

بررسی اثر تغییر پارامترهای طراحی در شبیه سازی نانوحس گر شتاب سنج چندگانه پیزوالکتریک خازنی - مقاومتی

احمد مامندی^۱، معصومه اسدی^۲

am_2001h@yahoo.com

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پرند
۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پرند

چکیده

در این مقاله، طراحی و شبیه سازی نانوحس گر شتاب سنج ترکیبی پیزوالکتریک خازنی-مقاومتی با استفاده از نرم افزار مالتی فیزیک Comsol مورد بررسی قرار گرفته است. معادله حاکم بر خیز نانوحس گر یکسر درگیر با در نظر گرفتن نیروهای الکترواستاتیک و واندروالس-کازیمیر ارائه شده است. اثر در نظر گرفتن لایه پیزوالکتریک، پیزومقاومت و صفحه خازنی در رفتار خمشی نانوحس گر با اعمال ویژگی های فیزیکی لایه ها به کمک واسطه های ریاضی در محیط نرم افزار شبیه سازی شده و سپس تحلیل شده است. برای چهار مدل شبیه سازی شده، نتایج به دست آمده از تحلیل شامل محاسبه مقدار تغییرات مقاومت $\Delta R/R$ ، تغییرات پتانسیل الکتریکی $\Delta V/V$ پیزوالکتریک و تغییرات ظرفیت خازنی $\Delta C/C$ برحسب شتاب، توزیع تنش فون مایرز به ازای شتاب های مختلف و مقایسه بیشینه مقدار تنش با تنش تسلیم حس گر، توزیع خیز بر اساس شتاب وارد شده به نانوحس گر، تحلیل خستگی و تعیین شکل مودها و فرکانس های طبیعی نانوحس گر برای حصول اطمینان از کارکرد مناسب آن ارائه شده اند.

واژگان کلیدی: نانوحس گر شتاب سنج، نانوحس گر پیزوالکتریک خازنی-مقاومتی، نرم افزار کامسول.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۲/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۹/۲۶

۱ - مقدمه

یکی از تکنولوژی‌های مطرح در زمینه کوچک‌سازی حس‌گرهای شتاب‌سنج، تکنولوژی^۱ NEMS است به طوری که بتوان به کمک حس‌گرهایی با ابعاد کوچک‌تر از مقیاس میکرومتر، حساسیت بالاتر، نویزپذیری پایین و توان مصرفی کمتر را بر پایه این تکنولوژی تولید نمود. شتاب‌سنج NEMS با حساسیت بالا برای سیستم‌های کنترل و هدایت نسل جدید تجهیزات آزمایش روتور به عنوان proximeter بسیار دقیق در وسایل اندازه‌گیری ارتعاشات یا تاقان‌های تجهیزات دوار، تثبیت کننده سکو فضاپیماها و ماهواره‌های در حال چرخش در مدار سیارات، سیستم ناوبری، هدایت و کنترل شناورهای سطحی و زیر سطحی مانند زیردریایی‌های کوچک اکتشافی شامل بازوهای رباتیکی با دقت عملیاتی بالا در عمق زیاد در دریاها و اقیانوس‌ها و سیستم‌های موقعیت‌یاب زیر سطحی برای زیردریایی‌های اتمی و اژدرهای سریع و هواپیماهای جنگنده مافوق صوت پیشرفته، موشک‌های کروژ و بالستیک نقطه‌زن مورد توجه بسیار زیاد در صنایع نظامی و غیر نظامی دریایی و هوافضایی بوده و در حال توسعه می‌باشند.

با کاهش ابعاد در مقیاس نانو پدیده‌های مختلفی ظاهر می‌گردد که از جمله آن می‌توان نیروهای بین مولکولی را نام برد. نیروهای بین مولکولی برحسب فاصله اولیه بین یک تیر و یک صفحه بر دو نوع کازیمیر و واندروالس می‌باشد. اگر این فاصله کمتر از ۱۰ nm باشد، نیروهای واندروالسی و اگر بیشتر از آن باشد نیروهای کازیمیر بر تیر اعمال می‌شوند.

رضانی و هم‌کارانش [۱]، در سال ۲۰۰۷، ناپایداری استاتیکی و دینامیکی یک نانوتیر یکسر گیردار تحت تاثیر جریان مستقیم اعمالی و ناگهانی با استفاده از نظریه غیرکلاسیک تنش کوپل اصلاح شده در حضور اثرات تنش سطحی را با استفاده از روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند. تادی و هم‌کارانش [۲]، در سال ۲۰۱۱، ناپایداری pull-in و اثر اندازه را بر روی یک تیر نانو یکسر گیردار تحت اثر نیروی الکترواستاتیکی و نیروهای بین مولکولی (نیروی کازیمیر و واندروالس) با استفاده از نظریه گرادیان کرنش مورد مطالعه قرار داد. با استفاده از روش تبدیل تفاضلی و روش عددی معادلات تفاضلی حاکم بر سیستم حل شده و پارامترهای پایه برای طراحی مهندسی در مقیاس نانو همانند

خیز بحرانی انتهای تیر و ولتاژ pull-in محاسبه شده‌است. در سال ۲۰۱۳، کوکا و سودانو [۳]، با استفاده از نانوسیم شتاب‌سنج با حساسیت بالا در کاربرد برداشت انرژی ساختند. در سال ۲۰۱۵، مهران و مهاجرزاده [۴]، نانوساختاری برای شتاب‌سنج خازنی سیلیکونی با حساسیت بالا ارائه نمودند. کیوانی و خرسندی [۵]، در سال ۲۰۱۶، برای دو نوع مختلف نانوشتاب‌سنج از نوع پدالی و دو صفحه‌ای تحت نیرو و شتاب با استفاده از نظریه تنش کوپل با توجه به اثرات اندازه و تاثیر نیروی کازیمیر اثر pull-in را بررسی نمودند. جهت بررسی بیشتر کارهای انجام شده در زمینه میکرو و نانوحس‌گرها به مراجع [۶-۱۰] ارجاع داده می‌شود.

در سال ۲۰۱۸، حق [۱۱]، با معرفی نمونه هایی از ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک جاذب انرژی در مقیاس میکرو و نانو، کاربرد آنها در پایش و ارزیابی سلامت در حوزه مهندسی پزشکی را معرفی نمود. همچنین، در سال ۲۰۱۹، سانگ و همکارانش [۱۲]، تحلیل نظری نانو سازه به شکل میله پیزوالکتریک جاذب انرژی را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۹، پارک و همکارانش تحلیل و کاربرد یک نانوتیر پیزوالکتریک جاذب انرژی در برداشت انرژی ناشی از ارتعاش نانوتیر را مطالعه نمودند.

از کارهای مورد بررسی مشاهده می‌گردد که تاکنون در خصوص تلفیقی از این نوع شتاب‌سنج‌ها با به‌کارگیری همزمان چند نوع لایه برای بالابردن دقت و حساسیت نانوحس‌گر شتاب‌سنج یکسر درگیر ایده‌ای مطرح نگردیده و شبیه‌سازی و طراحی پیشنهادی برای آن صورت نگرفته‌است. با توجه به این که تاکنون در خصوص نانوشتاب‌سنج‌ها به نحوی که از چند مدل مختلف ترکیبی در یک سازه استفاده نشده این ایده از کاربرد نانوحسگر پیزوالکتریک در پژوهش کنونی می‌تواند به عنوان نوآوری جدیدی در این زمینه باشد. در پژوهش کنونی، مدل حسگر شامل یک نانوحسگر یکسر گیردار از جنس سیلیکان و با لایه نشانی از نوع فلزی که هنگام خم شدن ظرفیت خازن تغییر نموده و با تغییر مقدار ظرفیت خازنی ΔC می‌توان مقدار خمش را تعیین نمود.

