مقاله

سیستم‌های میکرو الکترو مکانیک

حمید غضنفر، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد
ghazanfar.hamid@yahoo.com
مسعود طهانی، استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
mtahani@um.ac.ir

چکیده
با رشد روزافزون فناوری‌های ساخت ابزار و سیستم‌ها در مقیاس نانو و میکرو، توجه محققان به‌سمت طراحی و ساخت حسگرها و عملگرهایی برای کنترل و پردازش رفتار این سیستم‌ها در مقیاس‌های کوچک جلب شده است. سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی حاصل تلاش و تحقیق محققان در حوزه‌های مهندسی مکانیک، برق، شیمی و متالورژی در مسیر ساخت میکروحسگرها و میکروعملگرهاست. این سیستم‌ها - که آنها را به‌اختصار ممز[1] می‌نامند - تحولی شگرف در زمینهٔ کنترل ابزار و سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی و همچنین ارتباط بین این ابزار و مدارهای مجتمع را رقم زده‌اند. این سیستم‌ها با توجه به ساختار و عملکرد آنها سیستم‌هایی با فیزیک چندگانه به‌شمار می‌روند. جامع‌بودن و پیچیدگی‌های موجود به‌خاطر ترکیب چند زمینهٔ مختلف فیزیکی در این ابزارها تحلیل و بررسی آنها را دشوار کرده و امکان تحلیل و طراحی یک نمونهٔ کامل با بررسی تمام جنبه‌های آن را غیرممکن ساخته است. نیروهای الکترومغناطیسی به‌عنوان نیروی اعمالی، وجود نیروی میرایی ویسکوز و قوانین حاکم بر فشار یک سیال نیوتونی و غیرنیوتونی در فضای موجود بین صفحهٔ متحرک و زمینه، وجود نیروهای الاستیک بازگرداننده، ارتعاش و جابه‌جایی تیر و همچنین تأثیر نیروهای بین‌مولکولی در حرکت این ابزارها سبب ترکیب و کوپل‌شدن چندین زمینهٔ انرژی در این سیستم‌ها خواهد شد. با توجه به ماهیت فیزیکی این ابزارها، جنبه‌های تحقیقی بی‌شماری در زمینهٔ طراحی، بهینه‌سازی و افزایش دقت این سیستم‌ها در برابر محققان وجود خواهد داشت. در این مقاله سعی شده است برخی از این جنبه‌ها به‌همراه گزارشی از کارهای انجام‌شده روی آنها مطرح شود.

واژگان کلیدی: میکرو الکترو مکانیک، میکرو تیر، نیروی کاسمیر[2]، فن‌کارمان، میرایی فشاری، نیروی الاستیک

مقدمه
تلفیق میکرو الکترونیک سیلیکونی با فناوری ماشین‌کاری در ابعاد میکرو، نوید پیشرفت در هر نوع محصولی را خواهد داد، تا بدین ترتیب به نظام جامع بر روییک تراشه جامع عمل بپوشاند. سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی فناوری با توانمندی‌های بالاست که با درک و کنترل عملکرد

میکروحسگرها و میکروعملگرها و جمع‌پذیری توانایی محاسبات دستگاه‌های میکرو الکترونیکی، سبب پیشرفت در تولیدات هوشمند می‌شود. مدارهای پیوسته میکرو الکترونیکی می‌توانند به‌عنوان مغز متفکر سیستم‌ها باشند و با افزودن چشم و بازو (میکروحسگرها و میکروعملگرها)، این قدرت تفکر توسعه داده می‌شود تا این میکروسیستم‌ها بتوانند محیط اطرافشان را حس و کنترل کنند. این حسگرها در ساده‌ترین حالت خود با کمک اندازه‌گیری پدیده‌های مکانیکی، گرمایی، زیستی، شیمیایی، نوری و مغناطیسی، اطلاعات را از محیط جمع‌آوری می‌کنند. پس از اخذ اطلاعات از حس‌کننده‌ها، دستگاه‌های الکترومکانیکی به‌کمک قدرت تصمیم‌گیری خود، محرک‌ها را به پاسخ‌هایی چون حرکت، جابه‌جایی، تنظیم‌کردن، پمپ‌کردن و فیلترکردن وادار کرده و محیط را به‌سمت نتایج مورد نظر هدایت می‌کنند. چون سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی همانند IC ها با روش‌های ساخت ناپیوسته[3] ساخته می‌شوند، می‌توانند سطح بسیار بالایی از کارکرد، اطمینان و پیچیدگی را با هزینهٔ اندک روی تراشهٔ کوچک سیلیکونی تشکیل دهند.

