

# سوئیچ RF-MEMS بیضوی در باند Ka با الگوی برشی جدید به منظور کاهش ولتاژ تحریک

محمد جهان بخت، عباسعلی لطفی نیستانک، مرتضی لطفی نیستانک و محمد تندرو آغمیونی

به طور کلی در راستای طراحی یک عنصر MEMS نیازمندی‌ها و عوامل زیادی باید در نظر گرفته شوند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (الف) عملکرد فنی بخش RF شامل اتلاف ورودی، اتلاف بازگشتی، ایزولاسیون و ... (ب) مکانیزم تحریک و پارامترهای کنترلی: شامل ولتاژ، جریان، توان، انرژی پس‌ماند، سرعت و ... (ج) فناوری ساخت و بسته‌بندی: شامل سطح، توپولوژی، توپوگرافی، استانداردسازی و بررسی اثر نویزهای خارجی روی عملکرد فنی بخش RF، EMC، مجتمع‌سازی زیرسیستم‌ها، قیمت، تحریک و ... سوئیچ‌های MEMS برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ به صورت سوئیچ‌های الکترواستاتیک پایه به نمایش در آمدند. اثر نامطلوب این سوئیچ‌ها ولتاژ تحریک بالا می‌باشد. در صورت حل این مشکل این دسته از سوئیچ‌ها بهترین گزینه برای وسایل RF در مقایسه با سوئیچ‌های الکترومغناطیسی یا الکتروگرمایی می‌باشند [۱] و [۲].

در سال‌های اخیر سوئیچ‌های MEMS دستخوش تغییر در تنوع مواد و پیشرفت طراحی در هندسه آنها به منظور کاهش ولتاژ تحریک شده‌اند [۳] و [۴]. این تلاش‌ها هم‌زمان با کاهش باریکه ثابت فنر<sup>۱</sup>، افزایش ناحیه میدان الکترواستاتیک و کاهش فاصله گاف<sup>۲</sup> صورت گرفته است اما هرگونه تغییر در بیشتر این پارامترها باعث ایجاد اثر نامطلوب در دیگر پارامترهای ذکر شده میکروسوئیچ می‌شود. اگر ما گاف را کاهش دهیم یا ناحیه میدان الکترواستاتیک را افزایش دهیم باعث کاهش ایزولاسیون می‌شود [۵].

یک سوئیچ در حالت ساده شبیه یک پل است. وقتی که سوئیچ با یک ولتاژ DC بایاس می‌شود، یک نیروی الکترواستاتیک به پسته وارد گردیده و پل به سمت پایین خم شده و مانع از عبور امواج الکترومغناطیسی خواهد شد که در این حالت می‌گوییم پل روشن شده است. از سوی دیگر با توقف نیروی الکترواستاتیک، پل بالا می‌آید و سوئیچ باز شده و در نتیجه موج، توانایی عبور از سوئیچ را پیدا می‌کند [۶] تا [۸].

در تغییردهنده‌های فاز توزیع شده<sup>۴</sup>، خمیدگی پل تحت نیروهای الکترواستاتیک با یک لایه دی‌الکتریک محدود می‌گردد. به همین دلیل پل خمیده شده، موج عبوری از خط انتقال را متوقف نمی‌نماید و سوئیچ به جای قطع و وصل میدان، مانند خازن قابل تنظیم عمل می‌کند [۹] تا [۱۲].

در [۱۳] تحلیل و طراحی یک تغییردهنده فاز میکرو الکترومکانیکی توزیع شده بر روی موج‌بر هم‌صفحه ارائه شده است. با استفاده از تحلیل حساسیت ابعاد فیزیکی، ابعاد مناسب برای یک انتقال دهنده فاز در باند Ka

چکیده: در این مقاله یک ساختار جدید بیضوی برای کاهش ولتاژ تحریک در سوئیچ‌های MEMS معرفی شده است که برای استفاده در باند Ka مناسب است. در ادامه برای این سوئیچ RF یک الگوی برش عرضی جدید پیشنهاد شده که قادر است ولتاژ تحریک را مجدداً تا حدود ۲۱٪ نسبت به ساختار مشابه با پل مستطیلی کاهش دهد. سایر پارامترهای سوئیچ نظیر اتلاف بازگشتی، اتلاف افزوده، و تغییر شکل مکانیکی سوئیچ تحت ولتاژ الکتریکی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا از مناسب بودن آنها اطمینان حاصل شود. این نتایج با نتایج ارائه شده در سایر مقالات معتبر مورد مقایسه قرار گرفته و همچنین نشان داده شده که سوئیچ پیشنهادی برای کار در سیستم‌های پیچیده‌تر و در کنار سایر عناصر برای مقاصد نظیر تغییردهنده فاز و آرایه‌های فازی مناسب است.

