

Metamalzeme Tabanlı Hassas Mikrodalga Sensör ile Zeytinyağındaki Tağış Tespiti

Adulteration Detection in Olive Oil by Sensitive Metamaterial- Based Microwave Sensor

 Hüseyin Korkmaz¹, Uğur Cem Hasar¹ 

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep
muh.huseyinkorkmaz@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3518-1943, ugurcem.hasar@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-6098-7762

Öz

Bu çalışmada, tekrarlanabilir, uygulanabilir ve dielektrik parametrelerdeki değişikliklere duyarlı olan bir mikrodalga sensör önerilmiş, saf zeytinyağında mısır yağının tespiti için özel olarak tasarlanmış ve kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca bu çalışma önerilen mikrodalga sensörünün hassasiyetini ve performansını arttırmayı amaçlamaktadır. Önerilen sensör 5.055 GHz rezonans frekansında 41.65 dB'lik bir büyüklüğe sahiptir. Numuneler doğrudan sensör üzerine sensörün tüm yüzeyini kapsayacak şekilde yerleştirilerek sensörün performansı test edilmiştir. Numunelerin ölçülen dielektrik sabitleri, kayıp tanjant değerleri, rezonans frekansları ve $|S_{11}|_{dB}$ değerlerine göre sonuçların tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen metamalzeme sensörü, 192.7'lik kalite faktörü, %7.25 normalleştirilmiş hassasiyet değeri ve 1203.3 başarımlı ölçüsü değeri ile literatürde mevcut olan diğer sensörlerle karşılaştırıldığında üstün performans sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga Sensörü, Yüksek Hassasiyet, Zeytinyağı, Mısır Yağı, Tağış Tespiti

Abstract

In this study, a microwave sensor proposed that is reproducible, feasible, and sensitive to changes in dielectric parameters was specifically designed and comprehensively analyzed for the detection of corn oil in pure olive oil. Additionally, this study aims to increase the sensitivity and performance of the proposed microwave sensor. The proposed sensor has a magnitude of 41.65 dB at a resonance frequency of 5.055 GHz. The performance of the sensor was tested by placing the samples directly on the sensor to cover the entire

surface of the sensor. It has been observed that the results are consistent according to the measured dielectric constant, loss tangent value, resonance frequency, and $|S_{11}|_{dB}$ value of samples. The proposed metamaterial sensor demonstrated superior performance to other sensors available in the literature, with a quality factor of 192.7, a normalized sensitivity value of 7.25%, and a Figure of Merit value of 1203.3.

Keywords: Microwave Sensor, High Sensitivity, Olive Oil, Corn Oil, Adulteration Detection

1. Giriş

Zeytinyağının kalitesi ve bileşimi, üretim süreçlerinin her aşamasında kritik olan temel parametrelerdir. Ancak bazı üreticiler kârı maksimuma çıkarmak için gıdalardaki tağış oranını arttırmaktadır [1]. Günlük kullanımda zeytinyağının hem bileşim hem de kalite açısından diğer yağlardan üstün olduğu belirtilmektedir. Ancak bu yağların üretim süreçlerindeki farklılıklar nedeniyle fiyat aralığı düşük kaliteli ürünlerden yüksek kaliteli ürünlere kadar geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Bu durum, düşük kaliteli yağların yüksek kaliteli yağlarla karıştırılması sonucu pazarlama sürecinde ortaya çıkan karmaşıklıkları artırabilmektedir [2]. Sızma zeytinyağı ve diğer değerli yağlara genellikle ayçiçeği, mısır, palmye ve pamuk tohumu gibi daha ekonomik yağlarla katkı yapılmaktadır [3]. Bu tür katkılar, normal insan duyuları veya basit araçlarla tespit edilmesini zorlaştırmak için çeşitli yöntemler kullanabilmektedir [4]. Yağ numunelerinin analizinde, gaz kromatografisi [5] ve yüksek performanslı sıvı kromatografisi [6] gibi geleneksel yöntemlerin yanı sıra,

diferansiyel taramalı kalorimetri [7] yöntemleri (ince tabaka kromatografisi [8] gibi modern teknikler ve kızılötesi spektroskopisi [9], ultraviyole spektroskopisi [10] ve floresans spektroskopisi [11]) de kullanılmaktadır. Bu analiz teknikleri çoğu zaman alıcı ve karmaşık olduğu için eleştirilmekte ve yüksek maliyetli tesisler gerektirdiği sıklıkla vurgulanmaktadır. Son araştırmalar yüksek doğruluk, kompakt boyut ve yüksek hassasiyete sahip sensörlerin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır [12]-[20]. Mikrodalga (MD) sensörler, algılama süreçlerinde elektromanyetik alanları kullanır ve genellikle 300 MHz ile THz arasında değişen frekanslarda çalışır [21][39]. MD sensörlerinin diğer alternatiflere göre düşük maliyet, kompakt yapı, yüksek doğruluk, kolay üretim ve test edilebilirlik gibi avantajları bulunmaktadır. Bu bariz avantajlar sayesinde MD sensörler sağlık [22], gıda sanayi [18], savunma sanayi [23] ve sanayi [24] gibi birçok farklı alanda kritik bir rol oynamaktadır. Son yıllarda araştırmacılar MD sensörlerini kullanarak taşıma tespiti konusunda çeşitli çalışmalar yürütmektedir. MM sensörlerinin farklı yağların tespitinde kullanılabilirliği de araştırmalarda gösterilmiştir [25][26]. Örneğin kirli ve temiz transformatör yağlarında rezonans frekans kayması 70 MHz civarında iken zeytinyağı ve mısır yağlarında bu değer 50 MHz'e düşmektedir. Markalı ve markasız yakıt numunelerinin tespiti için yüksek verimli ve taşınabilir bir sensör önerilmiştir [27]. Markalı ve markasız motorin için rezonans frekans kayması 72 MHz olarak belirlenirken, markalı ve markasız benzin için bu kayma 12 MHz olarak belirlendi. Orijinal ve katkı benzin numunelerini ayırt etmek için iletim hattı tabanlı bir MTM sensörü geliştirildi [28]. Bu sensör, 50 MHz frekans kaymasıyla orijinal ve katkı dizel numuneleri arasında ayırma yapma kapasitesine sahiptir. Literatür araştırmaları, MM tabanlı sensörlerin geniş bir frekans aralığında katı dielektrik malzemelerden sıvılara, gazlar [26][27][28][29] ve biyomoleküllere kadar çeşitli malzemeleri tespit etmek için kullanılabileceğini ortaya koymaktadır [30][31][32]. Orijinal ve katkı yakıt numunelerini ayırt etmek için yüksek hassasiyetli bir MM sensörü geliştirilmiştir [33]. Bu çalışmada rezonans frekansı 100 MHz kadar kaydırılmıştır. Akış algılama için Rhombus MM sensörü önerilmiştir [34], ancak bu çalışmada sensörün hassasiyetinin ve kalite faktörünün düşük olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada polipropilen tespiti için kullanılan kavislili çizgi MM tabanlı sensörün orta

