

مدلسازی رفتار سیستم میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی در محدوده 1g

منیژه ذاکری^۱، مجید صیامی^۲، سعید لامعی^۳

۱ استادیار دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز، m.zakeri@tabrizu.ac.ir

۲ کارشناس ارشد مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز

۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۰۳

چکیده

در این مقاله رفتار میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی شامل اغتشاش سیستم، حساسیت و مدت زمان پاسخ‌دهی مدلسازی و بهینه‌سازی شده است. همچنین رفتار دینامیکی سیستم برای توابع ورودی شتاب شامل تابع ثابت، ضربه و پله شبیه‌سازی شده است. برای این منظور، ابتدا رفتار سیستم با استفاده از تابع ورودی ثابت شبیه‌سازی و نتایج حاصل با نتایج تجربی دیگر تحقیقات مقایسه و تأیید شده است. در ادامه، با مینیمم‌سازی اغتشاش کلی سیستم، فاصله بهینه بین صفحات خازن به دست آمده است. همچنین حساسیت سیستم با محاسبه مقدار جرم محک با در نظر گرفتن ماکزیمم جابه‌جایی ممکن بین صفحات خازن به‌عنوان قید، به‌طوری‌که بین الکترودها برخوردی رخ ندهد، در حد ماکزیمم افزایش یافته است. طبق نتایج، برای عملکرد بهینه سیستم در مقایسه با نمونه موجود فاصله بین صفحات خازن‌ها به‌میزان ۹۰ درصد کاهش و طول و عرض جرم محک ۴۱/۵ درصد افزایش داده شد. بدین ترتیب، حساسیت سیستم تا دو برابر افزایش و مدت پاسخ زمانی سیستم نیز به‌میزان قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین، نتایج به دست آمده از انتخاب توابع پله و ضربه برای شتاب ورودی نشان می‌دهند که نوع تابع عامل مؤثری در طراحی بر پایه مدل بوده و موجب تغییر مقادیر پارامترهای طراحی و عملکرد پیش‌بینی شده برای سیستم می‌گردد.

واژگان کلیدی

مدلسازی، میکروشتاب‌سنج، حسگر خازنی، حساسیت، اغتشاش

۱. مقدمه

میکروشتاب‌سنج از جمله ابزارهایی است که کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مهندسی همچون ربات‌های خودمتعادل، هواپیماهای

طی سالیان اخیر، ساخت ابزارآلات دقیق و استفاده از حسگرهایی در ابعاد میکرو در حوزه‌های گوناگون رشد یافته است.

بدون سرنشین، سیستم هشدار، سیستم ردیابی، حسگر تراز، ناوبری و کیسه هوای خودرو، پزشکی و زیست‌شناسی دارد. از این ادوات برای اندازه‌گیری مقدار صحیح شتاب استفاده می‌شود و براساس سیستم اندازه‌گیری به‌کار رفته در حسگر، به انواع مختلف خازنی، پیزومقاومتی، پیزوالکتریکی، نوری، حرارتی تقسیم می‌شوند.

میکروشتاب‌سنج‌های نوع خازنی، به‌لحاظ نحوه قرارگیری صفحات خازنی نسبت به هم به سه نوع صفحه‌ای، شانه‌محوری و شانه‌جانبی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این پژوهش، مدل سیستم میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی بررسی و بهینه‌سازی شده است. از مزایای این نوع میکروشتاب‌سنج می‌توان به دقت و حساسیت بالا، عملکرد مناسب در مقابل اغتشاش، تغییر کم پارامترها در طول زمان و کم‌بودن حساسیت در مقابل تغییرات دما اشاره کرد.

میکرو شتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی از یک جرم محک^۱ و دو فنر تشکیل شده است. هر کدام از این فنرها به‌صورت دو تیر u شکل در نظر گرفته می‌شود. مجموعه‌ای از شانه‌های متصل به جرم محک و شانه‌های متصل به قاب اصلی حسگر، خازن‌ها را به‌وجود می‌آورد. شانه‌های جانبی متصل به جرم محک به‌همراه آن جابه‌جا می‌شوند و شانه‌های متصل به بدنه اصلی، ثابت‌اند. هر جفت از شانه‌های ثابت و متحرک، تشکیل یک خازن می‌دهند و دی‌الکتریک این خازن‌ها هواست. اساس کار این نوع حسگر بر پایه تغییر فاصله بین شانه‌های ثابت و متحرک به‌عنوان الکترودهای خازن است. به این‌صورت که تغییر فاصله، موجب تغییر ظرفیت خازن‌ها و در نتیجه ولتاژ خروجی سیستم می‌شود. با اندازه‌گیری اختلاف ولتاژ اولیه و نهایی در خروجی سیستم، می‌توان شتاب وارده را محاسبه کرد. اختلاف ظرفیت خازن بین شانه‌های ثابت متصل به دیواره قاب میکروشتاب‌سنج و مجموعه‌ای از شانه‌هایی که به جرم لرزه‌ای متصل‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. با تحلیل تغییر ظرفیت خازن‌ها نهایتاً شتاب وارده بر میکرو حسگر محاسبه می‌شود.

