

## **A High-Resolution Active Microwave Sensor for Contactless Pressure Measurement**

**A. Keyvanlou, M. Rezaei\***

\* Assistant Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

(Received: 28/08/2021; Accepted: 01/12/2021)

### **Abstract**

*In this paper, an active contactless microwave pressure sensor with high-quality factor for harsh environment applications are presented. The proposed sensor operates at 1.2GHz and consists of two parts of a reader antenna and a passive Split Ring Resonator (SRR). A movable pad is located above the resonator by considering an air gap between them and this gap is decreased when external pressure is applied. By decreasing the gap, the resonant frequency of SRR is decreased. The resonant frequency of SRR is measured by using the insertion loss scattering parameter through the reader part, wirelessly. To improve the resolution, the sensor's quality factor is enhanced by using an active circuit with a positive feedback design in the reader part. Therefore, the quality factor of the passive sensor is increased from 73.91 to 3268 by using the active sensor. The sensitivity of the sensor is 70MHz/mm in both passive and active sensors. The proposed sensor is simulated and studied using CST and ADS software.*

**Keywords:** Wireless pressure sensor, Microwave sensor, Active sensor, Quality factor.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

© Authors



---

\* Corresponding author E-mail: Morteza.rezaee@hsu.ac.ir

## یک حسگر مایکروویوی فعال برای اندازه‌گیری فشار بدون نیاز به اتصال فیزیکی و با قدرت تفکیک بالا

علی کیوانلو<sup>۱</sup>، مرتضی رضائی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۰)

### چکیده

در این مقاله یک حسگر فعال مایکروویوی بدون نیاز به اتصال فیزیکی با ضریب کیفیت بالا برای اندازه‌گیری فشار در محیط‌های سخت ارائه شده است. فرکانس کاری این حسگر 1.2GHz بوده و ساختار آن از دو بخش قرائت‌گر و تشدیدکننده SRR تشکیل شده است. در طراحی انجام شده روی تشدیدکننده یک پد متحرک قرار داده شده است که با جابه‌جایی آن تحت اعمال فشار، فرکانس تشدید SRR تغییر خواهد یافت. این فرکانس، با استفاده از پارامتر پراکندگی تلفات تعبیه از طریق بخش قرائت‌گر اندازه‌گیری می‌گردد. به‌منظور بهبود قدرت تفکیک، ضریب کیفیت حسگر با استفاده از یک مدار فعال با فیدبک مثبت در بخش قرائت‌گر افزایش داده شده است. بدین ترتیب ضریب کیفیت حسگر غیرفعال از ۷۳/۹۱ به ۳۲۶۸ در حسگر فعال بهبود یافته است. میزان حساسیت حسگر نیز در هر دو مدل غیرفعال و فعال، ۷۰MHz/mm می‌باشد. حسگر پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزارهای CST و ADS مورد شبیه‌سازی و بررسی قرار گرفته است.

### کلیدواژه‌ها: حسگر فشار، حسگر مایکروویوی، حسگر فعال، ضریب کیفیت

#### ۱- مقدمه

این حسگرها شکننده‌اند و به علت محدودیت‌های عملیاتی، قابلیت کاربردی در برخی از محیط‌ها را ندارند [۸ و ۹]. در سال‌های اخیر، حسگرهای مایکروویوی برای سنجش فشار در محیط‌های سخت مورد توجه قرار گرفته‌اند. این حسگرها مزایای مختلفی مانند ارزان بودن، سنجش بی‌سیم، پاسخ دقیق و بلندنگ و عدم نیاز به منبع تغذیه یا سایر اتصالات را دارا می‌باشند. یکی از روش‌های پیاده‌سازی این حسگرهای بی‌سیم مایکروویوی، استفاده فناوری گرمادهی سرامیک در دمای پایین<sup>۲</sup> و گرمادهی سرامیک در دمای بالا<sup>۳</sup> است. این روش دارای مزایایی همچون ایجاد ساختارهای سه‌بعدی دارای حفره داخلی، قابلیت تحمل دماهای بالا و خصوصیات خوب الکتریکی و مکانیکی است. در مرجع [۱۰ و ۱۱] با استفاده از این فناوری ساخت، حسگر فشار مایکروویوی مبتنی بر تشدیدکننده داخلی<sup>۴</sup> ارائه شده است. ساختار این حسگر از یک آنتن شکاف‌دار و تشدیدکننده داخلی تشکیل شده است. در این طرح، ارتباط بی‌سیم بین حسگر و قرائت‌گر به علت وجود روزنه کوپلینگ<sup>۵</sup> که روی تشدیدکننده قرار دارد، امکان‌پذیر است. در نتیجه با کمک پارامترهای پراکندگی میزان فشار اعمالی بر حسگر به صورت مایکروویوی قابل‌سنجش است. در [۱۲ و ۱۳] حسگر فشار با استفاده از تشدیدکننده LC و فناوری ساخت LTCC و HTCC ارائه شده است. در این حسگر از سیم‌پیچ صفحه‌ای برای ایجاد بخش سلفی استفاده شده و بخش خازنی هم توسط دو صفحه موازی مربعی

در سال‌های اخیر ورود گسترده فناوری‌های دیجیتال به صنایع و همچنین پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه الکترونیک منجر به توسعه اتوماسیون صنعتی و اینترنت اشیا شده است [۱] و حسگرها، از مهم‌ترین ابزارها در این سیستم‌ها می‌باشند. یکی از پرکاربردترین حسگرها، حسگر فشار است که نقشی کلیدی در سیستم‌های نظارتی و کنترلی دارد. استفاده از حسگرهای فشار در محیط‌های سخت<sup>۱</sup> که عواملی همچون رطوبت بالا، خوردگی و دمای بالا در یک فضای بسته وجود دارد، حیاتی است. از جمله این محیط‌ها می‌توان به صنایع هوافضا، نیروگاه‌های تولید انرژی، صنایع نفت و گاز و صنایع معدنی اشاره کرد [۲-۵].