اگرچه سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی بسیار کوچک‌اند[4]، اما اهمیت فناوری آنها فقط به ابعاد و اندازهٔ آنها مربوط نمی‌شود. این سیستم‌ها تنها به موارد پایهٔ سیلیکونی محدود نمی‌شود، هرچند سیلیکون به‌دلیل داشتن خواص عالی به انتخابی مورد توجه برای مصارف مکانیکی با کیفیت بالا تبدیل شده است. مثلاً نسبت استحکام به وزن برای سیلیکون از بسیاری از مواد مهندسی دیگر بالاتر است، از همین‌رو ساخت وسائل مکانیکی با پهنای باند وسیع را ممکن می‌سازد. این فناوری فاصلهٔ بین سیستم‌های مکانیکی پیچیده و مدارهای مجتمع الکترونیکی را پر می‌کند.

قابل توجه است که سیستم‌های الکترونیکی، محرک‌ها و حس‌کننده‌ها در ابعاد بزرگ قابل اعتماد نیستند [۴] و داده‌های آنها با خطا همراه خواهد شد. از این‌رو فناوری سیستم‌های میکرونی امکان ساخت سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی را با استفاده از روش‌های ساخت ناپیوسته فراهم کرده که این امر سبب برابری قیمت و اعتبار حس‌کننده‌ها و محرک‌ها با مدارهای مجتمع می‌شود. جالب اینکه انتظار می‌رود کارآیی دستگاه‌ها و ابزارهای سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی بالاتر از عناصر و سیستم‌های مقیاس ماکرو و قیمت آن خیلی پایین‌تر از آنها باشد.

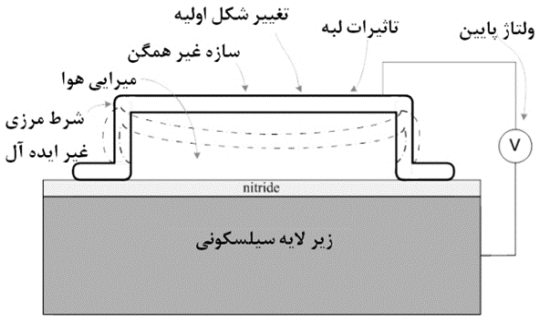
فیزیک مسئله

مسئله سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی مسئله‌ای با فیزیک چندگانه محسوب می‌شود و پدیده‌ای است که در آن ترکیب چندین زمینهٔ فیزیکی وجود دارد. مهم‌ترین پدیده‌ای که در یک مسئلهٔ میکرو الکترو مکانیکی شاهدیم مسئلهٔ نیروهای الاستیک،خمش و ارتعاش تیر و عوامل تأثیرگذار بر این موارد است. حرکت تیر با شرط مرزی مشخص خود برای ایفای نقش حسگر و یا حرکت آن به‌عنوان عملگر سبب ایجاد نیروهای خمشی به تیر و یا صفحهٔ میکرونی می‌شود. این نیروها توسط نیروهای الاستیک تیر خنثی و باعث می‌شوند تیر در محل تعادل خود قرار گیرد و یا در حالتی که سیستم به‌عنوان کلید مورد استفاده است با اعمال ولتاژ بیشتر به صفحهٔ پایینی اتصال کوتاه کند، بدون آنکه در آن شکست رخ دهد.

پدیدهٔ مهم دیگر برای دقت مورد نظر ایجادشده در تحلیل سازه‌ها در مقیاس میکرو به‌هم پیوستگی[5] جنبه‌های مکانیکی و الکتریکی موجود در مسئله و همچنین آثار غیرخطی موجود در سازه و نیروهای الکترواستاتیکی می‌باشد. همچنین شرایط مرزی غیر ایده‌آل، آثار لبه در نیروهای الکترواستاتیکی، تغییر شکل اولیه و تنش پسماند موجود در تیر و همچنین مواد غیرهمگن سازنده سیستم باعث پیچیدگی مدل ریاضی سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی برای حل تحلیلی و عددی آن می‌شود. تمام این آثار در شکل ۱ نمایش داده شده است [۳].

فناوری ساخت

برای تشریح تنوع و پیشرفت فناوری‌های ساخت سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی به ارائهٔ تاریخچه‌ای مختصر از آن می‌پردازیم.



شکل ۱. به‌هم پیوستگی‌های غیرخطی موجود در مسئله

سیستم‌های میکروالکترو مکانیکی برای نخستین‌بار در سال ۱۹۶۷ م با ساخت اولین قطعهٔ سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی بر پایهٔ سیلیکون توسط مؤسسهٔ آی. بی. ام.[۶] مطرح شدند. البته قابل ذکر است که این صنعت تا دو دههٔ بعد و تا زمان تکامل سیستم‌های ماشین‌کاری در ابعاد میکرو گسترش چندانی نداشت [۴]. با گسترش و توسعهٔ سیستم‌های ماشین‌کاری در مقیاس کوچک، توسعه و پیشرفت دستگاه‌های ساخته‌شده براساس فناوری سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی گسترش یافتند.