کلید واژه: ساختار بیضی شکل، سوئیچ میکرو الکترومکانیکی، ولتاژ تحریک.

## ۱- مقدمه

کوچک‌سازی یکی از مهم‌ترین تمایلات فناوری در دهه اخیر می‌باشد و توسعه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی (MEMS) در این روند جهانی کوچک‌سازی یکی از زمینه‌های عمده تحقیقاتی در سراسر دنیا است. در این رهگذر فناوری میکرو الکترومکانیک به طرز موفقیت‌آمیزی، برای کاربردهای RF نظیر سوئیچ‌ها، تغییردهنده‌های فاز، عناصر پسیو، سنسورها و فعال‌کننده‌ها<sup>۱</sup> استفاده می‌شود.

این ابزار میکرو توانایی مجتمع شدن با دیگر اجزا مایکروویو نظیر آنتن‌های صفحه‌ای و غیر صفحه‌ای، آرایه‌های فازی، تقسیم‌کننده‌های توان و فیلترها را دارند. از سوی دیگر، سوئیچ‌ها وسایلی هستند که تمایل زیادی به کاهش اندازه آنها در جهت راحت نمودن استفاده از آنها وجود دارد. مزیت اصلی این چنین ساختاری، کم نمودن توان مصرفی، ابعاد خیلی کوچک، قیمت کم، قابل اعتماد بودن، رنج عریض قابل کنترل بودن، نوبز فازی کم، کاهش افت عبوری و بسته‌بندی در یک تراشه واحد می‌باشد که تقریباً با نیمه‌هادی‌های استاندارد امکان پذیر نمی‌باشد. این محاسن در کنار فواید دیگر، سوئیچ‌های MEMS را هماهنگ با دیگر مدارهای مجتمع نموده است.

این مقاله در تاریخ ۱۲ آبان ماه ۱۳۸۸ دریافت و در تاریخ ۴ تیر ماه ۱۳۸۹ بازنگری شد. این تحقیق توسط معاونت پژوهش و فن‌آوری جهاد دانشگاهی پشتیبانی شده است. محمد جهان بخت، گروه پژوهشی مهندسی ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، ایران (email: jahanbakht@gmail.com). عباسعلی لطفی نیستانک، گروه پژوهشی مهندسی ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، ایران (email: alotfi@iust.ac.ir). مرتضی لطفی نیستانک، گروه پژوهشی مهندسی ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، ایران (email: morlotfi@gmail.com). محمد تندرو آغمیونی، دانشگاه مالتی مدیا؛ سایبرجایا، مالزی (email: tondro@gmail.com).

2. Spring Constant of the Beam
3. Gap
4. Distributed MEMS Phase Shifter

1. Actuators

نیز بهبود در هر دو پارامتر ذکر شده رخ می‌دهد که این تقویت به قیمت تنزل در کیفیت تحریک است به این معنی که برای روشن کردن سوئیچ در تحریک الکترواستاتیک به ولتاژ بالایی نیاز خواهد بود.

سوئیچ‌های MEMS را از نقطه نظر ترکیب ساخت می‌توان در دو گروه اصلی جای داد. سوئیچ با باریکه لنگری یا سگدست<sup>۵</sup> و سوئیچ با باریکه ثابت - ثابت یا پل معلق<sup>۶</sup>. هر کدام از دو گروه بالا را از منظر نحوه قرارگرفتن در طول خط انتقال، می‌توان به دسته‌های سری یا موازی تقسیم نمود [۱۰].

روشن شدن سوئیچ در بسیاری مراجع به این صورت تعریف شده است که پل بیش از  $\frac{2}{3}$  مقدار اولیه‌اش خمش پیدا کند و از آنجایی که این خمش محصول نیروی الکترواستاتیک حاصل از ولتاژ تحریک  $V_s$  می‌باشد، محاسبه این ولتاژ تحریک از پارامترهای مهم در هر سوئیچ به حساب می‌آید [۱۰].