اکثر حسگرهای فشار متداول بر پایه نیمه‌هادی سیلیکونی ساخته می‌شوند و با توجه به ویژگی‌های اتصال P-N در آن‌ها، گستره دمای کاری این حسگرها به حدود ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد محدود می‌گردد و در نتیجه استفاده از این حسگرها در محیط‌های سخت، ممکن نیست [۶ و ۷]. همچنین این حسگرها برای انتقال داده‌های سنجش شده به پردازنده به اتصالات فیزیکی مانند سیم نیاز دارند که این موضوع کاربردی این حسگرها را برای محیط‌هایی که دارای اجزای متحرک هستند، ناممکن می‌سازد. راه‌حل دیگری که برای اندازه‌گیری فشار در دماهای بالا مطرح شده است، استفاده از حسگرهای مبتنی بر فیبر نوری است. این حسگرها قابلیت تحمل دمای بالا را دارند و همچنین مصون از تداخل‌های الکترومغناطیسی می‌باشند. با وجود مزایای ذکر شده،

<sup>۲</sup> Low-Temperature Co-fired Ceramic (LTCC)

<sup>۳</sup> High-Temperature Co-fired Ceramic (HTCC)

<sup>۴</sup> Re-entrant resonator

<sup>۵</sup> Coupling aperture

\* رایانامه نویسنده مسئول: Morteza.rezaee@hsu.ac.ir

<sup>۱</sup> Harsh environment



کیفیت بالا برای تشخیص ضریب گذردهی الکتریکی مایعات ارائه شده است که در آن از حلقه فیدبک مثبت به منظور افزایش ضریب کیفیت استفاده شده است. در این روش، حلقه فیدبک شیفت فرکانسی به میزان ۱۸۰ درجه را در خروجی خود تولید می‌کند و یک شیفت فرکانسی ۱۸۰ درجه‌ای دیگر توسط تشدیدکننده غیرفعال ایجاد می‌شود. در نتیجه یک فیدبک مثبت سازنده در اطراف تشدیدکننده به وجود آمده که تلفات قسمت غیرفعال مدار را جبران کرده و سبب افزایش ضریب کیفیت می‌شود. در [۳۰] از این روش برای بهبود ضریب کیفیت در حسگر سنجش PH کمک گرفته شده است. راهکار مشابهی مبتنی بر استفاده از مقاومت منفی برای افزایش ضریب کیفیت در حسگرهای تشخیص مایعات پیشنهاد شده است [۳۱]. در این طرح از عنصر فعال به منظور ایجاد مقاومت منفی استفاده شده که تلفات الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط تشدیدکننده را جبران می‌کند. در مرجع [۳۲] یک حسگر تشخیص مواد با ضریب کیفیت بالا با استفاده از تکنیک قفل‌شدگی تزریق<sup>۴</sup>، پیشنهاد شده است. روش دیگر افزایش قدرت تفکیک حسگرهای مایکروویوی استفاده از عنصر فعال با نقش یک نوسان‌ساز می‌باشد که در مرجع [۳۳] برای یک حسگر تشخیص مایعات پیشنهاد شده است.

در این مقاله یک حسگر فشار فعال با ضریب کیفیت بالا طراحی و شبیه‌سازی شده است. به منظور افزایش ضریب کیفیت، از یک حلقه فیدبک و عنصر فعال استفاده شده که این کار موجب افزایش پارامترهایی مانند ضریب کیفیت و قدرت تفکیک حسگر می‌شود. برای مدل‌سازی فشار، ارتفاع حفره موجود در بخش تگ حسگر تغییر پیدا کرده که این امر منجر به تغییر ظرفیت خازنی ساختار تگ حسگر می‌شود. در نتیجه با تغییر فرکانس تشدید، میزان فشار اعمال شده با استفاده از اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی و میزان شیفت فرکانسی قابل محاسبه است. در ادامه مقاله، روند طراحی حسگر مورد بحث قرار می‌گیرد و در پایان نیز نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

## ۲- طراحی حسگر

### ۲-۱- ساختار اولیه حسگر

شکل (۱ الف) ساختار اولیه حسگر فشار پیشنهادی را نشان می‌دهد که متشکل از قرائت‌گر و تگ حسگر می‌باشد. بخش قرائت‌گر دارای دو خط انتقال ریزنوازی انتها باز می‌باشد که توسط دو پورت تحریک می‌گردد. تشدیدکننده مورد استفاده در بخش تگ حسگر از نوع SRR بوده که دارای ضریب کیفیت بالایی است. برای کمتر شدن حساسیت اندازه‌گیری‌ها به فاصله بین تگ حسگر و مدار قرائت‌گر، از یک بازوی اضافی در ساختار تشدیدکننده

ایجاد شده است. این دو بخش توسط مسیر فلزی<sup>۱</sup> به یکدیگر متصل شده‌اند و در کنار هم تشدیدکننده LC حسگر را ایجاد می‌کنند. با اعمال فشار، خازن معادل ساختار تغییر پیدا می‌کند که نتیجه آن عوض شدن فرکانس تشدید حسگر است. در نتیجه با توجه به جابه‌جایی نمودار پاسخ فرکانسی حسگر، میزان فشار اعمالی به صورت بی‌سیم قابل اندازه‌گیری می‌باشد. نمونه‌های مشابهی از حسگر فشار مایکروویوی با کاربری دمای بالا که در ساختار آن از تشدیدکننده LC استفاده شده، در مراجع [۱۷]-[۱۴] ارائه شده است. در [۱۸] یک حسگر تشخیص هم‌زمان فشار و دما با قابلیت کاربری در محیط‌های سخت ارائه شده که در ساختار این حسگر، دو مدار تشدیدکننده LC قرار داده شده است. در این حسگر یکی از تشدیدکننده‌ها حساس به تغییرات فشار و دیگری حساس به تغییرات دما می‌باشد. همچنین در مرجع [۱۹] نیز یک حسگر دومنظوره برای اندازه‌گیری هم‌زمان پارامترهای فشار و رطوبت پیشنهاد شده است. تفاوت اصلی این حسگر با سایر حسگرهای دومنظوره مایکروویوی در استفاده از یک تشدیدکننده LC برای سنجش هر دو پارامتر می‌باشد. در [۲۰] طراحی و ساخت حسگر فشار خازنی بی‌سیم با آنتن تراشه-ای RF پیشنهاد شده است. این حسگر متشکل از یک مدار نوسان‌ساز است که فرکانس سیگنال خروجی آن متناسب با خازن حساس بر فشار است. یکی دیگر از روش‌های طراحی حسگرهای مایکروویوی استفاده از فراماده می‌باشد. مهم‌ترین ارجحیت استفاده از این ساختار، ابعاد نهایی بسیار کوچک حسگر نهایی است [۲۱]. قسمت اصلی حسگرهای مایکروویوی مبتنی بر فراماده را ساختارهای تشدیدکننده حلقه-جدا<sup>۲</sup> و تشدیدکننده مکمل حلقه-جدا<sup>۳</sup> تشکیل می‌دهند. در مرجع [۲۲] از ساختار CSRR برای ایجاد یک حسگر مایکروویوی تشخیص ضریب گذردهی الکتریکی مایعات استفاده گردیده است. از ساختار SRR برای پیاده‌سازی گستره‌ای از حسگرهای مایکروویوی مانند تشخیص‌دهنده مواد [۲۳]، سرعت [۲۴]، ضخامت [۲۵] و زاویه [۲۶] نیز استفاده شده است.