düzeyde performans gösterdiği belirtilmiştir [35]. Değişen elektriksel özelliklere sahip sıvı kimyasalları tespit etmek için MM soğurucudan ilham alan bir sensör önerilmiştir [36]. Sensörün kalite faktörünün ve hassasiyetinin yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla endüstriyel uygulamalara yönelik omega formatında yeni bir sensör piyasaya sürülmüştür [37]. Sensör 8–12 GHz frekans aralığında çalışacak şekilde tasarlanmış olup, temiz ve atık transformatör yağları için 70 MHz frekans kayması sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Sıvı kimyasalları tespit etmek için yeni bir MM sensörü de tanıtılmıştır [38]. Çalışmadaki kalite faktörleri ve hassasiyet ortalama düzeyde olduğu anlaşılmıştır. MD tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlerin zeytinyağı taşımasına karşı algılama yetenekleri araştırılmıştır. Zeytinyağı, mısır yağı ve soya yağı gibi farklı tipteki yenilebilir yağlar için 2-9 GHz frekans aralığında elektromanyetik tepkileri araştırılmıştır. Ancak hesaplanan kalite faktörü, S ve başarımlı ölçümü değerleri yeterli düzeyde değildir [42]. Saf ve katkı yakıt ve yağların geniş bir yelpazesini tespit etmek için metamalzeme sensörü önerilmiştir. Sensörün yüksek kalite faktörü ve düşük seviyede hassasiyet ve başarımlı değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir [43]. Yaklaşık 3 GHz frekansında çalışan PCB kartlarından, mineral yağların özelliklerini algılamak için bir mikrodalga aktif anten sensörü tasarlanıp imal edilmiştir. Tasarlanan antenin üst yüzüne temas edecek şekilde mikroskop cam slaytı üzerine 150 µL kapasiteli M şeklinde bir kanal oluşturuldu. Daha sonra kanala yeni ve hasarlı trafo yağı enjekte edilerek sensör test edildi. Önerilen sensörün düşük hassasiyete sahip olduğu anlaşılmaktadır [44]. Motor yağının ömrü ve seviye tespiti amacıyla iki farklı yağ numunesine yerleştirilen önerilen antenle, geri dönüş kaybı grafiğindeki rezonans frekansı ve bant genişlikleri incelenmiştir. Bu çalışma, önerilen anten aracılığıyla motor yağının ömrünün mikrodalga frekanslarında gerçek zamanlı olarak tespitini sağlamaktadır. Ancak hassasiyet, kalite faktörü ve başarımlı ölçümü hakkında herhangi bir analize rastlanmamıştır [45]. Metamalzeme tabanlı bir sensör tasarımı, TE polarizasyon modunda 8-12 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapı, ön yüzeyinde dört ayrı dikdörtgen ve halka tabanlı rezonatörler içermekte olup, arka yüzeyde ise bu rezonatörlerin açıları 180° değiştirilmiştir. Ayrıca, yapının arka kısmına 10 mm kalınlığında WR90 dalga kılavuzuyla uyumlu boyutlarda bir örnek tutucu entegre

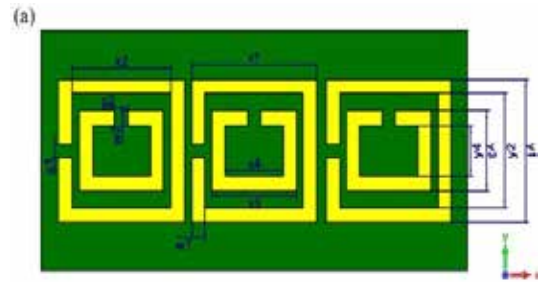
edilerek, test edilecek malzemenin bu tutucuya yerleştirilmesi hedeflenmiştir. Önerilen sensörün kalite faktörü yeterli düzeyde iken hassasiyet ve başarımlı ölçümü hakkında herhangi bir hesaplama yapılmamıştır [46]. Literatür araştırmamız sonucunda önerilen sensörlerin hassasiyetinin (S), kalite faktörünün ve başarımlı ölçümü değerlerinin önemli performans parametreleri olduğu ve bu parametrelerin potansiyel kısıtlamalar oluşturabileceği ve literatürde önerilen sensörlerin bu konularda dezavantajları bulunmaktadır [39]. Bu sınırlamalara ve dezavantajlara çözüm olarak bu çalışma, zeytinyağındaki tağşişleri tespit etmek için tekrarlanabilir, uygulanabilir ve dielektrik parametrelerdeki değişikliklere yüksek hassasiyetle tepki verebilen MM tabanlı bir MD sensör önermekte ve bu sensörün hassasiyetini ve performansını arttırmayı amaçlamaktadır. Önerilen sensör, saf zeytinyağındaki %10 oranındaki mısır yağını tespit edebilme özelliği ile başarılı bir performans sergilemektedir. Önerilen sensör, literatürde mevcut olan diğer sensörlere kıyasla daha yüksek performans sergilemekte ve 5.055 GHz frekansında maksimum %7.25 hassasiyet, 192,7 kalite faktörü ve 1203,3 başarımlı ölçümü değeriyle çalışmaktadır. Ayrıca önerilen sensör, yüksek hassasiyet, kompakt tasarım ve düşük ölçüm maliyetleri ve az miktarda test numunesi gerektirmesi gibi avantajlar sayesinde MD algılama uygulamaları için önemli bir aday olarak değerlendirilebilmektedir.

