# طراحی و تحلیل عملکرد یک نانوشتابسنج باز آوایشی (رزونانسی) با کاربرد پایش امواج زمینصوتی

میثم رحمتی احمدآبادی <sup>۱</sup>، سیامک اسماعیلزاده خادم<sup>\*</sup> <sup>۱</sup>، مسعود راسخ <sup>۱</sup> ۱. گروه نانومواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس ۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

#### چکیدہ

در این مقاله، طراحی و تحلیل عملکردی یک نانوحسگر بازآوایشی برای رصد زمین لرزه با کاربرد اندازه گیری امواج بسامد پایین زمین صوتی پیشنهاد شده است. الگوی ارائه شده از یک جرم معیار که توسط تکیه گاه به زیرلایه متصل شده و یک نانوتیر که در نزدیکی محل اتصال تکیه گاه قرار دارد، تشکیل شده است. این نانوتیر را میتوان یک نوسانگر دوسردرگیر در نظر گرفت که با نیروی برقی ایستایی (الکترواستاتیک (برقی ایستایی)) تحریک میشود. وارد شدن شتاب به جرم معیار موجب ایجاد نیروی کششی یا فشاری به صورت محوری در نوسانگر میشود. نیروی محوری وارد شده بر تیر منجر به تغییر انرژی پتانسیل ذخیره شده در تیر و در نتیجه تغییر بسامد طبیعی سامانه میشود. بنابر این، با اندازه گیری مقدار تغییر در بسامد طبیعی میتوان شتاب وارده به جرم معیار را اندازه گرفت. به علاوه، بر روی معادلات حاکم بر نانوحسگر با استاده گیری مقدار تغییر در بسامد طبیعی میتوان شتاب وارده به جرم معیار را اندازه گرفت. به علاوه، بر روی معادلات حاکم بر نانوحسگر با استفاده از اصل همیلتون به دست میآیند که شامل نیروهای برقی ایستایی (الکترواستاتیک (برقی ایستایی)) با اثر میدان فرینچ، میرایی، پیزوالکتریک، کزیمیر و غیر خطیت ناشی از اثرات کششی است. در ادامه، معادلات با روش عددی انتگرال گیری معادلات حاکم بر نانوحسگر با استفاده از اصل همیلتون به دست میآیند که شامل نیروهای برقی ایستایی (الکترواستاتیک (برقی ایستایی) معادلات حاکم بر نانوحسگر از طریـق نتـایج شـبیهسـازی بررسـی شـده کـه شـامل عملکـرد دینـامیکی ابـزار، حساسـیت، ایستیم حل شدهاند. عملکـرد نانوحسـگر از طریـق نتـایج شـبیهسـازی بررسـی شـده کـه شـامل عملکـرد دینـامیکی ابـزار، حساسـیت، نفکیکـپذیری، پهنای باند، برد دینامیک و مقاومت سازهای میشود. نتایج به دستآمده نشان می دهد که ابزار پیشنهاد شـده میتوانـد در اندازه گیری امواج فروآوا و بسامد پایین زمین صوتی، عملکرد بهتری در مقایسه با حسگرهای تجاری دایز رو کـلان (میکـرو و مـاکرو) داشـته

**کلیدواژه ها:** نانوحسگر، رصد زمین لرزه، دینامیک غیرخطیت، باز آوایشگر، شیوه مقیاس های زمانی چندگانه، فراآوایی، زمین صوتی.

#### ۱. مقدمه

لرزهنگارها در پیشبینی زمینلرزه، پایش سلامت ساختمان، آرایههای زلزلهسنجی از راه دور، پایش ارتعاشات زیر دریا در سامانههای اخطار سونامی و اکتشافات نفت و گاز کاربرد دارند. لرزهنگارهای رایج، بزرگ، سنگین (تقریبا ۱۰ کیلوگرم) و گران (۵۰ هزار تا ۱۰۰ هزار دلار) هستند. این تجهیزات پرمصرف هستند و نصب و نگهداری آنها گران است. این موارد مهمترین موانع بر سر استفاده از آنها در سازههای ساختمانی، پلها، ساختمانهای بزرگ، مکان های دور از شبکه برای پایش زمینلرزه یا اکتشاف

نفت و لرزهنگاری فضایی است، و منجر به توسعهی لرزهنگارهای در ابعاد خرد و نانو شده است [۱]. شتابسنجهای مورد استفاده در لرزهنگاری باید قادر به اندازه گیری امواج زمین صوتی<sup>۱</sup> و شتاب زمین در بسامدهای پایین (زیر ۱۰۰ هرتز) و با تفکیک پذیری بهتر از شتاب معادل نوفهی زمین<sup>۲</sup> [۲] (مطابق شکل ۱) و در دامنهی دینامیکی ۵± برابر شتاب زمین باشند. در شتابسنجهای ریزبرقی مکانیکی<sup>۳</sup> رایج، تفکیک پذیری با کاهش ابعاد، تضعیف میشود. یک راه حل مناسب در حسگرهای نجتال بازآوایشی، طراحی به شکل ترکیب

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Geoacoustic

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> NEA

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Microelectromechanical systems

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Nanoelectromechanical systems

<sup>\*</sup>نویسنده پاسخگو: khadem@modares.ac.ir

قطعات ریزبرقیمکانیکی (جرم ارتعاشی و لنگرها) و نانوبرقی مکانیکی (نوسانگرها) به صورت هم زمان می شود و عملکرد این حسگرها را بهبود می بخشد.



شکل ۱ الگوی نوفهی پایین جدید جامع جغرافیایی ایالات متحده<sup>۱</sup> برحسب شتاب تخمینی نوفهی با واحد m/s<sup>7</sup>/√Hz حرکت زمین برحسب بسامد. سطوح نوفهی مکانیکی برای نانولرزهنگار ارائهشده در شکل نشان داده شده است، با تغییراتی در منبع [۲].

از شتابسنجهای بازآوایشی معمولا در اندازه گیری شتابهای با بسامد پایین و تغییرات کم در طول زمان استفاده میشود. در این شتابسنجها از تغییر بسامد طبیعی یک نوسانگر در اثر نیروی محوری وارد شده ناشی از شتاب وارد بر جرم معیار، برای اندازه گیری شتاب وارده استفاده میشود. امتیاز اصلی شتابسنجی بازآوایشی، نروجی شبهرقومی دقیق و تفکیک پذیری بالای آن است (۳] که امکان پردازش علامت رقومی را بدون نیاز به میکند. البته این روش برای اندازه گیری شتابهای بالای میکند. البته این روش برای اندازه گیری شتابهای بالای چند صد هرتز مناسب نیست [۴]. این حسگرها نسبت به روشهای دیگر از جمله خوانش خازنی، مزایی از جمله حساسیت و تفکیک پذیری بالا، مصرف توان پایین و پایداری بلند مدت را دارند [۵].

با کاهش ابعاد، غیرخطیت زودتر رخ میدهد و پایش نوسانات در این حسگرها در دامنههای کم مشکل است. بنابراین، الگوسازی دینامیک غیرخطیت این حسگرها در دامنههای بزرگ اهمیت زیادی دارد [۶].

رفتار دینامیکی نوسانگرهای خرد و نانوبرقیمکانیکی در چندین مقاله بررسی شدهاند. قاسم در سال ۲۰۱۰ ارتعاشات یک ریزنوسانگر با کاربرد شتابسنج را با استفاده از نظریه تیر اویلر-برنولی و در نظر گرفتن نیروی

الکترواستاتیک (برقیایستایی) (برقیایستایی) با اثر میدان فرینج و غیرخطیت هندسی با روشهای پرتابهای و روش موازنه دینامیک ترویج با روش عددی غیرمجانبی حل کرده است [۷]. راسخ و همکاران در سال ۲۰۱۳ رفتار غیرخطیت

نانولولههای کربنی دوسردرگیر با تحریک الکتـرواسـتاتیک (برقی|یستایی) را با در نظر گرفتن غیرخطیـت هندسـی و نیروهای بین مولکولی وانـدروالس بـا روش انتگـرالگیـری مستقیم شبیهسازی کردهاند [۸].

