

# طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سوئیچ خازنی میکروالکترومکانیکی RF به‌منظور کاهش ولتاژ تحریک

فرید خمویی تولی<sup>۱</sup> جواد یavand حسنی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

[f\\_khamoii@elec.iust.ac.ir](mailto:f_khamoii@elec.iust.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

[yavand@iust.ac.ir](mailto:yavand@iust.ac.ir)

**چکیده:** بالا بودن ولتاژ تحریک یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های سوئیچ‌های RF MEMS است. یکی از روش‌های کاهش ولتاژ تحریک، کاهش ثابت فنری در ساختار سوئیچ است. در این مقاله ثابت فنری سوئیچ RF MEMS با روش انرژی مدل شده و ثابت فنری آن به‌صورت تحلیلی به‌دست آمده است. نتیجه این تحلیل یک راهنمای طراحی است که حداقل میزان مجاز ثابت فنری را نشان می‌دهد. سپس ساختار جدیدی با ولتاژ تحریک بسیار پایین برای سوئیچ‌های RF MEMS ارائه می‌شود که محدودیت فوق در آن رعایت شده است. نتایج تحلیل، مقدار ثابت فنری ۰,۰۷۱۴ نیوتن بر متر و مقدار ولتاژ تحریک ۱,۶۱ ولت را نشان می‌دهد. به‌منظور ارزیابی عملکرد ساختار ارائه‌شده و صحت‌گذاری نتایج تحلیل، سوئیچ طراحی‌شده با استفاده از نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی شده است. نتایج این شبیه‌سازی، ولتاژ تحریک ۱,۸ ولت، زمان سوئیچینگ ۲۵,۶ میکروثانیه، فون مایسس ۴,۵ مگا پاسکال، فرکانس طبیعی ۳۱۱۸,۶ هرتز، جرم آن ۰,۲۰۶ نانوگرم و درنهایت ثابت فنر ۰,۰۷۹ نیوتن بر متر را نشان می‌دهد. جنس پل و بیم‌ها از طلا است و از  $\text{Si}_3\text{N}_4$  به‌عنوان دی‌الکتریک استفاده شده است. درنهایت، عملکرد فرکانس بالای سوئیچ طراحی‌شده با استفاده از نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی، ایزولاسیون ۲۵ دسی‌بل، اتلاف عبوری ۰,۷ دسی‌بل و اتلاف بازگشتی ۱۶ دسی‌بل را در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** سوئیچ‌های RF MEMS، ثابت فنری، ولتاژ تحریک، زمان سوئیچینگ، فون مایسس، روش انرژی

**نوع مقاله:** پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.1

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر یavand حسنی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - نارمک - فرجام - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده‌ی برق

## ۱- مقدمه

در سالیان اخیر تحقیقات گسترده‌ای جهت توسعه سامانه‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) فرکانس بالا انجام شده است. خازن‌های متغیر، سوئیچ‌ها و انتقال‌دهنده‌های فاز از جمله عناصری هستند که با فناوری میکروالکترومکانیکی ساخته شده‌اند. در این میان سوئیچ‌های RF MEMS به دلیل کاربرد وسیع و بدون جایگزین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [۱، ۲]. از این سوئیچ‌ها به‌طور گسترده‌ای در کاربردهایی از قبیل فناوری ارتباطات پیشرفته، ارتباطات ماهواره‌ای، هوافضا، دفاعی، تلفن‌های همراه و تجهیزات اندازه‌گیری خودکار استفاده می‌شود [۳]. نیروهای موردنیاز برای حرکت مکانیکی این قطعه‌ها می‌توانند با استفاده از نیروی الکترواستاتیکی، مغناطیسی، پیزوالکتریکی یا طرح‌های حرارتی تأمین شود. تحریک الکترواستاتیکی به دلیل سرعت بالا، امکان ساخت و تحقق راحت‌تر در کنار افزایش‌های کوچک، قابلیت اطمینان زیاد خصوصاً در مقابل تغییرات محیطی و دمایی، مصرف توان بسیار کم (در حد صفر)، تکیه بر انرژی ذخیره‌شده برای حفظ حالت دلخواه افزاره، مقیاس‌پذیری مطلوب و ساخت ساده‌تر و سازگاری با فناوری CMOS<sup>۲</sup> به‌عنوان رایج‌ترین روش تحقق تحریک سوئیچ مطرح می‌گردد [۴، ۵]. تلفات داخلی پایین، ایزولاسیون بالا، پهنای باند بزرگ، توان مصرفی کم، وزن، حجم، و نیز سازگاری با فناوری CMOS، از مزایای عمده این سوئیچ‌ها نسبت به سوئیچ‌های نیمه‌هادی و دیودهای پین است [۶]. اصلی‌ترین عیب در سوئیچ‌های RF MEMS این است که امکان دستیابی به ولتاژ تحریک کوچک به همراه تلفات ورودی کم وجود ندارد، زیرا کاهش ولتاژ تحریک با کاهش عرض شکاف هوایی در ساختار سوئیچ، منجر به افزایش تلفات عبوری می‌شود. معادله دینامیکی سوئیچ RF MEMS به‌صورت رابطه زیر است [۷].

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = \frac{\epsilon_0 A V^2}{2 \left( d - x + \frac{t_d}{\epsilon_r} \right)} \quad (1)$$

$m$  جرم سوئیچ،  $b$  ضریب میرایی که ناشی از ویسکوزیتی سیال و  $k$  ثابت فنری سوئیچ است در طرف راست معادله نیروی الکترواستاتیک را مشاهده می‌کنیم. با حل این معادله به ولتاژ تحریک می‌رسیم [۸، ۹].

$$V = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27A\epsilon_0}} \quad (2)$$

پائین آوردن ولتاژ تحریک به یکی از سه طریق زیر امکان‌پذیر است:

- افزایش سطح مقطع، که اندازه سوئیچ و اتلاف عبوری نیز افزایش خواهد یافت.
- کاهش شکاف بین باریکه سوئیچ و الکتروود پائین، که در عمل با مشکلاتی همچون افزایش اتلاف عبوری همراه است.
- طراحی ساختار با ثابت فنر کم. در سال‌های اخیر محققین از هر سه روش برای کاهش ولتاژ تحریک استفاده کرده‌اند. بهترین روش طراحی ساختار با ثابت فنر کم است، [۹-۱۲].

در [۱۳] با استفاده از ساختاری جدید با خم‌های مارپیچی غیریکنواخت و عرض خم متغیر سبب کاهش ثابت فنری شده و در نتیجه با عرض خم ۱۰۰ تا ۲۸۰ میکرومتر ولتاژ تحریک به رنج ۱۵ تا ۳ ولت رسیده است و همچنین از روش کار و انرژی برای به دست آوردن جابجایی و درنهایت ثابت فنری استفاده شده است. در [۱۴] و [۱۵] ابتدا با معرفی یک مدل جدید برای ولتاژ تحریک با استفاده از تحلیل خازنی و به دست آوردن رابطه دقیق ریاضی توانسته‌اند تأثیر نیروهای الکترواستاتیک و میدان‌های حاشیه‌ای و همچنین حفره‌ها را در نظر بگیرند. همچنین برای بهبود تأثیر حفره‌ها الگوریتم مناسبی پیشنهاد شده است و درنهایت با ساختار پیشنهاد شده، ولتاژ تحریک به ۲،۱ ولت رسیده است. در مقاله‌ای دیگر با به دست آوردن دقیق ثابت فنری، ساختار جدیدی برای سوئیچ سری RF MEMS ارائه شده است که علاوه برداشتن مساحت کم و پارامترهای RF خوب ولتاژ تحریک به ۴،۰۵ ولت رسیده است [۱۶]. به‌عنوان روش دیگری، برای کاهش ولتاژ تحریک و رسیدن به اتلاف بازگشتی کم و ایزولاسیون بالا ساختار پله‌ای برای کاهش فاصله هوایی بین پل و خط انتقال پیشنهاد داده شده است [۱۷]. در این مقاله از AIN به جای دی‌الکتریک SiO<sub>2</sub> و Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> استفاده شده است که به دلیل داشتن ثابت دی‌الکتریک بیشتر، مقدار اثر خازنی پل در حالت پایین بودن آن افزایش می‌یابد و در نتیجه ایزولاسیون سوئیچ افزایش پیدا می‌کند. بطور کلی، در تمام پژوهش‌ها به دلیل اینکه کاهش ثابت فنری روش مناسب‌تری برای کاهش ولتاژ تحریک است ساختارهای پیشنهاد داده‌اند که ثابت فنری را کم کنند [۱۰، ۱۸]. اما باید به این نکته توجه داشت که کاهش ثابت فنری با محدودیتهایی همراه است و کاهش بیش از حد آن سبب بروز مشکل می‌شود [۶، ۱۹].

