

Journal Pre-proofs

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

Ali Khoshchehre, Mohammad Amir Sattari, Omar Hamed Shah, Gholamhossein Roshani

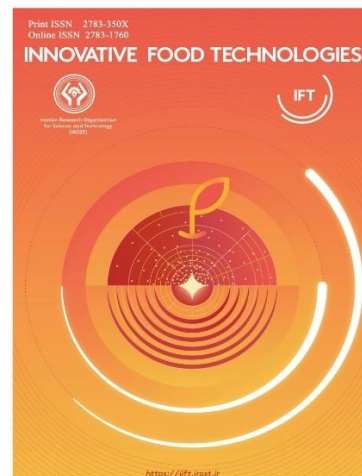
DOI: <https://doi.org/10.22104/IFT.2025.7689.2220>

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 11 June 2025

Revised Date: 23 July 2025

Accepted Date: 28 July 2025



Please cite this article as: Ali Khoshchehre, Mohammad Amir Sattari, Omar Hamed Shah, Gholamhossein Roshani, Design and Fabrication of a Novel Electronic Sensor for Detecting Spoilage in Milk, *Innovative Food Technologies* (2025), doi: <https://doi.org/10.22104/IFT.2025.7689.2220>

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2023 The Author(s). Published by irost.org.

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

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

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

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

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

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

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، زمان‌بر بودن و نیاز به تخریب نمونه همراه هستند. در مقابل، فناوری سنجش میکروویو، به ویژه با استفاده از سنسورهای میکرواستریپ، 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 میکرواستریپ جدید برای تشخیص روند فساد در شیر با استفاده از امواج میکروویو انجام شده است. یک سنسور میکرواستریپ 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 (۲۱°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 (فاسدترین) نمونه ۷/۰۲ dB بود. این میزان اختلاف، حدود ۱۰۵ برابر انحراف استاندارد (۰.۰۶۷ دسی‌بل) بود، که نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری بالا و معناداری نتایج است. فرکانس‌های دیگری مانند ۱۸۰۷ MHz نیز روند مشابه و قابل اتکایی را نشان دادند. سنسور میکرواستریپ 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.

کلیدواژه‌ها: سنسور میکرواستریپ، فساد شیر، سنجش میکروویو، کیفیت شیر، پارامتر S_{21} ، امواج الکترومغناطیس

* hosseinroshani@yahoo.com

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 S_{21}) 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*، کولای 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 قابل‌اجرا برای تشخیص بلادرنگ فساد شیر، شکاف قابل‌توجهی 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 (S_{21}) را در فرکانس‌های خاص، به‌ویژه ۲/۲ GHz، نشان داد که تأییدکننده دقت و قابلیت اطمینان سنسور است. این نتایج نه تنها امکان تشخیص زود هنگام 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 می‌توانند استانداردهای کنترل کیفیت را بهبود بخشند، ضایعات غذایی را کاهش دهند و ایمنی مصرف‌کنندگان را تضمین کنند.

مدلی نظری ارائه شده است که تغییرات شیمیایی، مانند تجزیه لاکتوز به اسید لاکتیک و تغییرات ساختار پروتئینی، را به تغییرات ثابت دی‌الکتریک مؤثر و در نتیجه به تغییرات S_{21} مرتبط می‌کند. این مدل نشان داد که فرکانس‌های مختلف (مانند ۱۸۰۷، ۱۹۲۷، و ۲۱۶۶ مگاهرتز) به جنبه‌های متفاوتی از تغییرات شیمیایی حساس هستند. برای مثال، فرکانس ۱۸۰۷ مگاهرتز به افزایش ϵ_{eff} ناشی از تولید اسید لاکتیک حساس‌تر است، که باعث کاهش دامنه S_{21} می‌شود، در حالی که فرکانس ۱۹۲۷ مگاهرتز به کاهش ϵ_{eff} ناشی از تجزیه پروتئین‌ها پاسخ می‌دهد و دامنه S_{21} را افزایش می‌دهد. [۳، ۱۶] فرکانس ۲۱۶۶ مگاهرتز، با تفاوت دامنه ۷۰۲ دسی‌بل و نسبت سیگنال به خطا ۱۰۵، به دلیل تعادل بین این اثرات شیمیایی، بالاترین حساسیت را نشان داد.

نوآوری‌های کلیدی این پژوهش شامل موارد زیر است:

- **تمرکز بر شیر:** برخلاف مطالعات قبلی که عمدتاً بر مواد غیرغذایی (مانند نفت یا محلول‌های شیمیایی) متمرکز بودند، این مطالعه به‌طور خاص شیر را بررسی کرد، که چالش‌های منحصربه‌فردی مانند حساسیت به فساد میکروبی دارد.
 - **تحلیل چندفرکانسی:** بررسی تغییرات S_{21} در چندین فرکانس، امکان شناسایی الگوهای پیچیده تغییرات شیمیایی را فراهم کرد، که در مقایسه با روش‌های تک‌فرکانسی، دقت و جامعیت بیشتری ارائه می‌دهد.
 - **طراحی ساده و کاربرد صنعتی:** سنسور پیشنهادی با ابعاد فشرده (۴۰×۲۵ میلی‌متر) 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 S_{21} با استفاده از مدل مخلوط دی‌الکتریک و رابطه تجربی pH ارائه شد. این تحلیل، ارتباط بین تغییرات شیمیایی و پارامترهای الکترومغناطیسی را روشن می‌کند و پایه‌ای برای توسعه سنسورهای پیشرفته‌تر فراهم می‌کند. در ادامه، این پژوهش جزئیات طراحی سنسور، روش‌شناسی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج را ارائه می‌دهد تا قابلیت‌های این روش نوین روشن‌تر شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. طراحی و ساخت سنسور مایکرواستریپ

سنسورهای مایکرواستریپ به دلیل طراحی ساده، ابعاد فشرده و هزینه پایین، ابزارهایی کارآمد برای سنجش خواص مواد، به‌ویژه در کاربردهای صنایع غذایی، محسوب می‌شوند. این سنسورها شامل یک نوار هادی هستند که توسط یک بستر دی‌الکتریک از صفحه زمین جدا شده و انتشار امواج الکترومغناطیسی را ممکن می‌سازند. حساسیت بالای این سنسورها به تغییرات خواص دی‌الکتریک مواد مجاور، آن‌ها را برای تشخیص تغییرات شیمیایی در مواد غذایی، مانند فساد شیر، مناسب می‌کند. در این پژوهش، یک سنسور

مایکرواستریپ برای تشخیص غیرتهاجمی روند فساد شیر طراحی و ساخته شده است که با اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های فرکانسی ناشی از تغییرات دی‌الکتریک نمونه، امکان شناسایی مراحل مختلف فساد را فراهم می‌آورد.

ارتباط بین ویژگی‌های 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 می‌گیرد، ثابت دی‌الکتریک محیط تغییر کرده و بر پرمیتویته مؤثر ساختار مایکرواستریپ تأثیر می‌گذارد. فرکانس تشدید یک رزوناتور مایکرواستریپ نیم‌موج با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود: [۱۴]

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (۱)$$

که در آن (c) سرعت نور در خلأ، (L) طول رزوناتور، و (ϵ_{eff}) ثابت دی‌الکتریک مؤثر بستر و ماده بالای آن است. با تغییر ویژگی‌های شیمیایی شیر در اثر فساد، (ϵ_{eff}) تغییر می‌کند و فرکانس تشدید (f_r) جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی فرکانسی مبنای تشخیص فساد شیر در این پژوهش است.

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

$$\Delta f \approx -\frac{f_r}{2} \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_{eff}} \quad (۲)$$

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 مایکرواستریپ را برای کاربرد حاضر ایده‌آل می‌سازد. سنسور پیشنهادی یک ساختار مایکرواستریپ با یک پورت ورودی و یک پورت خروجی است که در نرم‌افزار Advanced Design System (ADS) طراحی و شبیه‌سازی شده است (شکل ۱، بخش الف). این سنسور در دو بازه فرکانسی گذردهی دارد: ناحیه اول از ۱۸۰۷ مگاهرتز تا ۲۴۶۶ مگاهرتز و ناحیه دوم از ۳۶۰۴ مگاهرتز تا ۴۴۲۶ مگاهرتز. گذردهی کامل در ناحیه اول در بازه ۲۱۶۶ تا ۲۲۸۶ مگاهرتز و در ناحیه دوم در بازه ۴۰۲۳ تا ۴۲۰۳ مگاهرتز 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.

بستر مورد استفاده RT/Duroid 4003 با ثابت دی‌الکتریک نسبی 3.55 (ϵ_r) و ضخامت ۰.۷۸۷ میلی‌متر 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 مایکرواستریپ تنظیم شده‌اند. مقادیر سلف (L) و خازن (C) معادل با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند [۱۵].

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

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

که در آن (Z_0) امپدانس مشخصه خط میکرواستریپ، (λ_g) 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 نرم افزار ADS به کار رفتند. مقادیر نمونه برای مدار معادل در فرکانس 2.2 GHz شامل ($L1 = 0.3$ nH)، ($L2 = 4.8$ nH)، ($C1 = 1.5$ pF)، و همچنین ($C2 = 2.0$ pF) است. مقایسه پاسخ فرکانسی مدار معادل LC و طرح میکرواستریپ در شکل ۲ (بخش ب) نشان داده شده است. مدار LC رفتارهای رزونانسی اصلی و اثرات کوپلینگ طرح را به خوبی بازنمایی می کند، اما تفاوت های جزئی به دلیل اثرات پارازیتی و توزیع شده در طرح میکرواستریپ مشاهده می شود که در مدل LC به طور کامل قابل مدل سازی نیستند.

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) 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 میلی متر مربع است.

۲-۲. ساختار اندازه گیری

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 ۳.۵۵ و ضخامت ۰.۷۸۷ mm ساخته شده است. این سنسور دارای دو ناحیه گذردهی فرکانسی است: ناحیه اول از ۱۸۰۷ MHz تا ۲۴۶۶ MHz و ناحیه دوم از ۳۶۰۴ MHz تا ۴۴۲۶ 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.

