

# طراحی، تحلیل و شبیه سازی میکروسنسور شیب خازنی

زینب ورع<sup>۱</sup> مهدیه مهران<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- آزمایشگاه RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE)- بخش مهندسی

برق- دانشگاه شهید باهنر- کرمان- ایران

[nazaninzeinab.varaa@yahoo.com](mailto:nazaninzeinab.varaa@yahoo.com)

۲- دانشیار- آزمایشگاه RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE)- بخش مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر-

کرمان- ایران

[m.mehran@uk.ac.ir](mailto:m.mehran@uk.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله برای اندازه‌گیری زاویه حول محور افقی (x)، میکروسنسورهای شیب خازنی مبتنی بر تکنولوژی MEMS طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی شده‌اند. ساختار این میکروسنسورها استوانه‌ای است و بر روی یکی از قاعده‌های آن‌ها از خازن‌های بین‌انگشتی با الکترودهایی از جنس مس استفاده شده است. الکترودهای خازن‌های بین‌انگشتی به صورت یک در میان به ولتاژ زمین یا ترمینال وصل می‌شوند. نیمی از حجم استوانه با روغن سیلیکون و نیمه دیگر با هوا پر شده است. با چرخش استوانه حول محور افقی به دلیل ثابت ماندن سطح روغن درون محفظه به علت گرانش، سطحی از الکترودهایی که درون روغن قرار می‌گیرند تغییر کرده، در نتیجه مقدار خازن‌های ساختار و بدنبال آن خروجی تغییر می‌کند. از این تغییرات برای اندازه‌گیری زاویه استفاده می‌شود. با یک تحلیل دقیق، تاثیر تغییرات زاویه بر ظرفیت خازن‌های ساختار و خروجی مورد بررسی قرار گرفته است، بعلاوه ساختارهای پیشنهادی با کمک نرم‌افزار COMSOL Multiphysics شبیه‌سازی شده‌اند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل مؤید یکدیگر می‌باشند. دو ساختار به ترتیب با حساسیت‌های ۴۴ fF/deg و ۸۸ fF/deg زاویه را در بازه ۹۰°- تا ۹۰°+ یا ۰° تا ۱۸۰° اندازه‌گیری می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** میکروسنسور خازنی شیب، خازن‌های بین‌انگشتی، رنج اندازه‌گیری، حساسیت، دی‌الکترونیک مایع

DOI: 10.52547/jiaeee.19.3.113

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

تاریخ ارسال پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدیه مهران

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کرمان - بزرگراه امام- میدان پژوهش- دانشگاه شهید باهنر کرمان - بخش برق

## ۱- مقدمه

سنسور شیب یا زاویه‌سنج، زاویه را نسبت به یک بردار مرجع اندازه‌گیری می‌کند. بردار مرجع می‌تواند بردار گرانش، میدان مغناطیسی (در مورد سنسورهای مغناطیسی) و غیره باشد [۱].

در دهه‌های اخیر علاقه به سنسور شیب با توجه به گسترش کاربرد آن، بسیار افزایش یافته است. شیب یک پارامتر مهم در برنامه‌های تشخیص حرکت می‌باشد. سنسورهای شیب یا زاویه‌سنج‌ها در بسیاری از زمینه‌ها مانند ارتباطات، هوافضا، تجهیزات الکترومکانیکی، خودروسازی، تجهیزات صنعتی، کنترل ابزار دقیق اتوماسیون‌های صنعتی و مهندسی عمران کاربرد دارند [۲، ۳]. علاوه بر موارد ذکر شده از آن‌ها به طور گسترده‌ای در کاربردهایی نظیر نظارت بر آتشفشان‌ها، ربات‌ها، حرکت زمین، سیستم‌های خورشیدی، سیستم تثبیت رادار و موشک، محصولات الکترونیکی، اسباب بازی‌ها، گوشی‌های هوشمند و دوربین‌ها استفاده می‌شود [۴، ۵].

استفاده از سنسور شیب در علوم پزشکی نیز بسیار متداول است. برای مثال در ربات‌های جراح، تشخیص حرکت بدن انسان و بهبود عملکرد افراد دارای معلولیت حرکتی از آن‌ها استفاده می‌شود [۶، ۷، ۳].

در بین سنسورهای شیب، سنسورهای شیب مبتنی بر سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی دارای مزایایی همچون هزینه پایین، حساسیت بالا، اندازه کوچک و امکان تولید انبوه هستند. اکثر سنسورهای شیب شامل یک پوشش ثابت و یک جرم متحرک می‌باشند. هنگامی که به سنسور، زاویه کوچکی اعمال شود به علت نیروی ناشی از گرانش، جرم متحرک سنسور نسبت به پوشش ثابت جابجا می‌گردد. به این جرم متحرک پاندول گفته می‌شود. پاندول بخشی است که تغییرات زاویه را نشان می‌دهد. پاندول‌ها می‌توانند جامد، مایع یا گاز باشند.

پاندول‌های جامد رنج اندازه‌گیری زاویه بزرگی دارند؛ اما در برابر ضربه ضعیف هستند، در مقابل پاندول‌های گازی مقاومت بیشتری در برابر ضربه از خود نشان می‌دهند؛ اما به راحتی تحت تأثیر بسیاری از عوامل محیطی قرار می‌گیرند. پاندول‌های گازی قابلیت این را دارند که اندازه‌گیری زاویه را با وضوح بالا انجام دهند. پاندول‌های مایع معمولاً براساس الکترولیت ساخته می‌شوند و دارای مزایایی همچون کم مصرف بودن و حساسیت بالا هستند؛ اما دارای زمان پاسخ طولانی بوده و در برابر شوک، مقاومت کمی دارند. روش‌های تشخیص موقعیت پاندول، شامل اندازه‌گیری تغییرات مقاومت، ظرفیت، حرارت، الکترولیتی، نوری و مغناطیسی می‌باشد [۸، ۳].

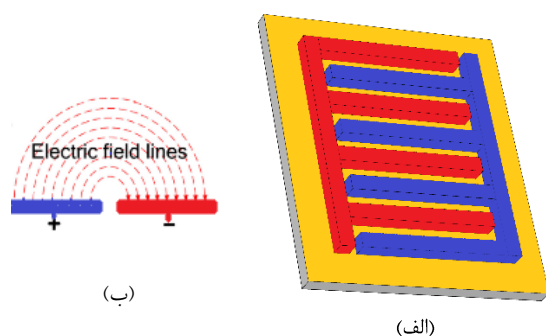
در بررسی کارایی سنسورهای شیب پارامترهایی همچون حساسیت، دقت، رنج اندازه‌گیری زاویه و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. حساسیت، نسبت تغییرات دامنه خروجی به تغییرات دامنه ورودی است. دقت، کمترین تغییرات دامنه ورودی است که باعث تغییر در خروجی می‌گردد و رنج اندازه‌گیری زاویه، بخشی از بازه  $0^\circ$  تا  $360^\circ$  است که در بیشترین حالت برابر با بازه کامل  $0^\circ$  تا  $360^\circ$  است.