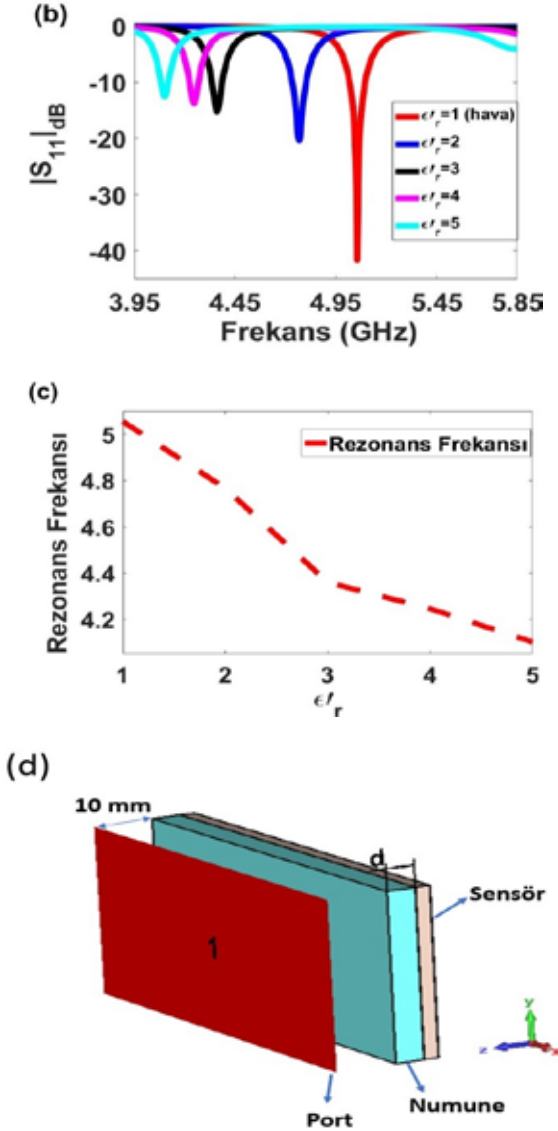
2. Malzemeler ve Yöntemler

2.1. Tasarım ve Analiz

Bu bölümde bu çalışma kapsamında geliştirilen ve incelenen MM tabanlı sensör detaylı olarak ele alınacaktır. Önerilen sensörün boyutları titizlikle analiz edilmiş ve optimum tasarıma ulaşılmıştır. Sıvı gıdaların, özellikle de yağların MD teknikleri kullanılarak tespit edilmesi için geliştirilen sensörün son versiyonu, boyutlarıyla birlikte Şekil 1(a)'da sunulmuştur. Simülasyonlar, Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) tabanlı Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi Mikrodalga (CST Studio Suite 2019) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Frekans alanı çözücüsü en yüksek çözünürlük (3. derece) ve 10–12 doğruluk seviyesi ile kullanılmıştır. S-parametrelerinin doğru simülasyonunu sağlamak için dalga boyu başına düşen hücre sayısı otomatik olarak ayarlandı. Simülasyonun ağ tipi dört yüzlü ağ olarak seçildi ve dalga boyu başına minimum ve

maksimum geçiş sayıları sırasıyla 3 ve 8 olarak düzenlendi. Tasarlanan sensör, üstte iç içe iki ayrı halkadan oluşan üç grup rezonatör, ortada FR-4 dielektrik katman ve altta bakır topraklama katmanından oluşmaktadır. Önerilen tasarımda FR-4 malzemesinin kayıp tanjant değeri 0,025, bağıl geçirgenliği 4,3 ve kalınlığı 1,6 mm olarak belirlenmiştir. Sensörün genel boyutları 47,55 x 22,15 mm² olarak belirlenmiş, C bant dalga kılavuzuyla uyumlu olup 3.95-5.85 GHz frekans aralığında çalışacak şekilde optimize edilmiştir. Z eksenine normal bir elektromanyetik dalga durumunda, x ve y eksenlerine mükemmel bir elektrik iletkeni (PEC) sınır koşulu uygulanır. Tasarlanan sensörün geometrik detayları $x_1=14$ mm, $x_2=11$ mm, $x_3=9.41$ mm, $x_4=6.44$ mm, $y_1=13.17$ mm, $y_2=10.62$ mm, $y_3=7.45$ mm, $y_4=4.66$ mm, $g_1=1.27$ mm, $g_2=1.49$ mm, $w_1=1.5$ mm, $w_2=1.4$ mm şeklindedir. Numune katmanı ($d=3$ mm) önerilen sensörün tüm üst yüzeyini kaplayacak şekilde sensörün üzerine yerleştirilmiştir. Dalga kılavuzu numuneye 10 mm uzaklıkta konumlandırılmış ve frekans alanı çözücüsü en yüksek çözünürlük düzeyinde çalıştırılmıştır. S parametrelerini simüle etmek için dalga boyu başına hücre sayısı otomatik olarak ayarlandı. CST programında tasarlanan yansıma tabanlı sensörün $|S_{11}|_{dB}$ değeri Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi rezonans frekansı yaklaşık 5.055 GHz ve $|S_{11}|_{dB}$ ise -41.65 dB olduğu görülmektedir.