مدلسازی میکروشتاب‌سنج و تحلیل پاسخ دینامیکی آن جهت بهینه‌سازی حساسیت و بازده سیستم، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ تحقیقات فراوانی نیز در این حوزه انجام شده است. آنسل روش المان محدود را به‌عنوان روش جهانی و عمومی برای آنالیز میکروشتاب‌سنج‌ها معرفی و روش محاسبه پاسخ استاتیکی و

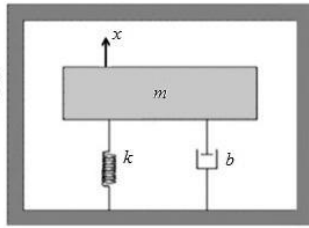
دینامیکی سیستم شتاب‌سنج را بیان کرد [۱]. تران و همکاران افزایش بازده در میکروشتاب‌سنج سیلیکونی پیزومقاومتی سه درجه آزادی را بررسی کردند. بدین منظور، به مقادیر بالای دقت تفکیک‌پذیری و حساسیت نیاز بود که این نتیجه با بهینه‌سازی حساسیت ضریب گرمایی پیزو، اغتشاش، مصرف انرژی، و عمق نقاط اتصال به‌دست آمد [۲]. ژانگ و همکاران مشخصه‌های ساختار و اصول کار میکروشتاب‌سنج ارتعاشی و معادلات تعادل نیرو برای جرم محک را در حالت‌های با شتاب و بدون شتاب ارائه کردند [۳]. کوکس معادله بین نرخ افزایش ابعاد تیر و کمترین فرکانس ویژه در یک میکروشتاب‌سنج خازنی را به‌دست آورد. او همچنین اطلاعاتی را برای انتخاب بهینه ابعاد هندسی تیر میکروشتاب‌سنج ارائه نمود [۴]. سان و همکاران روش‌های مختلف بهبود حساسیت شتاب‌سنج خازنی را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه این پژوهش افزایش حساسیت خازن به میزان ۸۰ درصد به ازای افزایش ۲۰ درصد در مقدار جرم محک است [۵].

در این مقاله رفتار سیستم میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی مدلسازی و بررسی شده است. برای این منظور، نخست مدل الکترومکانیکی سیستم ارائه می‌شود که در آن رفتار دینامیکی، تغییر ظرفیت خازن‌ها، حساسیت و اغتشاش سیستم مطالعه و تحلیل شده است. سپس مقادیر بهینه پارامترهای سیستم انتخاب و رفتار دینامیکی سیستم در وضعیت بهینه شبیه‌سازی می‌شود. همچنین، با توجه به اینکه در تحقیقات موجود شتاب و در نتیجه نیروی وارد بر سیستم ثابت فرض شده و اهمیت مدت زمان پاسخ سیستم بررسی نشده است، و از طرفی در حالت واقعی شتاب وارد بر سیستم لحظه‌ای است، رفتار سیستم براساس نیروی ورودی سیستم به شکل تابع پله و تابع ضربه نیز بررسی می‌شود.

۲. مدلسازی الکترومکانیکی میکروشتاب‌سنج

در شکل ۱ ساختار کلی میکروشتاب‌سنج خازنی نمایش داده شده است. در این حسگر، جرم محک توسط چهار تیر u شکل معلق است و سختی کل سیستم برابر k می‌باشد [۶]. این نوع میکروشتاب‌سنج از نوع تک‌محوره است و شتاب وارده در جهت محور x را اندازه‌گیری می‌کند. وقتی شتاب و در نتیجه آن نیرویی بر حسگر وارد می‌شود، جرم محک حرکت می‌کند و به این ترتیب فاصله هوایی نیمی از خازن‌ها کاهش و فاصله هوایی سایر خازن‌ها افزایش می‌یابد. این جابه‌جایی سبب تغییر ظرفیت خازن‌ها

است [۷]. فنر و میراکننده به دلیل جابه‌جایی یکسان به صورت موازی در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۲. مدل دینامیکی میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی

$$x = \frac{F}{k} \quad (4)$$

فرکانس طبیعی سیستم نیز از معادله ۵ به دست می‌آید:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

در حالت اولیه؛ یعنی حالتی که شتاب یا نیروی خارجی بر سیستم اعمال نمی‌شود، جرم محک در حالت تعادل بوده و ظرفیت اولیه خازن‌ها ثابت است. مجموع ظرفیت اولیه خازن‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲].

$$C_0 = \frac{\epsilon l t}{d} N \quad (6)$$

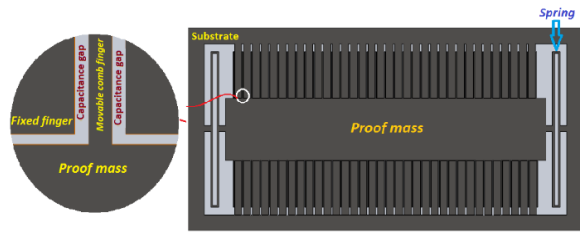
به طوری که در این رابطه C_0 ظرفیت کل خازن‌ها قبل از اعمال شتاب ورودی، N تعداد شانه‌ها، l طول شانه‌ها، t برابر ضخامت شانه‌ها، d فاصله صفحات خازن و ϵ ضریب گذردهی هواست [۷]. با اعمال شتاب بر حسگر و جابه‌جایی جرم محک و در نتیجه تغییر فاصله صفحات خازن‌ها، ظرفیت آنها از معادلات ۷ و ۸ به دست می‌آید [۱۳].