با محاسبه تغییر در ظرفیت خازنی می‌توان الگوی خمش و مقدار آن را به دست آورد. لایه‌ای از پیزوالکتریک در قسمت درگیر در زیر تیر و لایه‌ای از پیزومقاومت در بالای تیر قرار می‌گیرد. هنگام خم شدن تیر با فشار بر لایه‌ها و ایجاد ولتاژ

¹Nano Electro Mechanical System (NEMS)

سمت چپ آن، t زمان، $w = w(x, t)$ خیز مکانی-زمانی (نانوتیر به عنوان الکتروود متحرک) که جهت مثبت آن به سمت پایین می باشد به ازای ولتاژ معین، E مدول یانگ، ρ چگالی ماده، A مساحت سطح مقطع تیر به طول L عرض b و ضخامت h و I ممان اینرسی دوم سطح مقطع تیر $(I=1/12bh^3)$ می باشد. همچنین، نیروی الکترواستاتیک اعمال شده به نانوتیر و F_{vdw} و $F_{casimir}$ نیروهای بین مولکولی و اندروالس و کازیمیر به شکل زیر تعریف می شوند [۹ و ۱]:

$$F_{elec} = \frac{\epsilon_0 b V^2}{2(g-w)^2} \left(1 + 0.65 \frac{g-w}{b} \right), \quad (2)$$

$$F_{vdw} = \frac{\bar{A}b}{6\pi(g-w)^3}, F_{casimir} = \frac{\pi^2 \bar{h}bc}{240(g-w)^4},$$

که در آن، $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$ ضریب گذردهی الکترون در خلا، V ولتاژ اعمالی به تیر، g فاصله اولیه بین تیر و الکتروود پایینی آن، \bar{A} مقدار ثابت هاماکر، $\bar{h} (=h/2\pi)$ ثابت کاهش یافته پلانک که در آن $h = 1.055 \times 10^{-34} Js$ با جایگذاری روابط (۲) در رابطه (۱)، معادله غیرخطی حاکم بر جابجایی عرضی نانوتیر یکسر گیردار به دست می آید. شرایط مرزی و شرایط اولیه نانوتیر حاکم بر مسئله به صورت زیر می باشند

$$w(x, t) = \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} = 0 \quad \text{در } x = 0 \quad (3)$$

$$EI \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^3} = \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad \text{در } x = L$$

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

در این پژوهش، چون ابعاد در نظر گرفته شده برای نانوتیر بیشتر از 20 nm است تنها نیروی کازیمیر در نظر گرفته شده است [۷-۵]. با تغییر متغیر $v(x, t) = \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2}$ معادله تفاضلی درجه چهار حاکم بر تیر اویلر-برنولی در رابطه (۱) به دو معادله تفاضلی درجه دو قابل حل در نرم افزار Comsol به همراه شرایط مرزی در واسط (ماژول) معادلات PDE به صورت زیر تبدیل می گردد

$$EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = f(w), EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = E Iv \quad (5)$$

$$w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \text{در } x = 0, \quad (6)$$

$$v = \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \text{در } x = L$$

این معادلات توسط فیزیک Mathematic در نرم افزار Comsol جهت به دست آوردن رفتار خمشی تیر وارد می گردد. لازم به ذکر است که شکل کلی معادله ورودی در معادلات PDE در محیط نرم افزار Comsol به صورت زیر است.

V لایه پیزوالکتریک ولتاژ را نشان می دهد و همچنین با تغییر مقاومت لایه پیزورزیستور ΔR مشخص می گردد. سپس، با داشتن این تغییرات می توان جابجایی را مشخص نمود.

با تلفیق این سه خروجی می توان بهترین وضعیت نانوحسگر شتابسنج را به دست آورد. در نانوحسگرهای شتابسنج چندگانه، تلفیقی از اجزای خازنی، پیزوالکتریک و پیزومقاومت استفاده می گردد. با استفاده از معادلات این مدل شتابسنجها و بکارگیری فیزیکی برای هر کدام به طور جداگانه این نوع شتابسنج را می توان در محیط نرم افزار اجزای محدود Comsol مدل سازی ریاضی و سپس تحلیل نمود.

اهدافی که از شبیه سازی چهار مدل نانوحسگر در این پژوهش مد نظر قرار گرفته اند عبارتند از الف- مدل سازی و شبیه سازی ریاضی چهار مدل نانوحسگر شتابسنج چندگانه پیزوالکتریک خازنی-پیزومقاومتی با استفاده از نرم افزار Comsol Multiphysics، ب- تحلیل نتایج و سپس بررسی تغییر پارامترهای موثر در طراحی شامل محاسبه مقدار تغییرات مقاومت $\Delta R/R$ بر حسب شتاب، تغییرات پتانسیل الکتریکی $\Delta V/V$ حاصل از پیچ پیزوالکتریک بر حسب شتاب، تغییرات خازنی $\Delta C/C$ بر حسب شتاب، توزیع تنش فون مایز به ازای شتابهای مختلف و مقایسه بیشینه مقدار تنش با تنش تسلیم نانوحسگرها در چهار مدل، توزیع خیز بر اساس شتاب وارد شده به نانوحسگرها، تحلیل خستگی و عمر نانوحسگر و تعیین شکل مودها و فرکانسهای طبیعی نانوحسگر برای حصول اطمینان از کارکرد مناسب آن.

بنابراین با مقایسه مدل های ارائه شده در این مقاله (به عنوان ایده نمونه) و بررسی تغییرات پارامترهای هندسی و مواد سازنده لایه پیزوالکتریک می توان به مدل نانوحسگر ارتعاشی ای که دربرگیرنده شرایط مطلوب نظر طراح باشد دست یافت و آن را بسته به کاربرد و محدوده های کارکردی انتخاب نمود.

۲ - معادله دینامیکی حاکم بر نانوحسگر شتابسنج با تاثیر وجود لایه پیزوالکتریک و پیزومقاومت

معادله حاکم بر خیز نانوتیر یکسر درگیر اویلر-برنولی و در نظر گرفتن نیروهای بین مولکولی عبارت است از [۹]:

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = F_{elec} + F_{casimir} + F_{vdw} \quad (1)$$

که در آن x مختصات در راستای طول تیر با مبدا در انتهای

بکار رفته در تیر، روابط پیزوالکتریک به صورت زیر کاهش می یابد.

$$\sigma_{xx} = c_{11}\epsilon_{xx} - e_{31}E_z \quad (14)$$

$$\begin{Bmatrix} D_x \\ D_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_z \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & e_{15} \\ e_{31} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{xz} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

با صرف نظر نمودن از جابجایی الکتریکی در دو راستای x و y به دلیل نازکی لایه پیزوالکتریک، رابطه (۱۵) برای لایه پیزوالکتریک به صورت زیر بازنویسی می گردد.

$$D_z = \epsilon_{33} E_z - e_{31}\epsilon_{xx} \quad (16)$$

چون شارژ الکتریکی خارجی در حس گر وجود ندارد بنابراین، جابجایی الکتریکی در راستای z در حس گر صفر است، در نتیجه:

$$D_z = \epsilon_{33} E_z - e_{31}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x}\right) = 0 \quad (17)$$

که E_z و $\psi_x = \frac{\partial w}{\partial x}$ عبارت است از:

$$E_z = \frac{e_{31}}{\epsilon_{33}}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x}\right) \quad (18)$$

با قراردادن رابطه (۱۸) در رابطه (۱۴)، تنش در حس گر با رابطه زیر بیان می شود:

$$\sigma_{xx} = (c_{11} + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}})\left(\frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x}\right) \quad (19)$$

در شکل (۱)، هندسه تیر متشکل از لایه پیزوالکتریک نشان داده شده است. کار اصلی حس گر تبدیل تغییر شکل مکانیکی به ولتاژ است.