عزیزی و همکاران در سال ۲۰۱۴ بازآوایش اولیه یک ریزتیر دوسردرگیر تحت تحریک نیروی ترکیبی مستقیم و متناوب الکترواستاتیک (برقیایستایی) را با استفاده از اعمال ولتاژ پیزوالکتریک تنظیم کردهاند. روش مورد استفاده در تحلیلها پرتابهای بوده و با استفاده از روش

مقیاسهای زمانی چندگانه صحهگذاری شده است [۹]. زو و سشیا در سالهای ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ یک ریزشتابسنج بازآوایشی با تفکیک پذیری بالا و پهنای باند گسترده در دامنهی دینامیک ورودی بزرگ را در رژیمهای خطی و غیرخطیت مشخصهبندی و با تنظیم ولتاژ بازخورد بهینه کردهاند [۱۰–۱۱].

عوقد و همکاران در سال ۲۰۱۸ مشخصههای پولین یک نانوتیر را تحت تحریک نیروی الکترواستاتیک (برقیایستایی) و با در نظر گرفتن نیروهای بین مولکولی بهصورت تحلیلی با حل بسته تخمین زدهاند [۱۱].

به صورت تحقیقی با حل بسته تحمین زدهاند ۲۱۱۱. چندین تولید کننده ی تجاری و مرکز تحقیقاتی اقدام به طراحی و ساخت لرزهنگارهای کلان، استی اس-۲<sup>۲</sup>، یک جرم ۴ کیلوگرمی روی فنرهای برگی قرار داده که دامنه تناوب ۳۶۰ ثانیه ای ایجاد می کند و برای ایجاد کمترین کف نوفه در خلا نصب شده اند. استی اس-۲<sup>۳</sup> و سی ام جی-تای جرمهای ۱۳ و ۱۴ کیلوگرمی و دوره تناوب ۱۲۰ ثانیه دارند که شتاب معادل نوفه ی کمتر از THZ ایجاد می س<sup>۵</sup> با ۲۰<sup>-۱۰</sup> ایجاد می کند. سرسل ال-۴<sup>۴</sup> و اویو ژئواسپیس<sup>۵</sup> با

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> USGS

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> STS-1

 $<sup>^{3}</sup>$  STS-2

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Sercel L-4 <sup>5</sup> Oyo-Geospace HS-1

بازآوایش ۱ هرتز و ۴٫۵ هرتز نوفه خـودی بسـیار بـالاتری دارند [۱۲–۱۷].

در مورد لرزهنگارهای دارای ابعاد ریز، می توان به شتاب سنج راکستاد در سال ۱۹۹۵ اشاره کرد که نوف هی m/s<sup>\*</sup>/vHz <sup>۷</sup>-۱۰ داشت [۱۸]. لرزهنگار های ساخته شده توسط یزدی [۱۹] در سال ۲۰۰۰ و سوزوکی [۲۰] در سال ۲۰۰۶ هم نوفه هایی بیش تر از نوفه ی زمین داشتند. کومار در سال ۲۰۰۷ یک ریزشتاب سنج را به منظور لرزهنگاری در مأموریت های فضایی طراحی کرده است که نوفه ی نسبتا پایینی دارد [۱].

با توجه به مقالات فوق مشاهده می شود که تاکنون حسگری در مقیاسهای خرد و نانو طراحی نشده است که نوف ای کمتر از نوف می زمین داشته و در کاربردهای لرزه نگاری یا پیش بینی زلزله مناسب باشد که این کار برای اولین بار در مقاله انجام شده است. این حسگرها در بسامدهای پایین کار می کنند که منجر به نوفه ی براونی و سازند کیفیت پایین ناشی از میرایی گرماکشسانی می شود. برای غلبه بر این محدودیتها برای اولین بار یک حسگر باز آوایشی با جرم معیار در ابعاد ریز و نوسانگر در ابعاد نانو با نوفه ی کم تر از نوفه ی زمین ارائه شده است که منجر به حساسیت و تفکیک پذیری بالاتر و پهنای باند گسترده تر می شود.

به علاوه در مقلات موجود، به ندرت و در مورد مشخصهای محدودی از روشهای نظریه برای شبیه سازی رفتار و تحلیل عملکرد حسگرهای شتاب استفاده شده است. از نوآوری های دیگر این مقاله می توان به استفاده از از لایه ی پیزوالکتریک به منظور بهبود عملکرد حسگر اشاره کرد.

شبیه سازی و الگوسازی یک حسگر شتاب شامل جرم معیار در ابعاد ریز و یک نانوتیر مرتعش با بسامد بازآوایشی بالا در مرتبهی مگاهرتز منجر به غلبه بر مشکل تضعیف تفکیک پذیری با کاهش ابعاد شده است. افزایش بسامد کاری موجب افزایش حساسیت و بهبود تفکیک پذیری ابزار خواهد شد. در این مقاله، با در نظر گرفتن معادلهی غیر خطیت حاکم بر سامانه، شبیه سازی دینامیک، حساسیت، تفکیک پذیری، برد دینامیک، پهنای باند و مقاومت سازه ای مطالعه شدهاند.

# ۲. الگوسازی

طرح کلی شتاب سنج باز آوایشی در شکل نشان داده شده است. این حسگر از جرم معیار  $_{s}$  M که توسط تکیه گاه به زیرلایه متصل شده، یک نوسانگر و یک الکترود جهت تحریک و خوانش الکترواستاتیک (برقیایستایی) تشکیل شده است. نوسانگر استفاده شده یک نانوتیر دوسردرگیر است که توسط دو لایه پیزوالکتریک دربرگرفته شده است نانوتیر توسط الکترود تحریک می شود. باز آوایش توسط و به محل اتصال جرم معیار به زیرلایه متصل می شود. این نانوتیر توسط الکترود تحریک می شود. باز آوایش توسط قرارگیری نوسانگر در یک حلقه باز خورد مدار نوسانی ابزار وارد می شود، منجر به وارد شدن نیروی محوری به نوسانگر خواهد شد. نیروی محوری اعمالی باعث جابه جایی در بسامد طبیعی نوسانگر به دلیل تغییر در انرژی پتانسیل نامی سامانه می شود. بنابر این اندازه گیری جابه جایی



**شکل ۲** نمای کلی شتابسنج شامل جرم معیار، نانونوسانگر و الکترود.

نمای کلی از نوسانگر مورد تحلیل در شکل ۳ نشان داده شده است. طول تیر با ۱، عـرض آن بـا ۵، و ضـخامت بـا n نشان داده شدهاند. مشخصات لایهی پیـزو بـا زیرنـویس p مشخص شدهاند.



شکل ۳ طرح کلی نانونوسانگر با تحریک الکترواستاتیک (برقی|یستایی) و دارای دو لایه پیزوالکتریک.

$$(EI)_{eq} = EI + E_p hah_p(\frac{h}{\gamma} + h_p)$$
(\*)

$$U_{a} = \frac{(EA)_{eq}}{8 l} \left( \int_{-}^{L} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^{r} dx \right)^{r}$$
( $\Delta$ )

$$(EA)_{eq} = Eah + rE_pah_p \tag{6}$$

انرژی کرنشی ناشی از نیروی محوری پیزوالکتریک از رابطهی زیر بهدست میآید:

$$U_p = \frac{F_p}{\gamma} \int_{-}^{L} \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^{\gamma} dx \tag{Y}$$

که در ان
$$F_p = re_{r_1}V_pah_p$$
 (۸)

### ۲-۱-۳. کار نیروهای خارجی

نیروی خارجی وارد شده به نانوتیر ناشی از تحریک الکترواستاتیک (برقیایستایی) و نیروی کزیمیر به صورت معادلهی ۹ نوشته می شود:

$$W_{ext} = \int_{-\infty}^{L} (F_e + F_c + F_d) dx \tag{9}$$

که در آن نیـروی میرایـی  $F_a$ ، نیـروی الکتـرواسـتاتیک (برقـیایسـتایی)  $F_e$  و نیـروی کزیمیـر  $F_c$  بـه شـرح ذیـل هستند:

$$F_{e} = \frac{\varepsilon_{.} b V^{\mathsf{T}}}{\mathsf{T} \left(g_{.} - w\right)^{\mathsf{T}}} \left( \mathsf{1} + \cdot .\mathfrak{S} \Delta \frac{\left(g_{.} - w\right)}{b} \right)$$

$$F_{e} = \frac{\pi^{\mathsf{T}} \overline{h} C b}{(\mathsf{1} \cdot \mathsf{1})}$$

$$(\mathsf{1} \cdot \mathsf{1})$$

$$rf \cdot (g_{.} - w)^{f}$$

$$F_{c} = -c \frac{\partial w}{\partial t}$$
که در آن آ ثابت پلانک تقسیم بر  $\pi$ ، ۲ و سرعت نور  
به ترتیب  $\frac{m}{s}$  ۲×۱۰<sup>\*</sup> و Js ۱/۰۵۵×۱۰<sup>-۳۴</sup> هستند. به  
عـلاوه  $w = r \zeta w$  بسـامد طبیعـی سـامانه  
میباشد و داریم:  
 $V = V_{DC} + V_{AC} \cos(\Omega t)$  (۱۱)

