

## طراحی و شبیه‌سازی کلید MEMS با ایزولاسیون بالا برای کاربرد در فرکانس‌های بالا

سید محمد علوی<sup>۱</sup>، رضا شایان‌فر<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی یک کلید MEMS برای کاربرد در محدوده‌ی فرکانس بالا ارائه شده‌است. ساختار طراحی شده یک کلید موازی خازنی in-line با تیر دو سر گیردار به شکل صلیب و از جنس طلا است. این کلید در محدوده‌ی فرکانس ۲۰ تا ۱۰۰ گیگاهرتز عملکرد بسیار مناسبی از لحاظ الکترومغناطیسی دارد، به طوری که ایزولاسیون بالای ۲۳ dB و ۲۶ dB- را در حالت قطع به ترتیب در ۲۰ و ۱۰۰ گیگاهرتز تأمین می‌کند. همچنین تلفات انتقالی کلید در حالت وصل برابر ۰/۱۶ dB- و ۱/۲ dB- در ۲۰ و ۱۰ گیگاهرتز است. طراحی به گونه‌ای انجام شده‌است که علاوه بر حصول عملکرد الکترومغناطیسی مورد نظر و مناسب، ولتاژ تحریک کلید نیز با طرحی نو کاهش یابد. نوآوری طرح در شکل صلیبی ساختار است که عامل کاهش ولتاژ تحریک نسبت به یک ساختار ساده است. ولتاژ تحریک ساختار ۳۰ ولت است. تحلیل و معیارهای الکترومغناطیسی و مکانیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی ارائه شده‌است.

### کلیدواژه

کلید خازنی in-line، ایزولاسیون بالا، ساختار صلیبی شکل، RF MEMS

### مقدمه

یا حالت جامد (PIN دیودها و ترانزیستورها) کلیدهای MEMS مزایای بسیار چشمگیری از قبیل افت بسیار کم، ایزولاسیون<sup>۴</sup> بسیار بالا، خطی بودن و توان مصرفی ناچیز را ارائه می‌کنند که باعث استفاده‌ی بیشتر آن‌ها به ویژه در مدارات فرکانس بالا می‌شود [۳]. طی سال‌های اخیر نیاز به پهنای باند وسیع‌تر باعث شده است که تکنولوژی CMOS برای کاربرد در محدوده-ی فرکانسی امواج میلیمتری و مایکروویو گسترش زیادی پیدا کند. یکی از ضرورت‌ها در فرکانس‌های بالا، توانایی و کارایی چند بانده بودن است تا به کمک آن بتوان از چند استاندارد ارتباطات بی‌سیم به صورت یکپارچه و در تنها یک سیستم که قابلیت کار در آن محدوده‌های مختلف فرکانسی را دارد، استفاده کرد. نوین‌ترین راه برای رسیدن به این خواسته، استفاده از کلیدهای RF MEMS است [۴]. کلیدهای MEMS را می‌توان بنا بر مکانیزم یا عامل تحریک (الکترواستاتیکی، مغناطیسی)، نوع کنتاکت (خازنی یا اهمی)، مکانیزم بخش متحرک تیر (تیر دو سر گیردار یا یک سر گیردار)، نحوه‌ی قرار گرفتن در مدار (سری یا موازی) و جهت حرکت بخش متحرک (عمودی یا افقی) تقسیم بندی کرد که هر یک مزایا، معایب و کاربردهای ویژه‌ای دارند.

سیستم‌های میکروالکترومکانیکی فرکانس رادیویی یا به‌طور خلاصه RF MEMS<sup>۳</sup> به اجزایی اشاره دارد که دارای قطعات متحرک در ابعاد میکرو هستند و کارکرد RF دارند [۱]. انواع مختلف از آنها مانند تشدیدکننده‌ها، نوسان‌سازها، کلیدها، خازن‌ها و سلف‌های متغیر وجود دارند. با پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی فن‌آوری MEMS و میکروماشین، توجهات بسیار زیادی به سوی قطعات MEMS جلب شده‌است. ارتباطات بی‌سیم چه در سطح تجارت و بازار چه در کاربردهای نظامی به ویژه در فرکانس بالا رشد بسیاری کرده‌است. ارتباطات بی‌سیم شخصی، شبکه‌های محلی بی‌سیم و ارتباطات ماهواره‌ای از این دست کاربردها هستند که در همه آنها کلید RF یک جز اساسی برای انتقال سیگنال است [۲]. کلیدهای MEMS کاربردهای وسیعی از قبیل گیرنده و فرستنده‌ها، شبکه‌های تطبیق امپدانس، بانک‌های فیلتر و مدارات الکترونیکی دیگر دارند. در مقایسه با هم‌تاهای مکانیکی

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده فن‌آوری اطلاعات، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه ارومیه،  
r.shayanfar@gmail.com