ساخت دستگاه‌های جداسازی مخلوط گاز در مقیاس میکرو در سال ۱۹۷۵، سر جوهرافشان پرینترها[۷] در سال ۱۹۷۷، میکرو آینه‌ها[۸] در سال ۱۹۸۰ و هارد دیسک‌ها با قابلیت ثبت اطلاعات مجدد در سال ۱۹۸۱ گوشه‌ای از این پیشرفت‌ها در حوزهٔ دانش سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی هستند. همچنین در سال ۲۰۰۰ دستگاه‌های بر پایهٔ اجزای ارتباط نوری سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی رونق یافتند. امروزه قطعات این سیستم‌ها به‌طور گسترده‌ای در صنعت، پزشکی، محصولات مصرفی و آزمایشگاهی استفاده می‌شوند، که البته رشد و بالندگی صنایع گوناگون را نیز درپی داشته‌اند.

نیروهای الکترواستاتیکی[۹]

نیروهای الکترواستاتیکی در مسائل میکرو الکترو مکانیکی نقش مهمی ایفا می‌کنند. در حسگرهای میکرو الکترو مکانیکی با تغییر فاصلهٔ صفحه و یا تیر متحرک نسبت به قسمت ثابت[۱۰] ظرفیت خازن ایجادشده بین صفحات تغییر می‌کند و با تغییر این ظرفیت نیروی الکترواستاتیکی مورد نظر نیز تغییر می‌یابد. در واقع همین سازوکار اساس کارکرد حسگرهای میکرو الکترو مکانیکی می‌باشد. از طرفی در عملگرهای میکرو الکترو مکانیکی اعمال نیروی الکترواستاتیکی باعث حرکت قسمت متحرک می‌شود و می‌تواند در سوئیچ‌ها جریان را قطع و وصل کند.

تأثیرات لبه

معادلهٔ توزیع نیروی الکترواستاتیکی بین صفحات ثابت و متحرک به‌صورت معادلهٔ ۱ است [۵]:

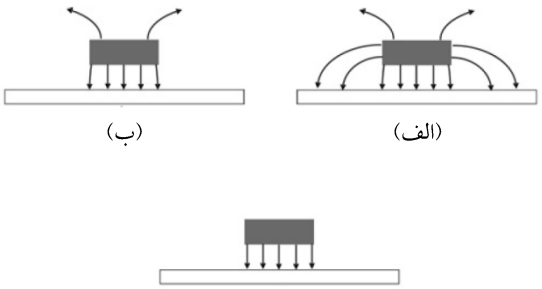
$$F_e = \frac{-V^2}{2} \times \frac{\partial C}{\partial g} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه V ولتاژ اعمالی و C ظرفیت خازن ایجاد شده در اثر نوع قرارگیری صفحات است. لازم به‌ذکر است ظرفیت خازن ایجادشده با سطح مقطع تیر یا صفحهٔ میکرونی و فاصلهٔ بین صفحات متناسب است. همچنین g ضریب گذردهی خلأ دی‌الکتریک موجود بین صفحات است. بررسی‌های انجام شده در مرجع [۵] نشان می‌دهد که تأثیر وجود لبه‌ها بر نیروهای الکترواستاتیکی در تیرها با ضخامت کم قابل صرف‌نظر نیست و این امر به‌دلیل اندازهٔ ضخامت تیر یا صفحهٔ میکرونی و طول محدود آنهاست. از همین‌رو تخمین ظرفیت خازن و نیروهای الکترواستاتیکی موجود یکی از زمینه‌های تحقیقاتی در مسائل میکروالکترومکانیکی می‌باشد. در همین راستا باترا[۱۱] و همکاران [۵] اثرات در نظر گرفتن آثار لبه بر ظرفیت خازن ایجادشده و تاثیر آن روی دقت اندازه‌گیری شده در ولتاژ کشیدگی پایین[۱۲] را بررسی کرده‌اند. آنها از فرمول‌بندی MOM[۱۳] برای اندازه‌گیری ظرفیت خازن ایجاد شده استفاده

نمودند. همچنین در این تحقیق با بررسی فرمول‌بندی‌های موجود برای ظرفیت خازن ایجاد شده از سه روش مجیس فوکما[۱۴]، پالمار[۱۵] و تئوری صفحه‌های موازی دقت هر کدام از این روش‌ها برای ضخامت‌های مختلف در محدودهٔ زیر مورد بررسی قرار گرفت.