ایده‌آل‌ترین سنسور شیب، سنسوری است که تمامی پارامترهای حساسیت و رنج اندازه‌گیری را در حد بسیار مطلوبی دارا باشد. دستیابی به چنین سنسوری، نیازمند تکنیک‌های ساخت پیشرفته است [۹].

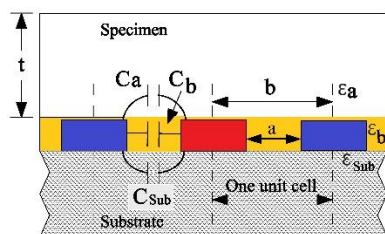
۲- معرفی خازن‌های بین انگشتی<sup>۱</sup>

با افزایش تقاضا برای مجتمع‌سازی سیستم‌ها بر روی تراشه و نیاز به کوچک سازی سنسورها، سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. پیکربندی سنسورهای خازنی بین انگشتی از الکترودهای دوره‌ای بر روی یک صفحه عایق تشکیل شده است، بنابراین مانند خازن‌های معمولی نیاز به فضای بین الکترودها ندارند. خازن‌های بین انگشتی متداول‌ترین ساختار خازنی مورد استفاده در حوزه MEMS هستند که با ابعاد ساختاری و دی‌الکتریک یکسان، نسبت به خازن‌هایی که صفحات آن‌ها مقابل یا عمود بر هم هستند، ظرفیت خازنی بزرگ‌تری دارند [۱۳، ۱۲].

در شکل ۱، ساختار و نحوه بسته شدن خطوط میدان در این نوع از خازن‌ها، نشان داده شده است. این خازن‌ها از تعدادی خازن کوچک‌تر، ساخته می‌شوند که در مجموع، ظرفیت قابل ملاحظه‌ای را ایجاد می‌کنند.



شکل (۱): ساختار (الف) خازن‌های بین انگشتی و (ب) نحوه بسته خطوط میدان [۱۳، ۱۴]



شکل (۲): مقطع عرضی خازن‌های بین انگشتی [۱۵]

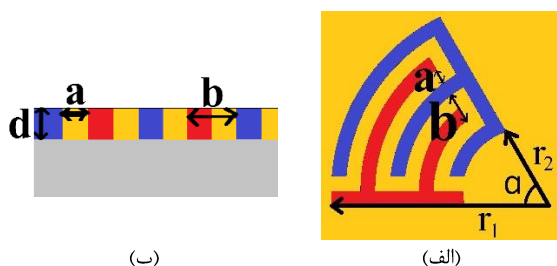
$$C = C_{uc} (N - 1)L \quad (1)$$

$$C_{uc} = C_a + C_b + C_{Sub} \quad (2)$$

روابط ظرفیت خازن های بین انگشتی معمولی بدست آورد. اگر الکترو د حلقوی دارای شعاع خارجی  $r_1$ ، شعاع داخلی  $r_2$  و قطاع  $\alpha$  از یک دایره باشد (شکل ۴)، در این صورت طول مؤثر را می توان با استفاده از رابطه ی ۶ محاسبه کرد. با جانشین کردن این طول در روابط ۱ تا ۵، می توان ظرفیت خازن های بین انگشتی با الکترو د حلقوی را به دست آورد.

شکل ۴ نمای از بالا و مقطع عرضی یک خازن بین انگشتی با الکترو د های حلقوی را نشان می دهد. این خازن قطاعی  $\alpha$  درجه، از یک دایره است.

$$L = \frac{\pi(r_1 + r_2) \times \alpha}{360} \quad (۶)$$



شکل (۴): (الف) نمای از بالا و (ب) مقطع عرضی یک خازن بین انگشتی با الکترو د های حلقوی

جهت اختصار، برای ظرفیت خازن های بین انگشتی در ساختارهای پیشنهادی این مقاله، از روابط ۷ و ۸ استفاده شده است. رابطه ی ۷ بیانگر ظرفیت خازن حاصل از بسته شدن خطوط میدان الکتریکی از طریق بستر خازن های بین انگشتی ( $C_{Sub}$ ) است که دارای مقدار ثابتی می باشد. در طراحی میکرو حسگرها، پارامتر  $Z$  نشان داده شده در رابطه ی ۸ را می توان به عنوان قسمت ثابت در نظر گرفت.

$$C_{Sub} = (N - 1)L \frac{K(\sqrt{1 - k^2})}{2K(k)} \epsilon_0 \epsilon_{Sub} \quad (۷)$$

$$Z = (N - 1)L \epsilon_0 \frac{K(\sqrt{1 - k^2})}{2K(k)} + (N - 1)L \epsilon_0 \frac{d}{a} \quad (۸)$$

### ۳- اساس عملکرد سنسورهای پیشنهادی

زمانی که به سنسور، زاویه ای مطابق شکل ۵ حول محور افقی اعمال شود ( $\theta = 30^\circ$ )، سطح روغن سیلیکون درون محفظه استوانه ای به دلیل گرانش همچنان افقی باقی می ماند؛ اما سطحی از الکترو د ها که در روغن سیلیکون یا هوا قرار می گیرند، تغییر می کنند. تغییر در سطح قرارگیری الکترو د ها در دی الکتریک هوا و روغن سیلیکون در اثر اعمال زاویه، سبب تغییر در ظرفیت خازن ها می شود. اگر یک خازن بین انگشتی با قطاع  $\alpha$  کاملاً درون ماده ای با ضریب دی الکتریک  $\epsilon$  قرار گیرد، در این صورت، ظرفیت خازن را می توان با استفاده از رابطه ی ۹ محاسبه کرد.

$$C_a + C_{Sub} = \epsilon_0 \left( \frac{\epsilon_a + \epsilon_{Sub}}{2} \right) \frac{K(\sqrt{1 - k^2})}{K(k)} \quad (۳)$$

$$C_b = \epsilon_0 \epsilon_b \frac{d}{a} \quad (۴)$$

$$k = \frac{a}{b} \quad (۵)$$

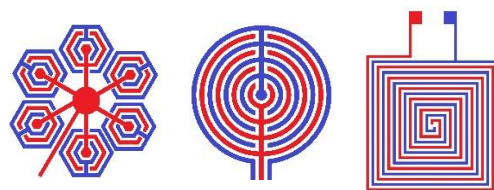
\*uc : unit cell

هر دو الکترو د خازن های بین انگشتی سه خازن ایجاد می کنند که در شکل ۲، نشان داده شده است. ظرفیت خازن های بین انگشتی را می توان با استفاده از روابط ۱ تا ۵، به دست آورد [۱۵].

