

Stub Yapılı Kuplaj Tabanlı Mikrodalga Sensör ile Motor Yağı Kullanım Ömrü Tespiti

Detection of Engine Oil Service Life Using a Stub-Structured Coupled-Line-Based Microwave Sensor

ID 0009-0008-8191-6534

ID 0000-0002-5675-1714

ID 0000-0002-0360-7188

ORCID: B. PEHLİVAN (0009-0008-8191-6534), M. YILDIRIM (0000-0002-5675-1714), M. A. GÖZEL (0000-0002-0360-7188)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

berkaypehlivanog@gmail.com, mustfayildirimm@gmail.com, *mahmutgozel@sdu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, motor yağı kullanım ömrünün mikrodalga frekans bölgesinde tahribatsız ve yüksek hassasiyetle izlenebilmesi amacıyla kuplaj hattı destekli, stub yapılı kompakt bir sensör tasarlanmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır. AD 255C taban malzemesi üzerine inşa edilen 120×30 mm² boyutlarındaki sensör, çeyrek dalga empedans uyumlamasına göre optimize edilerek elektromanyetik alanın numune ile etkileşimi artırılmıştır. Tasarımın performansı, 0 km ile 21.100 km aralığındaki motor yağı numuneleri kullanılarak S₂₁ iletim parametresi üzerinden analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, yağın kullanım kilometresi arttıkça dielektrik sabitindeki değişime bağlı olarak rezonans frekansında kayma sergilediğini kanıtlamıştır. Hava ortamında 5.48 GHz olan rezonans frekansı; kullanılmamış motor yağında 5.20 GHz'e, 15.500 km'de 5.18 GHz'e ve 21.100 km'de 5.12 GHz seviyesine gerilemiştir. Toplamda 360 MHz'lik bir frekans kayması elde edilmiştir. Önerilen S₂₁ tabanlı yaklaşım, literatürdeki yansıma temelli sistemlerden farklı bir ölçüm altyapısı sunarak, motor yağı kullanım durumunun belirlenmesine yönelik bakım uygulamaları için pratik bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Motor yağı, mikrodalga sensör, kuplaj, stub, motor yağı kullanım ömrü.

Abstract

In this study, a coupling line-supported, stub-structured compact microwave sensor was designed and experimentally validated to monitor engine oil service life non-destructively and with high sensitivity in the microwave frequency range. The sensor, fabricated on an AD 255C substrate with dimensions of 120×30 mm², was optimized according to quarter-wave impedance matching conditions to enhance the interaction between the electromagnetic field and the oil sample. The sensor performance was evaluated using the S₂₁ transmission parameter for engine oil samples with usage histories ranging from 0 km to 21,100 km. Experimental results demonstrated that the resonance frequency systematically shifted toward lower frequencies as the oil usage increased, due to changes in the

dielectric constant. The resonance frequency decreased from 5.48 GHz in air to 5.20 GHz for unused oil and to 5.12 GHz for oil used for 21,100 km, resulting in a total frequency shift of 360 MHz. The proposed S₂₁-based approach provides a different measurement infrastructure from the reflection-based systems reported in the literature, offering a practical approach for maintenance applications aimed at determining the condition of engine oil.

Keywords: Engine oil, microwave sensor, coupling, stub, engine oil lifetime.