$$C_1' = \frac{\epsilon l t}{d+x} N \quad (7)$$

$$C_2' = \frac{\epsilon l t}{d-x} N \quad (8)$$

به طوری که x جابه‌جایی جرم محک پس از اعمال شتاب و C_1' مجموع ظرفیت خازن‌هایی است که با اعمال نیروی خارجی فاصله صفحات آنها افزایش یافته است. همچنین C_2' مجموع ظرفیت خازن‌هایی است که فاصله صفحات آنها کاهش یافته است. نهایتاً تغییر ظرفیت خازن‌ها که موجب تغییر ولتاژ خروجی حسگر می‌شود، از معادله ۹ به دست می‌آید.

می‌شود. در شکل ۲ مدل دینامیکی ساده میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی شامل جرم، فنر معادل و میراکننده نمایش داده شده



شکل ۱. ساختار کلی میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی

بر اساس مدل شکل ۲، معادله دینامیکی سیستم به شکل ۱ به دست می‌آید [۸].

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = -F = ma \quad (1)$$

به طوری که در این رابطه m جرم محک، b ضریب میرایی، k ضریب سختی فنر، F نیروی خارجی وارده بر حسگر و x جابه‌جایی جرم محک است. در بیشتر تحقیقات پیشین، میرایی ناشی از وجود هوا یا سیال موجود در شتاب‌سنج در نظر گرفته نشده است. با توجه به اینکه ابعاد حسگر در مقیاس میکرومتری است، لذا هوای محبوس شده در سیستم موجب میرایی می‌شود [۹]. در میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی، ضریب میرایی هوا از معادله ۲ به دست می‌آید [۱۰].

$$b = N \left(7.2 \mu l \left(\frac{t}{d} \right)^3 \right) \quad (2)$$

به طوری که در این رابطه N تعداد شانه‌ها، l طول الکترودها، t ضخامت الکترودها، d فاصله بین صفحات خازن‌ها و μ لزجت دینامیکی هواست که برابر $1/16 \times 10^{-11}$ کیلوگرم بر متر ثانیه می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد، سیستم میکروشتاب‌سنج دارای دو فنر نگهدارنده جرم است که با استفاده از چهار تیر u شکل مدلسازی می‌شوند (شکل ۱) و هر کدام سهم یکسانی در سختی سیستم دارند. برای به دست آوردن سختی فنرها از مدل تیر یکسر گیردار استفاده می‌شود. نهایتاً سختی سیستم فنرها از معادله ۳ به دست می‌آید [۱۱]. در این رابطه، E مدول یانگ، t ضخامت فنر، w عرض فنر و L طول تیرهای تکیه‌گاهی است.

$$k = 2Et \left(\frac{w}{L} \right)^3 \quad (3)$$

مقدار جابه‌جایی نهایی سیستم از معادله ۴ به دست می‌آید.

$$\Delta C = C_1' - C_2' = 2x \frac{C_0}{d} \quad (9)$$

در طراحی میکرو حسگر باید میزان حساسیت حسگر زیاد باشد تا سیستم واکنش مطلوبی نسبت به شتاب‌های وارده کوچک نشان دهد. بنا بر تعریف، حساسیت سیستم شتاب‌سنج برابر با تغییرات ظرفیت خازن بر شتاب ورودی است [7].

$$S = \frac{\Delta C}{a} \rightarrow S = \frac{2C_0}{d} \left(\frac{M}{k} \right) \quad (10)$$

با توجه به معادله ۱۰، حساسیت سیستم تحت تأثیر پارامترهای جرم محک، ضریب سختی فنر، فاصله صفحات خازن و ظرفیت خازن در حالت استاتیکی C_0 قرار دارد. پارامتر دیگری که در طراحی میکروشتاب‌سنج حائز اهمیت است، مقدار اغتشاش کلی سیستم است که از برآیند اغتشاش مکانیکی^۲ و اغتشاش الکتریکی^۳ به دست می‌آید. اغتشاش مکانیکی به سبب حرکت براونی ذرات هوای محبوس در داخل سیستم به وجود می‌آید و از معادله ۱۱ به دست می‌آید [۱۱].

$$BNEA = \frac{\sqrt{4k_b T b}}{M} \quad (11)$$

در این رابطه k_b ثابت بولتزمن و برابر با 1.38×10^{-23} است. همچنین T دمای مطلق، m جرم محک و b ضریب میرایی می‌باشند [7]. اغتشاش الکتریکی به واسطه مدارهای موجود در سیستم به وجود می‌آید و به حساسیت خازن‌ها بستگی دارد و به شکل معادله ۱۲ است [۷، ۹].