در این روابط  $L$ ،  $N$  و  $d$  و  $a$  به ترتیب نشان دهنده تعداد، طول، ضخامت و فاصله ی بین الکترو د ها و  $b$  مجموع عرض و فاصله بین الکترو د ها در خازن های بین انگشتی نشان داده شده در شکل ۲، هستند.  $\epsilon_0$  ثابت گذردهی الکتریکی خلاء،  $\epsilon_a$ ،  $\epsilon_b$  و  $\epsilon_{Sub}$  به ترتیب ضرایب دی الکتریک ماده قرار گرفته بر روی الکترو د ها، بین آن ها و ضریب گذردهی بستر می باشند.  $K(k)$  تابع انتگرال بیضوی کامل نوع اول است که آرگمان تابع با استفاده از رابطه ی ۵ محاسبه می شود [۱۶]. از روابط ذکر شده، می توان نتیجه گرفت که با تغییر در طول الکترو د ها یا ضریب دی الکتریک ماده قرار گرفته بر روی آن ها، ظرفیت خازن های بین انگشتی، به صورت خطی تغییر می کند. به دلیل عملکرد خوب و ساختار ساده، در بسیاری از سنسورها از خازن های بین انگشتی استفاده شده است [۱۷-۲۱].

### ۲-۱- برخی از ساختارهای خازن های بین انگشتی

در سال های اخیر برای برطرف کردن برخی از محدودیت های خازن های بین انگشتی معمولی، ساختارهای مختلفی از آن ها ارائه شده است، برخی از این ساختارها، در شکل ۳، ارائه شده اند.

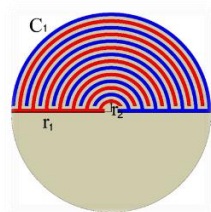


شکل (۳): برخی از ساختارهای خازن های بین انگشتی [۲۲، ۲۳]

### ۲-۲- خازن های بین انگشتی با الکترو د حلقوی

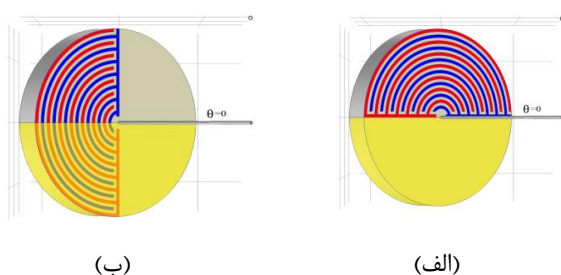
در برخی از کاربردها ممکن است الکترو د های مستطیلی شکل خازن بین انگشتی، جای خود را به الکترو د های حلقوی بدهند؛ زیرا الکترو د های حلقوی دارای ویژگی تقارن چرخشی بوده و در مقایسه با الکترو د های مستطیلی شکل، بخش های حساس بزرگتری دارند [۲۴]. ظرفیت خازن های بین انگشتی با الکترو د حلقوی را می توان با تعمیم

زوایای  $90^\circ$  تا  $90^\circ +$  اندازه گیری می کند، با توجه به خروجی، جهت اعمالی به سنسور نیز مشخص می گردد.



شکل (۶): ساختار میکروسنسور شیب تک خازنی

$$L = \frac{\pi(r_1 + r_2)}{2} \quad (11)$$



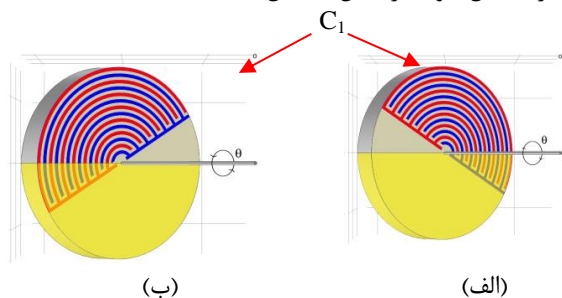
شکل (۷): حالت اولیه در ساختار تک خازنی با رنج اندازه گیری، (الف)  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  و (ب)  $90^\circ$  تا  $90^\circ +$

زمانی که خازن کاملاً در روغن یا هوا قرار گیرد، به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار ظرفیت است که این مقادیر را با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳، می توان به دست آورد. زمانی که سنسور زاویه  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  را اندازه گیری می کند، در حالت صفر، کمترین ظرفیت خازنی را داراست. با افزایش زاویه اعمالی به سنسور، ظرفیت به صورت خطی افزایش پیدا کرده، در زاویه  $180^\circ$  به بیشترین مقدار خود می رسد. در حالتی که سنسور قادر به اندازه گیری زوایای بین  $90^\circ$  تا  $90^\circ +$  باشد، در زاویه  $90^\circ -$  کمترین و در  $90^\circ +$  بیشترین ظرفیت را داراست.

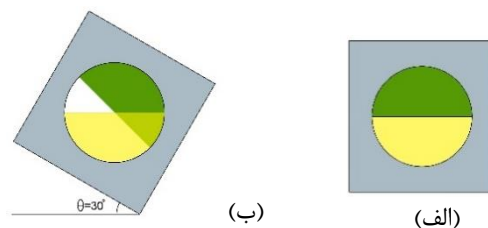
$$C_{\min} = C_{\text{sub}} + Z \varepsilon_{\text{air}} \quad (12)$$

$$C_{\max} = C_{\text{sub}} + Z \varepsilon_{\text{oil}} \quad (13)$$

موقعیت خازن  $C_1$  زمانی که به سنسور، زاویه ای در جهت پادساعتگرد یا ساعتگرد اعمال شود، در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل (۸): اعمال زاویه به سنسور شیب با ساختار تک خازنی در جهت، (الف) پادساعتگرد و (ب) ساعتگرد



