

Süt Tağış Tespitinde Mikrodalga Sensör Yöntemi

Microwave Sensor Method in Milk Adulteration Detection

Hüseyin Korkmaz¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep
muh.huseyinkorkmaz@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3518-1943 

Öz

Bu çalışmada, tekrarlanabilir, uygulanabilir ve dielektrik parametrelerdeki değişikliklere duyarlılık gösteren bir mikrodalga sensör önerilmiş, özellikle yağlı sütte yağsız süt tağışının tespiti amacıyla tasarlanmış ve detaylı bir şekilde incelenmiştir. Önerilen yansıma tabanlı sensör, 5.127 GHz rezonans frekansında 75.09 dB büyüklüğe ulaşan bir performans sergilemektedir. Sensörün performansı, numunelerin doğrudan sensör yüzeyinin tamamını kaplayacak şekilde yerleştirilmesiyle test edilmiştir. Önerilen mikrodalga sensörü, 4882.8 kalite faktörü, %1.56 normalleştirilmiş hassasiyet değeri ve 7617.2 başarımlı ölçümü ile literatürdeki mevcut sensörlere kıyasla üstün bir performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Süt, Mikrodalga Sensörü, Yüksek Kalite Faktörü, Tağış Tespiti

Abstract

In this study, a microwave sensor that is repeatable, applicable, and sensitive to changes in dielectric parameters was proposed, specially designed for detecting skim milk adulteration in whole milk, and was studied in detail. The proposed reflection-based sensor exhibits a performance reaching a magnitude of 75.09 dB at the resonance frequency of 5.127 GHz. The performance of the sensor was tested by placing samples directly covering the sensor surface. The proposed microwave sensor has shown superior performance compared to sensors available in the literature with a quality factor of 4882.8, a normalized sensitivity value of 1.56%, and a Figure of Merit value of 7617.2.

Keywords: Milk, Microwave Sensor, High-Quality Factor, Adulteration Detection

1. Giriş

Süt, sadece günlük beslenmemizde değil, aynı zamanda birçok gelişmekte olan ve gelişmiş ülkenin genel ekonomisinde de çok önemli bir rol oynamaktadır. Süt, özellikle besin değerleri nedeniyle vejetaryen beslenenler için günlük yaşamın ayrılmaz bir parçasıdır [1]. Süt hem bebeklerin hem de yetişkinlerin ihtiyaç duyduğu bol miktarda besin maddesi nedeniyle ideal gıda olarak kabul edilir. Protein, yağ, karbonhidrat, vitamin ve mineraller için en iyi kaynaklardan biridir. Ancak, süt en fazla tağışe maruz kalan ürünlerinde başında gelmektedir [2]. Bu durum sütün kalitesini azaltmakla birlikte halk sağlığını da tehdit etmektedir [3][4][5]. Süt içerisindeki tağışın nitel tespiti kimyasal reaksiyonlarla kolayca gerçekleştirilebilirken, nicel tespitler karmaşık ve çeşitlidir [6]. Kantitatif tespit tekniklerinin türü, sütteki sahte maddelerin doğasına bağlıdır [7]. Örneğin, Sıvı Kromatografisi [8] ve Enzim Bağlantılı İmmünosorbent Testi [9], yabancı proteini tespit etmek için kullanılan en yaygın tekniklerdir. Polimeraz Zincir Reaksiyonu [10] ve Poliakrilamid Jel Elektroferezisi [11] genellikle belirli bir türün sütünde farklı türlere ait sütlerde sahtecilik olup olmadığını tespit etmek için kullanılır. Bu analiz yöntemleri genellikle yüksek maliyetli tesislere ihtiyaç duymaları ve karmaşıklıkları nedeniyle eleştirilmekte, aynı zamanda pahalı olmaları sıkça dile getirilmektedir. Son dönem araştırmaları, yüksek doğruluk, kompakt boyut ve üstün hassasiyet özelliklerine sahip sensörlerin geliştirilmesine odaklanmıştır [12]-[20]. Mikrodalga (MD) sensörler, algılama süreçlerinde elektromanyetik alanlardan yararlanır ve genellikle 300 MHz ile THz aralığındaki frekanslarda faaliyet gösterir [21][39]. MD sensörleri, diğer alternatiflere kıyasla düşük maliyet, kompakt tasarım, yüksek doğruluk, kolay üretim ve test

edilebilirlik gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu belirgin avantajları sayesinde MD sensörler, sağlık [22], gıda endüstrisi [18], savunma sanayi [23] ve genel sanayi [24] gibi çeşitli alanlarda kritik bir rol üstlenmektedir. Son yıllarda araştırmacılar, MD sensörlerini kullanarak taşıma tespitine yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirmektedir. MD sensörlerinin çeşitli yağların tespitinde kullanılabilirliği, yapılan araştırmalarla ortaya konulmuştur [26]. Örneğin, kirli ve temiz transformatör yağlarında rezonans frekans kayması yaklaşık 70 MHz olarak belirlenirken, zeytinyağı ve mısır yağlarında bu değer 50 MHz civarına inmektedir. Markalı ve markasız yakıt numunelerinin tespitine yönelik yüksek verimli ve taşınabilir bir sensör önerilmiştir [27]. Markalı ve markasız motorin için rezonans frekans kayması 72 MHz olarak ölçülürken, markalı ve markasız benzin için bu kayma 12 MHz olarak tespit edilmiştir. Orijinal ve katkılı benzin numunelerinin ayırımı yapmak için iletim hattı tabanlı bir metamalzeme (MM) sensörü tasarlanmıştır [28]. Bu sensör, 50 MHz'lik frekans kayması ile orijinal ve katkılı dizel numunelerini ayırt etme yeteneğine sahiptir. Literatür incelemeleri, MM tabanlı sensörlerin geniş bir frekans aralığında katı dielektrik malzemelerden sıvılara, gazlara [26][27][28][29] ve biyomoleküllere kadar farklı malzemelerin tespitinde etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir [30][31][32]. Orijinal ve katkılı yakıt numunelerini ayırt etmek için yüksek hassasiyetli bir MM sensörü tasarlanmıştır [33]. Bu çalışmada, rezonans frekansı 100 MHz'e kadar kaydırılmıştır. Akış algılama için Rhombus MM sensörü önerilmekle birlikte [34], bu çalışmada sensörün hassasiyetinin ve kalite faktörünün düşük olduğu gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada, polipropilen tespiti için kullanılan kavisli çizgi MM tabanlı sensörün orta düzeyde bir performans sergilediği ifade edilmiştir [35]. Değişen elektriksel özelliklere sahip sıvı kimyasalların tespiti için, MM soğurucu prensibinden esinlenen bir sensör geliştirilmiştir [36]. Sensörün kalite faktörü ve hassasiyetinin yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bu eksiklikleri telafi etmek için, endüstriyel uygulamalara yönelik omega formatında yeni bir sensör piyasaya sunulmuştur [37]. Sensör, 8–12 GHz frekans aralığında çalışacak şekilde tasarlanmış olup, temiz ve atık transformatör yağları için 70 MHz'lik bir frekans kayması elde edecek şekilde optimize edilmiştir. Sıvı kimyasalların tespiti için geliştirilmiş yeni bir MM sensörü de tanıtılmıştır [38].