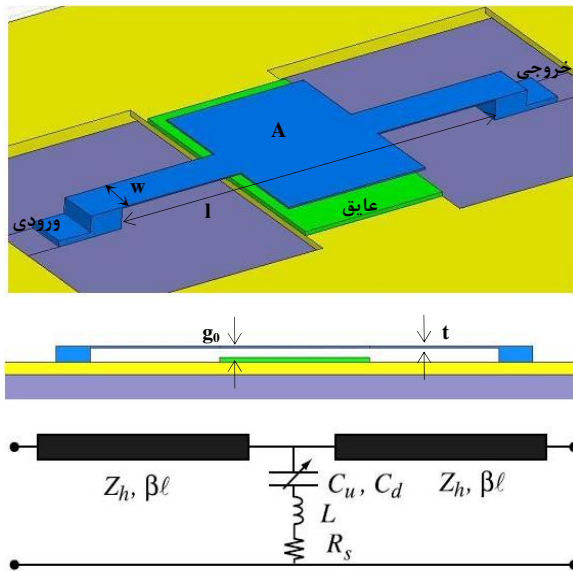
<sup>۳</sup> Radio Frequency Micro Electro Mechanical System

تاریخ دریافت: ۱۷ دی ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: ۲۱ اسفند ۹۲

<sup>۴</sup> isolation

## عملکرد الکتریکی

در شکل ۱ نمای کلید موازی خازنی in-line همراه با مدل مداری آن دیده می‌شود. زمانی که کلید در حالت بالا یا وصل است فاصله هوایی زیاد حدوداً ۳ میکرونی، امپدانس بزرگی را بین پل و زمین ایجاد می‌کند که از انتقال سیگنال ورودی به زمین جلوگیری می‌نماید، لذا سیگنال ورودی به خوبی و با اتلاف بسیار کم به خروجی انتقال پیدا می‌کند. در حالت کلید پایین یا قطع، بخش اعظم سیگنال ورودی از طریق امپدانس متغیر که در این حالت مقدار کوچکی است، به زمین منتقل می‌شود، و از انتقال سیگنال ورودی به خروجی جلوگیری به عمل می‌آید، به این ترتیب کلید به خوبی نقش مدار باز را بازی می‌کند.



شکل ۱. نمای ۳ بعدی و مقطع عرضی کلید موازی خازنی in-line و مدل مداری آن

## پارامترهای پراکندگی

اگر کلید به شکل یک دودهنه در نظر گرفته شود، می‌توان مفهوم پارامترهای پراکندگی را استدلال کرده و به دست آورد [۶]. دهنه یا پایانه‌ی یک یا ورودی قسمتی است که سیگنال وارد کلید می‌شود و پایانه‌ی دو یا خروجی آن قسمت که سیگنال از کلید خارج می‌گردد. فرض کنید به پایانه‌ی ورودی سیگنالی اعمال شده باشد، توان کل، همان توان سیگنال ورودی است. بخشی از این توان به پایانه‌ی ورودی باز خواهد گشت؛ نسبت این توان به توان کل، تلفات بازگشتی<sup>۶</sup> است، بخشی از توان به پایانه‌ی خروجی راه خواهد یافت که

معمولاً برای کاربردهای فرکانس بالا از کلیدهای موازی خازنی استفاده می‌شود. اولین کلید موازی خازنی کاربردی در سال ۱۹۹۶ توسط Raytheon و به صورت دو سرگردار ارائه شد [۵]. از آن زمان به بعد تلاش‌های زیادی برای طراحی کلیدهای موازی خازنی با عملکرد الکتریکی بهتر و ولتاژ تحریک کمتر انجام شده‌است.

هنگامی که فرکانس سیگنال ورودی تا فرکانس تشدید LC کلید در حالت پایین افزایش پیدا کند (به طور نوعی حدود ۶۰-۲۵ گیگاهرتز)، خاصیت سلفی ساختار کم‌کم خود را نشان می‌دهد. هر چه این خاصیت کمتر باشد عملکرد کلید در فرکانس‌های بالا بهتر است [۶]. برای رسیدن به این هدف یک روش استفاده از کلیدهای in-line است. کلیدهایی که هنگام وصل، خود بخشی از مسیر عبور سیگنال هستند. مزیت این نوع کلید در این است که طراحی مکانیکی آن مستقل از مقدار سلف بوده و امکان ساخت کلید با سلف کوچک (۵-۲ pH) را فراهم می‌سازد [۶]. از این رو برای کاربرد در فرکانس‌های بالا بسیار مناسب است. از معیارهای مهم در بررسی عملکرد کلیدهای الکترواستاتیکی ولتاژ تحریک است. همان‌طور که در بخش عملکرد مکانیکی توضیح داده خواهد شد کاهش این ولتاژ از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً برای کاهش ولتاژ تحریک از ساختارهایی با پایه‌های فنری به شکل مارپیچ استفاده می‌شود تا ثابت فنر و در نهایت ولتاژ تحریک کاهش یابد. اما اضافه کردن پایه‌های مارپیچی به افزودن طول تیر و در نتیجه افزایش مقاومت و خاصیت سلفی کلید منجر می‌شود [۶]. همان‌طور که در ادامه بحث خواهد شد این موضوع در فرکانس‌های پایین قابل اغماض است ولی با افزایش فرکانس کارایی کلید تحت تاثیر این عوامل به شدت افت خواهد کرد. بنابراین برای کاربردهای فرکانس بالا برای کاهش ولتاژ تحریک نمی‌توان از این راه حال بهره برد. لذا باید در پی طراحی ساختاری بود که در عین حال که برای فرکانس‌های بالا مناسب است ولتاژ تحریک آن نیز به روشی کاهش یافته باشد. کلید پیشنهادی به صورت موازی خازنی in-line و از نوع دوسرگردار به شکل صلیب و بر روی یک خط انتقال CPW<sup>۷</sup> طراحی شده - است.