در این مقاله ساختار جدیدی ارائه شده است. در بخش ۲ ساختار پیشنهادی با ابعاد آن آورده شده است. در بخش ۳ با استفاده از روش انرژی ثابت فنری و ولتاژ تحریک آن محاسبه شده و برای راستی آزمایی نتایج، از نرم‌افزار COMSOL در بخش ۴ استفاده شده است. پارامترهای

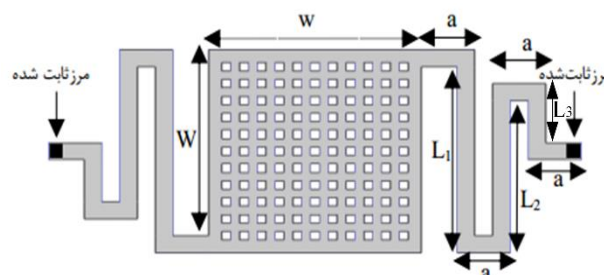
جدول (۱): مشخصات ساختار پیشنهاد شده

پارامتر	سمبل	اندازه (μm)
عرض پل	w	۱۲۰
طول پل	W	۱۲۰
طول بیم‌های افقی	a	۳۰
طول بیم عمودی	L1	۱۱۰
طول بیم عمودی دوم	L2	۹۰
طول بیم عمودی سوم	L3	۳۰
عرض خم	w <sub>m</sub>	۱۰
ضخامت دی‌الکتریک	td	۰,۱۵
ضخامت پل متحرک	tb	۰,۶
فاصله هوایی بین دو سطح	g0	۲,۵
اندازه طول حفره‌ها	wh	۵
تعداد حفره‌ها	$n_l \times n_w$	۱۱*۱۱
ثابت دی‌الکتریک	$\epsilon_r$	۷,۶
مدول یانگ طلا	E	۷۹GPa

پراکندگی عملکرد سوئیچ را در کاربردهای فرکانس بالا مشخص می‌کند لذا برای پیدا کردن آن‌ها از نرم‌افزار HFSS استفاده شده است. ثابت فرنری ۰,۰۷۱۴ نیوتن بر متر و ولتاژ تحریک ۱,۶۱ ولت برای ساختار پیشنهاد شده محاسبه شده است. سوئیچ پیشنهادی با شبیه‌سازی در COMSOL دارای ولتاژ تحریک ۱,۸ ولت و زمان سوئیچینگ ۲۵,۶ میکروثانیه و با حداکثر تنش قابل تحمل ۴,۵ مگا پاسکال، فرکانس طبیعی سوئیچ ۳۱۱۸,۶ هرتز و جرم آن ۰,۲۰۶ نانوگرم و در نتیجه ثابت فرنری ۰,۰۷۹ نیوتن بر متر است. اختلاف در نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در ثابت فرنری قابل قبول و در ولتاژ تحریک از تقریب در فرمول ناشی می‌شود. جنس پل و بیم‌ها از طلا و دی‌الکتریک از Si3N4 استفاده شده است. در بخش ۵ به نتیجه گیری پرداخته شده است.

## ۲- ساختار سوئیچ پیشنهادی

شکل (۱) ساختار مکانیکی قسمت متحرک سوئیچ پیشنهاد شده را نشان می‌دهد از دو ساختار فرنری معکوس هم برای حفظ تعادل استفاده شده است که از دو طرف ثابت شده‌اند.



شکل (۱): طراحی قسمت متحرک سوئیچ

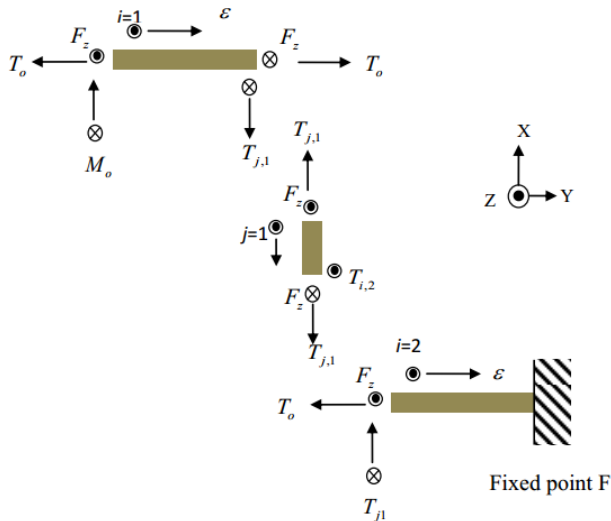
در جدول (۱) اندازه قسمت‌های مختلف سوئیچ پیشنهاد شده آورده شده است. اولین قدم در طراحی تعیین جنس مواد برای قسمت‌های مختلف ساختار پیشنهادی است به همین دلیل برای انتخاب جنس پل، مدول یانگ و چگالی جرمی به عنوان یکی از مهمترین معیار برای انتخاب در نظر گرفته می‌شود زیرا ولتاژ تحریک با ثابت فرنری و ثابت فرنری به مدول یانگ و چگالی جرمی ارتباط دارد. برای کاهش ولتاژ تحریک و بهبود زمان سوئیچینگ باید نسبت مدول یانگ به چگالی جرمی بیشتر شود از این نظر طلا بهترین انتخاب برای پل است. ویژگی‌های دی‌الکتریک از قبیل ثابت دی‌الکتریک مقاومت دی‌الکتریک جریان نشتی و زبری سطح در عملکرد سوئیچ RF MEMS تأثیر دارند برای کاهش ولتاژ تحریک باید ثابت دی‌الکتریک زیاد شده و تلفات ac کم شود برای Si3N4 ثابت دی‌الکتریک حدود ۷,۶ است به همین دلیل Si3N4 گزینه مطلوبی برای لایه دی‌الکتریک است [۲۰].