$$CNEA = \frac{\Delta C_{\min}}{S} \quad (12)$$

در این رابطه ΔC_{\min} کمترین تغییرات ظرفیت خازن‌هاست. با افزایش فاصله بین صفحات خازن‌ها اغتشاش الکتریکی افزایش و اغتشاش مکانیکی کاهش می‌یابد. لذا مقدار فاصله d باید به گونه‌ای انتخاب شود که مقادیر اغتشاش مکانیکی و اغتشاش الکتریکی در بهینه‌ترین حالت باشند [۹]. برای تعیین فاصله بهینه صفحات خازن‌ها، از اغتشاش کلی^۴ استفاده می‌گردد که برآیند اغتشاش مکانیکی و اغتشاش الکتریکی بوده و به صورت ۱۳ تعریف می‌گردد [۱۱].

$$TNEA = \sqrt{BNEA^2 + CNEA^2} \quad (13)$$

مدت زمان پاسخ سیستم تابعی از ضریب میرایی بحرانی b_{cr} و ضریب میرایی b است. ضریب میرایی بحرانی و نسبت میرایی ξ از معادلات ۱۴ و ۱۵ به دست می‌آید [۱۴].

$$b_{cr} = 2m\omega_n \quad (14)$$

$$\xi = \frac{b}{b_{cr}} \quad (15)$$

به طوری که m جرم محک و b ضریب میرایی سیستم است. مدت زمان واکنش از معادله ۱۶ به دست می‌آید [۱۴].

$$T = \frac{1}{4f_n \xi} \quad (16)$$

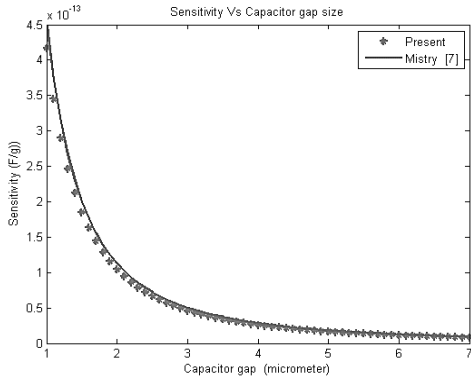
۳. شبیه‌سازی عملکرد سیستم تحت ورودی ثابت

در این بخش، ابتدا رفتار سیستم با استفاده از مقادیر نامی موجود در جدول ۱ و مطابق مقادیر موجود [7] شبیه‌سازی شده، سپس ابعاد هندسی با هدف افزایش حساسیت و کاهش اغتشاش بهینه‌سازی می‌شود. مقادیر فرکانس طبیعی (از معادله ۵)، ضریب میرایی (از معادله ۲) و سختی کل سیستم (از معادله ۳) براساس مقادیر نامی، به ترتیب برابر ۲ کیلوهرتز $10^{-11} \times 9/72$ نیوتن ثانیه بر متر و $3/1$ نیوتن بر متر به دست می‌آیند. در شکل ۳ نمودار تغییرات جابه‌جایی جرم محک نسبت به زمان پس از اعمال شتاب ورودی معادل شتاب گرانش ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان جابه‌جایی نهایی برابر 64 نانومتر است که پس از مدت زمانی در حدود 800 ثانیه سیستم به حالت پایدار رسیده است.

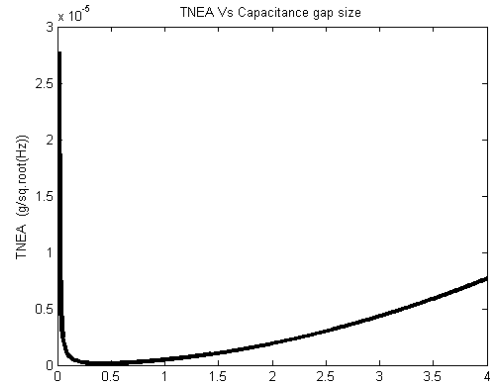
جدول ۱. مقادیر نامی پارامترهای سیستم

مقادیر	پارامترها
۲۰۰۰ میکرومتر	طول جرم محک
۴۰۰ میکرومتر	عرض جرم محک
۱۰ میکرومتر	ضخامت جرم محک
۴۰۰ میکرومتر	طول فنرها
۸ میکرومتر	عرض فنرها
۳۰۰ میکرومتر	طول شانه‌ها
۵ میکرومتر	عرض شانه‌ها
۲۸۰ میکرومتر	طول الکترودها
۳ میکرومتر	فاصله صفحات خازن‌ها
۷۰	تعداد الکترودها

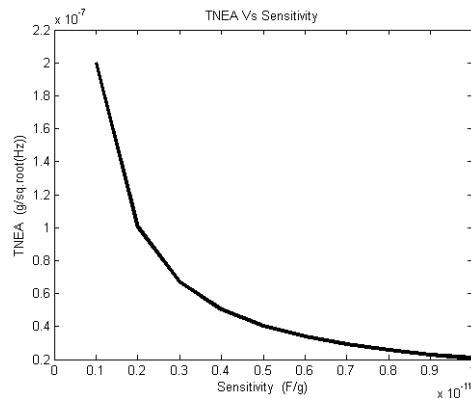
در شکل ۴ نمودار تغییرات ظرفیت خازن‌ها نسبت به تغییرات شتاب، نشان داده شده است. نمودارها با استفاده از مقادیر نامی و



