

تحلیل حساسیت پاسخ فرکانسی میکروسکوپ نیروی اتمی در محیط مایع نسبت به پارامترهای هندسی تیرک

مهرنوش دمیرچلی^۱

* نویسنده مسئول: m.damircheli@qodsiau.ac.ir

چکیده

در این مقاله دینامیک غیر خطی میکروسکوپ نیروی اتمی مستطیلی با مدل تیر تیموشنکو با در نظر گرفتن اثر پارامترهای هندسی مانند طول، عرض، ضخامت تیرک، ارتفاع نوک تیرک و زاویه قرارگیری تیرک نسبت به نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مین آن هستند که فرکانس تشدید، دامنه ارتعاش و فاز پاسخ بسیار حساس به تغییرات پارامترهای هندسی هستند. سپس به منظور بهبود رفتار سیستم و بهینه سازی آن تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی سیستم بر روی فرکانس تشدید و دامنه ارتعاش تغییر مکان عمودی مربوط به مود اول به روش سوپول انجام شده است. از آنجا که وضوح تصاویر گرفته شده از نمونه ها و تقریب خواص رابطه مستقیمی با حساسیت فرکانسی میکروسکوپ نیروی اتمی دارند، نتایج این مقاله می تواند راهنمای خوبی جهت انتخاب بهترین تیرک به منظور رسیدن به بهترین وضوح تصویر برای نمونه های نرم بیولوژیکی در محیط مایع باشند. همچنین یکی از روشهای بالا بردن سرعت عکسبرداری در محیط مایع استفاده از تیرکهای کوتاه است و برای مدل سازی تیرکهای کوتاه، مدل تیر تیموشنکو از مدل‌های دیگر مانند تیر اویلر برنولی بسیار دقیق تر به نظر می رسد زیرا در مدل تیر تیموشنکو اثر تغییر شکل برشی و اینرسی چرخشی در نظر گرفته می شود و در این مقاله از این مدل برای رسیدن به نتایجی دقیق تر استفاده شده است.

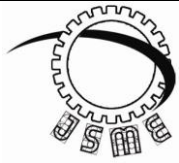
واژه‌های کلیدی

تحلیل حساسیت، پارامترهای هندسی تیرک، مدل تیر تیموشنکو، محیط مایع، روش سوپول و مود ضربه‌ای

تاریخ ارسال: ۱۳۹۳/۱۰/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۲۵



Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Sensitivity Analysis of Frequency Response of Atomic Force Microscopy in Liquid Environment on Cantilever's Geometrical Parameters

M. Damircheli¹

* Corresponding Author: m.damircheli@qodsiau.ac.ir

Abstract:

In this paper, the non-linear dynamic response of rectangular atomic force microscopy in tapping mode is considered. The effect of cantilever's geometrical parameters (e.g., cantilever length, width, thickness, tip length and the angle between the cantilever and the sample's surface in liquid environment has been studied by taking into account the interaction forces. Results indicate that the resonant frequency, amplitude and phase are very sensitive to changes of geometrical parameters. In order to improve and optimize the system's behavior, the sensitive analysis (SA) of geometrical parameters on the first resonant frequency and amplitude of cantilever's vertical displacement has been conducted using Sobol's method. Results show that the influence of each geometrical variable on frequency response of the system can play a crucial role in designing the optimum cantilever in liquid medium for soft and sensitive biological samples. Also, one way to speed up the imaging process is to use short cantilevers. For short beams, the Timoshenko model seems to be more accurate compared to other models such as the Euler-Bernoulli. By using the Timoshenko beam model, the effects of rotational inertia and shear deformation are taken into consideration. In this paper, this model has been used to obtain more accurate results.

Keywords:

Sensitive analysis
Geometrical parameters
Timoshenko beam
Liquid environment
Sobol method

1- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

۱- مقدمه

نیروهای غیرخطی بین نوک و نمونه حل تحلیلی بسیار پیچیده و حتی غیر ممکن است بنابراین برای تحلیل دینامیکی از روشهای عددی مثل المان محدود و روش جمع آثار حول نقطه تعادل استفاده شده است [۹]. به منظور بررسی اثر تغییر شکل برشی و اینرسی چرخشی، مدل سازی تیرک میکروسکوپ اتمی با تیر تیموشنکو دقیقتر از تیر اویلر برنولی است که این مدل در محیط هوا انجام شده است. [۱۰]

علیرغم تحقیقات وسیعی که در مورد رفتار دینامیکی میکروسکوپ نیروی اتمی در محیط هوا و خلا انجام شده است، هنوز نکات مبهم بسیاری در مورد رفتار آن در محیط مایع وجود دارد. در مود ضربه ای نوک تیرک بطور متناوب و نه پیوسته به سطح نمونه ضربه می‌زند و خسارت وارد بر نمونه را به حداقل می‌رساند. بنابراین، از این مود برای تصویر برداری نمونه‌های زیستی مثل دی ان ای، پروتئین، ویروس ها و سلولهای زنده استفاده می‌شود [۱۱]. مدلسازی تیرک در مود ضربه ای در محیط مایع بسیار پیچیده تر از محیط هوا است. در محیط مایع رفتار تیرک تحت تاثیر میراکننده هیدرو دینامیکی و اثر جرم افزوده محیط مایع می‌باشد. پوتمن و همکاران [۱۲] با آزمایشهای تجربی پاسخ سیستم را در دو محیط هوا و مایع مقایسه کرده‌اند. چن و همکاران [۱۳ و ۱۴] پاسخ فرکانسی تیرک در محیط مایع را با مدل کردن تیرک به صورت یک کره که روی سطح نمونه را اسکن می‌کند بررسی کردند. برنهام و همکاران [۱۵] نیز تیرک در محیط مایع را با مدل جرم و فنر شبیه سازی کرده‌اند. نتایج آنها تطابق خوبی را با آزمایشات عملی در هوا نشان می‌داد، اما شبیه سازی ها در محیط مایع تغییرات نامتقارن دامنه در ناحیه ضربه زدن را نشان نمی‌داد و بدین ترتیب مشخص شد که نیروی هیدرو دینامیکی اعمالی به کانتیلور را نمی‌توان تنها با نیروی درگ اعمالی به یک کره تقریب زد. سادر [۱۶] یک مدل ریاضی عمومی برای کانتیلور در محیط سیال لزج ارائه داد. این مدل تنها برای تیرهای مرتعشی صادق است که دامنه ارتعاشی آنها کوچک و طول در مقایسه با پهنا بسیار

ابعاد تیرک، شکل پروب، ابعاد پروب، زاویه قرارگیری تیرک نسبت به سطح نمونه و دیگر پارامترهای هندسی بر اساس محیط کاربردی و جنس نمونه طراحی می‌گردند مثلاً برای نمونه های بیولوژیکی که از جنس بسیار نرمی می‌باشند به منظور جلوگیری از تخریب و آسیب نمونه‌ها حین عکسبرداری در محیط مایع در مود ضربه ای، فرکانسهای اصلی تیرک باید پایین باشند و دامنه ارتعاش آن نیز در محیط مایع بدلیل کمی فضا باید در بازه محدود و مشخصی باشد که با تغییرات پارامترهای هندسی در طراحی به فرکانس و دامنه مطلوب می‌توان دست یافت.

میکروسکوپ نیروی اتمی به صورت یک تیرک به همراه نوکی که معمولاً در انتهای آزاد آن قرار می‌گیرد برای عکسبرداری از نمونه استفاده می‌شود. در مود ضربه ای، هم در محیط مایع و هم در محیط خلاء یا هوا از تغییرات دامنه ارتعاشی نوک، فاز زاویه پاسخ و تغییر فرکانس تشدید که به واسطه نیروهای غیر خطی بین نمونه و نوک ایجاد می‌شود برای تقریب زدن خواص سطح و توپوگرافی استفاده می‌شود. بنابراین مدل‌های تحلیلی و عددی که بتوانند بطور دقیقی دینامیک سیستم را شبیه سازی کنند بسیار ضروری هستند. بسیاری از محققین با استفاده از مدل گسسته یا جرم و فنر، دینامیک غیر خطی تیرک را در محیط هوا تحت مود ضربه ای مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۷ و ۱۸]. تحقیقات بعدی همگی بیانگر این مهم بودند که مدل گسسته فقط رفتار سیستم را در هارمونیکهای پایین به خوبی می‌تواند تقریب بزند و برای تحریک تیرک در هارمونیکهای بالا تفاوت عمده‌ای بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از این مدل سازی وجود دارد [۱۹ و ۲۰]. محققین دیگر اثبات کردند که مدل سازی گسسته فقط می‌تواند تغییر شکل عمودی تیرک را تقریب بزند در حالیکه در واقعیت تغییر شکل زاویه ای تیرک تاثیر غیرقابل اغمازی در نتایج تجربی دارد و برای از بین بردن این مشکل در مدلسازی تیرک، از مدل تیر اویلر برنولی استفاده کردند [۸ و ۷ و ۶]. به دلیل وجود

