



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Numerical analysis of the effects of base and electrode dimensions on the electrostatic response of the micromirrors using square and circular electrodes

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Farhad Rezvannezhad*

Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Ali Amiri Jaghargh

Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Mazdak Radmalekshahi

Electrical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

* Correspondence

f.rezvannezhad@razi.ac.ir

Postal Code: 6717914169

Phone: 08337220879

Fax: 08337220879

Article History

Received: 25 May 2026

Accepted: 15 Jun 2026

ePublished: 16 Jun 2026

ABSTRACT

In this study, the effect of the geometric dimensions of the spiral-shaped base of a micromirror on its maximum displacement and response time under electrostatic excitation was numerically investigated. The influence of electrode size and shape was also analyzed. An array of 16 square and circular electrodes was used, with a potential difference of one volt applied. Results indicate that increasing the handle length from 400 to 440 μm leads to a 17% and 15% rise in displacement and response time for square electrodes, and 33% and 12% for circular electrodes. When the handle width increases from 10 to 30 μm , displacement and response time decrease by 59% and 30% for square electrodes, and by 64% and 25% for circular ones. Overall, using a square electrode instead of a circular one yields greater maximum displacement and shorter response time. Moreover, by increasing the electrode side or diameter from 40 to 80 μm , depending on the base dimensions, the micromirror's maximum displacement increases by approximately two to three times.

Keywords: Micromirror; Electrostatic Force; Micro Electro Mechanical Device; MEMS.

مطالعه عددی تاثیر ابعاد پایه و الکتروود در پاسخ آینه میکروالکترومکانیکی به تحریک الکترواستاتیکی توسط الکترودهای مربعی و دایروی

فرهاد رضوان‌نژاد*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

علی امیری جاغرق

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

مزدک رادمکشاهی

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

در این مطالعه اثر ابعاد هندسی پایه مارپیچ شکل یک میکروآینه بر حداکثر جابجایی و پاسخ زمانی آن، طی تحریک الکترواستاتیکی به صورت عددی بررسی شده است. همچنین اثر ابعاد الکتروود و شکل آن نیز مطالعه شده است. به این منظور از یک آرایه ۱۶ تایی از الکترودهای مربعی و دایروی استفاده شده است که اختلاف پتانسیل یک ولت به آن اعمال می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش طول دستک پایه از ۴۰۰ به ۴۴۰ میکرومتر، برای الکتروود مربعی جابجایی و زمان پاسخ به ترتیب ۱۷ و ۱۵ درصد، و برای الکتروود دایروی به ترتیب ۳۳ و ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش عرض دستک از ۱۰ به ۳۰ میکرومتر، جابجایی و زمان پاسخ در الکتروود مربعی به ترتیب ۵۹ و ۳۰ درصد، و در الکتروود دایروی به ترتیب ۶۴ و ۲۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. در مجموع در صورت

استفاده از الکتروود مربعی بجای الکتروود دایروی حداکثر جابجایی میکروآینه افزایش و زمان پاسخ آن کاهش می‌یابد. با افزایش ضلع/قطر الکتروود از ۴۰ به ۸۰ میکرومتر، بسته به ابعاد پایه، حداکثر جابجایی میکروآینه بین دو تا سه برابر افزایش پیدا می‌کند.

کلید واژه‌ها

میکروآینه، نیروی الکترواستاتیک، ابزار میکروالکترومکانیکی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

* نویسنده مسئول: f.rezvannezhad@razi.ac.ir

۱ مقدمه

میکروآینه‌ها یکی از ابزارهای مهم و کاربردی در زمینه‌های مختلف صنعت می‌باشند که بر پایه ابزار الکترومکانیکی عمل می‌کنند [۱]. ویژگی اصلی این آینه‌ها این است که با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی می‌توان زاویه سطح میکروآینه را تغییر داد. این جابه‌جایی، به‌عنوان مثال، می‌تواند باعث تغییر جهت بازتابش نور شود. با توجه به اینکه در ساختارهای مکانیکی معمول، امکان چرخش و جابه‌جایی آینه در گام‌های بسیار کوچک وجود ندارد، میکروآینه‌ها مشکل جابه‌جایی دقیق سطح آینه را حل کرده و حوزه جدیدی از کاربردها را پیش روی بشر گشوده‌اند [۲].

آینه‌های میکروالکترومکانیکی براساس نوع حرکت به ۴ دسته‌ی شکل‌پذیر، متحرک، پیستونی و پیچشی تقسیم می‌شوند. میکروآینه‌های شکل‌پذیر منعطف‌ترین نوع این ابزار هستند و همچون یک پوسته نرم امکان تغییر شکل دارند. پس از آن بیشترین درجه آزادی متعلق به میکروآینه متحرک است که قادر به حرکت و چرخش در فضای سه‌بعدی می‌باشد. میکروآینه‌های پیستونی همانند یک پیستون در راستای عمودی بالا و پایین می‌روند و در نهایت میکروآینه‌های پیچشی، تنها حول یک محور می‌چرخند و جابجایی قابل توجهی ندارند [۳-۵].

در دهه ۱۹۶۰، برای اولین بار در مقالات به آینه‌های الکترومکانیکی و کاربردهای مختلف آن‌ها به صورت تئوری و عملی اشاره شد [۶]. در سال‌های بعد، آینه‌های الکترومکانیکی به عنوان یکی از اجزای کلیدی در سیستم‌های نورپردازی و دستگاه‌های پرتوسنجی استفاده شدند. با پیشرفت فناوری، آینه‌های الکترومکانیکی توسعه چشم‌گیری پیدا کردند و در صنایع مختلف از جمله نور و لیزر [۷، ۸، رادار [۹] و سوئیچ‌های نوری^۱ [۱۰] به کار گرفته شدند. در فناوری لیزر از این نوع میکروآینه‌ها به منظور کنترل و مدولاسیون^۲ پرتو و همچنین کنترل پایداری حفره‌های لیزری استفاده می‌شود که در عمل موجب تولید پالس‌های لیزری کوتاه و شدید می‌شود. با استفاده از آینه الکترومکانیکی، می‌توان پرتو نوری را به طور دقیق و با سرعت بالا به جهت مورد نظر هدایت کرد. در سیستم‌های مخابرات نوری که نیاز به انتقال اطلاعات به صورت دقیق و با سرعت بالا دارند، میکروآینه از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، آینه الکترومکانیکی می‌تواند در تغییر شدت نور استفاده شود. تغییر شدت نور به صورت الکترومکانیکی، امکان انتقال اطلاعات به صورت دیجیتال را در سیستم‌های مخابرات نوری فراهم می‌کند [۱۱].