شکل (۵): موقعیت روغن سیلیکون در حالت (الف) افقی و (ب) اعمال زاویه  $30^\circ$  به سنسور حول محور افقی

$$C = C_{\text{sub}} + Z \varepsilon \quad (9)$$

مقادیر ثابت  $C_{\text{sub}}$  و  $Z$  به ترتیب با استفاده از روابط  $\gamma$  و  $\lambda$  محاسبه می شوند. زمانی که خازن با الکترودهای حلقوی با قطاع  $\alpha$  درجه ای، حول محور افقی به اندازه ی زاویه  $\theta$  جابجا شود؛ بخشی از سطح الکترودها درون روغن سیلیکون (ضریب دی الکتریک  $\varepsilon_{\text{oil}}$ ) و بخشی دیگر درون هوا (ضریب دی الکتریک  $\varepsilon_{\text{air}}$ ) قرار می گیرند. در این صورت می توان ظرفیت خازن را با استفاده از رابطه ی ۱۰ محاسبه کرد.

$$C = C_{\text{sub}} + Z \varepsilon_0 \left( \varepsilon_{\text{air}} \frac{\alpha - \theta}{\alpha} + \varepsilon_{\text{oil}} \frac{\theta}{\alpha} \right) \quad (10)$$

با توجه به زاویه  $\theta$  (زاویه ای که حول محور افقی به سنسور اعمال می شود)، سطح قرار گرفته ی الکترودها در هوا و روغن سیلیکون تغییر می کند که سبب تغییر در ظرفیت خازن می شود.

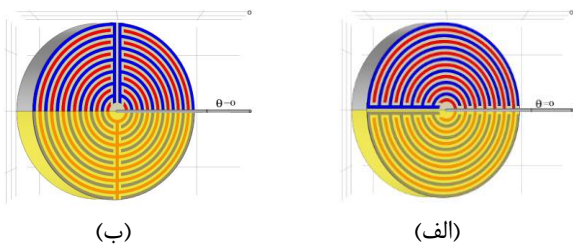
## ۴- طراحی و تحلیل ساختارهای پیشنهادی

در این مقاله، برای اندازه گیری زاویه حول محور افقی، دو ساختار براساس خازن های بین انگشتی با الکترودهای حلقوی، ارائه گردیده اند. این دو ساختار دارای رنج اندازه گیری برابری هستند ولی از حساسیت های متفاوتی برخوردارند. در قسمت بعد به تحلیل و شبیه سازی ساختارهای پیشنهادی شده می پردازیم.

### ۴-۱- ساختار تک خازنی

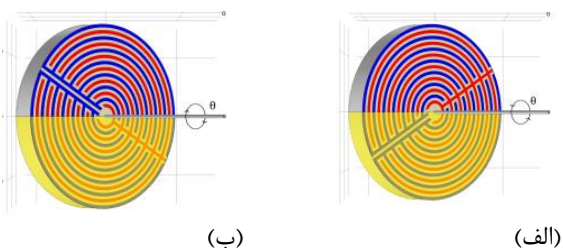
شکل ۶، ساختار پیشنهادی میکروسنسور شیب تک خازنی را نشان می دهد. در این ساختار از یک خازن بین انگشتی استفاده شده است. الکترودهای خازن بین انگشتی به صورت قطاع هایی  $180^\circ$  از دوایری به شعاع های  $r_1$  تا  $r_2$  هستند. طول مؤثر الکترودها را در این ساختار می توان با استفاده از رابطه ی ۱۱، محاسبه کرد. با اعمال زاویه حول محور افقی به سنسور، ظرفیت خازن تغییر می کند. این میکروسنسور شیب بسته به کاربرد، می تواند زوایای  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  یا  $90^\circ$  تا  $90^\circ +$  را اندازه گیری کند. همانطور که مشاهده می شود، این سنسور توانایی اندازه گیری زاویه را در یک یا دو جهت داراست. حالت اولیه سنسور، تعیین کننده بازه ی اندازه گیری زاویه است. شکل ۷، حالت اولیه سنسور را برای این دو رنج نشان می دهد. در حالتی که سنسور

اندازه گیری زاویه اعمالی در رنج  $90^\circ$  تا  $90^\circ+$  است، در حالت اولیه سنسور، ظرفیت هر دو خازن با هم برابر می باشد، زمانی که به سنسور زاویه  $90^\circ+$  اعمال شود یکی از خازن ها بیشترین و دیگری کمترین ظرفیت را داراست و اگر به سنسور زاویه  $90^\circ-$  اعمال شود ظرفیت این دو خازن عکس حالت  $90^\circ+$  می شود. بیشترین و کمترین ظرفیت خازن ها را می توان مشابه با بیشترین و کمترین ظرفیت، در ساختار تک خازنی (روابط ۱۲ و ۱۳) محاسبه کرد.



شکل (۱۰): حالت اولیه در ساختار دو خازنی با رنج اندازه گیری، (الف)  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  و (ب)  $90^\circ-$  تا  $90^\circ+$

شکل ۱۱، موقعیت خازن های ساختار دو خازنی را هنگام اعمال زاویه به صورت پادساعتگرد و ساعتگرد، نشان می دهد.



شکل (۱۱): اعمال زاویه به ساختار دو خازنی به صورت (الف) پادساعتگرد و (ب) ساعتگرد

تغییرات خازن های  $C_1$  و  $C_2$  بر اساس زاویه اعمالی به سنسور در دو حالت یک و دو جهت به ترتیب بر اساس روابط ۱۸ تا ۲۱ بیان می شوند.

$$\theta = 0^\circ \text{ to } 180^\circ$$

$$C_1 = C_{sub} + Z \left[ \varepsilon_{air} \frac{180^\circ - \theta}{180^\circ} + \varepsilon_{oil} \frac{\theta}{180^\circ} \right] \quad (18)$$

$$C_2 = C_{sub} + Z \left[ \varepsilon_{oil} \frac{180^\circ - \theta}{180^\circ} + \varepsilon_{air} \frac{\theta}{180^\circ} \right] \quad (19)$$

$$\theta = -90^\circ \text{ to } 90^\circ$$

$$C_1 = C_{sub} + Z \left[ \varepsilon_{air} \frac{90^\circ - \theta}{180^\circ} + \varepsilon_{oil} \frac{\theta + 90^\circ}{180^\circ} \right] \quad (20)$$

$$C_2 = C_{sub} + Z \left[ \varepsilon_{oil} \frac{90^\circ - \theta}{180^\circ} + \varepsilon_{air} \frac{\theta + 90^\circ}{180^\circ} \right] \quad (21)$$

تغییرات ظرفیت خازن  $C_1$  برحسب زاویه اعمالی در ساختار تک خازنی در دو حالت یک یا دو جهت به ترتیب به صورت روابط ۱۴ و ۱۵ بیان می شوند.

