

مقاله پژوهشی

طراحی و ساخت یک سنسور الکترونیکی جدید به منظور تشخیص فساد در ماده غذایی شیر

علی خوش چهره^۱، محمدامیر ستاری^{۲*}، عمر حامد شاه^۳، غلامحسین روشنی^{۴*}

۱. گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲. گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۳. گروه مهندسی مکانیک و مرکز تحقیقات هوش مصنوعی، دانشگاه عجمان، عجمان، امارات متحده عربی

۴. گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۳/۲۱، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۴/۵/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۰۶)

چکیده:

ارزیابی کیفیت و سلامت شیر، به عنوان یکی از مواد غذایی ضروری در تغذیه انسان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های سنتی تشخیص کیفیت شیر، عمدتاً بر پایه آزمون‌های شیمیایی استوارند که علی‌رغم قابلیت اطمینان، با معایبی همچون هزینه بالا، زمان بر بودن و نیاز به تخریب نمونه همراه هستند. در مقابل، فناوری سنجش مایکروویو، به ویژه با استفاده از سنسورهای مایکرواستریپ، به عنوان یک رویکرد نوین، پتانسیل ارائه روشی کم‌هزینه، غیرمخرب و بلادرنگ را داراست. این سنسورها با تحلیل تغییرات پاسخ فرکانسی ناشی از خصوصیات دی‌الکتریک ماده تحت آزمایش، امکان شناسایی تغییرات کیفیت، از جمله فساد را فراهم می‌کنند. این پژوهش با هدف طراحی، ساخت و ارزیابی یک سنسور مایکرواستریپ جدید برای تشخیص روند فساد در شیر با استفاده از امواج مایکروویو انجام شده است. یک سنسور مایکرواستریپ با دو ناحیه گذردهی در نرم‌افزار ADS طراحی و ساخته شد. ده نمونه شیر تجاری با شرایط یکسان، در ده روز متوالی تهیه و در دمای کنترل‌شده (21°C) نگهداری شدند. در روز آزمایش، پارامتر پراکندگی (S_{21}) برای هر نمونه با حجم ۱۸۰ ml با استفاده از تحلیل‌گر شبکه برداری (VNA) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تغییرات محسوس در پارامتر S_{21} در ناحیه گذردهی اول (۱۸۰۷ MHz تا ۲۴۶۶ MHz) با افزایش عمر نمونه‌ها رخ می‌دهد. بیشترین حساسیت و تفاوت معنادار در فرکانس ۲۱۶۶ MHz مشاهده شد؛ در این فرکانس، اختلاف دامنه بین تازه‌ترین (سالم‌ترین) و کهنه‌ترین (فسادترین) نمونه ۷/۰۲ dB بود. این میزان اختلاف، حدود ۱۰۵ برابر انحراف استاندارد (۰/۰۶۷ dB) بود، که نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری بالا و معناداری نتایج است. فرکانس‌های دیگری مانند ۱۸۰۷ MHz نیز روند مشابه و قابل اتکایی را نشان دادند. سنسور مایکرواستریپ ارائه‌شده، ابزاری کارآمد، دقیق و سریع برای پایش غیرمخرب و بلادرنگ فساد شیر است و جایگزینی مناسب برای روش‌های آزمایشگاهی پرهزینه و زمان‌بر در صنایع غذایی محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: سنسور مایکرواستریپ، فساد شیر، سنجش مایکروویو، کیفیت شیر، پارامتر S_{21} ، امواج الکترومغناطیس

۱. مقدمه

افزایش تقاضای جهانی برای مواد غذایی ایمن و باکیفیت، همراه با استانداردهای رو به رشد بهداشتی، کنترل کیفیت مواد غذایی را به یکی از چالش‌های اصلی صنایع غذایی تبدیل کرده است. شیر، به عنوان منبعی غنی از پروتئین، چربی، قند لاکتوز و ویتامین‌ها، از مهم‌ترین اجزای رژیم غذایی در سراسر جهان است [۱]. با این حال، حساسیت بالای این ماده به تغییرات میکروبی و محیطی، مانند دما و زمان نگهداری، آن را مستعد فساد سریع می‌کند، که می‌تواند سلامت مصرف‌کنندگان، به‌ویژه گروه‌های حساس مانند کودکان و سالمندان، را به خطر اندازد [۲، ۳]. روش‌های سنتی تشخیص فساد شیر، نظیر آزمون‌های شیمیایی و میکروبیولوژیکی، اغلب زمان‌بر، پرهزینه و نیازمند تخریب نمونه هستند، که این محدودیت‌ها کارایی آن‌ها را در نظارت بلادرنگ زنجیره تأمین کاهش می‌دهد [۴]. در این راستا، فناوری سنجش مبتنی بر امواج مایکروویو به دلیل ویژگی‌هایی مانند غیرتهاجمی بودن، سرعت بالا و هزینه پایین، رویکردی نویدبخش برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های سنتی ارائه می‌دهد [۵]. سنسورهای مایکرواستریپ، که با تحلیل تغییرات پارامترهای امواج الکترومغناطیسی (نظیر گذردهی یا S21) عمل می‌کنند، امکان تشخیص سریع و دقیق تغییرات شیمیایی و فیزیکی مواد را فراهم می‌کنند [۶]. این پژوهش با بهره‌گیری از یک سنسور مایکرواستریپ، به دنبال ارائه روشی کارآمد برای تشخیص بلادرنگ فساد شیر است که می‌تواند با کاهش هزینه‌ها و ضایعات غذایی، به بهبود ایمنی و پایداری در صنایع غذایی کمک کند.

پژوهش‌های پیشین نشان‌دهنده پتانسیل بالای فناوری مایکروویو در سنجش خواص مواد در حوزه‌های مختلف هستند. برای مثال، سنسورهای مایکروویو برای تشخیص غلظت محلول‌های مایع، مانند آب و نمک یا اتانول، با دقت بالا استفاده شده‌اند [۷، ۸]. در صنایع نفت و گاز، این فناوری برای شناسایی ناخالصی‌هایی نظیر شوری در نفت خام یا درصد آب در روغن به کار گرفته شده است [۹، ۱۰]. در زیست‌پزشکی نیز، کاربردهایی مانند اندازه‌گیری غیرتهاجمی سطح گلوکز و تشخیص رشد میکروب‌هایی مانند *E. coli* گزارش شده است [۱۱، ۱۲]. این مطالعات از مزایایی مانند سرعت بالا،

غیرتهاجمی بودن و انعطاف‌پذیری برخوردارند، اما اغلب به تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت وابسته‌اند، که کاربرد آن‌ها را در محیط‌های صنعتی محدود می‌کند [۵]. در حوزه صنایع غذایی، مطالعات محدودی به بررسی خواص دی‌الکتریک شیر با استفاده از امواج مایکروویو پرداخته‌اند [۳]. این پژوهش‌ها عمدتاً بر تحلیل ویژگی‌های کلی شیر، مانند غلظت یا تازگی، تمرکز داشته‌اند و کمتر به تشخیص روند فساد در بازه‌های زمانی مختلف پرداخته‌اند. علاوه بر این، بسیاری از این مطالعات از روش‌هایی استفاده کرده‌اند که نیازمند تجهیزات پیشرفته یا شرایط آزمایشگاهی خاص هستند، که عملی بودن آن‌ها را در مقیاس صنعتی کاهش می‌دهد [۱۳]. فقدان روش‌های ساده، ارزان و قابل اجرا برای تشخیص بلادرنگ فساد شیر، شکاف قابل توجهی در ادبیات علمی ایجاد کرده است که پژوهش حاضر به دنبال پر کردن آن است.

این پژوهش با طراحی و ارزیابی یک سنسور مایکرواستریپ ساده و کم‌هزینه، رویکردی نوآورانه برای تشخیص بلادرنگ روند فساد شیر ارائه می‌دهد. برخلاف روش‌های سنتی که به زمان و تجهیزات آزمایشگاهی وابسته‌اند، این سنسور امکان نظارت آنلاین بر کیفیت شیر را بدون تخریب نمونه فراهم می‌کند. آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های شیر در بازه ۱۰ روزه، تغییرات معنادار در پارامتر گذردهی (S21) را در فرکانس‌های خاص، به‌ویژه ۲/۲ GHz، نشان داد که تأییدکننده دقت و قابلیت اطمینان سنسور است. این نتایج نه تنها امکان تشخیص زودهنگام فساد را فراهم می‌کنند، بلکه با ارائه روشی مقرون‌به‌صرفه، قابلیت کاربرد در خطوط تولید و زنجیره توزیع را دارند. از منظر علمی، این مطالعه با گسترش کاربردهای فناوری مایکروویو در صنایع غذایی، به‌ویژه در تشخیص فساد شیر، به ادبیات علمی کمک می‌کند. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر کاربردهای زیست‌پزشکی یا صنعتی غیرغذایی تمرکز داشته‌اند، این پژوهش به‌طور خاص به نیازهای صنایع غذایی پاسخ می‌دهد و راه را برای توسعه سنسورهای مشابه برای سایر مواد غذایی هموار می‌کند. از منظر عملی، نتایج این مطالعه می‌تواند استانداردهای کنترل کیفیت را بهبود بخشد، ضایعات غذایی را کاهش دهند و ایمنی مصرف‌کنندگان را تضمین کنند.

۲. مواد و روش ها

۱.۲. طراحی و ساخت سنسور میکرواستریپ

سنسورهای میکرواستریپ به دلیل طراحی ساده، ابعاد فشرده و هزینه پایین، ابزارهایی کارآمد برای سنجش خواص مواد، به ویژه در کاربردهای صنایع غذایی، محسوب می شوند. این سنسورها شامل یک نوار هادی هستند که توسط یک بستر دی الکتریک از صفحه زمین جدا شده و انتشار امواج الکترومغناطیسی را ممکن می سازند. حساسیت بالای این سنسورها به تغییرات خواص دی الکتریک مواد مجاور، آن ها را برای تشخیص تغییرات شیمیایی در مواد غذایی، مانند فساد شیر، مناسب می کند. در این پژوهش، یک سنسور میکرواستریپ برای تشخیص غیرتهاجمی روند فساد شیر طراحی و ساخته شده است که با اندازه گیری جابه جایی های فرکانسی ناشی از تغییرات دی الکتریک نمونه، امکان شناسایی مراحل مختلف فساد را فراهم می آورد.

ارتباط بین ویژگی های شیمیایی شیر (نظیر تغییرات ناشی از فعالیت میکروبی در فرآیند فساد) و پاسخ فرکانسی سنسور، مبتنی بر اصول انتشار امواج الکترومغناطیسی است. هنگامی که نمونه شیر در نزدیکی سنسور قرار می گیرد، ثابت دی الکتریک محیط تغییر کرده و بر پرمیوتیه مؤثر ساختار میکرواستریپ تأثیر می گذارد. فرکانس تشدید یک رزوناتور میکرواستریپ نیم موج با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود: [۱۴]

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

که در آن (c) سرعت نور در خلأ، (L) طول رزوناتور، و (ϵ_{eff}) ثابت دی الکتریک مؤثر بستر و ماده بالای آن است. با تغییر ویژگی های شیمیایی شیر در اثر فساد، (ϵ_{eff}) تغییر می کند و فرکانس تشدید (f_r) جابه جا می شود. این جابه جایی فرکانسی مبنای تشخیص فساد شیر در این پژوهش است.