ساده‌وختان و سینگا [۱۲] به طراحی، ساخت و شبیه‌سازی ریزآینه الکترواستاتیکی روبشی دو محوره با ساختار مارپیچی پرداختند. در این طراحی، اسکن دوبعدی از طریق تحریک الکترواستاتیک میکروآینه‌های دارای پیکربندی دو قاب انجام می‌شود. آنها با مقایسه کنترل زاویه میکروآینه در ساختارهای دارای تیر مستقیم و مارپیچی، نشان دادند استفاده از تیرهای مارپیچی برای اتصال آینه به قاب، در آینه‌های با ابعاد کوچک که زاویه شیب کوچکی ایجاد می‌کنند، مناسب‌تر است. لیو و همکاران [۱۳] به بررسی آینه‌های میکروالکترومکانیکی پرداختند که با حرارت الکتریکی فعال می‌شوند. به دلیل زاویه اسکن بالا، ولتاژ پایین و ضریب پر شدن بالا، این آینه‌ها به‌خصوص برای تصویربرداری آندوسکوپی

مناسب هستند. آنها یک مدل کنترلی بر اساس تابع انتقال پیشنهاد کردند. آزمایشات نشان داد روش پیشنهادی می‌تواند غیرخطی بودن اسکن و اعوجاج را بدون افزودن سخت‌افزار اضافی اصلاح کند. کاو و همکاران [۱۴] عملکرد میکروآینه‌های اسکن چرخشی رزونانسی را با محرک‌های شانه‌ای الکترواستاتیک بررسی کردند. این میکروآینه‌ها به طور گسترده در تولید چراغ‌های ساختاری برای سنسجس سه‌بعدی استفاده می‌شوند. پایداری اسکن رزونانسی در این میکروآینه‌ها به طور قابل‌توجهی تحت تأثیر دمای کار قرار می‌گیرد، که این مساله دقت سنسجس را به خطر می‌اندازد. نتایج آزمایش تأیید کرد میزان زاویه و ضریب دمایی را در یک میکروآینه با محرک شانه‌ای، می‌توان با تغییر طول صفحه آینه و یا اندازه شانه تغییر داد. ژانگ و همکاران [۱۵] یک طرح سنسجس خازنی برای کنترل حلقه بسته زاویه اسکن و فاز یک میکروآینه الکترواستاتیک تک‌محوره شانه‌ای پیشنهاد دادند. نتایج تجربی نشان داد با استفاده از سیگنال حامل ۲/۵ ولت و ۱ مگاهرتز، دقت اندازه‌گیری زاویه اسکن میکروآینه به ۰/۱۵ درجه می‌رسد و تاخیر زمانی را می‌توان در ۰/۴۷ میکروثانیه کنترل کرد. لی و همکاران [۱۶] همراه با تحلیل فرم مارپیچ میکروآینه‌ای، نوع جدیدی از سیستم نوری همه‌جهته را طراحی کردند که می‌تواند تصویربرداری اسکن همه‌جانبه لیدار^۳ را محقق کند. سیستم کلی می‌تواند به تصویربرداری اسکن ۳۶۰ درجه با وضوح افقی ۰/۱ درجه دست یابد. فانگ و همکاران [۱۷] موفق به طراحی معرفی یک میکروآینه الکترومکانیکی جدید تحت تأثیر نیروی الکترواستاتیک با قابلیت اطمینان ساختاری بالا شدند. در این مقاله اهمیت میکروآینه‌های الکترواستاتیک در هدایت پرتو نور بررسی شده و در عین حال دو چالش اصلی یعنی دستیابی به زاویه دید^۴ بزرگ و کاهش تنش پیچشی در نقاط اتصال تیرهای مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته است. طراحی یک هندسه هوشمندانه در این مقاله، تنش را به طور چشمگیری (حدود ۶۰٪) کاهش و امکان

³ Lidar

⁴ Field Of View

¹ Optical Switch

² Modulation

میکروآینه الکترومکانیکی که به صورت الکترواستاتیکی کنترل می‌شود، تاثیر ابعاد پایه بر این حرکت با هدف دستیابی به بیشترین جابه‌جایی در کمترین زمان، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر شکل هندسی و اندازه الکترودها بر حداکثر جابه‌جایی نیز مطالعه شده است.

۲ مدل‌سازی

در این مطالعه جابجایی یک میکروآینه الکترومکانیکی در اثر نیروی الکترواستاتیکی بررسی شده است. میکروآینه، مربعی شکل با طول ضلع $q = 400 \mu\text{m}$ و ضخامت $1 \mu\text{m}$ می‌باشد که توسط چهار پایه ماریچی به تکیه‌گاه متصل شده است. شکل ۱-الف نمای سه بعدی میکروآینه، پایه‌ها و الکترودها را نشان می‌دهد. الکترودها که در فاصله $5 \mu\text{m}$ از میکروآینه قرار گرفته‌اند، در دو نوع دایروی و مربعی در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای هندسی و چیدمان الکترودها در شکل ۱-ب نشان داده شده است. همچنین پارامترهای هندسی پایه‌ها نیز در شکل ۱-ج قابل مشاهده است.