به طور کلی یکی از مشکلات حسگرهای مایکروویوی غیرفعال، ضریب کیفیت پایین آن‌ها می‌باشد. بنا به تعریف، ضریب کیفیت برابر با نسبت فرکانس تشدید به پهنای باند 3dB آن می‌باشد. در حسگرهای مایکروویوی ضریب کیفیت تأثیر مستقیمی روی پارامترهایی مانند قدرت تفکیک، حساسیت و حداقل سیگنال قابل تشخیص دارد. یک راه‌حل برای افزایش ضریب کیفیت حسگرها، استفاده از مدارات فعال در ساختار آن‌ها می‌باشد. در مراجع [۲۷-۲۹] حسگر غیر تماسی فعال با ضریب

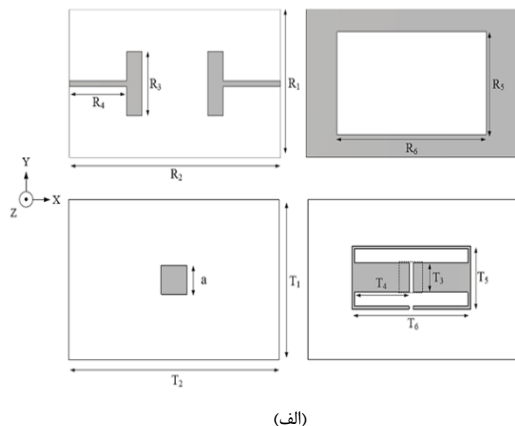
<sup>1</sup> Via

<sup>2</sup> Split Ring Resonator (SRR)

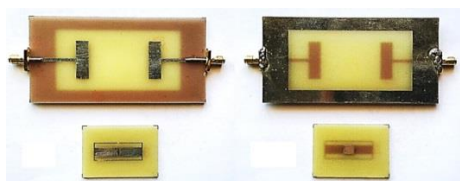
<sup>3</sup> Complimentary Split Ring Resonator (CSRR)

<sup>4</sup> Injection Locking

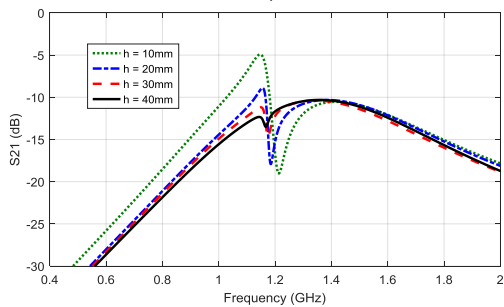
شرایط ولتاژ کم - جریان کم، اشاره کرد. طراحی حلقه فیدبک هم براساس مشخصات ترانزیستور و فرکانس کاری حسگر پیشنهادی، صورت گرفته است. ابعاد هندسی حسگر در جدول (۱) لیست شده است. باید توجه داشت که به دلیل قرارگیری ترانزیستور بر روی بخش قرائت‌گر و عدم اتصال فیزیکی آن با تگ حسگر که در معرض دمای بالا قرار دارد، در عمل مشکلی برای عملکرد ترانزیستور به وجود نخواهد آمد.



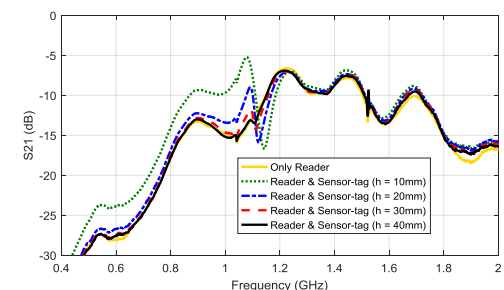
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱). (الف) نمای بالایی و پایینی بخش قرائت‌گر، تگ حسگر و (ب) ساختار ساخته شده. (ج) پاسخ فرکانسی حسگر فشار به‌ازای تغییرات فاصله بین قرائت‌گر و تگ حسگر. (د) پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده حسگر در فواصل مختلف

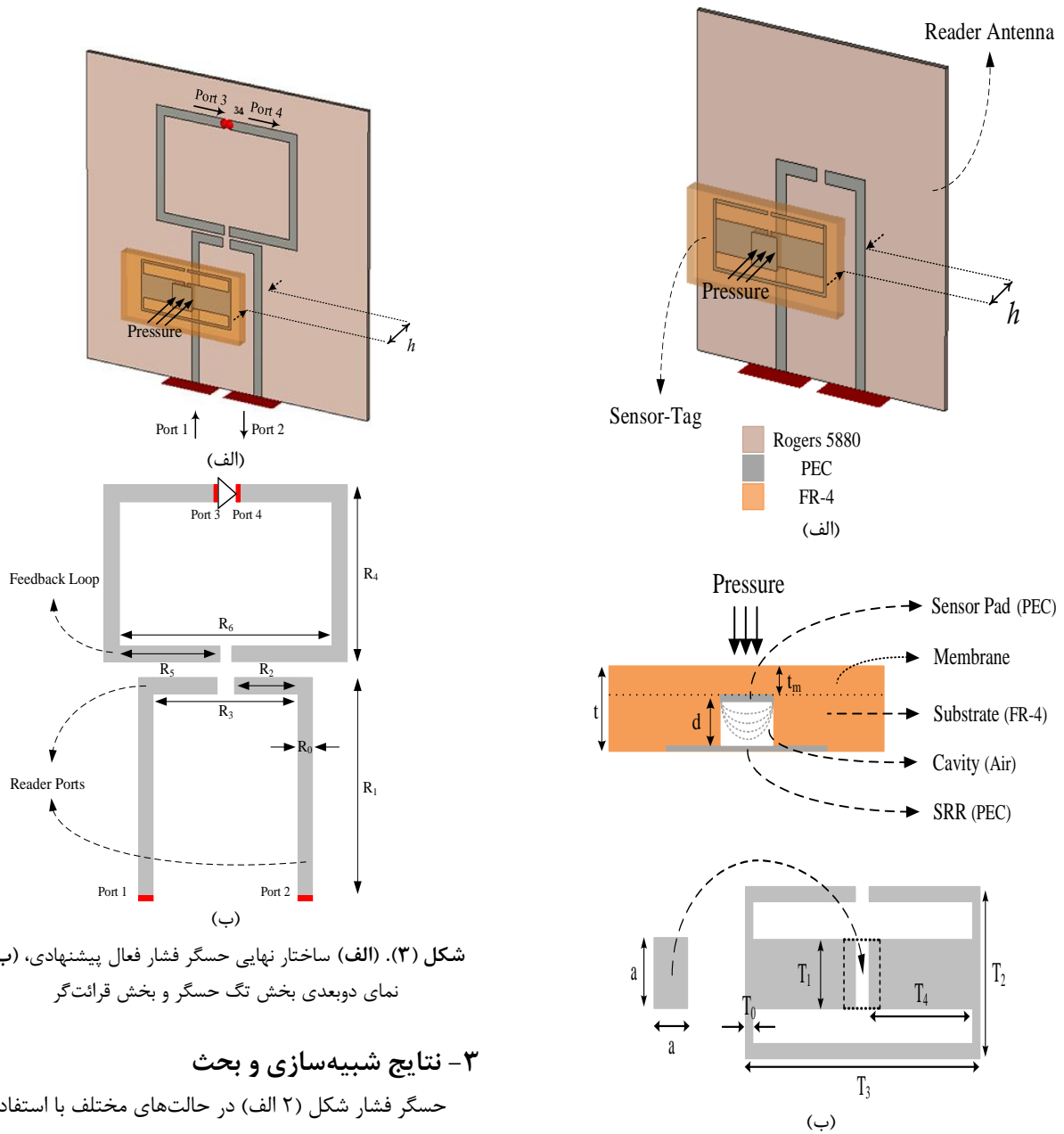
استفاده شده است [۳۴]. یک پد خازنی مربعی شکل نیز در بالای دو بخش انتهایی تشدیدکننده استفاده شده است که تغییر مکان آن منجر به تغییر ظرفیت خازنی معادل تشدیدکننده شده و فرکانس تشدید حسگر را تغییر خواهد داد.