۲-۱-۱. انرژی جنبشی انرژی جنبشی نانوتیر به همراه لایـههای پیزوالکتریک از رابطهی ۱ بهدست میآید؛

$$T = \frac{1}{\gamma} \int_{-\infty}^{L} (\rho A)_{eq} \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^{\gamma} dx \tag{1}$$

که در آن A نشاندهندهی سطح مقطع تیر، p چگالی، و w جابجایی در جهت عرضی هستند. زیرنویس eq به معنای معادل است، و داریم

$$(\rho A)_{eq} = \rho A + \tau \rho_p A_p \tag{(7)}$$

$$\mathbf{Y} \qquad U_b = \frac{(EI)_{eq}}{r} \int_{\cdot}^{L} \left(\frac{\partial^{\mathsf{v}} w}{\partial x^{\mathsf{v}}}\right)^{\mathsf{v}} dx \tag{(*)}$$

که در آن

DOR: 20.1001.1.23455748.1397.6.2.2.5 ]

$$\frac{\partial^{\mathsf{F}} w^{*}}{\partial x^{*}} + \frac{\partial^{\mathsf{T}} w^{*}}{\partial t^{*}} + c^{*} \frac{\partial w^{*}}{\partial t^{*}} - [N_{T}^{*}] \frac{\partial^{\mathsf{T}} w^{*}}{\partial x^{*}} - \left[\alpha_{1} \int_{\cdot}^{1} \left(\frac{\partial w^{*}}{\partial x^{*}}\right)^{\mathsf{T}} dx\right] \frac{\partial^{\mathsf{T}} w^{*}}{\partial x^{*}} \qquad (1Y)$$
$$= \frac{\alpha_{\mathsf{T}} V^{\mathsf{T}}}{\left(1 - w^{*}\right)^{\mathsf{T}}} + \frac{\alpha_{3} V^{\mathsf{T}}}{\left(1 - w^{*}\right)} + \frac{\alpha_{\mathsf{F}}}{\left(1 - w^{*}\right)^{\mathsf{F}}}$$
$$\sum_{\mathsf{T} \in \mathsf{T}} \sum_{\mathsf{T} \in \mathsf{T}} \left(1 - w^{*}\right)^{\mathsf{T}} + \frac{\alpha_{\mathsf{T}}}{\left(1 - w^{*}\right)^{\mathsf{T}}} +$$

$$c^{*} = \frac{c L^{\intercal}}{(EI)_{eq} \tau}$$

$$N_{T}^{*} = \frac{\left(N_{a} + N_{.} + F_{p}\right) L^{\intercal}}{(EI)_{eq}}$$

$$\alpha_{\intercal} = \frac{g_{.}^{\intercal}}{\Upsilon} \frac{(EA)_{eq}}{(EI)_{eq}}$$

$$\alpha_{\intercal} = \frac{\varepsilon_{.} b L^{\intercal}}{\Upsilon(EI)_{eq} g_{.}^{\intercal}}$$
(\\Lambda)

$$\begin{aligned} \alpha_{r} &= \cdot.۶ \delta \; \frac{\varepsilon_{.}L'}{2(EI)_{eq}g^{r}} \\ \alpha_{r} &= \frac{\pi^{r} \bar{h} c b L^{r}}{r \epsilon \cdot (EI)_{eq} g_{.}^{\delta}} \\ \end{aligned}$$

$$x &= 1 \; g \; x = \cdot \; g \; x = \cdot \; g$$

$$w = \cdot \cdot \frac{\partial w}{\partial x} = \cdot \tag{19}$$

۲-۲. روش حل

در ادامه معادلهی ۱۷ با استفاده از روش انتگرال گیری  
مستقیم به صورت عددی حل شده است.  
برای استفاده از روش اغتشاشات در حل معادلـه و تحلیـل  
پاسخ در مجاورت بازآوایش اولیه، دامنهی حرکت بایـد بـه  
اندازهی کافی کوچک باشد؛ برای برآوردن این شرط فـرض  
میشود که تغییر شکل تیر ۷، ترکیبی از مولفهی استاتیک  
میشود که تغییر شکل تیر ۷، ترکیبی از مولفهی استاتیک  
میشود که تغییر شکل تیر ۱۹ ترکیبی از مولفه دینامیک ۷  
ماشی از ولتاژ مستقیم و و مولفه دینامیک 
$$w_d$$
 ناشی  
از تحریک هارمونیک ولتاژ متناوب است [۹].  
معادلهی حاکم برای  $w_a$  به این شکل است:  
(۲۰)  
برای محاسبه تغییر شکل استاتیک  $w_s$ ، مشتقات زمانی  
و تحریک هارمونیک را در رابطه ی ۱۷ برابر صفر قـرار داده  
و با حذف علامت \* رابطهی ۲۱ بهدست میآید.

$$\int_{t_{1}}^{t_{\gamma}} (\delta T - \delta U + \delta W_{ext}) dt = \cdot$$
 (17)

# ۲-۱-۵. معادله ار تعاشی

با اعمال اصل همیلتون و یک مجموعه سادهسازی ریاضی معادلهی ارتعاشی نانوتیر با در نظر گرفتن غیرخطیت هندسی، نیروی الکترواستاتیک (برقیایستایی)، تنش محوری و نیروی مانده محوری، نیروی کزیمیر، نیروی ویسکوالاستیک (لزج کشسانی) و اثر پیزوالکتریک به این شکل درمیآید:

$$= \frac{1}{15} Ebh^{r} + 5E_{p} \left(\frac{1}{15} b h_{p}^{r}\right)$$

$$\left(h - h_{p}\right)^{r}$$

$$(1\%)$$

$$+\left(\frac{n}{r} + \frac{n_p}{r}\right) bh_p)$$

$$(EA)_{eq} = EA + rE_pA_p \tag{10}$$

در مرحلهی اول معادلات بدون بعد میشوند. بـا تعریـف کمیتهای بیبعدسازی زیر

$$t^* = \frac{t}{\tau}, \ w^* = \frac{w}{g}, \ x^* = \frac{x}{L}, \ \tau = \sqrt{\frac{(\rho A)_{eq}}{(EI)_{eq}}} L^{\tau}$$
 (19)

و جایگذاری این عبارات در رابطهی ۱۳ معادلهی بـیبعـد بهدست میآید:

$$... + \alpha_{3} \left[ \frac{V_{DC}^{r} w_{d}}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{V_{DC}^{r} w_{d}^{r}}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{V_{DC}^{2} w_{d}^{r}}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{r}} w_{d} + \cdots \right]$$

$$+ \alpha_{r} \left[ \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{s}} + \frac{r \cdot V_{DC}^{r} w_{d}^{r}}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{r \cdot V_{DC}^{r} w_{d}^{r}}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{\alpha_{s} \left[ \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{\alpha_{s} \left[ \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{r}} + \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\Omega t)}{(1 - w_{s})^{n}} + \frac{r V_{DC} V_{AC} \cos(\lambda_{s} t)}{(1 - w_{s})^{n}} + \frac{r V_{A} V_$$

| $\mathcal{A}_k$ مفادير $\mathcal{A}_k$ |           |  |  |  |  |  |
|--|-----------|--|--|--|--|--|
| $\lambda_k$                            | شماره مود |  |  |  |  |  |
| ۴٫٧٣٠                                  | ١         |  |  |  |  |  |
| ۷٬۸۵۳                                  | ٢         |  |  |  |  |  |
| <b>۱۰</b> ٬۹۹۶                         | ٣         |  |  |  |  |  |
| 14,144                                 | ۴         |  |  |  |  |  |