میکروآینه مورد بررسی دارای مدول یانگ $E = 170,28 \text{ GPa}$ ، مدول برشی $G = 66 \text{ GPa}$ و چگالی $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$ است [۱۹]. فاصله (دی‌الکترونیک) بین میکروآینه و الکترودها با هوا پر شده است. در تمامی حالات ولتاژ ثابت یک ولت به الکترودها اعمال شده است. لازم به ذکر است این مقدار، به عنوان ولتاژ مینا و برای تضمین رفتار خطی سازه و امکان مقیاس‌پذیری نتایج انتخاب شده است. با توجه به تناسب حداکثر جابجایی با توان دوم ولتاژ (رابطه (۲))، نتایج این مطالعه برای ولتاژهای کاری بالاتر نیز معتبر خواهند بود. البته اثر تغییر ولتاژ بر پاسخ میکروآینه می‌تواند در مطالعه بعدی بررسی شود. ابعاد هندسی میکروسازه در جدول ۱ گزارش شده است.

تنظیم فرکانس رزونانس را به گونه‌ای فراهم می‌کند که استرس پیچشی در نقاط بحرانی به حداقل می‌رسد. از طرفی در حالت رزونانسی، زاویه $3/1$ درجه را در فرکانس 445 هرتز با ولتاژ 20 ولت به دست آمد که این نشان از راه‌حلی مؤثر برای ساخت میکروآینه‌های الکترواستاتیک با عمر طولانی‌تر و زاویه دید بزرگ‌تر ارائه می‌دهد. این طراحی پتانسیل بالایی در کاربردهای مهمی همچون اسکنرهای لیزری، پروژکتورها و سیستم‌های نوری پیشرفته خواهد داشت. بنانی و همکاران [۱۸] یک عملگر میکروالکترومکانیکی تحت نیروی الکترواستاتیک جدید با جابجایی طولی^۱ بسیار بلند را طراحی کردند. عملگرهای متحرک شانه‌ای^۲ معمولی، در بیشتر مواقع جابه‌جایی طولی محدودی (در حد چند ده میکرومتر) دارند که این موضوع به دلیل ناپایداری جانبی، اصطکاک شانه‌ها و محدودیت‌های ساختاری است. در این مقاله آن‌ها موفق شدند که با طراحی ساختار پایه‌های آبشاری^۳، مانع از تماس ناخواسته بین دستک‌ها و یا ناپایداری جانبی شوند. در این ساختار انگشت‌های متحرک به صورت هوشمندانه از میان انگشت‌های ثابت عبور کرده و اجازه می‌دهند مراحل مختلف به صورت سری عمل کنند و جابه‌جایی هر مرحله به صورت تجمعی به مرحله بعدی اضافه شود. این طراحی موفق با مدل‌سازی تحلیلی به وسیله شبیه‌سازی المان محدود^۴ و بهینه‌سازی دقیق انجام شد که نشان می‌دهد با افزایش تعداد مراحل آبشاری، جابه‌جایی طولی به طور خطی افزایش می‌یابد در حالی که ولتاژ مورد نیاز و اندازه کلی دستگاه کنترل شده باقی می‌ماند.

بررسی مطالعات در دسترس بیانگر اهمیت ساختار پایه‌های اتصال میکروآینه به قاب در عملکرد آن است. با توجه به ابعاد ریز میکروآینه‌ها، مطالعات گوناگون بر استفاده از ساختار ماریچی تاکید دارند. با این حال مطابق جستجوهای انجام شده، تا کنون مطالعه مستقلی روی ابعاد اجزای پایه، برای دستیابی به بهترین عملکرد انجام نشده است. در این مطالعه با شبیه‌سازی حرکت

³ Cascade

⁴ Finite Element Simulation

¹ Stroke

² Comb Actuator

انحراف یا چرخش میکروآینه می‌شوند. تغییر پتانسیل الکتریکی هر یک از الکترودها می‌تواند بر جهت و میزان چرخش میکروآینه تاثیر گذارد.

نیروی الکترواستاتیک وارد شده بر هر ناحیه‌ی سیستم مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\vec{F} = \oint_S \hat{n} T ds \quad (1)$$

در این رابطه S سطح بسته محصور کننده ناحیه مورد نظر، n بردار عمود بر سطح و T تانسور نیروی ماکسول است. با کمی محاسبه ریاضی، نیروی الکترواستاتیک به صورت رابطه (۲) درمی‌آید که راستای آن عمود بر سطح میکروآینه می‌باشد [۱۲].

$$F = \frac{V^2}{2} \left| \frac{\partial C}{\partial x} \right| \quad (2)$$

در این رابطه V ولتاژ الکتریکی و C ظرفیت خازن ایجاد شده بین الکترودها و میکروآینه است که از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

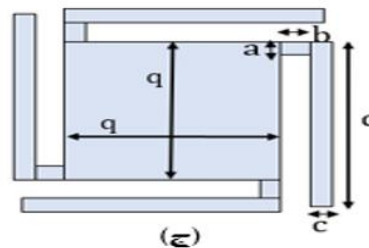
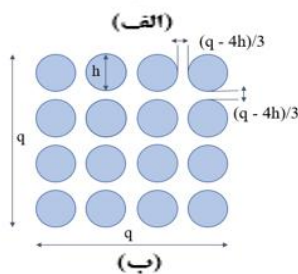
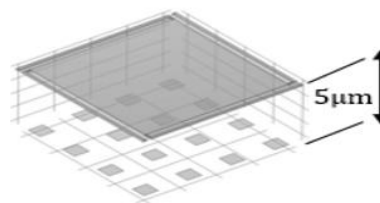
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{D} \quad (3)$$

که در آن A سطح میکروآینه، ϵ_0 ضریب گذردهی خلاء و D فاصله بین الکتروود و میکروآینه است.

نیروی الکترواستاتیک تمایل دارد میکروآینه را در راستای عمود بر سطح آن جابجا کند. اما با توجه به اتصال میکروآینه به تکیه‌گاه‌ها، این جابجایی باعث ایجاد یک نیروی کشسانی می‌شود که در برابر حرکت میکروآینه مقاومت می‌کند. این نیروی بازایی از رابطه (۴) به دست می‌آید [۱۲].

$$F = Kx \quad (4)$$

در این رابطه x جابجایی سطح و K ثابت فنر است که با توجه به ساختار پایه میکروآینه قابل محاسبه است. بنابراین ملاحظه می‌شود نیروی بازایی به طور مستقیم به ساختار پایه میکروآینه مرتبط است و این مساله موید اهمیت طراحی دقیق ساختار پایه است. موفقیت تعادلی میکروآینه بر اساس موازنه بین نیروهای الکترواستاتیکی و بازایی، تعیین می‌شود.