برای راستی‌آزمایی و اطمینان از روند شبیه‌سازی، تشدیدکننده حسگر و تگ حسگر روی دو طرف یک زیرلایه با دی‌الکتریک FR4 در نظر گرفته شده است (شکل ۱ ب). نتایج شبیه‌سازی تمام موج پاسخ فرکانسی حسگر به‌ازای مقادیر مختلف فاصله بین تشدیدکننده و تگ حسگر ( $h$ ) در شکل (۱ ج) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود فرکانس تشدید در فرکانس 1.1GHz ایجاد شده است و با افزایش فاصله، دامنه نمودار کاهش می‌یابد. نتایج اندازه‌گیری حسگر با استفاده از VNA نیز رفتار نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهد (شکل ۱ د). ریبیل‌های مازادی که در پاسخ فرکانسی دیده می‌شود ناشی از عدم تطبیق امپدانس و موج ایستادن ایجاد شده در کابل کواکسیال اندازه‌گیری می‌باشد. این ریبیل‌ها با تغییر فاصله بین تگ حسگر و قرائت‌گر تغییر چندانی ندارند. در عمل با کم کردن طول کابل‌ها این مشکل ذاتی قابل رفع است.

## ۲-۲- بهبود ساختار حسگر

شکل (۲ الف) ساختار حسگر فشار پیشنهادی را نشان می‌دهد که متشکل از قرائت‌گر و تگ حسگر می‌باشد که در فاصله  $h=5\text{mm}$  از یکدیگر قرار گرفته است. به علت هدف‌گذاری انجام شده برای کاربری حسگر در محیط‌های سخت، ماده پایه مورد استفاده برای تشدیدکننده می‌بایست به‌گونه‌ای باشد که در مقابل افزایش حرارت محیط، ساختار فیزیکی خود را حفظ نماید. عموماً جنس ماده پایه از نوع مواد پلیمری با ضریب گرمایی بالا انتخاب می‌شود به‌گونه‌ای که دارای تلفات دی‌الکتریک پایینی نیز باشند. در اینجا برای طراحی اولیه از FR-4 به‌عنوان ماده پایه استفاده شده است. برای ساخت این حسگر نیز می‌توان از روش‌های پیاده‌سازی مراجع [۱۰ و ۱۱] الگوبرداری کرد. این ساختار که در شکل (۲ ب) نشان داده شده است دارای یک حفره هوایی به ابعاد متناظر با پد واقع شده روی بخش انتهایی تشدیدکننده می‌باشد. محل قرارگیری پد متحرک در حالت پیش‌فرض که فشاری بر حسگر وارد نمی‌شود،  $d=2\text{mm}$  بالاتر از مرکز تشدیدکننده در نظر گرفته شده است و این فاصله با فرض اعمال فشار کمتر می‌شود.

در ادامه از یک تقویت‌کننده به همراه یک حلقه برای ایجاد فیدبک مثبت با هدف افزایش ضریب کیفیت استفاده می‌شود. ساختار نهایی حسگر فعال پیشنهادی در شکل (۳ الف) نشان داده شده است که در آن از ترانزیستور NE66204 با آرایش امیتر مشترک به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است. از ویژگی‌های این ترانزیستور می‌توان به عدد نویز پایین و عملکرد خوب آن در



شکل (۳). (الف) ساختار نهایی حسگر فشار فعال پیشنهادی، (ب) نمای دوبعدی بخش تگ حسگر و بخش قرائت‌گر

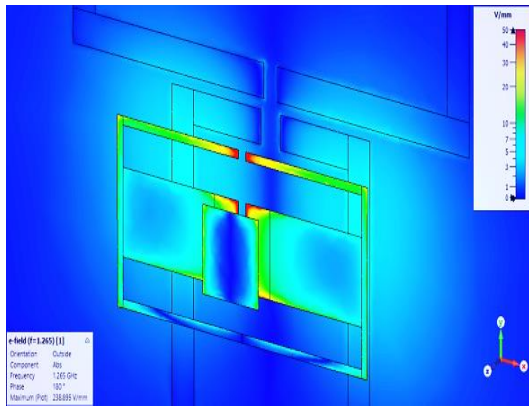
### ۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

حسگر فشار شکل (۲ الف) در حالت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار CST شبیه‌سازی و نتایج مربوط به پاسخ فرکانسی انتقال ساختار با در نظر گرفتن فاصله بین قرائت‌گر و تگ حسگر  $h=5\text{mm}$  در شکل (۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، دو خط انتقال متصل به پورت‌ها در حالتی که بخش تگ حسگر و حلقه فیدبک وجود نداشته باشد با یکدیگر تزویجی ندارند. به عبارت دیگر در نمودار  $S_{21}$  متناظر با این حالت، هیچ پیک فرکانسی دیده نمی‌شود. با این حال، اضافه شدن ساختار تگ حسگر به بخش قرائت‌گر موجب به وجود آمدن یک پیک فرکانسی در فرکانس 1.2 GHz خواهد شد. در واقع در این حالت، مسیر عبور سیگنال از طریق تشدیدکننده واقع در تگ حسگر ایجاد می‌گردد. همچنین با توجه به نمودار، اضافه شدن حلقه فیدبک به بخش قرائت‌گر، تأثیری را روی پاسخ فرکانسی حسگر ندارد.