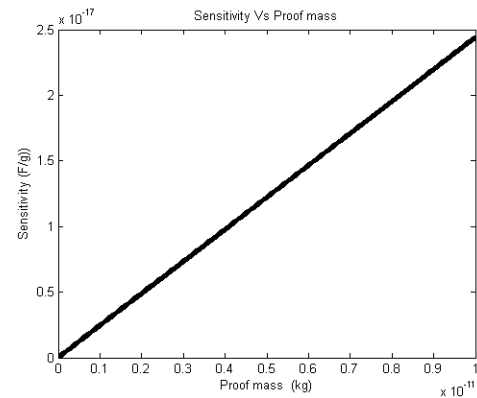
شکل ۸. تغییرات حساسیت نسبت به فاصله صفحات خازن‌ها



شکل ۷. تغییرات اغتشاش کل سیستم نسبت به فاصله صفحات خازن‌ها



شکل ۱۰. نمودار اغتشاش کل معادل نسبت به تغییرات حساسیت



شکل ۹. حساسیت نسبت به تغییرات جرم محک با استفاده از پارامترهای نامی

مشاهده می‌شود، با افزایش حساسیت اغتشاش کل معادل کاهش می‌یابد که موجب بهبود کارایی سیستم می‌گردد. در مجموع پس از بهینه‌سازی تغییرات عمده‌ای در مقادیر پارامترهای طراحی به‌وجود می‌آید که شامل موارد زیر است:

۱. فاصله صفحات خازن‌ها از ۳ میکرومتر به ۰/۳ میکرومتر کاهش می‌یابد. در این نقطه، مقدار نوفه کل نسبت به مقدار اولیه به میزان ۹۵ درصد کاهش نشان می‌دهد.
۲. با استفاده از نمودار تغییر حساسیت نسبت به جرم، طول جرم محک از ۲۰۰۰ میکرومتر به ۲۸۳۰ میکرومتر و عرض جرم محک از ۴۰۰ میکرومتر به ۵۶۵ میکرومتر افزایش می‌یابد. مقادیر بهینه پارامترهای هندسی در جدول ۲ ارائه شده است.

در شکل ۱۱ نمودار جابه‌جایی نسبت به زمان برای شتاب ورودی معادل جاذبه g و براساس مقادیر بهینه نمایش داده شده است. میزان جابه‌جایی نهایی جرم محک به حدود ۱۰۹ نانومتر رسیده که افزایشی برابر ۷۰ درصد دارد. همچنین مشاهده می‌شود

پس از انتخاب فاصله مناسب صفحات، تأثیر بهینه‌سازی اغتشاش کلی معادل بر حساسیت سیستم بررسی شده است. حساسیت میکروشتاب‌سنج به پارامترهایی چون جرم محک، فاصله صفحات بین خازن‌ها و ضریب سختی فنر بستگی دارد. جهت بهبود حساسیت سیستم، مناسب‌ترین مقدار برای جرم محک بایستی انتخاب گردد. نمودار تغییرات حساسیت نسبت به مقدار جرم محک در شکل ۹ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که حساسیت سیستم با افزایش مقدار جرم محک رابطه مستقیم دارد. از اینرو تنها قید موجود، امکان برخورد الکترودهای خازن با افزایش جرم محک و در نتیجه میزان جابه‌جایی آن در اثر شتاب وارده خواهد بود که باید مورد توجه قرار گیرد. طبق معادلات موجود و با در نظر گرفتن مقادیر نامی، تغییرات ابعاد جرم محک با فرض ضخامت ثابت ویفر سیلیکون در طول و عرض برابر ۴۱/۵ درصد به‌دست می‌آید. از طرفی اغتشاش کل معادل با افزایش حساسیت ناشی از افزایش مقدار جرم محک دچار تغییر خواهد شد. نمودار تغییرات اغتشاش کل معادل نسبت به تغییرات حساسیت در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌گونه که

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی

مقدار بهینه	مقدار نامی	متغیرها
$3/88 \times 10^{-7}$	$9/72 \times 10^{-11}$	ضریب میرایی (نیوتن ثانیه بر متر)
۳/۱	۳/۱	ضریب سختی فنر (نیوتن بر متر)
$9/1 \times 10^{-12}$	$4/55 \times 10^{-14}$	حساسیت (F/g)
$8/74 \times 10^{-8}$	$4/3 \times 10^{-6}$	اغتشاش کل (g/sqrt(Hz))
۱۵۲۵/۲	۲۰۰۰	فرکانس طبیعی (هرتز)

نهایتاً مقدار تغییر ظرفیت خازن‌ها تحت شتاب ورودی معادل شتاب گرانش، با استفاده از مقادیر بهینه برابر $9/6689 \times 10^{-12}$ فراد به‌دست می‌آید.