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 غیر تماسی 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.

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 6 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 درصد 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 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.

نتایج اولیه نشان داد که ناحیه فرکانسی ۱۸۰۷ MHz تا ۲۴۶۶ MHz، که ناحیه گذردهی اول سنسور است، تغییرات معناداری را در پاسخ فرکانسی نمونه های مختلف نشان می دهد. این بازه فرکانسی به عنوان محدوده اصلی برای تحلیل های بعدی انتخاب شد. داده های حاصل از اندازه گیری های پاسخ فرکانسی (S21) برای هر نمونه در فرکانس های منتخب در ناحیه گذردهی اول سنسور (۱۸۰۷ MHz تا ۲۱۶۶ MHz) جمع آوری و میانگین گیری شدند. جدول ۱ میانگین مقادیر دامنه پارامتر S21 (بر حسب دسی بل) را برای ۱۰ نمونه شیر در روزهای مختلف و در هفت فرکانس کلیدی نشان می دهد. هر مقدار میانگین از پنج اندازه گیری برای هر نمونه محاسبه شده است. این جدول داده های خام مورد نیاز برای تحلیل تغییرات دامنه امواج در اثر روند فساد شیر را فراهم می کند و مبنایی برای ارزیابی آماری در بخش های بعدی است. ترتیب نمونه ها از روز اول (کهنه ترین) تا روز دهم (تازه ترین) نشان دهنده تغییرات تدریجی در خواص دی الکتریک شیر در اثر فساد است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج

آزمایش های انجام شده بر روی ۱۰ نمونه شیر تجاری با چربی ۳ درصد، که طی ۱۰ روز متوالی تهیه و در دمای کنترل شده ۲۱°C نگهداری شدند، تغییرات دامنه پارامتر S21 را در ناحیه گذردهی اول سنسور مایکرواستریپ (۱۸۰۷ MHz تا ۲۱۶۶ MHz) نشان می دهند. هر نمونه پنج بار آزمایش شد، که در مجموع ۵۰ اندازه گیری برای تولید داده های قابل اعتماد انجام گرفت. میانگین مقادیر دامنه S21 (بر حسب دسی بل) برای هر نمونه در فرکانس های کلیدی در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول روند تغییرات خواص دی الکتریک شیر را از روز اول (کهنه ترین نمونه) تا روز پنجم (تازه ترین نمونه) نشان می دهد.

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.

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، و ۲۱۶۶ مگاهرتز (به‌ترتیب ۲.۲۹ dB، ۰.۹۴ dB، و ۲.۹۹ dB) به‌مراتب بزرگ‌تر از خطای آزمایش است، که دقت و معناداری نتایج را تأیید می‌کند. به‌ویژه، 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 (شکل‌های ۶ تا ۹) این روند را به‌صورت 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.

برای اطمینان از دقت اندازه‌گیری‌های سنسور مایکرواستریپ، تمامی آزمایش‌ها در محیط آزمایشگاهی کنترل‌شده با دمای ثابت ۲۱ درجه سانتی‌گراد و رطوبت پایدار انجام شدند. این شرایط کنترل‌شده، امکان جداسازی اثرات ناشی از تغییرات دی‌الکتریک شیر در فرآیند فساد را فراهم کرد. با این حال، پاسخ فرکانسی سنسورهای مایکرواستریپ به شرایط محیطی مانند دما و رطوبت حساس است، زیرا این عوامل بر ثابت دی‌الکتریک مؤثر (ϵ_{eff}) بستر و محیط اطراف تأثیر می‌گذارند [۱۴]. فرکانس تشدید (fr) یک رزوناتور مایکرواستریپ با معادله ۱ زیر محاسبه می‌شود. ثابت دی‌الکتریک مؤثر به‌صورت 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، $\epsilon_r = 3.55$)، (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 (fr) 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]. به‌عنوان مثال، برای RT/Duroid 4003، افزایش دما از ۲۰

به ۳۰ درجه سانتی‌گراد ممکن است ϵ_r را حدود ۰.۰۱ تا ۰.۰۵ کاهش دهد (بسته به مشخصات ماده)، که منجر به کاهش ϵ_{eff} و افزایش (fr) 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 درجه سانتی‌گراد)، 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 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 درصد) 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 fr می‌شود، در حالی که افزایش ϵ_{eff} (ناشی از رطوبت) فرکانس را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، برای سنسور با $fr = 2166 \text{ MHz}$ و $\epsilon_{eff} \approx 3.55$ ، کاهش ۰.۱ در ϵ_{eff} می‌تواند fr را حدود ۳۰ مگاهرتز 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 تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت (۳۰ تا ۷۰ درصد) و ایجاد مدل جبران‌سازی است. مدل می‌تواند از جدول جستجو یا توابع پلی‌نومینال 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 کنترل‌شده انجام شدند تا اثرات فساد شیر بررسی شود. با این حال، آزمایش‌های آینده برای ارزیابی تکرارپذیری سنسور در شرایط محیطی متغیر و توسعه پروتکل کالبراسیون 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 مگاهرتز کاهش دامنه S21 و ۱۹۲۷ مگاهرتز 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 مگاهرتز) 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، پلازاسیون دی‌الکتریک را کاهش می‌دهد و ϵ_r را پایین می‌آورد [۱۶]. این کاهش در فرکانس‌های بالاتر (مانند ۱۹۲۷ مگاهرتز) غالب است، زیرا پروتئین‌های تجزیه‌شده پرمیتوخته 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 ϵ_r با مدل مخلوط دی‌الکتریک به صورت زیر است [۱۶]:

$$\epsilon_r = \epsilon_{r,0} + \sum_i f_i \epsilon_{r,i} \quad (8)$$

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

$$\text{pH} \approx \text{pH}_0 - k \cdot [\text{LA}] \quad (9)$$

که در آن $\text{pH}_0 \approx 6.6$ (pH شیر تازه)، k ضریب تجربی (حدود $0.1-0.2$ 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 $\Delta\epsilon_{eff}$ وابسته است. رابطه تجربی زیر برای تغییرات S21 پیشنهاد می‌شود:

$$\Delta S21(\text{dB}) \approx \alpha \cdot \Delta\epsilon_{eff} \quad (10)$$

که در آن α ضریب حساسیت سنسور است (وابسته به فرکانس و طراحی سنسور). برای فرکانس 1807 مگاهرتز، داده‌ها نشان داد که $\Delta S21 \approx -5.414, \text{dB}$ است، که با افزایش ϵ_{eff} (ناشی از اسید لاکتیک) هم‌خوانی دارد. در فرکانس 1927 مگاهرتز، $\Delta S21 \approx +0.470, \text{dB}$ با کاهش ϵ_{eff} (ناشی از تجزیه پروتئین‌ها) سازگار است. فرکانس‌های پایین‌تر (مانند 1807 مگاهرتز) به تغییرات ناشی از اسید لاکتیک حساس‌تر هستند، در حالی که فرکانس‌های بالاتر (مانند 1927 مگاهرتز) به تجزیه پروتئین‌ها پاسخ بیشتری نشان می‌دهند [۳]. این مدل تقریبی است، زیرا pH و [LA] به‌صورت مستقیم در این مطالعه اندازه‌گیری نشدند. برای اعتبارسنجی، آزمایش‌های آینده باید شامل اندازه‌گیری‌های شیمیایی (pH و [LA]) همزمان با S21 باشند.

۳-۲. بحث

نتایج این پژوهش توانایی سنسور مایکرواستریپ را در تشخیص دقیق روند فساد شیر از طریق تغییرات دامنه پارامتر S21 تأیید می‌کند. فرکانس‌های 1807 MHz، 1867 MHz، 2107 MHz و 2166 MHz به‌عنوان نقاط بهینه شناسایی شدند، زیرا تفاوت‌های دامنه در این فرکانس‌ها به‌مراتب بزرگ‌تر از خطای آزمایش است. به‌ویژه، فرکانس 2166 MHz با تفاوت دامنه 2.99 dB و نسبت سیگنال به خطا 45 ، 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 [۳، ۱]. کاهش دامنه در فرکانس‌های 1807 MHz و 1867 MHz ممکن است به افزایش جذب امواج به دلیل تشکیل ترکیبات اسیدی مربوط باشد، در حالی که افزایش دامنه در فرکانس 1927 MHz می‌تواند ناشی از تجزیه پروتئین‌ها و چربی‌ها باشد که پرمیتوئته مؤثر را کاهش می‌دهد [۳].

فرکانس 1987 MHz با تفاوت دامنه ناچیز (0.06 dB) و نسبت سیگنال به خطا حدود 2.7 ، 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 کنترل شده 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 درصد 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 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 مگاهرتز بالاترین حساسیت را در تشخیص روند فساد شیر ارائه می‌دهد، با تفاوت دامنه S21 برابر ۷۰۲ دسی‌بل 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 مگاهرتز در مرکز ناحیه گذردهی اول سنسور مایکرواستریپ (۱۸۰۷ تا ۲۴۶۶ مگاهرتز) 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 مگاهرتز 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 مگاهرتز 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 میکروویو 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 مگاهرتز، 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 (۷.۰۲ دسی‌بل) حدود ۱۰۵ برابر انحراف استاندارد (۰.۰۶۷ دسی‌بل) است، که نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری بالای سنسور در این فرکانس است.

حساسیت بالای فرکانس ۲۱۶۶ مگاهرتز 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 مگاهرتز، تفاوت دامنه S21 (۰.۸۹ دسی‌بل) بسیار کمتر است، که نشان‌دهنده حساسیت پایین‌تر به تغییرات دی‌الکتریک در آن فرکانس است.