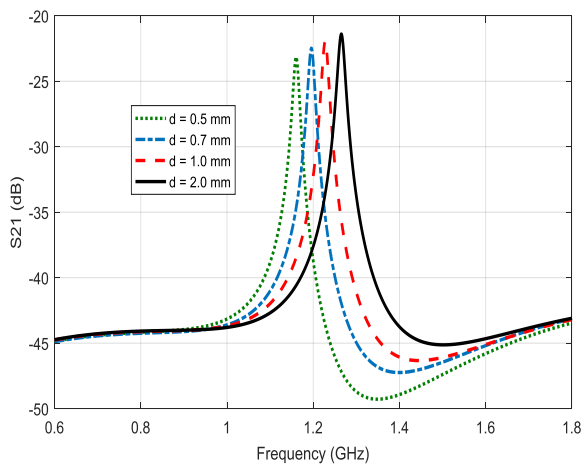
شکل (۲). (الف) ساختار اولیه حسگر فشار غیرفعال پیشنهادی، (ب) نمای دوبعدی بخش تگ حسگر و تشدیدکننده SRR

جدول (۱). ابعاد متغیرهای حسگر طراحی شده

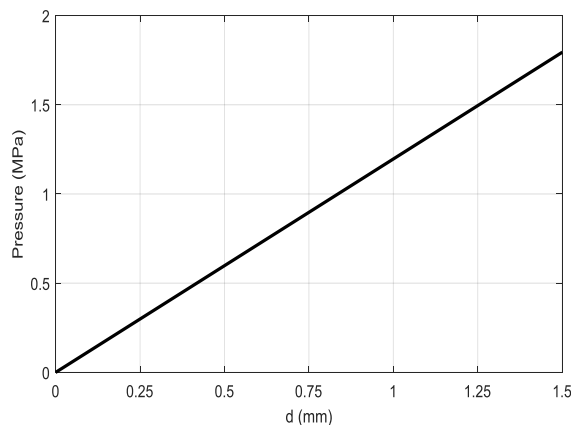
متغیر طراحی	ابعاد (mm)	متغیر طراحی	ابعاد (mm)
$R_0$	۲/۲	$a$	۶
$R_1$	۳۵/۶	$T_0$	۰/۵۶
$R_2$	۹	$T_1$	۶
$R_3$	۲۰	$T_2$	۱۲
$R_4$	۲۵	$T_3$	۲۵
$R_5$	۱۷/۸	$T_4$	۱۱/۵
$R_6$	۳۷	$d$	۲
$t_m$	۰/۱	$t$	۲/۱



شکل (۵). توزیع میدان الکتریکی در فرکانس تشدید



شکل (۶). پاسخ فرکانسی حسگر فشار غیرفعال به‌ازای تغییرات ارتفاع پد متحرک



شکل (۷). نمودار میزان انحراف پد متحرک به‌ازای اعمال فشار

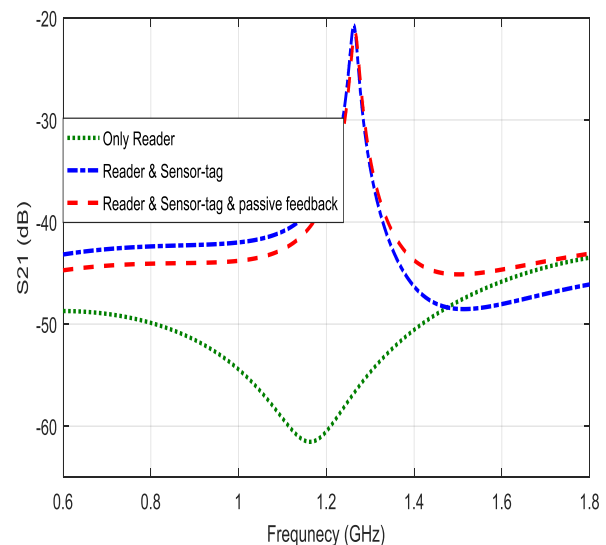
برای بررسی عملکرد حسگر فعال، نتایج تحلیل تمام موج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار CST به نرم‌افزار ADS منتقل شده و شبیه‌سازی نهایی حسگر فشار فعال با نرم‌افزار ADS انجام می‌گیرد (مطابق شکل ۸). نتایج شبیه‌سازی حسگر فعال تحت تغییر ارتفاع پد متحرک در شکل (۹) نشان داده شده است. باتوجه‌به شکل، میزان افزایش ضریب کیفیت در حالت‌های مختلف ارتفاع

شکل (۵) توزیع میدان الکتریکی در حسگر فشار غیرفعال را در فرکانس تشدید حسگر نشان می‌دهد که نمایانگر تمرکز میدان الکتریکی در بخش انتهایی تشدیدکننده SRR که پد حسگر در آنجا قرار دارد، می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، باتوجه‌به تمرکز میدان در محل پد و در صورتی که پد در اثر فشار جابه‌جا شود، فرکانس تشدید حسگر نیز شیف‌ت پیدا خواهد کرد و با اندازه‌گیری فرکانس متناظر با پیک نمودار پاسخ فرکانسی می‌توان میزان فشار اعمالی را اندازه‌گیری نمود. شکل (۶) پاسخ فرکانسی حسگر فشار غیرفعال را تحت تغییر ارتفاع پد متحرک نشان می‌دهد. طبق نمودار با کاهش ارتفاع پد متحرک که متناظر با افزایش فشار اعمالی بر حسگر می‌باشد، فرکانس تشدید حسگر به علت افزایش خازن معادل بخش تگ حسگر، کاهش می‌یابد. در این حالت میزان حساسیت حسگر پیشنهادی،  $70 \text{ MHz/mm}$  می‌باشد و همچنین ضریب کیفیت آن  $73/91$  است.

همچنین مقدار انحراف پد متحرک ( $d$ ) بر حسب میلی‌متر، رابطه مستقیمی با فشار اعمالی بر حسگر دارد که طبق رابطه زیر قابل محاسبه است [۳۵].