$$\theta = 0^\circ \text{ to } 180^\circ$$

$$C_1 = C_{sub} + Z \left[ \varepsilon_{air} \frac{180^\circ - \theta}{180^\circ} + \varepsilon_{oil} \frac{\theta}{180^\circ} \right] \quad (14)$$

$$\theta = -90^\circ \text{ to } 90^\circ$$

$$C_1 = C_{sub} + Z \left[ \varepsilon_{air} \frac{90^\circ - \theta}{180^\circ} + \varepsilon_{oil} \frac{\theta + 90^\circ}{180^\circ} \right] \quad (15)$$

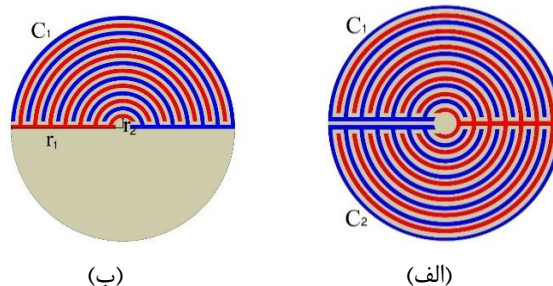
در این ساختار پیشنهادی، خروجی و حساسیت را می توان به ترتیب با استفاده از روابط ۱۶ و ۱۷ محاسبه کرد (مقدار ثابت  $Z$  با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می شود).

$$C_{out} = C_1 \quad (16)$$

$$S = \left| S_{\theta}^{C_{out}} \right| = \frac{dC_{out}}{d\theta} = \frac{Z(\varepsilon_{oil} - \varepsilon_{air})}{180} \quad (17)$$

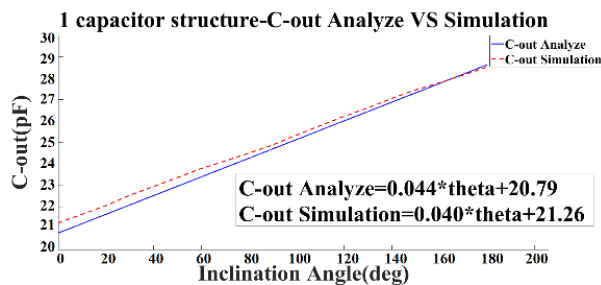
## ۲-۴- ساختار دو خازنی

دومین سنسور شیب پیشنهادی دارای دو خازن بین انگشتی است. شماتیک این ساختار و یکی از خازن های آن در شکل ۹، نشان داده شده است. در این ساختار الکترودهای خازن ها به صورت قطاع هایی  $180^\circ$  از دایره به شعاع های  $r_1$  تا  $r_2$  هستند. طول مؤثر الکترودها مشابه ساختار تک خازنی با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می شود.

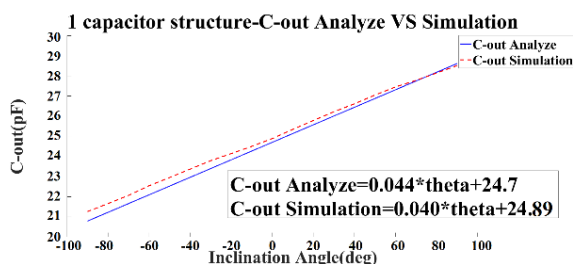


شکل (۹): ساختار، (الف) میکروسنسور پیشنهادی دو خازنی و (ب) یک خازن آن

مشابه ساختار تک خازنی، رنج اندازه گیری این سنسور زوایای  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  یا  $90^\circ-$  تا  $90^\circ+$  است که بسته به حالت اولیه اش می تواند زاویه را در یک یا دو جهت اندازه گیری کند. شکل ۱۰، حالت اولیه سنسور را در این دو رنج نشان می دهد. در رنج اندازه گیری  $90^\circ-$  تا  $90^\circ+$ ، با توجه به خروجی، جهت اعمالی به سنسور نیز مشخص می گردد. در صورتی که سنسور دارای رنج اندازه گیری  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  باشد، در حالت اولیه سنسور، یکی از خازن ها بیشترین و دیگری دارای کمترین مقدار ظرفیت می باشد. اگر به سنسور، زاویه  $180^\circ$  اعمال شود، ظرفیت دو خازن عکس حالت اولیه می شود. در حالتی که سنسور قادر به



شکل (۱۳): نتایج حاصل از تحلیل و شبیه سازی ساختار تک خازنی در حالت یک جهته

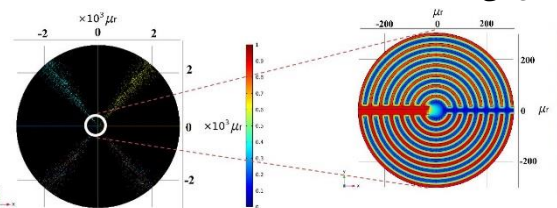


شکل (۱۴): نتایج حاصل از تحلیل و شبیه سازی ساختار تک خازنی در حالت دو جهته

با بررسی مشخصه های خروجی به دست آمده در شکل های ۱۳ و ۱۴ و استفاده از رابطه ی ۱۷، حساسیت بدست آمده از تحلیل و شبیه سازی ساختار تک خازنی به ترتیب برابر با  $0.44 \text{ fF/deg}$ ،  $0.4 \text{ fF/deg}$  می باشد. رنج اندازه گیری این ساختار  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  یا  $90^\circ$  تا  $90^\circ$  بوده و در تمامی رنج اندازه گیری زاویه، تغییرات خروجی خطی است.

### ۵-۱- ساختار دو خازنی

شکل ۱۵ توزیع ولتاژ در ساختار دو خازنی را در نرم افزار کامسول نشان می دهد.



شکل (۱۵): توزیع ولتاژ در ساختار دو خازنی

با شبیه سازی ساختار دو خازنی در نرم افزار کامسول و جانشین کردن مشخصات هندسی ساختار در روابط ۱۸ تا ۲۱، تغییرات دو خازن و خروجی سنسور (رابطه ۲۲) در دو حالت یک و دو جهته به ترتیب در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده اند.