شکل ۱ الف) نمای کلی میکروسازه (الکتروود مربعی) ب) نحوه چیدمان الکترودها (مقطع دایروی) ج) میکروآینه و پایه‌های آن.

جدول ۱ ابعاد هندسی میکروسازه (μm)

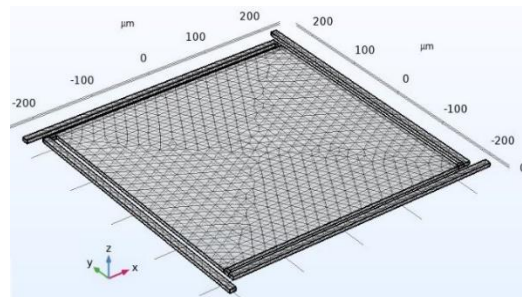
پارامتر	حالات مختلف			
a	۲۰	۱۵	۱۰	۵
b	۳۰	۲۰	۱۵	۱۰
c	۳۰	۲۰	۱۵	۱۰
d	۴۴۰	۴۲۰	۴۱۰	۴۰۰
h			۸۰	۴۰

۳ معادلات حاکم

با اعمال ولتاژ الکتریکی به الکترودها و برقراری اختلاف پتانسیل الکتریکی بین میکروآینه و هر یک از الکترودها، بارهای الکتریکی سطحی روی آن‌ها ایجاد می‌شود. مطابق قانون کولن و تانسور نیروی ماکسول [۱۱]، این بارها یکدیگر را جذب کرده و موجب

۴ روش عددی

حرکت میکروآینه در محیط نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس^۱، که بر مبنای روش المان محدود عمل می‌کند، شبیه‌سازی شده است. در این نرم‌افزار شبیه‌سازی حرکت میکروآینه و تاثیر نیروی الکترواستاتیک بر حداکثر جابه‌جایی و زمان آن با فیزیک‌های الکترواستاتیک^۲ و سالیید مکانیک^۳ به همراه مش متحرک انجام شده است. به این منظور، با اعمال اختلاف پتانسیل ثابت یک ولت بین میکروآینه و الکترودها، ابتدا توزیع بار و میدان الکتریکی در ساختار بدست آمده و سپس نیروی ناشی از این توزیع بار بر میکروآینه محاسبه می‌شود. موقیت پایه‌ها در محل اتصال به بدنه ثابت فرض شده است و جنس آن‌ها از ماده الاستیک خطی با خواص گفته شده در ذیل شکل ۱ می‌باشد. برای شبکه‌بندی میکروسازه مطابق شکل ۲ از ۲۴۱۳۶ المان هرمی استفاده شده است. بررسی شبکه نشان داد با افزایش تعداد مش به ۶۸۵۵۰ المان حداکثر ۰/۸ درصد تغییر در نتایج ایجاد می‌شود که قابل صرف‌نظر است. بنابراین برای کاهش زمان محاسبات به همان تعداد المان بسنده شد. در جدول ۲ داده‌های مربوط به استقلال نتایج از شبکه قابل مشاهده است. باید توجه داشت به علت حرکت میکروسازه و تغییر شکل آن، لازم است در شبیه‌سازی از مش متحرک استفاده شود.



شکل ۲ نمای از شبکه‌بندی میکروسازه

جدول ۲ بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی

تعداد مش	۶۵۱۴	۱۱۲۴۵	۲۴۱۳۶	۶۸۵۵۰
جابه‌جایی (μm)	$۱,۶۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۸۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۹۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۹۸ \times ۱۰^{-۵}$
درصد تغییر		٪۱۲,۵۷	٪۴,۸۲	٪۰,۸۱

۵ نتایج و بحث

در ابتدا برای اطمینان از درستی نتایج حل عددی، در یک حالت ساده ضریب سختی میکروسازه با استفاده از روابط موجود در مرجع [۲۰] استخراج شده و بر اساس آن جابه‌جایی میکروآینه در حالت پایا به صورت تحلیلی محاسبه شد. مقایسه حل‌های عددی و تحلیلی برای این حالت که در جدول ۳ آمده است، نشان می‌دهد حل عددی تنها یک درصد خطا داشته و قابل اطمینان است.

جدول ۳ مقایسه نتایج حل عددی با حل تحلیلی

حل تحلیلی	حل عددی	درصد خطا	
جابه‌جایی نهایی (μm)	$۱,۹۴۹۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۹۶۸۴ \times ۱۰^{-۵}$	٪۱

در ادامه تاثیر ابعاد پایه (جدول ۱) بر پاسخ میکروآینه به سیگنال ورودی بررسی می‌شود. شکل ۳ تاثیر پارامتر a (شکل ا ج) بر حداکثر جابه‌جایی و زمان لازم برای این جابه‌جایی را برای هر دو الکتروود مربعی و دایروی نشان می‌دهد. شایان ذکر است به دلیل اثر میرایی لایه هوای فشرده، سیستم رفتار فوق‌میرا داشته و پاسخ زمانی آن کاملاً هموار و بدون فراجهش است. در این شرایط زمان گزارش شده، زمان کل جابه‌جایی از لحظه اعمال ولتاژ تا نشست کامل در مقدار نهایی پایا می‌باشد که معادل زمان نشست با باند خطای صفر است.