بر اساس قوانین نیوتن برای یک پل مستطیلی این خمش زمانی آغاز خواهد شد که نیروی جاذبه الکترواستاتیکی بزرگ‌تر یا مساوی نیروی دافعه فنری باشد و به این ترتیب برای دو حالت پل معلق و باریکه لنگری می‌توان به سادگی نشان داد

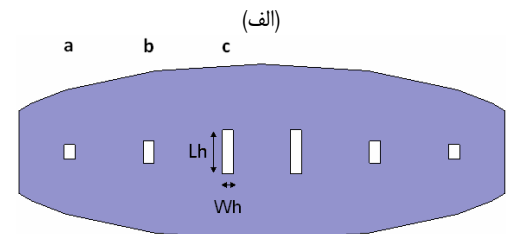
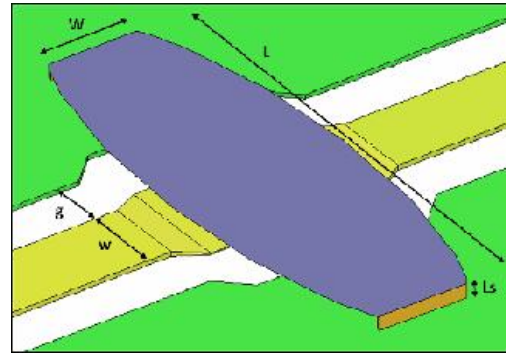
$$V_s \cong \sqrt{\frac{\lambda k h_{up}^3}{27 \epsilon_0 A}} \begin{cases} \sqrt{\frac{12 \lambda E t^3 h_{up}^3}{27 \epsilon_0 L^3}} \text{ for a Suspension Bridge} \\ \sqrt{\frac{2 E t^3 h_{up}^3}{27 \epsilon_0 L^3}} \text{ for a Cantilever} \end{cases} \quad (1)$$

که  $k$  ثابت مؤثر فنر،  $h_{up}$  ارتفاع اولیه سطح بیم در هنگام خاموش بودن سوئیچ،  $\epsilon$  ضریب نفوذپذیری خلأ،  $E$  مادول یانگ،  $A$  مساحت سطح بیم،  $L$  طول بیم و  $t$  ضخامت بیم می‌باشند. واضح است که نوع سگدست دارای ولتاژ تحریک کمتر (از مرتبه ۸) نسبت به پل معلق معمولی است. در عمل کاهش  $k$  موجب کاهش ولتاژ تحریک و در مقابل افزایش زمان سوئیچ می‌گردد. به بیان دیگر بین سرعت و ولتاژ تحریک یک موازنه وجود دارد [۱۰]. رابطه (۱) به خوبی وابستگی و میزان حساسیت ولتاژ تحریک نسبت به تغییر ابعاد فیزیکی پل و ثابت مؤثر فنر را نشان می‌دهد.

منحنی بیضوی در مقایسه با سایر مدل‌ها و در شرایط کارایی یکسان دارای سایز فشرده‌تر، سطح مقطع کوچک‌تر، پهنای باند وسیع‌تر و شکل منطبق‌تر است که باعث بهبود شتاب خمش پل و افزایش نسبت نیرو به سختی ساختار می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از خطوط انتقال هم‌صفحه (CPW) با ابعاد  $g/w/g = 35/25/35 \mu\text{m}$  با زیرلایه سیلیکون با  $\epsilon_r = 11.9$  به منظور سوار کردن پل روی ساختار استفاده شده است. ابعاد هادی موج‌بر در زیر پل به  $50/30/50 \mu\text{m}$  تغییر داده شده است.

ارتفاع زیرلایه  $0.4 \text{ mm}$  است و هادی آن از طلا و با ضخامت  $2 \mu\text{m}$  ساخته شده که در زیر پل به  $0.5 \mu\text{m}$  کاهش می‌یابد. طول باریکه  $250 \mu\text{m}$  انتخاب شده و عرض آن از  $40 \mu\text{m}$  در جاهای باریک تا  $60 \mu\text{m}$  در پهن‌ترین نقاط متغیر است. این پل در ارتفاع  $0.85 \mu\text{m}$  بالای هادی خارجی موج‌بر سوار شده است.