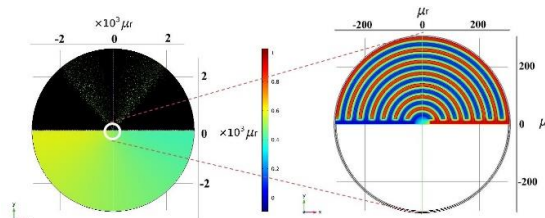
خروجی و حساسیت در این سنسور را می توان به ترتیب با استفاده از روابط ۲۲ و ۲۳ به دست آورد.

$$C_{out} = C_1 - C_2 \quad (22)$$

$$S = \left| \frac{dC_{out}}{d\theta} \right| = \frac{dC_{out}}{d\theta} = \frac{2Z(\epsilon_{oil} - \epsilon_{air})}{180} \quad (23)$$

### ۵- نتایج و بحث

در این قسمت به بیان نتایج حاصل از شبیه سازی ساختارها با استفاده از نرم افزار کامسول می پردازیم، علاوه روابط تحلیلی به دست آمده با استفاده از نرم افزار Matlab ترسیم شده و این نتایج با هم مقایسه می گردند. در جدول ۱، مشخصات ساختاری میکروسنسور پیشنهاد شده، ارائه گردیده است. ساختار تک خازنی شکل ۱۲ توزیع ولتاژ حاصل از پیاده سازی ساختار تک خازنی با استفاده از نرم افزار کامسول را نشان می دهد.



شکل (۱۲): توزیع ولتاژ در ساختار تک خازنی

جدول (۱): مشخصات ساختاری میکرو سنسورهای شیب پیشنهاد شده

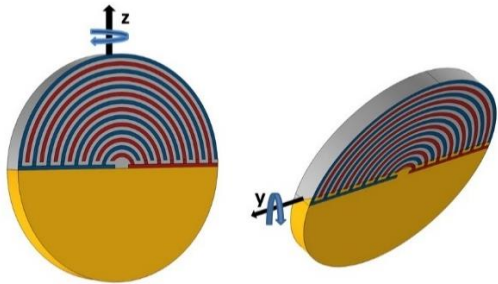
مشخصات	جنس	اجزاء ساختاری سنسور
شعاع حفره: $3020 \mu\text{m}$ $50 \mu\text{m} \cdot h$	زدایش بستر سیلیکونی	حفره استوانه ای
ضخامت: $1 \mu\text{m}$	تفلون	پوشش داخلی استوانه
$\epsilon_{Sub}: 4/2$	شیشه	بستر الکترودها
$\alpha: 180^\circ$ $N: 148$ $d: 1 \mu\text{m}$ $r_1: 3000 \mu\text{m}$ $r_2: 50 \mu\text{m}$ $a: 10 \mu\text{m}$ $b: 10 \mu\text{m}$	مس	خازن های بین انگشتی
$\epsilon_{oil}: 2/8$ چسبندگی: $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ حجم: $0.7163 \text{ mm}^3$ کشش سطحی: $19 \text{ mN/m}$	روغن سیلیکون	دی الکترونیک مایع

شکل های ۱۳ و ۱۴، نتایج حاصل از تحلیل و شبیه سازی ساختار تک خازنی را به ترتیب در حالت یک و دو جهته، نشان می دهند.

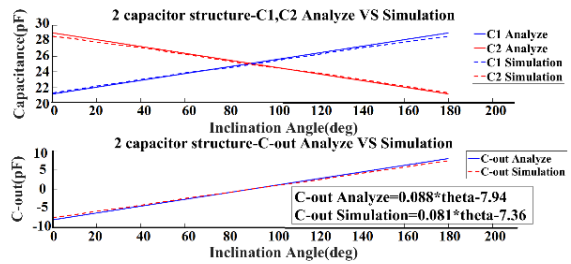
شعاع  $\frac{h}{2}(\tan \beta)$  (h برابر با ارتفاع استوانه) دیگر قادر به اندازه گیری زاویه حول محور X نیستند. به عبارتی مرکز چرخش حول محور افقی (x) به اندازه  $\frac{h}{2}(\tan \beta)$  جا به جا می شود. برای بروز کمترین خطا در خروجی سنسورهای شیب پیشنهاد شده به هنگام وارد شدن شیب حول محور y، باید مقدار رابطه ی  $\frac{h}{2}(\tan \beta)$  به اندازه کافی از شعاع سنسور کوچکتر انتخاب شود. رابطه ی ۲۴ بیانگر این موضوع است.

$$r \gg \frac{h}{2}(\tan \beta) \quad (24)$$

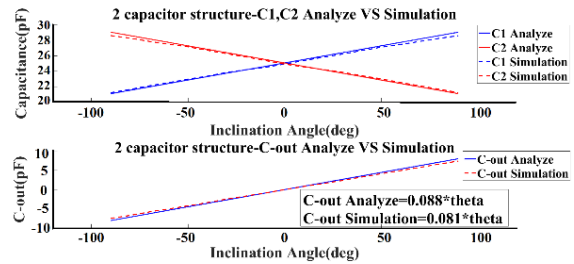
بنابراین هرچه ارتفاع استوانه کمتر باشد میزان تأثیرپذیری سنسورهای محور افقی (x)، از چرخش حول محور y کمتر می شود. قسمت الف و ب شکل ۱۹، به ترتیب خروجی و تابع خطا در ساختار یک و دو خازنی را نشان می دهند.



شکل (۱۸): موقعیت دی الکتریک هنگام اعمال زاویه حول محور y و z به سنسور محور افقی (x)



شکل (۱۶): نتایج حاصل از تحلیل و شبیه سازی ساختار دو خازنی در حالت یک جهت

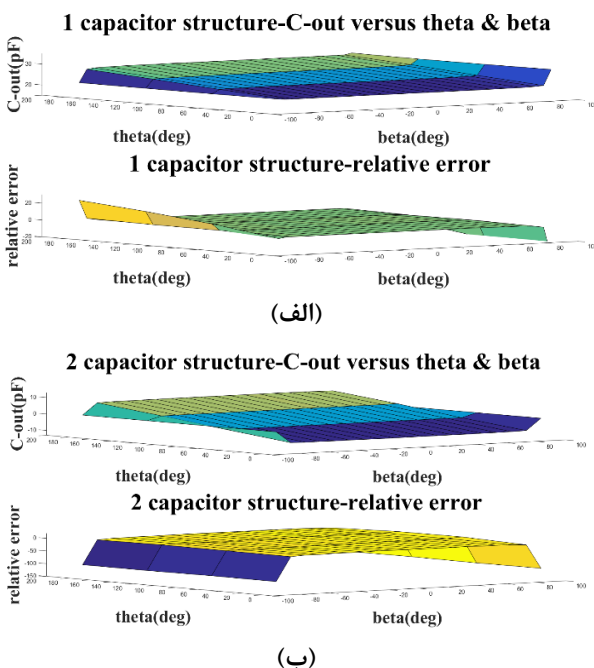


شکل (۱۷): نتایج حاصل از تحلیل و شبیه سازی ساختار دو خازنی در حالت دو جهت

با توجه به مشخصه ی خروجی به دست آمده در شکل های ۱۶ و ۱۷ و استفاده از رابطه ی ۲۳، نتایج بدست آمده برای حساسیت از تحلیل و شبیه سازی به ترتیب برابر با  $88 \text{ fF/deg}$  و  $81 \text{ fF/deg}$  می باشند که نسبت به حالت تک خازنی دو برابر گردیده اند، اما رنج اندازه گیری آن مشابه حالت تک خازنی است ( $0^\circ$  تا  $180^\circ$  یا  $90^\circ$  تا  $+90^\circ$ ). لازم به ذکر است که تغییرات خروجی در تمامی رنج اندازه گیری در این ساختار، به صورت خطی می باشد.