تغییر در پاسخ فرکانسی سنسور ناشی از تغییرات خواص ماده را می توان با نظریه اختلال (perturbation theory) توضیح داد. تغییر در فرکانس تشدید (Δf) ناشی از تغییر در ثابت دی الکتریک ($\Delta \epsilon$) به صورت زیر است:

مدلی نظری ارائه شده است که تغییرات شیمیایی، مانند تجزیه لاکتوز به اسید لاکتیک و تغییرات ساختار پروتئینی، را به تغییرات ثابت دی الکتریک مؤثر و در نتیجه به تغییرات S21 مرتبط می کند. این مدل نشان داد که فرکانس های مختلف (مانند ۱۸۰۷ MHz، ۱۹۲۷ MHz و ۲۱۶۶ MHz) به جنبه های متفاوتی از تغییرات شیمیایی حساس هستند. برای مثال، فرکانس ۱۸۰۷ MHz به افزایش ϵ_{eff} ناشی از تولید اسید لاکتیک حساس تر است، که باعث کاهش دامنه S21 می شود، در حالی که فرکانس ۱۹۲۷ MHz به کاهش ϵ_{eff} ناشی از تجزیه پروتئین ها پاسخ می دهد و دامنه S21 را افزایش می دهد. [۳، ۱۶] فرکانس ۲۱۶۶ MHz با تفاوت دامنه ۷/۰۲ dB و نسبت سیگنال به خطا ۱۰۵، به دلیل تعادل بین این اثرات شیمیایی، بالاترین حساسیت را نشان داد.

نوآوری های کلیدی این پژوهش شامل موارد زیر است:

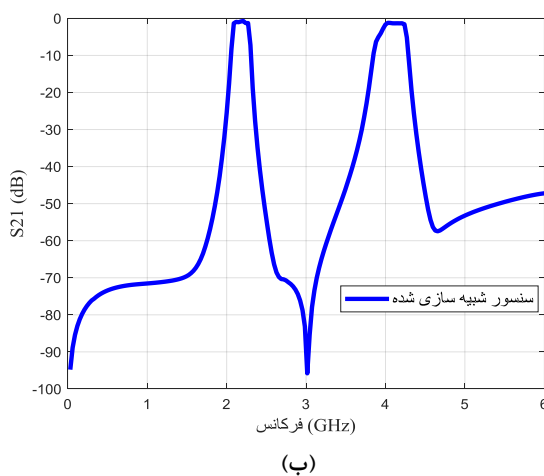
- **تمرکز بر شیر:** برخلاف مطالعات قبلی که عمدتاً بر مواد غیرغذایی (مانند نفت یا محلول های شیمیایی) متمرکز بودند، این مطالعه به طور خاص شیر را بررسی کرد، که چالش های منحصر به فردی مانند حساسیت به فساد میکروبی دارد.

- **تحلیل چندفرکانسی:** بررسی تغییرات S21 در چندین فرکانس، امکان شناسایی الگوهای پیچیده تغییرات شیمیایی را فراهم کرد، که در مقایسه با روش های تک فرکانسی، دقت و جامعیت بیشتری ارائه می دهد.

- **طراحی ساده و کاربرد صنعتی:** سنسور پیشنهادی با ابعاد فشرده (۲۵×۴۰ mm) و هزینه کم، برای نظارت بلادرنگ در خطوط تولید لبنی مناسب است، برخلاف تجهیزات پیچیده مورد نیاز در برخی مطالعات قبلی.

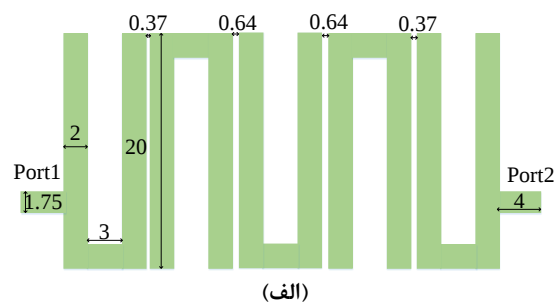
رابطه کمی بین پارامترهای شیمیایی (مانند pH و غلظت اسید لاکتیک) و S21 با استفاده از مدل مخلوط دی الکتریک و رابطه تجربی pH ارائه شد. این تحلیل، ارتباط بین تغییرات شیمیایی و پارامترهای الکترومغناطیسی را روشن می کند و پایه ای برای توسعه سنسورهای پیشرفته تر فراهم می کند. در ادامه، این پژوهش جزئیات طراحی سنسور، روش شناسی آزمایش ها و تحلیل نتایج را ارائه می دهد تا قابلیت های این روش نوین روشن تر شود.

شده است (شکل ۱، بخش الف). این سنسور در دو بازه فرکانسی گذردهی دارد: ناحیه اول از ۱۸۰۷ MHz تا ۲۴۶۶ MHz و ناحیه دوم از ۳۶۰۴ MHz تا ۴۴۲۶ MHz. گذردهی کامل در ناحیه اول در بازه ۲۱۶۶ MHz تا ۲۲۸۶ MHz و در ناحیه دوم در بازه ۴۰۲۳ MHz تا ۴۲۰۳ MHz مشاهده می‌شود (شکل ۱، بخش ب). طراحی دوباند این سنسور، با تقویت تعامل میدان الکترومغناطیسی با نمونه در دو بازه فرکانسی، حساسیت را افزایش داده و نسبت سیگنال به نویز را بهبود می‌بخشد.



$$\Delta f \approx -\frac{f_r}{2} \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_{eff}} \quad (2)$$

این رابطه نشان‌دهنده ارتباط معکوس جابه‌جایی فرکانس تشدید با تغییرات ثابت دی‌الکتریک ماده نزدیک به سنسور است. با پیشرفت فساد شیر، کاهش ثابت دی‌الکتریک مؤثر منجر به افزایش فرکانس تشدید می‌شود، که این ویژگی سنسورهای میکرواستریپ را برای کاربرد حاضر ایده‌آل می‌سازد. سنسور پیشنهادی یک ساختار میکرواستریپ با یک پورت ورودی و یک پورت خروجی است که در نرم‌افزار Advanced Design System (ADS) طراحی و شبیه‌سازی



شکل (۱). (الف) طرح شبیه‌سازی شده سنسور میکرواستریپ، (ب) پاسخ فرکانسی سنسور شبیه‌سازی شده

Fig 1. (a) Simulated design of the microstrip sensor, (b) Frequency response of the simulated sensor

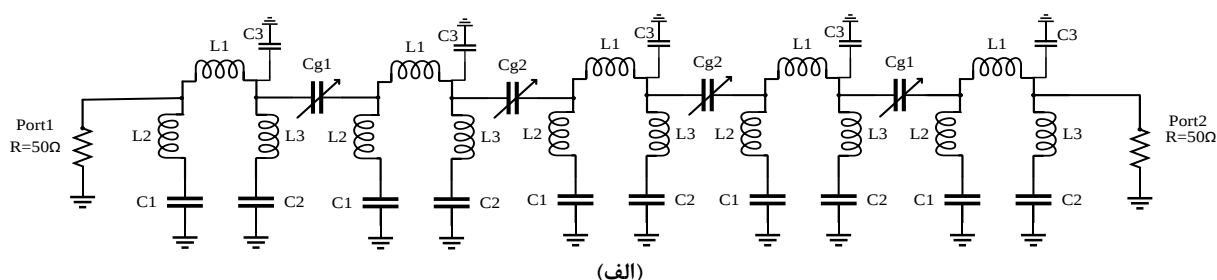
$$C = \frac{1}{2\pi f_r Z_0} \tan \left(\frac{\pi l}{\lambda_g} \right) \quad (4)$$

که در آن امپدانس مشخصه خط میکرواستریپ، (۱) طول فیزیکی رزوناتور، (λ_g) طول موج هدایت شده $(\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}})$ ، و (f_r) فرکانس تشدید است. این روابط برای تنظیم دقیق اجزای مدار با استفاده از ابزار تنظیم (tuning tool) در نرم‌افزار ADS به کار رفتند. مقادیر نمونه برای مدار معادل در فرکانس 2.2 GHz شامل $(L1 = 0.3 \text{ nH})$ ، $(L2 = 4.8 \text{ nH})$ ، $(C1 = 1.5 \text{ pF})$ ، و همچنین $(C2 = 2.0 \text{ pF})$ است. مقایسه پاسخ فرکانسی مدار معادل LC و طرح میکرواستریپ در شکل (۲) (بخش ب) نشان داده شده است. مدار LC

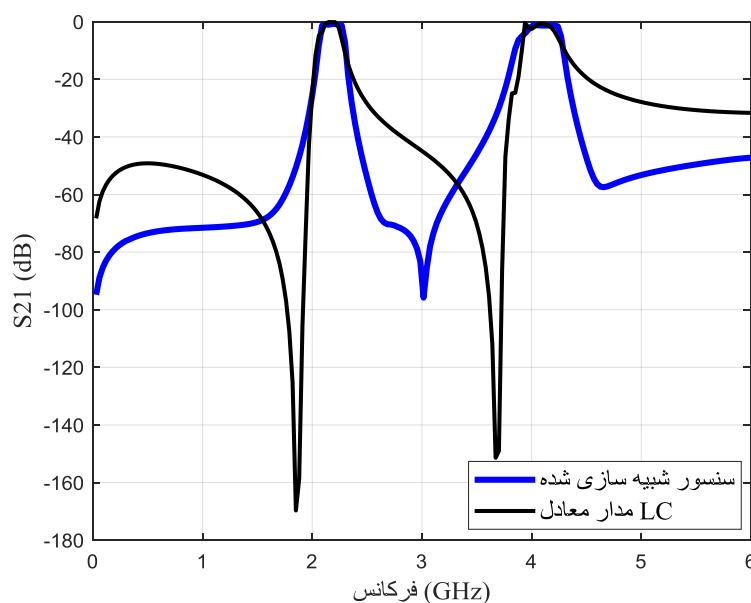
بستر مورد استفاده RT/Duroid 4003 با ثابت دی‌الکتریک نسبی 3.55 (ϵ_r) و ضخامت ۰.۷۸۷ mm است. شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی در ADS با در نظر گرفتن اثرات پارازیتی، مانند خازن‌های انگشتی (interdigital capacitance)، انجام شد تا رفتار واقعی سنسور با دقت بالا مدل‌سازی شود. برای مدل‌سازی رفتار رزونانسی سنسور، یک مدار معادل LC طراحی شد (شکل ۲، بخش الف). این مدار شامل سلف‌ها و خازن‌هایی است که برای بازنمایی اثرات کوپلینگ و پارازیتی طرح میکرواستریپ تنظیم شده‌اند. مقادیر سلف (L) و خازن (C) معادل با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند [۱۵].

$$L = \frac{Z_0}{2\pi f_r} \sin \left(\frac{2\pi l}{\lambda_g} \right) \quad (3)$$

رفتارهای رزونانسی اصلی و اثرات کوپلینگ طرح را به خوبی توزیع شده در طرح مایکرواستریپ مشاهده می شود که در مدل LC به طور کامل قابل مدل سازی نیستند.