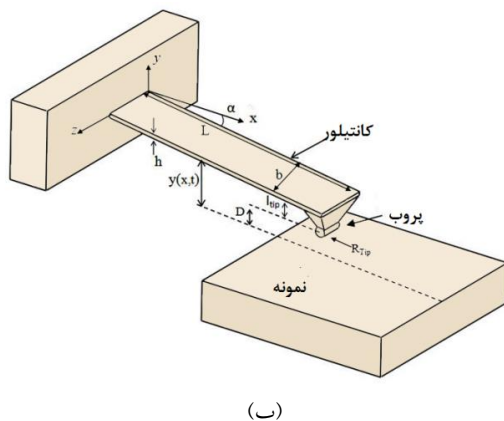
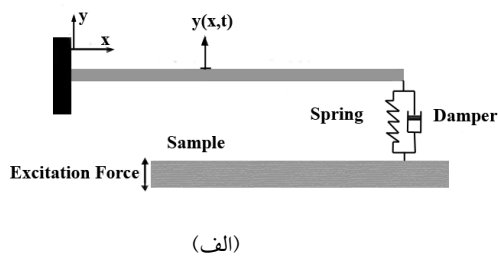
هستند، به منظور جلوگیری از تخریب و آسیب آنها حین عکسبرداری در محیط مایع در مود ضربه ای فرکانس تشدید باید پایین باشد و دامنه ارتعاش نیز در محیط مایع بدلیل کمی فضا باید در بازه محدود و مشخصی باشد. با بررسی اثر تغییر پارامترهای هندسی در پاسخ فرکانسی سیستم به طراحی دقیقتر میکرو-تیرک در محیط مایع می توان نائل شد و محدودیتهایی که در فرکانس تشدید و دامنه ارتعاش وجود دارد را لحاظ کرد.

در نهایت تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی در پاسخ فرکانسی سیستم به روش سوپول انجام شده است و تاثیر هر یک از پارامترهای هندسی بر فرکانس تشدید و دامنه ارتعاش مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مدل سازی

۲-۱- مدل سازی ریاضی میکروکانتیلور

به منظور مدل سازی ریاضی، تیر مستطیلی شکل یکسر درگیر یکنواخت در شکل (۱) در نظر گرفته می شود.



شکل (۱) شماتیکی از تیرک یک میکروسکوپ نیروی اتمی

(الف) تیرک یک سر درگیر و تحت تاثیر نیروهای خطی (ب) پارامترهای

هندسی

بزرگتر باشد. سونگ و بوشان [۱۷] با استفاده از روش المان محدود حرکت ارتعاشی کانتیلور میکروسکوپ نیروی اتمی با مدل تیر اوایلر برنولی را در مود ضربه ای و در محیط مایع تحلیل کردند. آنها با تقریب نیروی هیدرودینامیکی اعمالی از جانب سیال از مدل تجربی سادر، پاسخ های فرکانسی و گذرا سیستم را استخراج کردند. کواریم و ابراهیمی [۱۸] پاسخ فرکانسی تیر با مدل اوایلر برنولی را با استفاده از روش عددی فوروارد تایم^۱ در محیط مایع تحلیل کردند. ولی در تحقیقات انجام شده از ابعاد نوک صرف نظر شده و تیرک موازی با نمونه فرض شده است.

بنابراین، با توجه به اهمیت کارکرد میکروسکوپ نیروی اتمی در محیط مایع در علم بیولوژی و نیاز به سرعت بالای عکسبرداری در این محیط که استفاده از تیرک های کوتاه را می طلبد، در این مقاله به تحلیل ارتعاشی کانتیلور با مدل تیر تیموشنکو در محیط مایع با در نظر گرفتن کلیه نیروهای تماسی در این محیط و با در نظر گرفتن نیروی هیدرودینامیکی مایع پرداخته شده است در تحقیقات قبلی تیرک در محیط هوا با تیر تیموشنکو مدل شده است [۱۰]. لی و چن [۱۹] تحلیل حساسیت کانتیلور وی شکل را در محیط هوا بررسی کردند. موسی پور و همکاران تحلیل حساسیت فرکانس مودهای پیچشی را در میکروسکوپهایی با تیرکهای مستطیلی مورد بررسی قرار دادند [۲۰].

در این مقاله پاسخ فرکانسی میکروسکوپ نیروی اتمی با مدل تئوری در محیط مایع بررسی شده و اثر پارامترهای هندسی تیرک از جمله طول، عرض، ضخامت تیرک، ارتفاع نوک تیرک و زاویه قرارگیری تیرک نسبت به نمونه بر پاسخ فرکانسی سیستم با مدل تیر تیموشنکو در محیط مایع مورد بررسی قرار گرفته است نتایج نشان دهنده این مهم هستند که تاثیر تغییرات پارامترهای هندسی بر پاسخ فرکانسی در محیط مایع به دلیل تاثیر ابعاد بر اندازه نیروی هیدرودینامیکی مایع در مقایسه با محیط هوا مهمتر می باشد. از آنجا که برای نمونه های بیولوژیکی که از جنس بسیار نرمی

¹ Forward-time

$$B.C.S: \begin{cases} y(x,t) = \phi(x,t) = 0 & x=0 \\ -KGA\left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} - \phi(x,t)\right) = \\ k_n y(x,t) + c_n \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} & x=L \\ EI \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} = 0 & x=L \end{cases} \quad (۳)$$

که در شرایط مرزی بالا، رابطه اول مبین تیر یک سر در گیر یا صفر بودن تغییر مکان و شیب در سرگیردار تیر می باشد. روابط دوم و سوم به ترتیب نشان دهنده، تعادل نیرویی و صفر بودن شناور در انتهای دیگر تیر یا سر آزاد تیر هستند که این امر به دلیل موازی بودن تیرک با نمونه ایجاد شده است. شبیه سازی های بسیاری برای نیروی هیدرودینامیکی که توسط محیط مایع به تیرک وارد می شود انجام شده است، ولی دقیقترین آنها این نیرو را متناسب با سرعت و شتاب تیرک می داند [۱۳-۱۴]،

$$f_h(x,t) = -\rho_l \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} - c_l \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} \quad (۴)$$

با جایگذاری رابطه بالا در معادله (۱) معادلات حاکم بر تیر به صورت زیر بازنویسی می شوند،

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[KGA \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} - \phi(x,t) \right) \right] - (c + c_l) \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} - \\ (\rho + \rho_l) A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} \right) + \\ KGA \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} - \phi(x,t) \right) - \\ \rho l \frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (۵)$$

که ρ_l و c_l به ترتیب ضریب جرم افزوده مایع و ضریب میرایی محیط مایع هستند که به دلیل غوطه وری تیرک در محیط مایع ایجاد شده اند. ضرایب بالا به شکل زیر تقریب زده می شوند.

$$\rho_l = 0.6 \rho_{liq} \frac{1}{L^2} b^3 \quad (۶)$$

با فرض تئوری تیر تیموشنکو، با استفاده از روش همیلتون دو معادله کوپل حرکت که شامل تغییر شکل عمودی و زاویه چرخش خمشی تیر است در مود ضربه ای به صورت زیر بدست می آیند، این مدل برای محیط مایع در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که جمله استهلاک نیز به روابط اضافه شده است [۲۱-۲۳].

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[KGA \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} - \phi(x,t) \right) \right] - \\ c \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} - \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + f_h(x,t) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} \right) + KGA \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} - \phi(x,t) \right) - \\ \rho l \frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (۱)$$

که K ضریب برش تیر تیموشنکو، G مدول الاستیسیته برشی، A سطح مقطع تیر، $y(x,t)$ تغییر مکان عرضی تیر، $\phi(x,t)$ تغییر مکان زاویه ای تیر، ρ چگالی تیر، I ممان اینرسی سطح مقطع تیر حول تار خنثی، E مدول الاستیسیته کششی، C ضریب دمپینگ داخلی تیر و $f_h(x,t)$ نیروی هیدرودینامیکی وارد از محیط مایع به تیرک هستند. معمولاً محاسبه ضریب دمپینگ داخلی C دشوار است. می توان از ضریب دمپینگ مناسب استفاده کرد [۱۷].

$$\begin{aligned} C &= \Phi^{-T} C_\Lambda \Phi^T \\ C_\Lambda &= \text{diag} [2\xi_1 \omega_1, 2\xi_2 \omega_2, \dots, 2\xi_n \omega_n] \end{aligned} \quad (۲)$$

در رابطه بالا Φ ماتریسی از بردارهای ویژه، ξ_n ، مرتبه n ضریب دمپینگ و ω_n مرتبه n فرکانس طبیعی تیر هستند. در شبیه سازی ساده، تیرک موازی نمونه فرض می گردد و نیروهای تقابل عمودی با یک نیروی فنر و دمپر خطی تقریب زده می شود و شرایط مرزی به صورت زیر استخراج می شوند.

$$F_{liq-n}(d) = \begin{cases} F_{DLVO}(d) = \frac{4\pi\lambda_D R_t}{\epsilon\epsilon_0} \sigma_T \sigma_s e^{-\frac{d}{\lambda_D}} - \frac{AR_t}{6d^2}; d \geq a_0 \\ F_{DMT}(d) = \frac{4E_{eff} \sqrt{R_t}}{3} (a_0 - d)^{\frac{3}{2}} + F_{DLVO}(a_0); d < a_0 \end{cases} \quad (11)$$