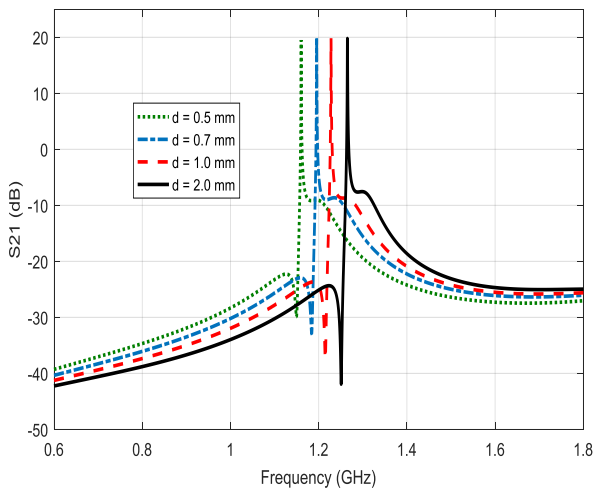
$$d = 0.01512 \frac{Pa^4 (1 - \nu^2)}{Et_m^3} \quad (1)$$

که  $P$ ،  $E$  و  $\nu$  به ترتیب میزان فشار اعمالی بر حسب مگاپاسکال، مدول یانگ ماده پایه بر حسب GPa و نسبت پواسون بوده که مقدار آن‌ها برای زیرلایه FR-4،  $21/6 \text{ GPa}$  و  $0/28$  می‌باشد. ضخامت لایه حساس به فشار و طول حفره هوایی نیز بر حسب متر برابر با  $t_m$  و  $a$  نشان داده شده‌اند. شکل ۷ نمودار میزان فشار اعمالی و مقدار انحراف پد متحرک را نشان می‌دهد.

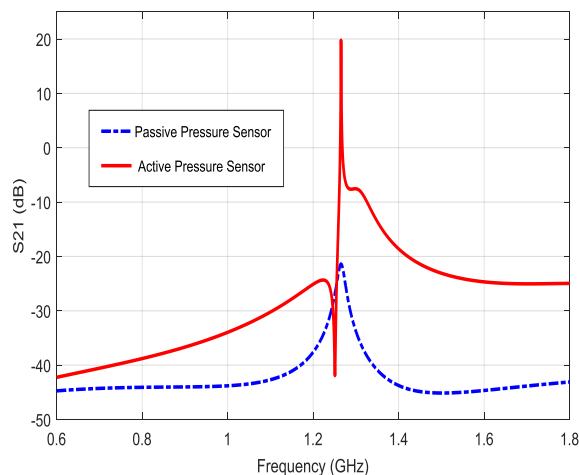


شکل (۸). نمودار پاسخ فرکانسی حسگر غیرفعال در حالت‌های مختلف

تنظیم می‌شود تا سطح توان خروجی در همه حالت‌ها یکسان گردد. در شکل (۱۰) پاسخ فرکانسی حسگر فشار فعال تحت تغییرات ارتفاع پد متحرک و با استفاده از اصلاح بهره تقویت-کننده، نمایش داده شده است. ضریب کیفیت حسگر فشار فعال در این حالت به ۳۲۶۸ افزایش یافته و میزان حساسیت آن مشابه حسگر غیرفعال می‌باشد. همچنین دامنه پاسخ فرکانسی در فرکانس تشدید از -20dB به +20dB افزایش یافته است. مقایسه بین پاسخ فرکانسی حسگر در حالت فعال و غیرفعال در شکل (۱۱) نشان داده شده است. تغییرات فرکانس تشدید حسگر فعال بر حسب جابه‌جایی ارتفاع پد متحرک نسبت به تشدیدکننده، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تغییر ارتفاع پد متحرک در بازه ۰/۶ mm تا ۱/۵ mm باعث افزایش فرکانس تشدید به صورت خطی می‌شود که معادله تقریبی آن به صورت  $f_{r,GHz} = 0.0744d + 1.147$  است (با ضریب تعیین  $R^2=0.96$  که نزدیک به یک است) و نمایانگر میزان حساسیت ۷۰ MHz/mm حسگر می‌باشد.

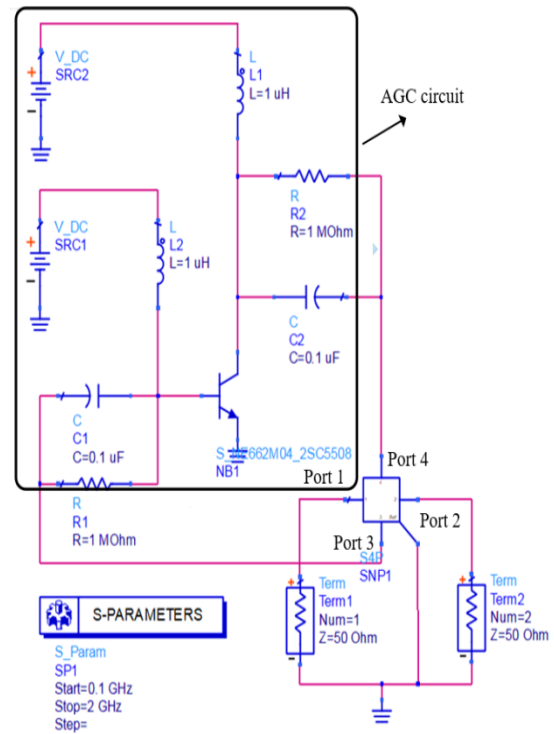


شکل (۱۰). پاسخ فرکانسی حسگر فشار فعال به‌ازای تغییرات ارتفاع پد متحرک با استفاده از AGC

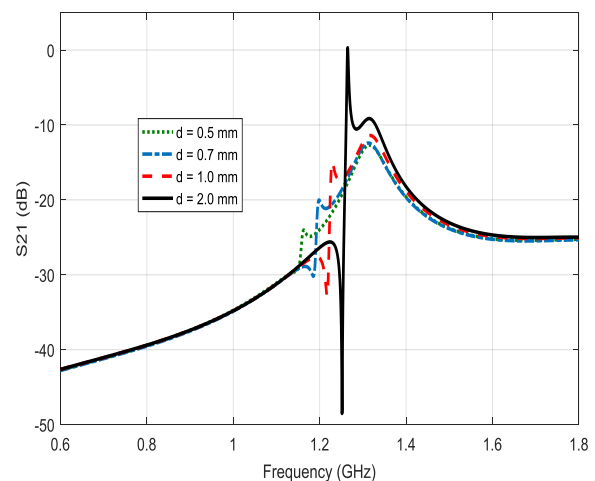


شکل (۱۱). مقایسه پاسخ فرکانسی حسگر فشار در دو غیرفعال و فعال

پد، متفاوت است. این مسئله از شیفت فرکانسی نسبتاً زیاد متناظر با مقادیر مختلف  $d$  نسبت به فرکانس مرکزی ناشی می‌شود. به عبارت دیگر حساسیت بالای حسگر سبب شده تا اندازه قدرت سیگنال خروجی در حالت‌های مختلف حسگر فعال متفاوت باشد که نتیجه آن نداشتن یک ضریب کیفیت ثابت است.