## ۳- تحلیل ثابت فرنری ساختار پیشنهادی

مدل‌سازی ثابت فرنری با روش انرژی به این صورت است که در ابتدا باید جابه‌جایی حاصل از نیروی الکترواستاتیک در تیرها محاسبه شود و سپس با استفاده از رابطه (۳) می‌توان ثابت فرنری را به دست آورد [۲۱].

$$k_z = \frac{F_z}{\delta_z} \quad (3)$$

$F_z$  نیروی الکترواستاتیک اعمالی و  $\delta_z$  جابجایی تیرها را نشان می‌دهد. در این روش خم‌های ساختار پیشنهاد شده به صورت تیرهای مکانیکی در نظر گرفته شده‌اند و برای هر تیر باید گشتاور خمشی و گشتاور پیچشی محاسبه شود زیرا در اثر اعمال نیروی  $F_z$  در هر تیر گشتاورهای پیچشی و خمشی ایجاد می‌شوند. برای سادگی محاسبات خم‌های ساختار پیشنهاد شده به هفت تیر تقسیم شده و محاسبات روی هریک از آن‌ها انجام شده است. در شکل (۲) مشخصه‌های خم پیشنهادی آورده شده است. در سازه مکانیکی پیشنهاد شده سرعت تیر



شکل (۳): نحوه تحلیل قسمت‌های مختلف خم ساختار پیشنهادی در روش انرژی، انرژی حاصل از نیرو خارجی و گشتاورهای داخلی به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید. لذا می‌توان جابه‌جایی را به صورت رابطه (۶) تعریف کرد. سپس با رابطه (۳) ثابت فنری محاسبه می‌شود [۲۲].

$$U = \left( \sum_{i=1}^N \int_0^a \left( \frac{M_{a,i}^2}{2EI_{x,a}} + \frac{T_{a,i}^2}{2GJ_a} \right) d\epsilon + \sum_{j=1}^N \int_0^{L_j} \left( \frac{M_{b,j}^2}{2EI_{x,b}} + \frac{T_{b,j}^2}{2GJ_b} \right) d\epsilon \right) \quad (5)$$

$$\delta_z = \frac{\partial U}{\partial F_z} \quad (6)$$

در رابطه انرژی E مدول یانگ، و G مدول گشتاور پیچشی و J ثابت پیچش و  $I_{x,a}$  و  $I_{x,b}$  ممان اینرسی برای خم‌های افقی و عمودی هستند که مقدارشان به صورت رابطه (۷) حساب می‌شود [۲۲].

$$I_x = I_{x,a} = I_{x,b} = \int_{-w/2}^{w/2} \int_{-t/2}^{t/2} x^2 dx dz = \frac{wt^3}{12} \quad (7)$$

و ممان اینرسی در جهت Z هم به صورت رابطه (۸) است [۲۲].

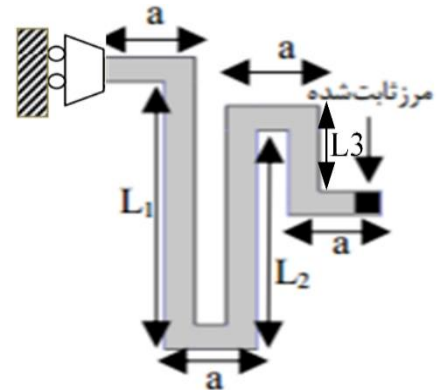
$$I_z = \int_{-t/2}^{t/2} \int_{-w/2}^{w/2} x^2 dx dz = \frac{tw^3}{12} \quad (8)$$

مدول پیچش رابطه (۹) تعریف می‌شوند. E، مدول یانگ و  $\nu$  ضریب پواسون است [۲۲].

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

و جابه‌جایی به صورتی است که می‌توان مسئله را استاتیکی در نظر گرفت و در یک مسئله استاتیکی فرض بر این است که سازه در تعادل کامل است لذا در کل بخش‌های تحلیل فرض شده است که جمع تمام نیروهای داخلی و خارجی و همین‌طور جمع تمام گشتاورهای خمشی و پیچشی صفر است. در رابطه (۴) این فرض نشان داده شده است [۲۱].

$$\sum T = 0, \sum M = 0, \sum F = 0 \quad (4)$$



شکل (۲): مشخصه‌های قسمت‌های فنری خم‌ها

برای به دست آوردن گشتاور خمشی و پیچشی بخش‌های مختلف تیر، پل را به صورت تکیه‌گاه فرض شده است، لذا در صورتی که آن را با یک سطح لغزنده فرض کنیم باید تأثیر آن را به صورت نیروهای گشتاور خمشی و پیچشی در نظر بگیریم تا سازه در تعادل استاتیکی باقی بماند. به همین دلیل همان‌طوری در شکل (۳) تجزیه نیروها و گشتاورها در قسمت‌های مختلف تیر نشان داده شده است. و همچنین برای استاتیک ماندن سازه،  $T_0$  و  $M_0$  باید در خلاف جهت موجود در سر ثابت در سمت پل معلق قرار داده شود تا تیر در تعادل باقی بماند. برای تحلیل تیر را به هفت بخش تقسیم می‌کنیم. در ساختار پیشنهادی چهار تیر افقی به طول a با یک روش تحلیل و سه تیر عمودی به صورت دیگری در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل را از قسمت معلق شروع می‌کنیم. با حرکت از سمت معلق به سمت ثابت M, T را برای هر قسمت تیر با شرط تعادل به دست می‌آوریم. شکل (۳) تیرهای افقی با پیشوند a و تیرهای عمودی با پیشوند b فرض شده‌اند. در جدول (۲) خلاصه تحلیل هفت قسمت خم ساختار پیشنهادی آورده شده است. نیروی الکترواستاتیک در سوئیچ‌های خازنی موازی RF-MEMS برای تغییر وضعیت سوئیچ از حالت بالا به پایین اعمال می‌شود. لذا می‌توان این نیرو را در راستای Z در نظر گرفت. برای سادگی، فرض می‌کنیم در راستای دیگر هیچ نیروی خارجی به تیرها اعمال نمی‌شود. با استفاده از تئوری کاستیگلیانو<sup>۳</sup> جابه‌جایی حاصل از اعمال نیروی خارجی، با مشتق انرژی کل نسبت به نیروی خارجی برابر است.

با توجه به رابطه ممان اینرسی برای خم‌های افقی و عمودی ثابت پیچش برای پل مستطیلی به صورت رابطه (۱۰) است [۲۲].

$$J = 0.413(I_X + I_Z) \quad (10)$$

شروع تحلیل با تعیین وضعیت سر ثابت صورت گرفته است. همان‌طوری در ساختار پیشنهادی شکل (۱) خم‌ها از یک طرف به پل و از طرف دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند. برای تحلیل مسئله ساختار پیشنهادی فرض شده است که در سر ثابت هیچ حرکتی وجود ندارد لذا می‌توان نوشت:

$$\theta_0 = \frac{\partial U}{\partial M_0} = 0 \quad \phi_0 = \frac{\partial U}{\partial T_0} = 0 \quad (11)$$

$\theta_0$  تغییر انرژی نسبت به گشتاور خمشی و  $\phi_0$  تغییر انرژی نسبت به گشتاور پیچشی را نشان می‌دهد. به بیان ساده‌تر شیب در سر ثابت در حرکت خمشی و در حرکت پیچشی صفر است. برای حل مسئله در ابتدا باید گشتاور پیچشی و خمشی در سر ثابت حساب شود. برای این منظور از فرض  $\theta_0 = 0$  و  $\phi_0 = 0$  در این مرزها استفاده شده است [۲۲].

$$\theta_0 = \frac{\partial U}{\partial M_0} = \left( \sum_{i=1}^{2N} \int_0^a \left( \frac{M_{a,i}}{EI_{x,a}} \frac{\partial M_{a,i}}{\partial M_0} + \frac{T_{a,i}}{GJ_a} \frac{\partial T_{a,i}}{\partial M_0} \right) d\varepsilon + \sum_{j=1}^{2N} \int_0^{L_j} \left( \frac{M_{b,j}}{EI_{x,b}} \frac{\partial M_{b,j}}{\partial M_0} + \frac{T_{b,j}}{GJ_b} \frac{\partial T_{b,j}}{\partial M_0} \right) d\varepsilon \right) \quad (12)$$

$$\phi_0 = \frac{\partial U}{\partial T_0} = \left( \sum_{i=1}^{2N} \int_0^a \left( \frac{M_{a,i}}{EI_{x,a}} \frac{\partial M_{a,i}}{\partial T_0} + \frac{T_{a,i}}{GJ_a} \frac{\partial T_{a,i}}{\partial T_0} \right) d\varepsilon + \sum_{j=1}^{2N} \int_0^{L_j} \left( \frac{M_{b,j}}{EI_{x,b}} \frac{\partial M_{b,j}}{\partial T_0} + \frac{T_{b,j}}{GJ_b} \frac{\partial T_{b,j}}{\partial T_0} \right) d\varepsilon \right) \quad (13)$$

با حل روابط بالا،  $M_0$  و  $T_0$  بر حسب اندازه تیرهای افقی و عمودی و  $G$  و  $I$  و  $F$  به دست می‌آید. و چون برای به دست آوردن جابه‌جایی باید نسبت به  $F_z$  مشتق گرفته شود لذا در نهایت به  $M_0$  و  $T_0$  صورت  $C_1 F_z$  و  $C_2 F_z$  نوشته می‌شود.