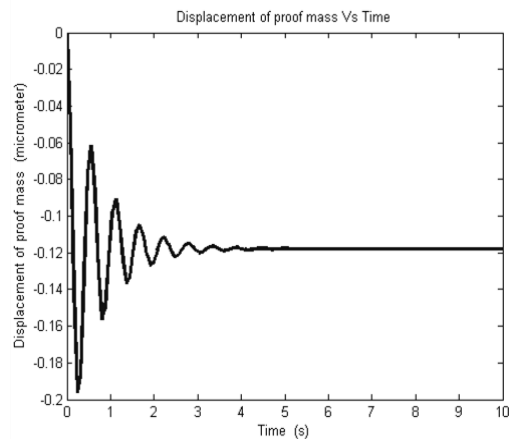
۴. شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم تحت تابع ورودی ضربه و پله

در این قسمت از شبیه‌سازی، رفتار حسگر با فرض اعمال شتاب به سیستم به شکل توابع ضربه و پله بررسی می‌شود. در حالت اول فرض شده است که در لحظه $t=0$ سیستم تحت تابع ورودی ضربه معادل با نیروی وزن قرار بگیرد. با استخراج نمودار جابه‌جایی نسبت به زمان در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که برای مقادیر بهینه، سیستم پس از ۴ ثانیه میرا می‌شود در صورتی‌که برای مقادیر نامی سیستم پس از مدت زمان بسیار زیاد میرا می‌گردد.

طبق نمودار شکل ۱۲، ماکزیمم جابه‌جایی جرم محک در حدود $0/04$ میکرومتر بوده و رفتار سیستم در مقایسه با فرض اعمال شتاب ثابت بسیار متفاوت و قابل توجه است که بایستی در طراحی حسگر مدنظر قرار گیرد. بیشترین جابه‌جایی جرم محک در لحظه شروع حرکت مشاهده می‌شود که ناشی از فرض اعمال نیرو به صورت لحظه‌ای در لحظه $t=0$ است و سپس سیستم به صورت آزاد ارتعاش می‌کند. به‌علاوه، در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که بیشینه جابه‌جایی برای مقادیر نامی تقریباً دو برابر مقادیر بهینه است و ممکن است برای ضربه‌های بزرگتر سیستم پاسخ مناسبی در حالت نامی ندهد.

با توجه به اینکه با فرض تابع ورودی ضربه، جرم محک نهایتاً پس از ارتعاشات متمادی در $x=0$ متوقف می‌شود، لذا از بیشینه جابه‌جایی جرم محک در طول مدت ارتعاش برای به‌دست آوردن تغییرات ظرفیت خازن‌ها و ماکزیمم ولتاژ خروجی استفاده شده

که حرکت جرم محک تقریباً پس از حدود ۵ ثانیه میرا می‌شود که در مقایسه با بسیار کاهش یافته است. با مطالعه رفتار سیستم در برابر اعمال شتاب ورودی معادل جاذبه g ، و نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها براساس مقادیر نامی و بهینه پارامترها، مشاهده می‌شود که تغییرات قابل توجهی در مدت زمان لازم جهت میراشدن سیستم و در نتیجه پاسخ سیستم به‌وجود آمده است. میرایی سیستم با استفاده از مقادیر بهینه نسبت به مقادیر نامی به‌میزان قابل توجهی بهبود یافته است که برای سیستم میکروشتاب‌سنج بسیار حائز اهمیت می‌باشد. نتایج کلی شبیه‌سازی‌ها براساس مقادیر نامی و بهینه پارامترها در جدول ۳ با هم مقایسه شده‌اند.



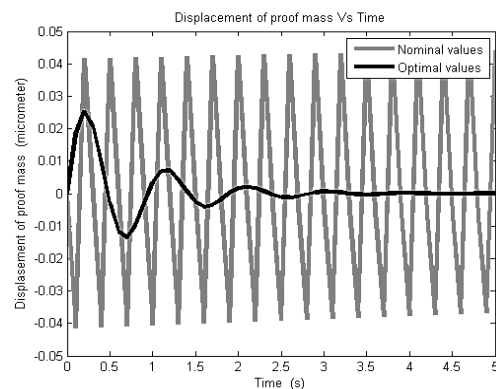
شکل ۱۱. نمودار جابه‌جایی نسبت به تغییرات زمان برای شتاب g با استفاده از مقادیر بهینه

جدول ۲. مقادیر بهینه پارامترهای سیستم

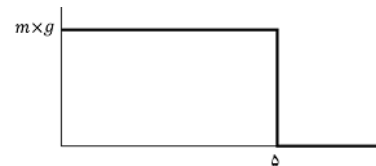
پارامترها	مقادیر
طول جرم محک	۲۸۳۰ میکرومتر
عرض جرم محک	۵۶۵ میکرومتر
ضخامت جرم محک	۱۰ میکرومتر
طول فنرها	۴۰۰ میکرومتر
عرض فنرها	۸ میکرومتر
طول شانه‌ها	۳۰۰ میکرومتر
عرض شانه‌ها	۵ میکرومتر
طول الکترودها	۲۸۰ میکرومتر
فاصله صفحات خازن‌ها	$0/3$ میکرومتر
تعداد الکترودها	۷۰

است. تغییرات ظرفیت خازن‌ها برای مقادیر نامی و بهینه به‌ترتیب برابر $5/1931 \times 10^{-14}$ فاراد و $2/9822 \times 10^{-12}$ فاراد به‌دست می‌آید. لذا تغییر ظرفیت خازن‌ها برای حالت بهینه بیشتر از حالت نامی است که دقت و حساسیت بالای سیستم در حالت بهینه را نشان می‌دهد.