(الف)



(ب)

شکل (۲). (الف) مدار معادل LC ، (ب) مقایسه پاسخ فرکانسی مدار معادل LC و طرح مایکرواستریپ

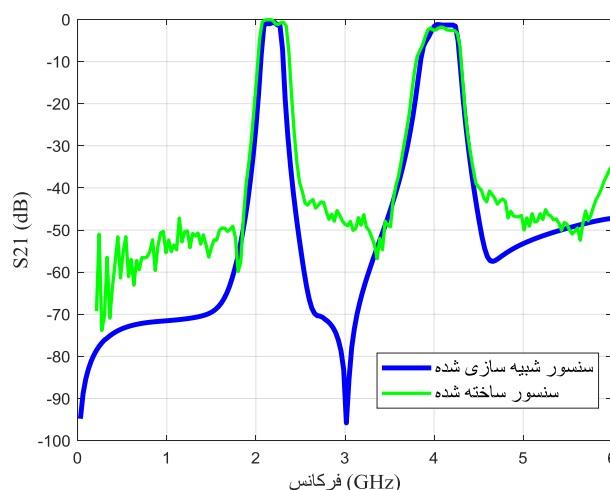
Fig 2. (a) Equivalent LC circuit, (b) Comparison of the frequency response of the equivalent LC circuit and the microstrip design

تطابق مناسبی را نشان می دهد که صحت طراحی و فرآیند ساخت را تأیید می کند. انحرافات جزئی بین این دو پاسخ به عوامل عملی مانند تolerانس های ساخت و اثرات محیطی نسبت داده می شود. ابعاد کلی سنسور 25×40 mm² است.

سنسور پیشنهادی بر روی بستر RT/Duroid 4003 ساخته شد (شکل ۳، بخش الف). پاسخ فرکانسی سنسور ساخته شده با استفاده از تحلیل گر شبکه برداری (VNA) مدل NanoVNA تا فرکانس ۶ GHz اندازه گیری شد. مقایسه پاسخ فرکانسی سنسور ساخته شده و شبیه سازی شده (شکل ۳، بخش ب)



(الف)



(ب)

شکل (۳). (الف) سنسور میکرواستریپ ساخته شده، (ب) مقایسه پاسخ فرکانسی سنسور ساخته شده و شبیه سازی شده

Fig 3. (a) Fabricated microstrip sensor, (b) Comparison of the frequency response of the fabricated and simulated sensors

۲.۲. ساختار اندازه گیری

برای قرار دادن نمونه های شیر در نزدیکی سنسور، از یک

ظرف شفاف از جنس پلی استایرن با ظرفیت ۲۰۰ ml استفاده شد (شکل ۴، بخش الف). این ظرف با سطح مقطع 2857 mm^2 ، ارتفاع ۷۰ mm، و ضخامت دیواره ۱ mm طراحی شد تا نمونه ها را در فاصله ای ثابت و به صورت غیرتماسی در محدوده میدان نزدیک سنسور نگه دارد. آزمایش های اولیه نشان داد که حجم ۱۶۰ ml شیر برای مستقل شدن نتایج از تغییرات جزئی حجم کافی است. برای اطمینان از یکنواختی، در تمام آزمایش ها از حجم ۱۸۰ ml استفاده شد. جنس پلی استایرن به دلیل شفافیت، پایداری شیمیایی، و تأثیر ناچیز بر خواص دی الکتریک میدان الکترومغناطیسی سنسور انتخاب شد. حضور ظرف پلی استایرن تغییر جزئی در پاسخ فرکانسی سنسور ایجاد می کند، اما این تغییر به دلیل یکنواختی در تمام آزمایش ها قابل چشم پوشی است.

برای ارزیابی عملکرد سنسور میکرواستریپ پیشنهادی در تشخیص روند فساد شیر، یک ساختار اندازه گیری دقیق طراحی و اجرا شد. این ساختار شامل ابزارهای مورد نیاز برای قرارگیری نمونه ها، ثبت پاسخ فرکانسی سنسور، و کنترل شرایط آزمایش است. ابزار اصلی این پژوهش، یک سنسور میکرواستریپ است که در نرم افزار Advanced Design System (ADS) طراحی و بر روی بستر RT/Duroid 4003 با ثابت دی الکتریک نسبی $3/55$ و ضخامت 0.787 mm ساخته شده است. این سنسور دارای دو ناحیه گذردهی فرکانسی است: ناحیه اول از 18.07 MHz تا 2466 MHz و ناحیه دوم از 3604 MHz تا 4426 MHz . پاسخ فرکانسی سنسور با استفاده از تحلیل گر شبکه برداری (VNA) مدل NanoVNA تا فرکانس ۶ GHz اندازه گیری شد. جزئیات طراحی و ساخت سنسور در بخش مربوطه ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل (۴). (الف) ظرف آزمایش از جنس پلی استایرن، (ب) نمونه های شیر تهیه شده در ۱۰ روز متوالی

Fig 4. (a) Polystyrene test container, (b) Milk samples prepared over 10 consecutive days

تأثیری بر پاسخ فرکانسی ندارد. برای حفظ یکنواختی نحوه قرارگیری، ظرف پلی استایرن به صورت ثابت بر روی سنسور نصب شد. پس از هر آزمایش، ظرف با استفاده از یک سرنگ تخلیه و برای آزمایش بعدی با نمونه جدید پر شد. این روش از جابه جایی ظرف و تغییرات احتمالی در موقعیت آن جلوگیری کرد. آزمایش ها در یک محیط کنترل شده انجام شد تا عوامل محیطی مانند دما و تداخل های الکترومغناطیسی به حداقل برسند. هر نمونه شیر پنج بار آزمایش شد تا تأثیر نویز و تغییرات احتمالی در پاسخ سنسور کاهش یابد، که در مجموع ۵۰ اندازه گیری را شامل شد (شکل ۵). پس از هر آزمایش، نمونه از ظرف تخلیه و پس از چند دقیقه وقفه، مجدداً با همان نمونه پر شد تا از یکنواختی شرایط اطمینان حاصل شود. پاسخ فرکانسی (S21) برای هر آزمایش با استفاده از نرم افزار NanoVNA ثبت و به رایانه منتقل شد. داده ها در نرم افزار اکسل ذخیره و برای تحلیل های آماری آماده شدند.

پاسخ فرکانسی سنسور (پارامتر S21) با استفاده از تحلیل گر شبکه برداری (VNA) مدل NanoVNA اندازه گیری شد. این دستگاه قادر به ثبت داده ها تا فرکانس ۶ GHz است و از طریق نرم افزار NanoVNA به رایانه متصل می شود. داده های خام به فرمت قابل استفاده در نرم افزار اکسل تبدیل شده و برای تحلیل های بعدی ذخیره شدند. ده نمونه شیر با چربی ۳٪ از شرکت بیستون در بازه زمانی ۱۰ روز متوالی تهیه شد (شکل ۴، بخش ب). این نمونه ها به ترتیب از کهنه ترین (روز اول) تا تازه ترین (روز دهم) دسته بندی شدند. برای اطمینان از یکنواختی شرایط آزمایش، دما، حجم، و نحوه قرارگیری نمونه ها به دقت کنترل شد. نمونه ها در محیطی با دمای ثابت ۲۱ °C نگهداری شدند. نمونه روز دهم (تازه ترین) نیز به مدت پنج ساعت در همان دما قرار گرفت تا شرایط یکسانی داشته باشد. قبل از انجام آزمایش، دمای هر نمونه با دماسنج دیجیتال تأیید شد.

حجم هر نمونه ۱۸۰ ml تعیین شد، زیرا آزمایش ها نشان داد که در حجم های بیش از ۱۶۰ ml، تغییرات جزئی حجم



شکل (۵). انجام آزمایش و ثبت نتایج در رایانه

Fig 5. Experiment setup and data recording on the computer



برای ۱۰ نمونه شیر در روزهای مختلف و در هفت فرکانس کلیدی نشان می‌دهد. هر مقدار میانگین از پنج اندازه‌گیری برای هر نمونه محاسبه شده است. این جدول داده‌های خام موردنیاز برای تحلیل تغییرات دامنه امواج در اثر روند فساد شیر را فراهم می‌کند و مبنایی برای ارزیابی آماری در بخش‌های بعدی است. ترتیب نمونه‌ها از روز اول (کهنه‌ترین) تا روز دهم (تازه‌ترین) نشان‌دهنده تغییرات تدریجی در خواص دی‌الکتریک شیر در اثر فساد است.

نتایج اولیه نشان داد که ناحیه فرکانسی ۱۸۰۷ MHz تا ۲۴۶۶ MHz، که ناحیه گذردهی اول سنسور است، تغییرات معناداری را در پاسخ فرکانسی نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. این بازه فرکانسی به‌عنوان محدوده اصلی برای تحلیل‌های بعدی انتخاب شد. داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های پاسخ فرکانسی (S21) برای هر نمونه در فرکانس‌های منتخب در ناحیه گذردهی اول سنسور (MHz ۱۸۰۷ تا ۲۴۶۶) جمع‌آوری و میانگین‌گیری شدند. جدول ۱ میانگین مقادیر دامنه پارامتر S21 (بر حسب dB) را

جدول (۱). میانگین مقادیر دامنه پارامتر S21 در فرکانس‌های مختلف برای ۱۰ نمونه شیر در روزهای متوالی

Table 1. Mean values of the S21 parameter amplitude at different frequencies for 10 milk samples over consecutive days

Frequency MHz	Mean (Day 1) S21 (dB)	Mean (Day 2) S21 (dB)	Mean (Day 3) S21 (dB)	Mean (Day 4) S21 (dB)	Mean (Day 5) S21 (dB)	Mean (Day 6) S21 (dB)	Mean (Day 7) S21 (dB)	Mean (Day 8) S21 (dB)	Mean (Day 9) S21 (dB)	Mean (Day 10) S21 (dB)
۱۸۰۷	-۱۷,۲۳	-۱۷,۴۵	-۱۸,۳۰	-۱۹,۱۲	-۱۹,۵۲	-۲۱,۰۹	-۲۱,۲۹	-۲۱,۴۶	-۲۱,۹۱	-۲۲,۴۶
۱۸۶۷	-۵,۷۷	-۵,۸۱	-۶,۰۹	-۶,۲۶	-۶,۵۱	-۷,۲۸	-۷,۲۹	-۷,۳۲	-۷,۴۴	-۸,۰۹
۱۹۲۷	-۴,۹۰	-۴,۸۸	-۴,۸۴	-۴,۷۹	-۴,۷۹	-۴,۶۴	-۴,۵۴	-۴,۵۱	-۴,۵۰	-۴,۴۸
۱۹۸۷	-۵,۹۶	-۵,۹۱	-۵,۹۱	-۵,۹۱	-۵,۹۰	-۵,۸۹	-۵,۸۷	-۵,۸۸	-۵,۸۸	-۵,۸۷
۲۰۴۷	-۵,۸۶	-۵,۸۱	-۵,۷۱	-۵,۶۱	-۵,۵۸	-۵,۴۶	-۵,۴۳	-۵,۴۱	-۵,۴۰	-۵,۳۷
۲۱۰۷	-۷,۶۸	-۷,۵۸	-۷,۲۱	-۶,۷۳	-۶,۶۲	-۶,۲۴	-۶,۰۹	-۵,۹۹	-۵,۹۶	-۵,۸۵
۲۱۶۶	-۱۷,۹۱	-۱۷,۷۰	-۱۶,۶۸	-۱۵,۴۴	-۱۴,۹۲	-۱۳,۰۰	-۱۲,۴۸	-۱۲,۰۱	-۱۱,۷۸	-۱۰,۸۹

نمونه در فرکانس‌های کلیدی در جدول (۱) ارائه شده است. این جدول روند تغییرات خواص دی‌الکتریک شیر را از روز اول (کهنه‌ترین نمونه) تا روز پنجم (تازه‌ترین نمونه) نشان می‌دهد.