اگرچه فرکانس ۲۱۶۶ مگاهرتز بهینه شناسایی شد، این بهینه بودن ممکن است به ترکیب خاص شیر (۳٪ چربی) و شرایط آزمایش (دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد) 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 مگاهرتز 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 میکرواستریپ (۱۸۰۷ تا ۲۴۶۶ مگاهرتز) با باندهای ارتباطی بی‌سیم، مانند باند ۲.۴ گیگاهرتز مورد استفاده در WiFi (۲۴۰۰-۲۴۸۳/۵ مگاهرتز)، همپوشانی دارد. این همپوشانی می‌تواند در محیط‌های صنعتی، که منابع متعدد امواج الکترومغناطیسی مانند روترهای WiFi، دستگاه‌های بلوتوث، یا تجهیزات مخابراتی 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 مگاهرتز 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 گیگاهرتز ممکن است در فرکانس‌های نزدیک به ۲۱۶۶ مگاهرتز (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 مگاهرتز 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 میکروویو) اطراف سنسور می‌تواند سیگنال‌های خارجی را تضعیف کند. این محافظ‌ها باید طوری طراحی شوند که امواج در بازه ۱۸۰۷ تا ۲۴۶۶ مگاهرتز را مسدود کنند، بدون اینکه بر عملکرد سنسور اثر بگذارند [۱۵]

۲. **فیلترهای فرکانسی:** استفاده از فیلترهای باندگذر یا باندتوقف در مدار ورودی/خروجی سنسور می‌تواند سیگنال‌های تداخلی خارج از بازه فرکانسی کاری سنسور را حذف کند. برای مثال، فیلتر باندتوقف در فرکانس ۲۴۰۰ مگاهرتز 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.

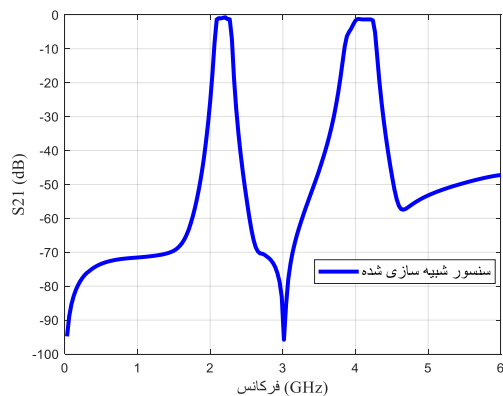
این تحلیل و راهکارهای پیشنهادی، امکان استفاده از سنسور میکرواستریپ در محیط‌های صنعتی با تداخل‌های الکترومغناطیسی را تسهیل می‌کند و قابلیت اطمینان آن را برای نظارت بلادرنگ کیفیت شیر افزایش می‌دهد.

۴. نتیجه گیری

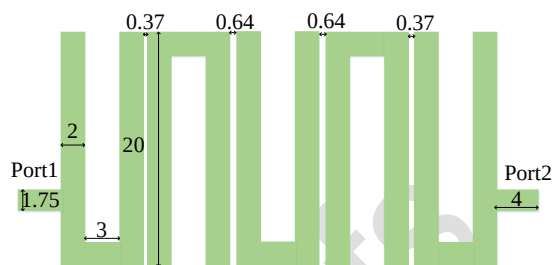
این پژوهش با طراحی و ارزیابی یک سنسور میکرواستریپ جدید، روشی نوین و غیرتهاجمی را برای تشخیص بلادرنگ روند فساد شیر ارائه کرد. آزمایش‌ها بر روی پنج نمونه شیر تجاری با چربی ۳ درصد، تهیه شده طی پنج روز متوالی و نگهداری شده در دمای ثابت ۲۱ درجه سانتی‌گراد، نشان داد که سنسور پیشنهادی قادر به شناسایی تغییرات معنادار در دامنه 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 ۲۰۹۹ dB در فرکانس ۲۱۶۶ MHz بین نمونه‌های تازه و فاسد. این تفاوت، با میانگین انحراف استاندارد ۰۰۰۶۷ 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 (۴۰ × ۲۵ میلی‌متر مربع) 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.

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.

شکل‌ها:

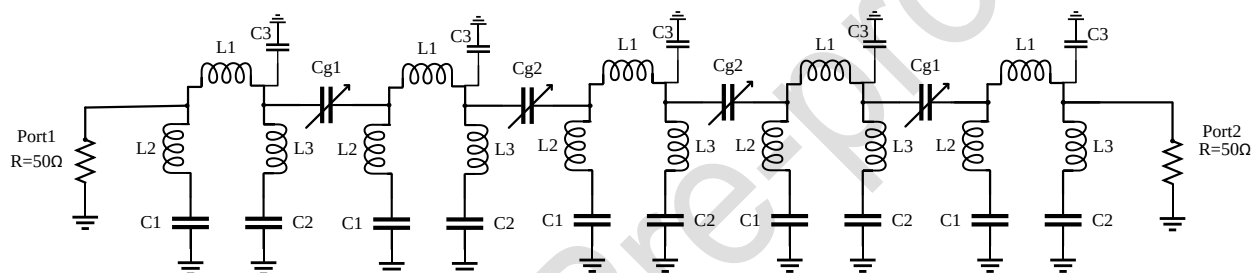


(ب)