در این مقاله دلایل ارائه‌ی طرح مورد نظر به صورت صلیبی تحلیل شده، عملکرد الکتریکی و مکانیکی ساختار به همراه روابط مورد نیاز آورده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز برای تصدیق عملکرد مناسب کلید ارائه شده‌است. در بخش پایانی مقایسه‌ای بین این کلید و کلیدهای مشابه دیگر صورت گرفته و مزیت‌های آن جمع‌بندی گردیده‌است.

<sup>۶</sup> return loss

<sup>۷</sup> co-planar waveguide

$$Loss = \omega^2 C^2 R Z_0 \quad (7)$$

برای حالت کلید قطع تلفات از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$Loss = \frac{4R}{Z_0} \quad (8)$$

### عملکرد مکانیکی

در کلیدهای خازنی، میدان الکتریکی قوی (3-5 Mv/cm) درون لایه عایق (100-80 nm) منجر به پدیده تزریق بار می‌شود که باعث ایجاد چسبندگی و کاهش طول عمر قطعه می‌شود. تزریق بار رابطه‌ی نمایی با ولتاژ تحریک داشته و حدوداً هر 6 ولت کاهش ولتاژ تحریک منجر به 10 برابر شدن طول عمر قطعه می‌گردد [7]. بنابراین کاهش ولتاژ تحریک بسیار ضروری است.

ساختار طراحی شده از نوع دوسرگیردار است. پس می‌توان از روابط زیر (مندرج در مرجع [6]) برای طراحی و بررسی آن بهره گرفت. برای بیان میزان سختی تغییر حالت تیر از بالا به پایین در برابر عامل یا نیروی ایجادکننده‌ی تغییر از معیار ثابت فنر استفاده می‌شود. رابطه‌ی زیر بیانگر ارتباط ثابت فنر با ابعاد و جنس تیر است.

$$k = 32Ew \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (9)$$

که در آن k ثابت فنر، E مدول یانگ، w، t و l به ترتیب عرض، ضخامت و طول تیر هستند و در شکل 1 نشان داده شده‌اند. رابطه‌ی 9 نشان می‌دهد که هر چه عرض تیر کمتر باشد، ثابت فنر کوچک‌تر خواهد بود. یکی از مهم‌ترین کمیت‌ها در بررسی کلیدها ولتاژ تحریک است. رابطه‌ی زیر نشان‌دهنده‌ی ارتباط ولتاژ تحریک با ثابت فنر و ابعاد ساختار است.

$$V_p = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 A}} g_0^3 \quad (10)$$

که در آن k ثابت فنر، A مساحت اعمال نیرو،  $g_0$  فاصله هوایی (A و  $g_0$  در شکل 1 مشخص شده‌اند) و  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی خلا است. رابطه 10 نشان می‌دهد که هر چه مساحت اعمال نیرو بزرگتر و ثابت فنر کوچکتر باشد به ولتاژ کمتری جهت پایین کشیدن پل نیاز است.

ساختار طراحی شده مشابه یک تیر دو سر گیردار مرسوم است با این تفاوت که فرم صلیبی شکل آن، در وسط تیر مساحت بزرگتری را برای اعمال نیروی الکترواستاتیکی بیشتر فراهم

نسبت آن به توان کل تلفات انتقالی<sup>۷</sup> نامیده می‌شود. روابط زیر و جزئیات آن‌ها همگی در مرجع [6] آمده است. تلفات بازگشتی یا  $S_{11}$  برابر است با

$$S_{11} = -\frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_s} \quad (1)$$

که  $Z_0$  امپدانس مشخصه‌ی خط انتقال CPW و  $Z_s$  امپدانس کلید است و بسته به فرکانس و حالت کلید، می‌تواند ناشی از خازن (در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس تشدید)، مقاومت (در فرکانس تشدید) و یا سلف (در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس تشدید) باشد. در حالت کلی امپدانس کلید از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Z_s = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

R، L، C و  $\omega$  به ترتیب مقاومت، سلف، خازن کلید و فرکانس زاویه‌ای سیگنال ورودی هستند.