که در رابطه بالا λ_D ، σ_T ، σ_s ، ϵ ، ϵ_0 و A به ترتیب طول دیبی، چگالی بار سطحی نوک تیرک، چگالی دانسیته بار سطحی نمونه، ثابت دی الکتریک محیط، ضریب گذردهی خلا و ثابت هماکر هستند. d فاصله گذرا بین نوک تیرک و نمونه است. در رابطه بالا E_{eff} مدول الاستیسیته موثر بین نمونه و نوک تیرک است [۲۴]:

$$E_{eff} = \left[\frac{(1-\nu_t)}{E_t} + \frac{(1-\nu_s)}{E_s} \right]^{-1} \quad (12)$$

که E_t ، E_s ، ν_t و ν_s به ترتیب مدولهای الاستیسیته و ضریب پواسون نوک تیرک و نمونه هستند. نیروی الکترواستاتیک دو لایه به دلیل بارهای سطحی در سطوح تماس افزایش می‌یابد در میکروسکوپ های نیروی اتمی پتانسیل اضافی بین نوک و نمونه ایجاد می‌شود که باعث تقویت این نیرو می‌شود در ضمن آب ثابت دی الکتریک بالایی دارد، بنابراین جذب بار در آب بسیار متداول است. نیروی الکترواستاتیک دو لایه در محیط مایع نیروی مهمی است که صرفنظر از این نیروی مهم خطای قابل توجهی را در شبیه سازیها ایجاد می‌کند، ولی در تحلیل‌های دینامیکی برای سادگی محاسبات از این نیرو صرفنظر می‌شود. نیروی مماسی بین نوک تیرک و نمونه در محیط مایع نیز مانند محیط هوا با استفاده از مدل تئوری هرترز بیان می‌شود.

$$F_{air-t}(d) = \begin{cases} 0 & ; d \geq a_0 \\ -8G_{eff} \left(\frac{3R_t f_c}{4E_{eff}} \right)^{\frac{1}{3}} \Delta_t & ; d < a_0 \end{cases} \quad (13)$$

در رابطه بالا G_{eff} مدول برش موثر بین نمونه و نوک تیرک

است و برابر است با:

$$C_l = C_{free} + C_{sq} \quad (7)$$

که در آن ρ_{liq} چگالی مایعی است که تیرک در آن عمل می‌کند، L طول تیرک، b عرض تیر هستند. C_{sq} و C_{free} ضریب دمپینگ آزاد و فیلم فشرده مایع هستند. ضریب دمپینگ آزاد برای حالتی می‌باشد که تیرک دور از نمونه ارتعاش دارد و در این حالت ضریب دمپینگ فشرده مایع صفر است و هرچه که تیرک به نمونه نزدیک می‌شود، لایه فشرده ای از مایع بین نوک تیرک و نمونه ایجاد می‌شود و دمپینگ اضافه ای به وجود می‌آید که دمپینگ فیلم فشرده نام دارد که با توجه به روابط هوساکا و همکاران، C_{sq} و C_{free} را به صورت زیر می‌توان بیان کرد [۲۲].

$$C_{free} = 3\pi\eta + \frac{3}{4}\pi b \sqrt{2\rho_{liq}\eta\omega} \quad (8)$$

$$C_{sq} = \frac{\eta b^3}{H(x,t)^3} \quad (9)$$

در روابط بالا، η لزجت سیالی است که تیرک در آن غوطه ور است، ω فرکانس طبیعی تیر و $H(x,t)$ فاصله گذرا بین نوک تیرک و نمونه است که برای حالتی که تیر موازی تیرک نباشد و با آن زاویه بسازد به صورت زیر بیان می‌شود.

$$H(x,t) = D + I_{tip} \cos \alpha + (L-x) \sin \alpha + y(x,t) \quad (10)$$

که در رابطه بالا I_{tip} ارتفاع پرآب، D فاصله تعادلی نوک تیرک نسبت به سطح نمونه و α زاویه قرارگیری تیرک نسبت به نمونه هستند.

۲-۲ مدل سازی نیروهای تقابل در مایع

نیروهای تقابل عمودی در محیط مایع در منطقه جاذبه‌ای و قبل از تماس با مدل نیروی دی ال وی او^۱ و در منطقه دافعه ای و بعد از تماس با مدل نیروی دی ام تی^۲ تقریب زده می‌شوند. برای مواردی که نوک تیرک کره ای شکل و نمونه مسطح است این نیرو به صورت زیر بیان می‌شود،

^۱ DLVO
^۲ DMT

۳- شبیه سازی و نتایج

معادله ارتعاش اجباری تیرک در غیاب نیروهای اندرکنش در محیط هوا به روش المان محدود به صورت زیر است،

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{F_e\} \quad (20)$$

که ماتریسهای $[M]$ ، $[K]$ و $[C]$ به ترتیب ماتریسهای جرم، سختی و دمپینگ تیر تیموشنکو هستند که محاسبه آنها برای هر المان به روش المان محدود است. $\{F_e\}$ ماتریس نیروی تحریک می باشد که به پایه تیرک وارد می شود و $\{d\}$ ماتریس تغییر مکان در گره های تیرک است که شامل تغییر مکانهای عمودی و زاویه ای هر گره از تیرک است.

$$\{F_e\} = A \omega^2 e^{i\alpha t} [M] \{1, 0, 1, 0, \dots\}^T \quad (21)$$

با فرض اینکه پاسخ سیستم به صورت زیر باشد،

$$\{d(t)\} = e^{i\alpha t} \{\phi\} \quad (22)$$

معادله حرکت برابر خواهد بود با،

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]) \{\phi\} = A \omega^2 [M] \{1, 0, 1, 0, \dots\}^T \quad (23)$$

در محیط مایع با وارد کردن نیروی هیدرودینامیکی به رابطه (۲۰)

معادله ارتعاش به صورت زیر در می آید [۲۶]،

$$(-\omega^2 [M + M_a] + i\omega [C + C_a] + [K]) \{\phi\} = A \omega^2 [M + M_a] \{1, 0, 1, 0, \dots\}^T \quad (24)$$

که دامنه فرکانسی پاسخ ارتعاشی برابر است با [۲۶]،

$$A \left[\frac{(\omega^2 [M + M_a] - i\omega [C_a]) \{1, 0, 1, 0, \dots\}^T}{-\omega^2 [M + M_a] + i\omega [C + C_a] + [K]} + 1 \right] \quad (25)$$

حال با در نظر گرفتن تیرک سیلیکونی و نمونه از جنس HOPG با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) پاسخ های فرکانسی در محیط مایع از روش المان محدود بررسی می شود.

$$G_{eff} = \left[\frac{(2-v_t)}{G_t} + \frac{(2-v_s)}{G_s} \right]^{-1} \quad (14)$$

که G_s و G_t به ترتیب مدولهای برش نوک تیرک و نمونه

هستند و f_c نیروی تماس عمودی و برابر است با،

$$f_c = \frac{4E_{eff} \sqrt{R_t}}{3} (a_0 - d)^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

برای حالتی که تیرک حول نقطه تعادل ارتعاش می کند نیروی

عمودی با یک فنر عمودی می توان خطی سازی کرد که در محیط مایع به صورت زیر تعریف می شود.

$$F_{int} = -K_n \Delta_n \quad (16)$$

$$K_n = \begin{cases} \frac{4\pi R_t \sigma_T \sigma_S e^{-\frac{D_0}{\lambda_D}} - AR_t}{\varepsilon \varepsilon_0 3D_0^3}; d \geq a_0 \\ 2E_{eff} \sqrt{R_t} (a_0 - D_0)^{\frac{1}{2}}; d < a_0 \end{cases}$$

و نیروی مماسی بین نوک تیرک و نمونه را نیز در حالتیکه

تیرک حول نقطه تعادل ارتعاش می کند با یک فنر مماسی می توان

خطی سازی کرد که برای نیروی مماسی از تئوری هرتز برای

محیط مایع استفاده می شود،

$$F_{tan} = -K_t \Delta_t \quad (17)$$

$$K_t = \begin{cases} 0 & d \geq a_0 \\ 8G_{eff} \left(\frac{3R_t f_c}{4E_{eff}} \right)^{\frac{1}{3}} & d < a_0 \end{cases}$$

در حالتیکه میکروسکوپ نیروی اتمی با نمونه موازی نباشد

Δ_t و Δ_n برابر خواهند بود با،

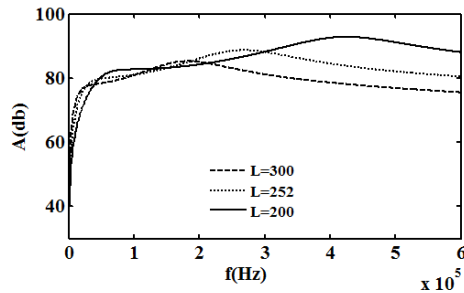
$$\Delta_n = d \cos \alpha - l_{tip} \theta \sin \alpha \quad (18)$$

$$\Delta_t = l_{tip} \theta \cos \alpha + d \sin \alpha$$

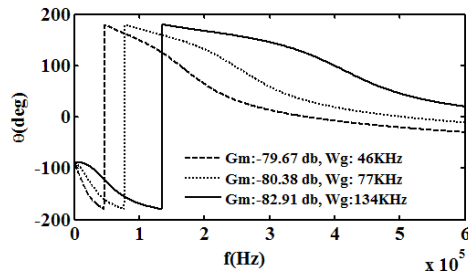
و ماتریس سختی برای آخرین المان محل اعمال نیرو برابر