Çalışmada, kalite faktörleri ve hassasiyetin ortalama seviyede olduğu anlaşılmıştır. MD tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlerinin, zeytinyağı taşımasını tespit etme konusundaki algılama yetenekleri incelenmiştir. Zeytinyağı, mısır yağı ve soya yağı gibi farklı türdeki yenilebilir yağların elektromanyetik tepkileri, 2-9 GHz frekans aralığında incelenmiştir. Bununla birlikte, hesaplanan kalite faktörü, S parametresi ve başarımlı ölçüm değerlerinin yeterli seviyede olmadığı tespit edilmiştir [42]. Saf ve katkılı yakıt ve yağ türlerini tespit edebilmek için bir MM sensörü geliştirilmiştir. Sensörün yüksek kalite faktörüne sahip olduğu, ancak hassasiyet ve başarımlı değerlerinin düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir [43]. Yaklaşık 3 GHz frekansında çalışan PCB kartları kullanılarak, mineral yağların özelliklerini algılamak için bir mikrodalga aktif anten sensörü tasarlanıp üretilmiştir. Tasarlanan antenin üst yüzeyine temas edecek şekilde, mikroskop cam slaytı üzerine 150 µL kapasiteli M şeklinde bir kanal tasarlanmıştır. Ardından, kanala yeni ve hasarlı trafo yağı enjekte edilerek sensör test edilmiştir. Önerilen sensörün, düşük hassasiyete sahip olduğu tespit edilmiştir [44]. Motor yağının ömrü ve seviyesini tespit etmek amacıyla, iki farklı yağ numunesine yerleştirilen önerilen anten kullanılarak geri dönüş kaybı grafiğinde rezonans frekansı ve bant genişlikleri incelenmiştir. Bu çalışma, önerilen anten aracılığıyla motor yağının ömrünün mikrodalga frekanslarında gerçek zamanlı olarak tespit edilmesini sağlamaktadır. Ancak, hassasiyet, kalite faktörü ve başarımlı ölçümüyle ilgili herhangi bir analiz yapılmamıştır [45]. MM tabanlı bir sensör tasarımı, TE polarizasyon modunda 8-12 GHz frekans aralığında yapılmıştır. Önerilen yapı, ön yüzeyinde dört ayrı dikdörtgen ve halka tabanlı rezonatörler içerirken, arka yüzeyde bu rezonatörlerin açıları 180° oranında değiştirilmiştir. Ayrıca, yapının arka kısmına 10 mm kalınlığında WR90 dalga kılavuzuyla uyumlu boyutlarda bir örnek tutucu entegre edilerek, test edilecek malzemenin bu tutucuya yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen sensörün kalite faktörü yeterli düzeyde iken hassasiyet ve başarımlı ölçümü hakkında herhangi bir hesaplama yapılmamıştır [46]. Literatür araştırmamız, önerilen sensörlerin hassasiyet (S), kalite faktörü ve başarımlı ölçümü gibi performans parametrelerinin önemli olduğunu, bu parametrelerin potansiyel sınırlamalar oluşturabileceğini ve literatürdeki sensörlerin bu açıdan dezavantajlar içerdiğini ortaya

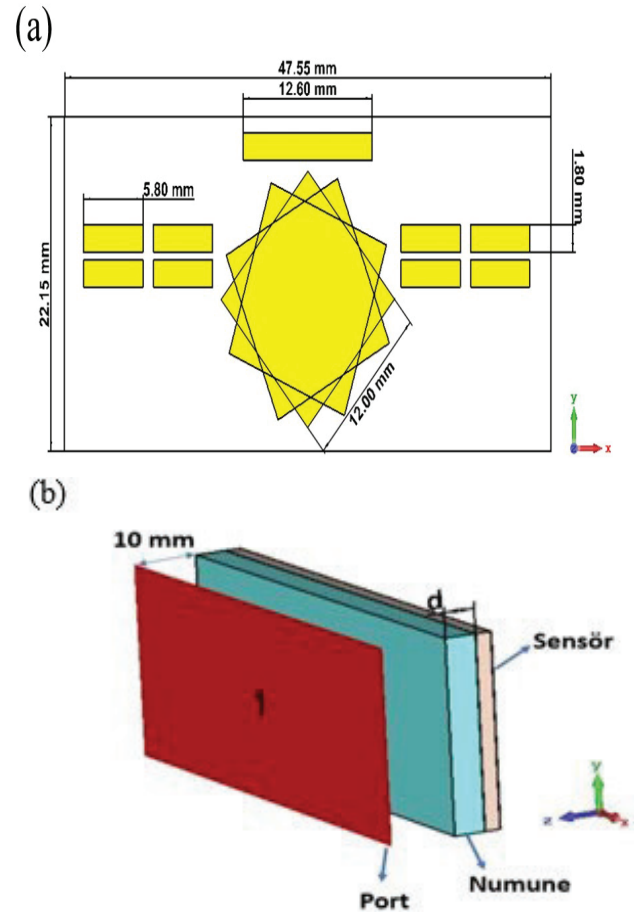
koymaktadır [39]. Bu sınırlamaları ve dezavantajları aşmak amacıyla, bu çalışma yağlı sütteki tağışları tespit edebilen, tekrarlanabilir, uygulanabilir ve dielektrik parametrelerdeki değışimlere yüksek hassasiyetle tepki veren bir MD sensör önermeyi amaçlamaktadır. Önerilen sensör, saf yağlı sütteki %10 oranındaki yağsız sütü tespit etme yeteneğıyle başarılı bir performans sergilemektedir. Önerilen sensör, literatürdeki diğersensörlere kıyasla daha yüksek performans sergileyerek, 5.127 GHz frekansında maksimum %1,56 hassasiyet, 4882,8 kalite faktörü ve 7617,2 başarıml ölçümü değıeriyle çalışmaktadır. Ayrıca, önerilen sensör, yüksek hassasiyet, kompakt tasarım, düşük ölçüm maliyetleri ve az miktarda test numunesi gerektirmesi gibi avantajlarıyla, MD algılama uygulamaları için potansiyel bir çözüm olarak dikkate alınabilir.