یک لایه از عایق سیلیکون-نیتريد، با ضخامت  $0.15 \mu\text{m}$  در روی هادی مرکزی موج‌بر Sputter شده است که وظیفه آن اجتناب از هرگونه



شکل ۱: نگاه شماتیک به ساختار سوئیچ بیضوی، (الف) ساختار بیضوی ساده و (ب) ساختار بیضوی با الگوی برشی.

ارائه شده و نشان داده شده که با افزایش پهنای پل و یا کاهش ارتفاع اختلاف فاز بالاتری به دست می‌آید ولی اتلاف بیشتر شده و نیاز به ولتاژ بایاس بیشتری خواهیم داشت.

ساختار پیشنهادی ما استفاده از باریکه بیضوی به جای نوع مستطیلی مرسوم می‌باشد. بر طبق هندسه بیضوی نشان داده شده، این ساختار باعث افزایش شتاب خمش<sup>۱</sup> و نسبت نیرو به سختی<sup>۲</sup> پل می‌شود. به همین دلیل به صورت کارآمدی باعث کاهش ولتاژ تحریک و زمان صعود سوئیچ می‌شود.

در کنار ساختار جدید بیضوی، از برش‌های عرضی به گونه‌ای استفاده شده است که بتوان ثابت فنری را کاهش داد. این الگوهای برشی نسبت به برش‌های فنری مرسوم به‌طور قابل ملاحظه‌ای دارای زمان سوئیچینگ کمتری می‌باشند. به علاوه نشان داده خواهد شد که در این طراحی، ایزولاسیون بالا در کنار افت عبوری و افت بازگشتی کم قابل حصول است.

## ۲- تئوری

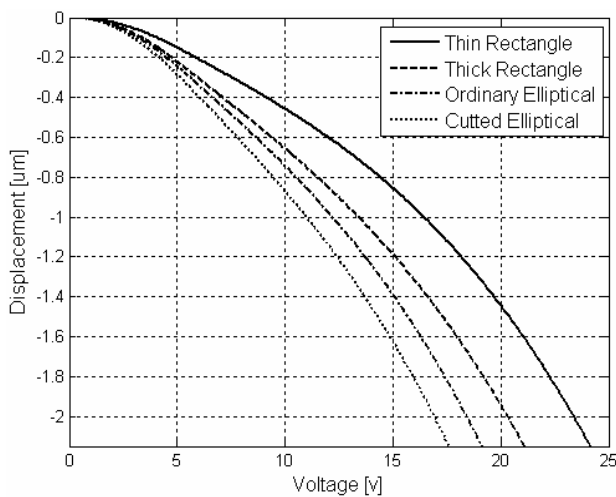
در عمل دو نوع کلی از سوئیچ‌های MEMS وجود دارند. سوئیچ‌های اهمی<sup>۳</sup> (MAM) و سوئیچ‌های خازنی<sup>۴</sup> (MIM). در هر دوی این سوئیچ‌ها می‌توان به تلفات انتقالی بسیار کم در هنگام خاموش بودن سوئیچ و ایزولاسیون بالا در هنگام روشن بودن آن دست یافت. متأسفانه مشکل عمده سوئیچ‌های اهمی در مستعد بودن اتصالاتش برای خوردگی است. علاوه بر این ایجاد اتصالات فلز-فلز در این نوع بسیار دشوار است.

در سوئیچ‌های خازنی اما یک موازنه برقرار است؛ افزایش سطح سوئیچ منجر به افزایش تلفات انتقال در هنگام خاموش بودن سوئیچ می‌شود که مطلوب نیست و از سوی دیگر ایزولاسیون را در هنگام روشن بودن آن افزایش می‌دهد که مورد نظر است. اگر ارتفاع سطح بیم را افزایش دهیم

1. Bending Momentum
2. Force/Stiffness Ratio
3. Ohmic or Metal - Air - Metal
4. Capacitive Membrane or Metal - Insulator - Metal

5. Cantilever

6. Suspension Bridge



شکل ۴: خمش پل تحت نیروی الکترواستاتیکی برای پل‌های مستطیلی و بیضوی.

جدول ۱: ابعاد سوئیچ MEMS بیضوی به همراه الگوی برشی جدید.