خواهد با،

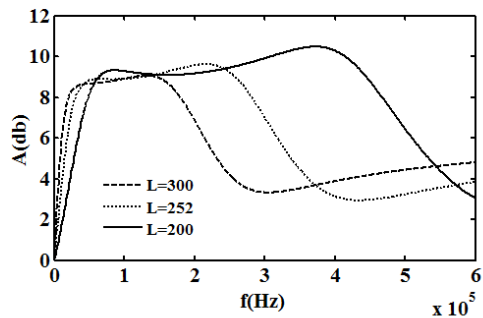
$$K = \begin{bmatrix} K_n \cos^2 \alpha + K_t \sin^2 \alpha & l_{tip} \cos \alpha \sin \alpha (K_t - K_n) \\ l_{tip} \cos \alpha \sin \alpha (K_t - K_n) & l_{tip}^2 (K_t \cos^2 \alpha + K_n \sin^2 \alpha) \end{bmatrix} \quad (19)$$



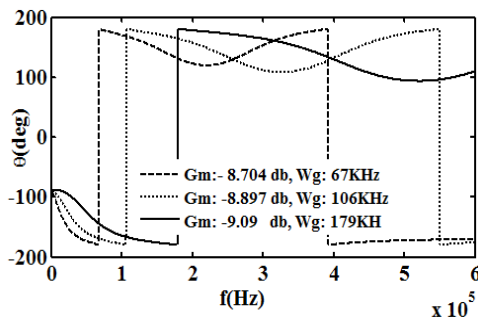
(الف) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



(ب) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



(ج) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان عمودی



(د) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان عمودی

شکل (۲) بررسی تاثیر طول تیرک بر پاسخ فرکانسی

در شکل (۳) با ثابت نگاه داشتن طول و عرض در حالتی که تیرک موازی با نمونه است، دامنه و فاز تغییر مکان عمودی و زاویه‌ای تیرک برای ضخامت‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با افزایش ضخامت، فرکانس تشدید و دامنه افزایش می‌یابند. بنابراین، کاهش ضخامت تیرک در طراحی باید مورد نظر قرار گیرد. ضمناً

جدول (۱) پارامترهای مربوط به تیرک سیلیکونی و نمونه بیولوژیکی از

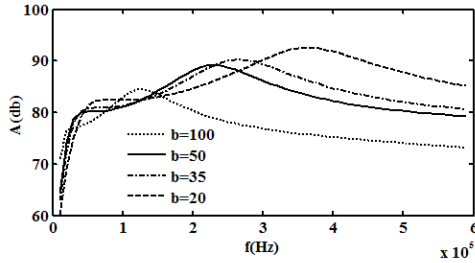
جنس HOPG [۱۹]

واحد	اندازه	پارامترهای مربوط به تیرک و نمونه
μm	۲۵۲	طول تیرک (L)
μm	۳۵	عرض تیرک (b)
μm	۲,۳	ضخامت تیرک (h)
μm	۱۰	طول پروب (I_{tip})
nm	۱۰	شعاع پروب (R_{tip})
kg / m^3	۲۳۳۰	چگالی تیرک (ρ)
kg / m^3	۱۰۰۰	چگالی آب (ρ_{water})
$x10^{-4} (kg / ms)$	۵۴/۸	لزجت آب (η_{water})
GPa	۲/۱۰	مدول الاستیسیته موثر (E_{eff})
GPa	۲/۴	مدول برشی موثر (G_{eff})
-	۳/۳۳	فاکتور کیفیت مود اول و دوم
-	۰/۵	فاکتور کیفیت مود سوم و بالاتر
$x10^{-2} J$	۲/۹۶	ثابت هم‌اگر آب

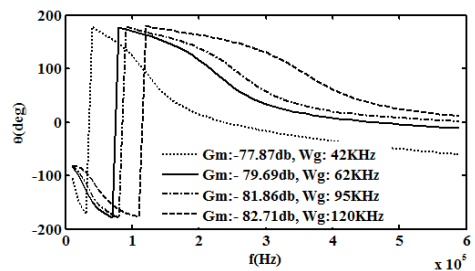
در شکل (۲) با ثابت نگاه داشتن عرض و ضخامت تیرک پاسخ‌های فرکانسی تغییر مکان عمودی و زاویه‌ای تیرک برای طول‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش طول، فرکانس تشدید کاهش می‌یابد که طبق رابطه (۶) بدلیل افزایش ضریب جرم افزوده است. ضمناً با افزایش طول، دامنه ارتعاش نیز کاهش می‌یابد. همانطور که قبلاً اشاره شد به دلیل جلوگیری از تخریب سلول‌های بیولوژی هنگام عکسبرداری توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، فرکانس پایین مطلوب است و به دلیل کاهش فضا در محیط مایع دامنه ارتعاشی باید در محدوده معینی قرار گیرد بنابراین افزایش طول تیرک در طراحی این مشکلات را مرتفع می‌سازد. ضمناً حاشیه بهره‌ها هم نشان می‌دهد که با افزایش طول تیرک، سیستم در حالت پایدارتری خواهد بود.

دمپینگ به کاهش دامنه ارتعاش منجر خواهد شد بنابراین افزایش عرض تیرک در طراحی باید لحاظ شود. ضمناً حاشیه بهره ها هم نشان می دهد که با افزایش پهنای تیرک، سیستم در حالت پایتتری خواهد بود.

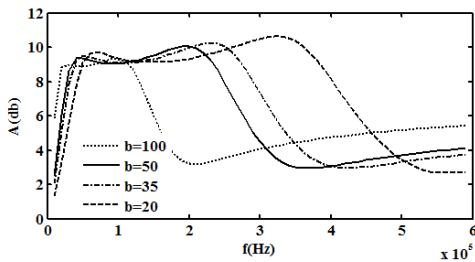
حاشیه بهره ها هم نشان می دهد که با کاهش ضخامت تیرک، سیستم در حالت پایتتری خواهد بود.



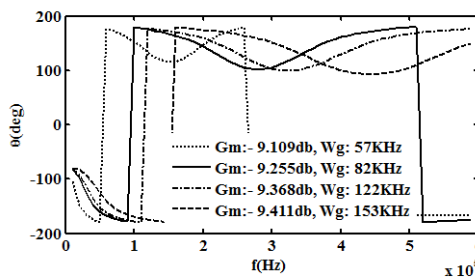
الف) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



ب) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



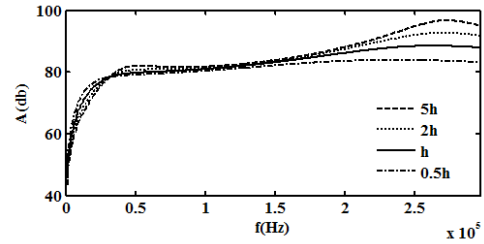
ج) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان عمودی



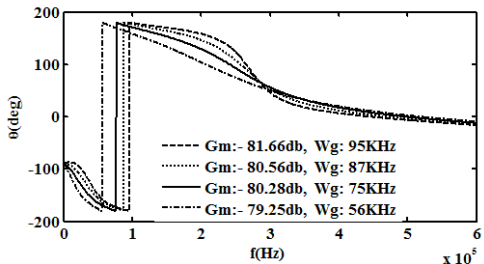
د) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان عمودی

شکل (۴) بررسی تاثیر عرض تیرک بر پاسخ فرکانسی

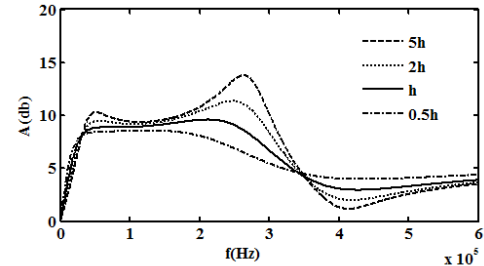
در شکل‌های (۵) و (۶) اثر تغییرات ارتفاع نوک تیرک در حالتیکه تیرک با نمونه زاویه ۴۰ درجه می سازد در دو ناحیه جاذبه و دافعه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش ارتفاع نوک، فرکانس تشدید اول تغییر مکان عمودی و زاویه‌ای در منطقه جاذبه‌ای افزایش می یابد ولی تغییرات در فرکانس دوم ملموس است. در منطقه دافعه‌ای



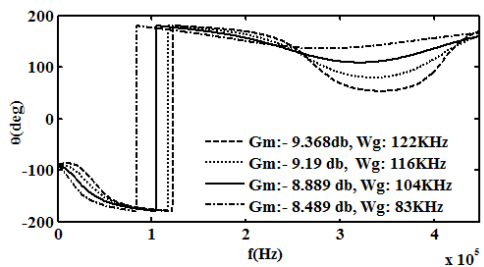
الف) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