2. Malzemeler ve Yöntemler

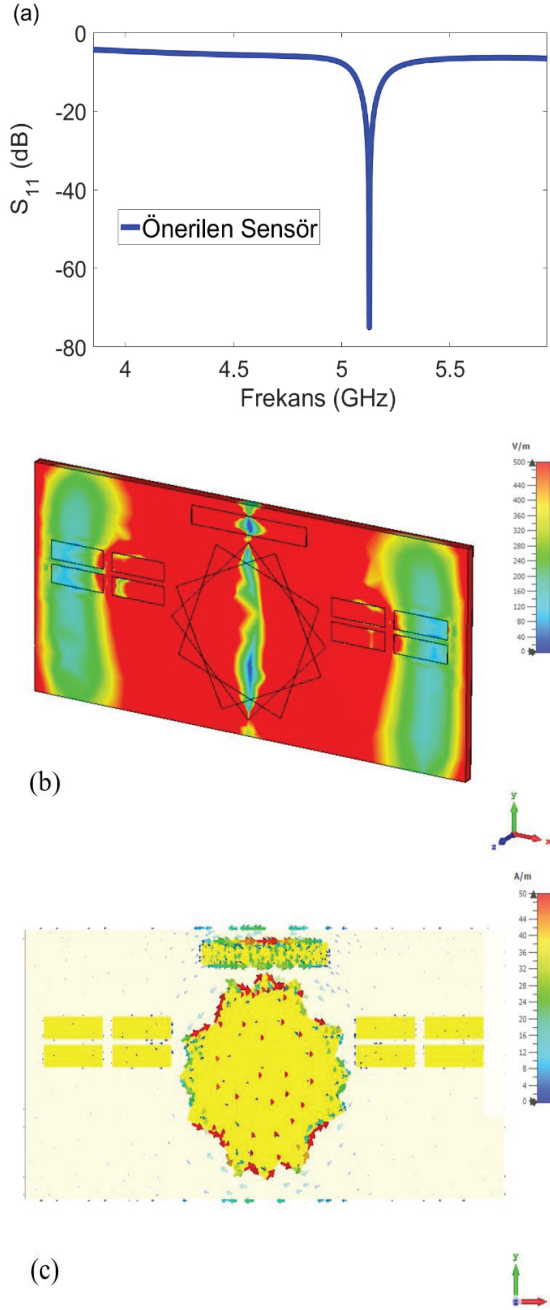
2.1. Tasarım ve Analiz

Bu bölümde, bu çalışma kapsamında geliştirilen ve analiz edilen MD sensör ayrıntılı bir şekilde incelenecektir. Önerilen sensörün boyutları titizlikle değıerlendirilmiş ve en uygun tasarım elde edilmiştir. Sıvı gıdaların, özellikle sütlerin, MD teknikleriyle tespitine yönelik geliştirilen sensörün son versiyonu, boyutlarıyla birlikte Şekil 1(a)'da gösterilmiştir. Simülasyonlar, Sonlu Entegrasyon Tekniğı tabanlı Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi (CST Studio Suite 2019) yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Frekans alanı çözücüsü, en yüksek çözünürlük (3. derece) ve 10^{-12} doğruluk seviyesi ile kullanılmıştır. S-parametrelerinin doğru simülasyonunu sağlamak amacıyla, dalga boyu başına düşen hücre sayısı otomatik olarak ayarlanmıştır. Simülasyonun ağı tipi, dört yüzlü ağı olarak seçilmiş ve dalga boyu başına minimum ve maksimum geçiş sayıları sırasıyla 3 ve 8 olarak ayarlanmıştır. Tasarlanan sensör, üst katmanda rezonatör, ortada FR-4 dielektrik katman ve altta bakır topraklama katmanından oluşmaktadır. Önerilen tasarımda, FR-4 malzemesinin kayıp tanjant değıeri 0,025, bağıl geçirgenliğı 4,3 ve kalınlığı ise 1,6 mm olarak seçilmiştir. Sensörün genel boyutları 47,55 x 22,15 mm² olarak belirlenmiş ve C bandı dalga kılavuzuyla uyumlu olacak şekilde, 3,95-5,85 GHz frekans aralığında optimize edilmiştir. Z eksenine dik bir elektromanyetik dalga durumunda, x ve y eksenlerinde mükemmel elektrik iletkeni

(PEC) sınır koşulları uygulanmıştır. Tasarlanan sensörün geometrik özellikleri Şekil 1(a)'da gösterilmektedir. Şekil 1(b)'de görüleceğı üzere numune katmanı (d=3 mm), önerilen sensörün tüm üst yüzeyini kaplayacak şekilde sensör üzerine yerleştirilmiştir. Dalga kılavuzu, numuneye 10 mm mesafede yerleştirilmiş ve frekans alanı çözücüsü, en yüksek çözünürlük seviyesinde çalıştırılmıştır. CST programında tasarlanan yansıma tabanlı sensörün $|S_{11}|_{dB}$ değıeri, Şekil 2(a)'da gösterildiğı üzere önerilen sensör 5.127 GHz frekansında rezonans göstermiş olup yaklaşık -75.09 dB yansıma büyüklüğüne sahiptir.



Şekil 1. (a) Önerilen MD sensör ve boyutları (b) önerilen sensör ve numune ölçüm düzeneğı.