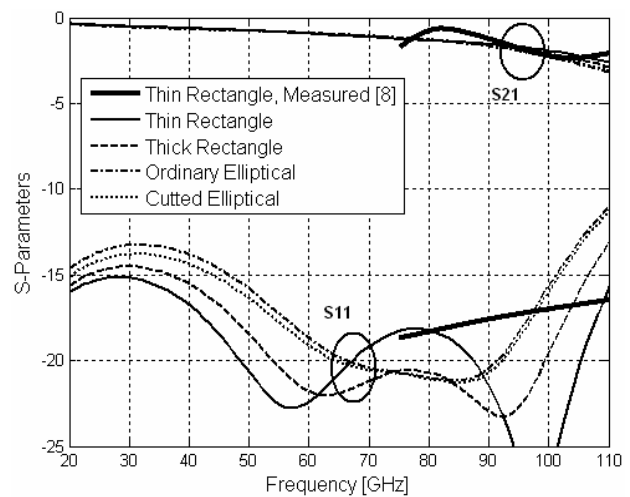
نام متغیر	مقدار [μm]
$L$	۲۵۰
$W$	۴۰
$L_s$	۰٫۸۵
$g$	۲۵
$w$	۳۵
$Wh$	$L/۵۰$
$Lh$ for $a$	$W/۶$
$Lh$ for $b$	$W/۴$
$Lh$ for $c$	$W/۲$

وقتی سوئیچ باز است، افت بازگشتی از باند UHF تا موج میلی‌متری در حدود کمتر از ۱۵ dB خواهد بود و وقتی سوئیچ بسته می‌شود فرکانس پایین مؤثر سوئیچ به باند Ku تغییر یافته و فرکانس بالای آن همچنان در موج میلی‌متری خواهد ماند. بنابراین پهنای باند مؤثر سوئیچ در حدود باند Ka می‌باشد. همچنین افت عبوری برای سوئیچ باز در حدود ۱ dB تا ۲ dB و برای سوئیچ بسته کمتر از ۱۰ dB - پرش می‌کند که به معنی یک ایزولاسیون قابل قبول است [۱۴].

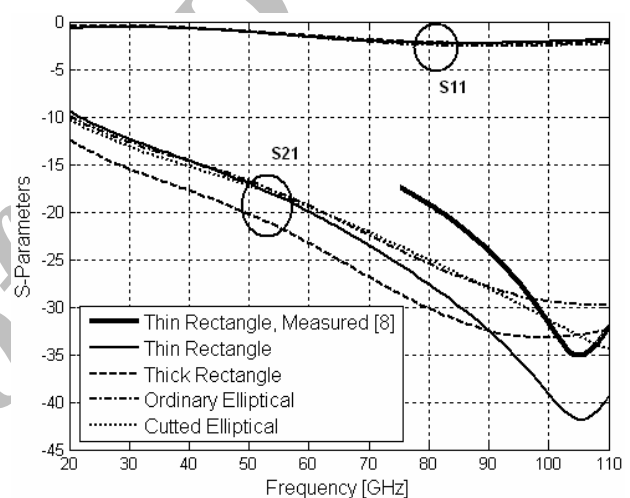
همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود، بر طبق تئوری میدان و امواج، هیچ تفاوت مهمی بین باریکه مستطیلی و بیضوی وجود ندارد. در حقیقت باریکه بیضوی مؤثرتر از پوسته مستطیلی عریض توانایی عبور یا عدم عبور سیگنال از پل را دارد. افزودن برش‌های عرضی نیز تأثیری منفی بر پارامترهای پراکندگی نشان نمی‌دهند.

در شکل ۴ تأثیر ولتاژ تحریک بر روی تغییر شکل پل بررسی شده است. سطح مورد نیاز پتانسیل الکتریکی به شدت به شکل پل و نوع معماری آن بستگی دارد. باریکه مستطیلی باریک در ناحیه کمی تحت تأثیر نیروی الکترواستاتیکی است که همین امر ولتاژ تحریک آن را افزایش می‌دهد. مستطیل عریض نیز دارای اتلاف عبوری بیشتری نسبت به مستطیل باریک است و این اتلاف با عرض پل نسبت مستقیم دارد (در اینجا ۲ تا ۳ dB بیشتر).