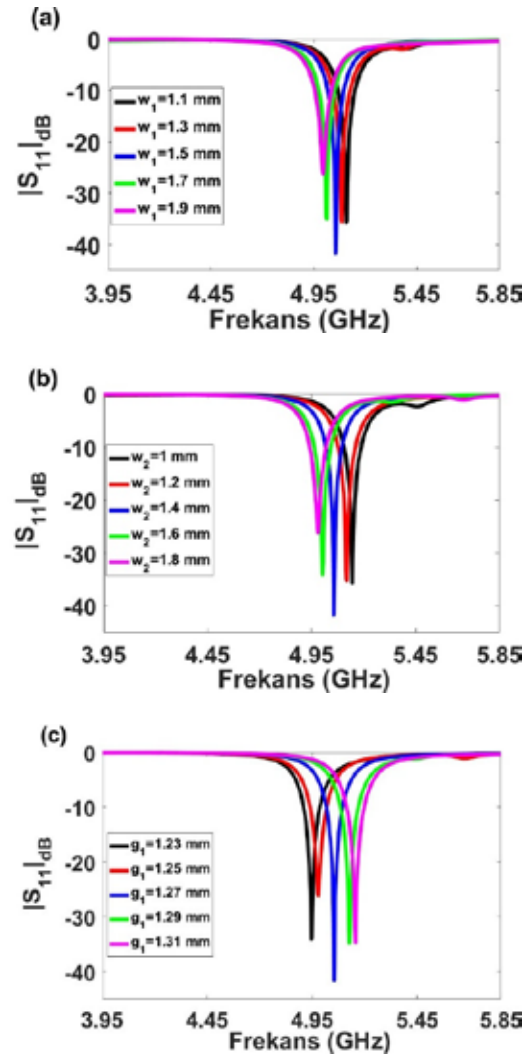


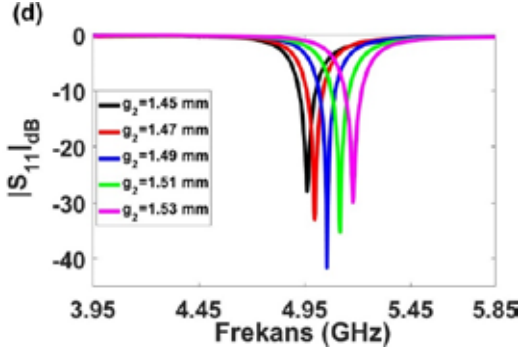


Şekil 1. Benzetim ortamındaki (a) önerilen MM tabanlı MD sensör, (b) ϵ_r değişime bağlı olarak önerilen sensörün $|S_{11}|_{dB}$ tepkisi, (c) ϵ_r değişimine bağlı olarak önerilen sensörün rezonans frekans değişimi, (d) önerilen sensör ve numune ölçüm düzeneği

Şekil 2(a)-(d)'den tasarlanan sensörün rezonans performansının uygun w_1 , w_2 , g_1 , ve g_2 değerleri seçilerek optimize edilebileceği görülmektedir. Bu çalışmada $w_1=1.5$ mm, $w_2=1.4$ mm, $g_1=1.27$ mm, ve $g_2=1.49$ mm değerleri referans alınmıştır. Diğer boyutsal parametrelerin önerilen sensörün rezonans performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için ek simülasyonlar yapıldı. Etkilerinin w_1 ,

w_2 , g_1 , ve g_2 parametrelerinden daha küçük olduğu gözlemlendiğinden, çalışmanın sadeliği açısından bu parametrelerin sonuçları sunulmamıştır. Önerilen sensörün üzerine sensörün tüm üst yüzeyini kaplayacak şekilde tanımlanan ve $\epsilon_r=1,2,3,4$ ve 5 değerlerinde rezonans frekans tepkileri ölçülen “numune” katmanını yerleştirilmiştir. Bu numunelerin $|S_{11}|_{dB}$ tepkileri Şekil 1(b)'de ve bu numunelerin sağladığı rezonans frekansları da Şekil 1(c)'de sunulmaktadır. Şekil 1(b)-(c) incelendiğinde önerilen sensör üzerine konulan malzemenin dielektrik katsayısı (ϵ_r) arttıkça hem rezonans frekansının hem de $|S_{11}|_{dB}$ değerinin neredeyse doğrusal olarak azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, önerilen sensörün bir sonraki bölümde detaylı olarak ele alacağımız dielektrik katsayısı (ϵ_r) ve kayıp tanjant ($\tan\delta_e$) değerlerine karşı hassasiyetini kanıtlamaktadır.



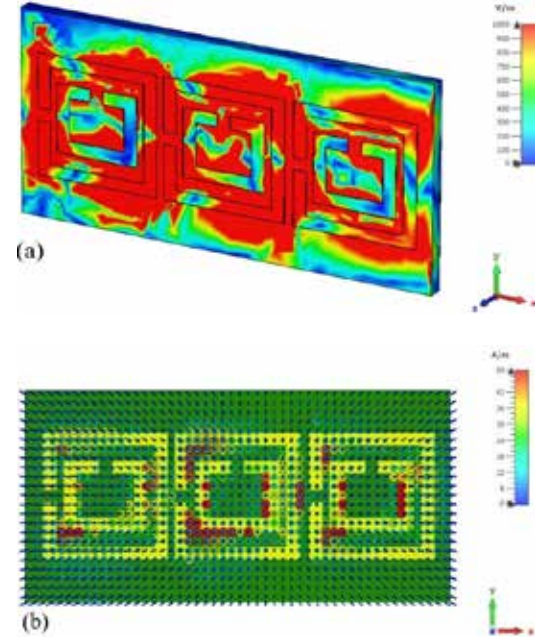


Şekil 2. Benzetim ortamında (a) w_1 , (b) w_2 , (c) g_1 ve (d) g_2 'nin önerilen sensörün $|S_{11}|_{dB}$ tepkisi üzerindeki etkisi.

Önerilen sensörün çalışma prensibini anlamak için elektrik alan dağılımları da incelenmiştir. Elektrik alanındaki değişiklikler sensörün enerji depolama kapasitesinin değerlendirilmesine olanak sağlar [20]. Önerilen sensörün elektrik alan dağılımları Şekil 3(a)'da görüldüğü gibi rezonans frekansında (5.055 GHz) simüle edilmiştir. Rezonatörü oluşturan bileşenlerde, özellikle rezonatörün kapasitif yönlerinde elektrik alan şiddetinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3(b), önerilen sensörün yüzey akımının rezonans frekansındaki dağılımını göstermektedir. Yüzey akımı dikdörtgen rezonatörler üzerinde daha yoğun bir şekilde dağılmıştır. Önerilen yapı için, rezonans olayını tetikleyen bir elektrik dipolünün varlığı, simüle edilmiş yüzey akım dağılımı ile gösterilmiştir. Sonuç olarak önerilen yapı, rezonatörün üst bölgesinde meydana gelen numunenin elektriksel özelliklerinde meydana gelen çok küçük değişiklikleri bile tespit etme kapasitesine sahiptir. Rezonatör, etkili kapasitansın yanı sıra etkili bir endüktansa da sahiptir; bu kombinasyon genellikle rezonans frekansı (f_r) ile sonuçlanır.

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

Burada L_{eff} ve C_{eff} sırasıyla önerilen sensörün etkin endüktansını ve kapasitansını temsil eder.