$$0.2 < h/b < 2$$

نتایج کار نشان داده است که در تیرهای نازک با توجه به ایجاد اثرات لبه، تئوری صفحه‌های موازی و پالمار با توجه به در نظر نگرفتن این اثرات با خطا همراه بوده و مناسب نیستند. در شکل ۲ فیزیک فرمول‌بندهای مورد استفاده نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمایی از اثرات لبهٔ در نظر گرفته شده در فرمول‌بندی‌های گوناگون؛ الف) مجیس فوکما، ب) پالمر، ج) تئوری صفحهٔ موازی [۵]

رابطهٔ ۲ تخمین مقدار ظرفیت خازن ایجادشده تحت تأثیرات لبه با تئوری مجیس فوکما را نشان می‌دهد:

$$C = \varepsilon \left[\frac{b}{w} + 0.77 + 1.06 \left(\frac{b}{w} \right)^{0.25} + 1.06 \left(\frac{h}{w} \right)^{0.5} \right] \qquad (۲)$$

این تئوری تمام اثرات لبه را در نظر گرفته و حداکثر انحراف ۲ درصد را برای نسبت $0.1 \le h/g \le 4$ و $b/g \ge 1$ و حداکثر انحراف ۶ درصد را برای مقادیر بیشتر ارائه خواهد داد. با جایگذاری رابطهٔ ۲ در ۱ و مشتق‌گیری از ظرفیت خازن ایجادشده، ولتاژ اعمالی بر میکروتیر محاسبه خواهد شد.

$$F_e = \frac{1}{2} V^2 \varepsilon \left[\frac{b}{w^2} + \frac{53b}{200w^2 \left(\frac{b}{w} \right)^{0.75}} + \frac{53h}{100w^2 \left(\frac{h}{w} \right)^{0.5}} \right] \qquad (۳)$$

به‌طوری‌که در این رابطه ε ضریب گذر دهی خلأ است. با توجه به رابطهٔ ۳ می‌توان مشاهده کرد که نیروی الکتریکی اعمالی تابعی از خیز، ولتاژ اعمالی و اندازه تیر خواهد بود.

سازه

مهم‌ترین مسئله در بخش سازه در تحلیل سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی مواد مورد استفاده برای ساخت این قطعات خواهد بود. سیلیسیم پرکاربردترین ماده در ساخت تراشه‌هاست. این ماده هم از نظر اقتصادی به‌صرفه است و هم از نظر مکانیکی ویژگی‌های بی‌همتایی دارد. تک‌بلور سیلیسیم ماده‌ای کاملاً هوکی است، بدین معنا که به‌هنگام تغییر شکل هیچ‌گونه تنش پسماند ندارد و از این‌رو تلفات انرژی در آن وجود نخواهد داشت. این ویژگی باعث می‌شود تا مقاومت به خستگی این ماده بسیار بالا باشد. مواد دیگری مانند پلیمرها و فلزها نیز کاربرد گسترده‌ای برای ساخت سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی دارند.

همچنین تغییر در ساختار ماده به‌طوری‌که بهترین خواص را در برابر شرایط محیطی داده شده داشته باشد نیز از زمینه‌های تحقیقاتی جدید است که مورد توجه اکثر محققان در این زمینه قرار گرفته است. از این‌رو استفاده از خواص کامپوزیت‌ها و مواد هدفمند در طراحی سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی امری ضروری به‌نظر می‌رسد. اما نکتهٔ مهمی که در این بین وجود خواهد داشت امکان

ساخت سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی توسط مواد فوق می‌باشد. به‌طور یقین با پیشرفت فناوری در سال‌های آینده امکان لایه‌چینی مواد و پخت آنها برای داشتن مواد هدفمند و کامپوزیت در مقیاس میکرو و نانو امکان‌پذیر خواهد شد. تابع نسبت حجمی سیلسیم و ژرمانیم در مدل سازییک ماده هدفمند مطابق رابطهٔ ۴ می‌باشد:

$$V_1 + V_2 = 1$$
$$V_2(z) = (0.5 + \bar{z})^n \qquad (۴)$$

با توجه به این رابطه ژیا[۱۶] و همکاران [۶] در پژوهش خود تأثیر تابع تغییر خواص مواد هدفمند را بر مقدار ولتاژ کشیدگی پایین بررسی کردند. آنها در این تحقیق با مدل‌سازی ماده به‌کار رفته در ساخت میکرو تیرها با خواص یک مادهٔ هدفمند در سازهٔ آن نشان دادند که با افزایش توان نمایی n مقدار ولتاژ کشیدگی پایین کمتر خواهد شد. در واقع در این حالت با افزایش نسبت سیلسیم به ژرمانیم و مقدار بیشتر ضریب الاستیسیته در سیلسیم باعث افزایش سختی و در نتیجهٔ آن افزایش فرکانس طبیعی خواهد شد. همچنین نشان دادند که با افزایش انحنای اولیهٔ تیر اختلاف نتایج در ولتاژ کشیدگی پایین برای تیر همگن و تیر ساخته شده با مواد هدفمند افزایش خواهد یافت.