برای ارزیابی دقت آزمایش، انحراف استاندارد هر مجموعه اندازه‌گیری محاسبه شد. جدول (۲) میانگین انحراف استاندارد (به‌عنوان شاخص خطای آزمایش) و تفاوت دامنه S21 بین نمونه‌های روز اول (فاسدترین) و روز پنجم (تازه‌ترین) را در فرکانس‌های منتخب نشان می‌دهد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. نتایج

آزمایش‌های انجام‌شده بر روی ۱۰ نمونه شیر تجاری با چربی ۳٪، که طی ۱۰ روز متوالی تهیه و در دمای کنترل‌شده ۲۱°C نگهداری شدند، تغییرات دامنه پارامتر S21 را در ناحیه گذردهی اول سنسور مایکرواستریپ (MHz ۱۸۰۷ تا ۲۴۶۶) نشان می‌دهند. هر نمونه پنج بار آزمایش شد، که در مجموع ۵۰ اندازه‌گیری برای تولید داده‌های قابل‌اعتماد انجام گرفت. میانگین مقادیر دامنه S21 (بر حسب dB) برای هر

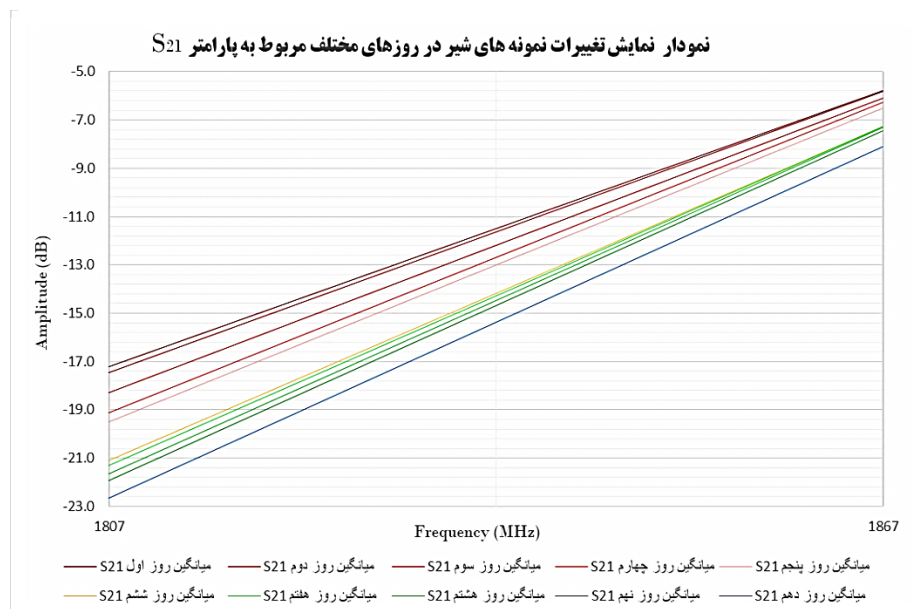
جدول (۲). میانگین انحراف استاندارد و تفاوت دامنه S21 بین نمونه‌های روز اول و پنجم

Table 2. Mean standard deviation and amplitude difference of S21 between the samples from Day 1 and Day 5

Frequency MHz	Mean SD of Samples (dB)	Δ Mean S21 (Day 1 – Day 10) (dB)
۱۸۰۷	۰,۰۷۴	۵,۴۱۴
۱۸۶۶,۹	۰,۰۴۸	۲,۳۱۸
۱۹۲۶,۸	۰,۰۲۷	۰,۴۷۰
۱۹۸۶,۷	۰,۰۲۲	۰,۰۸۹
۲۰۴۶,۶	۰,۰۱۷	۰,۴۹۹
۲۱۰۶,۵	۰,۰۲۴	۱,۸۳۰
۲۱۶۶,۴	۰,۰۶۷	۷,۰۲۰

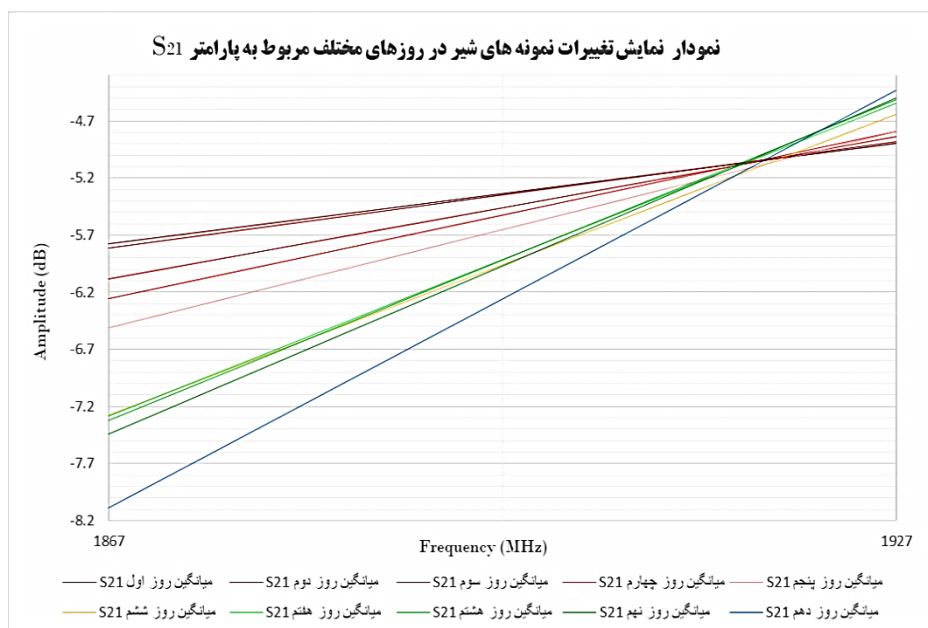
(شکل‌های ۶ تا ۹) این روند را به صورت بصری نمایش می‌دهند. شکل (۶) تغییرات کاهشی دامنه در فرکانس‌های ۱۸۰۷ MHz و ۱۸۶۷ MHz را از نمونه‌های کهنه به تازه نشان می‌دهد. شکل ۷ روند معکوس را در فرکانس‌های ۱۸۶۷ MHz و ۱۹۲۷ MHz نمایش می‌دهد، جایی که دامنه افزایش می‌یابد. شکل (۸) (بخش الف و ب) تغییرات در فرکانس‌های ۱۹۲۷ MHz، ۱۹۸۷ MHz، ۲۰۴۷ MHz، ۲۱۰۷ MHz و ۲۱۶۶ MHz را نشان می‌دهد و شکل (۹) نمای کلی تغییرات در تمام فرکانس‌ها را ارائه می‌کند.

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که خطای آزمایش در تمام فرکانس‌ها ناچیز است، با بیشترین مقدار ۰/۰۷۴ dB در ۱۸۰۷ MHz و کمترین مقدار ۰/۰۱۷ dB در ۲۰۴۷ MHz. تفاوت‌های دامنه بین نمونه‌های تازه و فاسد در فرکانس‌های ۱۸۰۷، ۲۱۰۷، ۲۱۶۶ MHz (به ترتیب ۲/۲۹ dB، ۲/۹۴ dB و ۲/۹۹ dB) به مراتب بزرگ‌تر از خطای آزمایش است، که دقت و معناداری نتایج را تأیید می‌کند. به ویژه، فرکانس ۲۱۶۶ MHz با تفاوت دامنه ۲/۹۹ dB و نسبت سیگنال به خطا حدود ۴۵، بالاترین حساسیت را نشان داد. نمودارهای تغییرات دامنه S21 در فرکانس‌های مختلف



شکل (۶). تغییرات S21 در فرکانس ۱۸۰۷ MHz و ۱۸۶۷ MHz

Fig 6. Variations of S21 at frequencies 1807 MHz and 1867 MHz

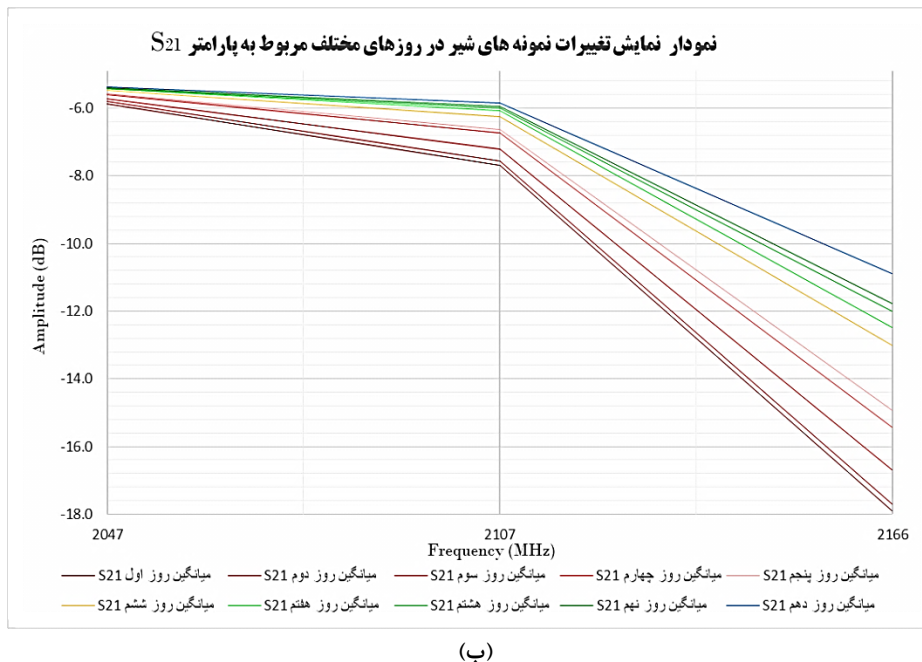


شکل (۷). تغییرات S21 در فرکانس ۱۸۶۷ MHz و ۱۹۲۷ MHz

Fig 7. Variations of S21 at frequencies 1867 MHz and 1927 MHz



(الف)



شکل (۸). (الف) تغییرات S21 در فرکانس های ۱۹۲۷ MHz و ۱۹۸۷ MHz، (ب) تغییرات S21 در فرکانس های ۲۰۴۷ MHz، ۲۱۰۷ MHz و ۲۱۶۶ MHz
 Fig 8. (a) Variations of S21 at frequencies 1927 MHz and 1987 MHz, (b) Variations of S21 at frequencies 2047 MHz, 2107 MHz, and 2166 MHz