$$\frac{\partial^{\mathsf{r}} w_{s}}{\partial x^{\mathsf{r}}} - [N_{T}^{\mathsf{r}}] \frac{\partial^{\mathsf{r}} w_{s}}{\partial x^{\mathsf{r}}} - \left[ \alpha_{\mathsf{v}} \int_{\cdot}^{\mathsf{v}} \left( \frac{\partial w_{s}}{\partial x} \right)^{\mathsf{r}} dx \right] \frac{\partial^{\mathsf{v}} w_{s}}{\partial x^{\mathsf{r}}} \tag{(1)}$$
$$= \frac{\alpha_{\mathsf{v}} V_{DC}^{\mathsf{v}}}{\left( \mathsf{v} - \mathsf{w}_{s} \right)^{\mathsf{v}}} + \frac{\alpha_{\mathsf{v}} V_{DC}^{\mathsf{v}}}{\left( \mathsf{v} - \mathsf{w}_{s} \right)^{\mathsf{r}}} + \frac{\alpha_{\mathsf{v}}}{\left( \mathsf{v} - \mathsf{w}_{s} \right)^{\mathsf{r}}}$$

$$(1 - w_s) = (1 - w_s) + (1 - w_s)$$

$$x = x_g + x_s = x_g$$

$$w_s = \cdot, \frac{dw_s}{dx} = \cdot$$
(17)

با جایگذاری رابطهی ۲۰ در ۱۷ و در نظر گرفتن رابطهی ۲۱ و بسط تیلور نیروی الکترواستاتیک (برقیایستایی) حول نقطهی تعادل استاتیک، مسئلهی دینامیک حاکم به این شکل در میآید:

$$\frac{\partial^{*} w_{d}}{\partial x^{*}} + \frac{\partial^{*} w_{d}}{\partial t^{*}} + c^{*} \frac{\partial w_{d}}{\partial t} - [N_{T}^{*}] \frac{\partial^{*} w_{d}}{\partial x^{*}}$$

$$\alpha_{1} \int_{\cdot}^{1} \left(\frac{\partial w_{d}}{\partial x}\right)^{*} dx \left[\frac{\partial^{*} w_{d}}{\partial x^{*}}\right]$$

$$= \alpha_{1} \int_{\cdot}^{1} \left(\frac{\partial w_{s}}{\partial x}\right)^{*} dx \left[\frac{\partial^{*} w_{d}}{\partial x^{*}}\right]$$

$$= \left[ \nabla \alpha_{1} \int_{\cdot}^{1} \left(\frac{\partial w_{s}}{\partial x} \frac{\partial w_{d}}{\partial x}\right) dx \right] \frac{\partial^{*} w_{d}}{\partial x^{*}}$$

$$= \left[ \nabla \alpha_{1} \int_{\cdot}^{1} \left(\frac{\partial w_{d}}{\partial x}\right)^{*} dx \right] \frac{\partial^{*} w_{d}}{\partial x}$$

$$= \alpha_{1} \left[ \frac{\nabla V_{DC}}{(1 - w_{s})^{*}} + \frac{\nabla V_{DC}}{(1 - w_{s})^$$

(۲۳)

[Downloaded from joasi.ir on 2025-09-03]

$$F_{\gamma} = r \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ r \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ r \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$F_{\tau} = r \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ r \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \lambda \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \lambda \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \lambda \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \lambda \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \lambda \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \lambda \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \lambda \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

$$+ \lambda \alpha_{\tau} V_{DC} \int_{\cdot}^{\gamma} \frac{\Phi_{\gamma} \Phi_{\gamma}}{(\gamma - w_{s})^{\tau}} dx$$

۳. مدار خوانش

در این حسکر، نوسانگر از طریق قرار گرفتن در یک حلقهی بازخورد مدار در بازآوایش نگه داشته شده و تعداد نوسان آن اندازه گیری می شود. با وارد شدن شتاب خارجی به جرم معیار در راستای محور حساس، نیروی محوری به نوسانگر وارد می شود. نیروی اعمالی به دلیل تغییر در انرژی پتانسیل نامی منجر به جابه جایی در بسامد بازآوایش نوسانگر می شود.

خروجی این ابزار، اختلاف ایجاد شده در بسامد خروجی با وارد شدن شتاب است. حرکات نوسانی نوسانگر، توسط تغییر ظرفیت خازنی ایجاد شده بر اثر این حرکات اندازه گیری می شود و نوسانگر از طریق یک حلقه ی بسته پ\_ی[ل]ل<sup>۱</sup> با استفاده از تحریک الکترواستاتیک (برقی ایستایی) در بسامد باز آوایش تحریک می شود. این مدار بازخوردی باعث می شود بسامد باز آوایشی نوسانگر حفظ شود و نوسانگر با تغییر بسامد طبیعی در اثر تغییر پارامتر فیزیکی مورد اندازه گیری، هم چنان در بسامد طبیعی نوسان کند.

یک کنترلر بازخوردی به یک پایش فعال بسامد بازآوایش و حرکت آن نیاز دارد. به علاوه یک سازوکار تحریک نیاز است که نوسانگر را در نوسان نگه میدارد. مولفههای اصلی

$$\begin{aligned} \begin{array}{l} & + - \left[ \sum_{k=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \left( \sum_{k=1}^{n} \sum_{k=1}^$$

<sup>1</sup> PLL

Downloaded from joasi.ir on 2025-09-03

حسگر باز آوایشـی شـامل نوسـانگر، واحـد تحریـک، واحـد پایش و مدار بازخورد در شکل نشان داده شدهاند [۵].



شکل ۴ قسمتهای اصلی تشکیل دهندهی حسگر باز آوایشی [۵].

۴. نتایج شبیهسازی

به منظور ارائهی نتایج شبیهسازی، ویژگیهای مربوط به نمونهی موردی نانوحسگر طبق جدول۲ در نظر گرفته شد.

| ······································ |                     |           |                     |  |  |  |  |
|--|---------------------|-----------|---------------------|--|--|--|--|
| واحد                                   | نماد                | مقدار     | پارامتر             |  |  |  |  |
| μm                                     | L×W×H               | 97×97×5   | ابعاد جرم معيار     |  |  |  |  |
| ng                                     | M <sub>s</sub>      | 1e-1•     | جرم معيار           |  |  |  |  |
| ١                                      | Leverage            | ٨٠        | سازند بزرگنمایی     |  |  |  |  |
| nm                                     | h                   | ٣٠        | ارتفاع نانوتير      |  |  |  |  |
| nm                                     | 1                   | ۶۰۰۰      | طول نانوتير         |  |  |  |  |
| nm                                     | b                   | ٣٠٠       | عرض نانوتير         |  |  |  |  |
|  |                     |           | فاصلەي              |  |  |  |  |
| nm                                     | g.                  | ۲۰۰       | الكترواستاتيك       |  |  |  |  |
|  |                     |           | (برقىايستايى) اوليه |  |  |  |  |
|  | h                   | \<br>\    | ارتفاع لايههاي      |  |  |  |  |
| 11111                                  | п <sub>р</sub>      | 1         | پيزوالكتريك         |  |  |  |  |
|  | 1                   | <i>\$</i> | طول لايەھاي         |  |  |  |  |
| пш                                     | Iр                  | /•••      | پيزوالكتريك         |  |  |  |  |
|  | 1                   | ٣         | عرض لايەھاي         |  |  |  |  |
| 11111                                  | υ <sub>p</sub>      | ,         | پيزوالكتريك         |  |  |  |  |
| Kg∕m <sup>r</sup>                      | ρ                   | ۲۳۳۲      | چگالی نانوتیر       |  |  |  |  |
| GPa                                    | Е                   | 189,81    | مادول يانگ نانوتير  |  |  |  |  |
| Va/m <sup>r</sup>                      |                     | VA        | چگالی لایههای       |  |  |  |  |
| кg/ш                                   | $ ho_p$             | νω        | پيزوالكتريك         |  |  |  |  |
|  |                     |           | مادول يانگ          |  |  |  |  |
| GPa                                    | $E_p$               | ۷۶٫۶      | لايەھاي             |  |  |  |  |
|  |                     |           | پيزوالكتريك         |  |  |  |  |
| ١                                      | $\overline{e_{31}}$ | -9,79     | ضريب پيزوالكتريك    |  |  |  |  |

| ,دی [۲۳]. | مطالعه مو | فيزيكى   | و ثوابت | هندسه | دول۲ |
|-----------|-----------|----------|---------|-------|------|
|           |           | <u> </u> | • • • • |       |      |