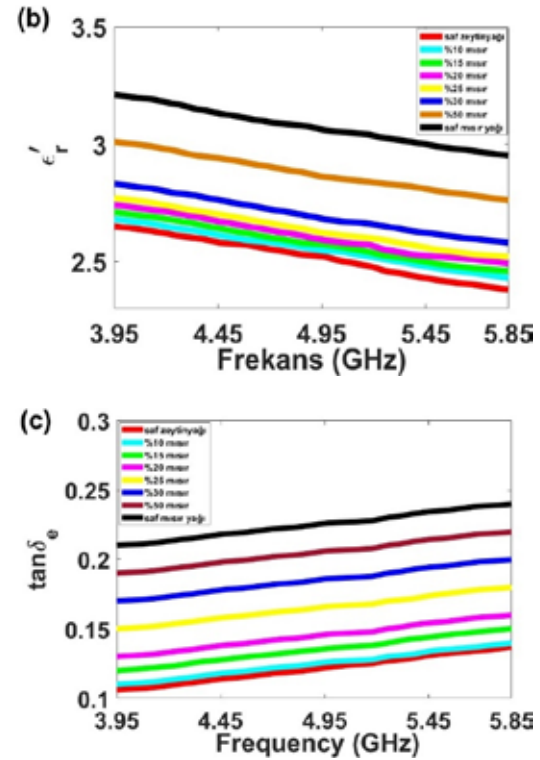


Şekil 3. Önerilen sensörün rezonans frekansındaki (5.055 GHz) (a) E-alanı ve (b) yüzey akım dağılımı.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Önerilen MM tabanlı sensörün farklı yüzdelerde hazırlanan numunelere tepkisini simüle etmek için tüm numunelerin dielektrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, Gaziantep'teki (Türkiye) yerel bir süpermarketten satın alınan saf mısır yağı ve saf zeytinyağı farklı oranlarda karıştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan zeytinyağı, 15,5 g/100 g doymuş yağ asidi, 74 g/100 g tekli doymamış yağ asidi ve 10,5 g/100 g çoklu doymamış yağ asidi içermektedir. Ayrıca kullanılan mısır yağında 15 g/100 g doymuş yağ asidi, 26 g/100 g tekli doymamış yağ asidi ve 59 g/100 g çoklu doymamış yağ asidi bulunmaktadır. Numunelerin dielektrik sabitleri, Şekil 4(a)'da gösterilen dielektrik prob ölçüm düzeneği kullanılarak 500 MHz-26.5 GHz frekans aralığında ölçülmüştür. Hazırlanan numunelerin dielektrik sabitleri, Keysight Technologies'in açık uçlu koaksiyel dielektrik prob kiti (Model numarası: N1501A) ve kalibrasyon için kısa devre, açık devre ve damıtılmış su gibi referans standartlar kullanılarak belirlenmiştir. Kalibrasyonun doğruluğunu teyit etmek amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan distile su, etanol ve metanolün kalibrasyon sonrası ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra her bir yağ numunesinden yeterli miktarda alınarak

200 ml'lik cam beherlere yerleştirildi ve doğru ölçümler elde etmek için prob ucu numune yüzeyinden yaklaşık 15 mm derinliğe daldırıldı. Her bir numune ölçümü 5 defa tekrarlanmış ve ortalaması alınarak dielektrik katsayısı belirlenmiştir (1001 data). Ayrıca numunelerin hazırlanması ve dielektrik prob ölçümleri normal oda koşullarında (23°C ve yaklaşık % 55 bağıl nem) gerçekleştirilmiştir. Yansıma tepkisi, yaklaşık 90 dB dinamik aralığa ve yaklaşık 30 dB yönlülüğe sahip Keysight'in (Model: N9918A) vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçüm, 1 metre uzunluğunda iki adet 3,5 mm faz kararlı koaksiyel kablo aracılığıyla yapılmıştır. Daha sonra, her numune için göreceli karmaşık geçirgenlik ($\epsilon = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$) kullanılarak, yerleşik yazılım aracılığıyla dielektrik sabiti (ϵ'_r) ve kayıp tanjant ($\tan\delta_e = \epsilon''_r/\epsilon'_r$) değerleri elde edilmiştir (1001 data). Şekil 4(b) ve 4(c) sırasıyla saf zeytinyağı, saf mısır yağı ve zeytinyağı-mısır yağı tağışı numunelerinin farklı oranlardaki gerçel dielektrik sabitleri ve kayıp tanjant değerlerinin grafiklerini göstermektedir. Şekil 4(b)'den mısır yağının gerçel dielektrik sabiti değerinin zeytinyağından daha büyük olduğu görülmektedir. Numunelerin gerçel dielektrik sabiti 3.95-5.85 GHz arasında doğrusal bir düşüş gösterirken, aynı frekans aralığında bu örneklerin kayıp tanjantı doğrusal bir artış göstermektedir. Saf zeytinyağı ve zeytinyağına karıştırılan mısır yağı (%10, %15, %20, %25, %30, %50 oranlarında) ve saf mısır yağı numunelerinin rezonans frekansında ölçülen gerçel dielektrik sabiti (kayıp tanjantı) sırasıyla 2,50 (0,124), 2,54 (0,127), 2,56 (0,137), 2,58 (0,147), 2,61 (0,167), 2,67 (0,187), 2,85 (0,207) ve 3,05 (0,227) şeklindedir. Zeytinyağı ve mısır yağının ölçülen dielektrik sabiti değerleri literatürle oldukça uyumludur [25]. Dielektrik özellikleri belirlenen ve verileri CST benzetim programı kütüphanesine aktarılan tüm numuneler rezonatörün tüm yüzeyine kapsayacak şekilde yerleştirilerek (numune katmanı) simüle edilmiştir. Bu bağlamda önerilen MM tabanlı yansıma rezonans sensörünün farklı yüzdelerdeki numunelere verdiği tepki benzetim ortamında değerlendirilmiştir.

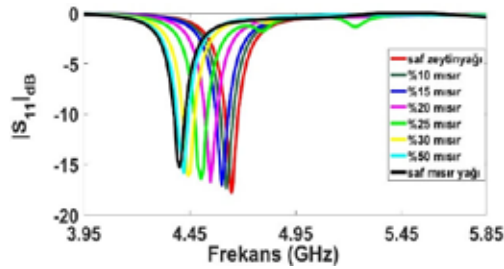


Şekil 4. (a) Koaksiyel prob deneysel ölçüm düzeneği, saf zeytinyağı, saf mısır yağı ve mısır katkılı zeytinyağı numunelerinin (b) dielektrik sabiti (ϵ'_r) ve (c) kayıp tanjant ($\tan\delta_e$) grafikleri.

