

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## تحلیل و طراحی نانو حسگرهای بیومکانیکی بر اساس نانولوله های طلا

رضا حسینی آراء

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران

Email: HosseiniAra@pnu.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش بر اساس تحلیل دقیق ارتعاشی یک نانولوله طلا، نانوحسگری بیومکانیکی در ابعاد نانو طراحی شد تا بتواند بر اساس تغییرات فرکانس ارتعاشی به تشخیص ویروس های اطراف خود بپردازد. برای این منظور یک مدل نظری برای تحلیل ارتعاشات نانو لوله طلا مورد نظر جهت تشخیص نوع ویروس های جذب شده ارائه گردید. در این مدل، اثرهای ناموضعی و تنش سطحی نیز در تحلیل ارتعاشی نانوحسگر مورد محاسبه قرار گرفته است تا بتوان در مقیاس های بسیار کوچک، پاسخ های دقیقی تری از فرکانس تشدید نانو حسگر بیومکانیکی به دست آورد. دستاوردهای حاصل از این پژوهش می تواند در نسل جدید نانو حسگرهای بیومکانیکی جهت تشخیص ویروس ها بسیار مفید باشد.

### واژه های کلیدی

نانولوله طلا، نانو حسگر بیومکانیکی، تیر اویلر- برنولی، اثر ناموضعی، تنش های سطحی.

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## ۱. مقدمه

امروزه با کمک فن آوری نانو، پیشرفت های چشم گیری در زمینه تشخیص و درمان برخی بیماری ها ایجاد شده است. یکی از ابزارهایی که در این زمینه به سرعت در حال پیشرفت و توسعه است، نانوحسگرهای بیومکانیکی می باشد [۱]. در واقع عوامل بیماری زا مانند ویروس ها بر اساس جرم و ساختار متفاوتشان، دارای اثرهای منحصر به فردی بر روی نانوحسگرها می باشند. یکی از این اثرها، تغییر در فرکانس ارتعاشی تشدید نانوحسگرها می باشد. در این راستا بدون تردید ساختارهای نانو لوله ای شکل یکی از جذاب ترین نانو ساختارهایی هستند که توجه بیشتر پژوهشگران این رشته را به خود جلب کرده اند. کشف این نوع از نانو ساختارها در اواخر قرن بیستم، مرحله تازه ای از پیشرفت در زمینه فن آوری نانو بود [۲]. در این زمینه برخی محققان نیز به تحلیل ارتعاشات نانو لوله ها با در نظر گرفتن اثرهای ناموضعی در ابعاد نانو پرداختند [۳، ۴]. همچنین در تحقیق دیگری، کاربرد ساختارهای نانولوله ای در طراحی نانوحسگرهای بیومکانیکی مورد تحلیل قرار گرفت [۵].

این تحقیق می خواهد به بررسی این موضوع در ابعاد نانو و بر روی یک نانولوله طلا با در نظر گرفتن اثرهای گوناگون در ابعاد بسیار کوچک بپردازد و با یافتن تغییر در فرکانس ارتعاشی تشدید آن، نوع این عامل را بر اساس ساختار و جرم ویروس یا باکتری مورد نظر، شناسایی نماید. در این راستا محاسبه بسیار دقیق تغییر فرکانس ارتعاشی نانوحسگرهای زیستی، باعث عملکرد مناسب تر آن ها می گردد. از طرفی با توجه به این که تحلیل های مورد نظر در ابعاد نانو می باشد، مکانیک محیط های پیوسته به شکل کلاسیک آن دیگر پاسخ دقیقی ندارد و باید اثرهای ناموضعی مربوط به ابعاد بسیار کوچک نیز مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر تحلیل نانوحسگرها بر پایه تئوری ناموضعی ارینگن مورد بررسی قرار می گیرد. طبق این تئوری، تنش در هر نقطه از یک جسم جامد هوک، نه تنها به کرنش آن نقطه بلکه به کرنش در تمام نقاط جسم بستگی دارد [۶]. به این ترتیب در نتیجه اثرهای ناموضعی مربوط به نیروهای بین اتمی در معادلات اصلاح شده ظاهر می گردد. همچنین در مقیاس نانو به علت نسبت سطح به حجم بسیار بزرگ، اثرهای سطحی به وجود می آید که خود باعث تغییرات مهمی در ویژگی های فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی ماده می شوند. در نتیجه این اثر نیز در محاسبات دقیق نانو زیست حسگرها قابل چشم پوشی نمی باشد [۷].