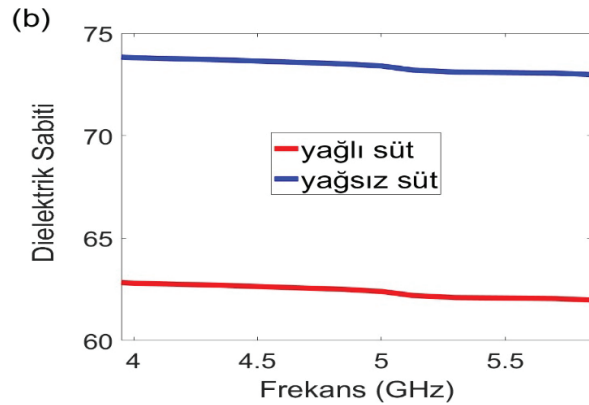
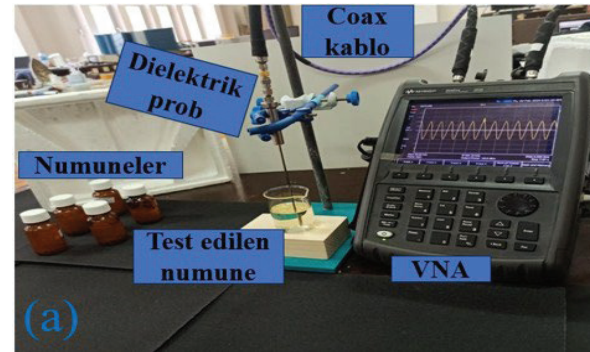
Şekil 2. (a) Önerilen sensörün hava ortamındaki saçılma parametresi ($|S_{11}|_{dB}$), rezonans frekansındaki (5.127 GHz) (b) E-alanı ve (c) yüzey akım dağılımı.

Önerilen sensörün çalışma prensibini daha iyi kavrayabilmek için elektrik alan dağılımları da detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elektrik alanındaki değişiklikler, sensörün enerji depolama kapasitesinin değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır [20]. Önerilen sensörün elektrik alan

dağılımları, Şekil 2(b)'de gösterildiği üzere rezonans frekansında (5.127 GHz) simüle edilmiştir. Rezonatörü oluşturan bileşenlerde elektrik alan şiddetinin belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir. Şekil 2(c), önerilen sensörün yüzey akımının rezonans frekansındaki dağılımını yansıtmaktadır. Yüzey akımının, dikdörtgen rezonatörler üzerinde daha yoğun bir şekilde yayıldığı gözlemlenmiştir. Önerilen yapı için, rezonans olayını başlatan bir elektrik dipolünün varlığı, simüle edilmiş yüzey akım dağılımıyla ortaya konmuştur. Sonuç olarak, önerilen yapı, rezonatörün üst bölgesinde numunenin elektriksel özelliklerinde oluşan çok küçük değişiklikleri dahi tespit etme yeteneğine sahiptir. Rezonatör, etkili kapasitansın yanı sıra etkili bir endüktansa da sahip olup; bu iki bileşenin birleşimi, genellikle rezonans frekansını (f_r) ortaya çıkarır.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eff}C_{eff}}} \quad (1)$$

Burada (eşitlik 1) L_{eff} ve C_{eff} sırasıyla önerilen sensörün etkin endüktansını ve kapasitansını ifade etmektedir.

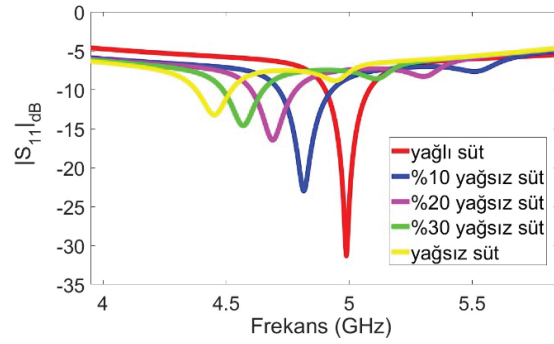


Şekil 3. (a) Koaksiyel prob deneysel ölçüm düzeni, (b) saf yağlı süt ve saf yağsız süt numunelerinin dielektrik sabiti (ϵ'_r).

3. Sonuçlar ve Tartışma

Önerilen yansıma tabanlı sensörün, çeşitli yüzdelerde hazırlanan numunelere olan tepkisini simüle edebilmek için, her bir numunenin dielektrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çerçevede, Gaziantep'teki yerel bir süpermarketten temin edilen yağlı ve yağsız sütler, çeşitli oranlarda karıştırılmıştır. Numunelerin dielektrik sabitleri, Şekil 3(a)'da sunulan dielektrik prob ölçüm düzeneğiyle, 500 MHz ile 26.5 GHz arasındaki frekans aralığında ölçülmüştür. Hazırlanan numunelerin dielektrik sabitleri, Keysight Technologies'e ait açık uçlu koaksiyel dielektrik prob kiti (Model numarası: N1501A) ile ölçülmüş ve kalibrasyon için kısa devre, açık devre ve damıtılmış su gibi referans standartlar kullanılmıştır. Kalibrasyonu doğrulamak için, literatürde yaygın olarak kullanılan distile su, etanol ve metanol gibi referans sıvıların kalibrasyon sonrasında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, her bir süt numunesinden yeterli miktarda alınıp 200 ml'lik cam beherlere konulmuş ve doğru ölçümler elde edebilmek amacıyla prob ucu, numune yüzeyinden yaklaşık 15 mm derinliğe yerleştirilmiştir. Her bir numune için ölçümler 5 kez tekrarlanmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak dielektrik katsayısı belirlenmiştir (1001 veri). Bunun yanı sıra, numunelerin hazırlanması ve dielektrik prob ölçümleri, normal oda koşullarında (23°C ve yaklaşık %55 bağıl nem) gerçekleştirilmiştir. Yansıma tepkisi, yaklaşık 90 dB dinamik aralık ve 30 dB yönlülük değerlerine sahip Keysight (Model: N9918A) vektör ağ analizörü (VNA) ile gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm, 1 metre uzunluğunda iki adet 3,5 mm faz kararlı koaksiyel kablo kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her numune için, yerleşik yazılım kullanılarak göreceli karmaşık geçirgenlik ($\epsilon = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$) hesaplanmış ve bu sayede dielektrik sabiti (ϵ'_r) değerleri belirlenmiştir (1001 veri). Şekil 3(b), saf yağlı ve yağsız süt numunelerinin gerçek dielektrik sabiti değerlerini içeren grafiklere yer verilmektedir. Şekil 3(b)'de, yağsız sütün gerçek dielektrik sabiti değerinin yağlı süttten daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca ölçülen dielektrik sabiti değerlerinin literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [25]. Dielektrik özellikleri belirlenen ve CST simülasyon programı kütüphanesine aktarılan bütün numune verileri, rezonatörün yüzeyini tam olarak kaplayacak şekilde yerleştirilerek simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu

başlamda, önerilen sensörünün çeşitli yüzdelerdeki numunelere verdiği tepki, benzetim ortamında analiz edilmiştir.