۴-۱. سازند کیفیت'
سازند کیفیت مکانیکی Q مقیاسی از اتـلاف انـرژی یـک
نوسانگر یا به عبارت دیگر، مقیاسی برای میرایی مکانیکی
است. روابط تحلیلی مختلفی بـرای محاسـبهی سـازند
کیفیت وجود دارد.
سازند کیفیت موثر سامانه ترکیبی از سـازندهای کیفیت
لزچ، گرماکشسانی'، لغزشی' و مـوارد دیگـر اسـت کـه از
رابطهی ۲۷ بهدست میآید:
(۲۷)

که در رابطهی فوق  $Q_{TH}$ ،  $Q_{EFF}$  و  $Q_{SL}$  بهترتیب سازند کیفیت موثر، گرماکشسانی، فیلم فشاری و لزج و سازند کیفیت ناشی از اثرات دیگر هستند. با توجه به ایجاد خلاً در محفظهی حسگر، میرایی گرماکشسانی بیشترین نقش را در سازند کیفیت دارد و استهلاک لزج و فیلم فشرده اثر زیادی ندارند [۲۲].

استهلاک گرماکشسانی طبق نظریهی زنر برای تیرهای با مقطع مستطیل تحت تحریک همساز<sup>۴</sup> معتبر است [۲۳]. سازند کیفیت گرماکشسانی از این رابطه بهدست میآید:

$$Q_{TH}^{-1} = \frac{E\alpha T}{\rho_b c_P} \frac{\omega \tau_z}{1 + (\omega \tau_z)^{\mathrm{T}}}$$
(TA)

که در آن  $\rho_b$  چگالی حجمی ماده و E مادول گرماکشسانی هستند.  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی و  $C_P$  گرمای ویژه تحت فشار ثابت و T دمای محیط هستند.  $\omega$  بسامد تحریک و  $\tau_z$  زمان واهلش<sup>60</sup> برای مود اول ارتعاشی تیر هستند که  $\tau_z$  از رابطه ۲۹ بهدست میآید [۲۳]:

 $\tau_z = \frac{h^{\rm r}}{\pi^{\rm r}\kappa} \tag{(19)}$ 

h کـه در آن  $\pi$  ضـریب انتشـار حـرارت در مـاده تیـر و ضخامت آن است. برای تخمین استهلاک لزج از دو سـازند کیفیت استهلاک لایه فشاری<sup>۲</sup> و لغزشی استفاده میشود. لزجت مـوثر در اسـتهلاک لایـه لغزشـی از رابطـهی زیـر بهدست میآید [۲۴]:

$$\mu_{SL} = \frac{\mu}{1 + \mathsf{r}K_n + \ldots \mathsf{r}K_n} e^{-K_n/\mathsf{r}} e^{-K_n/\mathsf{r}}$$
(\mathcal{r})

- <sup>1</sup> Quality Factor
- <sup>2</sup> Thermoelastic
- <sup>3</sup> Sliding film
- <sup>4</sup> Harmonic
- <sup>5</sup> Phase Locked Loop
- <sup>6</sup> Relaxation time <sup>7</sup> Squeeze film

۵۳

 $P\lambda = 9.91 \times 10^{-1}$  [Pa.m]

 $K_n = \frac{\lambda}{g}$ 

 $C_{SL} = \mu_{SL} \frac{A}{a}$ 

 $\mu_{SQ} = \frac{\mu}{\frac{1+3.87}{K_m^{1.169}}}$ 

 $C_{SQ} = \cdot . \mathfrak{r} \mathfrak{r} \frac{\mu_{SQ} A^{\mathfrak{r}}}{a}$ 

 $\zeta_{SL} = \frac{C_{SL}}{\Upsilon m_{EFE} \omega_n} \zeta_{SQ} = \frac{C_{SQ}}{\Upsilon m_{EFE} \omega_n}$ 

 $Q_{SL} = \frac{1}{\gamma \zeta_{SL}} Q_{SQ} = \frac{1}{\gamma \zeta_{SQ}}$ 

که در آن  $\mu$  لزجت گاز و  $K_n$  عدد نودسن هستند که عـدد

که لا برای هوا از رابطه وابستگی فشار و فاصله آزاد

با فرض گاز غیرنیوتنی، ضریب استهلاک لایه لغزشی به

که در آن A سطح الکترود و .g فاصله شکاف خازنی است. برای محاسبهی ضریب استهلاک لایه فشاری، لزجت مـوثر

برای مقادیر کم لایه فشاری، ضریب استهلاک فشاری

نسبت استهلاک و سازند کیفیت نظیر طبق روابط ۳۶ تا

مقادیر جدول ۳ در محاسبهی سازند کیفیت استفاده

شدهاند. مقادیر سازند کیفیت متناظر با فشارهای مختلف در جدول۴ از رابطهی ۲۷ بهدست آمده است. نتایج با در نظر گرفتن *Qother* از مرتبهی ۱۰<sup>۵</sup> بهدست آمدهاند

مولکول طبق رابطهی ۳۲ بهدست می آید [۲۵]:

نودسن از رابطه ۳۱ بهدست میآید:

صورت رابطهی ۳۳ بیان میشود:

از رابطهی ۳۴ بهدست میآید [۲۴]:

بهصورت رابطهی ۳۵ بیان می شود: •

۴۰ بهدست می آید [۲۴]:

 $(\mathcal{T})$ 

(٣٢)

(۳۳)

(۳۴)

(۳۵)

(3)-(4.)

.[۲۵]

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران/ سال ششم/ شماره ۲/ پاییز و زمستان ۱۳۹۷

| نماد           | واحد                               | مقدار                                     | سازند                         |
|----------------|------------------------------------|---|-------------------------------|
| Λ              | М                                  | × ) • <sup>-^</sup><br>۶,۲ )              | مسير آزاد ميانگين هوا         |
| μ              | Pa.s                               | × ۱ • <sup>-9</sup><br>1 λ <sub>1</sub> 9 | لزجت هوا                      |
| C <sub>P</sub> | J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> | ۷۱۲                                       | گرمای ویژه تحت فشار<br>ثابت   |
| А              | K-`                                | × \ • -۶<br>۲/۶                           | ضریب انبساط گرمایی<br>سیلیکون |
| Τ.             | К                                  | ۳۰۰                                       | دما                           |
| к              | m <sup>r</sup> .s <sup>-1</sup>    | × γ • <sup>-9</sup><br>λλ                 | ضريب پخش سيليكون              |
| Р              | Ра                                 | × ) • <sup>-r</sup>                       | فشار داخل محفظه               |

**جدول ۳** مقادیر استفاده شده در محاسبه سازند کیفیت [۲۳].

#### ۴–۲. پاسخ بسامدی

نمودار پاسخ بسامدی نوسانگر در ولتاژ پیزوالکتریک صفر بهدست آمده از حل عددی رابطه ی ۲۶ در شکل نشان داده شده است. کمترین ولتاژ مستقیم قابل اعمال، ۵ ولت و ولتاژ متناوب ۵٫۰ ولت است زیرا در این ولتاژ کمترین دامنه ینوسان در شتاب ۵۵ برابر ۵ نانومتر در طیف بسامدی بهدست میآید که این دامنه توسط آخرین روش های موجود قابل اندازه گیری است [۷] و در صورتی که ولتاژ از این مقدار کمتر شود، دامنه ی نوسان قابل اندازه گیری نخواهد بود.

| Q <sub>EFF</sub> | Q <sub>other</sub>                            | Q <sub>TH</sub>                                 | Q <sub>SQ</sub>                                  | Q <sub>SL</sub>  | نوع فشار | فشار   |
|------------------|---|---|--|--|----------|--------|
| 114              | $\gamma_{\prime}\gamma\Delta \times \gamma$ . | $r_{\lambda} $ $\lambda $ $\lambda $ $\lambda $ | $\gamma_{\prime}$ ) $\gamma \times$ ) • $\gamma$ | $\Delta_{\rho} \mathcal{F} \mathcal{A} \times \mathcal{V} \mathcal{F}^{V}$ | اتمسفر   | ١      |
| 110              | ۱,۱۵×۱۰ <sup>۵</sup>                          | $r_{\lambda} $ $\lambda $ $\lambda $            | ۲, ۲۰ ×۱۰ <sup>۴</sup>                           | $\Delta_{i} \forall F \times 1 \cdot \mathbf{v}$                           | فشار کم  | •,•• ١ |

**جدول۴** مقادیر سازند کیفیت متناظر با فشارهای مختلف.



(برقیایستایی) (برقیایستایی) در شتابهای مختلف، ۵ = ۷<sub>DC</sub> ، ۵، V<sub>p</sub> • ۰ (V<sub>AC</sub> =

۴–۳. حساسیت (سازند مقیاس<sup>۱</sup>)

طبق تعریف نسبت تغییرات خروجی (در این جا بسامد بازآوایش) به تغییرات ورودی (در این جا شتاب در جهت مورد نظر) که قابل اندازه گیری است، حساسیت یا سازند مقیاس نامیده می شود [۲۶]. این کمیت معمولا با به دست آوردن شیب نمودار ورودی – خروجی حسگر محاسبه می شود.