نکته مهم دیگر، که در بخش سازه در تحلیل‌ها و معادلات تأثیرگذار است، ماهیت غیرخطی این‌گونه سازه‌هاست. اصولاً صفحه‌های موازی تحت نیروهای الکترواستاتیکی ماهیتی غیرخطی دارند [۷].

نیروهای بین مولکولی

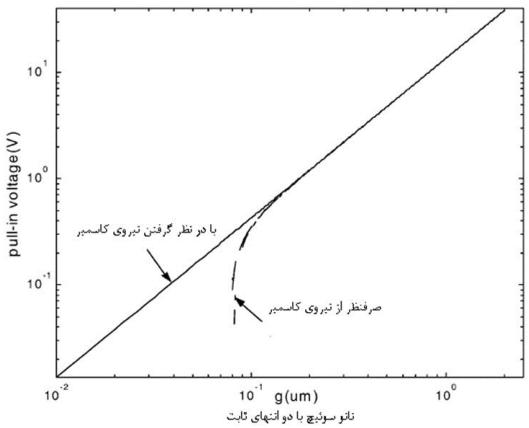
با توجه به مقیاس سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی، که در ابعاد نانو و میکرو هستند، در این ابعاد و در حرکت اجزای این سیستم‌ها نیروهای بین مولکولی نیز می‌توانند در نوع پاسخ سیستم تأثیرگذار باشند. دو نوع نیروی بین مولکولی در ابزارهای میکرو الکترو مکانیکی تأثیرگذار می‌باشد. این نیروها عبارت‌اند از: نیروی واندروالس[۱۷] و نیروی کاسمیر. در این بررسی ابتدا ماهیت نیروی واندروالس توضیح داده شده است. اتم‌ها توسط پیوندهای کووالانسی کنار هم نگه داشته شده‌اند. نیروهایی که مولکول‌های یک ماده را در حالت مایع یا جامد به همدیگر ارتباط می‌دهد به نیروهای بین مولکولی معروف هستند. نیروهای بین مولکولی بین مولکول‌های قطبی با این نیروها بین مولکول‌های غیرقطبی با هم تفاوت دارند. معمولاً نیروهای بین مولکولی به نام نیروهای واندروالسی معروف‌اند. وجود این نیروها بین مولکول‌ها باعث می‌شود که یک ترکیب جامد مولکولی شکل معینی داشته باشد و با غلبه بر این نیروها بتوان آن را به حالت مایع درآورد. اولین بار یوهانس واندروالس در سال ۱۸۷۳ م وجود نیروهای کشش بین مولکولی در میان مولکول‌های گاز را مطرح کرد. امروزه نیروهای بین مولکولی را به‌صورت عام نیروهای واندروالس می‌نامند.

نیروی کاسمیر

برای تعریف نیروی کاسمیر نیاز به یادآوری مفهوم قضیهٔ بور در مواد هستیم. این نظریه بیان می‌کند که در صورت قرار گرفتن دو ذره در کنار یکدیگر مولکول‌های آنها قطبی شده و ذرات مثبت و منفی در ماده تغییر جهت می‌دهند و این ذرات یکدیگر را جذب می‌کنند. نیروی کاسمیر نیز ماهیتی مشابه دارد با این تفاوت که ماهیت نیروی کاسمیر به‌صورت یک تشعشع فشاری است و انتشار این نیرو به‌علت نوسانات امواج الکترومغناطیسی در مواد می‌باشد [۸]. نیروی کاسمیر در تحلیل‌های مربوط به سازه‌ها در مقیاس میکرو و نانو نقش اساسی دارد. این امر به دو دلیل می‌باشد: نیروی کاسمیر در واحد سطح اعمال شده و معمولاً با توان سوم و چهارم فاصلهٔ میان دو سطح نسبت معکوس دارد و زمانی‌که فاصلهٔ بین دو سطح در مقیاس کمتر از میکرون باشد، نیروی کاسمیر از نظر مقداری افزایش قابل توجهی خواهد داشت. همچنین در سازه‌های ساخته‌شده در این مقیاس وجود قسمت‌های متحرک سبب تغییر فاصله میان اجزا شده و در فاصله‌های نزدیک

صفحات نیروی کاسمیر می‌تواند در پاسخ دینامیکی و رفتار ارتعاشی سازه نقش اساسی داشته باشد. همچنین لازم به‌ذکر است که نقش این نیرو هنگامی‌که دو صفحهٔ موازی تحت نیروهای الکترواستاتیک یکدیگر را جذب می‌کنند به‌دلیل ایجاد میدان‌های قطبی در ماده بیشتر خواهد شد [۹].