## ۲. تحلیل ارتعاشات نانوحسگر

معادله دیفرانسیلی حاکم بر تیر اوپلر- برنولی با در نظر گرفتن اثر اندازه های کوچک و در غیاب نیروهای محوری به شکل زیر استخراج می گردد [۸]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q \right] = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q \quad (1)$$

که در این معادله  $E$  مدول یانگ و  $I$  ممان اینرسی سطح مقطع تیر است. بار گسترده سطحی نیز با  $q$  نشان داده می شود. همچنین در این معادله پارامتر  $m$  نمایش دهنده جرم تیر و ذرات روی آن می باشد که به صورت زیر تعریف می گردند:

$$m = \int_A \rho dA = \rho A + \frac{n_b m_b}{l} \quad (2)$$

در حالی که  $\rho$ ،  $A$  و  $l$  به ترتیب چگالی جرمی، مساحت سطح مقطع و طول نانو تیر است. همچنین  $m_b$  و  $n_b$  نیز به ترتیب جرم و تعداد ویروس های اضافه شده به نانو زیست حسگر می باشد. به علاوه، پارامتر ناموضعی برای محاسبه اثر ابعاد کوچک در تئوری ناموضعی از رابطه  $\mu = (e_0 l_i)^2$  به دست می آید که در آن،  $e_0$  و  $l_i$  به ترتیب ثابت ماده و طول مشخصه داخلی می باشند.

اکنون بر اساس فرض های انجام شده، معادله حاکم (۱) برای حالت ارتعاشات آزاد یک نانوتیر در غیاب نیروهای محوری، بارهای گسترده عرضی و اثر تنش های سطحی، به شکل زیر ساده سازی می گردد:

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \mu m \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3)$$

بر پایه معادله حاکم (۳)، به منظور تحلیل ارتعاشات آزاد نانوتیر در حالت ناموضعی، با استفاده از روش جداسازی متغیرها یک پاسخ برای خیز تیر در دوره‌ی زمانی دلخواه و برای ارضای شرایط مرزی دو سر گیردار به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$w(x, t) = \left( 1 - \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) e^{i\omega t} \quad (4)$$

که در این رابطه،  $w$  همان شکل مود و  $\omega$  فرکانس طبیعی ارتعاشات تیر است. همان طور که در رابطه (۴) مشاهده می‌شود، با توجه به شرایط مرزی دو سر گیردار، خیز و شیب تیر در دو انتهای تیر صفر خواهد بود. اکنون با ترکیب معادلات (۳) و (۴)، پاسخ بسته فرکانس ارتعاشی نانوتیر اویلر-برنولی با در نظر گرفتن اثر ناموضعی به شکل رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{\frac{EI \left( \frac{2n\pi}{l} \right)^4}{m + \mu m \left( \frac{2n\pi}{l} \right)^2}} \quad (5)$$

همان طور که پیشتر نیز گفته شد، دومین اثری که باید در تحلیل ارتعاشات نانوتیرها مورد نظر قرار گیرد، اثر تنش‌های سطحی در مقیاس نانو می‌باشد. حال آن که پاسخ ارتعاشی به دست آمده در معادله (۷) در غیاب این اثر می‌باشد. برای این منظور کافی است در معادله حاکم (۱)، بار گسترده سطحی  $q$  به شکل  $q(x, t) = H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$  تعریف گردد که در این رابطه،  $H$  پارامتر ثابتی است و با توجه به شکل سطح مقطع دایره‌ای در نانو لوله‌های سیلیکونی، به صورت  $H = 2\tau_0 D$  به دست می‌آید [۷]. همچنین منظور از  $D$  قطر و  $\tau_0$  ثابت تنش سطحی نانو لوله سیلیکونی مورد نظر می‌باشد. به این ترتیب، با در نظر گرفتن اثر تنش‌های سطحی در سختی خمشی تیر در معادله (۱)، شکل کامل معادله حاکم بر ارتعاشات یک نانولوله به صورت رابطه (۶) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( -EI^* \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ -2\tau_0 D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right] + 2\tau_0 D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (6)$$

در این رابطه سختی خمشی موثر در رابطه (۶) با در نظر گرفتن اثر تنش‌های سطحی به شکل  $EI^* = E \times \frac{\pi D^4}{64} + E^s \times \frac{\pi D^3}{8}$  تعریف می‌شود و منظور از پارامتر  $E^s$  در این معادله، مدول یانگ سطحی است که به جنس جسم بستگی دارد [۷]. اکنون با ترکیب معادلات (۴)، (۶) و جای‌گذاری رابطه سختی خمشی موثر، پاسخ بسته و کامل فرکانس ارتعاشی یک نانو تیر اویلر-برنولی با در نظر گرفتن اثرهای ناموضعی و تنش سطحی به صورت معادله (۷) به دست می‌آید:

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

$$\omega = \left(\frac{2n\pi}{l}\right) \sqrt{\frac{\left(\frac{2n\pi}{l}\right)^2 \left(E \times \frac{\pi D^4}{64} + E^s \times \frac{\pi d^3}{8}\right) + 2\tau_0 D \left[1 + \mu \left(\frac{2n\pi}{l}\right)^2\right]}{m \left[1 + \mu \left(\frac{2n\pi}{l}\right)^2\right]}} \quad (7)$$

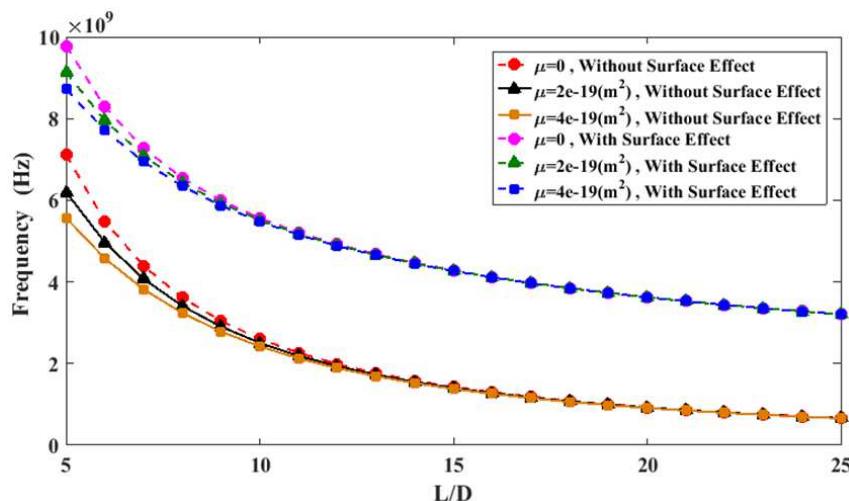
### ۳. نتایج عددی

برای بررسی پاسخ‌های ارتعاشی نانو زیست حسگر طلا بر اساس معادله (7) و محاسبه نتایج عددی، ویژگی‌های مکانیکی نانو لوله‌های طلا به صورت رابطه (8) فرض شده است [8]:

$$D = 1 \times 10^{-9} \text{ (m)}, E = 210 \text{ (GPa)}, E^s = 4.93 \text{ (N/m)}, \tau_0 = 1.33 \text{ (N/m)}, \rho = 19300 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (8)$$

### ۱.۳. اثرهای ناموضعی و تنش سطحی

نخست به بررسی اثرهای سطحی و ناموضعی در فرکانس ارتعاشی نانوحسگر پرداخته می‌شود. در این تحلیل پاسخ‌ها بر اساس تغییرات طول به قطر نانو لوله طلا به عنوان یک نانوحسگر در شکل (1) مشاهده می‌شود:



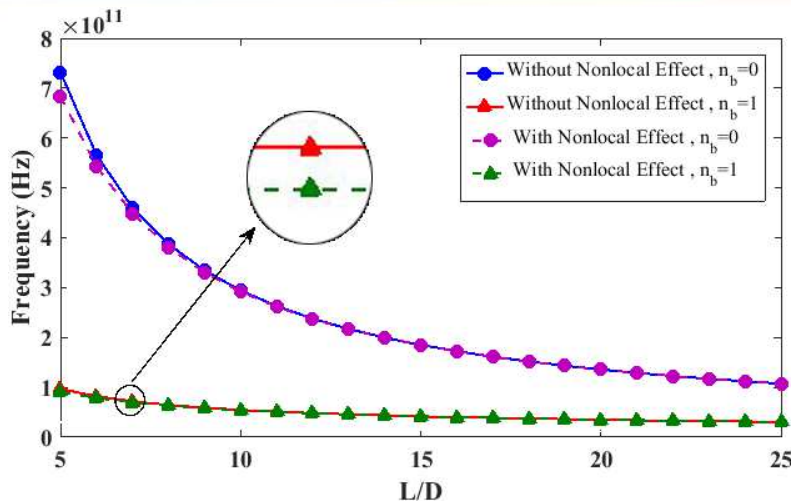
شکل ۱. اثرهای ناموضعی و سطحی بر روی تغییر فرکانس ارتعاشی نانوحسگر طلا.