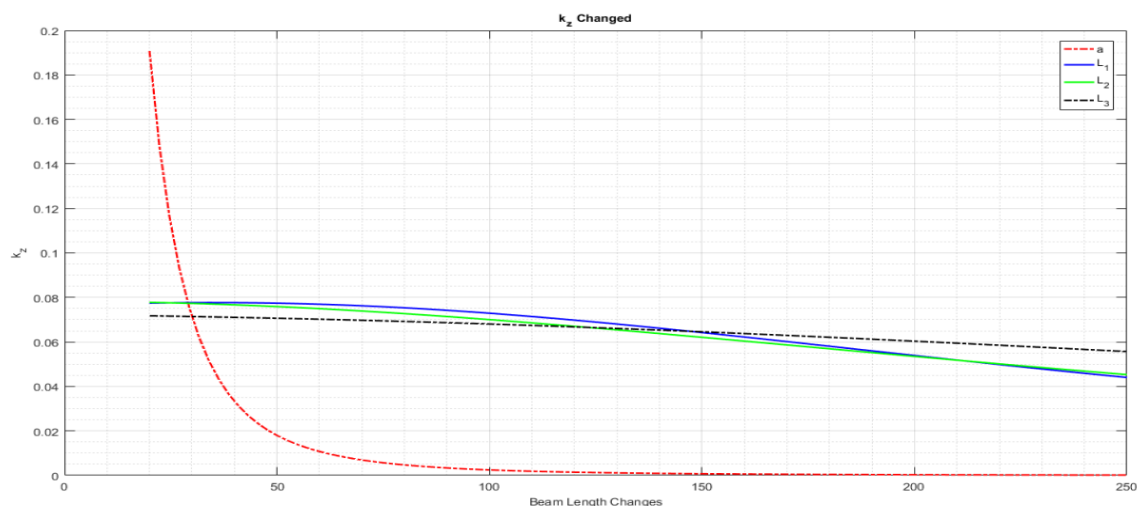
$$M_0 = f(a, L_1, L_2, L_3, G, I, F_z) = C_1 F_z \quad (14)$$

$$T_0 = f(a, L_1, L_2, L_3, G, I, F_z) = C_2 F_z \quad (15)$$

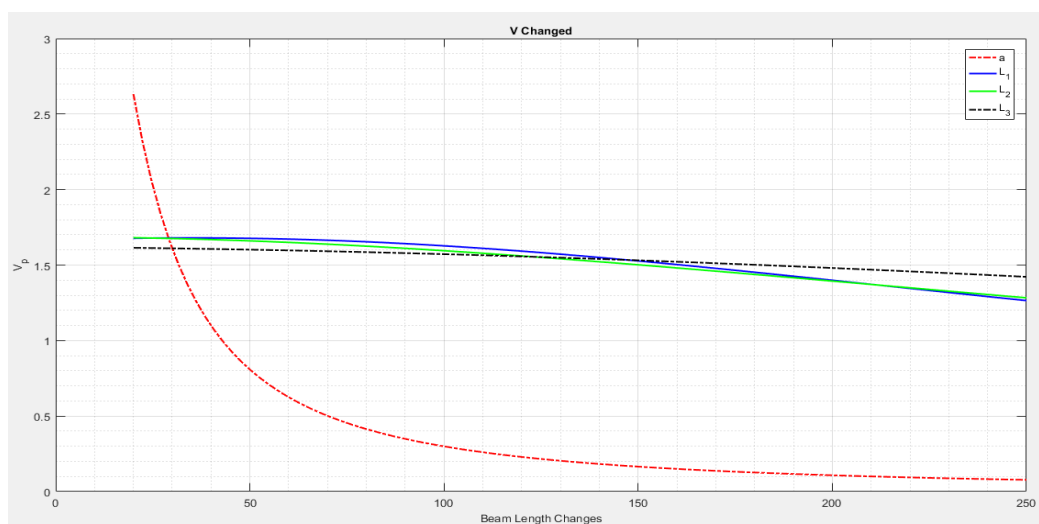
با جایگذاری رابطه‌های جدول (۲) در روابط (۱۱) و (۱۲) مقدار  $M_0$  و  $T_0$  بر حسب نیروی الکترواستاتیک به دست می‌آید. چون مسئله به صورت پارامتری بررسی شده است لذا به دلیل پیچیده و طولانی بودن روابط، حل آن به صورت سمبولیک در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. با در نظر گرفتن اندازه‌های قسمت‌های مختلف ساختار پیشنهادی در جدول (۱) مقدار ثابت فنری در تحلیل ارائه شده  $0.0714$  نیوتن بر متر به دست آورده شده است. در شکل (۳) تأثیر تغییر قسمت‌های مختلف ساختار بر روی کاهش ثابت فنری بررسی شده است. برای بررسی ثابت فنری قسمت‌های افقی و قسمت‌های عمودی به صورت مجزا از  $20$  تا  $250$  میکرومتر جاروب شده‌اند. با توجه به شکل (۳)، تأثیر افزایش تیر افقی از تیرهای عمودی بر روی کاهش ثابت فنری بیشتر است. با افزایش تیر افقی از  $20$  تا  $100$  میکرومتر ثابت فنری از  $0.17$  تا حدود  $0.002$  نیوتن بر متر کاهش می‌یابد. در نگاه اول این تأثیر بسیار مفید است و ما را به هدفمان نزدیک می‌کند اما در طراحی ساختار باید با اندازه نیروی بازدارنده در بازگرداندن سوئیچ به حالت اولیه و همچنین مقدار سطح مصرفی توجه شود. قسمت‌های عمودی در بازه  $20$  تا  $250$  میکرومتر تغییرات کمتری نسبت به تیر افقی دارند. و با جاروب تیرهای عمودی تغییر ثابت فنری در حدود  $0.02$  نیوتن بر متر است.

### ۳-۱- تحلیل ولتاژ تحریک برای سوئیچ پیشنهادی

همان‌طوری که در رابطه (۲) گفته شده است، ولتاژ تحریک به سه عامل، ثابت فنری و اندازه سطح تحریک و فاصله هوایی بستگی دارد. تغییر در هر عامل سبب کم یا زیاد شدن مقدار ولتاژ تحریک می‌شود. با استفاده از نتایج بخش قبل می‌توان رابطه‌ای تحلیلی برای ولتاژ تحریک آورد. با جایگذاری نتیجه رابطه (۳) در رابطه (۲) ولتاژ تحریک به دست می‌آید. به دلیل طولانی بودن رابطه، توسط نرم‌افزار MATLAB مقدار ولتاژ تحریک و همچنین تأثیر تغییرات قسمت‌های مختلف ساختار پیشنهادی بر روی ولتاژ تحریک در شکل (۴) ارائه شده است. در شکل (۴) نشان داده شده است که افزایش مقدار تیر افقی سبب کاهش سریع ولتاژ تحریک می‌شود. در بازه  $20$  تا  $100$  میکرومتری تغییر قسمت افقی تیر ولتاژ تحریک از  $2.5$  تا  $0.25$  کاهش یافته است. تأثیر تیرهای عمودی با شیبی کمتر از تیرهای افقی روی ولتاژ تحریک تأثیر گذاشته‌اند و با افزایش این تیرها از  $20$  تا  $250$  میکرومتر این تیرها ولتاژ تحریک از  $1.6$  تا  $1.4$  ولت تغییر می‌کند. در جدول (۳) به طور خلاصه تغییر اندازه تیر افقی و تیرهای عمودی و تأثیر این تغییر بر روی ثابت فنری و ولتاژ تحریک آورده شده است. کاهش فاصله هوایی روش دیگری برای کاهش ولتاژ است.