Şekil 4. Önerilen sensörün saf yağlı süt, saf yağsız süt ve yağlı yağsız süt karışımı numuneleri için benzetim ortamındaki $|S_{11}|_{dB}$ tepkileri.

3.1. Yağlı Sütün Yağsız Süt ile Tağış ve Analizi

Bu bölümde, önerilen sensör kullanılarak, yağlı süte farklı oranlarda ilave edilen yağsız süttün analiz süreci detaylandırılmaktadır. Yağlı süt, yağsız süt ve yağlı süte eklenen yağsız süt numunelerinin dielektrik özellikleri kullanılarak, 3.95-5.85 GHz frekans aralığında simülasyonlar yapılmıştır. Tağışın simülasyon sonuçları Şekil 4'te sunulmaktadır. Şekil 4 ve şekil 5(a)'da yer alan verilere göre, önerilen sensör, yağlı süte eklenen yağsız süt oranı değişikçe farklı rezonans frekansları ve değişen yansıma büyüklükleri göstermektedir. Yağlı süt ve yağsız süt numuneleri rezonatörün üst yüzeyine yerleştirildiğinde, tüm simülasyon parametrelerinin sabit tutulduğu koşullarda gözlemlenen rezonans frekansları ($|S_{11}|_{dB}$) sırasıyla 4.989 GHz (-31.33 dB) ve 4.452 GHz (-13.24 dB) olarak belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, %10, %20 ve %30 yağsız süt tağış durumlarında rezonans frekansları (ve $|S_{11}|_{dB}$) sırasıyla 4.815 GHz (-22.94 dB), 4.689 GHz (-16.46 dB) ve 4.569 GHz (-14.60 dB) olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca, saf yağlı süte göre tağışlı numunelerin rezonans frekans kaymaları şekil 5(b)'de görüleceği üzere sırasıyla 0 MHz, 174 MHz, 300 MHz, 420 MHz ve 537 MHz olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Yağlı-yağsız süt numuneleri için rezonans frekansı (f_r), $|S_{11}|_{dB}$ değerleri ve rezonans frekansı kaymaları (Δf_r)

Numuneler	f_r	$ S_{11} _{dB}$	Δf_r
Yağlı süt	4.989 GHz	-31.33 dB	0 MHz
%10 yağsız süt	4.815 GHz	-22.94 dB	174 MHz
%20 yağsız süt	4.689 GHz	-16.46 dB	300 MHz
%30 yağsız süt	4.569 GHz	-14.60 dB	420 MHz
Yağsız süt	4.452 GHz	13.24 dB	537 MHz

Tablo 1, numunelerin rezonans frekansları (f_r), $|S_{11}|_{dB}$ değerleri ve numunelerin rezonans frekans kaymaları (saf yağlı süte göre) dahil olmak üzere yağlı-yağsız süt taşımasının sonuçlarını sunmaktadır. Yağsız süt oranı arttıkça, rezonans frekansının azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yağsız süt oranı arttıkça numunelerin rezonans frekansı kaymaları, saf yağlı süte kıyasla artış göstermiştir. Son olarak, yağsız süt oranı arttıkça $|S_{11}|_{dB}$ değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

3.2. Hassasiyet, Kalite Faktörü ve Başarım Ölçümü Analizi

Sensör performansı, genellikle hassasiyet, kalite faktörü ve başarım ölçümü gibi boyutsuz parametreler aracılığıyla değerlendirilmektedir. Önerilen sensörün kalite faktörünü ve bant genişliği frekansını hesaplamak için (2) ve (3)'teki ifadeler kullanılmıştır.

$$Q = \frac{f_c}{f_b} \quad (2)$$

$$f_b = f_h - f_l \quad (3)$$

Burada f_c , f_b , f_h , ve f_l sırasıyla merkez rezonans frekansını, bant genişliği frekansını ve merkez frekansın -3 dB içindeki daha yüksek ve daha düşük frekansları ifade etmektedir. Önerilen sensör, numune ile yüklenip elektrik alanının en yoğun olduğu bölgede test edildiğinde, rezonans frekansının test edilen malzemenin dielektrik geçirgenliğine doğrudan

bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sensörün malzeme özelliklerindeki küçük değişikliklere duyarlılığını ve bu değişikliklerin rezonans frekansındaki etkisini göstermektedir. Bu ilişki, göreceli geçirgenlik ($\Delta\epsilon_r$)'teki herhangi bir değişikliğin, rezonans frekansındaki (Δf_r) doğrusal bir değişikliğe yol açtığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle önerilen sensörün önemli bir parametresi olan hassasiyet (S) (4) kullanılarak belirlenebilir.

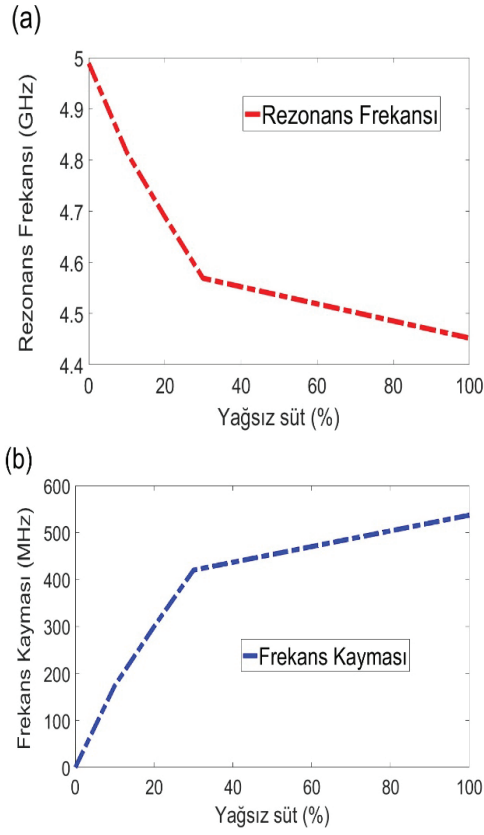
$$S = \frac{\Delta f_r}{\Delta\epsilon_r} = \frac{f_{empty} - f_{\epsilon_r}}{\epsilon_r - 1} \quad (4)$$