1. Giriş

Mikrodalga frekanslarında çalışan sensör sistemleri, yüksek hassasiyetleri, düşük üretim maliyetleri ve temassız ölçüm kabiliyetleri sayesinde malzeme karakterizasyonu ve içerik analizi uygulamalarında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [1-4]. Bu sistemler, ölçüm yapılan ortamın dielektrik özelliklerinde meydana gelen değişimleri, S-parametreleri üzerinden rezonans frekansı kaymaları ve genlik değişimleri aracılığıyla hassas bir biçimde algılayabilmektedir [5, 6]. Elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşimine dayanan bu yaklaşım, özellikle sıvı veya katı ortamların elektriksel özelliklerindeki değişimlerin izlenmesinde başarılı sonuçlar sunmaktadır. Mikrodalga sensörler hızlı ve tahribatsız ölçüm avantajları sayesinde gıda güvenliği, kimyasal saflık analizi ve biyolojik sıvıların sınıflandırılması gibi farklı disiplinlerde uygulanmaktadır [7]. Mikrodalga sensörlerin algılama hassasiyetini arttırmak için farklı teknikler tercih edilmektedir [8-12]. Mikrodalga sensörlerindeki teknikler arasında metalmalzemeler [13, 14], anten tabanlı sistemler [15], diferansiyel yöntemler [16], iletim hatları [17], RFID sistemli uzaktan sensörler [17-19], rezonatör tasarımları [20] ve kuplör [5] uygulamalarıdır.

Motorlu taşıtlarda motor yağının işlevsel ömrü ve durumu; sürtünme ve aşınmanın azaltılması, ısının uzaklaştırılması ve sızdırmazlığın korunması açısından kritik öneme sahiptir. Uygulamada yağ değişim periyotları çoğunlukla sabit kilometre veya zaman aralıklarına göre belirlenmektedir. Ancak sürüş koşulları, çevresel faktörler, yakıt kalitesi ve motor içi kirlenme gibi çok sayıda değişken nedeniyle yağın gerçek kullanım ömrü bu tahminlerden önemli ölçüde sapabilmektedir. Kurum,

oksidasyon ürünleri, su ve yakıt seyreltmesi ile metal aşınma partiküllerinin birikimi, yağın hem fiziksel hem de dielektrik özelliklerini zamana bağlı olarak değiştirmekte; bu durum erken değişim nedeniyle maliyet ve atık artışına ya da gecikmiş bakım sonucu performans kaybı ve arıza riskinin yükselmesine neden olabilmektedir. Bu bağlamda, motor yağının anlık durumunu doğrudan yansıtan, araç üzerinde uygulanabilir ve ekonomik bir izleme yaklaşımına duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Motor yağı özelinde yapılan bir çalışmada araç motor yağının ömrü ve seviyesini gerçek zamanlı olarak izlemek amacıyla 2.4 GHz'de çalışan Asimetrik Eş-düzlemsel Şerit beslemeli bir mikroşerit anten tasarlanmış ve antenin motor yağı içerisindeki farklı derinliklerdeki konumuna bağlı olarak rezonans frekansı, bant genişliği ve yansıma genliği değişimlerini analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kullanılmamış motor yağının 2.20 GHz'de, 10 bin km kullanılmış motor yağının 2.18 GHz'de ölçüldüğü belirtilmiştir. kullanım kilometresi arttıkça dielektrik özelliklerde meydana gelen değişimlerin rezonans karakteristiklerine yansıdığını açıkça ortaya koymuştur [15]. Motor yağı özelinde yapılan bir diğer çalışmada ise X-bandında çalışan kiral metamalzeme tabanlı sensör önerilmektedir. Önerilen çalışmada, IS680 alt tabakası üzerine basılmış kare ve dairesel rezonatörlerden oluşan kiral bir metamalzeme sensörü geliştirilmiş, sayısal olarak analiz edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Sensörün performansı, motor yağının bozulmasına bağlı olarak değişen dielektrik sabitinin rezonans frekansında oluşturduğu kaymalar üzerinden değerlendirilmiştir. Rapor edilen sonuçlara göre, temiz ve kullanılmış motor yağı örnekleri arasında belirgin rezonans frekansı kaymaları gözlemlenmiştir. S_{11} parametresi için 0–10.000 km aralığında yaklaşık 40 MHz, 0–5.000 km aralığında ise 60 MHz'lik kaymalar rapor edilirken; S_{22} parametresi için bu değerlerin sırasıyla 30 MHz ve 120 MHz olduğu belirtilmiştir. Sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel ölçümler arasında genel olarak iyi bir uyum elde edilmiş olup, küçük sapmaların kalibrasyon ve laboratuvar koşullarından kaynaklandığı ifade edilmektedir [21].