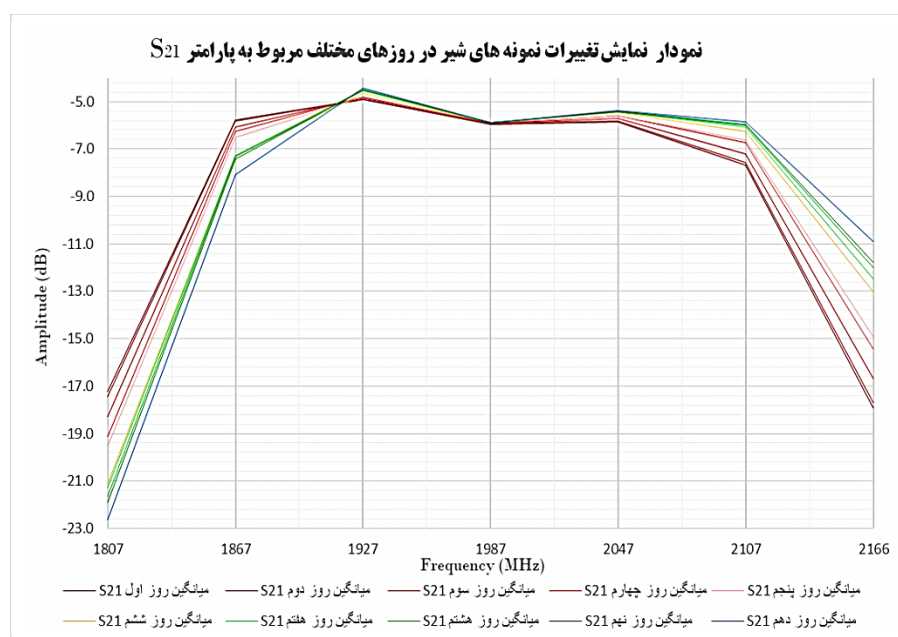


Fig 9. Variations of S21 across all frequencies

تغییرات دی الکتریک شیر در فرآیند فساد را فراهم کرد. با این حال، پاسخ فرکانسی سنسورهای میکرواستریپ به شرایط محیطی مانند دما و رطوبت حساس است، زیرا این عوامل بر ثابت دی الکتریک مؤثر (ϵ_{eff}) بستر و محیط اطراف

برای اطمینان از دقت اندازه گیری های سنسور میکرواستریپ، تمامی آزمایش ها در محیط آزمایشگاهی کنترل شده با دمای ثابت 21°C و رطوبت پایدار انجام شدند. این شرایط کنترل شده، امکان جداسازی اثرات ناشی از



سطح بستر، ثابت دی‌الکتریک محیط را افزایش می‌دهد، زیرا آب دارای ثابت دی‌الکتریک بالایی ($\epsilon_{water} \approx 80$) است. این افزایش، ϵ_{eff} را بالا می‌برد و فرکانس تشدید را کاهش می‌دهد. اثر رطوبت را می‌توان به صورت تقریبی با مدل مخلوط دی‌الکتریک توصیف کرد [۱۵]

$$\epsilon_{eff} \approx \epsilon_{eff,0} + \Delta\epsilon_{humidity} \cdot f_{water} \quad (7)$$

که در آن $\epsilon_{eff,0}$ ثابت دی‌الکتریک مؤثر در شرایط خشک، $\Delta\epsilon_{humidity}$ تغییر ناشی از رطوبت، و f_{water} کسر حجمی آب در محیط است. این رابطه نشان می‌دهد که افزایش رطوبت نسبی (مانند ۳۰٪ به ۷۰٪) می‌تواند ϵ_{eff} را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

تغییرات ϵ_{eff} ناشی از دما یا رطوبت، فرکانس تشدید را جابه‌جا می‌کند (معادله ۲) [۱۴]. کاهش ϵ_{eff} (ناشی از افزایش دما) باعث افزایش f_r می‌شود، در حالی که افزایش ϵ_{eff} (ناشی از رطوبت) فرکانس را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، برای سنسور با $f_r = 2166$ MHz و $\epsilon_{eff} \approx 3.55$ ، کاهش ۰/۱ در ϵ_{eff} می‌تواند f_r را حدود ۳۰ MHz افزایش دهد، که در اندازه‌گیری‌های S21 قابل توجه است.

برای اطمینان از عملکرد پایدار در کاربردهای عملی، کالیبراسیون سنسور در شرایط دمایی و رطوبتی مختلف پیشنهاد می‌شود. این کالیبراسیون شامل اندازه‌گیری پاسخ S21 در بازه‌های دما (مانند ۱۵°C تا ۳۰°C) و رطوبت (۳۰٪ تا ۷۰٪) و ایجاد مدل جبران‌سازی است. مدل می‌تواند از جدول جستجو یا توابع پلی‌نومیل استفاده کند تا اثرات محیطی بر S21 خنثی شوند. [۱۵] این روش در کاربردهای مشابه سنسورهای میکروویو، مانند تشخیص غلظت مایعات، موفقیت‌آمیز بوده است. در این مطالعه، آزمایش‌ها در شرایط کنترل شده انجام شدند تا اثرات فساد شیر بررسی شود. با این حال، آزمایش‌های آینده برای ارزیابی تکرارپذیری سنسور در شرایط محیطی متغیر و توسعه پروتکل کالیبراسیون برنامه‌ریزی شده‌اند. این رویکرد، قابلیت اطمینان سنسور را در محیط‌های صنعتی، مانند خطوط تولید لبنی، تضمین می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که در فرکانس‌های مختلف، (مانند ۱۸۰۷ MHz کاهش دامنه S21 و ۱۹۲۷ MHz)

تأثیر می‌گذارند [۱۴]. فرکانس تشدید (f_r) یک رزوناتور مایکرواستریپ با معادله ۱ زیر محاسبه می‌شود. ثابت دی‌الکتریک مؤثر به صورت تقریبی با رابطه زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

که در آن ϵ_r ثابت دی‌الکتریک نسبی بستر (برای RT/Duroid 4003، $\epsilon_r = 3.5$)، h ضخامت بستر، و w عرض نوار مایکرواستریپ است. این رابطه نشان می‌دهد که ϵ_{eff} به خواص بستر و ساختار سنسور وابسته است.

تغییرات دما از دو طریق بر ϵ_{eff} تأثیر می‌گذارند:

۱. انبساط یا انقباض حرارتی بستر: افزایش دما باعث انبساط حرارتی بسترمانند RT/Duroid 4003 با ضریب انبساط حرارتی حدود ۱۷ ppm/°C می‌شود، که طول رزوناتور (L) را افزایش می‌دهد. این تغییر در معادله فرکانس تشدید باعث کاهش f_r می‌شود، مگر اینکه اثر تغییر ϵ_{eff} غالب باشد.

۲. تغییر در ϵ_r : افزایش دما معمولاً باعث کاهش جزئی ϵ_r می‌شود، زیرا تحرک مولکولی در ماده دی‌الکتریک افزایش می‌یابد و پلاریزاسیون دی‌الکتریک کاهش می‌یابد [۱۴]. به عنوان مثال، برای RT/Duroid 4003، افزایش دما از ۲۰°C به ۳۰°C ممکن است ϵ_r را حدود ۰/۱ تا ۰/۰۵ کاهش دهد (بسته به مشخصات ماده)، که منجر به کاهش ϵ_{eff} و افزایش f_r می‌شود. رابطه تغییرات ϵ_{eff} با دما را می‌توان به صورت تقریبی با ضریب حرارتی ثابت دی‌الکتریک (α_ϵ) بیان کرد:

$$\epsilon_r(T) = \epsilon_r(T_0)[1 + \alpha_\epsilon(T - T_0)] \quad (6)$$

که در آن $\epsilon_r(T)$ ثابت دی‌الکتریک در دمای (T)، $\epsilon_r(T_0)$ ثابت دی‌الکتریک در دمای مرجع (مانند ۲۱°C)، و α_ϵ ضریب حرارتی ثابت دی‌الکتریک معمولاً در حدود ۵۰- تا ۱۰۰ ppm/°C برای مواد مانند (RT/Duroid) است. این تغییر در ϵ_r مستقیماً ϵ_{eff} را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

تأثیر رطوبت بر رطوبت با نفوذ به محیط اطراف سنسور یا

پایین می‌آورد [۱۶]. این کاهش در فرکانس‌های بالاتر (مانند ۱۹۲۷ MHz) غالب است، زیرا پروتئین‌های تجزیه شده پرمیتوئته کمتری دارند. کاهش ε_{eff} فرکانس تشدید را افزایش می‌دهد و می‌تواند دامنه S21 را افزایش دهد (شکل ۷).

برای مدل‌سازی کمی، فرض می‌کنیم ε_r شیر به pH و غلظت اسید لاکتیک ([LA]) وابسته است. رابطه تقریبی با مدل مخلوط دی‌الکتریک به صورت زیر است [۱۶]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r,0} + \sum_i f_i \varepsilon_{r,i} \quad (۸)$$

که در آن $\varepsilon_{r,0}$ ثابت دی‌الکتریک شیر تازه، f_i کسر حجمی جزء شیمیایی (i) (مانند اسید لاکتیک)، و $\varepsilon_{r,i}$ ثابت دی‌الکتریک آن جزء است. کاهش pH با افزایش [LA] رابطه تقریبی خطی دارد:

$$pH \approx pH_0 - k \cdot [LA] \quad (۹)$$

که در آن $pH_0 \approx 6.6$ (pH شیر تازه)، k ضریب تجربی (حدود ۰/۲-۰/۱ L/mol) و [LA] غلظت اسید لاکتیک (mol/L) است. افزایش [LA] باعث افزایش ε_r و در نتیجه ε_{eff} می‌شود، که فرکانس تشدید را کاهش می‌دهد (معادله ۲)

تغییرات S21 به $\Delta\varepsilon_{eff}$ وابسته است. رابطه تجربی زیر برای تغییرات S21 پیشنهاد می‌شود:

$$\Delta S21(dB) \approx \alpha \cdot \Delta\varepsilon_{eff} \quad (۱۰)$$

که در آن α ضریب حساسیت سنسور است (وابسته به فرکانس و طراحی سنسور). برای فرکانس ۱۸۰۷ MHz، داده‌ها نشان داد که $\Delta S21 \approx -5.414, dB$ است، که با افزایش ε_{eff} (ناشی از اسید لاکتیک) هم‌خوانی دارد. در فرکانس ۱۹۲۷ MHz، $\Delta S21 \approx +0.470, dB$ با کاهش ε_{eff} (ناشی از تجزیه پروتئین‌ها) سازگار است. فرکانس‌های پایین‌تر (مانند ۱۸۰۷ MHz) به تغییرات ناشی از اسید لاکتیک حساس‌تر هستند، در حالی که فرکانس‌های بالاتر (مانند ۱۹۲۷ MHz) به تجزیه پروتئین‌ها پاسخ بیشتری نشان می‌دهند [۳]. این مدل تقریبی است، زیرا pH و [LA] به صورت مستقیم در این مطالعه اندازه‌گیری نشدند. برای

افزایش دامنه S21، رفتارهای متفاوتی در پاسخ فرکانسی سنسور میکرواستریپ مشاهده شده است. این تفاوت‌ها به تغییرات خواص دی‌الکتریک شیر ناشی از فرآیندهای شیمیایی فساد، از جمله تجزیه لاکتوز به اسید لاکتیک و تغییرات ساختار پروتئینی، نسبت داده می‌شود. در این بخش، مدلی نظری برای ارتباط بین این تغییرات شیمیایی و ثابت دی‌الکتریک مؤثر (ε_{eff}) ارائه می‌شود و رابطه کمی بین پارامترهای شیمیایی (مانند pH و غلظت اسید لاکتیک) و تغییرات S21 بررسی می‌شود.