باریکه بیضوی هر دو خاصیت اتصال پایه باریک و ناحیه عریض میانی را دارا می‌باشد [۱۵]. مقایسه نتایج در شکل ۴ نشان می‌دهد که باریکه بیضوی، بهینه‌ترین هندسه در این بین برای رفتار الاستیکی را دارا می‌باشد.



شکل ۲: پارامترهای پراکندگی سوئیچ مستطیلی و بیضوی در حالتی که سوئیچ باز است.



شکل ۳: پارامترهای پراکندگی سوئیچ مستطیلی و بیضوی در حالتی که سوئیچ بسته است.

تماس احتمالی بین هادی خارجی و هادی مرکزی است که موجب اتصال کوتاه شدن ولتاژ تحریک DC خواهد شد. جدول ۱ ابعاد پل معرفی شده را نشان می‌دهد.

شکل ۲ و ۳ پهنای باند وسیع‌تر منحنی بیضوی را نسبت به منحنی مستطیلی نشان می‌دهد.

### ۳- نتایج عددی

در این بخش برخی از نتایج سوئیچ MEMS نشان داده شده و بحث خواهد شد. برای محاسبه نتایج از کامپیوتر پنتیوم IV، با تراشه اینتل ۳ گیگاهرتز و حافظه RAM، ۵۱۲ MB استفاده شده است. پارامترهای ماتریس پراکندگی سوئیچ، همگی به وسیله نسخه ۱۰ نرم‌افزار HFSS محاسبه گردیده‌اند. ساختار مکانیکی با تحریک الکترواستاتیکی نیز توسط نرم‌افزار Ansys مورد تحلیل قرار گرفته است.

افت عبوری ( $S_{21}$ ) و افت بازگشتی ( $S_{11}$ ) سوئیچ‌های MEMS مستطیلی و بیضوی در شکل‌های ۲ و ۳ برای هر دو حالت ممکن سوئیچ (بسته و باز) نشان داده شده‌اند.

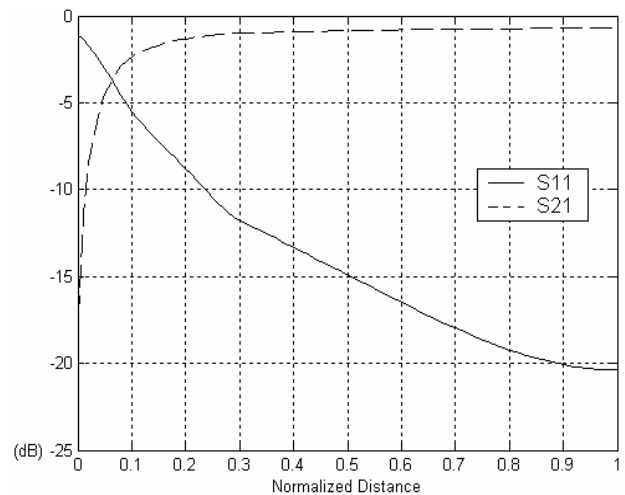
این نتایج برای سوئیچ مستطیلی با عرض  $40 \mu\text{m}$  و  $60 \mu\text{m}$  و همچنین برای سوئیچ بیضوی با و بدون الگوی برشی (شکل ۱-ب) آماده شده‌اند و با نتایج اندازه‌گیری برای مستطیل  $40 \mu\text{m}$  مورد مقایسه قرار گرفته‌اند [۶].

تأثیر نیروی الکترواستاتیکی را افزایش و از سوی دیگر عرض پایه پل را کاهش می‌دهد. این نوع پل شتاب خمش و نسبت نیرو بر سفتی را بهبود می‌بخشد.