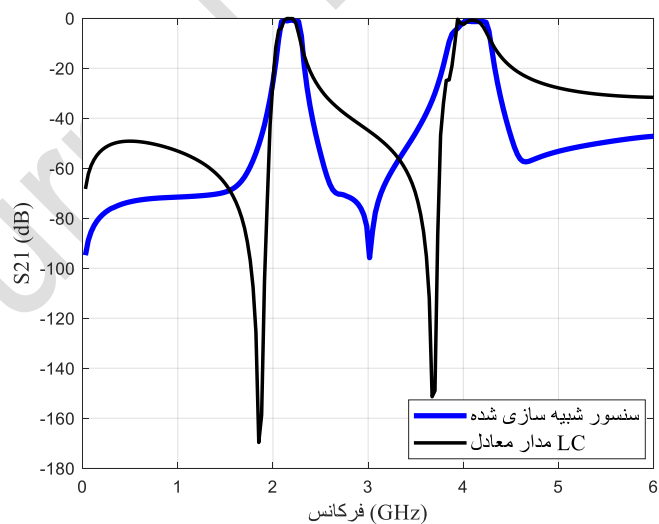


(الف)

شکل (۱): (الف) طرح شبیه‌سازی شده سنسور مایکرواستریپ، (ب) پاسخ فرکانسی سنسور شبیه‌سازی شده



(الف)

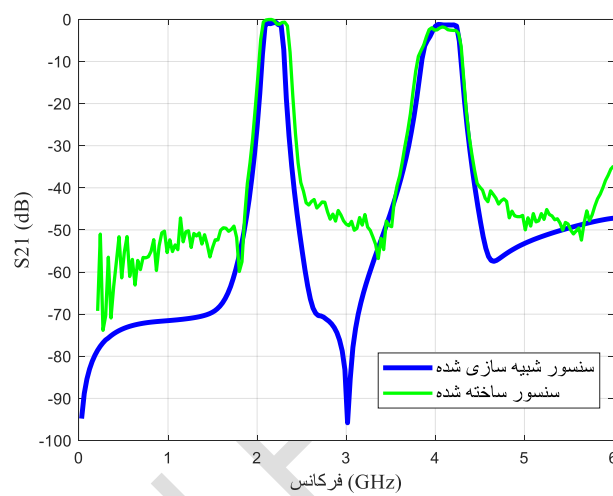


(ب)

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



(الف)



(ب)

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

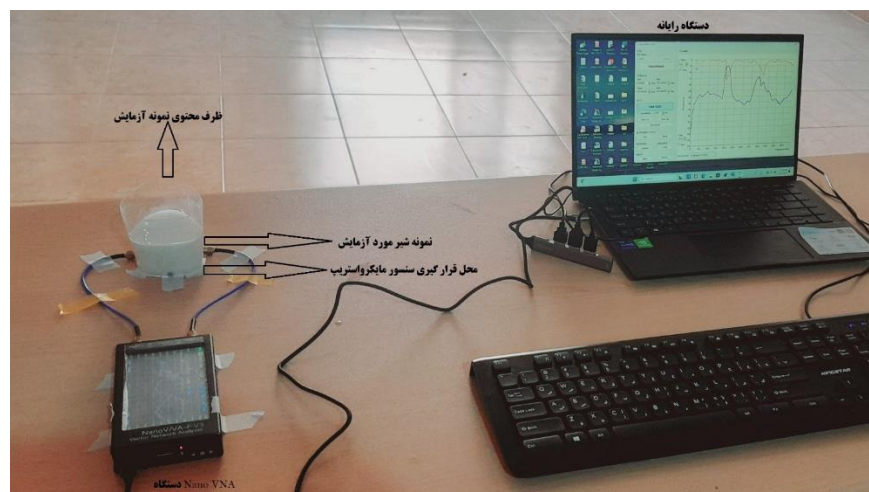


(ب)



(الف)

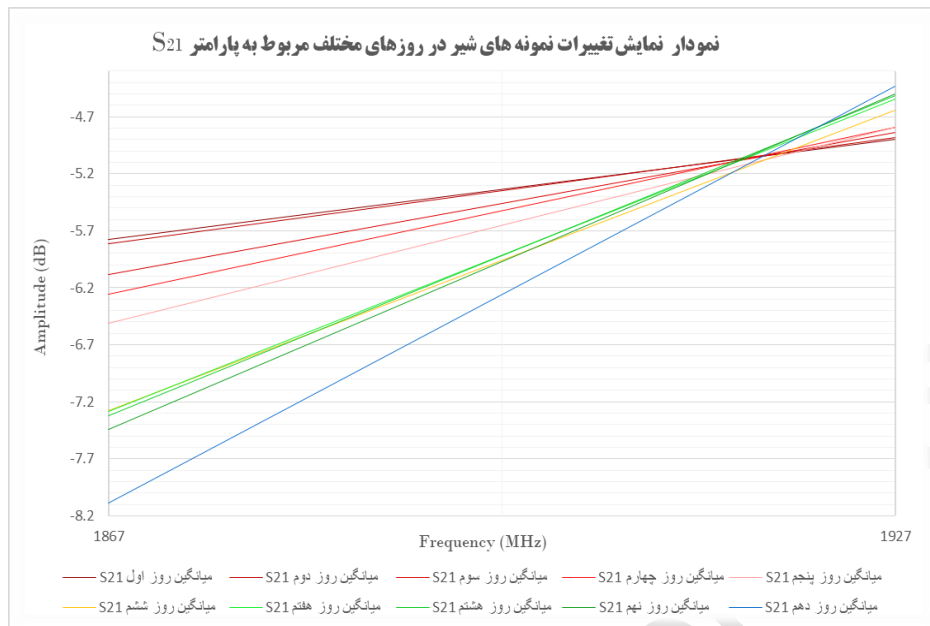
شکل (۴): (الف) ظرف آزمایش از جنس پلی استایرن، (ب) نمونه های شیر تهیه شده در ۱۰ روز متوالی