در حالت کلید وصل و در فرکانس‌های پایین که سلف و مقاومت قابل صرف‌نظر هستند، با ساده‌سازی رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$|S_{11}|^2 \approx \frac{\omega^2 C^2 Z_0^2}{4} \quad (3)$$

تلفات انتقالی یا  $S_{21}$  در حالت وصل برابر است با

$$S_{21} = \frac{2Z_s}{Z_0 + 2Z_s} \quad (4)$$

در حالت قطع به  $S_{21}$ ، ایزولاسیون گفته می‌شود که در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس تشدید از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$|S_{21}|^2 \approx \frac{4}{\omega^2 C^2 Z_0^2} \quad (5)$$

### تلفات<sup>۸</sup> کلید

یک کلید MEMS مانند هر قطعه‌ی واقعی دیگر مقداری توان مصرف می‌کند. آن بخش از توان کل که نه به پایانه‌ی خروجی انتقال پیدا کرده و نه به ورودی بازگشته، توسط خود کلید مصرف می‌شود. تلفات کلید در واقع نسبت توان مصرفی آن به توان کل است. با استفاده از تعریف پارامترهای پراکندگی تلفات کلید از رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$Loss = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (6)$$

برای حالت کلید وصل رابطه 6 به صورت زیر خواهد بود.

<sup>۷</sup> insertion loss  
<sup>۸</sup> loss

مطرح شده در بخش عملکرد الکتریکی مورد بررسی قرار گیرد. مهمترین این معیارها عبارتند از تلفات انتقالی در حالت وصل، ایزولاسیون و تلفات کلید. در حالت وصل انتظار بر این است که سیگنال ورودی با کمترین تضعیف توان به خروجی برسد. بنابراین  $S_{21}$  باید نزدیک ۱ یا  $dB(S_{21})$  نزدیک صفر دسی بل باشد. در حالت قطع برعکس، نباید توانی از ورودی به خروجی انتقال یابد. در حالت ایده آل  $S_{21}$  باید صفر یا  $dB(S_{21}) = -\infty$  باشد. شکل ۲ تلفات انتقالی در حالت وصل را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در حدود ۲۰ گیگاهرتز  $dB(S_{21})$  نزدیک صفر دسی بل است و تا  $dB -1/2$  برای ۸۰ GHz زیاد می‌شود. این نتایج به این معنی است که کلید در حالت بالا یا وصل سیگنال‌های این بازه‌ی فرکانسی را با تضعیف بسیار ناچیز از خود عبور می‌دهد. شکل ۳ ایزولاسیون کلید را در حالت قطع نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ایزولاسیون در بدترین حالت در ۲۰ GHz،  $23\text{ dB}$  است. این بدین معناست که در این محدوده‌ی فرکانسی در بدترین حالت، تنها کمتر از ۰/۰۰۵ از توان سیگنال ورودی به خروجی منتقل می‌شود. همچنین در هر دو شکل، منحنی تلفات بازگشتی نیز مشاهده می‌شود. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌ها و روابط ۳ و ۵ خازن متغیر کلید در دو حالت بالا و پایین به ترتیب برابر با  $C_{H1}=1.02\text{ pF}$ ،  $C_{H2}=4\text{ pF}$  و نسبت خازنی  $C_{H1}/C_{H2}=39$  است.

می‌کند (قسمت مشخص شده با حرف A در شکل ۱) که از طریق رابطه‌ی ۱۰ به کاهش ولتاژ تحریک منجر می‌شود و ابتدای باریک‌تر آن (قسمت مشخص شده با حرف w در شکل ۱) طبق رابطه‌ی ۹ ثابت فنر را کاهش داده و این کاهش نیز خود به کم شدن ولتاژ تحریک می‌انجامد. کاهش ولتاژ تحریک از این طریق دلیل ارائه طرح به فرم صلیبی شکل است. در جدول ۱ برخی از مشخصات کلید طراحی شده آمده‌است.