ب) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



ج) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان عمودی

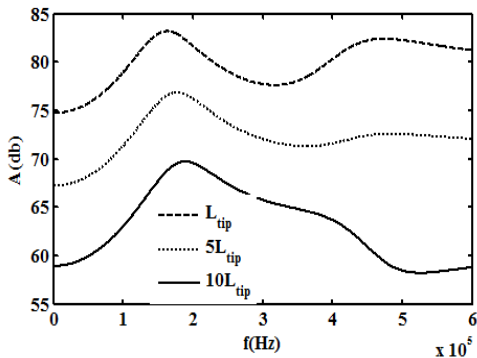


د) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان عمودی

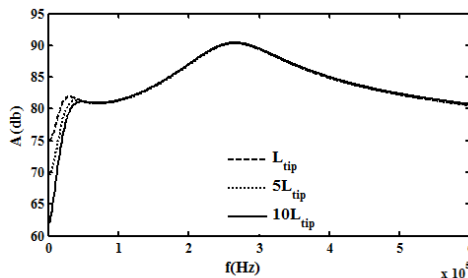
شکل (۳) بررسی تاثیر ارتفاع تیرک بر پاسخ فرکانسی

در شکل (۴) با ثابت نگاه داشتن طول و ضخامت در حالتی که تیرک موازی با نمونه است دامنه و فاز تغییر مکان عمودی و زاویه‌ای تیرک برای پهنای گوناگون مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با افزایش عرض فرکانس تشدید و دامنه هر دو کاهش می یابند با افزایش پهنای تیرک جرم افزوده و ضریب دمپینگ هر دو افزایش می یابند که افزایش جرم افزوده دلیلی بر کاهش فرکانس تشدید و افزایش ضریب

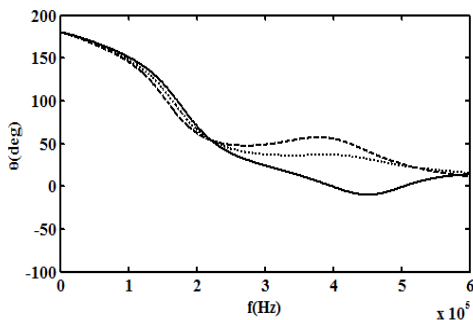
تغییرات فرکانس تغییر مکان عمودی بسیار ناچیز است ولیکن در تغییر مکان زاویه‌ای کاهش دامنه و افزایش فرکانس تشدید در اثر افزایش ارتفاع نوک کاملاً آشکار است.



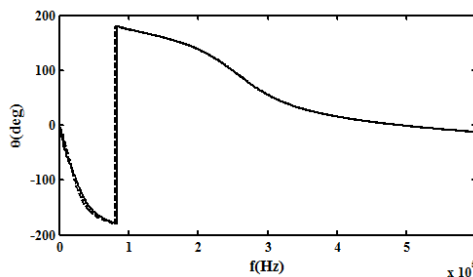
(الف) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



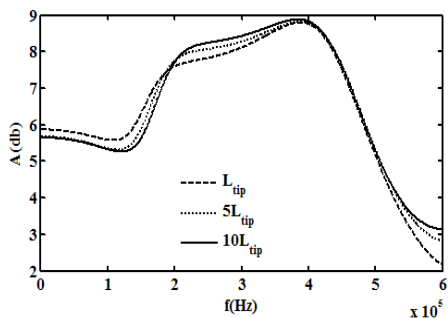
(الف) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



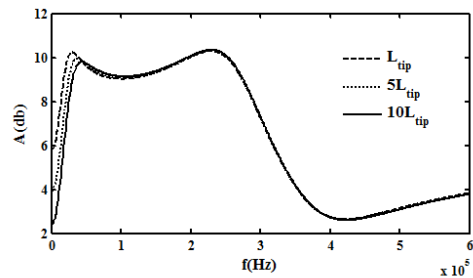
(ب) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



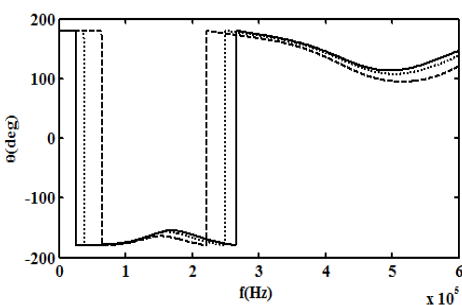
(ب) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



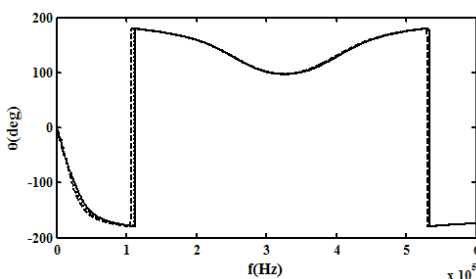
(ج) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان عمودی



(ج) نمودار دامنه- فرکانس تغییر مکان عمودی



(د) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان عمودی



(د) نمودار فاز- فرکانس تغییر مکان عمودی

شکل (۶) بررسی تاثیر ارتفاع نوک تیرک بر پاسخ فرکانسی با در نظر گرفتن

$$\alpha = 40^0$$

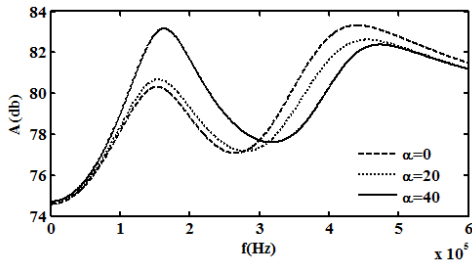
نیروهای تقابل در ناحیه دافعه‌ای و زاویه قرارگیری

در شکل‌های (۷) و (۸) اثر تغییرات زاویه قرارگیری تیرک نسبت به نمونه در دو منطقه جاذبه‌ای و دافعه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش زاویه، فرکانس تشدید اول تغییر مکان عمودی و زاویه‌ای در

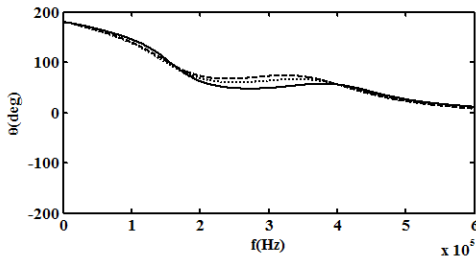
شکل (۵) بررسی تاثیر ارتفاع نوک تیرک بر پاسخ فرکانسی با در نظر گرفتن

$$\alpha = 40^0$$

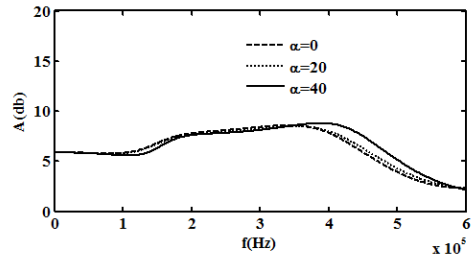
نیروهای تقابل در منطقه جاذبه‌ای و زاویه قرارگیری



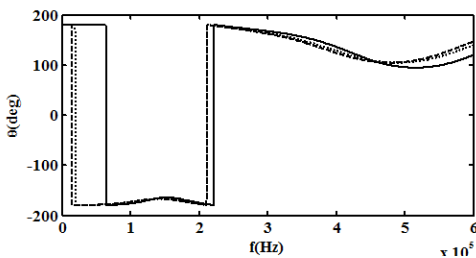
الف) نمودار دامنه-فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



ب) نمودار فاز-فرکانس تغییر مکان



ج) نمودار دامنه-فرکانس تغییر مکان عمودی



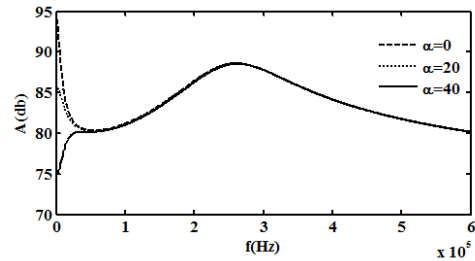
د) نمودار فاز-فرکانس تغییر مکان عمودی

شکل (۸) بررسی تاثیر زاویه قرارگیری تیرک بر پاسخ فرکانسی با در نظر

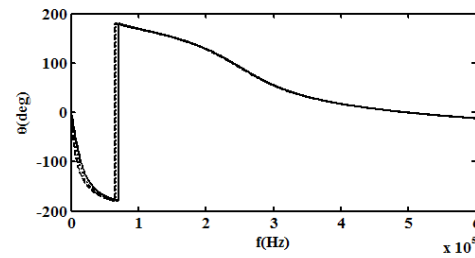
گرفتن نیروهای تقابل در منطقه دافعه‌ای

در نهایت تحلیل حساسیت به روش سوپول که یکی از روشهای آماری معروف برای مدل‌های ریاضی غیر خطی است برای دستیابی به طراحی بهینه سیستم انجام شده است [۲۵]. از این روش به منظور بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای هندسی بر فرکانس تشدید و دامنه ارتعاش وقتی دیگر پارامترهای هندسی نیز توأمآ تغییر می‌کنند استفاده شده است. عموماً دو روش برای تحلیل حساسیت وجود دارد در روش اول (Local SA) تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر روی

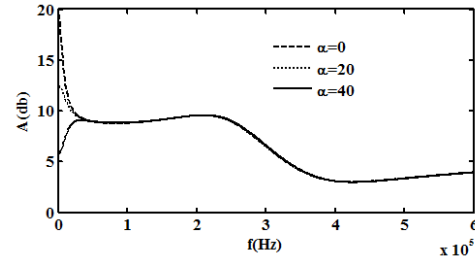
منطقه جاذبه‌ای اندکی افزایش می‌یابد ولیکن دامنه ارتعاش کاهش خواهد داشت و تغییرات در فرکانس و دامنه دوم مشاهده نمی‌شود. در منطقه دافعه‌ای تغییرات فرکانس تشدید تغییر مکان عمودی و چرخشی بسیار ناچیز است ولیکن در تغییر مکان زاویه‌ای در مود اول افزایش دامنه و در مود دوم کاهش دامنه به دلیل افزایش زاویه کاملاً مشهود می‌باشد.