با توجه به این شکل، افزایش پارامتر a باعث کاهش جابه‌جایی میکروآینه می‌شود و بنابراین در هر دو شکل الکتروود، بیشترین

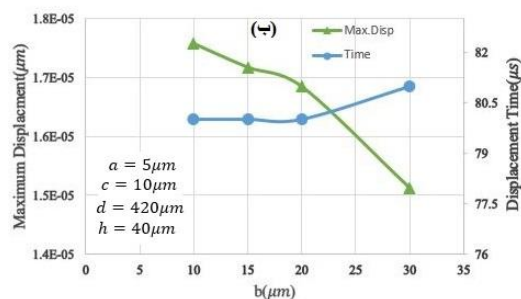
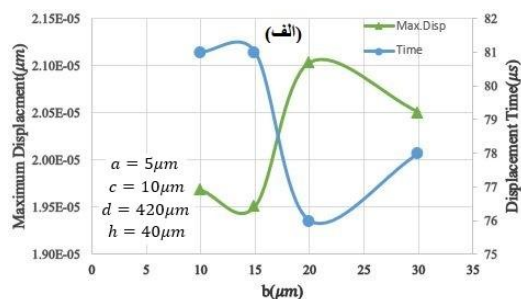
³ Solid Mechanics

¹ COMSOL Multiphysics

² Electrostatics

خمشی ناشی از نیروی الکترواستاتیکی را افزایش داده و از حداکثر جابجایی می‌کاهد. هم‌زمان، افزایش صلبیت موجب بالا رفتن فرکانس طبیعی سیستم و در نتیجه کاهش زمان پاسخ می‌شود. رفتار غیریکنوای مشاهده‌شده در الکتروود دایروی را می‌توان به اندرکنش پیچیده‌تر بین توزیع غیریکنواخت میدان الکتریکی در لبه‌های دایروی و تغییر در صلبیت موضعی نسبت داد.

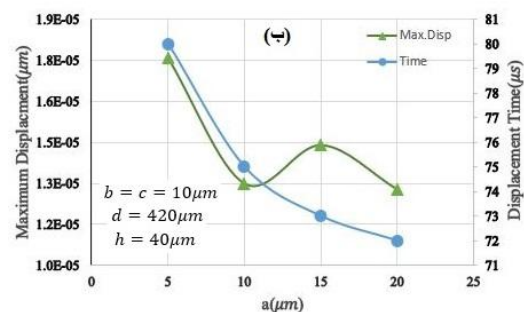
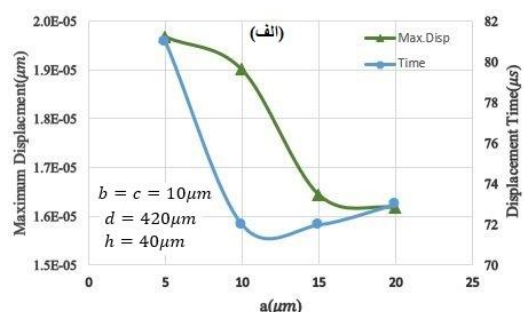
در شکل ۴ اثر پارامتر b (شکل ۱ج) بر حداکثر جابجایی میکروآینه و زمان لازم برای این جابجایی برای هر دو الکتروود مربعی و دایروی نشان داده شده است. در حالت الکتروود مربعی، نمودار جابجایی یک بیشینه نسبی در $b=20$ میکرومتر دارد. جالب اینکه نمودار زمان پاسخ در همین نقطه دارای یک کمینه نسبی است. بنابراین به طور واضح مقدار بهینه پارامتر b همان 20 میکرومتر است.



شکل ۴ اثر پارامتر b بر حداکثر جابجایی میکروآینه و زمان این جابجایی (الف) الکترودهای مربعی (ب) الکترودهای دایروی

از طرف دیگر، در صورت استفاده از الکتروود دایروی میکروآینه رفتار به کلی متفاوتی را نشان می‌دهد؛ به نحوی که نمودار جابجایی، یکنوا نزولی و نمودار زمان پاسخ، یکنوا صعودی می‌شود. در این

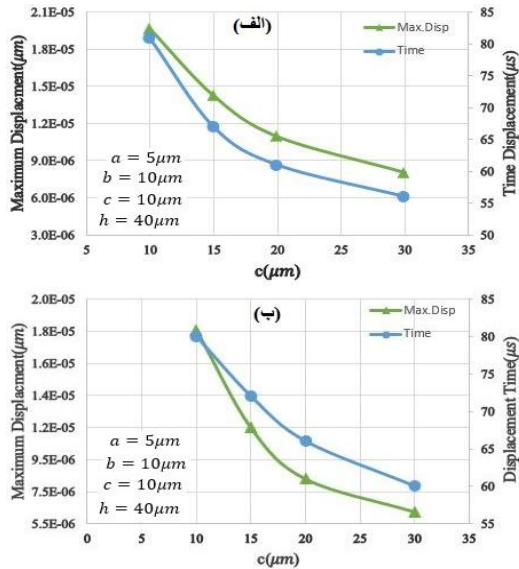
جابجایی در $a=5$ میکرومتر اتفاق می‌افتد؛ هرچند که در حالت الکتروود دایروی، تغییرات جابجایی یکنوا نیست و در مقادیر بزرگ a ، نوساناتی در مقدار جابجایی مشاهده می‌شود.



شکل ۳ اثر پارامتر a بر حداکثر جابجایی میکروآینه و زمان این جابجایی (الف) الکتروود مربعی (ب) الکتروود دایروی

همچنین از بین دو الکتروود بررسی شده، الکتروود مربعی جابجایی‌های بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند و مطلوب‌تر است. زمان پاسخ میکروآینه نیز با افزایش پارامتر a تقریباً به صورت یکنوا کاهش می‌یابد. زمان پاسخ برای هر دو نوع الکتروود تقریباً یکسان است. در کاربردهای میکروآینه‌ها، حداکثر جابجایی در کوتاه‌ترین زمان مد نظر است. بنابراین با در نظر گرفتن سرعت متوسط جابجایی میکروآینه، مقدار بهینه پارامتر a برای الکتروود مربعی و دایروی به ترتیب برابر 10 و 5 میکرومتر می‌باشد.