بسامد باز آوایش نوسانگر مطابق شکل در شتابهای مختلف نشان داده است و همان طور که مشاهده می شود، رفتار نوسانگر در شتابهای کم تر از ۲- برابر شتاب جاذبه غیر خطیت است.

حساسیت یا سازند مقیاس برابر با شیب نمودار خروجی حسگر (بسامد بازآوایش) برحسب ورودی (شتاب وارد بر جرم معیار) است [۲۷] که در مورد این حسگر، حساسیت برابر است با ۲۶۷۵۰

 $SF_{\gamma} = \frac{\Delta f_{out}}{\Delta \gamma_{in}} = 9 Y \Delta \cdot 9 Y Y \frac{Hz}{m/s^{\gamma}} \sim 688 \frac{kHz}{g}$ (۴۱)  $SF_{\gamma} = \Delta f_{out} = 9 Y \Delta \cdot 9 Y Y \frac{Hz}{m/s^{\gamma}} \sim 688 \frac{kHz}{g}$ (۴۱)  $SF_{\gamma} = \Delta f_{out} = 9 Y \Delta \cdot 9 Y Y \frac{Hz}{m/s^{\gamma}} = 0$ 



 $V_p = \cdot \cdot V_{AC} = \cdot \cdot \Delta \cdot V_{DC} = \Delta$ 

۴–۹. اثر ولتاژ الکترواستاتیک (برقیایستایی) پاسخ حسگر به شتاب ورودی تابع ولتاژی است که با آن تحریک صورت می گیرد. برای بررسی پاسخ حسگر در ولتاژهای مختلف تحریک، ولتاژ مستقیم *V<sub>DC</sub>* ولتاژهای مختلف تحریک، ولتاژ مستقیم اورد الکترواستاتیک (برقیایستایی) ۳ ولت به الکترودها وارد می شود. ولتاژ متناوب *V<sub>AC</sub>*، بهترتیب ۲٫۰، ۳٫۰ و ۱٫۴ ولت به الکترود وارد شده است.

پاسخ نوسانگر بـه ایـن ولتاژهـا در بسـامد هـای تحریـک مختلف در شکل نشان داده شده است.



**شکل ۷** نمودار پاسخ نوسانگر در طیف بسامدی به تحریک در ولتاژهای الکترواستاتیک (برقیایستایی) مختلف.

با توجه به نتایج بهدست آمده، با افزایش ولتاژ متناوب، حرکت نوسانگر غیرخطیت می شود. به علاوه، دامنه ی نوسانات در هر بسامد تحریک افزایش می یابد. از طرف دیگر بسامدی که در آن باز آوایش رخ می دهد نیز افزایش یافته است. هر چند افزایش ولتاژ تحریک با محدودیت پولین مواجه است، با افزایش آن می توان تفکیک پذیری حسگر امواج زمین صوتی را بهبود بخشید.

#### ۴-۵. پهنای باند و زمان پاسخ

پهنای باند، دامنه ی بسامدهای ورودی است که در آن رابطهی ورودی- خروجی حفظ می شود. معمولا تغییر ۳ دسی بل در سازند مقیاس در لبهی پهنای باند قابل پذیرش است [۲۸]. رابطه بین پهنای باند و بسامد باز آوایش w و سازند کیفیت موثر به صورت زیر است [۵]  $BW = \frac{\omega}{Q_{EFF}}$ در نتیجه بسامد طبیعی حدود ۱۱ مگاهرتز، پهنای باند شتاب سنج برابر ۱۱۰ هرتز به دست می آید. زمان پاسخ به ورودی از مشخصه های مهم شتاب سنجها و لرزه نگارها

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Scale factor

است. زمان پاسخ نسبت عکس با پهنای باند دارد. طبق تعریف [۱۹]؛ Response Time =  $\frac{1}{BW}$  (۴۳)

که برای حسگر مورد نظـر برابـر بـا ۰٬۰۱ ثانیـه بـهدسـت میآید.

# ۴-۶. تفکیک پذیری

کمترین میزان تغییر در شتاب ورودی که در آن خروجی الکتریکی از تراز نوفه قابل تشخیص است قدرت تفکی کپ ذیری یا رزولوشن گویند. باید توجه داشت که میزان تفکیک پذیری حسگر توسط نوف مکانیکی و الکترونیکی محدود می شود. منبع نوف مکانیکی و الکترونیکی محاوف مراونی و واحد تفکیک پذیری، واحد بیان نوف است. با توجه به ماهیت نوفه براونی که دارای طیف سفید است میتوان آن را برحسب دو واحد  $\frac{m}{\sqrt{NZ}}$  یا  $\frac{m}{\sqrt{HZ}}$  بیان کرد. توان نوفه مجموع ناشی از جرم، نوسانگر و تقویت کننده از رابطهی زیر به دست میآید:

 $S_{\omega}^{total}(\omega) = S_{\omega}^{m}(\omega) + S_{\omega}^{r}(\omega) + S_{\omega}^{a}(\omega)$ (۴۴) طبق منبع [۲۹] چگالی طیفی نوفه نیرویی ناشی از نوسانات گرمامکانیکی نوسانگر از این رابطه بهدست میآید  $S_{f}^{r}(\omega) = \frac{r}{\pi} k_{B}T \frac{m_{r}\omega}{o}$ (۴۵)

که در آن  $m_r$  جرم موثر نوسانگر،  $\omega$  بسامد زاویهای ارتعاش، Q سازند کیفیت،  $k_B$  ثابت بولتزمن و T دمای نوسانگر هستند.

بدون از دستدادن کلیت می توان فرض کرد که پهنای باند استفاده شده در خوانش فاز حلقه بسته در مقایسه با ۳- دسیبل پهنای باند نوسانگر بسیار باریک است. در نتیجه برای محاسبهی چگالی نوفهی جابجایی  $S_x^r$  می توان از تابع تبدیل آن  $\frac{Q}{m_r \omega^r}$  استفاده کرد.

میزان نوسانات در بسامد ناشی از این نوف می دامنه، یا همان توان نوفمی بسامد در یک سامانه حلقه بسته از این رابطه بهدست میآید؛

$$S_{\omega}^{r}(\omega) = \left(\frac{\omega}{rQ}\right)^{r} \frac{S_{x}^{r}(\omega)}{P_{.}}$$
(F9)

Q در آن 
$$S_{x}^{r}$$
 چگالی نوف دی جابج ایی،  $\omega$  بس امد نوس ان،  $P_{1}$  میاند کیفیت و  $P_{1}$  توان حامل جابجایی یعنی ریشه مربع  
میانگین دامنه تحریک نوسانگر برابر با  $T_{wmax}^{\dagger}$  است.  
نوف دی الکترونیکی معمولا برای تقویت کننده و مدار  
بازخورد به خوبی شناخته شده است و می توان به راحتی  
آن را در برد عملیاتی مورد نیاز زیر نوف دی زمین طراحی  
کرد [۳۰]. در نتیجه با فرض پهنای باند ۱۱۰ هرتز و با  
انتگرال گیری روی پهنای باند داریم  
(۴۷)  $\sigma_{w} = \sqrt{\int_{0}^{BW} S_{w}^{total}(\omega) d\omega}$   
پس تفکیک پذیری از رابطهی ۴۸ به دست می آید:  
 $\delta_{\gamma} = \frac{\sigma_{w}}{sF_{\gamma}}$   
که در آن  $F_{\gamma} = w_{s} \times \gamma \times Leverage$   
و در آن  $M_{s}$  جرم معیار،  $\gamma$  شاب وارد بر جرم معیار و  
اهرمگی خریب بزرگنمایی اهرمی شتاب سنج هستند.