با بهره گیری از رابطه تجربی $E_i = \phi_i$ [۹] رابطه (۱۸) در راستای z به شکل زیر بازنویسی می گردد:

$$E_z = -\frac{e_{31}}{\epsilon_{33}}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x}\right) = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (20)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۲۰) در راستای z رابطه حاکم بر اختلاف پتانسیل الکتریکی حس گر در اثر کرنش مکانیکی عبارت است از:

$$V = \frac{1}{A} \int_A (\phi|_{z=z_3} - \phi|_{z=z_2}) dA = -\frac{e_{31}h_x}{\epsilon_{33}}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + h_m \frac{\partial \psi_x}{\partial x}\right) \quad (21)$$

در روابط بالا، تنش های موجود در لایه پیزوالکتریک بر حسب جابجایی ها و ثابت های الکتریکی به دست آمدند. بنابراین رابطه منتجه نیرو عبارت است از (H تابع هوی ساید است)

$$N_{xx} = \int_{z_3}^{z_2} \sigma_{xx} H dz, \quad H(x) = \begin{cases} 1; & 0 < x < 1 \\ 0; & x \leq 0, x \geq 1 \end{cases} \quad (22)$$

با جایگذاری رابطه (۱۹) در رابطه (۲۲) داریم:

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - au + \gamma) + \beta \nabla + au = f, \quad (Y)$$

$$u = [uu, vv]^T, \quad \nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

معادلات (۵) به شکل معادلات ماتریسی شامل دو معادله بر حسب v و w به صورت زیر نوشته می شوند.

$$\begin{bmatrix} \rho A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{bmatrix} + \nabla \begin{bmatrix} 0 & EI \\ EI & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -EI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(w) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

مقادیر پارامترهای ثابت Comsol شامل e_a و c و f جهت وارد نمودن در نرم افزار به صورت زیر هستند.

$$e_a = \begin{bmatrix} \rho A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} 0 & -EI \\ -EI & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$f(w) = \frac{\epsilon_a b V^2}{2(g-w)^2} \left(1 + 0.65 \frac{g-w}{b} \right) + \frac{\pi^2 \overline{hbc}}{240(g-w)^4}$$

شکل تانسوری (اندیسی) تنش ها و جابجایی الکتریکی در مواد پیزوالکتریک به صورت زیر می باشد [۹]

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} - e_{kij} E_k, \quad (10)$$

$$D_i = e_{ikl} \epsilon_{kl} - \epsilon_{ik} E_k \quad (11)$$

که σ_{ij} مولفه های تنش، ϵ_{kl} مولفه های کرنش، E_k شدت میدان الکتریکی، C_{ijkl} تانسور کش سانی ماده پیزوالکتریک در یک میدان الکتریکی ثابت، e_{kij} ثابت های کرنش پیزوالکتریک، ϵ_{ik} ثابت های دی الکتریک و D_i جابجایی الکتریکی می باشد. روابط (۱۰) و (۱۱) به شکل ماتریسی برای یک ماده پیزوالکتریک همسانگرد عرضی بدون داشتن تقارن به شکل زیر نوشته می شوند [۹].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{11}-c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yz} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{32} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{Bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ c_{12} & \epsilon_{22} & c_{13} \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yz} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

به دلیل تقارنی در ماده تنها ده ثابت مستقل وجود دارد که پنج ثابت مستقل مربوط به تانسور کش سانی ماده پیزوالکتریک، سه ثابت برای تانسور کرنش پیزوالکتریک و دو ثابت برای تانسور دی الکتریک است. برای لایه پیزوالکتریک

در نتیجه ماتریس Π تنها بر اساس سه ثابت مستقل π_{11} ، π_{12} و π_{44} به صورت زیر نوشته می شود [۱۱].

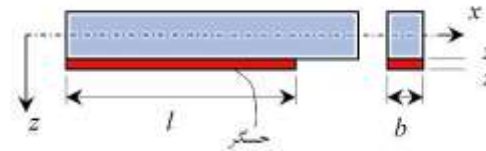
$$\Pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \quad (۳۰)$$

برای سیلیکون نوع p، کمیت ثابت π_{44} از نظر مقدار دو برابر مقادیر π_{11} یا π_{12} می باشد. مولفه π_{66} (که از نظر بزرگی برابر با π_{44} است) مولفه تنش برشی σ_{xy} را با مولفه غیر قطری $\Delta\rho_{xy}$ از ماتریس تغییر مقاومت ارتباط می دهد. همچنین، ارتباط $\Delta\rho_{xy}$ و مقدار جریان در راستای x به یک میدان الکتریکی القایی در راستای y و بالعکس را برقرار می سازد. در این پژوهش، یک ولتاژ پایه برابر ۱ V به پیرومقاومت اعمال می گردد.

تنش های برشی که ناشی از تغییر شکل تیر در اثر اعمال شتاب به آن می باشد در حضور پیرومقاومت بوجود می آیند. از طریق اثر پیرومقاومتی، این تنش های برشی باعث ایجاد یک میدان الکتریکی یا گرادیان پتانسیل عرضی در جهت جریان در در قطعه می گردند. واسط پیرومقاومت در نرم افزار Comsol روابط (۲۸) و (۲۹) را همراه با معادلات ساختار مکانیکی حل می کند. در این مدل از واسط (ماژول) Piezoresistance Boundry Currents برای حل معادلات سازه استفاده شده و همزمان اقدام به حل معادلات الکتریکی حاکم بر لایه نازک در مدل هندسی می گردد.

۲-۳- مدل نانوحس گر شتاب سنج چندگانه

در شکل (۲)، مدل طراحی ایجاد شده و اجزای لایه های نانوحس گر شتاب سنج چندگانه یکسردرگیر مدل سازی شده در محیط نرم افزار Comsol نشان داده شده است. در بالای تیر پیچ پیروالکترونیک قرار دارد که دو الکتروود فلزی به آن متصل شده تا در فیزیک پیروالکترونیک بتوان آن را به عنوان زمین و پتانسیل الکتریکی تعریف کرد. قطعه فلزی برای داشتن الکترو استاتیک بهتر و حساسیت بالاتر برای تعریف صفحه موازی با تیر جهت استفاده از خاصیت خازنی است. قسمتی از نانوتیر یکسردرگیر تکه های پیرومقاومتی هستند که شامل اتصال و تکه پیرومقاومت است. تمام مدل حس گر در حجمی از هوا قرار گرفته است. در جدول (۱) نام مدل های



شکل (۱) هندسه تیر متشکل از لایه حس گر پیروالکترونیک.

$$N_{xx} = \int_{z_3}^{z_2} (c_{11} + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}}) (\frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x}) R dz \quad (۲۳)$$

با در نظر گرفتن مقدار واحد برای R و پس از انتگرال گیری:

$$N_{xx} = A_1 \frac{\partial u}{\partial x} + A_2 \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \quad (۲۴)$$

که ضرایب A_1 و A_2 عبارتند از:

$$A_1 = \int_{z_3}^{z_2} (c_{11} + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}}) h_s, A_2 = \int_{z_3}^{z_2} (c_{11} + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}}) (\frac{z_2^2 - z_3^2}{2}) \quad (۲۵)$$

به این ترتیب نیروی به دست آمده برای لایه پیروالکترونیک (رابطه (۲۴)) به معادله حاکم بر تیر اضافه می گردد. روابط بین میدان الکتریکی E و چگالی جریان J در پیرومقاومت به صورت زیر است:

$$E = \rho' \cdot J + \Delta\rho' \cdot J \quad (۲۶)$$

در رابطه بالا، ρ' مقاومت ویژه و $\Delta\rho'$ تغییر ایجاد شده در مقاومت ویژه می باشد که در حالت کلی هر دو تانسورهای (ماتریس) مرتبه دو می باشند. با اعمال تنش σ تغییر در مقدار مقاومت با معادله ساختاری زیر بیان می شود:

$$\Delta\rho' = \Pi \cdot \sigma, \frac{\Delta\rho'}{\rho'} = \frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (۲۷)$$

که Π تانسور (ماتریس) پیرومقاومت و یک خاصیت از ماده است (در سیستم SI برحسب $Pa^{-1}\Omega m$). در نرم افزار Comsol رابطه (۲۷) به شکل زیر تبدیل می شود.

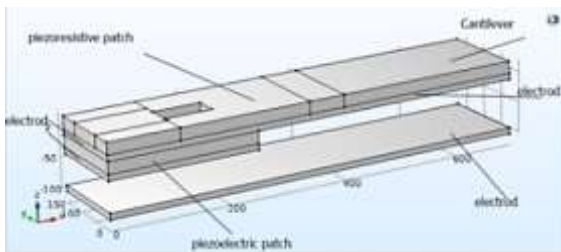
$$\begin{bmatrix} \Delta\rho_{xx} \\ \Delta\rho_{yy} \\ \Delta\rho_{zz} \\ \Delta\rho_{yz} \\ \Delta\rho_{xz} \\ \Delta\rho_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} & \Pi_{14} & \Pi_{15} & \Pi_{16} \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} & \Pi_{23} & \Pi_{24} & \Pi_{25} & \Pi_{26} \\ \Pi_{31} & \Pi_{32} & \Pi_{33} & \Pi_{34} & \Pi_{35} & \Pi_{36} \\ \Pi_{41} & \Pi_{42} & \Pi_{43} & \Pi_{44} & \Pi_{45} & \Pi_{46} \\ \Pi_{51} & \Pi_{52} & \Pi_{53} & \Pi_{54} & \Pi_{55} & \Pi_{56} \\ \Pi_{61} & \Pi_{62} & \Pi_{63} & \Pi_{64} & \Pi_{65} & \Pi_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (۲۸)$$