لین[۱۸] و همکاران [۸] در تحقیق انجام‌شده در سال ۲۰۰۵ تأثیر نیروی کاسمیر را در ولتاژ کشیدگی پایین بررسی کردند. آنها معادلات یک میکروسوئیچ را با در نظر گرفتن نیروی کاسمیر و با صرف‌نظر از این نیرو به‌صورت تحلیلی و با روش پرتوبیشن[۱۹] حل نمودند. در این بررسی مشخص شد که در نظر گرفتن نیروی کاسمیر می‌تواند باعث افزایش ولتاژ کشیدگی پایین شود. در شکل ۳ ولتاژ کشیدگی پایین برحسب فاصلهٔ بین صفحات برای دو حالت در نظر گرفته شده، رسم شده است. نتایج بیانگر این نکته است که در جایی‌که فاصلهٔ صفحات از یکدیگر بیشتر شود تأثیر نیروی کاسمیر کاهش یافته و نتایج دو حالت به یکدیگر نزدیک خواهد شد.



شکل ۳. ولتاژ کشیدگی پایین برحسب فاصلهٔ بین صفحات [۸]

بعد از شناخت ماهیت اصلی نیروهای بین مولکولی باید تأثیر این نیروها بر شرایط مسئله بررسی شود. نیروی کاسمیر و واندروالس اعمالی بر روییک تیر در مقیاس میکرو نیروهایی غیرخطی محسوب می‌شوند و هر دو نیرو با توان‌هایی از خیز تیر رابطه عکس خواهند داشت. از این‌رو، در نظر گرفتن این نیروها در حل مسئله سبب ایجاد پارامترهایی کاملاً غیرخطی در معادلات حرکت تیر خواهد شد. نیروی واندروالس در واحد طول تیر طبق روابط ارائه شده در مرجع [۹] به‌شرح زیر است:

$$F_3 = \frac{A \times b}{6\pi \left[d_0 - w(x,t) \right]^3} \qquad (۵)$$

به‌طوری‌که در این رابطه A مقدار ثابت هانکر[۲۰] می‌باشد. همچنین b عرض تیر و d_0 فاصلهٔ هوایی موجود بین دو تیر است. پارامتر W نیز خیز تیر است که تابعی از مکان و زمان می‌باشد. مقدار نیروی کاسمیر اعمالی بر تیر نیز به‌صورت زیر می‌باشد:

$$F_4 = \frac{\pi^2 \times hcb}{240 \left[d_0 - w(x,t) \right]^3} \qquad (۶)$$

به‌طوری‌که در این معادله h ثابت پلانک است.

نیروهای الاستیک

نیروهای مکانیکی اعمالی از قبیل ایجاد کشش عرضی در تیر می‌تواند سبب افزایش سختی تیر و به‌دنبال آن افزایش فرکانس طبیعی تیر شود. همچنین اعمال نیروهای الکتریکی مستقیم و متناوب می‌تواند باعث ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در مقیاس میکرو شود و از همین‌رو امکان استفاده از تئوری خطی برای جنبه‌های الاستیسیته و ارتعاشی تیر را بی‌استفاده خواهد کرد. در این حالت برای حل معادلات خیز و ارتعاش تیر از تئوری غیرخطی فن‌کارمان[۲۱] استفاده خواهد شد. همچنین در بررسی‌های انجام‌شده از تئوری الاستیسیتهٔ غیرمحلی[۲۲] نیز برای مدل‌کردن آثار الاستیک تیر در مقیاس میکرو استفاده خواهد شد.

تحلیل پایداری

مهم‌ترین زمینهٔ مطالعاتی در سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی مسئلهٔ ناپایداری کشیدگی پایین در این وسائل و بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی حاکم بر این سیستم‌ها در مقدار ولتاژ کشیدگی پایین است. این ناپایداری زمانی رخ

خواهد داد که صفحه یا تیر متحرک با صفحهٔ پایین تماس برقرار کند. در حرکت یک تیر و یا صفحهٔ سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی نیروی الکترواستاتیک باعث جذب صفحهٔ بالایی به‌طرف قسمت ثابت زمینه می‌شود. در این حالت نیروی الاستیک بازگرداننده موجود در تیر باعث بازگرداندن تیر به حالت اولیه خود می‌شود. حال اگر نیروی الکترواستاتیک، که در اثر ولتاژ اعمالی پدیدار شده، از حد معینی بیشتر شود، دیگر نیروهای الاستیک توانایی بازگرداندن تیر به حالت اولیه را نخواهند داشت. در این حالت تیر به‌سمت صفحهٔ پایینی رفته و در یک لحظه با آن تماس برقرار خواهد کرد. ولتاژی که در آن این ناپایداری در تیر ایجاد شود را ولتاژ کشیدگی پایین می‌گویند. این وضعیت در حالتی‌که فاصلهٔ بین دو تیر یا صفحه کمتر از ۱/۳ فاصله بین آنها شود، رخ خواهد داد [۷].