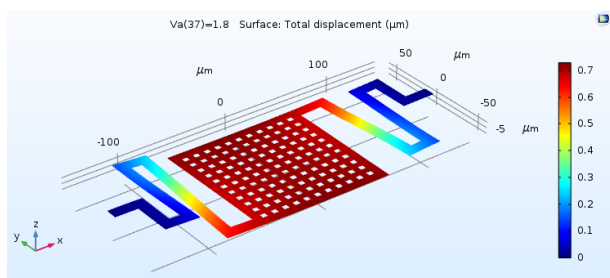
شکل (۳): تأثیر تغییر قسمت‌های مختلف ساختار پیشنهادی بر روی ثابت فنی



شکل (۴): تأثیر تغییر قسمت‌های مختلف ساختار پیشنهادی بر روی ولتاژ تحریک

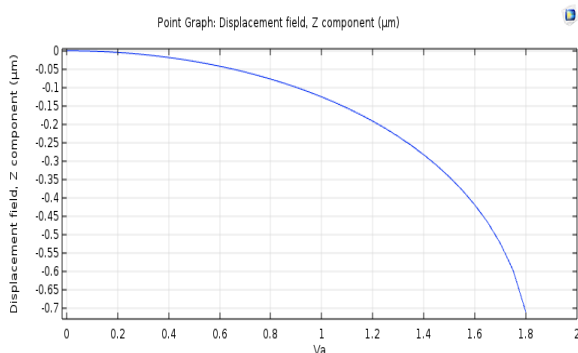
جدول (۲): تحلیل گساورها برای بخش‌های مختلف خم ساختار پیشنهادی

تیر عمودی		تیر افقی	
گساور پیچشی	گساور خمشی	گساور پیچشی	گساور خمشی
$T_{b1} = M_0 - F_z a$	$M_{b1} = -T_0 - F_z x$	$T_{a1} = T_0$	$M_{a,1} = M_0 - F_z x$
$T_{b2} = M_0 + 2F_z a$	$M_{b2} = -F_z x - T_0 - F_z L_1$	$T_{a2} = T_0 - F_z L_1$	$M_{a2} = -F_z a - F_z x + M_0$
$T_{b3} = M_0 - 3aF_z$	$M_{b3} = -T_0 - F_z x + F_z (L_1 - L_2)$	$T_{a3} = T_0 - F_z (L_1 - L_2)$	$M_{a3} = M_0 - F_z (2a) - F_z x$
0	0	$T_{a4} = T_0 + F_z (L_1 - L_2 + L_3)$	$M_{a4} = M_0 - 3F_z a - F_z x$



شکل (۵): جابجایی سوئیچ طراحی شده در اثر تحریک الکترواستاتیک

سوئیچ طراحی شده به ۱٫۸ ولت، ولتاژ تحریک برای عمل سوئیچینگ احتیاج داد در شکل (۶) نتیجه شبیه‌سازی در COMSOL آورده شده است. برای شبیه‌سازی در ابتدا شکل قسمت متحرک و دی‌الکتریک رسم شده و سپس فاصله هوایی ۲٫۵ میکرومتر بین قسمت متحرک و قسمت ثابت قرار داده شده است. در نهایت قسمت متحرک سوئیچ جنس آن از طلا و جنس دی‌الکتریک استفاده شده، در این شبیه‌سازی سیلیکون نیتريد استفاده شده است. تحریک در آن به صورت الکترواستاتیکی و به قسمت متحرک ولتاژ اعمال شده است و مرز بین دی‌الکتریک و فاصله هوایی زمین در نظر گرفته شده است.



شکل (۶): ولتاژ تحریک برای سوئیچ طراحی شده

در جدول (۵) مقایسه بین ولتاژ سوئیچ طراحی شده را با مراجع مشاهده می‌کنیم که کم بودن ولتاژ سوئیچ طراحی شده قابل مشاهده است.

#### ۴-۱- زمان سوئیچینگ

سرعت سوئیچینگ، سوئیچ‌های RF MEMS نسبت به سوئیچ‌های نیمه‌هادی و پین دیود پایین است و این نیز یکی از محدودیت‌ها سوئیچ‌های RF MEMS است میرایی، جرم و ساختار سوئیچ و مقدار ثابت فنری روی زمان سوئیچینگ تأثیر دارد استفاده از موادی مانند ALSI<sub>0.04</sub> می‌تواند با جرم کم، سرعت سوئیچینگ را بالا ببرد [۲۳].

در جدول (۴) مقدار ولتاژ تحریک برای فاصله هوایی مختلف آورده شده است مقدار ولتاژ تحریک برای فاصله هوایی ۲٫۵ میکرومتر ۱٫۶۱۰۷ ولت به دست آمده است.

جدول (۳): خلاصه تأثیر تغییرات ساختار بروی ثابت فنری و ولتاژ تحریک

بازه تغییر (۲۰-۲۵۰ میکرومتر)	ثابت فنری (نیوتن بر متر)	ولتاژ تحریک (ولت)
a	۰٫۱۹-۰٫۰۱	۲٫۶-۰٫۵
L <sub>1</sub>	۰٫۰۷۹-۰٫۰۴۵	۱٫۶-۱٫۴
L <sub>2</sub>	۰٫۰۷۹-۰٫۰۴۸	۱٫۶-۱٫۴
L <sub>3</sub>	۰٫۰۷۶-۰٫۰۶۵	۱٫۵۵-۱٫۵

جدول (۴): مقدار ولتاژ تحریک با ازای فاصله هوایی متفاوت در ساختار پیشنهادی

فاصله هوایی (میکرومتر)	ولتاژ تحریک (ولت)
۱	۰٫۴۰۷۵
۱٫۵	۰٫۷۴۸۶
۲	۱٫۱۵۲۵
۲٫۵	۱٫۶۱۰۷
۳	۲٫۱۱۷۳

فاصله هوایی باید طوری انتخاب شود که در مراحل ساخت طرح پیشنهادی دچار مشکل نشود. لذا برای جلوگیری از این موضوع فاصله هوایی ۲٫۵ میکرومتر انتخاب شده است [۱]. با توجه به جدول (۴) در صورت انتخاب فاصله هوایی کمتر، می‌توان به ولتاژ تحریک کمتر رسید. مشکل دیگر فاصله هوایی کم، افزایش اتلاف ورودی می‌شود [۱].

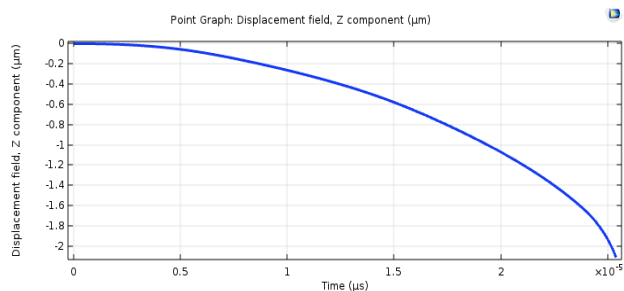
#### ۴- شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی

در سوئیچ طراحی شده برای کاهش ولتاژ تحریک از روش کاهش ثابت فنری با خم‌های غیریکنواخت استفاده شده بود که جابجایی سوئیچ طراحی شده توسط اعمال ولتاژ در نرم‌افزار COMSOL به صورت شکل (۵) است. در این شکل با جابجایی حدود ۱/۳ فاصله هوایی عمل سوئیچینگ انجام می‌شود [۱].