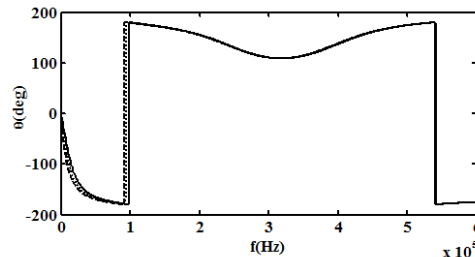
الف) نمودار دامنه-فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



ب) نمودار فاز-فرکانس تغییر مکان زاویه‌ای



ج) نمودار دامنه-فرکانس تغییر مکان عمودی



د) نمودار فاز-فرکانس تغییر مکان عمودی

شکل (۷) بررسی تاثیر زاویه قرارگیری تیرک بر پاسخ فرکانسی با در نظر گرفتن

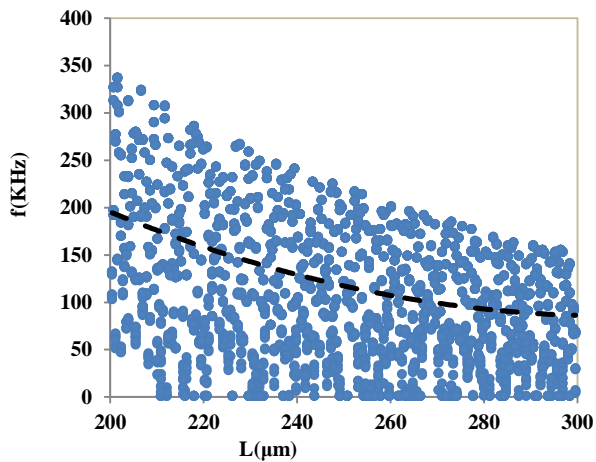
نیروهای تقابل در منطقه جاذبه‌ای

خروجی سیستم در حالیکه دیگر پارامترهای ورودی ثابت هستند بررسی می‌شود ولیکن در روش (Global SA) کلیه پارامترهای ورودی توأم تغییر می‌کنند و اثر هر یک بر خروجی بررسی می‌شود. در این قسمت بازه تغییرات هر یک از پارامترهای هندسی باید مشخص گردد که جدول (۲) این بازه ها را نشان می‌دهد، سپس، روش نمونه گیری سوپول انجام شده است که ۶۱۴۵ دسته داده تصادفی از بازه مشخص شده در جدول (۲) را تولید کرده است، سپس، فرکانس اول تشدید و دامنه اول تغییر مکان عمودی برای هر دسته داده تصادفی محاسبه گردیده است. در شکل (۹) تاثیر طول تیرک بر فرکانس تشدید و دامنه تغییر مکان عمودی با روش سوپول مورد بررسی قرار گرفته است که همانند شکل (۲) نشان دهنده این مهم می‌باشد که با افزایش طول، فرکانس تشدید و دامنه هر دو کاهش می‌یابند. در شکل (۱۰) تاثیر ضخامت تیرک بر فرکانس تشدید و دامنه تغییر مکان عمودی با روش سوپول مورد بررسی قرار گرفته است که همانند شکل (۲) نشان دهنده این مهم است که با افزایش ضخامت فرکانس تشدید و دامنه هر دو کاهش می‌یابند.

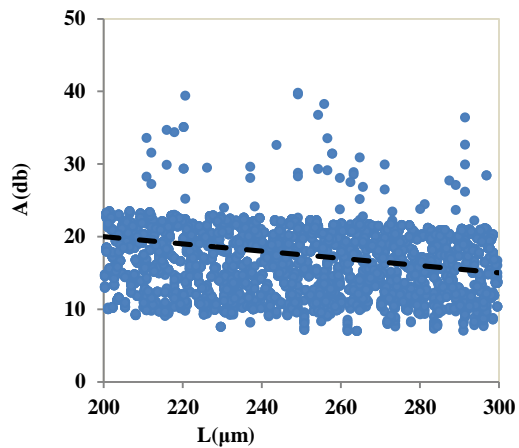
جدول (۲) بازه تغییرات پارامترهای هندسی

پارامترهای مربوط به تیرک و نمونه	اندازه	واحد
طول تیرک (L)	۲۰۰-۳۰۰	μm
عرض تیرک (b)	۲۰-۱۰۰	μm
ضخامت تیرک (h)	۱/۱۵-۱۱/۵	μm
طول پرآب (l _{tip})	۱۰-۱۰۰	μm
شعاع پرآب (α_{tip})	۰-۴۰	deg

در شکل (۱۱) تاثیر پهنای تیرک بر فرکانس تشدید و دامنه تغییر مکان عمودی با روش سوپول مورد بررسی قرار گرفته است که همانند شکل (۴) نشان دهنده این مهم است که با افزایش پهنای تیرک فرکانس تشدید و دامنه هر دو کاهش می‌یابند. در شکل (۱۲) تاثیر طول نوک تیرک بر فرکانس تشدید و دامنه تغییر مکان عمودی با روش سوپول مورد بررسی قرار گرفته است که همانند شکل (۵) نشان دهنده این است که با افزایش طول نوک فرکانس تشدید اول اندکی افزایش و بالعکس دامنه اول تغییر مکان عمودی کاهش می‌یابند. در شکل (۱۳) تاثیر زاویه قرارگیری تیرک بر فرکانس تشدید و دامنه تغییر مکان عمودی با روش سوپول مورد بررسی قرار گرفته است که همانند شکل (۶) نشان دهنده این مهم می‌باشد که با افزایش زاویه فرکانس تشدید اول افزایش و دامنه اول تغییر مکان عمودی کاهش می‌یابند. در نمودارهای (۱۴) درصد تاثیر پارامترهای هندسی در تغییر فرکانس تشدید اول و دامنه اول تغییر مکان عمودی نشان داده شده است آنها نشان دهنده این هستند که بیشترین حساسیت دامنه اول تغییر مکان عمودی نسبت به طول تیرک و کمترین حساسیت آن نسبت به طول نوک می‌باشد و در مورد فرکانس تشدید اول بیشترین حساسیت نسبت به ارتفاع تیرک و کمترین آن مجدداً نسبت به طول نوک می‌باشد.

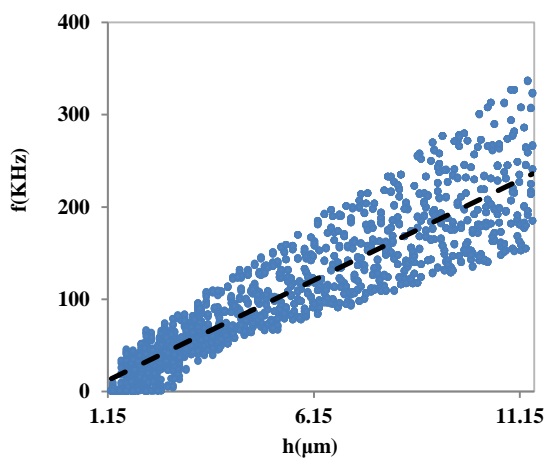


(ب) فاز

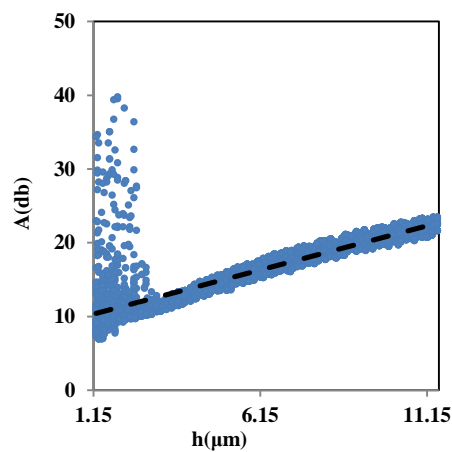


(الف) دامنه

شکل (۹) تحلیل حساسیت طول تیرک بر پاسخ فرکانسی مود اول تغییر مکان عمودی در منطقه جاذبه‌ای به روش سوبول