خواص دی‌الکتریک شیر به ترکیب شیمیایی آن، شامل آب (حدود ۸۷٪)، لاکتوز، پروتئین‌ها، و چربی‌ها، وابسته است [۳]. در فرآیند فساد، فعالیت میکروبی (مانند باکتری‌های لاکتیک) باعث تجزیه لاکتوز به اسید لاکتیک و کاهش pH می‌شود، که بر ثابت دی‌الکتریک نسبی (ε_r) شیر تأثیر می‌گذارد. این تغییر، ε_{eff} سنسور را تغییر می‌دهد (معادله ۳). هنگامی که ε_{eff} تغییر می‌کند، فرکانس تشدید (fr) جابه‌جا می‌شود (معادله ۱)، که بر پارامتر S21 اثر می‌گذارد. جابه‌جایی فرکانس تشدید (Δf_r) با استفاده از نظریه اختلال است (معادله ۲):

تأثیر تغییرات شیمیایی بر (ε_{eff}):

۱. تجزیه لاکتوز به اسید لاکتیک: در فرآیند فساد، لاکتوز ($C_{12}H_{22}O_{11}$) به اسید لاکتیک ($CH_3CH(OH)COOH$) تجزیه می‌شود، که pH شیر را از حدود ۶٫۶ (شیر تازه) به کمتر از ۵٫۵ (شیر فاسد) کاهش می‌دهد [Guo et al., 2010]. اسید لاکتیک دارای ثابت دی‌الکتریک بالاتر (حدود ۲۰-۳۰) در فرکانس‌های میکروویو (نسبت به لاکتوز (حدود ۳-۵) است، که ε_r شیر را افزایش می‌دهد. این افزایش، ε_{eff} را بالا می‌برد و فرکانس تشدید را کاهش می‌دهد، که در فرکانس‌های پایین‌تر (مانند ۱۸۰۷ MHz) باعث افزایش جذب امواج و کاهش دامنه S21 می‌شود (شکل ۶).

۲. تغییرات ساختار پروتئینی: تجزیه پروتئین‌ها (مانند کازئین) به مولکول‌های کوچک‌تر در اثر فعالیت میکروبی، پلاریزاسیون دی‌الکتریک را کاهش می‌دهد و ε_r را



اعتبارسنجی، آزمایش‌های آینده باید شامل اندازه‌گیری‌های شیمیایی (pH و [LA]) همزمان با S21 باشند.

۲.۳. بحث

نتایج این پژوهش توانایی سنسور مایکرواستریپ را در تشخیص دقیق روند فساد شیر از طریق تغییرات دامنه پارامتر S21 تأیید می‌کند. فرکانس‌های ۱۸۰۷ MHz، ۱۸۶۷ MHz، ۲۱۰۷ MHz و ۲۱۶۶ MHz به عنوان نقاط بهینه شناسایی شدند، زیرا تفاوت‌های دامنه در این فرکانس‌ها به مراتب بزرگ‌تر از خطای آزمایش است. به ویژه، فرکانس ۲۱۶۶ MHz با تفاوت دامنه ۲/۹۹ dB و نسبت سیگنال به خطا ۴۵، بالاترین حساسیت را نشان داد. این تغییرات با کاهش ثابت دی‌الکتریک شیر در اثر فعالیت میکروبی، مانند تولید اسید لاکتیک و کاهش pH، همخوانی دارد [۱، ۳]. کاهش دامنه در فرکانس‌های ۱۸۰۷ MHz و ۱۸۶۷ MHz ممکن است به افزایش جذب امواج به دلیل تشکیل ترکیبات اسیدی مربوط باشد، در حالی که افزایش دامنه در فرکانس ۱۹۲۷ MHz می‌تواند ناشی از تجزیه پروتئین‌ها و چربی‌ها باشد که پرمیتویته مؤثر را کاهش می‌دهد [۳].

فرکانس ۱۹۸۷ MHz با تفاوت دامنه ناچیز (۰/۰۶ dB) و نسبت سیگنال به خطا حدود ۲/۷، ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. این رفتار ممکن است به کاهش حساسیت سنسور در این فرکانس یا تداخل‌های ساختاری در ناحیه تشدید نسبت داده شود. بررسی‌های تکمیلی، مانند تحلیل طیف‌سنجی دی‌الکتریک در این فرکانس، می‌تواند دلایل این ضعف را روشن‌تر کند. تنوع در روندهای کاهشی و افزایشی دامنه (S21 شکل‌های ۶ تا ۸) پیچیدگی تعاملات الکترومغناطیسی با ترکیبات شیمیایی شیر را نشان می‌دهد، که انعطاف‌پذیری سنسور را برای کاربردهای مختلف افزایش می‌دهد. مطالعات پیشین در زمینه سنجش مایکروویو عمدتاً بر تشخیص غلظت محلول‌های مایع (مانند آب و نمک [۷] یا گلوکز [۱۱]) یا ناخالصی‌ها در نفت [۹، ۱۰] تمرکز داشته‌اند. در حوزه صنایع غذایی، بررسی خواص دی‌الکتریک شیر گزارش شده است [۳]، اما این مطالعات کمتر به تشخیص روند فساد در بازه‌های زمانی پرداخته‌اند. پژوهش حاضر با ارائه داده‌های

تجربی از ۵ نمونه در بازه ۵ روزه، رویکردی نوآورانه ارائه می‌دهد. برخلاف روش‌های شیمیایی سنتی که زمان‌بر و تهاجمی هستند [۴]، این سنسور امکان تشخیص غیرتهاجمی و بلادرنگ را فراهم می‌کند، مشابه روش‌های تشخیص گلوکز غیرتهاجمی [۱۱]. با این حال، برتری این پژوهش در طراحی ساده و کم‌هزینه سنسور است که برخلاف تجهیزات پیچیده موردنیاز در برخی مطالعات [۵]، کاربرد صنعتی آن را تسهیل می‌کند.

نتایج این پژوهش پتانسیل بالایی برای نظارت بر کیفیت شیر در زنجیره تأمین صنایع غذایی نشان می‌دهد. تشخیص زودهنگام فساد می‌تواند ضایعات غذایی را کاهش داده و ایمنی مصرف‌کنندگان را تضمین کند [۲]. از منظر علمی، این مطالعه کاربرد فناوری مایکروویو را در صنایع غذایی گسترش می‌دهد، که تاکنون کمتر کاوش شده است [۵]. طراحی کم‌هزینه سنسور و دقت بالای آن (نسبت سیگنال به خطا تا ۴۵) امکان پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی را فراهم می‌کند.

تحلیل اضافی نتایج نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های چند فرکانس (مانند ۱۸۰۷ MHz و ۲۱۶۶ MHz) با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۰]، می‌تواند دقت تشخیص را بهبود بخشد. این رویکرد می‌تواند الگوهای پیچیده‌تر در پاسخ‌های فرکانسی را شناسایی کرده و مراحل اولیه فساد را با حساسیت بالاتر تشخیص دهد. علاوه بر این، توسعه اپلیکیشن‌های مبتنی بر این سنسور برای نظارت آنلاین در کارخانجات لبنی می‌تواند فرآیندهای کنترل کیفیت را متحول کند. این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده انجام شد، و عوامل محیطی واقعی (مانند نوسانات دما یا رطوبت) ممکن است بر عملکرد سنسور تأثیر بگذارند. همچنین، نمونه‌ها از یک نوع شیر (۳٪ چربی) تهیه شدند، و تنوع در ترکیبات شیر (مانند شیر کم‌چرب) ممکن است پاسخ‌های متفاوتی ایجاد کند. تحقیقات آتی می‌توانند با آزمایش نمونه‌های متنوع‌تر و در شرایط واقعی، قابلیت تعمیم‌پذیری سنسور را ارزیابی کنند.

هم‌پوشانی فرکانسی سنسور (۱۸۰۷ MHz تا ۲۴۶۶ MHz) با باندهای ارتباطی بی‌سیم ممکن است در محیط‌های صنعتی تداخل ایجاد کند. استفاده از محافظ‌های

(۷,۰۲ dB) حدود ۱۰۵ برابر انحراف استاندارد (۰/۰۶۷) است، که نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری بالای سنسور در این فرکانس است.

حساسیت بالای فرکانس ۲۱۶۶ MHz می‌تواند به طراحی خاص سنسور، شامل ابعاد رزوناتور و بستر RT/Duroid 4003 با ثابت دی‌الکتریک نسبی ۳/۵۵، نسبت داده شود. این فرکانس در ناحیه‌ای قرار دارد که پاسخ سنسور به تغییرات کوچک در ϵ_{eff} (ناشی از تغییرات شیمیایی شیر) بهینه است. برای مثال، افزایش ϵ_{eff} به دلیل تولید اسید لاکتیک، فرکانس تشدید را کاهش می‌دهد و جذب امواج را افزایش می‌دهد، که به کاهش دامنه S21 منجر می‌شود. در مقابل، در فرکانس‌های دیگر مانند ۱۹۸۷ MHz، تفاوت دامنه S21 (۰/۰۸۹ dB) بسیار کمتر است، که نشان‌دهنده حساسیت پایین‌تر به تغییرات دی‌الکتریک در آن فرکانس است.

اگرچه فرکانس ۲۱۶۶ MHz بهینه شناسایی شد، این بهینه بودن ممکن است به ترکیب خاص شیر (۳٪ چربی) و شرایط آزمایش (دمای ۲۱°C) وابسته باشد. برای تأیید این نتایج، آزمایش‌های آینده باید شامل بررسی فرکانس‌های بهینه برای انواع مختلف شیر (مانند کم‌چرب یا پرچرب) و شرایط محیطی متنوع باشد. همچنین، اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای شیمیایی (مانند pH و غلظت اسید لاکتیک) همزمان با S21 می‌تواند دلایل دقیق حساسیت بالای این فرکانس را روشن‌تر کند. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل داده‌های چندفرکانسی نیز می‌تواند به شناسایی فرکانس‌های بهینه دیگر کمک کند. این تحلیل نشان می‌دهد که فرکانس ۲۱۶۶ MHz به دلیل ترکیب ویژگی‌های طراحی سنسور و پاسخ قوی به تغییرات شیمیایی شیر، به‌عنوان فرکانس بهینه برای تشخیص فساد شیر مناسب است. این ویژگی، سنسور را به ابزاری کارآمد برای نظارت بلادرنگ در صنایع غذایی تبدیل می‌کند.

ناحیه فرکانسی کاری سنسور مایکرواستریپ (MHz ۱۸۰۷ تا ۲۴۶۶) با باندهای ارتباطی بی‌سیم، مانند باند ۲,۴ GHz مورد استفاده در WiFi (۲۴۰۰-۲۴۸۳/۵ MHz)، همپوشانی دارد. این همپوشانی می‌تواند در محیط‌های صنعتی، که منابع متعدد امواج الکترومغناطیسی مانند روترهای WiFi، دستگاه‌های بلوتوث، یا تجهیزات مخابراتی

الکترومغناطیسی یا فیلترهای فرکانسی می‌تواند این مشکل را کاهش دهد. جهت‌گیری‌های آتی شامل بررسی سایر مواد غذایی، بهینه‌سازی طراحی سنسور برای کاهش ابعاد، و یکپارچه‌سازی با سیستم‌های نظارت آنلاین است. مدل‌سازی تغییرات شیمیایی شیر (مانند غلظت لاکتوز) در ارتباط با پاسخ‌های فرکانسی نیز می‌تواند درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های فساد فراهم کند.