رفتار مشاهده‌شده برای پارامتر a را می‌توان با تغییر در صلبیت پیچشی اتصال توجیه کرد. با افزایش این پارامتر، عرض ناحیه اتصال دستک به صفحه میکروآینه افزایش یافته و در نتیجه صلبیت خمشی آن بیشتر می‌شود. این امر مقاومت سازه در برابر گشتاور



شکل ۵ اثر پارامتر C بر حداکثر جابه‌جایی میکروآینه و زمان این جابه‌جایی الف) الکترودهای مربعی ب) الکترودهای دایروی

با توجه به شکل ۶، برای هر دو شکل الکترودها، با افزایش پارامتر d ، حداکثر جابه‌جایی و زمان پاسخ روندی افزایشی دارند. بنابراین برای دستیابی به جابجایی‌های بیشتر، انتخاب d بزرگ‌تر و برای رسیدن به پاسخ سریع‌تر، انتخاب d کوچک‌تر پیشنهاد می‌شود. با این حال از دیدگاه سرعت جابجایی متوسط، در حالت الکترودها مربعی و الکترودها دایروی به ترتیب مقادیر ۴۴۰ و ۴۲۰ میکرومتر بهینه هستند.

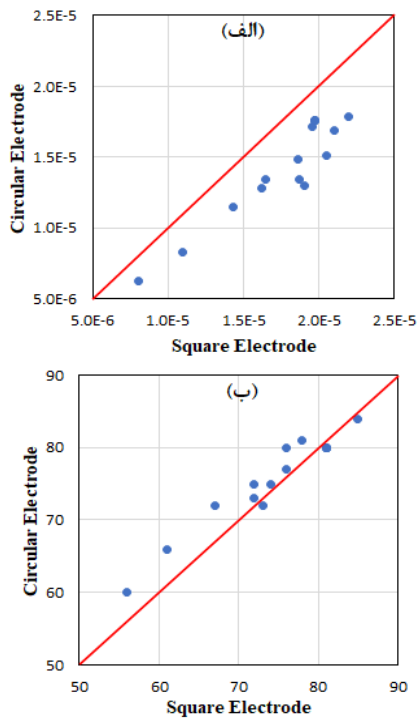
افزایش طول دستک، d ، سفتی معادل پایه‌های مارپیچ (مشابه تیر یک‌سر درگیر) را کاهش، در نتیجه سازه در برابر نیروی الکترواستاتیک نرم‌تر شده و جابجایی افزایش می‌یابد. هم‌زمان، کاهش سفتی باعث افت فرکانس طبیعی سیستم و در نتیجه افزایش زمان پاسخ می‌شود. این رفتار برای هر دو شکل الکترودها مشابه است، زیرا طول دستک به طور عمده بر خواص مکانیکی سازه تأثیر می‌گذارد و نه بر توزیع میدان الکتریکی.

برای تعیین اثر شکل الکترودها بر پاسخ میکروآینه، در شکل ۷ الف مقادیر حداکثر جابجایی حاصل از الکترودها مربعی در مقابل حداکثر جابجایی حاصل از الکترودها دایروی، برای کلیه حالات ذکر شده در

شرایط به طور واضح $b = 10$ میکرومتر مقدار بهینه است. این تفاوت رفتار بر اهمیت مطالعه شکل مناسب الکترودها دلالت دارد. پارامتر b معرف طول بازوی اهرمی است که نیروی الکترواستاتیک از طریق آن به دستک‌های مارپیچ منتقل می‌شود. در الکترودها مربعی، وجود یک بیشینه نسبی در $b = 20$ میکرومتر نشان‌دهنده تعادل میان دو اثر رقیب است: از یک سو افزایش b بازوی اهرم را بلندتر کرده و گشتاور خمشی وارد بر دستک را افزایش می‌دهد (تمایل به جابجایی بیشتر)، و از سوی دیگر، افزایش طول این اتصال، جرم و صلبیت سازه را تغییر می‌دهد. در مقادیر $b > 20$ ، اثر دوم غالب شده و جابجایی کاهش می‌یابد. رفتار کاملاً متفاوت در الکترودها دایروی ناشی از تفاوت در توزیع فشار الکترواستاتیک بر سطح میکروآینه است؛ در این حالت، با افزایش b ، بخش بیشتری از نیرو در ناحیه‌ای متمرکز می‌شود که بازوی اهرمی مؤثر کمتری دارد.

شکل ۵ نشان می‌دهد تغییرات حداکثر جابجایی میکروآینه و همچنین پاسخ زمانی آن نسبت به تغییرات پارامتر C (شکل ۱ ج) برای هر دو شکل الکترودها به صورت یک‌نوا نزولی است. در این شرایط اگر در طراحی، بیشترین جابجایی مد نظر باشد، مقدار C ۱۰ میکرومتر و اگر کمترین زمان پاسخ حائز اهمیت باشد، C ۳۰ میکرومتر مناسب است. در حالت کلی اگر سرعت متوسط حرکت میکروآینه را مبنا قرار داده شود، برای هر دو الکترودها $C = 10$ میکرومتر مقدار بهینه است.

کاهش یک‌نوا جابجایی با افزایش عرض دستک، C ، نتیجه مستقیم افزایش صلبیت خمشی تیرهای مارپیچ است. با توجه به رابطه ممان اینرسی سطح برای یک مقطع مستطیلی، افزایش عرض دستک از ۱۰ به ۳۰ میکرومتر، صلبیت خمشی را تا ۲۷ برابر افزایش می‌دهد. این افزایش چشمگیر در سفتی سازه، علت کاهش ۵۹ تا ۶۴ درصدی جابجایی است. کاهش زمان پاسخ نیز به دلیل افزایش فرکانس طبیعی سیستم در نتیجه صلبیت بالاتر رخ می‌دهد.