Burada, ϵ'_r numunenin dielektrik sabitini, f_{empty} önerilen sensörün boş durumdaki rezonans frekansını ve f_{ϵ_r} ise numunenin yerleştirildiği durumdaki sensörün rezonans frekansını temsil etmektedir. Bu parametreler, sensörün malzeme üzerindeki etkisini ve rezonans frekansındaki değişimi belirleyerek sensörün hassasiyetini hesaplamak için kullanılır. S(%), önerilen sensörün normalleştirilmiş hassasiyetini temsil etmektedir [20]. Önerilen sensörün normalleştirilmiş hassasiyeti (5) ve başarım ölçümü değeri (6) ifadeleri kullanılarak belirlenebilir.

$$S(\%) = \frac{f_{empty} - f_{\epsilon_r}}{f_{empty}(\epsilon_r - 1)} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Başarım ölçümü} = \text{Hassasiyet (\%)} \times \text{Kalite Faktörü} \quad (6)$$

Önerilen sensör, literatürdeki mevcut diğer sensörlerle karşılaştırmak amacıyla, kalite faktörü, malzeme, çalışma frekansı, hassasiyet ve başarım ölçümü gibi kriterlere dayalı olarak Tablo 2'de değerlendirilmiştir. Tablo 2'yi incelediğimizde, bu çalışmada önerilen sensörün 4882,8 kalite faktörü, %1,56 hassasiyet değeri ve 7617,2 başarım ölçümü değeri ile dikkate değer performans özelliklerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Önerilen sensör, literatürde yer alan diğer çalışmalara kıyasla daha yüksek kalite faktörü ve başarım ölçümü değeri sunmaktadır. Bu durum sensör üzerine yerleştirilen numunelerin daha hassas bir şekilde algılanabileceği ve süt numunelerinin saflık kalitesinin daha hassas bir şekilde tayin edilebileceği anlamı taşımaktadır. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar önerilen sensörün pratik algılama uygulamaları için uygun bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5. (a) Rezonans frekansının yağsız süt konsantrasyonuna göre değişim grafiği ve (b) frekans kaymasının yağsız süt konsantrasyonuna göre değişim grafiği.

Tablo 2. Önerilen sensörün literatürde mevcut diğer sensörlerle karşılaştırılması

Kaynak	Malzeme	f_r (GHz)	Kalite Faktörü	S (%)	Başarım ölçümü
[40]	Motor yağı	2-6	60	-	34
[41]	Dizel	8-12	110	-	37
[38]	Dizel	8-12	105	-	41
[26]	Motor yağı	8-12	100	-	48
[27]	Dizel	10-12	90	-	52
[28]	Dizel	8-12	95	-	38
[34]	Dizel	8-12	105	-	43
[7]	Zeytinyağı ve Mısır yağı	8-12	135	0.56	76
[42]	Yemeklik yağlar	2-9	24.3	2.24	8.82
[43]	Benzin ve etanol	8-12	430	1.99	855.70
[44]	Petrol yağı ve kimyasal sıvılar	2-4	-	3.25	-
[46]	Süt	8-12	288	-	-
Önerilen sensör	Yağlı ve yağsız süt	3.95-5.85	4882.8	1.56	7617.2

4. Sonuç

Süt, sağlıklı içeriği nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir besindir. Ancak, maliyetinin yüksek olması nedeniyle üretim sürecinde yağsız sütlerle karıştırılabilmektedir. Bu çalışma, yağlı süt ile karıştırılmış yağsız sütü tespit etmek amacıyla, dielektrik parametrelerdeki değişikliklere duyarlı, tekrarlanabilir ve uygulanabilir bir MD sensörü önermektedir. Önerilen yansıma tabanlı sensör, 5.127 GHz frekansında rezonansa girmiş olup, $|S_{11}|_{dB}$ değeri yaklaşık olarak -75.09 dB olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, sensörün elektrik alan ve yüzey akım dağılım analizleri de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, saf yağsız süt

ve saf yağlı süt numunelerinin dielektrik sabitleri, dielektrik ölçüm probu düzeneği ile ölçülüp detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Önerilen sensör, sırasıyla %10, %20 ve %30 katkılı numuneler için 174 MHz, 300 MHz ve 420 MHz rezonans frekans kaymaları gözlemlenmiş olup, bu değerler sayesinde sensörün bu taşıyıcıları kolaylıkla ayırt edebileceği sonucuna varılmıştır. Son olarak, önerilen sensörün performansı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda sensörün kalite faktörü, hassasiyeti ve başarımlı ölçümü değerleri hesaplanmıştır. Önerilen sensör, 4882,8 kalite faktörü, %1,56 normalleştirilmiş hassasiyet ve 7617,2 başarımlı ölçümü değeri ile literatürdeki diğer sensörlere kıyasla üstün bir performans sergilemektedir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular ve performans analizleri doğrultusunda, önerilen MD sensör, rezonans frekansındaki kaymalar aracılığıyla yağlı süt örneklerinde %10 oranında yağsız süt taşıyıcısını yüksek doğrulukla tespit edebilme yeteneğine sahiptir. Yağsız süt oranının artışıyla birlikte rezonans frekansında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yağsız süt oranı arttıkça numunelerin rezonans frekansı kaymalarının, saf yağlı süte kıyasla arttığı tespit edilmiştir. Yağsız süt oranı arttıkça, $|S_{11}|_{dB}$ değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Önerilen sensör (yöntem) literatürdeki diğer yöntemlere kıyasla düşük maliyetli, tekrarlanabilir, taşınabilir ve çok az miktarda numune gerektirmesi gibi avantajlarla pratik ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilebilir. Özellikle yağlı süte yağsız süt karıştırılmasıyla ilgili saflık testlerinde (süt kalitesi ve saflığını denetleyen kurumlar tarafından) kullanılabileceğini öngörmekle birlikte bir sonraki çalışmada performans kriterlerini optimize ederek önerilen yöntemi daha kullanılabilir bir noktaya taşımayı hedeflemekteyiz. Bu sayede sütün kalitesini ve halk sağlığını riske atacak taşıyıcıları azaltılabileceği düşünülmektedir. Bu çerçevede, yüksek hassasiyet, üstün kalite faktörü, gelişmiş performans, düşük maliyet ve minimum numune tüketimi gibi önemli avantajlara sahip olan önerilen sensör, frekans bazlı yansıma katsayısı tepkisi dikkate alınarak, yağlı süt taşıyıcı tespiti uygulamaları için uygun bir tercih olarak değerlendirilebilir.