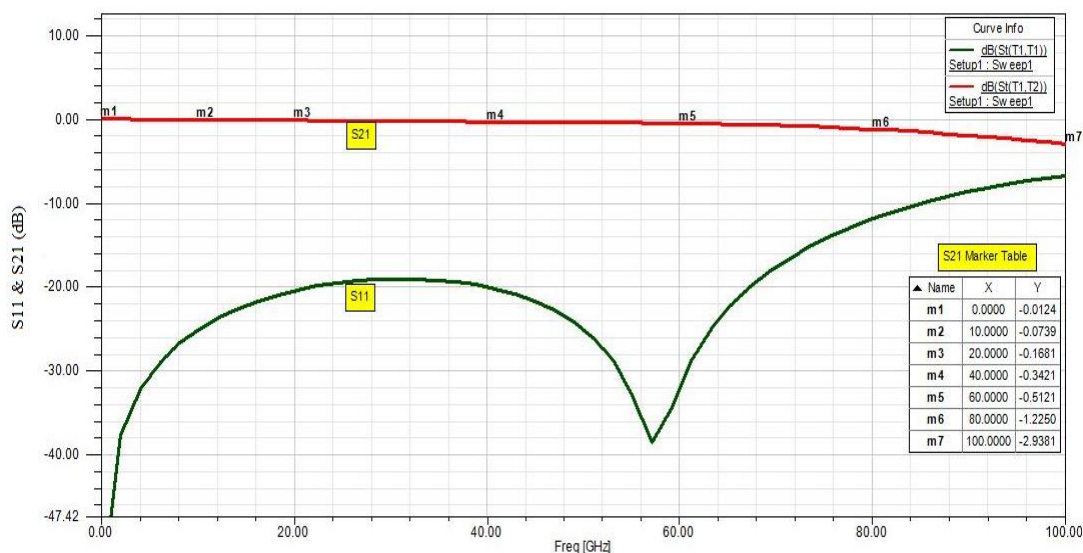
جدول ۱. مشخصات کلید پیشنهادی

مقدار	مشخصات
۳۵۰	طول تیر ( $\mu\text{m}$ )
۳۰	عرض تیر ( $\mu\text{m}$ )
۱	ضخامت تیر ( $\mu\text{m}$ )
۲/۸	فاصله‌ی هوایی ( $\mu\text{m}$ )
۱۵۰×۱۱۰	مساحت اعمال نیرو ( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )
طلا	جنس تیر
نیتريدسیلیکون	جنس عایق
سیلیکون	جنس بدنه

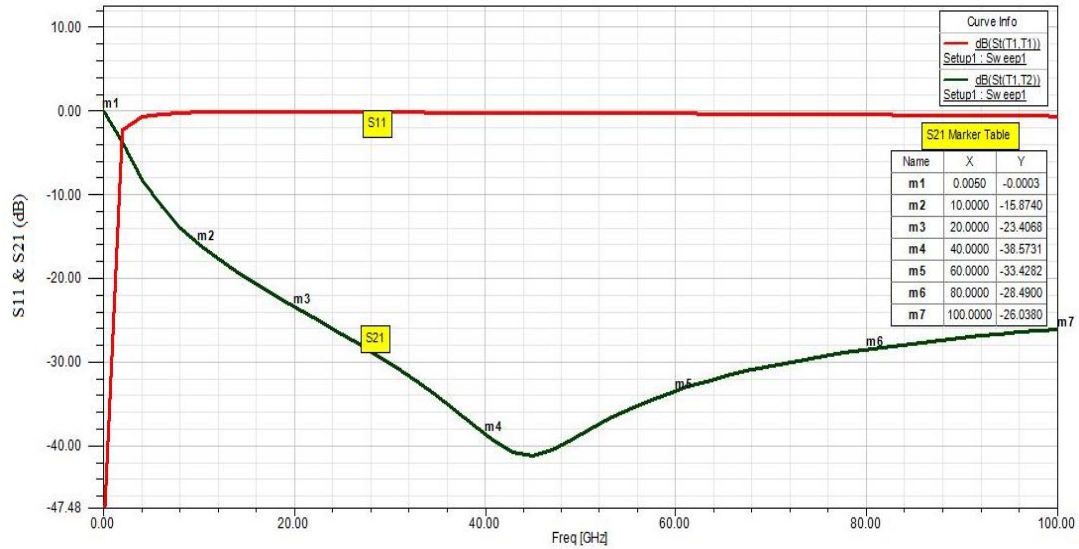
## نتایج شبیه‌سازی

### شبیه‌سازی الکترومغناطیسی

شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی توسط نرم‌افزار HFSS v.12 انجام شده است. در این بخش سعی بر آن است که معیارهای



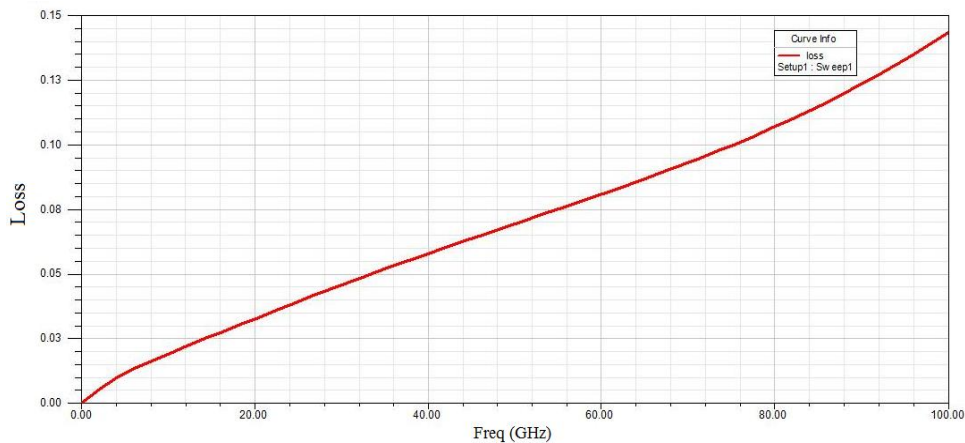
شکل ۲.  $S_{21}$  یا تلفات انتقالی و  $S_{11}$  تلفات بازگشتی برای حالت بالا (وصل)