شکل (۸). شماتیک مدار فعال در نرم‌افزار ADS

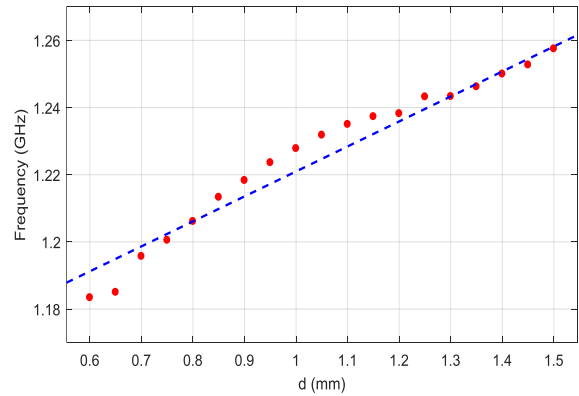
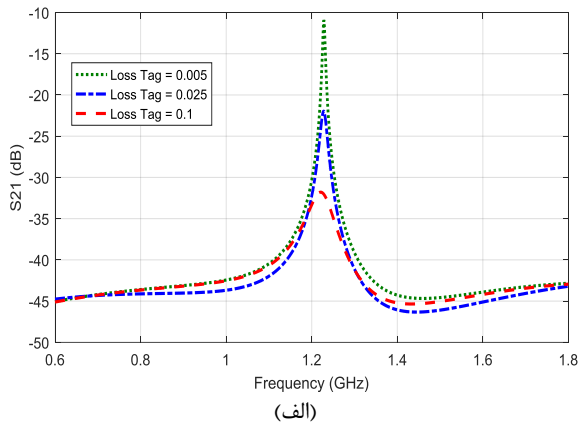


شکل (۹). پاسخ فرکانسی حسگر فشار فعال به‌ازای تغییرات ارتفاع پد متحرک بدون استفاده از AGC

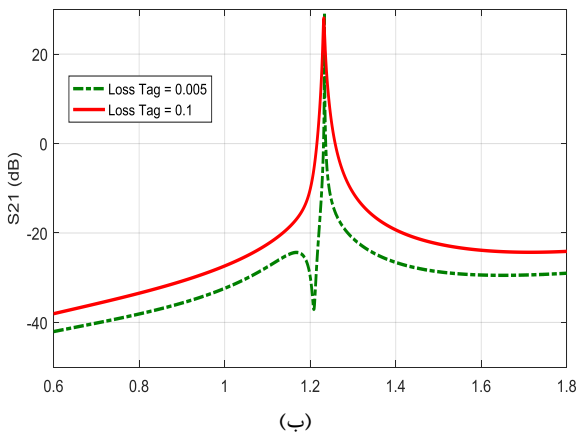
کم کردن محدوده تغییرات ارتفاع پد یک راه‌حل برای رفع این مشکل است. در [۲۶] از مدار کنترل‌کننده بهره خودکار<sup>۱</sup> برای اصلاح حسگر استفاده شده است. بر طبق این روش، ولتاژ تغذیه ترانزیستور برای حالت‌های مختلف ارتفاع پد به صورت مجزا

<sup>۱</sup> Automatic Gain Controller (AGC)



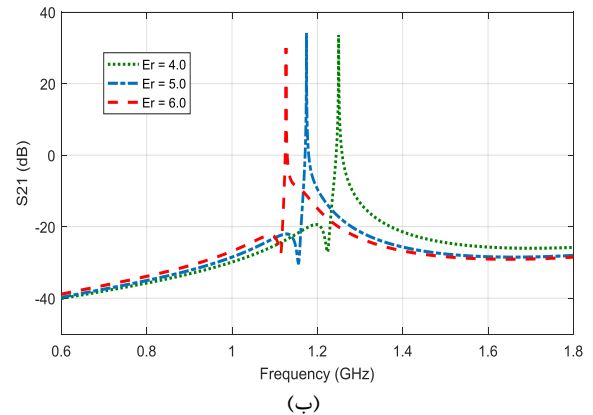
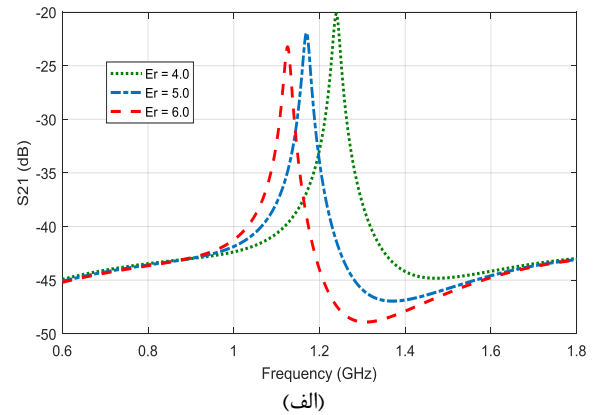


شکل (۱۲). تغییر فرکانس تشدید حسگر فعال بر حسب تغییرات ارتفاع پد متحرک



شکل (۱۴). مقایسه پاسخ فرکانسی حسگر فشار با تغییر تلفات دی‌الکتریک تگ حسگر در دو حالت (الف) غیرفعال و (ب) فعال

در شکل (۱۳) اثر تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی تگ حسگر روی فرکانس تشدید در دو حالت غیرفعال و فعال مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش ضریب گذردهی الکتریکی، فرکانس تشدید کاهش می‌یابد اما ضریب کیفیت آن تغییری نمی‌کند. در شکل (۱۴) نیز اثر تلفات دی‌الکتریک روی ضریب کیفیت و دامنه پاسخ فرکانسی نشان داده شده است و همان‌طور که دیده می‌شود در هر دو حالت غیرفعال و فعال، ضریب کیفیت کاهش می‌یابد.