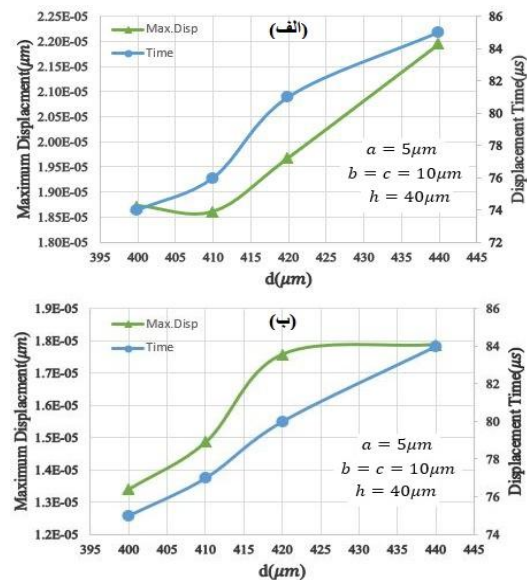


شکل ۷ مقایسه اثر الکتروود مربعی و دایروی بر پاسخ میکروآینه الف) حداکثر جابجایی (μm) (ب) زمان پاسخ (S)

تمامی حالات بررسی شده تا این قسمت برای طول ضلع/ قطر الکتروود برابر ۴۰ میکرومتر می‌باشد. برای ارزیابی اثر ابعاد الکتروود بر پاسخ میکروآینه، تمامی حالات قبلی برای $h=80$ میکرومتر تکرار شده و درصد تغییر نتایج، در جدول ۳ نشان داده شده است. در تنظیم این جدول فقط مقادیر مربوط به حالت بهینه هر پارامتر گزارش شده است. به عنوان مثال همان‌طور که در توضیح شکل ۳ گفته شد، برای الکتروود مربعی مقدار بهینه پارامتر a برابر ۱۰ میکرومتر است. لذا در جدول ۴ تنها اثر تغییر ضلع الکتروود برای $a=10$ میکرومتر گزارش شده است؛ که بر این اساس حداکثر جابجایی در این حالت ۲۲۵٪ افزایش می‌یابد، در حالی که زمان پاسخ تغییری نمی‌کند.

جدول ۱، رسم شده است. همچنین شکل ۷ نمودار مشابهی را برای زمان پاسخ نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷ در کلیه حالات الکتروود مربعی جابجایی بزرگ‌تری ایجاد کرده است. همچنین در حالت کلی الکتروود دایروی منجر به پاسخ سریع‌تری شده است؛ هرچند مواردی وجود دارد که سرعت پاسخ برای هر دو الکتروود تقریباً یکسان است.

برتری الکتروود مربعی در ایجاد جابجایی بیشتر را می‌توان به دو عامل نسبت داد: نخست، سطح مؤثر بزرگ‌تر الکتروود مربعی نسبت به دایروی با قطر هم‌ارز که نیروی الکترواستاتیکی کل را افزایش می‌دهد. دوم، توزیع یکنواخت‌تر میدان الکتریکی در زیر صفحه مربعی که منجر به تمرکز نیرو در نواحی نزدیک‌تر به مرکز میکروآینه و در نتیجه ایجاد گشتاور خمشی مؤثرتر می‌شود. زمان پاسخ کوتاه‌تر در الکتروود مربعی نیز به دلیل نیروی بیشتر و در نتیجه شتاب اولیه بالاتر است.



شکل ۶ اثر پارامتر d بر حداکثر جابجایی میکروآینه و زمان این جابجایی الف) الکترودهای مربعی (ب) الکترودهای دایروی

آن به تحریک الکترواستاتیکی تاثیر می‌گذارد. به این منظور پایه ماریچی با چهار پارامتر طول دستک (d)، طول اتصال بین میکروآینه و دستک (b)، عرض دستک (c) و عرض اتصال بین دستک و میکروآینه (a) مشخص شد. اهم نتایج به شرح زیر قابل بیان است:

(۱) افزایش طول دستک منجر به افزایش حداکثر جابجایی و همچنین زمان پاسخ میکروآینه می‌شود. با افزایش d از ۴۰۰ به ۴۴۰ میکرومتر برای الکتروود مربعی، جابجایی و زمان پاسخ به ترتیب ۱۷ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش برای الکتروود دایروی به ترتیب ۳۳ و ۱۲ درصد است.

(۲) با افزایش عرض دستک حداکثر جابجایی و زمان پاسخ کاهش می‌یابد. به نحوی که با افزایش عرض دستک از ۱۰ به ۳۰ میکرومتر، جابجایی و زمان پاسخ در صورت استفاده از الکتروود مربعی، به ترتیب ۵۹ و ۳۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. در صورت بکارگیری الکتروود دایروی، این کاهش به ترتیب ۶۴ و ۲۵ درصد خواهد بود.

(۳) در حالت کلی می‌توان گفت در صورت استفاده از الکتروود مربعی در عوض الکتروود دایروی برای یک پایه مشخص، حداکثر جابجایی میکروآینه افزایش و زمان پاسخ آن کاهش پیدا می‌کند. درصد این تغییرات به ابعاد پایه بستگی دارد.

(۴) با افزایش سطح مقطع الکتروود، حداکثر جابجایی میکروآینه افزایش می‌یابد. با افزایش ضلع قطر الکتروود از ۴۰ به ۸۰ میکرومتر، بسته به ابعاد پایه، جابجایی بین دو تا سه برابر افزایش می‌یابد.

(۵) ابعاد بهینه پایه برای هر دو الکتروود مربعی و دایروی در جدول ۳ گزارش شده است.

۷ مراجع و منابع

- [1] Sampsel, J.B., 1994. "Digital micromirror device and its application to projection displays". Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing,

جدول ۴ درصد تغییرات حداکثر جابجایی و زمان پاسخ در اثر افزایش ضلع قطر الکتروود از ۴۰ به ۸۰ میکرومتر

پارامتر	الکتروود مربعی		الکتروود دایروی	
	ابعاد (μm)	حداکثر جابجایی	ابعاد (μm)	حداکثر جابجایی
a	۱۰	٪۲۲۵	۵	٪۲۴۰
b	۲۰	٪۲۳۵	۱۰	٪۲۴۰
c	۱۰	٪۲۷۰	۲۰	٪۲۹۰
d	۴۴۰	٪۲۷۰	۴۲۰	٪۲۴۵

جدول ۴ بیان‌گر آن است که در کلیه حالات با افزایش ابعاد الکتروود از ۴۰ به ۸۰ میکرومتر، حداکثر جابجایی میکروآینه افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند در حالی که زمان پاسخ در حالت کلی ثابت باقی می‌ماند.