و رابطه (۲۶) به صورت زیر بازنویسی می شود:

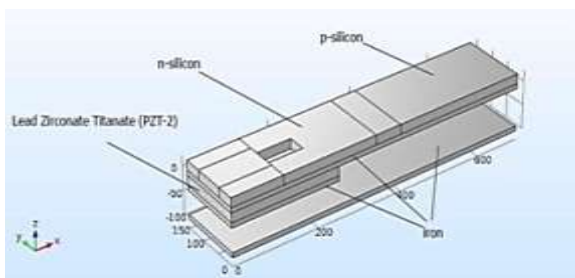
$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{yx} & \rho_{yz} \\ \rho_{xy} & \rho_{yy} & \rho_{yz} \\ \rho_{xz} & \rho_{yz} & \rho_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\rho_{xx} & \Delta\rho_{xy} & \Delta\rho_{zx} \\ \Delta\rho_{xy} & \Delta\rho_{yy} & \Delta\rho_{zy} \\ \Delta\rho_{xz} & \Delta\rho_{yz} & \Delta\rho_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} \quad (۲۹)$$

از آنجایی که سیلیکون دارای ساختار مکعبی و متقارن است

در جدول (۴)، ویژگی‌های مکانیکی مواد مورد استفاده در مدل نانوحسگر آورده شده است. پیچ پیزومقاومت نانوتیر پیزوالکتریک از جنس سیلیکان نوع p بوده و لایه پیزومقاومت و اتصالات از نوع سیلیکان با ناخالصی نوع n می‌باشند. در جدول (۵)، مقادیر تانسور مدول کشسانی و مدول برشی سیلیکان در نرم‌افزار Comsol ارائه شده است. در شکل (۴)، چیدمان هندسه پیچ پیزومقاومت که در جدول (۲) آورده شده نشان داده شده‌اند. در جدول (۶) ابعاد لایه پیزومقاومت مدل‌سازی شده ارائه شده است. در شکل (۵)، نمایی از پیچ پیزومقاومت تیر نانویکسر درگیر مدل‌سازی شده همراه با اجزای آن نشان داده شده است.



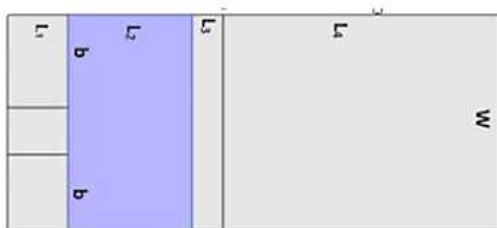
شکل (۲) شکل هندسی و لایه‌چینی در نانوحسگر.



شکل (۳) مواد در لایه‌های مختلف نانوحسگر.

جدول (۵) مشخصات مواد پیچ پیزومقاومت سیلیکان.

مدول کشسانی E (GPa)	مدول برشی G (GPa)
۱۲۹/۵	۷۹
۱۶۸	۶۱/۷
۱۸۶/۵	۵۷/۵



شکل (۴) هندسه پیچ پیزومقاومت.

مورد بررسی و ابعاد نانوحسگر یکسر درگیر شتاب‌سنج چندگانه که در این پژوهش در نظر گرفته شده آورده شده است.

مشخصات ویژگی‌های فیزیکی لایه (پیچ) پیزوالکتریک که از ماده اکسید روی (ZincOxide) می‌باشد در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین، به عنوان نمونه برای مدل نخست ابعاد قطعات مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. در شکل (۳)، چیدمان مواد اجزای مختلف (پیچ‌ها) در مدل‌سازی نانوحسگر در نرم‌افزار Comsol نشان داده شده است.

جدول (۱) نام مدل و مشخصات نانوحسگر.

نام ماده	ابعاد (ضخامت×عرض×طول) نانوحسگر بر حسب nm	نام مدل
Lead Zirconate Titanate (PZT-7A)	۷۰۰×۱۵۰×۲۰	مدل نخست
اکسید روی	۱۰۰۰×۱۰۰×۲۰	مدل دوم
Lead Zirconate Titanate (PZT-7A)	۱۰۰۰×۱۵۰×۱۰	مدل سوم
اکسید روی	۱۰۰۰×۱۰۰×۱۰	مدل چهارم

جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی لایه یزوالکتریک [۱۰].

ماده پیزوالکتریک	e_{31} (C/m ²)	C_{11} (GPa)	ϵ_{33} (C/v.m)
اکسید روی	-۶/۵	۱۲۶	$1/32 \times 10^{-8}$

جدول (۳) پیچ‌های نانوحسگر در مدل نخست.

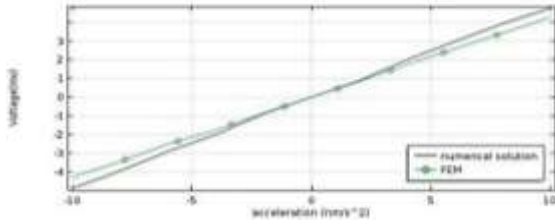
ابعاد (ضخامت×عرض×طول) لایه‌های (پیچ‌ها) نانوحسگر بر حسب nm			
تیر نانویکسر درگیر	لایه (پیچ) پیزوالکتریک	لایه (پیچ) پیزومقاومت	لایه الکتروود خازنی
۷۰×۱۵۰×۲۰	۲۵×۱۵۰×۲۰	۲۲×۱۵۰×۲۰	۷۰×۱۵۰×۱۰
الکتروود پیزوالکتریک	حجم هوای پیرامون نانوحسگر	الکتروود زمین	
۲۵×۱۵۰×۱۰	۷۰۰×۲۰۰×۱۸۰	۷۰×۱۵۰×۱۰	

جدول (۴) مشخصات مواد در مدل‌سازی نانوحسگر.

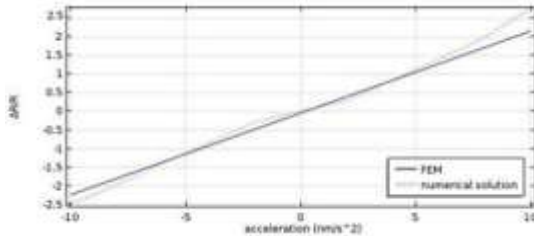
نام ماده	ν	E (GPa)	ρ (kg/m ³)
p -Silicon	۰.۲۲	۱۶۰	۲۳۳۰
n -Silicon	۰.۲۲	۱۶۰	۲۳۳۰
Iron	۰.۲۹	۲۰۰	۷۸۷۰
Lead Zirconate Titanate (PZT-7A)	۰.۴۹	۱۳۰	۷۷۰۰
Zinc oxide	۰.۴۹	۱۳۰	۵۶۸۰

جدول (۶) ابعاد پیچ پیرومقاومت سیلیکان تک بلور.

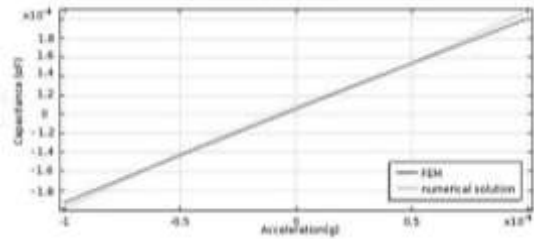
h	b	W	L ₄	L ₃	L ₂	L ₁	ابعاد (nm)
۲۰	۴۰	۱۵۰	۱۲۰	۶۰	۲۲۰	۱۲۰	



(الف)

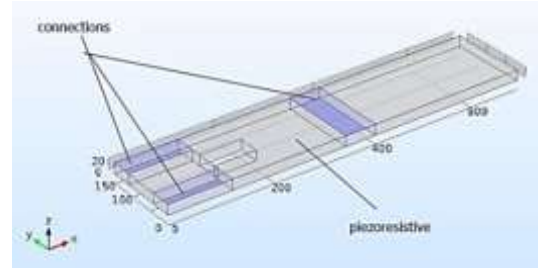


(ب)



(پ)

شکل (۶) (الف) تغییرات ولتاژ بر حسب شتاب، (ب) تغییرات مقاومت بر حسب شتاب و (پ) تغییرات ظرفیت خازن بر حسب شتاب.



