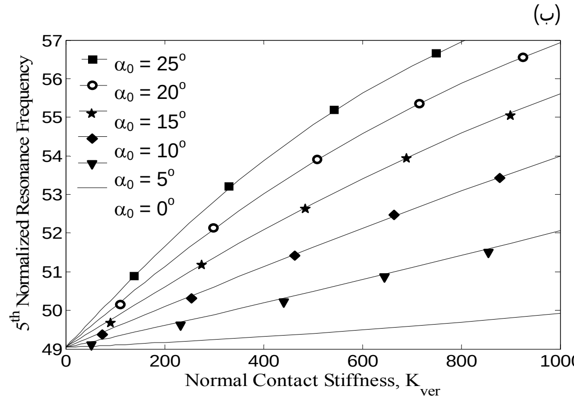
در این مقاله پاسخ فرکانسي تیر AFM مورد بررسي قرار گرفته است. در مقایسه با روش هاي مدلسازي مورد استفاده قبلي، از مدلسازي پیوسته تیر اولر - برنولي که اثرات جرم و اینرسي دوراني تیپ را در نظر گرفته، استفاده شده است. ابتدا، یک حل تحلیلي دقیق براي ارتعاشات خمشي تیر داراي تیپ استخراج شده است. سپس این حل در مطالعه موردي بر دو تیر تجاري مختلف که سطوح نمونه مختلفي را اسکن مي‌کنند، اعمال شده و در نهایت نتایج آن با حل مدل هاي قبلي مقایسه شده است.

نتایج در مقایسه با نتایج مطالعات دیگران در تطابق خوبي است. همانطور که انتظار مي‌رفت، فرکانس هاي تشدید پیش‌بیني شده با مدل اخیر کمتر از مدل هاي قبلي است. بویژه در شرایطي که نسبت جرمي تیپ به تیر بالا و در حدود ۱۰% باشد،

(الف)




(ب)

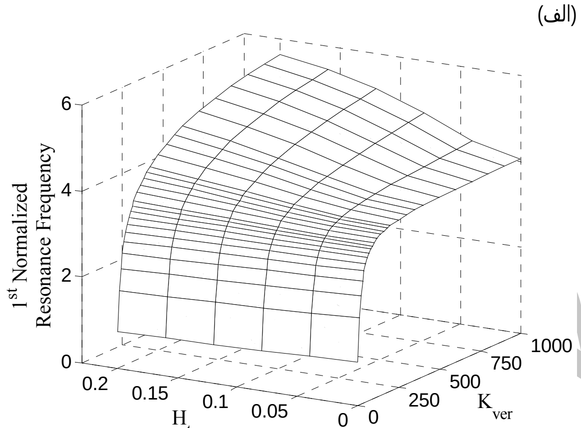



شکل (۷): حساسیت فرکانس تشدید به زاویه تمایل تیر($\alpha_0$)،(الف) مد اول، (ب) مد پنجم.

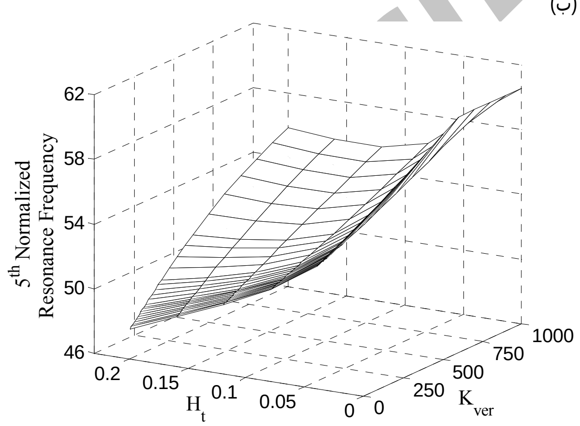
اختلاف بین مقادیر فرکانس هاي تشدید پیش‌بیني شده با مدل اخیر و مدل هاي قبلي بسیار قابل ملاحظه و در حدود ۶% تا ۱۷% در پنج مد اول ارتعاشي است. علاوه بر این، مشاهده شد که در یک سختي مشخص، همه مدها به یک اندازه تحت تأثیر قرار نمي‌گیرند و تغییرات فرکانس تشدید در مدهاي بالاتر، بیشتر است. همچنین مدهاي خمشي یک تیر مشخص بر روي یک سطح نرمتر حساسیت بیشتري دارند تا بر روي یک سطح سختتر که مشابه نتایجي است که Chang [۱۲] بدست آورده است. علاوه بر این نشان داده شده است که اثر اینرسي دوراني تیپ در مقایسه با جرم آن بر فرکانس تشدید خیلي کم و قابل چشم پوشي است.

در ادامه تأثیر زاویه تمایل تیر نسبت به سطح ($\alpha_0$) بر مقدار فرکانس تشدید با استفاده از مدل اخیر بررسي شد. نتایج نشان داد که در مد اول با افزایش زاویه تمایل تیر، شاهد بالارفتن مقدار فرکانس تشدید، بویژه در مدهاي بالاتر و سطوح با سختي بیشتر، بوده، اما این روند افزایشي با بزرگتر شدن زاویه تمایل ، کندتر مي‌شود، به عبارت دیگر در زوایاي تمایل بزرگتر، از وابستگي فرکانس تشدید به تغییر در اندازه زاویه تمایل تیر کاسته مي‌شود.

(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 بررسي شد و مشخص شد که در مدهاي پایین با افزایش ارتفاع تیپ، به

مقدار فرکانس تشدید افزوده مي‌شود هرچند تغيير در فرکانس تشديد تير وابستگي چنداني به ارتفاع تيپ ندارد. اين در حاليست که در مدهاي بالاتر، فرکانس تشديد تير به ميزان زياد به ارتفاع تيپ وابسته بوده و با افزايش ارتفاع تيپ ، از مقدار فرکانس تشديد کاسته مي‌شود و روند کاهشي آن در ارتفاع تيپ کمتر، شديدتر است.

از آنجا که محاسبه فرکانس تشدید و دامنه تير و اندازه گيري جابجايي آن از فرکانس طبيعي بعنوان سيگنال اندازه گيري AFM بسيار اهميت دارد، بنابراين با توجه به نتايج اين مطالعه، بنظر مي‌آيد که در طراحي سيستم بايستي جرم و اينرسي دوراني تيپ 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.; 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.

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

[۹] 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.

[۱۰] 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.

[۱۱] 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.

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

[۱۳] 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.

[۱۴] 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.

[۱۵] 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.

[۱۶] وب‌سايت محصولات شرکت سازنده:
www.veeco.com


## زيرنويس ها

۱ Resolution
۲ Scanning Probe Microscope
۳ Photo detector
٤ Contact Mode
٥ Non-contact Mode
٦ Tapping Mode
٧ Monitoring
٨ Interaction
٩ Lumped Model
١٠ Distributed Model
١١ Soft
١٢ Stiff