Mikrodalga sensörlerin yalnızca biyolojik ve gıda numunelerinde değil, petrol türevi sıvıların dielektrik özelliklerinin karakterizasyonunda da yüksek potansiyele sahip olduğu, güncel çalışmalarla ortaya konmuştur. Yapılan çalışmalarda mazot içerisine farklı oranlarda gaz yağı ilave edilmesiyle oluşan dielektrik özellik değişimlerinin belirlenmesi amacıyla yansıma katsayısı (S_{11}) tabanlı, yüksek kalite faktörüne sahip bir mikrodalga rezonatör sensörü geliştirmiştir. Yaklaşık 5.08 GHz rezonans frekansında çalışan sensörün elektromanyetik tasarımı 3.95–5.85 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiş, numunelerin dielektrik özellikleri açık uçlu koaksiyel prob yöntemiyle belirlenerek elektromanyetik benzetim modeline aktarılmıştır. Gaz yağı oranının artmasına bağlı olarak rezonans frekansında düzenli kaymalar meydana geldiği ve önerilen sensörün yakıt numunelerindeki dielektrik değişimlerin karakterizasyonunda yüksek duyarlılık sağladığı gösterilmiştir [22]. Petrol türevi sıvılar üzerinde elde edilen bu sonuçların ardından benzer mikrodalga sensör yaklaşımı, gıda ürünlerinde taşıyıcı analizine de uygulanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmada ise 3.95–5.85 GHz frekans aralığında çalışan, S_{11} tabanlı yüksek kalite faktörüne sahip bir mikrodalga rezonatör sensörü kullanarak süt taşıyıcısının belirlenmesini amaçlamıştır. Farklı oranlarda yağsız süt ilave edilen numunelerin dielektrik özellikleri açık uçlu koaksiyel prob yöntemiyle belirlenmiş, yaklaşık 5.127 GHz

rezonans frekansında çalışan sensörün, katkı oranına bağlı olarak belirgin frekans kaymaları oluşturduğu gösterilmiştir. Bu sonuçlar, mikrodalga rezonatör tabanlı sensörlerin süt numunelerindeki dielektrik değişimlerin hassas biçimde karakterize edilmesinde etkili bir yöntem sunduğunu ortaya koymuştur [23]. Benzer yaklaşım bitkisel yağlarda taşıyıcı analizine de uyarlanmıştır. Zeytinyağına farklı oranlarda mısır yağı ilavesinin belirlenmesi amacıyla metamalzeme tabanlı, S_{11} esaslı bir mikrodalga rezonatör sensörü geliştirmiştir. Elektromanyetik analizleri 3.95–5.85 GHz frekans aralığında gerçekleştirilen ve yaklaşık 5.05 GHz rezonans frekansında çalışan sensör ile katkı oranına bağlı olarak rezonans frekansında belirgin değişimler elde edilmiş; kalite faktörü, normalize edilmiş hassasiyet ve başarımlı ölçütü bakımından olumlu sonuçlar rapor edilmiştir. Bu çalışma, metamalzeme tabanlı rezonatör sensörlerin sıvı gıda ürünlerindeki dielektrik değişimlerin belirlenmesinde yüksek duyarlılık sağlayabileceğini göstermiştir [24]. Bu çalışmanın yanı sıra zeytinyağındaki ayçiçek yağı taşıyıcısının belirlenmesine yönelik metamalzeme tabanlı düzlemsel, S_{11} tabanlı mikrodalga rezonatör sensörü geliştirmiştir. FR-4 alt tabaka üzerine tasarlanan ve 8–12 GHz X-band frekans aralığında optimize edilen sensörün numunesiz rezonans frekansı yaklaşık 9.48 GHz olarak belirlenmiştir. Açık uçlu koaksiyel prob yöntemiyle elde edilen dielektrik verileri kullanılarak gerçekleştirilen analizler, ayçiçek yağı oranındaki artışa bağlı olarak rezonans frekansında düzenli kaymalar meydana geldiğini göstermiştir. Bulgular, farklı rezonatör geometrileri ve çalışma frekanslarında geliştirilen mikrodalga sensörlerin sıvı numunelerdeki dielektrik özellik değişimlerinin yüksek hassasiyetle karakterize edilmesinde güvenilir bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır [25]. Bir başka çalışmada ise bal numunelerinde su taşıyıcısının belirlenmesine yönelik yansıma katsayısı tabanlı, düzlemsel bir mikrodalga rezonatör sensörü geliştirmiştir. Yaklaşık 2.45 GHz rezonans frekansında çalışan sensörün elektromanyetik tasarımı gerçekleştirilmiş, farklı oranlarda su ilave edilen bal numunelerinde oluşan dielektrik özellik değişimleri rezonans frekansındaki kaymalar üzerinden değerlendirilmiştir. Su oranındaki artışa bağlı olarak rezonans frekansında düzenli değişimler meydana geldiği ve önerilen sensörün bal numunelerindeki dielektrik özellik değişimlerinin karakterizasyonunda yüksek hassasiyet sunduğu gösterilmiştir [26].