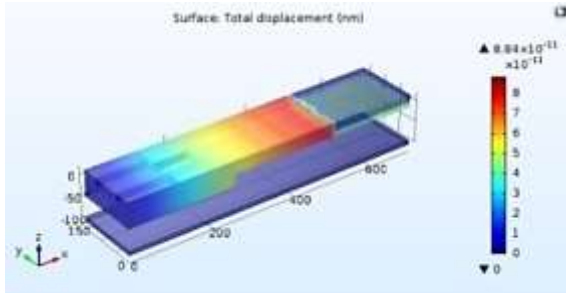
شکل (۵) نواحی مرزی در اتصالات اجزای سیستم پیرومقاومتی نانوحسگر یکسردرگیر مدل سازی شده.

فرض شده که پیرومقاومت دارای توزیع یکنواخت در ناخالصی‌ها به میزان $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ است و ضخامت آن برابر با 333 nm است. در قسمت‌های اتصال الکتریکی از ناخالصی سنگین به میزان 10^{23} cm^{-3} در نظر گرفته شده است. برای افزایش حساسیت حسگر از طریق افزایش تنش و کرنش‌های حاصل از اعمال شتاب، در انتهای تیر حفره‌ای با ابعاد $20 \times 45 \times 100 \text{ nm}$ ایجاد شده است (شکل (۲) و شکل (۵) را ببینید).

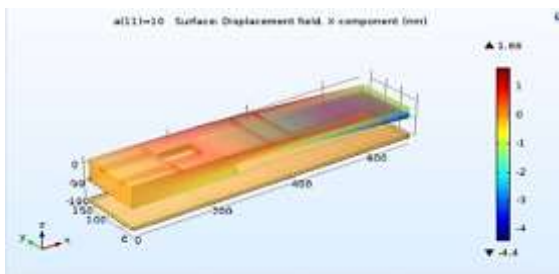
۳- تحلیل و بررسی نتایج

نمودار اختلاف پتانسیل بر حسب شتاب، اختلاف مقاومت بر حسب شتاب و اختلاف ظرفیت بر حسب شتاب با استفاده از نرم‌افزار Comsol و حل معادلات حاکم با استفاده از کد کامپیوتری تهیه شده در محیط برنامه ریاضی MAPLE بترتیب در شکل (۶) برای مدل نخست نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار Comsol و روش حل عددی ریاضی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. بنابراین می‌توان به نتایج حاصل از طراحی نانوحسگر شتاب‌سنج اطمینان داشت.

در شکل (۷) توزیع سه‌بعدی تغییر شکل (خیز) در نانوحسگر شتاب‌سنج یکسردرگیر در مدل نخست تحت اثر شتاب اعمالی برابر با 10 nm/s^2 بترتیب بدون در نظر گرفتن نیروهای بین مولکولی و با در نظر گرفتن این نیروها در مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Comsol نشان داده شده‌اند. از مقایسه دو شکل مشاهده می‌گردد در حالتی که نیروهای بین مولکولی کازیمیر/واندروالس در نظر گرفته نشوند (شکل ۷-الف)



(الف)

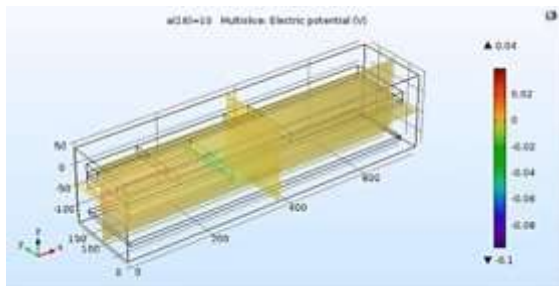


(ب)

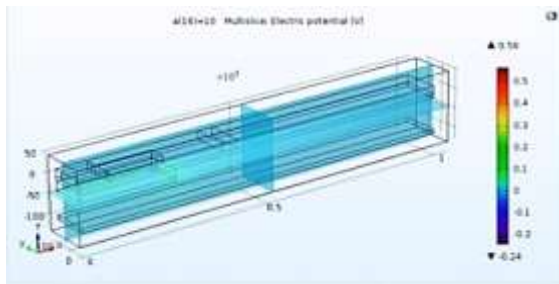
شکل (۷) توزیع خیز در نانوحسگر در مدل نخست، (الف) بدون در نظر گرفتن نیروهای بین مولکولی و (ب) با در نظر گرفتن نیروهای بین مولکولی.

از سوی دیگر در مدل دوم (شکل ۹-ب) بیشینه ولتاژ برابر با 0.0844 V و در مدل نخست (شکل ۹-الف) و مدل سوم (شکل ۹-پ) مقدار بیشینه ولتاژ برابر با 0.047 V می باشد.

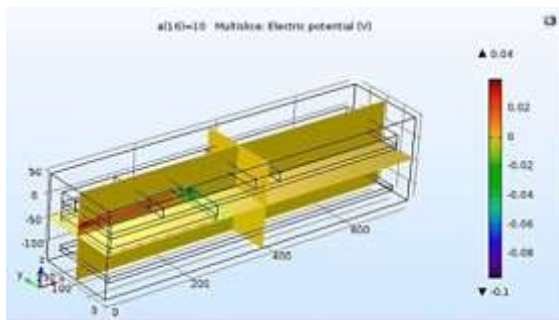
در شکل (۱۰)، تغییرات مقاومت نسبی نانوحسگر بر حسب شتاب برای لایه (پیچ) پیژومقاومت در دامنه شتاب $\pm 10 \text{ ng}$ برای مدل نخست، دوم، سوم و چهارم نشان داده شده است. مشاهده می شود که در مدل نخست (شکل ۱۰-الف) تغییرات مقاومت نسبی تا شتاب 5 m/s^2 ثابت بوده و پس از آن کاهش می یابد در حالی که در مدل دوم (شکل ۱۰-ب) تا شتاب 5 m/s^2 به صورت دو مرحله خطی افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. در مدل سوم (شکل ۱۰-پ) تغییرات مقاومت نسبی تا شتاب 5 m/s^2 به صورت دو مرحله خطی افزایش یافته و پس از آن ثابت می ماند. در مدل چهارم (شکل ۱۰-ت) این تغییرات به صورت یکنواخت روند نزولی دارد.



(الف)



(ب)

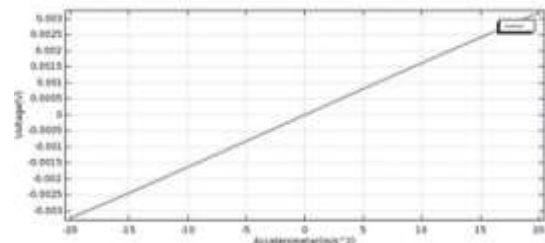


(پ)

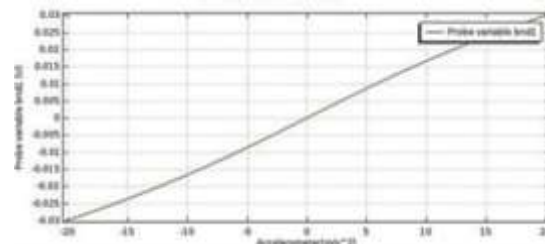
شکل (۹) تغییر ولتاژ در مقاطع مختلف در طول تیر، (الف) مدل نخست، (ب) مدل دوم و (پ) مدل سوم.

بیشینه خیز تیر نانوحسگر یکسر درگیر برابر با 0.0844 V و در حالتی که نیروهای بین مولکولی کازیمیر/واندروالس در نظر گرفته شوند (شکل ۷-ب) به مقدار $1/66 \text{ nm}$ افزایش یافته است.

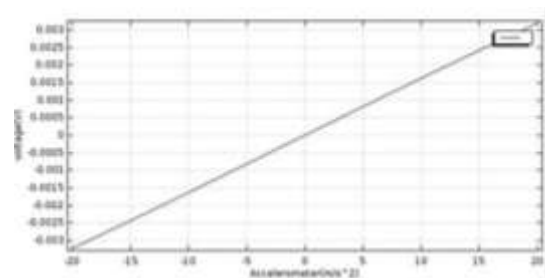
در شکل (۸)، تغییرات پتانسیل الکتریکی (ΔV) در پیچ پیژوالکتریک نانوحسگر بر حسب شتاب با در نظر گرفتن دامنه شتابی برابر با $\pm 20 \text{ m/s}^2$ برای مدل نخست، دوم و سوم نشان داده شده است. مشاهده می شود که رابطه ای خطی بین شتاب اعمالی و ولتاژ قطعه پیژوالکتریک وجود دارد. بیشترین مقدار ولتاژ نانوحسگر در مدول دوم (شکل ۸-ب) به دست آمده که مقدار آن در شتاب اعمالی 20 m/s^2 برابر با 0.03 V/ng می باشد. در شکل (۹)، توزیع پتانسیل در مقاطع مختلف در طول نانوحسگر شتاب سنج یکسردرگیر برای مدل نخست، دوم و سوم نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می گردد که در نواحی نزدیک به تکیه گاه گیردار تیر، دارای ولتاژ (پتانسیل الکتریکی) بیشینه تری نسبت به مقاطع دورتر از تکیه گاه وجود دارد.