3.1. Zeytinyağının Mısır Yağı ile Tağışı ve Analizi

Bu bölümde, önerilen MM tabanlı rezonans sensörü kullanılarak zeytinyağına farklı yüzdelerde ilave edilen mısır yağının analiz etme süreci anlatılmaktadır. Saf zeytinyağı, saf mısır yağı ve saf zeytinyağına karıştırılan mısır yağı numunelerinin dielektrik verileri kullanılarak 3.95-5.85 GHz

frekans aralığında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tağşiş simülasyon sonuçları Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi önerilen sensör, zeytinyağına eklenen mısır yağı oranı değiştirildiğinde farklı rezonans frekanslarına ve değişen yansıma büyüklüklerine sahip olmaktadır. Saf zeytinyağı ve mısır yağı rezonatörün üst yüzeyine yerleştirildiğinde tüm simülasyon parametrelerinin aynı tutulduğu koşullarda gözlenen rezonans frekansı ($|S_{11}|_{dB}$) değerleri sırasıyla 4.647 GHz (-17.78 dB) ve 4.401 GHz (-15.25 dB) şeklindedir. Simülasyon sonuçlarından, %10, %15, %20, %25, %30 ve %50 mısır yağı tağşişinin rezonans frekansı (ve $|S_{11}|_{dB}$) sırasıyla 4.623 GHz (-17.35 dB), 4.602 GHz (-17.02 dB), 4.548 GHz (-16.71 dB), 4.503 GHz (-16.42 dB), 4.443 GHz (-16.08 dB) ve 4.422 GHz (-15.78 dB) olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca saf zeytinyağına göre tağşişli numunelerin rezonans frekans kaymaları sırasıyla 0 MHz, 24 MHz, 45 MHz, 99 MHz, 144 MHz, 204 MHz ve 225 MHz olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 1 numunelerin rezonans frekansları, $|S_{11}|_{dB}$ değerleri, ϵ'_r (gerçek dielektrik sabiti) değerleri ve numunelerin rezonans frekans kaymaları (saf zeytinyağına göre) dahil olmak üzere zeytinyağı-mısır yağı tağşişinin sonuçlarını göstermektedir. Numunelerin gerçek dielektrik sabiti değerleri küçükten büyüğe sıralandığında saf zeytinyağı, mısır yağı ile karıştırılmış saf zeytinyağı (%10, %15, %20, %25, %30, %50 oranlarında) ve saf mısır yağı şeklinde bir sıralama gözlemlenmiştir. Mısır yağı oranı arttıkça rezonans frekansının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak mısır yağı oranı arttıkça numunelerin rezonans frekansı kaymaları saf zeytinyağına göre artmıştır. Son olarak mısır yağı miktarı arttıkça $|S_{11}|_{dB}$ değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Önerilen sensörün saf zeytinyağı, mısır katkı zeytinyağı numuneleri ve saf mısır yağı için benzetim ortamındaki $|S_{11}|_{dB}$ tepkileri.

Tablo 1. Zeytinyağı-mısır yağı tağşiş numuneleri için rezonans frekansı (f_r), ϵ'_r ve $|S_{11}|_{dB}$ değerleri ve rezonans frekansı kaymaları (Δf_r)

Numuneler	f_r	$ S_{11} _{dB}$	Δf_r	ϵ'_r
Saf zeytinyağı	4.647 GHz	-17.78 dB	0 MHz	2.50
%10 mısır tağşişi	4.623 GHz	-17.35 dB	24 MHz	2.54
%15 mısır tağşişi	4.602 GHz	-17.02 dB	45 MHz	2.56
%20 mısır tağşişi	4.548 GHz	-16.71 dB	99 MHz	2.58
%25 mısır tağşişi	4.503 GHz	-16.42 dB	144 MHz	2.61
%30 mısır tağşişi	4.443 GHz	-16.08 dB	204 MHz	2.67
%50 mısır tağşişi	4.422 GHz	-15.78 dB	225 MHz	2.85
Saf mısır yağı	4.401 GHz	-15.25 dB	246 MHz	3.05

3.2. Hassasiyet, Kalite Faktörü ve Başarım Ölçümü Analizi

Sensörün performansı genellikle hassasiyet, kalite faktörü ve başarım ölçümü gibi boyutsuz sensör parametreleriyle değerlendirilmektedir. Önerilen sensörün kalite faktörünü ve bant genişliği frekansını hesaplamak için (2) ve (3)'teki ifadeler kullanılmıştır. 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 temsil eder.

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

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

Önerilen sensör numune ile yüklenip elektrik alanının en güçlü olduğu bölgede test edildiğinde, rezonans frekansı test edilen malzemenin geçirgenliğine bağlı olarak doğrudan

değişmektedir. Bu ilişki, göreceli geçirgenlik ($\Delta\epsilon_r$)'teki herhangi bir değişikliğin, rezonans frekansı Δf_r 'de doğrusal bir değişikliğe neden olduğunu gösterir. 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 durum rezonans frekansını, f_{ϵ_r} ise numunenin yerleştirildiği durumdaki sensörün rezonans frekansını temsil etmektedir. S(%), önerilen sensörün normleştirilmiş duyarlılığıdır [20]. Önerilen sensörün normleştirilmiş hassasiyeti (5) ifadesi kullanılarak belirlenebilir.

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

Bu çalışma kapsamında numunelerin kalite faktörü, hassasiyeti ve başarımlı ölçümü değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 6(a)-(c)'de gösterilmiştir. Önerilen sensörün başarımlı ölçümü değeri (6) ifadesi kullanılarak belirlenebilmektedir.

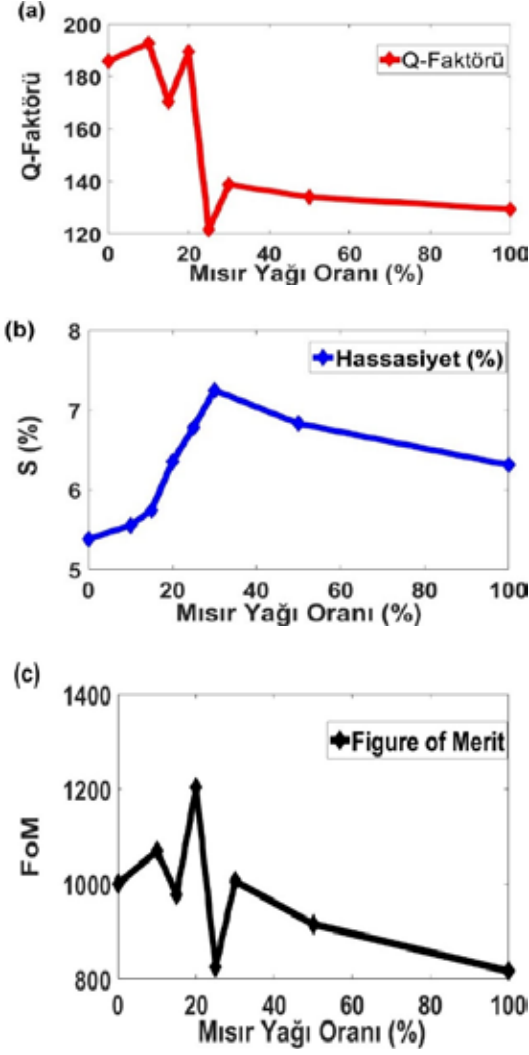
$$\text{Başarımlı ölçümü} = \text{Hassasiyet} \times \text{Kalite Faktörü} \quad (6)$$