Literatürde, motor yağı kalitesinin gerçek zamanlı ve invaziv olmayan yöntemlerle izlenmesine yönelik olarak X-bandında çalışan elektroformlu iris dalga kılavuzu tabanlı mikrodalga sensörler rapor edilmiştir. Üçüncü dereceden elektroformlu dalga kılavuzu filtresi kullanan bu sensör, motor yağının yaşlanmasına bağlı dielektrik özellik değişimlerini rezonans frekansı kaymaları üzerinden tespit edebilmekte ve geleneksel laboratuvar temelli yağ analizi yöntemlerine kıyasla sürekli ve yerinde izleme avantajı sunmaktadır. Deneysel çalışmalarda, 148, 316 ve 604 saat boyunca yaşlandırılmış motor yağı numuneleri için rezonans frekansında belirgin kaymalar gözlemlenmiş; en ileri yaşlanma durumunda yaklaşık 10 MHz'e kadar frekans kayması ölçülmüştür. Ek olarak, koaksiyel prob tekniği ile gerçekleştirilen dielektrik ölçümler, mikrodalga sensör verileriyle tutarlı sonuçlar vermiştir. Elde edilen bulgular, rezonans frekansının yağın yaşlanma süresine yüksek duyarlılık gösterdiğini ve sensörün öngörücü bakım uygulamalarında kullanılabilirliğini doğrulamaktadır. Elektroformlama yöntemiyle üretilen dalga kılavuzu yapısı,

düşük maliyet, hafiflik ve yüksek hassasiyet avantajları sunarken, sensörün sıvı konsantrasyon analizi gibi farklı endüstriyel uygulamalara da ölçeklenebilir bir çözüm sağladığı literatürde vurgulanmaktadır [27]. Mikrodalga tabanlı sensörler, motor yağının yaşlanma ve bozulma süreçleri sırasında meydana gelen bağıl dielektrik geçirgenlik ve kayıp tanjantı değişimlerini doğrudan algılayabilmeleri sayesinde bu ihtiyaca güçlü bir çözüm sunmaktadır.