## مراجع

- [1] E. Abbaspour Sani and S. Afrang, "A low voltage MEMS structure for RF capacitive switches," *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, vol. 65, pp. 157-167, 2006.
- [2] E. Abbaspour Sani, N. Nasirzadeh, and G. Dadashzadeh, "Two novel structures for tunable MEMS capacitor with RF applications," *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, vol. 68, pp. 169-183, 2007.
- [3] R. Chan, R. Lesnick, D. Becher, and M. Feng, "Low - actuation voltage RF MEMS shunt switch with cold switching lifetime of seven billion cycles," *J. of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, no. 5, pp. 713-719, Oct. 2003.
- [4] Z. Jamie Yao, S. Chen, S. Eshelman, D. Denniston, and C. Goldsmith, "Micromachined low - loss microwave switches," *IEEE J. of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 129-134, Jun. 1999.
- [5] F. Plotz, F. S. Michaelis, R. Aigner, H. J. Timme, J. Binder, and R. Noe, "A low - voltage tensional actuator for applications in RF micro - switches," *Sensors and Actuators*, vol. 92, no. 1-3, pp. 312-317, Aug. 2001.
- [6] J. Rizk, G. L. Tan, J. B. Muldavin, and G. M. Rebeiz, "High - isolation W - band MEMS switches," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 10-12, Jan. 2001.
- [7] H. T. Kim, J. H. Park, J. Yim, Y. K. Kim, and Y. Kwon, "A compact V - band 2 - bit reflection - type MEMS phase shifter," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 12, no. 9, pp. 324-326, Sep. 2002.
- [8] M. Jahanbakht, M. N. Moghaddasi, and A. A. Lotfi Neyestanak, "Fractal beam Ku - band MEMS phase shifter," *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 5, pp. 73-85, 2008.
- [9] J. J. Hung, L. Dussopt, and G. M. Rebeiz, "Distributed 2- and 3 - bit W - band MEMS phase shifters on glass substrates," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 2, pp. 600-605, Feb. 2004.
- [10] G. M. Rebeiz, *RF MEMS: Theory, Design, and Technology*, Wiley Inter Sciences, 2003.
- [11] G. M. Rebeiz, "Phase-noise analysis of MEMS-based circuits and phase shifters," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 5, pp. 1316-1323, May 2002.
- [12] J. S. Hayden and G. M. Rebeiz, "Very low-loss distributed X-band and Ka-band MEMS phase shifters using metal-air-metal capacitors," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 1, pp. 309-314, Jan. 2003.
- [13] ح. ا. زلفخانی، ج. راشد محصل و ف. حجت کاشانی، "تحلیل و طراحی تغییردهنده فاز N ییتی MEMS توزیع شده در باند Ka،" *نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران*، جلد ۴۱، شماره ۵، صص. ۶۳۰-۶۳۳، آذر ۱۳۸۶.
- [14] K. Topalli, M. Unlu, H. I. Atasoy, S. Demir, O. A. Civi, and T. Akin, "Empirical formulation of bridge inductance in inductively tuned RF MEMS shunt switches," *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, vol. 97, pp. 343-356, 2009.
- [15] M. Jahanbakht, M. N. Moghaddasi, and A. A. Lotfi Neyestanak, "Low actuation voltage Ka - band fractal MEMS switch," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 5, pp. 83-92, 2008.

محمد جهان‌بخت متولد سال ۱۳۶۰ در همدان بوده و تحصیلات خود را در رشته برق گرایش مخابرات و در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد، و دکتری به ترتیب در دانشگاه‌های آزاد اسلامی واحد شهرری، دانشگاه شاهد تهران، و دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۴، و ۱۳۸۸ به پایان رسانده است. نام‌برده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس و علوم تحقیقات به تدریس مشغول بوده و به عنوان کارشناس ارشد با پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی همکاری می‌نماید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، روش‌های عددی، طراحی آنتن‌ها، و طراحی مدارات مایکروویو. از ایشان تاکنون بیش از ۲۲ عنوان مقاله در همایش‌ها و مجلات معتبر داخلی و خارجی منتشر شده است.



شکل ۵: پارامتر پراکندگی سوئیچ MEMS به صورت تابعی از خمش پل (تغییر ارتفاع پل) در فرکانس ۵۰ GHz.

جدول ۲: مقایسه ولتاژ تحریک برای چند نمونه پل MEMS.

شماره مرجع	ولتاژ تحریک [v]
مرجع [۴]	۴۰
مرجع [۷]	۲۰
مرجع [۹]	۳۵-۴۰
مرجع [۱] و [۲]	۱۰-۳۰
مسططیلی ۶۰ μm	۲۱
مسططیلی ۴۰ μm	۲۴
بیضی معمولی	۱۹
بیضی برش‌خورده	۱۷٫۵

با توجه به شکل ۴ مشخص است که ولتاژ تحریک باریکه بیضوی در حدود ۱۴٪ نسبت به باریکه مستطیلی پایین‌تر است و این موضوع حتی در زمانی که عرض باریکه مستطیلی برای پوشاندن کل باریکه بیضوی، پهن انتخاب شود (۶۰ μm)، نیز صدق می‌کند.