نتایج این پژوهش نشان داد که فرکانس ۲۱۶۶ MHz بالاترین حساسیت را در تشخیص روند فساد شیر ارائه می‌دهد، با تفاوت دامنه S21 برابر با ۷/۰۲ dB بین نمونه‌های تازه و فاسد و نسبت سیگنال به خطا حدود ۱۰۵. این فرکانس به دلایل نظری و تجربی به‌عنوان فرکانس بهینه شناسایی شد. فرکانس ۲۱۶۶ MHz در مرکز ناحیه گذردهی اول سنسور مایکرواستریپ (۱۸۰۷ MHz تا ۲۴۶۶ MHz) قرار دارد، جایی که پاسخ فرکانسی سنسور (پارامتر S21) به دلیل طراحی دوبانده و تقویت تعامل میدان الکترومغناطیسی با نمونه شیر، حداکثر حساسیت را نشان می‌دهد [۱۴]. در این فرکانس، میدان الکترومغناطیسی در نزدیکی سنسور قوی‌تر است، که باعث می‌شود تغییرات در ثابت دی‌الکتریک مؤثر (ϵ_{eff}) ناشی از نمونه شیر، تأثیر قابل‌توجهی بر فرکانس تشدید (fr) داشته باشد (معادله ۱). جابه‌جایی فرکانس تشدید به دلیل تغییرات ϵ_{eff} با استفاده از نظریه اختلال توضیح داده می‌شود (معادله ۲). این ویژگی طراحی سنسور، حساسیت آن را در فرکانس ۲۱۶۶ MHz به تغییرات دی‌الکتریک شیر افزایش می‌دهد.

از نظر تجربی، تغییرات شیمیایی شیر در فرآیند فساد، مانند تولید اسید لاکتیک و تجزیه پروتئین‌ها، در فرکانس ۲۱۶۶ بیشترین اثر را بر ϵ_{eff} دارند. تولید اسید لاکتیک ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$) با ثابت دی‌الکتریک بالا (حدود ۲۰-۳۰) در فرکانس‌های مایکروویو باعث افزایش ϵ_{eff} می‌شود، در حالی که تجزیه پروتئین‌ها (مانند کازئین) به مولکول‌های کوچکتر، ϵ_{eff} را کاهش می‌دهد [۳، ۱۶]. در فرکانس ۲۱۶۶ MHz، تعادل بین این دو اثر (افزایش ϵ_{eff} به دلیل اسید لاکتیک و کاهش آن به دلیل تجزیه پروتئین‌ها) باعث جابه‌جایی قابل‌توجه فرکانس تشدید و تغییر در دامنه S21 می‌شود. داده‌های تجربی نشان داد که تفاوت دامنه S21 در این فرکانس



فرکانس ۲۴۰۰ MHz می‌تواند تداخل WiFi را کاهش دهد [۱۴].

۳. **کالیبراسیون محیطی:** کالیبراسیون سنسور در حضور منابع تداخل شناخته‌شده (مانند سیگنال‌های WiFi) می‌تواند اثرات نویز را جبران کند. این کالیبراسیون شامل اندازه‌گیری پاسخ S21 در شرایط مختلف تداخل و تنظیم مدل‌های جبران‌سازی (مانند جدول جستجو یا توابع پلی‌نومیل) است [۸].

۴. **طراحی آنتن با جهت‌گیری بالا:** استفاده از آنتن‌های میکرواستریپ با الگوی تشعشعی جهت‌دار می‌تواند دریافت سیگنال‌های خارجی را کاهش دهد و تمرکز میدان را بر نمونه شیر افزایش دهد [۱۵].

۵. **اندازه‌گیری تفاضلی:** ثبت S21 در حضور و عدم حضور نمونه شیر و محاسبه تفاوت آن‌ها می‌تواند اثر نویزهای محیطی را کاهش دهد، زیرا نویزهای ثابت در هر دو حالت حذف می‌شوند.

برای ارزیابی تأثیر تداخل در محیط‌های واقعی، آزمایش‌های آینده باید شامل اندازه‌گیری‌های S21 در حضور منابع تداخل واقعی (مانند روترهای WiFi یا دستگاه‌های مخابراتی) باشند. این آزمایش‌ها می‌توانند میزان کاهش دقت سنسور و اثربخشی راهکارهای پیشنهادی مانند محافظ‌ها یا فیلترها را بررسی کنند. همچنین، توسعه الگوریتم‌های پردازش سیگنال برای حذف نویزهای محیطی می‌تواند عملکرد سنسور را بهبود بخشد.

این تحلیل و راهکارهای پیشنهادی، امکان استفاده از سنسور مایکرواستریپ در محیط‌های صنعتی با تداخل‌های الکترومغناطیسی را تسهیل می‌کند و قابلیت اطمینان آن را برای نظارت بلادرنگ کیفیت شیر افزایش می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با طراحی و ارزیابی یک سنسور مایکرواستریپ جدید، روشی نوین و غیرتهاجمی را برای تشخیص بلادرنگ روند فساد شیر ارائه کرد. آزمایش‌ها بر روی پنج نمونه شیر تجاری با چربی ۳٪، تهیه‌شده طی پنج روز متوالی و نگهداری‌شده در دمای ثابت ۲۱°C، نشان داد که سنسور پیشنهادی قادر به شناسایی تغییرات معنادار در دامنه

وجود دارند، باعث تداخل شود و بر دقت اندازه‌گیری‌های پارامتر S21 تأثیر بگذارد. در این بخش، تأثیر احتمالی تداخل امواج و راهکارهای کاهش آن بررسی می‌شود.

آزمایش‌های این پژوهش در محیط آزمایشگاهی کنترل‌شده انجام شدند، جایی که تداخل‌های الکترومغناطیسی محیطی به حداقل رسید. این شرایط امکان جداسازی تغییرات S21 ناشی از خواص دی‌الکتریک شیر را فراهم کرد. با این حال، در محیط‌های صنعتی، سیگنال‌های خارجی در بازه فرکانسی ۱۸۰۷ تا ۲۴۶۶ MHz می‌توانند به‌عنوان نویز در اندازه‌گیری‌های S21 عمل کنند. این نویز می‌تواند فرکانس تشدید (fr) یا دامنه S21 را تغییر دهد، زیرا سیگنال‌های تداخلی بر میدان الکترومغناطیسی در نزدیکی سنسور اثر می‌گذارند [۱۴].

فرکانس تشدید سنسور به ثابت دی‌الکتریک مؤثر (ϵ_{eff}) وابسته است، و تداخل‌های خارجی می‌توانند به‌صورت ظاهری ϵ_{eff} را تغییر دهند، که منجر به جابه‌جایی فرکانس تشدید می‌شود. برای مثال، سیگنال WiFi در فرکانس ۲/۴ GHz ممکن است در فرکانس‌های نزدیک به ۲۱۶۶ MHz (فرکانس بهینه سنسور) نویز ایجاد کند، که می‌تواند دامنه S21 را به‌صورت کاذب تغییر دهد یا نسبت سیگنال به نویز را کاهش دهد. در این مطالعه، نسبت سیگنال به خطای ۱۰۵ در فرکانس ۲۱۶۶ MHz نشان‌دهنده دقت بالای سنسور در شرایط کنترل‌شده است، اما در حضور تداخل‌های قوی، این نسبت ممکن است کاهش یابد.

برای کاهش تأثیر تداخل امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های صنعتی، راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. **محافظ‌های الکترومغناطیسی:** استفاده از محفظه‌های

فلزی یا مواد جاذب امواج (مانند فوم‌های جاذب مایکروویو) اطراف سنسور می‌تواند سیگنال‌های خارجی را تضعیف کند. این محافظ‌ها باید طوری طراحی شوند که امواج در بازه ۱۸۰۷ MHz تا ۲۴۶۶ MHz را مسدود کنند، بدون اینکه بر عملکرد سنسور اثر بگذارند [۱۵].

۲. **فیلترهای فرکانسی:** استفاده از فیلترهای باندگذر یا باند توقف در مدار ورودی/خروجی سنسور می‌تواند سیگنال‌های تداخلی خارج از بازه فرکانسی کاری سنسور را حذف کند. برای مثال، فیلتر باندتوقف در

برای پروژه‌های آینده، چندین پیشنهاد ارائه می‌شود. نخست، آزمایش سنسور در شرایط واقعی صنعتی برای ارزیابی پایداری و مقاومت آن در برابر عوامل محیطی توصیه می‌شود. دوم، توسعه راهکارهایی مانند محافظ‌های الکترومغناطیسی یا فیلترهای فرکانسی می‌تواند تداخل‌های فرکانسی را کاهش دهد. سوم، بررسی انواع متنوع‌تر شیر (مانند کم‌چرب یا پرچرب) و سایر مواد غذایی (مانند آب‌میوه یا محصولات لبنی) می‌تواند کاربردهای سنسور را گسترش دهد. چهارم، بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته، مانند شبکه‌های عصبی، برای تحلیل داده‌های چندفرکانسی می‌تواند دقت تشخیص را بهبود بخشیده و مراحل اولیه فساد را با حساسیت بالاتر شناسایی کند. پنجم، بهینه‌سازی طراحی سنسور برای کاهش ابعاد و هزینه، همراه با یکپارچه‌سازی با سیستم‌های نظارت آنلاین، می‌تواند تجاری‌سازی آن را تسریع کند. در نهایت، مدل‌سازی دقیق‌تر تغییرات شیمیایی شیر در ارتباط با پاسخ‌های فرکانسی می‌تواند درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های فساد فراهم کند. این پژوهش با ارائه یک روش غیرتهاجمی و کارآمد، گامی مهم در توسعه فناوری‌های نوین برای نظارت بر کیفیت مواد غذایی برمی‌دارد. با پیگیری پیشنهادات ارائه‌شده، این سنسور می‌تواند به ابزاری کلیدی در بهبود ایمنی غذایی، کاهش ضایعات، و ارتقای پایداری در صنایع غذایی تبدیل شود.