Bu çalışmada, motor yağının kullanım ömrünün yüksek duyarlılıkla değerlendirilmesi amacıyla stub yapılı ve kuplaj hattı destekli kompakt bir mikrodalga sensör önerilmektedir. Stub ve kuplaj hattı, çeyrek dalga koşullarına göre boyutlandırılmış; kuplaj bölgesinin optimize edilmesiyle elektromanyetik alanın yağ numunesi ile etkileşiminin artırılması hedeflenmiştir. Bu sayede frekans seçiciliği yükseltilmiş ve dielektrik özelliklerde meydana gelen küçük değişimlere karşı hassas bir sensör yanıtı elde edilmiştir. Bu çalışmanın özgün katkıları aşağıda özetlenmiştir:

(i) Motor yağı kullanım ömrünün belirlenmesine yönelik olarak S_{21} iletim parametresi tabanlı, stub yapılı bir mikrodalga sensör mimarisi önerilmiştir.

(ii) Yansıma parametrelerine dayalı yaklaşımlardan farklı olarak, iletim parametresi kullanılarak bir ölçüm yaklaşımı sunulmuştur.

(iii) Önerilen sensör, farklı kilometrelerde kullanılmış gerçek motor yağı numuneleri ile deneysel olarak doğrulanmıştır.

2. Sensör Tasarımı

Bu çalışmada, sıvı karakterizasyonu ve dielektrik özelliklerin derişimini tespiti amacıyla kuplaj hattı Tabanlı Stub Yapılı bir mikrodalga sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sensörün temel geometrisi, test edilecek numunelerin dielektrik katsayılarında meydana gelen değişimlere karşı yüksek duyarlılık sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Sensör tasarımında mikroşerit iletim hattı yapısı esas alınmış olup, etkin dielektrik sabiti ve karakteristik empedans değerleri klasik mikroşerit hat teorisine dayalı olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda, mikroşerit hattın etkin dielektrik sabiti (ϵ_{eff}), alt tabaka dielektrik sabiti (ϵ_r), alt tabaka kalınlığı (h) ve iletim hattı genişliği (W) cinsinden aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad (1)$$

Burada ϵ_{eff} , mikroşerit hattın elektromanyetik alanının bir kısmının hava ortamında yayılmasından kaynaklanan etkin dielektrik sabitini temsil etmektedir. Etkin dielektrik sabiti, iletim hattının faz hızı ve rezonans frekansının belirlenmesinde kritik bir parametredir. Etkin dielektrik sabitinin belirlenmesinin ardından, mikroşerit hattın karakteristik empedansı (Z_0) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \ln\left(\frac{8h}{W} + 0.25 \cdot \frac{W}{h}\right) \quad (2)$$

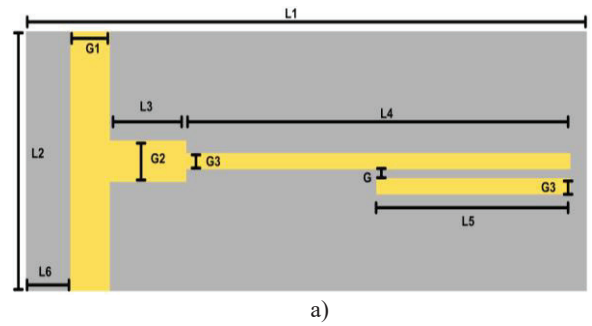
Karakteristik empedans değeri, sensörün giriş-çıkış uyumu ve maksimum güç aktarımının sağlanması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, sensörün ölçüm sistemleriyle

uyumlu olacak şekilde 50 Ω empedans koşulu hedeflenmiştir. Stub yapılı rezonatör yapısının rezonans davranışı, eşdeğer devre modeli üzerinden LC rezonans yaklaşımı ile analiz edilmiştir. Bu bağlamda, rezonans frekansı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