در صورت افزودن الگوی برشی شکل ۱-ب، نتایج ولتاژ تحریک باز هم بهبود می‌یابد و بر اساس جدول ۲، ولتاژ تحریک ۱۷٫۵ ولت به‌سادگی قابل دسترس است. این ولتاژ یک بهبود ۲۱٪ در ولتاژ تحریک را نسبت به پل مستطیلی نمایش می‌دهد.

شکل ۵ بیانگر اتلاف افزوده و بازگشتی سوئیچ MEMS در فرکانس ۵۰ GHz به‌صورت تابعی از میزان خمش پل است. در این شکل حالتی که پل روی عایق نشست کرده است را با صفر و حالتی که پل بدون حضور تحریک DC سرپا ایستاده با ۱ (نرمالیزه) نشان داده شده است. عمل نرمالیزاسیون نیز با حداکثر ارتفاع مجاز پل انجام گردیده است. در واقع شکل ۵ به نحوی حساسیت پارامتر S نسبت به تغییر ارتفاع خمش در پل را نیز نشان می‌دهد [۱۳].

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد که یک پوسته بیضوی، ولتاژ تحریکی در حدود ۱۴٪ کمتر از باریکه مستطیلی مشابه را دارا می‌باشد که این برتری با افزودن الگوی برشی مناسب تا ۲۱٪ قابل کاهش است. با مقایسه این ساختار با دیگر هندسه‌ها، نشان داده شد که باریکه بیضوی شکل پهنه‌ای را دارا می‌باشد که پارامترهای پراکندگی را دچار تخریب نساخته و تنها ولتاژ تحریک را کاهش می‌دهد. این ساختار از یک سو ناحیه تحت

**مرتضی لطفی نیستانک** در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نموده است. نام‌برده هم‌اکنون در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات در دانشگاه علم و صنعت ایران مشغول به تحصیل می‌باشد. ایشان از سال ۱۳۸۸، بعنوان کارشناس در پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی مشغول به فعالیت است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های میکروالکترومکانیکی RF، فیلترها و آنتن‌های میکرواستریپی طرح پذیر و مدارهای خطی و غیر خطی میکروویو.

**محمد تندرو اغمیونی** مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۸۶ در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات از دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر دریافت نموده و از سال ۱۳۸۶ تاکنون به عنوان کارشناس ارشد سیستم‌های مخابراتی مشغول به کار بوده است. نام‌برده از سال ۱۳۸۷ تا کنون مقالات علمی مختلفی را در سمینارها، دانشگاه‌ها، و مراکز معتبر علمی ارائه نموده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از مدارات فرکانس بالا و میکروویو، تقویت‌کننده‌های توان، سیستم‌های موجبری، مدیریت تکنولوژی در گرایش برق-مخابرات، و سیستم‌های فن‌آور.

**عباسعلی لطفی نیستانک** متولد ۱۳۵۰ در تهران بوده و تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مخابرات و کارشناسی ارشد الکترونیک به‌ترتیب در سالهای ۱۳۷۲ و ۱۳۷۶ و دکتری مخابرات را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است. نام‌برده در سالهای ۱۳۷۴ الی ۱۳۷۷ به عنوان مهندس فنی در طراحی شبکه در صدا و سیما جمهوری اسلامی ایران مشغول به کار بوده است. ایشان در چند سال اخیر در دانشگاه‌های آزاد اسلامی، علم و صنعت ایران، شاهد و پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی به تدریس و تحقیق اشتغال داشته است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مدارهای فعال و غیر فعال میکروویو، آنتن‌های میکرواستریپ، الگوریتم‌های بهینه سازی، طراحی شبکه‌های رادیویی، آنتن‌های هوشمند، سازگاری الکترومغناطیسی، اندازه گیری میکروویو و انتشار امواج.

دکتر لطفی نیستانک عضو ارشد انجمن بین المللی مهندسی برق و الکترونیک بوده و تا کنون بیش از ۸۵ مقاله در مجلات و همایش‌های معتبر داخلی و خارجی منتشر کرده است.

Archive of SID