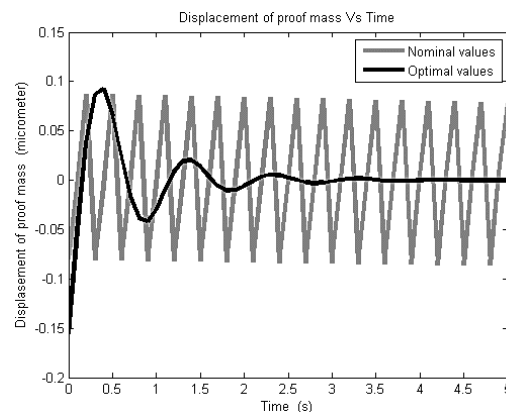
حال فرض می‌شود که سیستم تحت تأثیر نیروی ورودی به‌صورت تابع پله مطابق شکل ۱۳ قرار بگیرد. در ادامه با فرض اعمال نیروی $F_0 = mg$ به مدت ۵ ثانیه، نمودار جابه‌جایی جرم محک نسبت به زمان استخراج شده است.



شکل ۱۲. نمودار جابه‌جایی نسبت به تغییرات زمان تحت شتاب ضربه نمودار از مقادیر نامی و بهینه



شکل ۱۳. نمودار تابع پله نیروی ورودی سیستم نسبت به زمان



شکل ۱۴. نمودار جابه‌جایی نسبت به زمان تحت شتاب ورودی پله با استفاده از مقادیر نامی و بهینه

همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، با استفاده از مقادیر بهینه سیستم تقریباً پس از $3/5$ ثانیه میرا می‌گردد، اما براساس پارامترهای نامی، جرم محک مدت زمان بسیار زیادی برای میراشدن نیاز دارد. از طرفی احتمال دارد سیستم دچار پدیده ضربه‌ای شود که بسیار مخرب است.

طبق نمودار شکل ۱۴، اختلاف جابه‌جایی جرم محک و رفتار سیستم در مقایسه با فرض اعمال شتاب ثابت بسیار متفاوت و قابل توجه است که بایستی در حین طراحی حسگر مد نظر قرار گیرد. همچنین با محاسبات انجام‌شده، مقادیر ظرفیت خازن‌ها برای مقادیر نامی و بهینه به‌ترتیب برابر $7/47 \times 10^{-14}$ فاراد و $6/69 \times 10^{-14}$ فاراد می‌باشد. مشاهده می‌گردد که تغییرات ظرفیت خازن‌ها با استفاده از مقادیر بهینه بزرگتر از مقادیر به‌دست آمده براساس مقادیر نامی می‌باشد که بیانگر حساسیت بالای سیستم بهینه شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی مدلسازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شد. ساختار میکروشتاب‌سنج خازنی شانه‌جانبی از یک جرم محک و چهار تیر II شکل تشکیل شده است. مجموعه‌ای از شانه‌های متصل به جرم محک و متصل به قاب اصلی حسگر، خازن‌ها را به‌وجود می‌آورد. شانه‌های جانبی متصل به جرم محک به‌همراه آن جابه‌جا می‌شوند و شانه‌های متصل به بدنه اصلی ثابت‌اند. اساس کار این نوع حسگر بر پایه تغییر فاصله بین شانه‌های ثابت و متحرک به‌عنوان الکترودهای خازن است. به این‌صورت که تغییر فاصله، موجب تغییر ظرفیت خازن‌ها و در نتیجه ولتاژ خروجی سیستم می‌شود. با اندازه‌گیری اختلاف ولتاژ اولیه و نهایی در خروجی سیستم، می‌توان شتاب وارده را محاسبه کرد. در طراحی میکروشتاب‌سنج‌ها پارامترهای هندسی می‌بایست به‌گونه‌ای انتخاب گردد که حساسیت سیستم افزایش یابد و اغتشاش کلی سیستم و همچنین مدت زمان واکنش مینیمم شود. بدین منظور، در این مقاله سیستم از نظر اغتشاش کل معادل بهینه‌سازی شد. طبق نتایج، فاصله صفحات خازن‌ها از 3 میکرومتر به $0/3$ میکرومتر کاهش، طول جرم محک از 2000 میکرومتر به 2830 میکرومتر و عرض جرم محک از 400 میکرومتر به 565 میکرومتر افزایش یافت. تغییرات مذکور موجب افزایش حساسیت سیستم از مقدار اولیه $4/463 \times 10^{-14}$