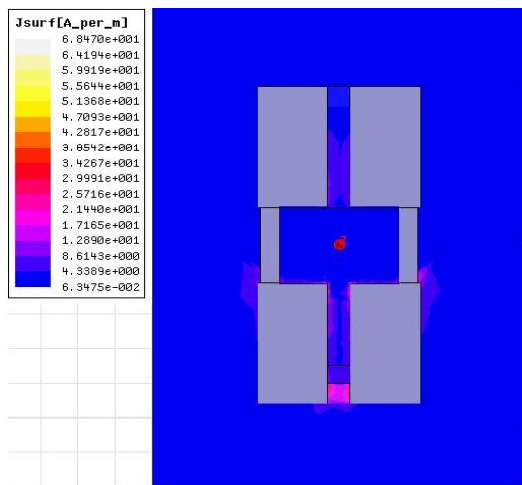
شکل ۳.  $S_{11}$  یا ایزولاسیون و  $S_{21}$  تلفات بازگشتی برای حالت پایین (قطع)

پارامترهای پراکندگی تعریف شده است مانند آن‌ها کمیتی بدون واحد است.

شکل ۴ نمودار تلفات کلید در حالت وصل است. همان‌طور که دیده می‌شود، تلفات در ۲۰ GHz حدود ۰/۰۴ است و این مقدار با افزایش فرکانس بیشتر می‌گردد. تلفات چون از روی



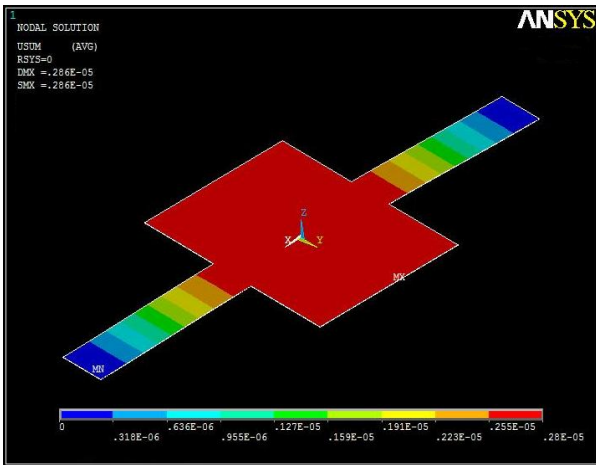
شکل ۴. توان مصرفی نسبی کلید در حالت بالا یا وصل



شکل ۵. نمودار توزیع چگالی جریان کلید برای حالت قطع

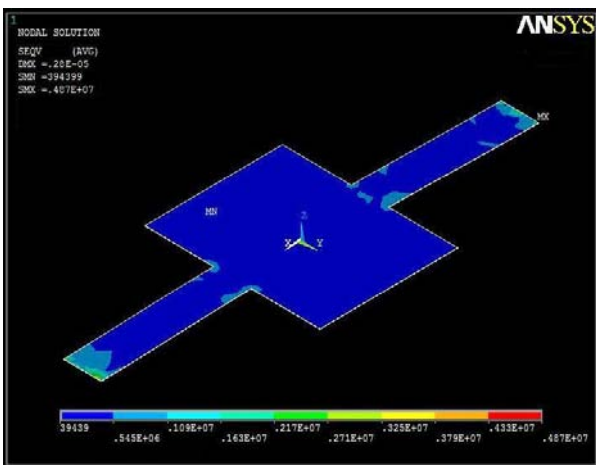
یکی دیگر از راه‌های بررسی عملکرد کلید در حالت‌های قطع و وصل، مشاهده‌ی چگالی جریان در پایانه‌ی خروجی نسبت به پایانه‌ی ورودی است. نمودار توزیع چگالی جریان کلید برای هر دو حالت قطع و وصل در فرکانس ۸۰ GHz، در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود. در شکل ۵ مشخص است که چگالی جریان در پایانه‌ی خروجی نسبت به ورودی بسیار ناچیز است و این نشان‌گر عملکرد عالی کلید در حالت قطع است. درست برعکس حالت قبل، در شکل ۶ مشاهده می‌شود که چگالی جریان در پایانه‌ی خروجی و ورودی تقریباً برابر است این بدین معنی است که کلید سیگنال را به خوبی از ورودی به خروجی انتقال می‌دهد.