پارامتر S21 در بازه فرکانسی ۱۸۰۷ MHz تا ۲۱۶۶ MHz است. فرکانس‌های ۱۸۰۷ MHz، ۱۸۶۷ MHz، ۲۱۰۷ MHz، و به‌ویژه ۲۱۶۶ MHz به‌عنوان نقاط بهینه تشخیص شناسایی شدند، با تفاوت دامنه ۲/۹۹ dB در فرکانس ۲۱۶۶ MHz بین نمونه‌های تازه و فاسد. این تفاوت، با میانگین انحراف استاندارد ۰/۰۶۷ dB و نسبت سیگنال به خطا حدود ۴۵ دقت و قابلیت اطمینان بالای سنسور را تأیید می‌کند. این نتایج نشان‌دهنده توانایی سنسور در تشخیص تغییرات خواص دی‌الکتریک شیر ناشی از فرآیندهای شیمیایی و میکروبی فساد، مانند تجزیه پروتئین‌ها و تولید ترکیبات اسیدی، است. اهمیت این یافته‌ها در ارائه روشی سریع، کم‌هزینه، و غیرمخرب برای نظارت بر کیفیت شیر نهفته است. این سنسور، برخلاف روش‌های آزمایشگاهی سنتی که زمان‌بر و پرهزینه هستند، امکان پایش بلادرنگ را در زنجیره تأمین، از تولید تا توزیع، فراهم می‌کند. طراحی ساده و ابعاد فشرده سنسور ($25 \times 40 \text{ mm}^2$) قابلیت یکپارچه‌سازی آن با سیستم‌های خودکار خطوط تولید را تسهیل می‌کند، که می‌تواند ضایعات غذایی را کاهش داده و ایمنی مصرف‌کنندگان را تضمین کند. از منظر علمی، این پژوهش کاربرد فناوری میکروویو را در نظارت بر کیفیت مواد غذایی گسترش می‌دهد و رویکردی نوآورانه برای تشخیص غیرتهاجمی فساد ارائه می‌کند. توانایی سنسور در شناسایی مراحل مختلف فساد، از تازه تا فاسد، آن را به ابزاری ارزشمند برای استانداردسازی فرآیندهای کنترل کیفیت تبدیل می‌کند.

منابع:

- [1] Sadat, A., Mustajab, P., Khan, I.A. (2006). Determining the adulteration of natural milk with synthetic milk using ac conductance measurement. *J. Food Eng.*, 77, 472–477.
DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2005.06.062](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.062)
- [2] Kim, B.S., Lee, M., Kim, J.Y., Jung, J.Y., Koo, J. (2016). Development of a freshness-assessment model for a real-time online monitoring system of packaged commercial milk in distribution. *J. Food Sci. Technol.*, 68, 532–540.
DOI: [10.1016/j.lwt.2015.12.049](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.049)
- [3] Guo, W., Zhu, X., Liu, H., Yue, R., Wang, Sh. (2010). Effects of milk concentration and freshness on microwave dielectric properties. *J. Food Eng.*, 99, 344–350.
DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2010.03.015](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.015)
- [4] Sadat, A., Mustajab, P., Khan, I.A. (2006). Determining the adulteration of natural milk with synthetic milk using ac conductance measurement. *J. Food Eng.*, 77, 472–477.
DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2005.06.062](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.062)
- [5] Gennarelli, G., Romeo, S., Soldovieri, F., Scarfi, M.R. (2013). A microwave resonant sensor for concentration measurements of liquid solutions. *IEEE Sensors J.*, 13(4), 1857–1864.
DOI: [10.1109/JSEN.2013.2244035](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2244035)
- [6] Moradkhani, A., Hasannejad, O., Baghelani, M. (2022). An artificial intelligence assisted distance variation robust microwave sensor for biofuel analysis applications. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 32(12).
DOI: [10.1109/LMW C.2022.3177403](https://doi.org/10.1109/LMW C.2022.3177403)



- [7] Mao, Y.J., Zhang, Y.J., Chen, Z.R., Tong, M.S. (2021). A noncontact microwave sensor based on cylindrical resonator for detecting concentration of liquid solutions. *IEEE Sensors J.*, 21(2). DOI: [10.1109/JSEN.2020.3016290](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3016290)
- [8] Wiltshire, B.D., Zarifi, M.H. (2019). 3-D printing microfluidic channels with embedded planar microwave resonators for RFID and liquid detection. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 29(1). DOI: [10.1109/LMWC.2018.2883715](https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2883715)
- [9] Baghelani, M., Hosseini, N., Daneshmand, M. (2021). Non-contact real-time water and brine concentration monitoring in crude oil based on multi-variable analysis of microwave resonators. *Measurement*, 177, 109286. DOI: [10.1016/j.measurement.2021.109286](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109286)
- [10] Sattari, M.A., Hayati, M. (2024). Accurate and non-contact measurement of volume percentages of oil-water fluids using microstrip sensors independent of the volume of sample using artificial neural network. *Meas. Instrum.*, 97, 102621. DOI: [10.1016/j.flowmeasinst.2024.102621](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102621)
- [11] Omer, A.E., Shaker, G., Safavi-Naeini, S. (2020). Portable radar-driven microwave sensor for intermittent glucose levels monitoring. *IEEE Sens. Lett.*, 4(5). DOI: [10.1109/LSSENS.2020.2986208](https://doi.org/10.1109/LSSENS.2020.2986208)
- [12] Jain, M.C., Nadaraja, A.V., Vizcaino, B.M., Roberts, D.J., Zarifi, M.H. (2020). Differential microwave resonator sensor reveals glucose-dependent growth profile of *E. coli* on solid agar. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 30(5). DOI: [10.1109/LMWC.2020.2980756](https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.2980756)
- [13] Abbasi, Z., Baghelani, M., Nosrati, M., Sanati-Nezhad, A., Daneshmand, M. (2019). Real-time non-contact integrated chipless RF sensor for disposable microfluidic applications. *IEEE J. Electromagn. RF Microwaves Med. Biol.* DOI: [10.1109/JERM.2019.2954219](https://doi.org/10.1109/JERM.2019.2954219)
- [14] Pozar, D. M. (2011). *Microwave Engineering*. 4th ed. John Wiley & Sons, Chapter 6.
- [15] Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. John Wiley & Sons.
- [16] Nelson, S. O. (2008). Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Res. Agric. Eng.*, 54(2), 104-112.

Research Article **Design and Fabrication of a Novel Electronic Sensor for Detecting Spoilage in Milk**

Ali Khoshchehre¹, Mohammad Amir Sattari^{2*}, Omar Hamed Shah³, Gholamhossein Roshani^{4*}

1. Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

2*. Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

3. Department of Mechanical Engineering and Artificial Intelligence Research Center, Ajman University, Ajman, United Arab Emirates

4*. Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

(Received 11 July 2025, Received in revised form 23 July 2025, Accepted 28 July 2023)

Introduction: The growing global demand for safe, high-quality food has intensified the need for efficient quality control in the food industry, particularly for perishable products like milk. As a staple rich in proteins, fats, lactose, and vitamins, milk is highly susceptible to microbial spoilage, posing health risks, especially for vulnerable groups such as children and the elderly. Traditional methods for assessing milk quality, primarily chemical and microbiological tests, are reliable but involve high costs, time-consuming procedures, and sample destruction, limiting their applicability for real-time monitoring in supply chains. Microwave sensing technology, particularly microstrip sensors, offers a promising alternative due to its non-invasive nature, rapid response, and cost-effectiveness. These sensors detect quality changes by analyzing frequency response variations driven by the dielectric properties of the material under test. Although microwave sensors have been successfully applied in fields such as biomedicine and the oil industry, their use in food quality monitoring—particularly for detecting milk spoilage—remains underexplored. This study aims to design, fabricate, and evaluate a novel microstrip sensor to detect milk spoilage trends in real-time using microwave signals. By providing a non-destructive, low-cost, and rapid method, this research addresses the limitations of conventional techniques and contributes to improving food safety and sustainability in the dairy industry.

Materials and methods: A microstrip sensor with two passband regions (1807–2466 MHz and 3604–4426 MHz) was designed using Advanced Design System (ADS) software and fabricated on an RT/Duroid 4003 substrate (dielectric constant 3.55, thickness 0.787 mm). The sensor, with dimensions 40×25 mm², was modeled with an equivalent LC circuit to simulate resonance behavior, accounting for parasitic effects. Ten commercial milk samples (3% fat) were collected over ten consecutive days and stored at a controlled temperature of 21°C. Each 180 ml sample was placed in a polystyrene container (200 ml capacity, 1 mm wall thickness) positioned in the sensor's near-field range to ensure consistent dielectric interaction. The scattering parameter S₂₁ (transmission coefficient) was measured using a NanoVNA vector network analyzer up to 6 GHz, with data recorded via NanoVNA software and exported to Excel for analysis. Each sample was tested five times, yielding 50 measurements to minimize noise. The first passband (1807–2466 MHz) was selected for analysis due to significant S₂₁ variations. Measurements were conducted in a controlled environment to reduce external interference, with sample temperature verified using a digital thermometer. The sensor's frequency response was compared to simulations to validate design accuracy.

Results and discussion: The experiments involved ten milk samples tested over ten days, with S₂₁ measurements revealing significant amplitude changes in the first passband (1807–2466 MHz). The most pronounced sensitivity was observed at 2166 MHz, where the amplitude difference between the freshest (day

*. Corresponding author email: mohamadmir.sattari@gmail.com, hosseinroshani@yahoo.com



10) and most spoiled (day 1) samples reached 7.02 dB, approximately 105 times the average standard deviation (0.067 dB), indicating high resolution and statistical significance. Other frequencies, such as 1807 MHz (5.414 dB difference) and 2106 MHz (1.830 dB difference), also showed reliable trends, while 1987 MHz exhibited minimal sensitivity (0.089 dB difference). These variations correlate with changes in milk's dielectric properties due to microbial activity, such as lactic acid production and pH reduction, which decrease the effective permittivity. The observed amplitude decrease at 1807 MHz may result from increased wave absorption by acidic compounds, whereas amplitude increases at 1927 MHz could stem from protein and fat degradation, reducing permittivity.

The sensor's high signal-to-noise ratio (up to 105) and low standard deviation (0.017–0.074 dB) confirm its precision. Compared to traditional chemical tests, which are invasive and time-consuming, this sensor offers real-time, non-destructive monitoring, aligning with non-invasive glucose detection methods in biomedical applications. However, its simple, low-cost design enhances industrial applicability, unlike complex setups in prior studies. The frequency range overlaps with wireless communication bands, potentially causing interference in industrial settings, which could be mitigated using electromagnetic shielding or frequency filters. Future enhancements include integrating multi-frequency data with machine learning, such as neural networks, to improve detection accuracy and identify early spoilage stages. Testing diverse milk types (e.g., low-fat) and real-world conditions will further validate the method's generalizability. This sensor's ability to detect spoilage trends supports its potential for in-line quality control, reducing food waste and enhancing consumer safety.

Conclusions: This study successfully developed a non-invasive microstrip sensor for real-time milk spoilage detection, demonstrating significant S21 amplitude changes at 1807, 1867, 2106, and 2166 MHz, with the highest sensitivity at 2166 MHz (7.02 dB difference, signal-to-noise ratio ~105). The sensor's low-cost, compact design (40×25 mm²) and high precision (standard deviation 0.067 dB) make it a viable alternative to time-consuming, destructive chemical tests. It enables rapid quality monitoring in dairy supply chains, potentially reducing waste and ensuring consumer safety. Future research should focus on real-world testing, diverse milk types, and integration with machine learning for enhanced accuracy. Electromagnetic shielding can address frequency interference. This research advances microwave sensing in food quality control, offering a scalable solution for industrial applications.

Keywords: *Microstrip sensor, milk spoilage, microwave sensing, milk quality, S21 parameter, electromagnetic waves*

How to cite this article:

Khoshchehre, A., Sattari, M.A., Shah, O.H., Roshani, Gh.h., (2025). Design and Fabrication of a Novel Electronic Sensor for Detecting Spoilage in Milk *Innovative Food Technologies*, 12(4), 353-372
DOI: <http://dx.doi.org/10.22104/IFT.2025.7689.2220>