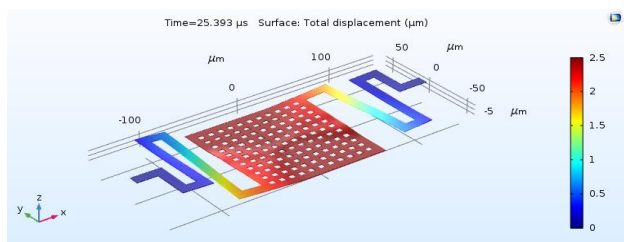
جدول (۵): مقایسه نتایج مراجع دیگر با سوئیچ طراحی شده

شماره منبع	ولتاژ تحریک	جنس دی‌الکتریک
[۹]	۵,۸	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۲۴]	۲,۸۵	$\text{SiO}_2$
[۱۲]	۴,۰۵	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۱۴]	۵,۶	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۱۳]	۲,۹	$\text{AlN}$
[۱۸]	۲,۱	$\text{SiO}_2$
[۲]	۲,۶	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۲۰]	۴,۸	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۲۵]	۲,۴	$\text{SiO}_2$
[۱۱]	۱,۹	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۱۲]	۶,۸	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۴]	۵,۵	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۲]	۵,۷	$\text{ZrO}_2$
[۲۶]	۱۰,۶	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۲۷]	۲,۴	$\text{HfO}_2$
[۲۸]	۲,۳۳	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۲۹]	۲,۶۴	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۳۰]	۲,۳	$\text{SiO}_2$
[۳۱]	۲,۵۴	$\text{Si}_3\text{N}_4$
[۳۲]	۳,۱	$\text{SiN}$
ساختار پیشنهادی	۱,۸	$\text{Si}_3\text{N}_4$

شکل (۷) نتیجه شبیه‌سازی زمان سوئیچینگ برای ساختار طراحی شده را در نرم‌افزار COMSOL نشان می‌دهد که زمان سوئیچینگ برای این ساختار ۲۵,۳ میکروثانیه به‌دست‌آمده است. در شکل (۸) جابجایی انجام‌شده در کل فاصله هوایی نشان داده‌شده است در بخش بعدی به محاسبه جرم و فرکانس‌های طبیعی سوئیچ، که تأثیر بسیاری در عملکرد سوئیچ دارند می‌پردازیم.



شکل (۷): زمان سوئیچینگ سوئیچ طراحی شده



شکل (۸): جابجایی انجام‌شده در زمان سوئیچینگ

#### ۴-۲- فرکانس‌های طبیعی و جرم سوئیچ طراحی شده

فرکانس‌های طبیعی سوئیچ و همچنین جرم سوئیچ بر روی ثابت فنری سوئیچ و در نهایت بر روی ولتاژ تحریک تأثیری گذارند به‌طوری هر قدر جرم سوئیچ کم باشد سرعت سوئیچینگ بالا می‌رود و برعکس و بالا بودن فرکانس‌های طبیعی ولتاژ تحریک را زیاد و زمان سوئیچینگ را کم می‌کند پس باید سوئیچ طوری طراحی شود که این مسامحه در نظر گرفته شود [۳۳]. در جدول (۶) شش فرکانس طبیعی اول سوئیچ طرح‌شده و جرم مربوط به سوئیچ آورده شده است.

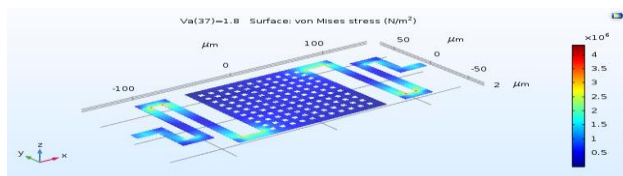
جدول (۶): شش فرکانس طبیعی سوئیچ طراحی شده

شماره فرکانس	فرکانس طبیعی (Hz)	جرم (ngr)
۱	۳۱۱۸,۶۲۷۵	۰,۲۰۶
۲	۳۲۷۵,۶۰۱۴	۰,۲۰۶
۳	۷۷۵۲,۰۹۱۳	۰,۲۰۶
۴	۱۰۸۴۲,۵۸۶۴	۰,۲۰۶
۵	۱۲۱۸۰,۴۹۹۳	۰,۲۰۶
۶	۳۰۷۰۹,۴۷۴۲	۰,۲۰۶

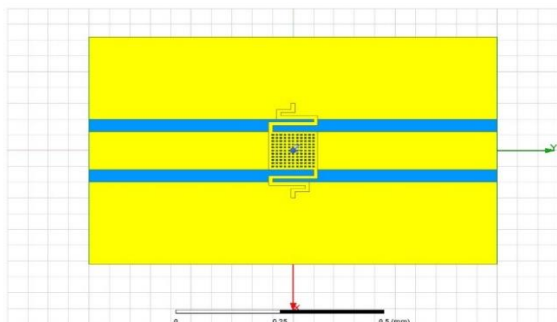
در شکل (۹) تغییر رفتار سوئیچ را بررسی کرده و باید پهنای باند سوئیچ طوری حساب شود که دچار تغییر رفتارهای ناگهانی نشود.

#### ۴-۳- فون مایسس برای ساختار مکانیکی

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در تحلیل مکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد فون مایسس است و برای تضمین ایمنی طراحی، محاسبه

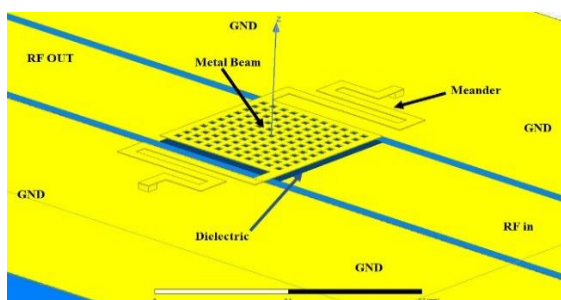


شکل (۱۰): فون مایسس برای ساختار پیشنهادی



شکل (۱۱): نمای سوئیچ پیشنهاد شده بر روی خط انتقال CPW

قسمت‌های مختلف ساختار پیشنهاد شده در شکل (۱۲) نام گذاری شده است.



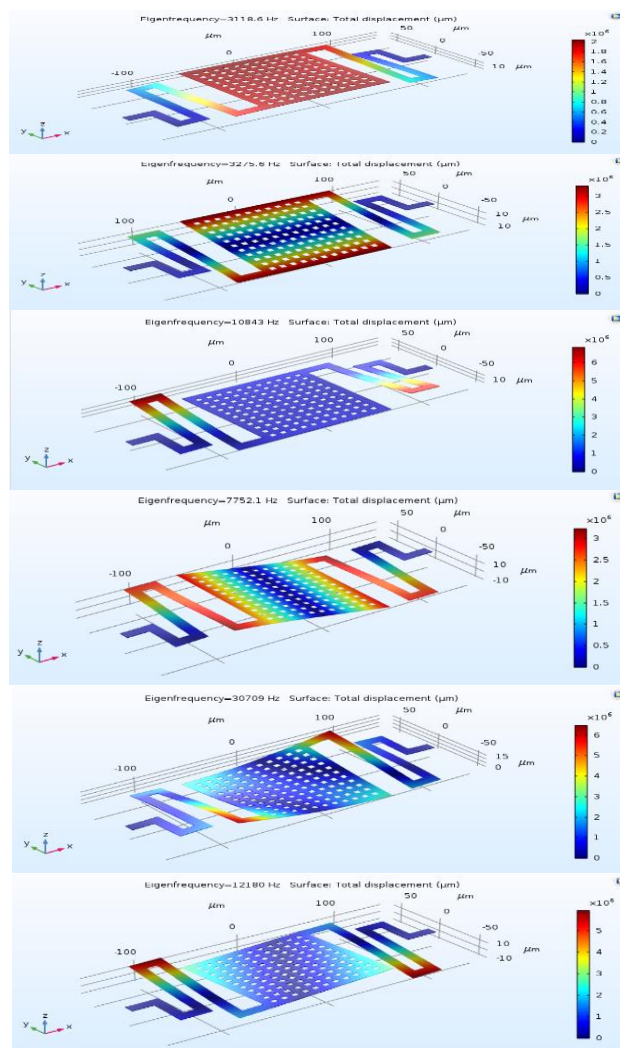
شکل (۱۲): نام گذاری قسمت‌های مختلف سوئیچ