(الف)

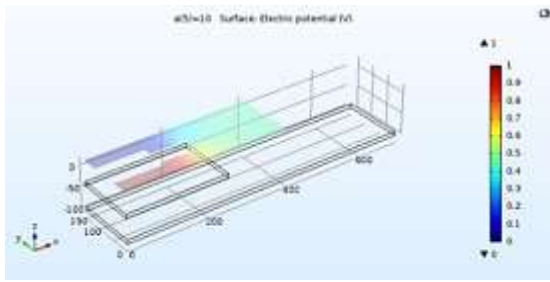


(ب)

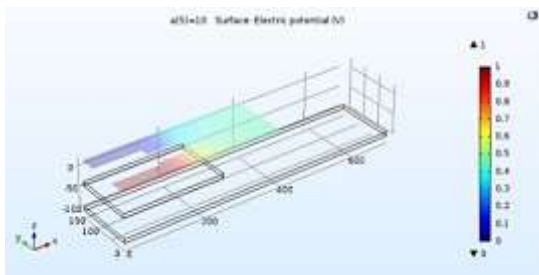


(پ)

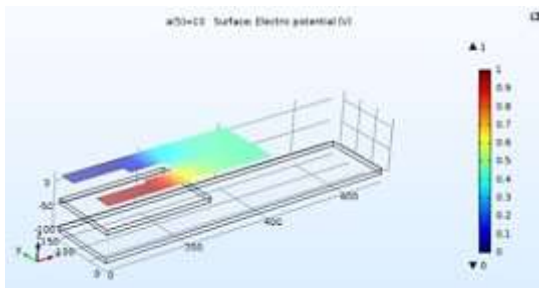
شکل (۸) تغییر پتانسیل الکتریکی بر حسب شتاب، (الف) مدل نخست، (ب) مدل دوم و (پ) مدل سوم.



(الف)



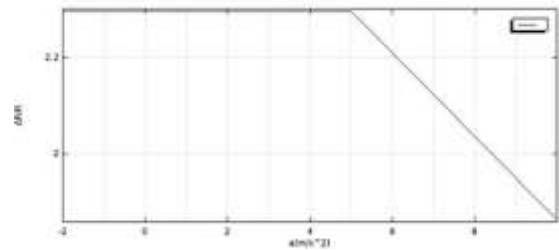
(ب)



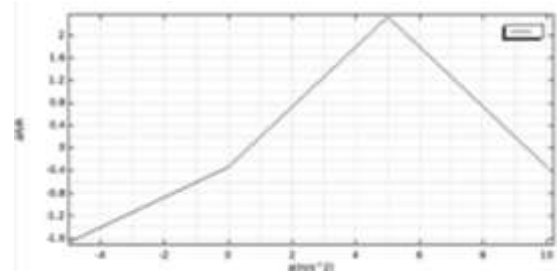
(پ)

شکل (۱۱) توزیع ولتاژ در پیژومقاومت نانوحس گر، (الف) مدل نخست، (ب) مدل دوم و (پ) مدل سوم.

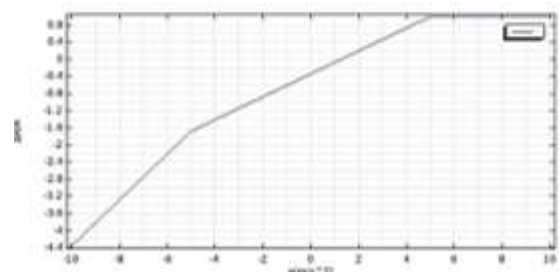
در مدل نخست (شکل ۱۲-الف) تغییرات ظرفیت خازن برحسب شتاب اعمالی نامنظم می‌باشد. در مدل دوم (شکل ۱۲-ب) تغییرات ظرفیت خازن برحسب شتاب اعمالی تا شتاب 3 m/s^2 به صورت دو خطی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. در مدل سوم (شکل ۱۲-پ) تغییرات ظرفیت خازن برحسب شتاب اعمالی تا شتاب 3 m/s^2 - کاهش یافته و پس از آن در مقدار صفر ثابت می‌ماند. در مدل چهارم (شکل ۱۲-ت) ظرفیت خازن برحسب شتاب اعمالی نامنظم است. در شکل (۱۳)، تغییرات جابجایی انتهای پیژومقاومت (نقطه میانی در سطح مقطع آن) برحسب شتاب اعمالی برای مدل نخست، مدل دوم و مدل سوم نشان داده شده است. با افزایش شتاب اعمالی مقدار جابجایی به صورت خطی افزایش می‌یابد. به کمک این نمودار می‌توان مقدار بیشینه جابجایی ناشی از یک مقدار شتاب اعمالی مشخص را به دست آورد و در طراحی حس گر مورد استفاده قرار داد.



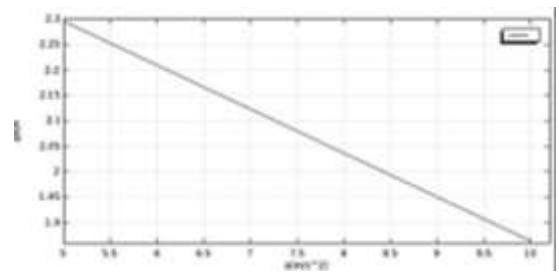
(الف)



(ب)



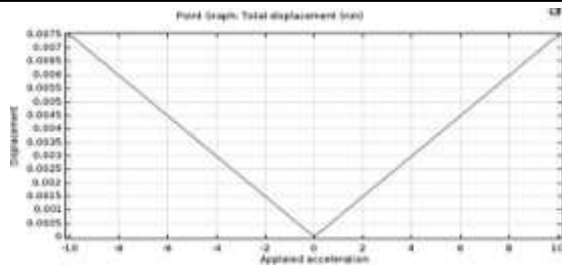
(پ)



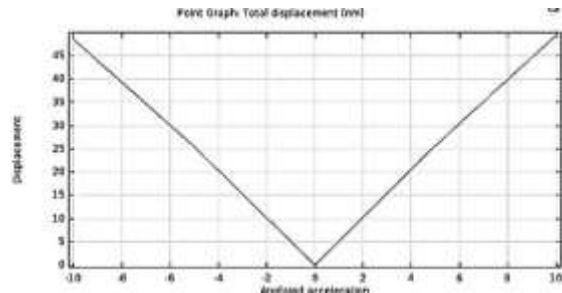
(ت)

شکل (۱۰) تغییرات مقاومت $\Delta R/R$ نانوحس گر برحسب شتاب، (الف) مدل نخست، (ب) مدل دوم، (پ) مدل سوم، (ت) مدل چهارم.