**جدول ۵** مقایسهی تفکیکپذیری لرزهنگار ارائهشده با نوفه زمین

یواسجی اس<sup>†</sup> در جدول ۵ مقایسه شدهاند.

برمبنای یواسجیاس.

| نوفه يواِسجىاِس             | حسگر طراحیشدہ                     |            |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------|
| $\gamma 	imes \gamma \cdot$ | $r_{A} \times r_{A} \times r_{A}$ | تفکیکپذیری |

## ۴-۷. برد مقیاس کامل

بیشینه شتابی که بدون ایجاد اثرات غیرخطیت در سازوکار خوانش مبتنی بر صفحات موازی می توان اندازه گرفت، به عنوان دامنهی عملکرد شتابسنج در نظر گرفته می شود. دامنهی عملکرد طبق تعریف، دامنه ی شتاب مثبت و منفی است که حسگر می تواند بدون رسیدن به حالت اشباع ردیابی کند.

مطابق شکل حسگر در دامنه ۲ - تا ۴ برابر شتاب گرانش زمین خطی است که برد مقیاس کامل حسگر میباشد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Displacement carrier power

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Resolution

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Leverage

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> USGS; United States Geographical Society

۴–۸. بازه دینامیکی بازه دینامیک نسبت دامنه ورودی حسگر به قدرت تفکیک پذیری آن است که نسبت ورودی - خروجی در آن حفظ می شود و معمولا بر حسب دسی بل بیان می شود. حد بالای بازه ی دینامیک یا دامنه ی عملکرد از حد شروع غیر خطیت شدن به دست می آید که در بخش قبل محاسبه شد. محدوده ی پایینی دامنه ی دینامیک از مجموع تمام فرآیندهای آشوبناک محرک نوسانگر به دست می آید که شامل نوسانات گرمامکانیک، نوفه ی کوانتوم، نوفه ی ناشی شامل نوسانات گرمامکانیک، نوفه ی کوانتوم، نوفه ی ناشی از جذب و واجذب گازها و منابع ذاتی مانند نوف ه ی ارتعاشی و تجهیرات (خوانش) است. با استفاده از تفکیک پذیری و دامنه ی عملکرد که از بخش های قبل به دست آمد، بازه ی دینامیک برای یک مقطع مستطیل شکل از رابطه ی ۵۰ به دست می آید [۲۶]:

$$DR = \Upsilon \cdot \times \log(\frac{\sigma_{v_{\omega}}}{\sigma_{\omega}})$$

$$= \Upsilon \cdot \times \log\left(\frac{\Im g}{\sigma_{\omega}}\right) = \Upsilon \cdot \cdot$$

۴-۸. مقاومت سازهای

سازهی حسگر باید بتواند در برابر تنش ناشی از شتاب واردشده بر جرم معیار مقاومت مکانیکی کافی داشته باشد. با توجه به معیار طراحی در سازه های سیلیکونی [2۵] تنش فن مایسز در سیلیکون باید بیشینه یک گیگاپاسکال و در لایه پیزوالکتریک باید بیشینه ۲۵۰ مگاپاسکال باشد. در بیشینهی شتاب وارد بر حسگر، بیشینهی تنش ایجادشده کم تر از تنش تسلیم است و معیار طراحی برآورده می شود.

**جدول ۶** تنش وارده بر سازهی نوسانگر حسگر در شتاب ۵ برابر شتاب گرانش زمین

| حد مجاز | حسگر طراحیشدہ |   |  |  |  |  |  |  |  |
|---------|---------------|---|--|--|--|--|--|--|--|
| ۱۰۰۰    | ۳۱            | تنش وارد بر سازه سیلیکونی<br>(مگاپاسکال)    |  |  |  |  |  |  |  |
| ۲۵۰     | ١٩٠           | تنش وارد بر لایه پیزوالکتریک<br>(مگاپاسکال) |  |  |  |  |  |  |  |

۵. بهینــهسـازی طراحـی بـا اســتفاده از ولتـاژ پیزوالکتریک متغیر

به منظور افزایش برد دینامیک حسگر بدون کاستن از تفکیک پذیری می توان از اعمال ولتاژ پیزوالکتریک متغیر استفاده کرد. به این شکل که با افزایش شتاب و نیروی محوری در تیر، لایهی پیزوالکتریک هم در جهت مخالف نیرو وارد می کند. این امر منجر به افزایش برد دینامیک و رفتار خطی در نانوتیر خواهد شد زیرا در شتابهای بیش تر امکان اندازه گیری شتاب به وجود می آید.

با اعمال ولتاژ پیزوالکتریک می توان رفتار نوسانگر را در محدوده ی خطی حفظ کرد. به علاوه می توان ولتاژ الکترواستاتیک (برقی ایستایی) اعمالی را کاهش داد چون به این ترتیب در شتابهای کششی بالا دامنه ی نوسان کاهش نمی یابد و نیاز به افزایش ولتاژ الکترواستاتیک (برقی ایستایی) برای دستیابی به دامنه ی ۵ نانومتر نیست. به این ترتیب پاسخ بسامدی و بسامد باز آوایش در تمام شتابها با تغییر ولتاژ پیزوالکتریک مطابق جدول ۷ به اعمال ولتاژ پیزوالکتریک مطابق جدول ۷ امکان اعمال ولتاژ پیزوالکتریک مطابق جدول ۷ امکان دستیابی به برد مقیاس کامل ۵± g به وجود می آید که بیش ترین شتاب اندازه گیری شده در زمین لرزهها است.

جدول ۷ ولتاژ پیزوالکتریک وارده در شتابهای مختلف.

|   | شتاب (g)               | Vp(V)         |
|---|------------------------|---------------|
|   | ۵                      | -•,• <b>Y</b> |
|   | ۲٫۵                    | -•,•۳۵        |
| ſ | ١                      | -•/•1۴        |
| ſ | •                      | •             |
| ſ | - 1                    | •/•14         |
| ſ | $-\Upsilon _{/}\Delta$ | ۰٬۰۳۵         |
| ſ | -δ                     | • / • V       |



شکل ۸ پاسخ بسامدی نوسانگر به ولتاژ تحریک الکترواستاتیک (برقیایستایی) در شتابها و ولتاژهای پیزوالکتریک متغیر.

زمین است که با استفاده از ولتاژ پیزوالکتریک متغیر تا ۵-برابر شتاب زمین قابل افزایش است. حساسیت حسگر ۱۱۴۰۰۰ و سازند کیفیت موثر برابر با ۱۱۴۰۰۰ مگاهرتز است که در پهنای باند ۱۱۰ هرتز با بسامد ۱۱ مگاهرتز نوسان می کند. مقاومت سازهی حسگر در برابر شتاب وارده بررسی شده و با استفاده از ولتاژ وارد بر لایههای پیزوالکتریک دو طرف نوسانگر، مشخصات حسگر بهبود یافته است. نتایج بهدست آمده طبق جدول ۸ نشان میدهند که حسگر طراحی شده در اکثر مشخصه از حسگرهای تجاری عملکرد بهتری دارد. ۶. نتیجهگیری عملکرد یک نانوحسگر مبتنی بر تیر مرتعش با بسامد کاری بالا جهت پایش نوسانات زمین صوتی در دامنه ی فروآوایی، در این مقاله بررسیشده و مشخصههای دینامیکی آن استخراج شدهاند. تیر با تحریک الکترواستاتیک (برقی ایستایی) و خوانش خازنی طراحی شده است. معادلات حرکت با استفاده از اصل همیلتون شده است. معادلات حرکت با استفاده از اصل همیلتون توسعه یافته به دست آمده اند. مشخصات عملکردی به دست آمده از حسگر شامل تفکیک پذیری، پهنای باند، بازه دینامیکی و بازه عملکرد با مشخصات لرزهنگارهای تجاری و تحقیقاتی مقایسه شدهاند.