در حالت روشن با عبور توان از سوئیچ، مقداری از آن باز می‌گردد که توان بازگشتی سوئیچ بوده و آن را با پارامتر  $S_{11}$  بیان می‌کنند و در واحد دسی‌بل بیان می‌شود. پارامتر دیگری که در حالت روشن بکار می‌رود، توان تلفاتی بوده که با  $S_{12}$  نشان داده می‌شود و میزان تلفات را نشان می‌دهد. پارامتر سوم که در حالت خاموش سوئیچ بیان می‌شود ایزولاسیون است که با پارامتر  $S_{12}$  نشان می‌دهند، ایزولاسیون میزان نشستی سیگنال در حالت خاموش از پورت ۱ به پورت ۲ را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی حاصل برای پارامترهای پراکندگی سوئیچ با زیر لایه سیلیکون در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز، دارای اتلاف بازگشتی ۱۶- دسی‌بل، است. در شکل (۱۳) تلفات بازگشتی نمایش داده شده است. مقدار ایزولاسیون یا پارامتر  $S_{12}$  در حالت خاموش با توجه به فاصله هوایی بین بیم و خط انتقال محاسبه می‌شود. و پارامتر  $S_{12}$  در حالت روشن تلفات عبوری سوئیچ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۴)، تلفات عبوری حدود ۰/۷ - دسی‌بل و ایزولاسیون ۲۵- دسی‌بل در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز است. با در نظر گرفتن ایزولاسیون ۲۵- دسی‌بل به عنوان معیار پهنای باند عملکرد سوئیچ ۶،۵ تا ۱۷،۵ گیگاهرتز است.

می‌شود با مقایسه این مقدار با مقدار مقاومت تسلیم ماده می‌توان گفت که یک سازه با طراحی خاص صورت می‌گیرد یا نه. در واقع اگر حداکثر تنش قابل تحمل بیشتر از استحکام ماده باشد طراحی شکست خواهد خورد و اگر حداکثر تنش قابل تحمل از استحکام ماده کمتر باشد طرح ایمن خواهد بود. برای طرح پیشنهادی این مقدار ۴،۵ MPa است و در شکل (۱۰) آمده است. مقدار حداکثر به دست آمده برای بستر سیلیکون قابل قبول است [۳۴].

## ۴-۴- شبیه‌سازی مشخصه‌های فرکانس بالا ساختار پیشنهادی

شکل (۱۱) نمای بالا خط سوئیچ پیشنهاد شده روی خط انتقال CPW با ابعاد ۴۰/۱۲۰/۴۰ میکرومتر برای منطبق بودن خط انتقال نشان داده شده است. در شکل نمای دیگری از سوئیچ با نام گذاری قسمت‌های مختلف آورده شده است.

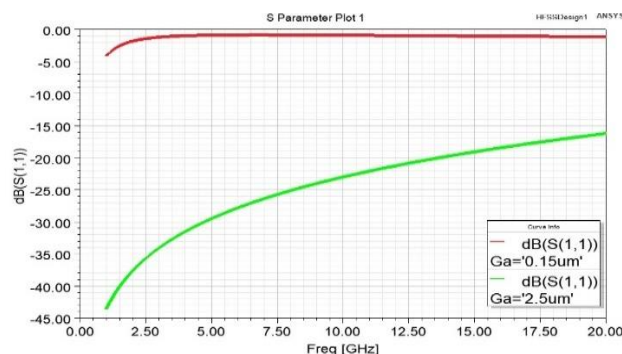


شکل (۹): تغییر مکان سوئیچ طراحی شده در شش فرکانس طبیعی

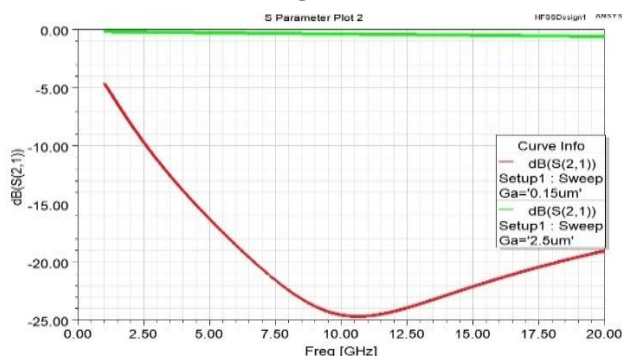
مکانیکی در این پژوهش استفاده شده است. ثابت فنری برای ساختار پیشنهاد شده ۰,۰۷۹ نیوتن بر مترمربع و ولتاژ تحریک برای ساختار با جنس طلا برای بیم ۱,۸ ولت به دست آمده است. مقدار زمان سوئیچینگ برای این ساختار ۲۵,۶ میکروثانیه به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی و مدل‌سازی حدود ۱۰ درصد باهم اختلاف دارند. و موضوع دیگر در طراحی بهینه ساختار مناسب برای سوئیچ RF MEMS بررسی مشخصات فرکانس بالای ساختار است در این پژوهش از نرم‌افزار HFSS برای بررسی مشخصات سوئیچ پیشنهادی می‌توان استفاده نمود. ایزولاسیون برای ساختار ارائه شده، ۲۵- در ۱۰ گیگاهرتز، اتلاف عبوری ۰,۷- دسی‌بل و اتلاف بازگشتی ۱۶- دسی‌بل به دست آمده است.

## مراجع

- [۱] G. M. Rebeiz, RF MEMS: theory, design, and technology. John Wiley & Sons, 2004.
- [۲] H. R. Ansari, S. Khosroabadi, and Y. Mafinejad, "Design and simulation of a RF MEMS shunt capacitive switch with low actuation voltage, low loss and high isolation", in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 18, no. 1, pp. 29-35, doi: 10.29252/jiaeee.18.1.29, 2021.
- [۳] A. S. Khan and T. Shanmuganatham, "Arc-shaped cantilever beam RF MEMS switch for low actuation voltage," in 2017 IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCS): IEEE, pp. 302-305, 2017.
- [۴] S. Lakshmi, P. Manohar, K. Natarajan, and P. N. Sayanu, "Design, fabrication, characterization of micromachined capacitive shunt switches with low actuation voltages and low temperature packaging," Microsystem Technologies, vol. 23, no. 10, pp. 4509-4522, 2017.
- [۵] S. Delaram Farimani, H. Hajghasem, A. R. Erfanian, and M. R. Aliahmad, "Design, Simulation and Fabrication of RF MEMS Capacitive Switch on Alumina Substrate," (in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 12, no. 2, pp. 15-24, 2015. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-107-fa.html>.
- [۶] V. K. Varadan, K. J. Vinoy, and K. A. Jose, RF MEMS and their applications. John Wiley & Sons, 2003.
- [۷] H. Nabovati, K. Mafinezhad, A. Nabovati, and H. Keshmir, "Comprehensive Electromechanical Analysis of MEMS Variable Gap Capacitors," (in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 2007. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-250-fa.html>.
- [۸] M. R. Mahlooji and J. Koohsorkhi, "Simulation and Derivation of Deflection Equation for Suspended Diaphragm for MEMS Application Using Kirchhoff-Love Theory," (in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 15, no. 4, pp. 21-28, 2019. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-793-fa.html>.