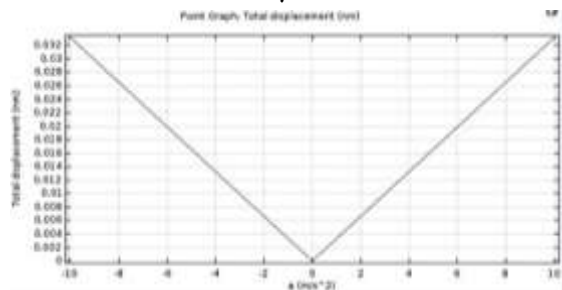
تغییرات ولتاژ در نواحی پیژومقاومت نانوحس گر و اتصالات آن برای مدل نخست، دوم و سوم در شکل (۱۱)، نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌گردد که ولتاژ در طول پیژومقاومت در هر سه مدل نخست، دوم و سوم (شکل (۱۱)) تفاوت چندانی نداشته و بیشینه ولتاژ نزدیک مقدار ولتاژ ورودی 1 V می‌باشد. نمودار تغییرات ظرفیت خازن نانوحس گر برحسب شتاب برای مدل نخست، دوم، مدل سوم و مدل چهارم در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



(الف)



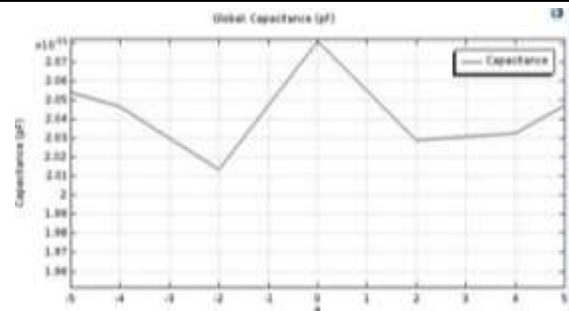
(ب)



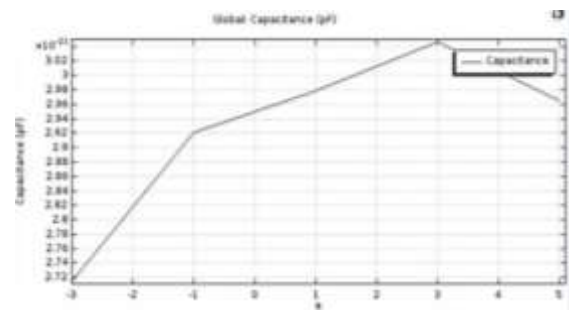
(پ)

شکل (۱۲) تغییرات جابجایی انتهایی پیژومقاومت نانوحسگر یکسردرگیر برحسب شتاب اعمالی، (الف) مدل نخست، (ب) مدل دوم و (پ) مدل سوم.

از این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش شتاب به سمت مقادیر مثبت، جابجایی تیر نیز به مقدار مثبت افزایش می‌یابد. حداکثر شتاب قابل اندازه‌گیری در مکانی است که بیشینه جابجایی اتفاق می‌افتد. حداکثر مقدار جابجایی تیر در شتاب 10 m/s^2 در مدل نخست، مدل دوم و مدل سوم به ترتیب برابر با 0.075 nm ، 50 nm و 0.33 nm است. توزیع تنش فون‌مایز در لایه‌های مختلف نانوحسگر یکسردرگیر برای مدل نخست، مدل دوم و مدل سوم در شکل (۱۴) نشان داده شده‌است. با اعمال شتاب، بیشینه مقدار تنش وارد شده به نانوحسگر برای مدل نخست، دوم و سوم (شکل (۱۴)) بترتیب برابر با 7 GPa ، 0.03 GPa و $4/14 \text{ GPa}$ می‌باشد که با مقایسه این بیشینه تنش با تنش تسلیم سیلیکون که 7 GPa می‌باشد نتیجه گرفته می‌شود که نانوحسگر در هر یک از مدل‌ها قادر به تحمل تنش‌های ناشی از شتاب‌های مختلف بدون ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک است.



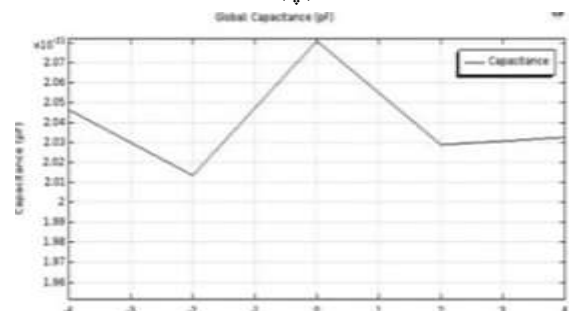
(الف)



(ب)



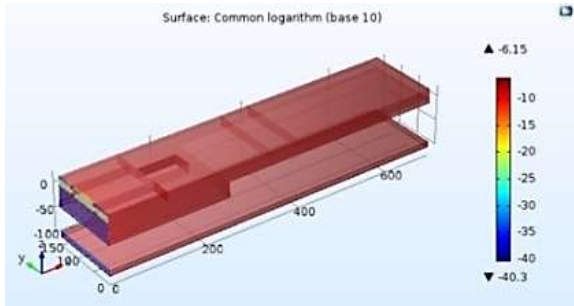
(پ)



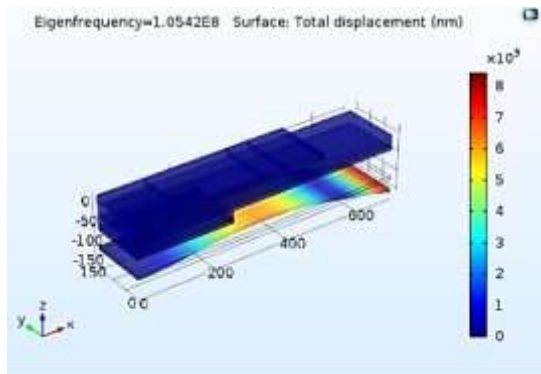
(ت)

شکل (۱۲) تغییرات ظرفیت خازنی نانوحسگر برحسب شتاب، (الف) مدل نخست، (ب) مدل دوم، (پ) مدل سوم و (ت) مدل چهارم.

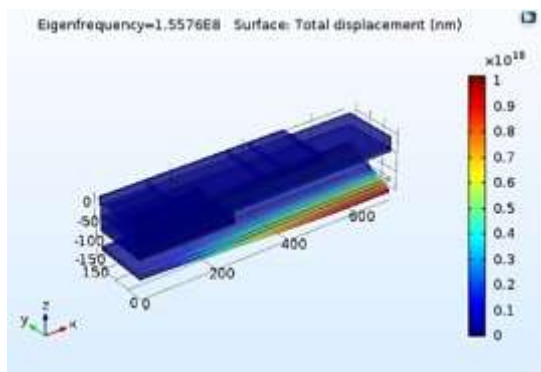
به عنوان نمونه، در مدل نخست (شکل ۱۳-الف)، مدل دوم (شکل ۱۳-ب) و مدل سوم (شکل ۱۳-پ) مقدار جابجایی در اثر اعمال شتابی برابر با 5 m/s^2 بترتیب برابر با 27 nm و 0.35 nm می‌باشد. بنابراین لازم است که ملاحظات مربوط به این مقدار جابجایی در طراحی حسگر که برای محدوده 5 m/s^2 کار می‌کند لحاظ گردد.



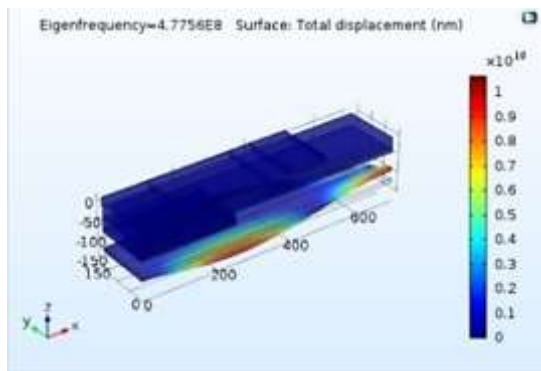
شکل (۱۵) توزیع عمر خستگی در نانوحسگر یکسر درگیر در مدل نخست.



(الف)



(ب)

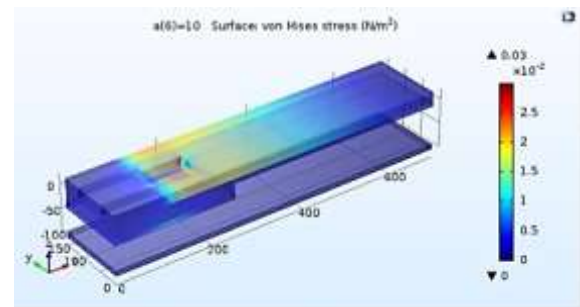


(پ)

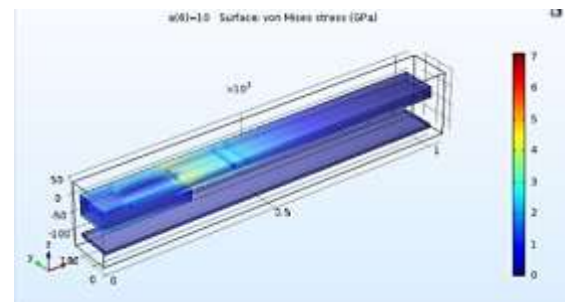
شکل (۱۶) شکل مودهای نانوشتاب‌سنج و فرکانس‌های طبیعی آن برای مدل نخست، (الف) مود دوم، (ب) مود سوم و (پ) مود ششم.