Yazar Katkıları

Numunelerin temini, deneysel ölçümler, simülasyonlar, kavramsallaştırma analizleri, illüstrasyonların hazırlanması,

sonuçların analizi ve değerlendirilmesi Hüseyin Korkmaz tarafından gerçekleştirildi.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] S. Chatterjee, A. Sarkar, and M. J. Boland, "The world supply of food and the role of dairy protein", *In Milk Proteins*, pp. 1–18, 2014.
- [2] M. Kamthania, J. Saxena, K. Saxena, DK. Sharma, "The world supply of food and the role of dairy protein", *Int J Engg Tech Res*, vol. 1, no. 15, p. 20, 2014.
- [3] D. I. Ellis, V. L. Brewster, W. B. Dunn, J. W. Allwood, A. P. Golovanov, and R. Goodacre, "Fingerprinting food: current technologies for the detection of food adulteration and contamination," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 41, no. 17, pp. 5706–5727, 2012.
- [4] P. Singh and N. Gandhi, "Milk preservatives and adulterants: processing, regulatory and safety issues," *Food Rev. Int.*, vol. 31, no. 3, pp. 236–261, 2015.
- [5] J. Spink and D. C. Moyer, "Defining the public health threat of food fraud," *J. Food Sci.*, vol. 76, no. 9, pp. R157–R163, 2011.
- [6] A. Poonia, A. Jha, R. Sharma, H. B. Singh, A. K. Rai, and N. Sharma, "Detection of adulteration in milk: A review," *Int. J. Dairy Technol.*, vol. 70, no. 1, pp. 23–42, 2017.
- [7] A. K. Yadav, M. Gattupalli, K. Dashora, and V. Kumar, "Key milk adulterants in India and their detection techniques: A review," *Food Anal. Methods*, vol. 16, no. 3, pp. 499–514, 2023.
- [8] G. Bordin, F. C. Raposo, B. De la Calle, and A. Rodriguez, "Identification and quantification of major bovine milk proteins by liquid chromatography," *J. Chromatogr. A*, vol. 928, no. 1, pp. 63–76, 2001.
- [9] C. Romero, M. Pardo, M. J. Grillo, R. Diaz, J. Blasco, and I. Lopez-Goñi, "Evaluation of PCR and indirect enzyme-linked immunosorbent assay on milk samples for diagnosis of brucellosis in dairy cattle," *J. Clin. Microbiol.*, vol. 33, no. 12, pp. 3198–3200, 1995.
- [10] E. Lipkin, A. Shalom, H. Khatib, M. Soller, and A. Friedmann, "Milk as a source of deoxyribonucleic acid and as a substrate for the polymerase chain reaction," *J. Dairy Sci.* vol. 76, no. 7, pp. 2025–2032, 1993.
- [11] N. Sharma, R. Sharma, Y. S. Rajput, B. Mann, R. Singh, and K. Gandhi, "Separation methods for milk proteins on polyacrylamide gel electrophoresis: Critical analysis and options for better resolution," *Int. Dairy J.*, vol. 114, p. 104920, 2021.

- [12] B. Wu, W. Jiang, J. Jiang, Z. Zhao, Y. Tang, W. Zhou, and W. Chen, 'Wave manipulation in intelligent metamaterials: recent progress and prospects', *Adv. Funct. Mater.*, p. 2316745, 2024.
- [13] T. Ergin, N. Stenger, P. Brenner, J. B. Pendry, and M. Wegener, 'Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths', *science*, vol. 328, no. 5976, pp. 337–339, 2010.
- [14] S. Krödel, N. Thomé, and C. Daraio, 'Wide band-gap seismic metastructures', *Extreme Mech. Lett.*, vol. 4, pp. 111–117, 2015.
- [15] H. Korkmaz and U. Hasar, 'Wide band metamaterial absorber with lumped element', *The Int. J. Mater. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 61–66, 2021.
- [16] H. Korkmaz, U. C. Hasar, and O. M. Ramahi, 'Thin-film MXene-based metamaterial absorber design for solar cell applications', *Opt. Quantum Electron.*, vol. 55, no. 6, p. 530, 2023.
- [17] M. Obaidullah, V. Esat, and C. Sabah, 'Multi-band (9, 4) chiral single-walled carbon nanotube based metamaterial absorber for solar cells', *Opt. Laser Technol.*, vol. 134, p. 106623, 2021.
- [18] U. C. Hasar, H. Hasar, H. Ozturk, H. Korkmaz, Y. Kaya, M. A. Ozkaya, A. Ebrahimi, J. J. Barroso, V. Nayyeri, and O. M. Ramahi, 'Simple and inexpensive microwave setup for industrial based applications: Quantification of flower honey adulteration as a case study', *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 8847, 2024.
- [19] Q. Shi, B. Dong, T. He, Z. Sun, J. Zhu, Z. Zhang, and C. Lee, 'Progress in wearable electronics/photronics—Moving toward the era of artificial intelligence and internet of things', *InfoMat*, vol. 2, no. 6, pp. 1131–1162, 2020.
- [20] R. A. Alahnomi, Z. Zakaria, Z. M. Yussof, A. A. Althuwayb, A. Alhegazi, H. Alsariera, and N. A. Rahman, 'Review of recent microwave planar resonator-based sensors: Techniques of complex permittivity extraction, applications, open challenges and future research directions', *Sensors*, vol. 21, no. 7, p. 2267, 2021.
- [21] P. Mehrotra, B. Chatterjee, and S. Sen, 'EM-wave biosensors: A review of RF, microwave, mm-wave and optical sensing', *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1013, 2019.
- [22] O. Korostynska, A. Mason, and A. Al-Shamma'a, 'Microwave sensors for the non-invasive monitoring of industrial and medical applications', *Sens. Rev.*, vol. 34, no. 2, pp. 182–191, 2014.
- [23] P. Hudec, J. Raboch, M. Randus, K. Hoffmann, A. Holub, M. Svanda, and M. Polivka, 'Microwave radar sensors for active defense systems', in *2009 European Radar Conference (EuRAD)*, pp. 581–584, 2009.
- [24] E. Nyfors, 'Industrial microwave sensors—A review', *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 23–43, 2000.
- [25] Q. Liu, W. Guo, and X. Zhu, "Effect of lactose content on dielectric properties of whole milk and skim milk," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 53, no. 9, pp. 2037–2044, 2018.
- [26] M. Bakır, M. Karaaslan, F. Karadag, S. Dalgac, E. Ünal, and O. Akgöl, 'Metamaterial sensor for transformer oil, and microfluidics', *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, pp. 799–806, 2019.
- [27] M. A. Tümkaya, M. Karaaslan, and C. Sabah, 'Metamaterial-based high efficiency portable sensor application for determining branded and unbranded fuel oil', *Bull. Mater. Sci.*, vol. 41, pp. 1–8, 2018.
- [28] A. Tamer, F. Ozkan Alkurt, O. Altintas, M. Karaaslan, E. Unal, O. Akgol, F. Karadag, and C. Sabah, 'Transmission line integrated metamaterial based liquid sensor', *J. Electrochem. Soc.*, vol. 165, no. 7, p. B251, 2018.
- [29] Y. Lee, S.-J. Kim, H. Park, and B. Lee, 'Metamaterials and metasurfaces for sensor applications', *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1726, 2017.
- [30] P. Vélez, L. Su, K. Grenier, J. Mata-Contreras, D. Dubuc, and F. Martin, 'Microwave microfluidic sensor based on a microstrip splitter/combiner configuration and split ring resonators (SRRs) for dielectric characterization of liquids', *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 20, pp. 6589–6598, 2017.
- [31] A. A. Mohd Bahar, Z. Zakaria, M. K. Md. Arshad, A. A. M. Isa, Y. Dasril, and R. A. Alahnomi, 'Real time microwave biochemical sensor based on circular SIW approach for aqueous dielectric detection', *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 5467, 2019.
- [32] H. J. Lee and J. G. Yook, 'Biosensing using split-ring resonators at microwave regime', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 25, 2008.
- [33] M. A. Tümkaya, F. Dinçer, M. Karaaslan, and C. Sabah, 'Sensitive metamaterial sensor for distinction of authentic and inauthentic fuel samples', *J. Electron. Mater.*, vol. 46, pp. 4955–4962, 2017.
- [34] M. A. Tümkaya, E. Ünal, and C. Sabah, 'Metamaterial-based fuel sensor application with three rhombus slots', *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 33, no. 24, p. 1950276, 2019.
- [35] M. T. Islam, M. R. Islam, M. T. Islam, A. Hoque, and M. Samsuzzaman, 'Linear regression of sensitivity for meander line parasitic resonator based on ENG metamaterial in the application of sensing', *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 10, pp. 1103–1121, 2021.
- [36] Y. I. Abdulkarim, L. Deng, M. Karaaslan, and E. Unal, 'Determination of the liquid chemicals depending on the electrical characteristics by using metamaterial absorber based sensor', *Chem. Phys. Lett.*, vol. 732, p. 136655, 2019.
- [37] O. Altıntaş, M. Aksoy, and E. Ünal, 'Design of a metamaterial inspired omega shaped resonator based sensor for industrial implementations', *Physica E*, vol. 116, p. 113734, 2020.
- [38] Y. I. Abdulkarim, L. Deng, M. Karaaslan, O. Altıntaş, H. N. Awl, F. F. Muhammadsharif, C. Liao, Emin Unal, and H. Luo, 'Novel metamaterials-based hypersensitized liquid sensor integrating omega-shaped resonator with microstrip transmission line', *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 943, 2020.