شکل (۱۳): تلفات بازگشتی ساختار پیشنهاد شده



شکل (۱۴): ایزولاسیون و تلفات عبوری ساختار پیشنهاد شده تا

فرکانس ۱۰ گیگاهرتز

## ۴-۵- مقدار ثابت فنری ساختار با استفاده از نتایج

### شبیه‌سازی

جابجایی به اندازه ۱/۳ فاصله هوایی برای عملکرد درست سوئیچ نیاز است [۱]. در این صورت  $g = \frac{2}{3}g_0$  خواهد شد. از طرفی ثابت فنر برای ساختار پیشنهاد شده طبق رابطه (۱۵)، ۰,۰۷۹ نیوتن بر متر به دست آمده است.

$$K = m * (2\pi f_1)^2 = (206 * 10^{-9}) * (2 * \pi * 3118.6)^2 = 0.079 \quad (15)$$

که  $f_1$  طبق جدول (۶) جرم و فرکانس طبیعی اول ساختار پیشنهاد شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی دقیق و تحلیل ساختار فنری به عنوان روش مناسب برای رسیدن به ولتاژ تحریک کم، ابتدا ثابت فنری دقیق ساختار پیشنهاد شده با استفاده از روش انرژی محاسبه شده است. مقدار ثابت فنری ۰,۰۷۱۴ نیوتن بر متر به دست آمد و سپس مقدار

ولتاژ تحریک ۱,۶۱ ولت محاسبه شده است. برای راستی آزمایی تحلیل‌های گفته شده از نرم‌افزار COMSOL برای شبیه‌سازی قسمت

- perforated MEMS switch," *Microsystem Technologies*, pp. 1-10, 2018.
- [۲۴] S. E. D. Nashat, R. AbdelRassoul, and A. E. M. A. El Bary, "Design and simulation of RF MEMS comb drive with ultra-low pull-in voltage and maximum displacement," *Microsystem Technologies*, pp. 1-11, 2018.
- [۲۵] H. R. Ansari and M. B. Taghaddosi, "Optimization and development of the RF MEMS structures for low voltage, high isolation and low stress," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, pp. 1-10, 2019.
- [۲۶] K. G. Sravani et al., "Designing of RF-MEMS Capacitive Contact Shunt Switch and Its Simulation for S-band Application," in *Micro and Nanoelectronics Devices, Circuits and Systems*: Springer, pp. 439-448, 2022.
- [۲۷] L. N. Thalluri, M. K. Reddy, S. R. Hussain, G. C. Reddy, S. Kiran, and K. Guha, "Iterative Approach for Low Actuation Voltage RF MEMS Switch," in *Micro and Nanoelectronics Devices, Circuits and Systems*: Springer, pp. 117-128, 2022.
- [۲۸] K. G. Sravani, K. S. Rao, and K. Guha, "New pull-in voltage modelling of step structure RF MEMS switch," *Microelectronics Journal*, p. 105264, 2021.
- [۲۹] M. Gaikwad, N. Deshmukh, and V. Sawant, "Electromagnetic Modelling and Parameters Extraction of Metal Contact and Capacitive Type RF MEMS Switch," in *Artificial Intelligence and Sustainable Computing*: Springer, pp. 143-153, 2022.
- [۳۰] C. Chand, R. Maity, K. S. Rao, N. Maity, and K. G. Sravani, "Design and Analysis RF-MEMS Capacitive SPDT Switch for Wireless Applications," in *Micro and Nanoelectronics Devices, Circuits and Systems*: Springer, pp. 363-370, 2022.
- [۳۱] Y. Liu, K. Han, Z. Jiang, N. Ye, and P. Wang, "A High Capacitive Ratio and Low Actuation Voltage RF MEMS Switch for Multi Band: Design and Performance Analysis," in *2021 9th International Conference on Communications and Broadband Networking*, pp. 305-309, 2021.
- [۳۲] N. Narang and P. Singh, "Metal contact RF MEMS switch design for high performance in Ka band," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 872, no. 1: IOP Publishing, p. 01, 2020.
- [۳۳] S. D. Senturia, *Microsystem design*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [۳۴] F. M. White, "Fluid mechanics," ed: McGraw-Hill, New York, 2003.
- [۹] H. Saffari, R. A. Moghadam, and M. Tahmasebipour, "Low actuation voltage RF MEMS Shunt Capacitive Switch based on rotated serpentine spring," in *Electrical Engineering (ICEE), 2017 Iranian Conference on*: IEEE, pp. 293-297, 2017.
- [۱۰] H. R. Ansari and S. Khosroabadi, "Design and simulation of a novel RF MEMS shunt capacitive switch with a unique spring for Ka-band application," *Microsystem Technologies*, vol. 25, no. 2, pp. 531-540, 2019.
- [۱۱] K. S. Rao et al., "Design, Modeling and Analysis of Perforated RF MEMS Capacitive Shunt Switch," *IEEE Access*, 2019.
- [۱۲] K. G. Sravani et al., "Design and Performance Analysis of Low Pull-In Voltage of Dimple Type Capacitive RF MEMS Shunt Switch for Ka-Band," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44471-44488, 2019.
- [۱۳] A. K. Sharma and N. Gupta, "Investigation of actuation voltage for non-uniform serpentine flexure design of RF-MEMS switch," *Microsystem technologies*, vol. 20, no. 3, pp. 413-418, 2014.
- [۱۴] K. Guha, N. Laskar, H. Gogoi, A. Borah, K. Baishnab, and S. Baishya, "Novel analytical model for optimizing the pull-in voltage in a flexured MEMS switch incorporating beam perforation effect," *Solid-State Electronics*, vol. 137, pp. 85-94, 2017.
- [۱۵] N. Van Der Meijs and J. Fokkema, "VLSI circuit reconstruction from mask topology," *Integration*, vol. 2, no. 2, pp. 85-119, 1984.
- [۱۶] K. Khodadady and B. A. Ganji, "Design and modeling of a novel RF MEMS series switch with low actuation voltage," *Microsystem Technologies*, vol. 22, no. 12, pp. 2921-2929, 2016.
- [۱۷] S. Molaei and B. A. Ganji, "Design and simulation of a novel RF MEMS shunt capacitive switch with low actuation voltage and high isolation," *Microsystem Technologies*, vol. 23, no. 6, pp. 1907-1912, 2017.
- [۱۸] A. Gopalan and U. K. Kommuri, "Design and development of miniaturized low voltage triangular RF MEMS switch for phased array application," *Applied Surface Science*, vol. 449, pp. 340-345, 2018.
- [۱۹] Y. Mafinejad, H. R. Ansari, and S. Khosroabadi, "Development and optimization of RF MEMS switch," *Microsystem Technologies*, vol. 26, no. 4, pp. 1253-126, 2020.
- [۲۰] Y. Mafinejad, A. Kouzani, K. Mafinezhad, and R. Hosseinnazhad, "Low insertion loss and high isolation capacitive RF MEMS switch with low pull-in voltage," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 1-4, pp. 661-670, 2017.
- [۲۱] E. R. Johnston, F. Beer, and E. Eisenberg, *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*. McGraw-Hill, 2009.
- [۲۲] F. P. Beer and E. R. Johnston, *Statics*. McGraw-Hill Kogakusha, 1977.
- [۲۳] K. Guha, N. Laskar, H. Gogoi, K. Baishnab, and K. S. Rao, "A new analytical model for switching time of a

<sup>1</sup> Microelectromechanical systems

<sup>2</sup> Complementary Metal-Oxide Semiconductor

<sup>3</sup> Castigliano Theorem