Saf zeytinyağı, mısır yağı ile karıştırılmış zeytinyağı (%10, %15, %20, %25, %30, %50 oranlarında) ve saf mısır yağının kalite faktörü değerleri sırasıyla 185.9, 192.7, 170.4, 189.5, 121.7, 138.8. Aynı şekilde numunelerin hesaplanan hassasiyet değerleri sırasıyla %5.38, %5.55, %5.74, %6.35, %6.78, %7.25, %6.83 ve %6.31'dir. Son olarak aynı sırayla numunelerin hesaplanan başarımlı ölçümü değerleri sırasıyla 1000.1, 1069.5, 978.1, 1203.3, 825.1, 1006.2, 915.2 ve 816.5'tir. Önerilen sensör, literatürdeki mevcut diğer sensörlerle karşılaştırmak için Tablo 2'de sunulan kalite faktörü, malzeme, çalışma frekansı, hassasiyet ve başarımlı ölçümü kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde bu çalışmada önerilen sensörün 192,7 kalite faktörü, %7.25 hassasiyet değeri ve 1203,3 başarımlı ölçümü değeri ile önemli performans değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Önerilen sensör literatürde yayınlanan diğer çalışmalara göre daha hassas ve daha yüksek başarımlı ölçümü değeri sunmaktadır. Dolayısıyla bu sonuçlar önerilen sensörün

algılama uygulamaları için uygun bir seçim olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Önerilen sensörün literatürde mevcut diğer sensörlerle karşılaştırılması

Kaynak	Malzeme	f_r (GHz)	Kalite Faktörü	S (%)	Başarımlı 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	Zeytinyağı ve Mısır yağı	3.95-5.85	193	7.25	1203.3



Şekil 6. Önerilen sensörün mısır yağı katkı yüzdesine göre hesaplanan (a) kalite faktörü, (b) hassasiyeti ve (c) başarımlı ölçümü değerleri.

4. Sonuç

Zeytinyağı sağlıklı içeriği nedeniyle oldukça tercih edilen bir besindir. Ancak maliyetinin yüksek olması nedeniyle üretim aşamasında diğer ekonomik yağlarla karıştırılabilmektedir. Bu çalışma, zeytinyağı ile karıştırılmış mısır yağının tespit etmek için tekrarlanabilir, uygulanabilir ve dielektrik parametrelerdeki değişikliklere duyarlı MM tabanlı bir MD sensörü önermekte ve önerilen mikrodalga sensörün hassasiyetini ve performansını arttırmayı amaçlamaktadır. Önerilen yansıma tabanlı sensör 5.055 GHz frekansında çalışmakta ve $|S_{11}|_{dB}$ değeri -41.65 dB olduğu

gözlemlenmiştir. Önerilen sensörün ϵ'_r değişimlerine karşı hassasiyetini belirlemek amacıyla sensör üzerine sensörün tüm yüzeyini kapsayacak şekilde yerleştirilen “numune” katmanına farklı ϵ'_r değerleri tanımlanarak sensörün frekansa bağlı yansıma tepkileri simüle edilmiş ve elde edilen rezonans frekansları ϵ'_r arttıkça azalmıştır. Ayrıca önerilen sensörün elektrik alan ve yüzey akım dağılım analizleri yapılmıştır. Öte yandan saf mısır yağı, saf zeytinyağı ve tağışış numunelerinin dielektrik sabitleri dielektrik ölçüm probu düzeneği kullanılarak ölçülüp analiz edilmiştir. Zeytinyağı ve mısır yağının dielektrik sabitleri birbirine yakın olmasına rağmen, önerilen sensörün sırasıyla %10, %15, %20, %25, %30 ve %50 katkılı numuneler için rezonans frekansındaki 24 MHz, 45 MHz, 99 MHz, 144 MHz, 204 MHz, ve 225 MHz rezonans frekans kaymaları ile bu yağları kolaylıkla ayırt edebildiği sonucuna varılmıştır. Son olarak önerilen sensörün performansı analiz edilmiştir. Buna göre sensörün kalite faktörü, hassasiyeti ve başarımlı ölçümü değerleri hesaplanmıştır. Önerilen sensörün, 192.7 kalite faktörü değeri, %7.25 normalleştirilmiş hassasiyet değeri ve 1203.3 başarımlı ölçümü değeri ile literatürde yer alan diğer sensörlerden daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, elde edilen bulgulara ve performans analizlerine dayanarak önerilen MD sensör, rezonans frekans kayması özelliğini kullanarak saf zeytinyağındaki tağışışlı yağları %10 oranında tespit edebilmektedir. Mısır yağı oranı arttıkça rezonans frekansının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak mısır yağı oranı arttıkça numunelerin rezonans frekansı kaymaları saf zeytinyağına göre artmıştır. Mısır yağı miktarı arttıkça $|S_{11}|_{dB}$ değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Buradan hareketle, yüksek hassasiyet, yüksek kalite faktörü, üstün performans, düşük maliyet ve düşük numune tüketimi gibi avantajlara sahip olan önerilen sensör, frekansa göre yansıma katsayısı tepkisi referans alınarak zeytinyağı tağışış tespiti uygulamalarda tercih edilebilir.

Teşekkür

Hüseyin Korkmaz, çalışmalarına verdikleri desteklerden dolayı BİDEB 2211/C programı için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve 100/2000 Doktora Bursu programı için Yükseköğretim Kurulu (YÖK)'na teşekkür etmektedir.

Yazar Katkıları

Simülasyonlar, kavramsallaştırma analizleri, illüstrasyonların hazırlanması, sonuçların analizi ve değerlendirilmesi Hüseyin Korkmaz ve Uğur Cem Hasar tarafından gerçekleştirildi. Uğur Cem Hasar çalışmanın akademik danışmanlığını yürütmüştür.

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] F. Göğüş, M. T. Özkaya, and S. Ötleş, 'Zeytinyağı, Eflatun Yayınevi'. Ankara, 2009.