## ۵-۲- حساسیت محورهای متقاطع

زمانی که به دو ساختار، زاویه ای حول محور افقی (x) اعمال شود، خروجی متناسب با زاویه تغییر می کند. شکل ۱۸ موقعیت دی الکتریک هنگام اعمال زاویه حول محور y و z به سنسور را نشان می دهد. اگر به این ساختارها، زاویه ای حول محور z نیز اعمال شود، روغن سیلیکون همچنان افقی باقی می ماند، بنابراین موقعیت خود را نسبت به الکترودها حفظ می کند. در این حالت در ظرفیت خازن ها تغییری ایجاد نمی شود و خروجی ثابت می ماند. حال اگر به این میکروسنسورها حول محور y نیز زاویه ای اعمال شود، در این صورت خروجی دچار خطا می گردد. اگر میزان اثر گذاری زاویه حول محور y روی خروجی اندازه گیری شده حول محور افقی (x) کم باشد، در پاسخ میکروسنسور خلل زیادی ایجاد نمی شود. برای آنکه حساسیت خروجی سنسورهای پیشنهاد شده ی محور افقی (x)، به اعمال زاویه حول محور y اندازه گیری شود، زاویه ی  $\pm \beta$  حول محور y به آن ها اعمال می گردد. در این حالت الکترودهای قرار گرفته درون دایره ای به



شکل (۱۹): خروجی و تابع خطای حاصل از اعمال زاویه به سنسور حول محور y در ساختار، (الف) یک و (ب) دو خازنی

است. در جدول ۲، سنسورهای شیب پیشنهادی با کارهای مشابه مقایسه شده اند.

جدول (۲): مقایسه سنسور شیب با ساختارهای پیشنهادی

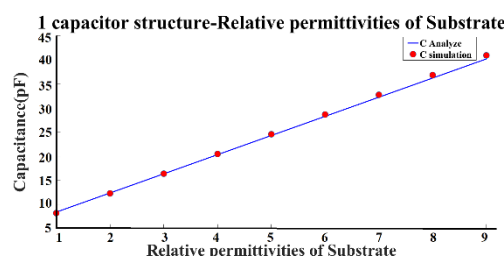
مدل سازی / ساخت	ابعاد mm	رنج اندازه گیری	حساسیت	سنسور شیب
ساخت	۵/۳ × ۲۰ × ۲۰	۰° تا ۹۰° (در بازه ی ۱۰° تا ۱۰° غیرخطی)	-	[۲۵] ۲۰۱۴
ساخت	به طور دقیق در دسترس نیست	۵°- تا ۵°+	mVolt/deg ۹۰	[۲۶] ۲۰۱۵
ساخت	۱۱/۵ × ۳۵ × ۷۵	۸۰°- تا ۸۰°+ (در بازه ی ۵۰°- تا ۵۰°+)	mV/deg ۱۶/۵	[۵] ۲۰۱۶
ساخت	۴۵ × ۲۵ × ۵۵	۳۶۰° تا ۰° به جز چهار بازه ی ۲۰° ± حول ۰°، ۹۰°، ۱۸۰° و ۲۷۰°	-	[۲۷] ۲۰۱۶
مدل سازی	۰/۷ × ۵ × ۵	۱۸۰° تا ۰°+	fF/deg یا ۶/۴۴ fF/deg ۱۲/۸۸	[۲۸] ۲۰۱۶
ساخت	۵/۲ × ۳/۳۴ × ۳/۳۴	۹۰°- تا ۹۰°+	fF/deg یا ۷/۵۸ fF/deg ۷/۶۲	[۹] ۲۰۱۸
مدل سازی	۶/۰۴ × ۶/۰۴ ۵/۲ ×	۹۰°- تا ۹۰°+ یا ۰° تا ۱۸۰°	۴۴ fF/deg	ساختار تک خازنی
مدل سازی	۶/۰۴ × ۶/۰۴ ۵/۲ ×	۹۰°- تا ۹۰°+ یا ۰° تا ۱۸۰°	۸۸ fF/deg	ساختار دو خازنی

## مراجع

- [1] R. Dai, R. B. Stein, B. J. Andrews, K. B. James, and M. Wieler, "Application of tilt sensors in functional electrical stimulation," IEEE Trans. Rehabil. Eng., vol. 4, no. 2, pp. 63–72, 1996.
- [2] E. Li, J. Zhong, B. Li, and H. Chang, "A tilt sensor with a constant sensitivity output in the full measurement range," in Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2017 IEEE 12th International Conference on, 2017, pp. 198–201.
- [3] X. Zou, P. Thiruvengatanathan, and A. A. Seshia, "A high-resolution micro-electro-mechanical resonant tilt sensor," Sensors Actuators A Phys., vol. 220, pp. 168–177, 2014.

## ۳-۵- تأثیر جنس بستر در ظرفیت خازن و حساسیت

همان طور که در رابطه ۳ مشاهده می شود بین ضریب دی الکتریک نسبی بستر و ظرفیت خازن های بین انگشتی رابطه خطی بر قرار است، بنابراین برای بزرگتر کردن ظرفیت خازن های بین انگشتی، می توان از بستری با ضریب دی الکتریک بزرگتر استفاده کرد. در ساختار تک خازنی با افزایش ضریب دی الکتریک بستر، ظرفیت خازن و حساسیت افزایش می یابد. در ساختار دو خازنی به دلیل آنکه حساسیت با اختلاف بین بیشترین و کمترین ظرفیت خازن های ساختار رابطه مستقیم دارد ( $C_{max} - C_{min}$ ) و این ظرفیت ها با تغییر جنس بستر، به یک میزان تغییر می کنند، در نتیجه تغییر در جنس بستر بر روی حساسیت ساختار دو خازنی، بی تأثیر است. در شکل ۲۰، تأثیر ضریب دی الکتریک بستر را بر روی ظرفیت ساختار تک خازنی نشان می دهد.