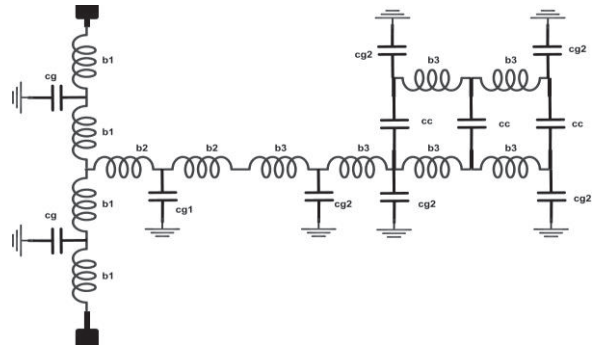
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Burada L ve C parametreleri, rezonatör yapısının eşdeğer endüktans ve kapasitans değerlerini temsil etmektedir. Rezonans frekansı, test edilen motor yağı numunelerinin dielektrik özelliklerine bağlı olarak değişmekte olup, bu değişim sensörün algılama mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. Bu teorik ifadeler doğrultusunda, sensör geometrisi çeyrek dalga koşulları dikkate alınarak optimize edilmiş ve elektromanyetik alanın numune ile maksimum etkileşimi sağlayacak şekilde tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Sensör tasarımında, yüksek frekans uygulamalarına uygun mikrodalga alt tabaka malzemesi olan Rogers AD 255C tercih edilmiştir. Kullanılan alt tabaka malzemesinin bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 2.55, kayıp tanjantı ($\tan\delta$) 0.0014 (10 GHz'de) ve kalınlığı 0.762 mm'dir; bakır kaplama kalınlığı ise 35 μ m olarak belirlenmiştir. Sensörün toplam fiziksel boyutları 120 $\times$ 30 mm² olarak belirlenmiş olup, kompakt bir yapı içerisinde yüksek hassasiyet göstermesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda tasarlanan stub yapılı mikrodalga sensörün tasarım parametreleri ve eşdeğer devre modeli Şekil 1'de birlikte sunulmuştur.



a)



b)

Şekil 1: Önerilen sensörün tasarım parametreleri (a) ve eşdeğer devre modeli (b)

Şekil 1(a)'da önerilen iki portlu sensör yapısının tasarımına ait parametreler verilirken Şekil 1(b)'de bu parametreler ile tasarlanan sensörün eşdeğer devre modeli yer almaktadır.

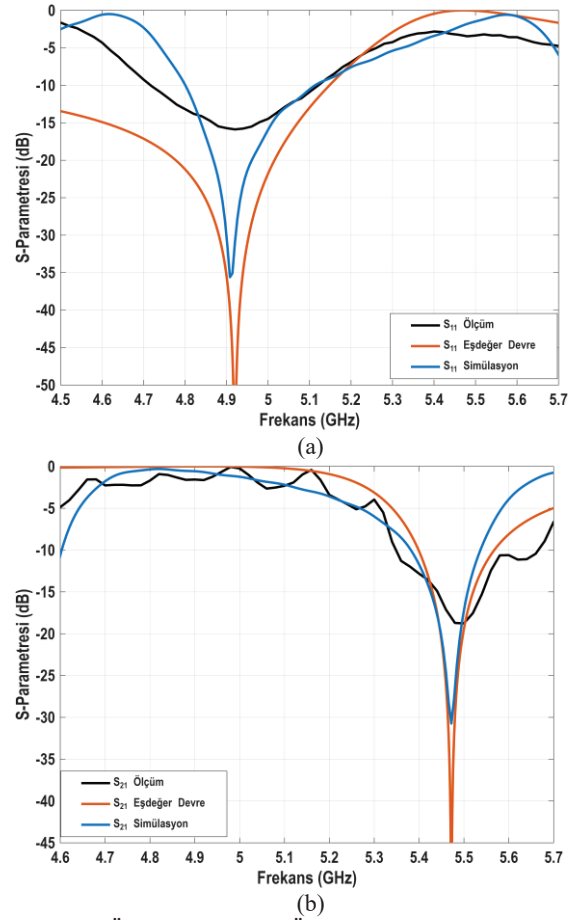
Sensör, ana iletim hattı üzerine yerleştirilmiş T-saplamalı rezonatör ve kuplaj bölgesini içermekte olup, rezonans koşullarının çeyrek dalga empedans uyumlamaya göre tasarlanmıştır. Sensör üzerinde tanımlanan parametreler, elektromanyetik alanın sıvı numune ile etkileşimini maksimize edecek şekilde optimize edilmiştir. Sunulan eşdeğer devre modeli ise iletim hattı segmentlerinin endüktansları (b_1 , b_2 , b_3) ve kuplaj ile saçılma etkilerini temsil eden kapasitif elemanlar (c_g , c_{g1} , c_{g2} , c_c) kullanılarak oluşturulmuştur. Bu model sayesinde sensörün rezonans frekansı yükleme etkilerine karşı gösterdiği davranış analitik olarak incelenebilmektedir. Önerilen sensörün tasarım parametreleri ve eşdeğer devresinde kullanılan elemanların değerleri Tablo 1 ile verilmektedir.