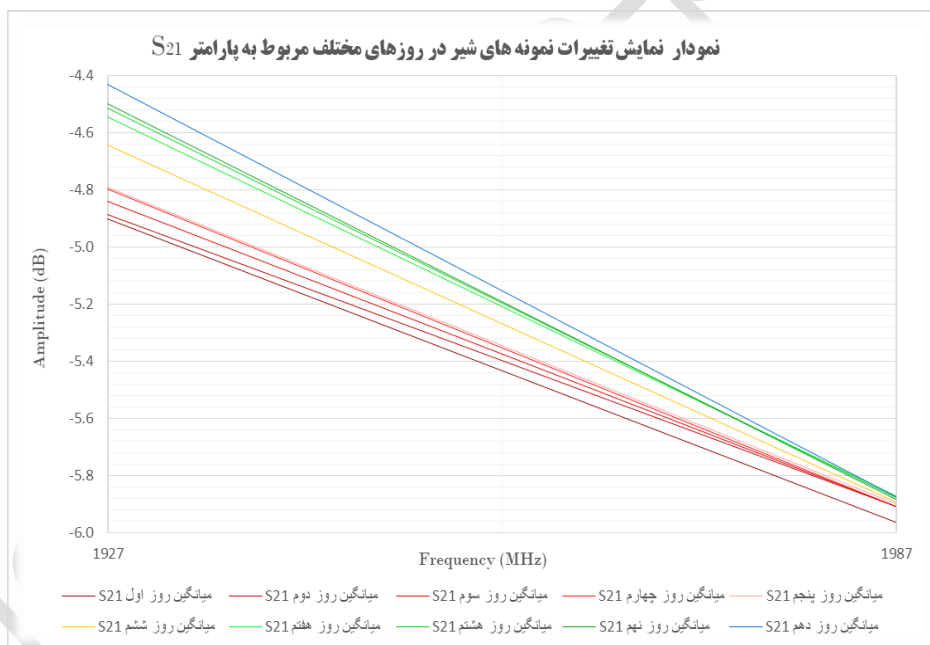
شکل (۵): انجام آزمایش و ثبت نتایج در رایانه



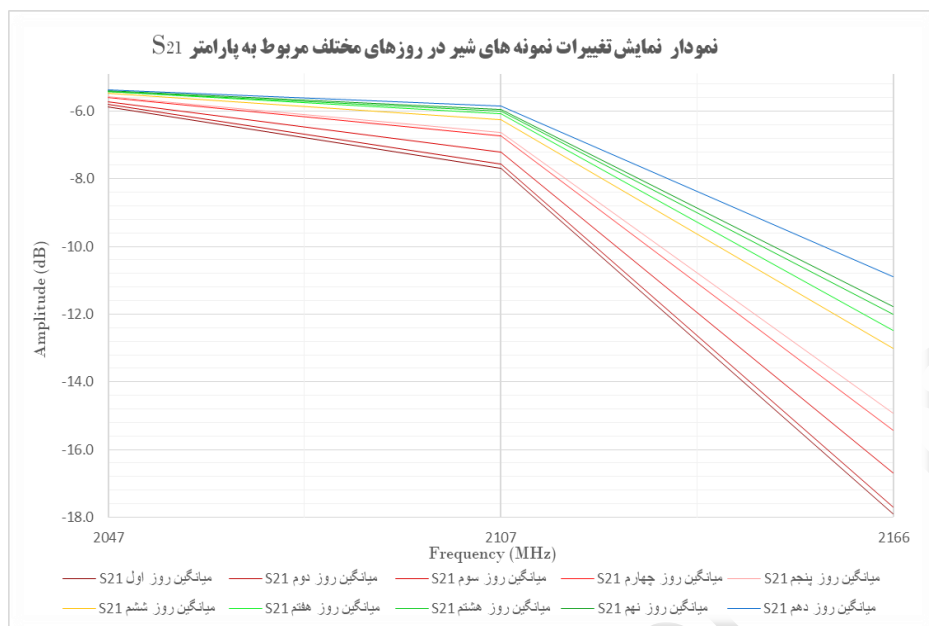
شکل (۶): تغییرات S_{21} در فرکانس ۱۸۰۷ MHz و ۱۸۶۷ MHz