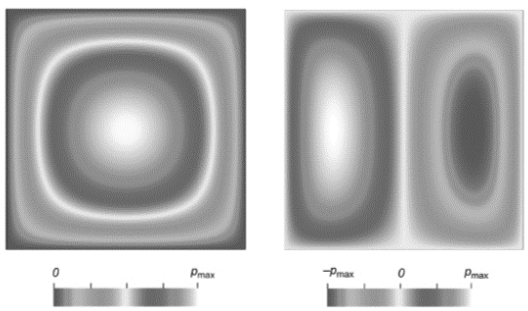
میرایی[۲۳]

سازه‌های میکرو الکترو مکانیکی توسط هوا احاطه شده است. زمانی‌که سازه تغییر شکل داشته باشد یا در حال ارتعاش باشد، حرکت سازه تحت تأثیر هوای اطراف قرار خواهد گرفت. این تأثیر به‌صورت نیروی میرایی بر سازه تأثیر خواهد گذاشت. حرکت سیال در این مسائل یک پدیدهٔ سه‌بعدی می‌باشد و تحلیل آن بسیار مشکل خواهد بود. این تأثیر در سازه‌هایی که ارتفاع دو صفحهٔ در آنها کوچک باشد، بیشتر خواهد بود. در این حالت برای ساده‌سازی مسئله، سیال به‌صورت دوبعدی مدل‌سازی می‌شود. میرایی ایجادشده از طریق لزجت سیال ایجاد می‌شود. از این‌رو باید قوانین حاکم بر لزجت سیال توسط مدل مناسب شبیه‌سازی شود. معادلهٔ حاکم بر لزجت سیال در حالتی‌که ارتفاع دو صفحه بزرگ بوده و فشار سیال نیز از فشار محیط بیشتر باشد، براساس معادلات ناویر استوکس[۲۴] خواهد بود. همچنین در فشارهای پایین و در مقیاس نانو، که محدودهٔ عدد نودسان بزرگ‌تر از ۱۰ باشد، معادلات پیوستگی صادق نبوده و باید از دینامیک مولکولی برای حل آنها استفاده شود [۱۶]. با توجه به پیچیدگی‌ها و جملات غیرخطی موجود در معادلات ناویر استوکس فرضیاتی برای ساده‌سازی این معادلات در نظر گرفته می‌شود. این فرضیات عبارت‌اند از:

۱. کوچک‌بودن فاصله بین دو قسمت ثابت و متحرک

۲. دامنهٔ کوچک ارتعاشات و فرکانس پایین ارتعاشات سازه

دو نوع میرایی ویسکوز فشاری و استوکس[۲۵] در این سازه‌ها وجود دارد. میرایی فشاری غشایی براساس فشار تحریک ایجاد شده در اثر حرکت سازه ایجاد خواهد شد. میرایی استوکس نیز بر اثر جریان برشی ایجاد شده در فاصلهٔ هوایی ایجاد خواهد شد. در رابطه با موج فشاری ایجادشده سرعت در جهت‌های x و y بسیار بیشتر از سرعت در جهت z می‌باشد. پروفیل سرعت در هر جهت میزان ضریب میرایی را مشخص می‌کند. همچنین این ضریب برای دو نوع حرکت عمودی و پیچشی با توجه به توزیع متفاوت تغییرات فشار متفاوت خواهد بود.



شکل ۴. توزیع فشار در سطح برای حرکت عمودی و پیچشی

لی و همکاران در تحقیقی به بررسی آثار میرایی فشاری بر دامنه و فرکانس ارتعاش یک میکرو تیر به‌روش آزمایشگاهی و نظری پرداختند. آنها در این تحقیق برای ساده‌سازی مسئله ارتعاش تیر را در مد صلب آن بررسی کردند. همچنین با ساده‌سازی‌های انجام‌شده معادلات ناویر استوکس به معادلات رینولدز ساده شدند [۱۱]. همچنین لازم به‌ذکر است که در فرکانس‌های بالا علاوه بر میرایی‌های یادشده باید اثر ویسکوآکوستیک نیز مورد

بررسی قرار گیرد؛ زیرا در فرکانس‌های بالا طول موج گاز در مقایسه با ابعاد سطح قابل ملاحظه خواهد بود. گپ سازه در این مسائل به‌صورت یک مادهٔ دی‌الکتریک همگن در نظر گرفته می‌شود.

همچنین سیال موجود در این بین نیز به‌صورت یک سیال نیوتونی مدل‌سازی می‌شود و خواص لزجت آن نیز از قوانین حاکم بر این نوع سیال تبعیت خواهد کرد. افزایش فرکانس تشدید باعث افزایش تأثیرات میرایی خواهد شد. در واقع افزایش فرکانس ارتعاشات باعث افزایش ضریب میرایی می‌شود. میرایی هوای موجود در فضای خالی بین دو تیر با فاصله صفحه‌ها با توان ۳ رابطه عکس دارد.