- [39] M. A. Khalil, W. H. Yong, M. T. Islam, A. Hoque, Md. S. Islam, C. C. Leei, and M. S. Soliman, 'Double-negative metamaterial square enclosed QSSR for microwave sensing application in S-band with high sensitivity and Q-factor', *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 7373, 2023.
- [40] O. Altıntaş, M. Aksoy, E. Ünal, and M. Karaaslan, 'Chemical liquid and transformer oil condition sensor based on metamaterial-inspired labyrinth resonator', *J. Electrochem. Soc.*, vol. 166, no. 6, p. B482, 2019.
- [41] A. Tamer, F. Karadağ, E. Ünal, Y. I. Abdulkarim, L. Deng, O. Altıntaş, M. Bakır, and M. Karaaslan, 'Metamaterial based sensor integrating transmission line for detection of branded and unbranded diesel fuel', *Chem. Phys. Lett.*, vol. 742, p. 137169, 2020.
- [42] Z. Viskadourakis, A. Theodosi, K. Katsara, M. Sevastaki, G. Fanourakis, O. Tsilipakos, V. M. Papadakis, and G. Kenanakis, "Engraved Split-Ring Resonators as Potential Microwave Sensors for Olive Oil Quality Control," *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2024.
- [43] M. R. Islam, M. T. Islam, A. Hoque, A.S. Alshammari, A. Alzamil, H. Alsaif, M. Samsuzzaman, and M.S. Soliman, "Star enclosed circle split ring resonator-based metamaterial sensor for fuel and oil adulteration detection," *Alexandria Eng. J.*, vol. 67, pp. 547–563, 2023.
- [44] A. A. Al-Mudhafar and A. M. Ra'ed, "High-precise microwave active antenna sensor (MAAS) formulated for sensing liquid properties," *Sens. Actuators, A*, vol. 341, 2022.
- [45] M. Yıldırım and M. A. Gözel, "Asimetrik eş-düzlemsel şerit beslemeli anten ile motor yağ seviye ve kullanım ömrü tespiti.," *SDU Journal of Engineering Sciences & Design/Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 11, no. 3, 2023.
- [46] M. Bakır and İ. Yasar, "Metamalzeme Tabanlı Hassas Süt ve Sıvı Sensörü Uygulaması," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, pp. 10–16, 2022.

Özgeçmişler



Hüseyin Korkmaz, Elektrik-Elektronik Mühendisliği alanında lisans ve yüksek lisans derecelerini sırasıyla 2016 ve 2019 yıllarında Gaziantep Üniversitesinden aldı. 2024 yılında Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Anabilim Dalından Doktora derecesi almıştır. Hüseyin Korkmaz 2021 yılında önerdiği Doktora tezi önerisiyle Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 221C ve Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora burs programları tarafından destek almaya hak kazandı. 2021-2023 yılları arasında TÜBİTAK tarafından desteklenen 120M763 kodlu TÜBİTAK 1001 projesinde Doktora Bursiyeri olarak görev yaptı. Araştırma ilgi alanları arasında mikro ve nanoteknoloji, fotovoltaiik güneş pilleri, metamalzeme bazlı soğurucular, tahribatsız muayene, MXene (ve diğer 2 boyutlu malzemeler), mikrodalga frekanslarında metamalzemelerin karakterizasyonu, mikrodalga sensörleri, bazı sıvılarda taklit ve taşıyış tespiti yer almaktadır.