شکل ۸ مقدار جابجایی نقاط مختلف تیر را پس از اعمال ولتاژ ۳۰ ولت نشان می‌دهد.

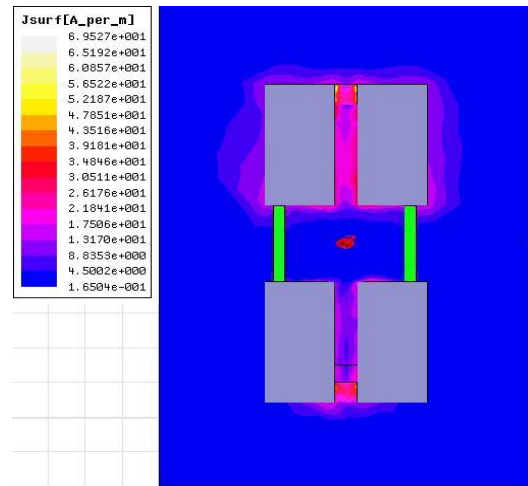


شکل ۸. نمودار جابجایی تیر در اثر اعمال ولتاژ ۳۰ ولت

معیار بسیار مهم دیگر که باید در نظر گرفته شود، میزان تنش است. اگر مقدار بیشینه‌ی تنش، نزدیک به تنش تسلیم طلا باشد، ساختار مناسبی نخواهد بود؛ برای مثال ممکن است کلید پس از اینکه به حالت پایین رسید دچار نقص شده و دیگر به حالت اولیه‌ی خود در بالا بر نگردد. شکل ۹ نمودار شدت تنش فن مایسز<sup>۹</sup> را نشان می‌دهد که آن نیز معیاری برای محک قابلیت اطمینان ساختار مکانیکی است. به طوری که بیشینه‌ی این تنش در ساختار پیشنهادی حدود ۵ MPa است که بسیار کمتر از تنش تسلیم طلا (۱۹۰ MPa) است.



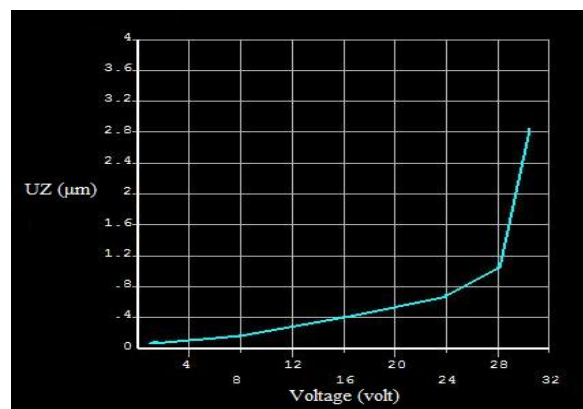
شکل ۹. نمودار تنش فن مایسز در تیر پس از اعمال ولتاژ ۳۰ ولت



شکل ۶. نمودار توزیع چگالی جریان کلید برای حالت وصل

### شبیه‌سازی مکانیکی

شبیه‌سازی‌های مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام شده‌است. برای مدل کردن ساختار تیر از المان SOLID45 و هوای اطراف آن از المان SOLID123 استفاده شده است. نمودار شکل ۷ مقدار جابجایی مرکز تیر را به ازای اعمال ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد. میزان انحراف به آرامی با افزایش ولتاژ زیاد می‌شود تا زمانی که به حدود ۱ میکرون که یک سوم مقدار  $g_0$  است می‌رسد، پس از آن با افزایش کمی در ولتاژ تیر به طور ناگهانی به سمت زمین می‌جهد و به آن می‌چسبد [۶]. همان طور که از نمودار پیداست این اتفاق بین ۲۸ و ۳۲ ولت می‌افتد؛ بنابراین ولتاژ تحریک کلید مقداری بین این دو عدد است، که با انجام شبیه‌سازی‌های بیشتر مقدار ۳۰ ولت برای آن به دست می‌آید.