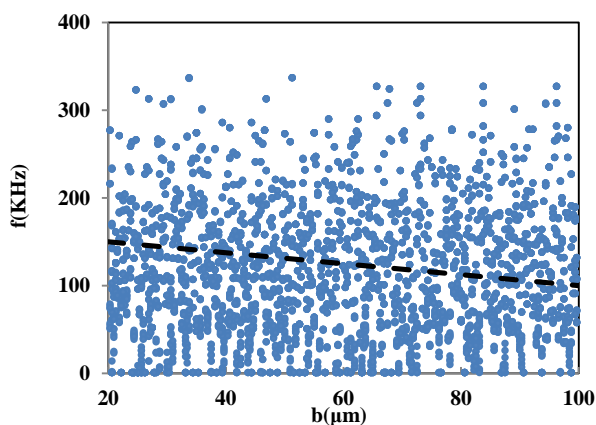


(ب) فاز

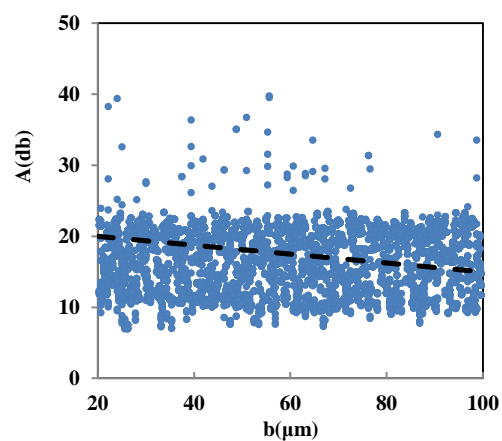


(الف) دامنه

شکل (۱۰) تحلیل حساسیت ضخامت تیرک بر پاسخ فرکانسی مود اول تغییر مکان عمودی در منطقه جاذبه‌ای به روش سوبول

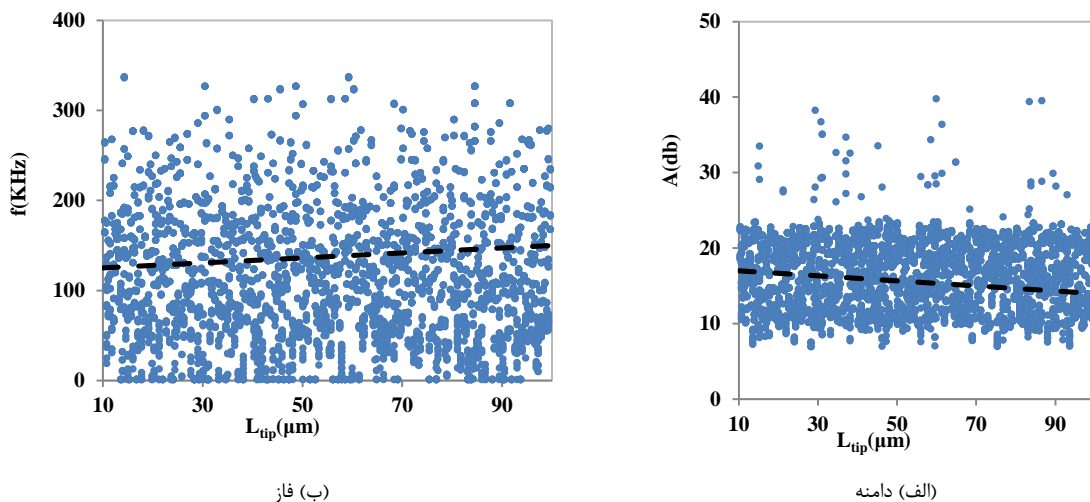


(ب) فاز

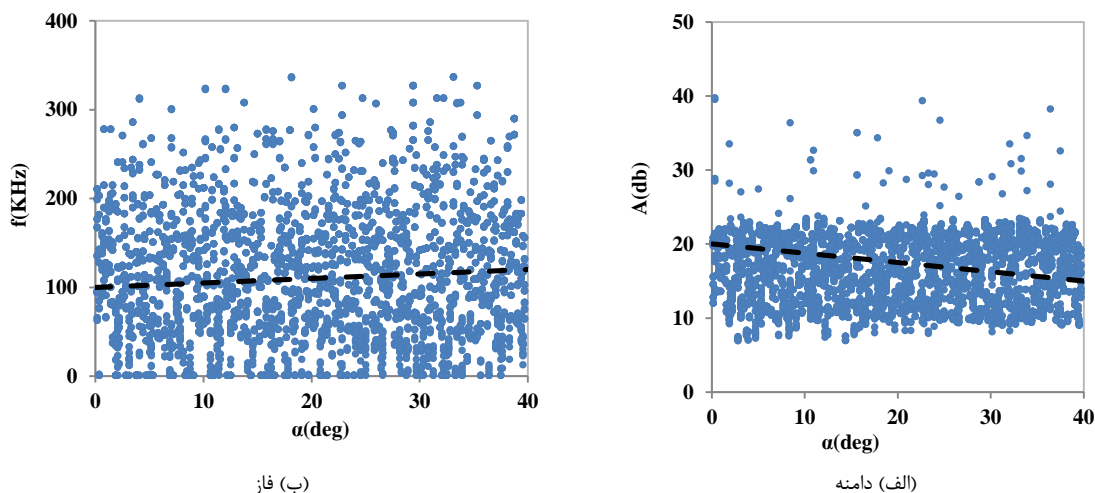


(الف) دامنه

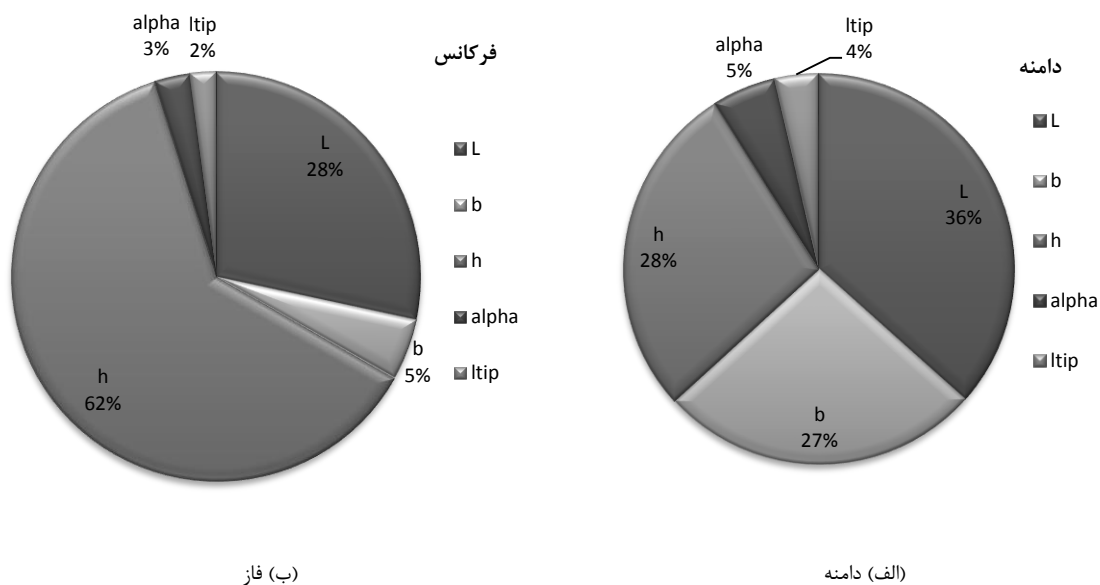
شکل (۱۱) تحلیل حساسیت پهنای تیرک بر پاسخ فرکانسی مود اول تغییر مکان عمودی در منطقه جاذبه‌ای به روش سوبول



شکل (۱۲) تحلیل حساسیت طول نوک تیرک بر پاسخ فرکانسی مود اول تغییر مکان عمودی در منطقه جاذبه‌ای به روش سوبول



شکل (۱۳) تحلیل حساسیت زاویه قرارگیری تیرک بر پاسخ فرکانسی مود اول تغییر مکان عمودی در منطقه جاذبه‌ای به روش سوبول



شکل (۱۴) درصد تاثیر پارامترهای هندسی در پاسخ فرکانسی

۴- جمع بندی

تحقیقات آتی در مورد تحلیل حساسیت فرکانس و دامنه ارتعاشات مودهای دوم و سوم نسبت به پارامترهای هندسی در طراحی و کاربرد میکروسکوپیهای نیروی اتمی دو مودی و چند مودی بسیار حائز اهمیت خواهند بود.