شکل (۷): تغییرات S_{21} در فرکانس ۱۸۶۷ MHz و ۱۹۲۷ MHz

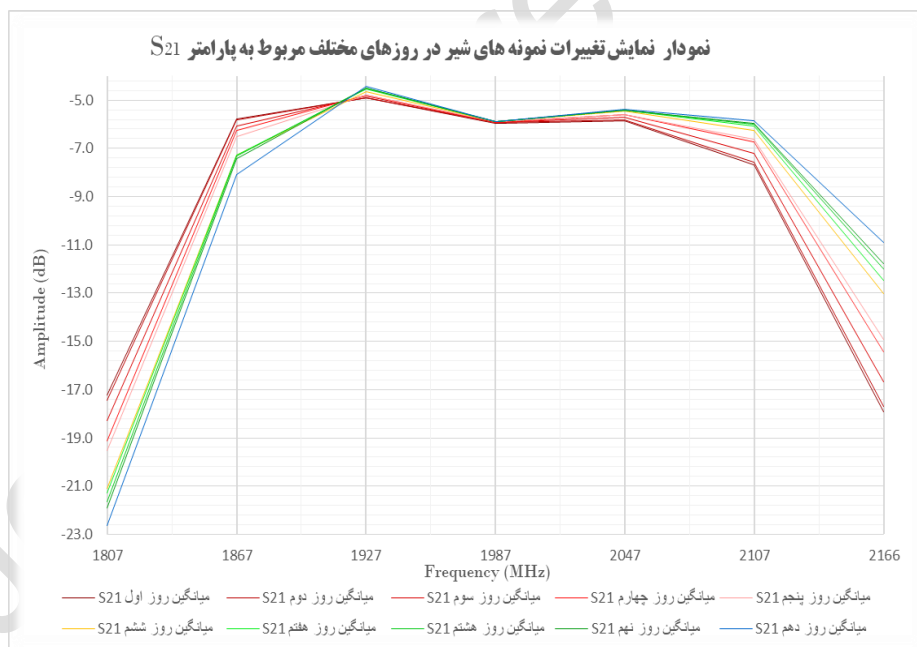


(الف)



(ب)

شکل (۸): (الف) تغییرات S_{21} در فرکانس های ۱۹۲۷ MHz و ۱۹۸۷ MHz، (ب) تغییرات S_{21} در فرکانس های ۲۰۴۷ MHz، ۲۱۰۷ MHz و ۲۱۶۶ MHz

شکل (۹): تغییرات S_{21} در تمام فرکانس های مورد مطالعه

جداول:

جدول (۱): میانگین مقادیر دامنه پارامتر S_{21} در فرکانس های مختلف برای ۱۰ نمونه شیر در روزهای متوالی

فرکانس MHz	میانگین روز اول S21 (dB)	میانگین روز دوم S21 (dB)	میانگین روز سوم S21 (dB)	میانگین روز چهارم S21 (dB)	میانگین روز پنجم S21 (dB)	میانگین روز ششم S21 (dB)	میانگین روز هفتم S21 (dB)	میانگین روز هشتم S21 (dB)	میانگین روز نهم S21 (dB)	میانگین روز دهم 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

جدول ۲: میانگین انحراف استاندارد و تفاوت دامنه S21 بین نمونه‌های روز اول و پنجم

فرکانس MHz	میانگین انحراف از معیار نمونه‌های مختلف (dB)	تفاوت میانگین روز اول و دهم S21 (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

مراجع:

[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.

- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [6] Moradkhani, A., Hasannejad, O., Baghelani, M. (2022). An artificial intelligence assisted distance variation robust microwave sensor for biofuel analysis applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 32(12).
- [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).
- [8] Wiltshire, B.D., Zarifi, M.H. (2019). 3-D printing microfluidic channels with embedded planar microwave resonators for RFID and liquid detection. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 29(1).
- [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.
- [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. *Measurement and Instrumentation*, 97, 102621.
- [11] Omer, A.E., Shaker, G., Safavi-Naeini, S. (2020). Portable radar-driven microwave sensor for intermittent glucose levels monitoring. *IEEE Sensors Letters*, 4(5).
- [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 Microwave and Wireless Components Letters*, 30(5).
- [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.*
- [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. *Research in Agricultural Engineering*, 54(2), 104-112.

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,
alikhoshchehre2014@gmail.com

^{2*} Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran,
mohamadmir.sattari@gmail.com

³ Department of Mechanical Engineering and Artificial Intelligence Research Center, Ajman University, Ajman,
United Arab Emirates, m.shah@ajman.ac.ae

^{4*} Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran,
hosseinroshani@yahoo.com

Introduction: The global demand for safe and 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 suffer from high costs, lengthy 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. Despite their successful application in fields like biomedical and oil industries, their use in food quality monitoring, especially for 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 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 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 S_{21} 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 work 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, S_{21} parameter, electromagnetic waves