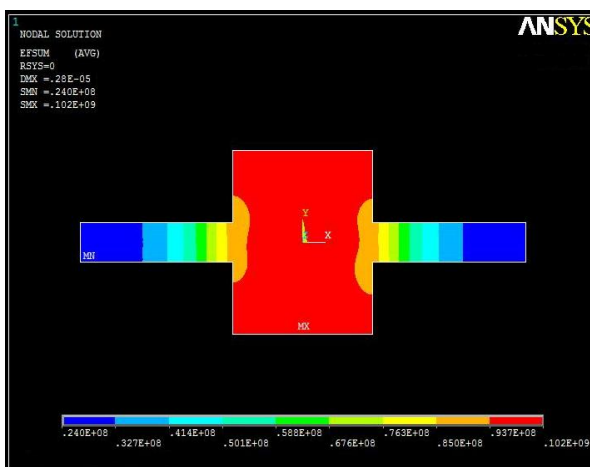


شکل ۷. نمودار میزان جابجایی مرکز تیر بر حسب ولتاژ اعمال شده

## نتیجه گیری

در این مقاله یک کلید MEMS برای کاربرد در فرکانس های بالا ارائه شده است. تلاش بر این بوده است که علاوه بر این که کلید عملکرد الکترومغناطیسی مطلوبی در فرکانس های بالا داشته باشد به روشی بتوان ولتاژ تحریک آن را نیز کاهش داد. نوآوری این ساختار استفاده از تیر صلیبی شکل برای کاهش ولتاژ تحریک است. همان طور که نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد کلید عملکرد الکترومغناطیسی و مکانیکی بسیار مناسبی دارد. ولتاژ تحریک آن ۳۰ ولت است که در مقایسه با ساختارهای ساده و بدون پایه های فنری به شکل مارپیچ، ولتاژ نسبتا کوچکی است. همچنین ایزولاسیون کلید بسیار چشمگیر است و در حالت قطع در بدترین شرایط، تنها ۰/۰۰۵ توان سیگنال ورودی را به خروجی انتقال می دهد. در جدول ۲ پارامترهای مهم کلیدهای MEMS جهت مقایسه ی ساختار طراحی شده با طرح های دیگر ارائه شده است.

شکل ۱۰ نمودار شدت میدان الکتریکی را پس از اعمال ولتاژ ۳۰ ولت نشان می دهد، که بیشینه آن ۰/۱ Gv/m یا ۱ Mv/cm است.



شکل ۱۰. نمودار شدت میدان الکتریکی

جدول ۲. مقایسه پارامترهای مهم کلیدها

کلید موازی خازنی؛ موازی خازنی in-line	کلید موازی خازنی مرجع [۸]	کلید موازی خازنی با ثابت فنر کوچک دانشگاه Michigan [۶]	کلید موازی خازنی Raytheon [۵]	پارامتر
۳۰	۳۵	۶-۲۰	۳۰-۵۰	ولتاژ تحریک (V)
۲/۸	۳	۴-۵	۳-۵	شکاف هوایی (μm)
۱	۰/۵	۲-۲/۵	۰/۵	ضخامت تیر یا پل (μm)
طلا	طلا	نیکل	آلومینیوم	جنس تیر یا پل
دو سر گیردار	دو سر گیردار	دو سر گیردار	دو سر گیردار	نوع ساختار
۴	۶/۳۶	۱-۳	۱-۶	خازن حالت پایین (pF)
۳۹	۷۸	۳۰	۸۰	نسبت خازنی
۳۰ GHz در -۳۰	۳۰ GHz در -۳۰	۳۰ GHz در -۲۵	۳۰ GHz در -۳۵	ایزولاسیون (dB)
۳۰ GHz در -۰/۲	۲۰ GHz در -۰/۲	۱۰-۴۰ GHz در -۰/۱	۱۰-۴۰ GHz در -۰/۰۷	تلفات انتقالی (dB)

- [3] Y. Wang, Z. Li, D. T. McCormick, and N. C. Tien., "A Low-Voltage Lateral MEMS Switch With High RF Performance," IEEE Trans. Microelectromechanical Systems, vol. 13, no. 6, pp. 902-911, December 2004.
- [4] S. Fouladi, and R. R. Mansou, "Capacitive RF MEMS Switches Fabricated in Standard 0.35-μm CMOS Technology," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 58, no. 2, pp. 478-486, February 2010.
- [5] G. M. Rebeiz, and J. B. Muldavin, "RF MEMS Switches and Switch Circuits", IEEE Microwave Magazine, Vol. 2, No. 4, pp. 59-71, December 2001.

## مراجع

- [1] K. A. P. A. V. Caekenberghe, "RF MEMS Technology for Millimeter-Wave Radar Sensors," Ph.D. dissertation, Dept. Electrical. Eng., Univ. Michigan, 1997.
- [2] I. J. Cho, T. Song, S. H. Baek, and E. Yoon, "A Low-Voltage and Low-Power RF MEMS Series and Shunt Switches Actuated by Combination of Electromagnetic and Electrostatic Forces" IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 53, pp. 2450-2457, July. 2005.

- [8] Poonam Verma, and Surjeet Singh, "Design and Simulation of RF MEMS Capacitive type Shunt Switch & its Major Applications", IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), Volume 4, Issue 5, pp. 60-66, Jan. - Feb. 2013.
- [6] G. M. Rebeiz, "RF MEMS theory, design, and technology", New Jersey: Wiley & Sons, 2003.
- [7] K. J. RANGRA, "Electrostatic Low Actuation Voltage RF MEMS Switches for Telecommunications," Ph.D. dissertation, Dept. Electrical. Eng., University of Trento, 2005.