شکل (۱۳). مقایسه پاسخ فرکانسی حسگر فشار با تغییر ضریب گذردهی الکتریکی تگ حسگر در دو حالت (الف) غیرفعال و (ب) فعال

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک حسگر فشار فعال مایکروویوی با ضریب کیفیت بالا برای کاربری در محیط‌های سخت طراحی و شبیه‌سازی شده است. حسگر پیشنهادی متشکل از یک مدار قرائت‌گر شامل دو خط انتقال مایکرواستریپی است که به یک حلقه با فیدبک مثبت کوپل شده است. از یک تشدیدکننده SRR به همراه یک پد خازنی نیز برای ایجاد شیفت فرکانس تشدید ناشی از تغییر فشار محیط استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد ضریب کیفیت حسگر در حالت غیرفعال ۷۳/۹۱ و در حالت فعال به ۳۲۶۸ می‌باشد. میزان حساسیت حسگر پیشنهادی نیز 70MHz/mm است.

#### تقدیر و تشکر:

بدین‌وسیله نویسندگان از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) به دلیل حمایت از این پژوهش تحت گرنت به شماره ۹۸۰۰۷۷۶۸ سپاسگزاری می‌کنند.



## ۵- مراجع

- on sapphire direct bonding for harsh environments," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 280, pp. 406-412, 2018.
- [17] J. Xiong et al., "An insertable passive LC pressure sensor based on an alumina ceramic for in situ pressure sensing in high-temperature environments," *Sensors*, vol. 15, pp. 21844-21856, 2015.
- [18] Q. Tan et al., "A wireless passive pressure and temperature sensor via a dual LC resonant circuit in harsh environments," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 26, pp. 351-356, 2017.
- [19] L. Dong et al., "An LC passive wireless multifunctional sensor using a relay switch," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, pp. 4968-4973, 2016.
- [20] M.C. Scardelletti et al., "Wireless capacitive pressure sensor with directional RF chip antenna for high temperature environments," *IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*, 2015.
- [21] A.N. Reddy et al., "Split ring resonator and its evolved structures over the past decade," *International Conference ON Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN)*, 2013.
- [22] E.L. Chuma et al., "Microwave sensor for liquid dielectric characterization based on metamaterial complementary split ring resonator," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, pp. 9978-9983, 2018.
- [23] R.A. Alahnomi et al., "High-Q sensor based on symmetrical split ring resonator with spurlines for solids material detection," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, pp. 2766-2775, 2017.
- [24] J. Mata-Contreras et al., "Application of split ring resonator (SRR) loaded transmission lines to the design of angular displacement and velocity sensors for space applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, pp. 4450-4460, 2017.
- [25] X.J. He et al., "Thin-film sensor-based tip-shaped split ring resonator metamaterial for microwave application," *Microsystem technologies*, vol. 16, pp. 1735-1739, 2010.
- [26] A.K. Horestani et al., "Rotation sensor based on horn-shaped split ring resonator," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 3014-3015, 2013.
- [27] Z. Abbasi et al., "High-resolution chipless tag RF sensor," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, pp. 4855-4864, 2020.
- [28] M.H. Zarifi et al., "Liquid sensing using active feedback assisted planar microwave resonator," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, pp. 621-623, 2015.
- [29] M.H. Zarifi et al., "Non-contact liquid sensing using high resolution microwave microstrip resonator," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015.
- [30] Z. Abbasi et al., "Contactless pH measurement
- [1] M.A Imran, S. Hussain, and Q.H. Abbasi, "Wireless Automation as an Enabler for the Next Industrial Revolution," *John Wiley & Sons*, 2020.
- [2] M.P. Boyce, "Gas turbine engineering handbook," Elsevier, 2011.
- [3] G. W. Hunter et al., "Development of chemical sensor arrays for harsh environments and aerospace applications," *Sensors conference, IEEE, Orlando, USA*, 2002.
- [4] H. Kou et al., "A microwave SIW sensor loaded with CSRR for wireless pressure detection in high-temperature environments," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 53, 2019.
- [5] J.E. Rogers et al., "A passive wireless microelectromechanical pressure sensor for harsh environments," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 27, pp. 73-85, 2017.
- [6] G.H. Kroetz et al., "Silicon compatible materials for harsh environment sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 74, pp. 182-189, 1999.
- [7] J. Xu et al., "A novel temperature-insensitive optical fiber pressure sensor for harsh environments," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, pp. 870-872, 2005.
- [8] Y. Zhu et al., "High-temperature fiber-tip pressure sensor," *Journal of lightwave technology*, vol. 24, pp. 861-869, 2006.
- [9] C.M. Jewart et al., "Ultrafast femtosecond-laser-induced fiber Bragg gratings in air-hole microstructured fibers for high-temperature pressure sensing," *Optics letters*, vol. 35, pp. 1443-1445, 2010.
- [10] H. Cheng et al., "Evanescent-mode-resonator-based and antenna-integrated wireless passive pressure sensors for harsh-environment applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 220, pp. 22-33, 2014.
- [11] S. Su et al., "Slot antenna integrated re-entrant resonator based wireless pressure sensor for high-temperature applications," *Sensors*, vol. 17, pp. 1963, 2017.
- [12] L. Lin et al., "Fabrications and performance of wireless LC pressure sensors through LTCC technology," *Sensors*, vol. 18, pp. 340, 2018.
- [13] Q. Tan et al., "A wireless passive pressure microsensor fabricated in HTCC MEMS technology for harsh environments," *Sensors*, vol. 13, pp. 9896-9908, 2013.
- [14] T. Luo et al., "A passive pressure sensor fabricated by post-fire metallization on zirconia ceramic for high-temperature applications," *Micromachines*, vol. 5, pp. 814-824, 2014.
- [15] C. Zheng et al., "Design and manufacturing of a passive pressure sensor based on LC resonance," *Micromachines*, vol. 7, pp. 87, 2015.
- [16] W. Li et al., "Wireless passive pressure sensor based

- [34] M. Nosrati et al., "Locally strong-coupled microwave resonator using PEMC boundary for distant sensing applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, pp. 4130-4139, 2019.
- [35] J. Xiong et al., "Wireless LTCC-based capacitive pressure sensor for harsh environment," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 197, pp. 30-37, 2013.
- based on high resolution enhanced Q microwave resonator," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2018.
- [31] M.H. Zarifi et al., "High-resolution RFID liquid sensing using a chipless tag," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 27, pp. 311-313, 2017.
- [32] R. Mirzavand et al., "High-resolution dielectric sensor based on injection-locked oscillators," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, pp. 141-148, 2017.
- [33] V. Sekar et al., "A self-sustained microwave system for dielectric-constant measurement of lossy organic liquids," *IEEE Sensors Journal*, vol. 60, pp. 1444-1455, 2012.