[2] S. B. Osman, O. Korostynka, A. Mason, J. D. Cullen, and A. I. Al-Shamma'a, 'Application of microwave spectroscopy analysis on determining quality of vegetable oil', *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 1–4, 2014.

[3] F. D. Gunstone, 'Production and trade of vegetable oils', *Vegetable oils in food technology: composition, properties and uses*, vol. 2, pp. 1–24, 2011.

[4] M. Meenu, Q. Cai, and B. Xu, 'A critical review on analytical techniques to detect adulteration of extra virgin olive oil', *Trends in Food Science & Technology*, vol. 91, pp. 391–408, 2019.

[5] F. Hashempour-baltork, S. V. Zade, Y. Mazaheri, A. M. Alizadeh, H. Rastegar, Z. Abdian, M. Torbati, S. A. Damirchi, 'Recent methods in detection of olive oil adulteration: State-of-the-Art', *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 16, p. 101123, 2024.

[6] L. Menegoz Ursol and S. Moret, 'Evaluation of the impact of olive milling on the mineral oil contamination of extra-virgin olive oils', *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 126, no. 3, p. 2300123, 2024.

[7] M. Islam, L. Bełkowska, P. Konieczny, E. Fornal, and J. Tomaszewska-Gras, 'Differential scanning calorimetry for authentication of edible fats and oils--What can we learn from the past to face the current challenges?', *Journal of Food and Drug Analysis*, vol. 30, no. 2, p. 185, 2022.

[8] M. Khursheed, A. Ahmad, S. E. Noor, L. F. García del Moral, V. Martos Núñez, and Others, 'Chromatographic Techniques for the Detection and Identification of Olive Oil Adulteration', 2024.

[9] H. Yılmaz-Düzyaman, R. de la Rosa, L. Velasco, N. Núñez-Sánchez, and L. León, 'Oil Quality Prediction in Olive Oil by Near-Infrared Spectroscopy: Applications in Olive Breeding', *Agriculture*, vol. 14, no. 5, p. 721, 2024.

[10] I. Musa, 'Investigation the optical properties of Palestinian olive oils for different geographical regions by

optical spectroscopy technique', *Food Chemistry Advances*, vol. 4, p. 100584, 2024.

[11] M. P. Rueda, A. Domínguez-Vidal, E. J. Llorent-Martínez, V. Aranda, and M. J. Ayora-Cañada, 'Monitoring organic matter transformation of olive oil production residues in a full-scale composting plant by fluorescence spectroscopy', *Environmental Technology & Innovation*, p. 103695, 2024.

[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', *Advanced Functional Materials*, 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 Mechanics Letters*, vol. 4, pp. 111–117, 2015.

[15] H. Korkmaz and U. Hasar, 'Wide band metamaterial absorber with lumped element', *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 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', *Optical and Quantum Electronics*, 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', *Optics & Laser Technology*, 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', *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 8847, 2024.

[19] KALİTE. Shi, B. Dong, T. He, Z. Sun, J. Zhu, Z. Zhang, and C. Lee, 'Progress in wearable electronics/photonics—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', *Sensor Review*, 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), 2009, pp. 581–584.

[24] E. Nyfors, 'Industrial microwave sensors—A review', *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 23–43, 2000.

[25] M. H. Bhatti, M. A. Jabbar, M. A. Khan, and Y. Massoud, 'Low-cost microwave sensor for characterization and adulteration detection in edible oil', *Applied Sciences*, vol. 12, no. 17, p. 8665, 2022.

[26] M. Bakır, M. Karaaslan, F. Karadağ, 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', *Bulletin of Materials Science*, vol. 41, pp. 1–8, 2018.

[28] A. Tamer, F. Ozkan Alkurt, O. Altintas, M. Karaaslan, E. Unal, O. Akgöl, F. Karadağ, and C. Sabah, 'Transmission line integrated metamaterial based liquid sensor', *Journal of The Electrochemical Society*, 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. Martín, 'Microwave microfluidic sensor based on a microstrip splitter/combiner configuration and split ring resonators (SRRs) for dielectric characterization of liquids', *IEEE Sensors Journal*, 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', *scientific reports*, vol. 9, no. 1, p. 5467, 2019.

[32] H.-J. Lee and J.-G. Yook, 'Biosensing using split-ring resonators at microwave regime', *Applied Physics Letters*, 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', *Journal of Electronic Materials*, vol. 46, pp. 4955–4962, 2017.

[34] M. A. Tümkaya, E. Ünal, and C. Sabah, 'Metamaterial-based fuel sensor application with three rhombus slots', *International Journal of Modern Physics 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', *Journal of Materials Research and Technology*, 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', *Chemical Physics Letters*, 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: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 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', *Scientific Reports*, 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', *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 166, no. 6, p. B482, 2019.

[41] A. Tamer, F. Karadağ, E. Ünal, Y. I. Abdulkarim, L. Deng, O. Altintas, M. Bakır, and M. Karaaslan, 'Metamaterial based sensor integrating transmission line for detection of branded and unbranded diesel fuel', *Chemical Physics Letters*, 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 Applied Electronic Materials*, 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 Engineering Journal*, 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, *Sensors and Actuators A: Physical*. 341 (2022) 113567.

[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) 2211C 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.



Uğur Cem HASAR, lisans ve yüksek Lisans derecelerini sırasıyla 2000 ve 2002 yıllarında Adana, Çukurova Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden almıştır. Doktora eğitimini 2008 yılında, Binghamton, New York Eyalet Üniversitesi, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2000-2005 yılları arasında Çukurova Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde, 2005-2008 yılları arasında ise Erzurum, Atatürk Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2009-2011 yılları arasında Erzurum, Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde yardımcı doçent, 2011-2013 yılları arasında ise Doçent olarak görev yapmıştır. Daha sonra Gaziantep Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Bölümünde Doçent olarak görev yapmaya başlamıştır. Şu an aynı üniversitede Profesör olarak görevine devam etmektedir. Başlıca araştırma alanları arasında mikrodalga frekanslarında malzemelerin tahribatsız muayenesi ve değerlendirilmesi, yeni kalibrasyon bağlı ve bağımsız mikrodalga yöntemleri ile geleneksel malzemelerin elektriksel ve fiziksel karakterizasyonun yapılması, milimetre dalgaları ve THz frekansları, yüksek güç yoğunluğu uygulamaları için yüksek sıcaklıkta paketlenme, gözenekli silikon temelli cihazlar ve uygulamaları ve metamalzemeler bulunmaktadır.