در بازهی دینامیکی ۲– تا ۵ برابر شتاب گرانش  $Y_1 \wedge \sqrt{Hz}$ 

|                          |                                 |  | 0 (            |              | 0,                  | 0  |                    |  |            |                   |              |
|--------------------------|---------------------------------|--|----------------|--------------|---------------------|--|--------------------|--|------------|-------------------|--------------|
| واحد                     | لرزمنگار ارائه<br>شده           | اِس تىراس <sup>ــ ر</sup><br>[١٧]      | [ఇచ్చ [దిగ]    | هوانگ [۲۴]   | السون [٣٣]          | ژئوتک کااس<br>۲۰۰۰ [۱۶]  | گورالپ-۳تی<br>[۳۲] | لوی [۲٫۱]                              | كومار [٣٦] | نماد              | ۅؚ۬ؿڔٛڲؽ     |
| $m/s^{^{\tau}}/\sqrt{H}$ | $\gamma_{A} \times \gamma_{-9}$ | $\mathbf{r}_{\mathbf{r}}$ 18 × 1 · -11 | 1 ×19          | 1 ×1.        | ۹ ×۱۰ <sup>-۳</sup> | $\mathbf{Y}_{j} \cdot \mathbf{A} \times \mathbf{Y} \cdot \mathbf{A}$ | زير<br>PNLM        | $\Delta \times \iota \cdot \cdot^{-v}$ | ۲ × ۱ ۰ -۹ | $\delta_{\gamma}$ | تفکیکپذیری   |
| kHz/g                    | 8801                            | -                                      | -              | ۲<br>V/(m/s) | ۳,۴                 | -  | -                  | 44.                                    | -          | SFγ               | حساسيت       |
| dB                       | ۲۰۰                             | -                                      | 17.            | 10.          | -                   | -  | -                  | -                                      | -          | DR                | برد دینامیکی |
| Hz                       | 11                              | 1,17.                                  | -•,• ۲۵<br>١•• | ۵۰-۰٬۰۱      | ۲۰۰-۱۰              | ١  | ١,١٢٠              | -                                      | ١٠         | BW                | پهنای باند   |
| -                        | 114                             | -                                      | -              | -            | 5.6.                | -  | -                  | -                                      | 4          | $Q_{EFF}$         | سازند كيفيت  |
| kHz                      | 11.07                           | -                                      | -              | -            | ٨٩٠                 | -  | -                  | -                                      | -          | ω                 | بسامد کاری   |
| Kg                       | $1 \times 1 \cdot _{-1}$ .      | ۵, ۰                                   | ريز            | ريز          | ريز                 | ٧,٧  | 14                 | ريز                                    | ريز        | M <sub>s</sub>    | جرم/مقياس    |

**جدول ۸** مشخصه های عملکردی حسگر شتاب پیشنهادی.

- [5] M.I. Younis, "MEMS Linear and Nonlinear Statics and Dynamics," Springer, 2011.
- [6] N. Kacem, S. Baguet, S. Hentz, R. Dufour, "Computational and quasi-analytical models for non-linear vibrations of resonant MEMS and NEMS sensors," International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 46, no. 3, pp. 532-542, 2011.
- [7] N. Kacem, "Nonlinear Dynamics of M&NEMS Resonant Sensors: Design Strategies for Performance Enhancement," Ph. D. thesis, INSA-Lyon, CEA-LETI, Grenoble, 2010.
- [8] M. Rasekh, S. Khadem, M. Tatari, "Nonlinear behaviour of electrostatically actuated carbon nanotube-based devices,"

## ۷. فهرست منابع

- S. Kumar, "Design and Fabrication of Micromachined Silicon Suspensions," Ph.D Thesis, Imperial College London, 2007.
- [2] J. Peterson, "Observations and Modelling of Background Seismic Noise," U.S. Geological Survey, 1993.
- [3] N. Kasem, "Nonlinear Dynamics of M&NEMS Resonant Sensors: Design Strategies for performance Enhancement," Ph.D Thesis, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2010.
- [4] A.A. Seshia, "Integrated Micromechanical Resonant Sensors for Inertial Measurement Systems," Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 2002.

Downloaded from joasi ir on 2025-09-03

- [23] M. Rasekh, S. Khadem, "Design and performance analysis of a nanogyroscope based on electrostatic actuation and capacitive sensing," Journal of Sound and Vibration, vol. 332, 2013.
- [24] T. Veijola, H. Kuisma, J. Lahdenpera, T. Ryhanen, "Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer," Sensors and Actuators A: Physical Systems, vol. 48, no. 3, pp. 239-248, 1995
- [25] A. Acar, A. Shkel, "MEMS Vibratory Gyroscopes, Structural Approaches to Improve Robustness," Springer, 2009.
- [26] IEEE, "IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology," 2001.
- [27] X. Zou, P. Thiruvenkatanathan, A.A. Seshia, "A seismic-grade resonant mems accelerometer," Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 23, no. 4, 2014.
- [28] M.H. Cyril, A.G. Piersol, "Harris' Shock and Vibration Handbook," McGRAW-HILL, 2002.
- [29] S. Hentz, L. Duraffourg, E. Colinet, "Comparison of capacitive and frequential readout when scaling accelerometers down from micro-to nano-electro mechanical systems," Instrumentation and Detectors, 2012.
- [30] S. Kumar, "Design and Fabrication of Micromachined Silicon Suspensions," Imperial College London, 2007.
- [31] R. Levy, D. Janiaud, J. Guerard, R. Taibi, O.L. Traon, "A 50 nano-g resolution quartz vibrating beam accelerometer," International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS), 2014,
- [32] G. Systems, "Guralp Catalog," 2014.
- [33] R.H. Olsson, J.G. Fleming, K.E. Wojciechowski, M.S. Baker, MR. Tuck, "Post-CMOS compatible aluminum nitride MEMS filters and resonant sensors," IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum., Tokyo, pp. 145-147, 2007.
- [34] W. Huang, S.-R. Kwon, S. Zhang, F.-G. Yuan, X. Jiang, "A trapezoidal flexoelectric accelerometer," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 25, no. 3, pp. 271-277, 2014.
- [35] HP, "HP MEMS Seismic Sensor for Oil and Gas Exploration," 2012.

Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 43, no. 31, 2010.

- [9] S. Azizi, M. Ghazavi, G. Rezazadeh, I. Ahmadian, "Tuning the primary resonances of a micro resonator, using piezoelectric actuation," Nonlinear Dynamics, vol. 76, no. 1, pp. 839-852, 2014.
- [10] X. Zou, A. Seshia, "Non-linear frequency noise modulation in a resonant MEMS accelerometer," IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 13, 2017.
- [11] M. Hassen, H. Ouakad, J. E. AlQasimi, "Comprehensive analytical approximations of the pull-in characteristics of an electrostatically actuated nanobeam under the influences of intermolecular forces," Actuators, vol. 7, 2018.
- [12] C. Oyo Geospace, "Oyo Geospace Catalog," http:// www.oyogeospace.com, 2014.
- [13] Sercel, "Sercel Catalog," 2014.
- [14] Nanometrics, "Nanometrics Catalog," 250 Herzberg Road, Kanata, OntarioK2K 2A1, Canada, 2014.
- [15] G.S. Ltd, "CMG-3," G. S. Ltd, ed., 2014.
- [16] I. Geotech, "CMG-3," 2014.
- [17] D.G. Streckeisen AG, "STS-1 Catalog," 2014.
- [18] H.K. Rockstad, J.K. Reynolds, T.K. Tang, J.K. Reynolds, T.W. Kenny, W.J. Kaiser, T.B. Gabrielson, "A miniature, highsensitivity, electron tunneling accelerometer," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 53, no. 1-3, pp. 227-231, 1996.
- [19] N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi, "Micromachined inertial sensors," Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 8, 1998.
- [20] Y. Suzuki, Y. Tai, "Micromachined highaspect-ratio parylene beam and its application to low-frequency seismometer," in 16th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Kyoto, Japan, 2003.
- [21] S. Azizi, "Parametric excitation of a piezoelectrically actuated system near Hopf bifurcation," Applied Mathematical Modelling, vol. 36, no. 4, pp. 1529-1549, 2012.
- [22] A. Duwel, J. Gorman, M. Weinstein, J. Borenstein, P. Ward, "Experimental study of thermoelastic damping in MEMS gyros," Sensor and Actuators A: Physical, vol. 103, no. 1-2, pp. 70-75, 2003.