سیستم اعمال می شود، اما برای تابع پله به مدت ۵ ثانیه و برای تابع ضربه به صورت لحظه‌ای در نظر گرفته می‌شود. با فرض یکسان بودن مقدار نیروی وارده در سه حالت، جابه‌جایی ماکزیمم برای حالت نیرو ثابت معادل $0/2$ میکرومتر، برای حالت پله معادل $0/1$ میکرومتر و برای تابع ضربه معادل $0/3$ میکرومتر به دست آمده است. میزان جابه‌جایی با توجه به مدت زمان اعمال نیرو، در حالت شتاب ورودی ثابت بزرگتر از مقادیر به دست آمده برای توابع پله و ضربه است. طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها، با فرض اعمال تابع شتاب ورودی به شکل توابع ضربه و پله، اختلاف به دست آمده برای جابه‌جایی جرم محک و رفتار سیستم در مقایسه با فرض اعمال شتاب ثابت بسیار متفاوت و قابل توجه است که بایستی در حین طراحی حسگر مد نظر قرار گیرد.

فاراد بر شتاب جاذبه زمین به مقدار نهایی $9/1 \times 10^{-12}$ فاراد بر شتاب جاذبه زمین شد.

نوفه کل معادل سیستم از $4/3 \times 10^{-6}$ به $8/74 \times 10^{-8}$ کاهش داده شد. نتایج نشان می‌دهد که دقت و حساسیت سیستم در حالت بهینه دو برابر حالت نامی است. علاوه بر آن، با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته شتاب ورودی و در نتیجه نیروی وارد بر سیستم ثابت فرض شده، در صورتی که در حالت واقعی شتاب وارد بر سیستم بصورت لحظه‌ای می‌باشد، لذا در این مقاله رفتار سیستم بر اساس نیروی ورودی سیستم به شکل تابع پله و ضربه نیز مطالعه و تحلیل شد. در هر سه حالت با توابع شتاب ثابت، پله و ضربه، شتاب وارد بر سیستم برابر g فرض شده است. مدت زمان اعمال شتاب برای حالت شتاب ثابت در تمام مدت زمان ارتعاش

۶. مأخذ

- [1] Ansel, Y., B. Romanowicz, P. Renaud, G. Schröpfer. "Global model generation for a capacitive silicon accelerometer by finite-element analysis." *Sensors and Actuators A: Physical* 67 (1998): 153-158.
- [2] Tran, T. D., D. V. Dao, T. T. Bui, L. T. Nguyen, T. P. Nguyen, S. Susumu. "Optimum design considerations for a 3-DOF micro accelerometer using nanoscale piezoresistors." Paper presented at the 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Sanya, China, January 6-9, 2008.
- [3] Zhang, F., X. He, Zh. Shi, W. Zhou. "Structure Design and Fabrication of Silicon Resonant Micro-accelerometer Based on Electrostatic Rigidity." Paper presented at the World Congress on Engineering, London, UK, July 1-3, 2009.
- [4] Kovács, Á., Z. Vízváry. "Structural parameter sensitivity analysis of cantilever- and bridge-type accelerometers." *Sensors and Actuators A: Physical* 89 (3) (2001): 197-205.
- [5] Sun, C., C. Wang, W. Fang. "On the sensitivity improvement of CMOS capacitive accelerometer." *Sensors and Actuators A: Physical* 141 (2008): 347-352.
- [6] Gad-el-Hak, M., *the MEMs handbook*, New York: CRC Press, 2002.
- [7] Kumar Mistry, K., S. Siddhartha. "Design of an SOI-MEMS high resolution capacitive type single axis accelerometer." *Microsystem Technology* 16 (2010): 2057-2066.
- [8] Park, K., C. Lee, H. Jang, Y. Oh, B. Ha. "Capacitive type surface- micromachined silicon accelerometer with stiffness tuning capability." *Sensors and Actuators A: Physical* 73 (1999): 109-116.
- [9] Vakili Amini, B., "Micro-gravity capacitive silicon-on-insulator accelerometers." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005): 2113-2120.
- [10] Baharodimehr, A., H. Sadeghi. "Capacitive MEMS accelerometer wide range modeling using artificial neural network." *Journal of Applied Research and Technology* 7 (2009): 185-192.
- [11] Badariah, B. "Mechanical sensitivity enhancement of an area-changed capacitive accelerometer by optimization of the device geometry." *Analog Integrated Circuits and Signal Processing* 44 (2005): 175-183.
- [12] Farahan, H. "Design, Fabrication and analysis of micromachined high sensitivity and 0% cross-axis sensitivity capacitive accelerometers." *Microsystem technologies* 15 (2009): 1815-1826.

[13] Dowhań, L., A. Wymysłowski, S. Kaliciński, P. Janus. "Numerical prototyping methods in microsystem accelerometers design."

Microelectronics Reliability 51 (2011): 1276-1282.

[14] Rao, S. S., *Mechanical Vibration*. New York: Prentice-Hall, 2010.

پی نوشت

-
1. proof mass
 2. Brownian noise equivalent of acceleration
 3. Circuit noise equivalent of acceleration
 4. Total noise equivalent of acceleration (TNEA)