از شکل (1) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت ابعادی طول به قطر نانو لوله، فرکانس ارتعاشی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار اثر تنش‌های سطحی، فرکانس ارتعاشی نیز افزایش می‌یابد اما با افزایش اثر ناموضعی، این فرکانس کاهش می‌یابد. در ضمن حالتی که در آن اثر ناموضعی اندازه‌های کوچک و اثر سطحی صفر فرض شده است، همان حالت کلاسیک تحلیل ارتعاشات یک تیر می‌باشد و مشاهده می‌گردد که با در نظر گرفتن اثرهای سطحی و چشم‌پوشی از اثر اندازه‌های کوچک، یک حد بالا برای پاسخ‌های فرکانس ارتعاشی به دست خواهد آمد. همچنین تاثیر تنش‌های سطحی و ناموضعی در فرکانس ارتعاشی نانوحسگر بر حسب تغییر جرم ویروس Parvoviridae با جرم  $m_b = 4.2445 \times 10^{-21}$  (kg) [9] به عنوان جرم اضافه شده در شکل (2) بررسی می‌شود:

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل ۲. اثرهای ناموضعی بر روی فرکانس ارتعاشی نانوحسگر طلا در حضور جرم ویروس اضافه شده

همان طور که در شکل (۲) مشخص است، می توان نتیجه گرفت که با افزایش جرم ویروس اضافه شده روی نانو لوله، فرکانس ارتعاشی کاهش می یابد. واضح است هرچه جرم ویروس اضافه شده افزایش یابد، نانو لوله سنگین تر شده و فرکانس ارتعاشی کوچکتری اتفاق می افتد. همچنین با افزایش مقدار اثر سطحی، فرکانس ارتعاشی نیز افزایش می یابد که علت آن افزایش سختی سیستم می باشد. در ضمن می توان مشاهده نمود که در مقایسه با شکل (۱)، اثرهای سطحی تاثیر بیشتری بر روی افزایش فرکانس نانو حسگر داشته اند. علت این پدیده این است که شکل (۱) در غیاب جرم ویروس های اضافه شده بود و به همین علت اثرهای سطحی، تاثیر کمتری بر روی نانو لوله طلا داشتند اما با اضافه شدن جرم ویروس ها، اثرهای سطحی نیز افزایش یافته و باعث افزایش بیشتر فرکانس سیستم شدند.

همچنین همانند شکل (۱) مشاهده می شود که با افزایش ضریب ناموضعی، باز هم فرکانس ارتعاشی نانو حسگر کاهش می یابد. در ضمن با چشم پوشی از اثرهای ناموضعی اندازه های کوچک و اثر سطحی، پاسخ حالت کلاسیک تحلیل ارتعاشات یک تیر ساده اوپلر-برنولی به همراه جرم های اضافه شده ویروس ها می باشد و مشاهده می گردد که حد بالای پاسخ فرکانس ارتعاشی نانو حسگر با در نظر گرفتن اثر سطحی و چشم پوشی از اثر اندازه های کوچک، به دست خواهد آمد.

### ۲.۳. تاثیر انواع ویروس ها

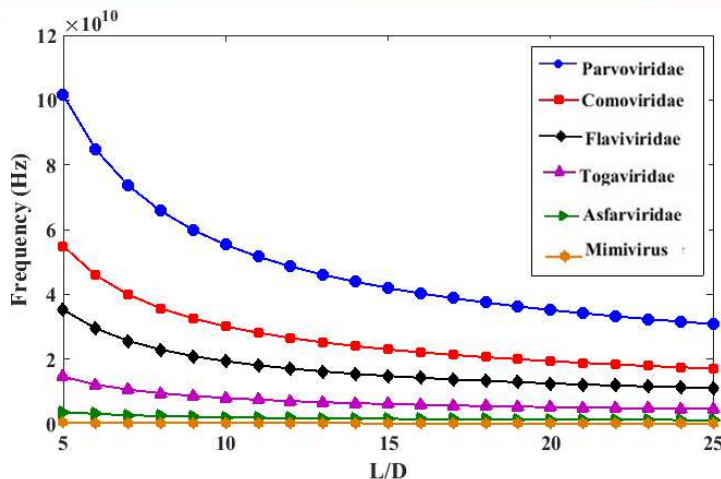
در ادامه مقدار فرکانس ارتعاشی نانوحسگر دو سر گیردار از جنس نانولوله طلا به نحوی محاسبه می شود که بر روی آن ویروس های مختلفی نیز قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده از مشخصات فیزیکی شش نوع ویروس مختلف [۹] در شکل (۳)، نتایج عددی استخراج می گردد.



# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل ۳. فرکانس ارتعاشی نانوحسگر طلا بر حسب تغییرات طول به قطر برای ویروس‌های متفاوت

همان طور که مشاهده می‌شود هر چه ویروس جرم بیشتری داشته باشد، فرکانس ارتعاشی نانوحسگر سیلیکونی کمتر می‌شود یعنی برای ویروس نوع Parvoviridae با کمترین جرم، بیشترین فرکانس ارتعاشی و برای ویروس نوع Mimivirus با بیشترین جرم، کمترین فرکانس ارتعاشی به وجود می‌آید. نتیجه دیگری که می‌توان از این نمودار به دست آورد مربوط به تاثیر ابعاد نانوحسگر بر تغییر فرکانس ارتعاشات آن است. در واقع با افزایش نسبت طول به قطر نانولوله سیلیکونی، فرکانس ارتعاشی آن نیز کاهش می‌یابد. همچنین شاید بتوان گفت مهمترین نتیجه این تحلیل در تفاوت معنی دار بین فرکانس‌ها در حضور ویروس‌های مختلف خواهد بود که این تغییرات فرکانس، اساس تشخیص نوع ویروس می‌باشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

از نتایج استخراج شده از تحقیق پیش رو می‌توان مشاهده نمود که با افزایش نسبت طول به قطر نانو لوله طلا به عنوان یک نانوحسگر، فرکانس ارتعاشی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار اثرهای سطحی، فرکانس ارتعاشی نیز افزایش می‌یابد اما با افزایش ضریب ناموضعی، این فرکانس کاهش می‌یابد. در ضمن با چشم‌پوشی از اثر ناموضعی اندازه‌های کوچک و اثر سطحی، همان حالت کلاسیک تحلیل ارتعاشات یک تیر اویلر-برنولی به دست می‌آید و مشاهده می‌گردد که با در نظر گرفتن اثرهای سطحی و چشم‌پوشی از اثر اندازه‌های کوچک، یک حد بالا برای پاسخ‌های فرکانس ارتعاشی به دست خواهد آمد. از سوی دیگر با اضافه شدن جرم ویروس‌ها، اثرهای سطحی نسبت به حالت بدون ویروس نیز افزایش یافته و باعث تغییر بیشتر فرکانس سیستم می‌شوند. در ادامه نیز نانو زیست حسگر مورد نظر در حضور شش نوع ویروس گوناگون از لحاظ ارتعاشی بررسی شد و مشاهده گردید که برای ویروس نوع پاروویریدائه بیشترین فرکانس ارتعاشی و برای میمی ویروس کمترین فرکانس ارتعاشی را خواهد داشت. نتایج به دست آمده از این مقاله می‌تواند در طراحی و تحلیل نانوحسگرهای زیستی، شیمیایی و مکانیکی بسیار مفید باشد.

#### منابع

- [۱] رضا حسینی آرا، محسن هادی، ۱۳۹۹. طراحی و تحلیل یک نانو زیست حسگر ارتعاشی بر پایه نانولوله کربنی برای تشخیص ویروس ها، نشریه علمی صوت و ارتعاش، دوره ۹، شماره ۱۷، صفحات ۶۹-۸۰.
- [2] Iijima, S., 1991. Helical micro tubes of graphitic carbon, Nature, 354, pp. 56-58.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری  
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [3] Amirian, B., Hosseini-Ara, R., Moosavi, H., 2012. Thermal vibration analysis of carbon nanotubes embedded in two-parameter elastic foundation based on nonlocal Timoshenko's beam theory, *Archives of Mechanics*, 64, pp. 581-602.
- [4] Lee, H.L., Chang, W.J., 2010. Surface effects on the frequency analysis of nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory, *J. Appl. Phys.*, 108, 093503.
- [5] Hosseini-Ara, R., Karamrezaei, A.H., Mokhtarian, A., 2020. Exact analysis of antibody-coated silicon biological nano-sensors (SBNSs) to identify viruses and bacteria, *Microsystem Technologies*, 26, pp. 509-516.
- [6] Eringen, A.C., 1983. On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves, *J. Appl. Phys.*, 54, pp. 4703-4710.
- [7] Amirian, B., Hosseini-Ara, R., Moosavi, H., 2014. Surface and thermal effects on vibration of embedded alumina Nanobeams based on novel Timoshenko beam model, *Appl. Math. Mech. Engl. Ed.*, pp. 875-886.
- [8] Olsson, P.A.T., Park, H.S., 2011. Atomistic study of the buckling of gold nanowires, *Acta Materialia*, 59, pp. 3883-3894.
- [9] Elishakoff, I., Challamel, N., Soret, C., Bekel, Y., Gomez, T., 2013. Virus sensor based on single-walled carbon nanotube: improved theory incorporating surface effects, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 371, pp. 1-14.