جمع‌بندی

با توجه به پیشرفت علوم در مقیاس‌های میکرو و نانو و همچنین ساخت سیستم‌ها و ابزارها در این مقیاس، ضرورت شناخت ماهیت فیزیکی و رفتار ابزار مورد استفاده در این سیستم‌ها را نمایان ساخته است. آنچه در این مقاله ارائه شد، مفاهیم اولیه و فیزیک حاکم بر سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی بود. این سیستم‌ها به‌عنوان پرکاربردترین ابزار با مقیاس نانو و میکرو در زندگی عادی بشر به‌شمار رفته و از این‌رو شناخت ماهیت آنها از اهمیت بالایی برخوردار است.

به‌هم پیوستگی موجود در جنبه‌های فیزیکی حاکم بر این سیستم‌ها باعث دشواری و عدم درک صحیح رفتار آنها شده است. پدیدهٔ رفتار غیرخطی الاستیک تیر در مقیاس میکرو و نانو، نیروهای الکترواستاتیک و تأثیرات لبه و همچنین نیروی میرایی فشاری هوا از جمله این مسائل می‌باشند که در این مقاله توضیح داده شده است. آنچه در اینجا روشن است سرفصل‌هایی می‌باشد که در اینجا ارائه شده و هر کدام می‌تواند به عنوان زمینه‌ای تحقیقاتی مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

مآخذ

[1] Younis, Mohammad. "Reduced-Order Model for Electrically Actuated Microbeam-Based MEMS," Microelectromechanical system 12, 2003: pp. 672-680.

[2] Stum, "Sensor Accuracy and Calibration Theory and Practical Application," Paper presented at the annual international conference on Building Commissioning, San Francisco, USA, 2006.

[3] Younis, M. "Investigation of the mechanical behavior of micro beam based MEMS devices," Master diss., Virginia TECH University, 2001.

[4] Najar, F. "Static and dynamic behaviors of MEMS microactuators," PhD diss, Tunis El Manar University, 2008.

[5] Batra, R. "Capacitance estimate for electrostatically actuated narrow microbeams," Micro & Nano Letters 1, 2006, pp. 71-73.

[6] Cao, X. "Characterization of the variation of the material properties in a freestanding inhomogeneous thin film," Physics Letters a 357, 2010, pp. 220-224.

[7] Nayfeh, Ali. "Modeling and performance study of a beam micro gyroscope," Sound and Vibration 329, 2010, pp. 4970–4979.

[8] Lin, W. "Casimir effect on the pull-in parameters of nanometer switches," Microsystem Technologies 11, 2005, pp. 80–85.

[9] Moghimi Zand. "Dynamic pull-in instability of electrostatically actuated beams incorporating Casimir and van derWaals forces," JMES 224, 2009, pp. 2037-2048.

[10] Shu, Ch. *differential quadrature and its application in engineering*. London: springer, 2000.

[11] Houlihan, R. “Modeling squeeze film effects in a MEMS accelerometer with a levitated proof mass, Micromech,” Microeng, 2005, pp. 893-902.
[12] Bao, M. “Review Squeeze film air damping in MEMS,” Sensors and Actuators a 136, 2007, pp. 3-27.
[13] Veijola, T. “Gas Damping in Vibrating MEMS Structures,” Modeling in MEMS 14, 2010, pp. 260-270.
[14] Wei, X. “Gaseous slip flow in parallel plate’s microchannel,” Micro nanoelectr, 2005, pp. 129-132.
[15] Hao, Z. “Modeling air damping effect in a bulk micro machined 2D tilt mirror,” Sens. Actuators a, 2002, pp. 42-48.
[16] Feng, C. “Squeeze-film effects in MEMS devices with perforated plates for small amplitude vibration,” MicrosystTechnol, 2007, pp. 625-633.
[17] Christian, R. “The theory of oscillating-vane vacuum gauges,” *Vacuum*, 1996, pp. 175-178.

پی‌نوشت

1. MEMS
2. Casimir
3. Discontinuous Production
۴. مثلاً سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی الکتروموتورهایی کوچک‌تر از قطر موی انسان دارند.

5. Coupling
6. IBM
7. Inkjet head printer
8. Micro mirror
9. Electrostatic
10. Subtract
11. Batra
12. Pull-in
13. Method of moments
14. Mejis–Fokkema
15. Palmer
16. Jia
17. VanderWaals
18. Lin
19. Perturbation
20. Hankar
21. Von karman
22. Nonlocal Elasticity
23. Damping
24. Navier Stokes
25. Stokes