در شکل (۱۵)، توزیع عمر در نانوحسگر برای مدل نخست نشان داده شده‌است. عمر خستگی نانوحسگر در محدوده عمر دائم از نظر دوره کاری است. در این تحلیل، نمودار $S-N$ برای سیلیکان در نظر گرفته شده بوده‌است. از آنجایی که تنش در قسمت‌های مختلف نانوتیر تغییر می‌کند پیش‌بینی عمر خستگی در نواحی مختلف متفاوت است.

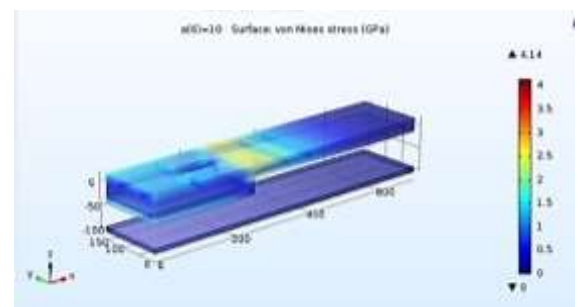
ولی عمر خستگی بر اساس نقاطی که بیشینه تنش در آنها اتفاق افتاده محاسبه شده‌است. در صورتی که بارهای نوسانی به تیر وارد شود و فرکانس آن با فرکانس‌های طبیعی تیر برابر باشد حسگر دچار خرابی می‌گردد. برای بررسی این موضوع، با استفاده از نرم‌افزار Comsol شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی نخست، سوم و ششم برای مدل نخست در شکل (۱۶) نشان داده شده‌اند.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل (۱۴) توزیع تنش فون‌مایز در نانوحسگر، (الف) مدل نخست، (ب) مدل دوم و (پ) مدل سوم.

تغییر شکل‌های پلاستیک قادر به تحمل تنش‌های ناشی از شتاب‌های اعمالی می‌باشد.
(۷) مشاهده گردید که طراحی نانوحس‌گر خازنی-مقاومتی در مدل ارائه شده ترکیبی دارای عمر خستگی بسیار بالایی می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Ramezani, A., Alasty, A. and Akbari, J., "Closed-form Solutions of the Pull-in Instability in Nano-Cantilevers under Electrostatic and Intermolecular Surface Forces", *International Journal of Solids and Structures*. Vol.44, No.14-15, pp.4925-4941, 2007.
- [2] Tadi Beni, Y., Koochi, A. and Abadyan, M., "Theoretical Study of the Effect of Casimir Force, Elastic Boundary Conditions and Size Dependency on the Pull-in Instability of Beam-Type NEMS", *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. Vol.43, No.4, pp.979-988, 2011.
- [3] Koka, A. and Sodano, H.A., "High-Sensitivity Accelerometer Composed of Ultra-Long Vertically Aligned Barium Titanate Nanowire Arrays", *Nature Communications*. Vol.4, No.2682, 2013.
- [4] Mehran, M. and Mohajerzadeh, S., "High Sensitivity Nanostructure Incorporated Interdigital Silicon based Capacitive Accelerometer", *Microelectronics Journal*. Vol.46, No.2, pp.166-173, 2015.
- [5] Keivani, M., "Pull-in Instability of Paddle-Type and Double-Sided NEMS Sensors under the Accelerating Force", *Acta Astronautica*. Vol.119, pp.196-206, 2016.
- [6] Batra, R.C., Porfiri, M. and Spinello, D., "Effects of Casimir Force on Pull-in Instability in Micromembranes", *EPL (Europhysics Letters)*. Vol.77, No.2, pp.200-210, 2007.
- [7] Buks, E. and Roukes, M.L., "Stiction, Adhesion Energy, and the Casimir Effect in Micro-Mechanical Systems", *Physical Review B*. Vol.63, No.3, pp.330-402, 2001.
- [8] Koochi, A., Kazemi, A.S., Beni, Y.T., Yekranghi, A. and Abadyan, M., "Theoretical Study of the Effect of Casimir Attraction on the Pull-in Behavior of Beam-Type NEMS using Modified Adomian Method", *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. Vol.43, No.2, pp.625-632, 2010.
- [9] Liu, C.C., "Dynamic Behavior Analysis of Cantilever-Type Nano-Mechanical Electrostatic Actuator", *International Journal of Non-Linear Mechanics*. Vol.82, pp.124-130, 2016.
- [10] Hidetoshi, T., Nguyen, M.D., Matsumoto, K. and Shimoyama, I., "Differential Pressure Sensor using a Piezoresistive Cantilever", *Journal of*

فرکانس‌های طبیعی مدهای نخست تا ششم بر حسب MHz بترتیب عبارتند از ۱۶/۸۵۱، ۱۰۵/۴۲، ۱۵۵/۷۶، ۲۴۱/۶۶، ۲۹۵/۵۳ و ۴۷۷/۵۶ و بیشینه جابجایی کلی در نقطه‌ای در میان سطح میانی نانوحس‌گر برای مدل نخست بر حسب nm بترتیب در این شش مد عبارتند از: ۰/۰۰۷۶۷۲۳، ۲/۱۷۹۳، ۱/۰۳۵۷، ۱/۷۰۲۳، ۴/۷۷۲۴ و ۵/۵۸۹۸.

۴- نتیجه‌گیری

خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده عبارتند از:
(۱) در حالتی که نیروهای بین مولکولی کازیمیر/واندروالس برای نانوحس‌گر یکسرگیردار در نظر گرفته شوند بیشینه خیز آن بیشتر از حالتی است که نیروهای بین مولکولی کازیمیر/واندروالس در نظر گرفته نشوند.
(۲) در نواحی نزدیک به تکیه‌گاه گیردار تیر، دارای ولتاژ بیشینه‌تری نسبت به مقاطع دورتر از تکیه‌گاه وجود دارد. از سوی دیگر، در مدل دوم بیشینه ولتاژ به میزان قابل توجهی بیشتر از مدل نخست و مدل سوم بوده و دارای حساسیت بیشتری می‌باشد.
(۳) در مدل نخست تغییرات مقاومت نسبی بر حسب شتاب ابتدا تا مقدار مشخصی ثابت بوده و سپس کاهش می‌یابد. در حالی که در مدل دوم تا شتاب مشخصی به صورت دو مرحله خطی افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. در مدل سوم تغییرات مقاومت نسبی تا شتاب مشخصی به صورت دو مرحله خطی افزایش یافته و پس از آن ثابت می‌ماند. در مدل چهارم این تغییرات به صورت یکنواخت روند نزولی دارد.
(۴) ولتاژ در طول پیزومقاومت در هر سه مدل نخست، دوم و سوم تفاوت چندانی نداشته و بیشینه ولتاژ نزدیک به مقدار ولتاژ ورودی نانوحس‌گر می‌باشد.
(۵) در مدل نخست تغییرات ظرفیت خازن بر حسب شتاب اعمالی نامنظم می‌باشد. در مدل دوم تغییرات ظرفیت خازن بر حسب شتاب اعمالی تا شتاب معینی به صورت دوخطی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. در مدل سوم تغییرات ظرفیت خازن بر حسب شتاب اعمالی تا شتاب معینی کاهش یافته و پس از آن در مقدار صفر ثابت می‌ماند. در مدل چهارم ظرفیت خازن بر حسب شتاب اعمالی نامنظم می‌باشد.
(۶) با اعمال شتاب، بیشینه مقدار تنش وارد شده به نانوحس‌گر در هر چهار مدل کمتر از تنش تسلیم حس‌گر می‌باشد و حس‌گر در هر چهار مدل پیشنهادی بدون ایجاد

- Micromechanics and Microengineering. Vol.22, No.5, 2012.
- [11] Haq, M., "Application of Piezo Transducers in Biomedical Science for Health Monitoring and Energy Harvesting Problems", *Materials Research Express*, Vol.6, No.2, pp.1-8, 2018.
- [12] Song, J., Yamada, T., Yoshino, M. and Nagasaki, T., "Theoretical Analysis of Nanogenerators with aligned nanorods for Piezoelectricenergy Harvesting", *Sensors and Materials*, Vol.31, No.11, pp.3669-3679, 2019.
- [13] Yeong Park, J., Salauddin Md., and Salauddin Rasel, M., "Nanogenerator for Scavenging Low Frequency Vibrations", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.25, No.5, pp.1-10, 2019.