افزایش چشمگیر جابجایی (۲ تا ۳ برابر) با دو برابر شدن ضلع یا قطر الکتروود، با رابطه ظرفیت خازنی و نیروی الکترواستاتیک قابل توجهی است. سطح الکتروود با مربع بعد مشخصه متناسب است و در نتیجه ظرفیت خازنی و نیروی الکترواستاتیک نیز تقریباً با h^2 افزایش می‌یابند. بنابراین دو برابر شدن h ، نیرو را حدود ۴ برابر بزرگتر می‌کند. اما به دلیل افزایش هم‌زمان صلبیت معادل سازه در برابر بار گسترده‌تر و توزیع متفاوت نیرو، جابجایی نهایی به اندازه ۴ برابر افزایش نمی‌یابد و به ۲ تا ۳ برابر محدود می‌شود. ثابت ماندن نسبی زمان پاسخ نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی سیستم (که تابع جرم و سفتی است) با تغییر ابعاد الکتروود تغییر محسوسی نمی‌کند.

۶ نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر ابعاد پایه ماریچی شکل یک میکروآینه و همچنین ابعاد الکتروودها، بر پاسخ دینامیکی آینه به تحریک الکترواستاتیکی، با شبیه‌سازی در محیط کامسول مولتی‌فیزیکس بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد حداکثر جابجایی میکروآینه و همچنین زمان لازم برای این جابجایی به شدت به ابعاد پایه وابسته است. با تغییر ابعاد پایه، خاصیت کشسانی میکروآینه تغییر کرده و این مساله بر پاسخ

- scanning micro-mirror with serpentine structure". *Materials Today: Proceedings*. 65: p. 229–234.
- [13] Tailong Liu , Teng Pan, Peng Wang , Shuijie Qin, Huikai Xie. 2022. "Scanning optimization of an electrothermally-actuated MEMS mirror for applications in optical coherence tomography endoscopy". *Sensors and Actuators, A. Physical*, 113377, pp. 335.
- [14] Yingchao Cao, Peng Wang, Jianhua Li, Huikai Xie. 2021. "Temperature stability study of resonant angular scanning micromirrors with electrostatic comb-drive actuators". *Sensors and Actuators*, 112525, pp.318 .
- [15] Ruihao Zhang, Jiasheng Qu, Yingchao Cao, Xinchao Zhang, Yilong Jia, Xiaoyi Wang, Wenbiao Zhou, Huikai Xie. 2023. "An integrated capacitive sensing method for electrostatic comb-drive micromirrors". *Sensors & Actuators, A. Physical*, 114416, p. 357.
- [16] Qingyan Li, Yu Zhang, Rundong Fan, Yue Wang, Yu Wang, Chunhui Wang. 2022. "MEMS mirror based omnidirectional scanning for lidar optical systems". *Optics and Lasers in Engineering*, 107178, pp. 158.
- [17] Fang, X. Y., Li, A., Tu, E. Q., Peng, B., Yi, Z. R. and Zhang, W. M. 2025. "An electrostatic micro-electromechanical systems micromirror with low-torsional stress supported by three-asymptote beam". *Chip*, 4(3), 100138.
- [18] Banani, Y., Buffoli, A., Mauri, F. D., Opreni, A., Frangi, A., Gattere, G., Langfelder, G. and Zega, V. 2025. "A long-stroke MEMS actuator based on cascaded stages of innovative pass-through comb fingers. *Sensors and Actuators A: Physical*", 382, 116146.
- [19] Daqaq, M. F., Reddy, C. K. and Nayfeh, A. H. 2008. Input-shaping control of nonlinear MEMS. *Nonlinear Dynamics*, 54(1-2), pp. 167–179.
- [20] Chang Liu, 2012, *Foundations of MEMS*, Pearson, www.pearson.com.
- Measurement, and Phenomena, 12(6), pp. 3242–3246.
- [2] Ayoub, A.B. and D. Psaltis, 2021. "High speed, complex wavefront shaping using the digital micro-mirror device". *Scientific Reports*, 11(1), pp. 18837.
- [3] L.J. Hornbeck, 1983. "128×128 deformable mirror devices". *IEEE Trans, Electron Devices ED*, 30(5), pp. 539–545.
- [4] R.S. Muller, K.Y. Lau, 1998. "Surface-micromachined micro optical elements and systems". *Proc IEEE*, 86(8), pp.1705–1720.
- [5] T-H Lin, 1994. "Implementation and characterization of a flexure-beam micromechanical spatial light modulator". *Opt. Eng*, 33(11), pp. 3643–3648.
- [6] Tobie, J.E. and G.R. Coatney, 1961. "Fluorescent antibody staining of human malaria parasites". *Experimental Parasitology*, 11(2-3), pp. 128-132.
- [7] Winter, C., et al., 2009. "Micro-beamer based on MEMS micro-mirrors and laser light source". *Procedia Chemistry*, 1(1), pp. 1311-1314.
- [8] Ruffin, P.B. 2003. "Optical MEMS-based arrays. in *Smart Structures and Materials*". *Smart Electronics, MEMS, BioMEMS, and Nanotechnology*, SPIE.
- [9] Wang, J., G. Zhang, and Z. You, 2019. "UKF-based MEMS micromirror angle estimation for LiDAR". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 29(3), p. 035005.
- [10] J.E. Ford, V.A. Aksyuk, D.J. Bishop, J.A. Walkers, 1999. "Wavelength add-drop switching using tilting micromirrors, J". *Lightwave Technol*, 17(5), pp. 904-911.
- [11] Crowe, J. and Z. Cheung, 2016. "Micro Scale Mirrors For Optical Communication". Technical Report No. UCB/EECS-2016-198, EECS Department, University of California, Berkeley.
- [12] Dhruvajyoti Sadhukhan , Gajendra Prasad Singh. 2022. "Design of electrostatic actuated MEMS biaxial