Tablo 1: Sensör tasarımında ve eşdeğer devrede kullanılan parametreler ve değerleri

Parametreler	Değerler (nH)	Parametreler	Değerler (pF)
b_1	0.3838	c_g	0.02653
b_2	2.41302	c_{g1}	0.3269
b_3	3.5089	c_{g2}	0.4310
		c_c	1.2991
Parametreler	Değerleri (mm)	Parametreler	Değerleri (mm)
L1	120	L6	8
L2	30	G	0.5
L3	6.5	G1	1.8
L4	100	G2	2.8
L5	50	G3	1

Tablo 1’de, önerilen stub yapılı mikrodalga sensörün eşdeğer devre modelinde kullanılan elemanların parametreleri ile geometrik boyutları sunulmaktadır. Eşdeğer devrede yer alan endüktans (b_1 – b_3) ve kapasitans (c_g , c_{g1} , c_{g2} , c_c) değerleri, sensörün elektromanyetik davranışını en iyi temsil edecek şekilde optimize edilmiş; buna karşılık L1–L6 uzunlukları ve G, G1–G3 boşluk parametreleri, rezonans frekansı, kuplaj seviyesi ve alan yoğunlaşmasını kontrol edecek biçimde belirlenmiştir. Önerilen sensörün eşdeğer devre modeli, Keysight Advanced Design System (ADS) 2016 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Eşdeğer devrede yer alan endüktans (b_1 – b_3) ve kapasitans (c_g , c_{g1} , c_{g2} , c_c) değerleri, sensörün elektromanyetik davranışını en iyi temsil edecek şekilde optimize edilmiş; L1–L6 uzunlukları ile G ve G1–G3 boşluk parametreleri ise rezonans frekansı, kuplaj seviyesi ve elektromanyetik alan yoğunlaşmasını kontrol edecek şekilde belirlenmiştir. Ardından, ADS ortamındaki Tuning ve Optimization araçları kullanılarak devre elemanlarının parametreleri iteratif olarak optimize edilmiş, eşdeğer devre modelinin elektromanyetik benzetim sonuçlarıyla kabul edilebilir düzeyde uyum sağlaması hedeflenmiştir.