شکل (۲۰): نتایج حاصل از تحلیل و شبیه سازی ظرفیت ساختار تک خازنی برای ضرایب دی الکتریک متفاوت بستر

## ۶- نتیجه گیری

سنسورهای شیب خازنی در مقایسه با سایر سنسورهای شیب، دارای مزایای بسیاری از قبیل قابلیت اندازه گیری خطی، حساسیت عالی، اصول عملکردی و ساخت آسان و غیره هستند. با افزایش تقاضا برای مجتمع سازی سیستم ها بر روی یک تراشه و نیاز به کوچک سازی سنسور، سنسورهای مبتنی بر خازن های بین انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. در این مقاله سنسورهای شیب پیشنهاد شده، بر اساس خازن های بین انگشتی طراحی شده اند. برای اندازه گیری زاویه حول محور افقی دو ساختار پیشنهاد شد. در ساختار اول از یک خازن بین انگشتی استفاده گردید. در این حالت سنسور دارای رنج اندازه گیری و حساسیت به ترتیب برابر با ۰° تا ۱۸۰° یا ۹۰°+ تا ۹۰°+ و ۴۴ fF/deg می باشد. در ساختار دوم، دو خازن بین انگشتی به کار گرفته شد. این سنسور مشابه ساختار تک خازنی دارای رنج اندازه گیری ۰° تا ۱۸۰° یا ۹۰°+ تا ۹۰°+ است ولی حساسیت آن دو برابر ساختار تک خازنی بوده و برابر با ۸۸ fF/deg می باشد. سنسورهای ارائه شده، می توانند به صورت یک و دو جهته به کار گرفته شوند که در حالت دو جهته با توجه به خروجی، جهت زاویه ای اعمالی به سنسور قابل تعیین



- [18] M. R. R. Khan, A. Khalilian, and S.-W. Kang, "A high sensitivity IDC-electronic tongue using dielectric/sensing membranes with solvatochromic dyes," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 668, 2016.
- [19] S. M. Radke and E. C. Alocilja, "Design and fabrication of a microimpedance biosensor for bacterial detection," *IEEE Sens. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 434–440, 2004.
- [20] Y. Liu, Y. Huang, R. Tang, and B. Wang, "Application of interdigital capacitive sensors for detecting power cable insulation damage," in *Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2015 IEEE International Conference on, 2015, pp. 1795–1799.
- [21] A. Guadarrama-Santana, A. García-Valenzuela, F. Pérez-Jiménez, and L. Polo-Parada, "Interdigitated capacitance sensors in the mm scale with sub-femtoFarad resolution suitable for monitoring processes in liquid films," *Rev. Mex. física*, vol. 60, no. 6, pp. 451–459, 2014.
- [22] Y. Kim, B. Jung, H. Lee, H. Kim, K. Lee, and H. Park, "Capacitive humidity sensor design based on anodic aluminum oxide," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 141, no. 2, pp. 441–446, 2009.
- [23] W. H. Grover, "Interdigitated Array Electrode Sensors: Their Design, Efficiency, and Applications," 1999.
- [24] J. Guo, P. Hu, and J. Tan, "Analysis of a segmented annular coplanar capacitive tilt sensor with increased sensitivity," *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 133, 2016.
- [25] C. H. Lee and S. S. Lee, "Study of capacitive tilt sensor with metallic ball," *ETRI J.*, vol. 36, no. 3, pp. 361–366, 2014.
- [26] P. Hu, J. Guo, and J. Tan, "An Annular Planar-Capacitive Tilt Sensor with a 360° Measurement Range," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 4, pp. 2469–2476, 2016.
- [27] B. Yao, L. Feng, X. Wang, W. Liu, and H. Jiao, "Micro-grating tilt sensor with self-calibration and direct intensity modulation," *Opt. J. Light Electron Opt.*, vol. 126, no. 1, pp. 144–147, 2015.
- [28] F. Mir and M. Mehran, "Design, analysis and simulation of a novel linear capacitive tilt micro-sensor," *Microsyst. Technol.*, vol. 22, no. 9, pp. 2159–2165, 2016.
- [4] Q. Han and C. Chen, "Research on tilt sensor technology," in *Knowledge Acquisition and Modeling Workshop*, 2008. KAM Workshop 2008. IEEE International Symposium on, 2008, pp. 786–789.
- [5] T. D. Dinh et al., "Two-axis tilt angle detection based on dielectric liquid capacitive sensor," in *SENSORS*, 2016 IEEE, 2016, pp. 1–3.
- [6] B. Arnold, D. Wohlrab, C. Meinecke, D. Reuter, and J. Mehner, "Design, Manufacturing and Test of a High-Precision MEMS Inclination Sensor for Navigation Systems in Robot-Assisted Surgery," *Int. J. Biomed. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2018.
- [7] L. Zhao and E. M. Yeatman, "Micro capacitive tilt sensor for human body movement detection," in *4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2007)*, 2007, pp. 195–200.
- [8] S. Su, D. Li, N. Tan, and G. Li, "The study of a novel tilt sensor using magnetic fluid and its detection mechanism," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 15, pp. 4708–4715, 2017.

[۹] مینو لیبیی، طراحی میکروسنسور خازنی شیب، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۶

- [10] P. M. Moubarak and P. Ben-Tzvi, "Design and analysis of a new piezoelectric MEMS tilt sensor," in *2011 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, 2011, pp. 83–88.
- [11] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, and M. Zahn, "Interdigital sensors and transducers," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 5, pp. 808–845, 2004.
- [12] D. L. Fuller, "Microelectromechanical Systems (MEMS) Applications—Microphones," *Rochester Inst. Technol. Microelectron. Eng.*, pp. 1–43, 2005.
- [13] N. ZORIC, A. IAVORSCHI, M. SIRETEANU, G. VIZITEU, and R. CIOBANU, "DESIGN AND SIMULATIONS OF IDC SENSOR USING COMSOL MULTYPHYSICS AND DIELECTRIC SPECTROSCOPY OF LTCC SPECTROSCOPY OF LTCC MATERIALS MATERIALS MATERIALS."
- [14] K. Chetpattananondh, T. Tapoanoi, P. Phukpattaranont, and N. Jindapetch, "A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 209, pp. 175–182, 2014.
- [15] N. Angkawisittpan and T. Manasri, "Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor," *Meas. Sci. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 8–13, 2012.
- [16] E. W. Weisstein, "Elliptic integral of the first kind," 2002.
- [17] Q. Tan et al., "A novel interdigital capacitor pressure sensor based on LTCC technology," *J. Sensors*, vol. 2014, 2014.

#### زیر نویس

<sup>1</sup> Interdigital capacitor