فهرست علائم

علائم یونانی	
η	لزجت سیال (kg /m.s)
ρ	چگالی تیرک (kg /m ³)
ρ_{liq}	چگالی مایع (kg /m ³)
$\phi(x,t)$	تغییر مکان زاویه ای تیر (rad)
ω	فرکانس طبیعی تیر (Hz)
A	دامنه ارتعاش تیر (nm)
A	سطح مقطع تیر (m ²)
A	ثابت همکار (J)
a_0	فاصله بین مولکولی (nm)
b	عرض تیرک (m μ)
C	ضریب دمپینگ تیر (kg/m.s)
C_{free}	ضریب دمپینگ آزاد (N.s/m)
C_l	ضریب دمپینگ محیط مایع (N.s/m)
C_{sq}	ضریب دمپینگ فیلم فشرده مایع (N.s/m)
D	فاصله تعادلی نوک و نمونه (nm)
E, E_{eff}	مدولهای الاستیسیته تیرک و موثر (GPa)
f_h	نیروی هیدرودینامیکی مایع (N)
F_{int}	نیروی تقابل (N)
G	مدول برشی (GPa)
h	ارتفاع تیرک (m μ)
l	ممان اینرسی تیر (m ⁴)
K	ضریب برش تیر تیموشنکو
K_t	سختی عرضی (N/m)
K_n	سختی عمودی (N/m)
L	طول تیرک (m μ)
L_{tip}	ارتفاع پرآب (m μ)
R	شعاع نوک تیرک (nm)
$y(x,t)$	تغییر مکان عرضی تیر (nm)

در این مقاله دینامیک میکروسکوپ نیروی اتمی مقطع مستطیلی با مدل تیر تیموشنکو که از لحاظ در نظر گرفتن تغییر شکل برشی و اینرسی چرخشی بسیار دقیق تر از مدل تیر اویلر برنولی است، در مود ضربه‌ای (تپینگ) در محیط مایع مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار در محیط مایع به دلیل نیروی هیدرودینامیکی و دیگر نیروهای تقابل کاملاً متفاوت از محیط هوا است.

در اکثر موارد فرکانسهای طبیعی در محیط مایع باید حتی الامکان پایین نگه داشته شود تا آسیب کمتری به نمونه های بیولوژیکی بزنند و حین آزمایش بتوان نمونه ها را زنده نگه داشت. همچنین، بدلیل فضای محدود توپوگرافی که در محیط مایع وجود دارد دامنه ارتعاش نیز به نسبت محیط های کاربری دیگر مانند هوا باید پایین باشد. بنابراین طراحی کانتیلور و پرآبی که نیازهای فوق الذکر را بتوانند برآورده سازد بسیار مهم است که با توجه به نتایج شبیه سازی و فرکانس تشدید و دامنه مورد قبول محدوده مطلوبی را برای پارامترهای هندسی می توان تعیین کرد. همانطور که از نتایج شبیه سازیهای انجام شده با نرم افزار سوپول مشخص شد. بیشترین حساسیت فرکانس طبیعی مود اول به ترتیب نسبت به ضخامت، طول، پهنای تیرک است و کمترین حساسیت نسبت به ارتفاع نوک تیرک و زاویه قرارگیری است. در حالیکه بیشترین حساسیت دامنه ارتعاشی مود اول به ترتیب نسبت به طول، ارتفاع و پهنای تیرک می- باشد. در این مورد نیز کمترین حساسیتها نسبت به ارتفاع نوک و زاویه قرارگیری است.

ضمناً، تغییر پارامترهای هندسی تیرک در محیط مایع به دلیل تغییر دادن ضریب جرم افزوده و ضریب دمپینگ محیط مایع تغییرات بیشتری را در پاسخ فرکانسی در مقایسه با محیط هوا ایجاد می کند.

تقدیر و تشکر

نتایج مندرج در این مقاله حاصل از طرح پژوهشی تحت عنوان "بررسی بهبود پاسخ میکروسکوپ نیروی اتمی چند فرکانسی (دو مودی و سه مودی) در محیط هوا و مایع در مقایسه با حالت تک مودی" می باشد که با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس انجام شده است.

مراجع

- [8] Lee S., Howell S., Raman A., Reifenberger R., Nonlinear dynamics of microcantilevers in tapping mode atomic force microscopy: A comparison between theory and experiment, *Physical Review B*, vol. 66, No. 11, 2002, pp. 115409.
- [9] Arinero R., L v que G., Vibration of the cantilever in force modulation microscopy analysis by a finite element model, *Review of scientific instruments*, vol. 74, No. 1, 2003, pp. 104-111.
- [10] Sadeghi A., Zohoor H., Nonlinear vibration of rectangular atomic force microscope cantilevers by considering the Hertzian contact theory, *Canadian Journal of Physics*, vol. 88, No. 5, 2010, pp. 333-348.
- [11] Hansma P., Cleveland J., Radmacher M., Walters D., Hillner P., Bezanilla M., Fritz M., Vie D., Hansma H., Prater C., Tapping mode atomic force microscopy in liquids, *Applied Physics Letters*, vol. 64, No. 13, 1994, pp. 1738-1740.
- [12] Putman C. A., Van der Werf K.O., De-Grooth B.G., N. F. Van Hulst, J. Greve, Tapping mode atomic force microscopy in liquid, *Applied Physics Letters*, vol. 64, No. 18, 1994, pp. 2454-2456.
- [13] Chen G., Warmack R., Huang A., Thundat T., Harmonic response of near-contact scanning force microscopy, *Journal of applied physics*, vol. 78, No. 3, 1995, pp. 1465-1469.
- [14] Chen G., Warmack R., Oden P., Thundat T., Transient response of tapping scanning force microscopy in liquids, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 14, No. 2, 1996, pp. 1313-1317.
- [15] Burnham N., Behrend O., Oulevey F., Gremaud G., Gallo P., Gourdon D., Dupas E., Kulik A., Pollock H., Briggs G., How does a tip tap?, *Nanotechnology*, vol. 8, No. 2, 1997, pp. 67.
- [16] Sader J.E., Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope,
- [1] Giessibl F.J., Forces and frequency shifts in atomic-resolution dynamic-force microscopy, *Physical Review B*, vol. 56, No. 24, 1997, pp. 16010.
- [2] San Paulo A., García R., Tip-surface forces, amplitude, and energy dissipation in amplitude-modulation (tapping mode) force microscopy, *Physical Review B*, vol. 64, No. 19, 2001, pp. 193411.
- [3] Rabe U., Janser K., Arnold W., Vibrations of free and surface-coupled atomic force microscope cantilevers: theory and experiment, *Review of Scientific Instruments*, vol. 67, No. 9, 1996, pp. 3281-3293.
- [4] Turner J.A., Hirsekorn S., Rabe U., Arnold W., High-frequency response of atomic-force microscope cantilevers, *Journal of Applied Physics*, vol. 82, No. 3, 1997, pp. 966-979.
- [5] Stark R.W., Schitter G., Stark M., Guckenberger R., Stemmer A., State-space model of freely vibrating and surface-coupled cantilever dynamics in atomic force microscopy, *Physical Review B*, vol. 69, No. 8, 2004, pp. 085412.
- [6] Butt H.J., Jaschke M., Calculation of thermal noise in atomic force microscopy, *Nanotechnology*, vol. 6, No. 1, 1995, pp. 1.
- [7] Rabe U., Turner J., Arnold W., Analysis of the high-frequency response of atomic force microscope cantilevers, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 66, 1998, pp. S277-S282.

- [26] Korayem M., Damircheli M., The effect of fluid properties and geometrical parameters of cantilever on the frequency response of atomic force microscopy, *Precision Engineering*, vol. 38, No. 2, 2014, pp. 321-329.
- [17] Y. Song, B. Bhushan, Finite-element vibration analysis of tapping-mode atomic force microscopy in liquid, *Ultramicroscopy*, vol. 107, No. 10, 2007, pp. 1095-1104.
- [18] Korayem M., Ebrahimi N., Nonlinear dynamics of tapping-mode atomic force microscopy in liquid, *Journal of Applied Physics*, vol. 109, No. 8, 2011, pp. 084301.
- [19] Lee H.L., Chang W.J., Sensitivity of V-shaped atomic force microscope cantilevers based on a modified couple stress theory, *Microelectronic Engineering*, vol. 88, No. 11, 2011, pp. 3214-3218.
- [20] Moosapour M., Hajabasi M.A., Ehteshami H., Frequency and sensitivity analysis of atomic force microscope (afm) cantilever considering coupled flexural-torsional vibrations, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, vol. 7, No. 3, 2012, pp. 1103-1115.
- [21] Timoshenko S., Goodier, *Theory of Elasticity, McGraw3 Iaill, New York*, vol. 1, No. 95, 1951, pp. 1.
- [22] Hosaka H., Itao K., Kuroda S., Damping characteristics of beam-shaped micro-oscillators, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 49, No. 1, 1995, pp. 87-95.
- [23] Hsu J.C., Lee H.L., Chang W.J., Flexural vibration frequency of atomic force microscope cantilevers using the Timoshenko beam model, *Nanotechnology*, vol. 18, No. 28, 2007, pp. 285503.
- [24] Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P., Effect of contact deformations on the adhesion of particles, *Journal of Colloid and interface science*, vol. 53, No. 2, 1975, pp. 314-326.
- [25] Saltelli A., Chan K., Scott EM: Sensitivity analysis, *Wiley*, vol. 79, 2000, pp. 80.
- Journal of applied physics*, Vol. 84, No. 1, 1998, pp. 64-76.