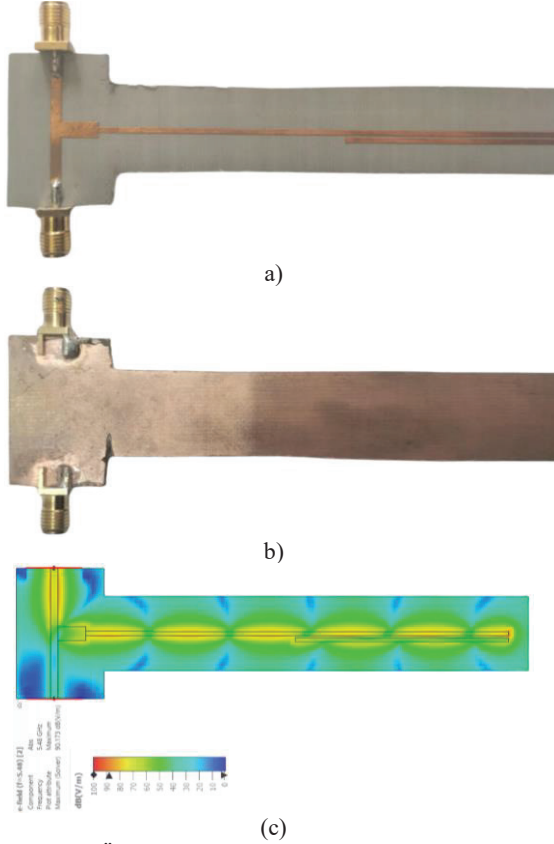
Önerilen sensör yapısının elektromanyetik performansını doğrulamak amacıyla, ölçüm sonuçları ile eşdeğer devre ve elektromanyetik simülasyon çıktıları S-parametreleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Önerilen sensörün elektromanyetik benzetimleri CST Studio Suite 2021 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda Elektromanyetik alanın serbest uzay koşullarında yayılımını modellemek amacıyla tüm yönlerde “Open (Add Space)” sınır koşulları uygulanmıştır.



Şekil 2: Önerilen sensörün Ölçüm, Simülasyon ve Eşdeğer Devre S-Parametreleri

Şekil 2’de sunulan S₂₁ ve S₁₁ parametreleri için ölçüm, eşdeğer devre simülasyonu ve elektromanyetik simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. S₂₁ parametresi incelendiğinde, sensörün 5.48 GHz frekansında iletimin en az olduğu belirgin bir rezonans sergilediği ve ölçüm sonuçlarının simülasyon verileriyle kabul edilebilir düzeyde uyumlu olduğu görülmektedir. Bu rezonans frekansı, motor yağı kullanım ömrünün belirlenmesinde temel gösterge olarak kullanılmış ve yağın dielektrik özelliklerindeki değişimlere bağlı frekans kaymaları S₂₁ üzerinden analiz edilmiştir. S₁₁ parametresi açısından ise eşdeğer devre simülasyonu ve ölçüm sonuçlarının 4.91 GHz aynı rezonans frekansı verdiği fakat farklı genlik oranlarını olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum logaritmik ölçekte her ne kadar genlik farkının olduğu gözükse de lineer ölçekte sonuçların kabul edilebilir düzeyde uyumludur. Bazı frekans bantlarında gözlemlenen uyumsuzluklar, sensörün üretim sürecinden kaynaklanan tolerans hatalarına atfedilmektedir. Özellikle bakır iletim hatlarının aşındırma aşamasında oluşan 0.1 mm’den küçük boyutsal sapmalar, elektromanyetik davranış üzerinde sınırlı düzeyde etkiler oluşturarak bu uyumsuzluklara neden olmuştur. Tasarlanan stub yapılı mikrodalga sensörün deneysel olarak doğrulanabilmesi amacıyla, belirlenen geometrik parametrelere uygun olarak baskı devre kartı üzerinde üretimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen sensör prototipi, üniversitenin laboratuvar imkânları

kapsamında kimyasal aşındırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Sensör geometrisi AD 255C alt tabaka üzerine bakır kaplı PCB olarak aktarılmış, iletken desenler kimyasal aşındırma işlemi ile elde edilmiştir. Üretim tamamlandıktan sonra sensör giriş ve çıkış portlarına 50 Ω SMA konnektörler laboratuvar ortamında lehimlenmiş, ardından spektrum analizörün yansıma ve iletim kalibrasyonları ayrı ayrı gerçekleştirilerek S_{11} ve S_{21} parametreleri ölçülmüştür.



Şekil 3: Önerilen sensörün baskısının ön (a), arka (b) yüzeyleri ve elektrik alan dağılımı (c)

Şekil 3'te, üretilen sensör prototipinin üst yüzeyi ve toprak düzlemi olan alt yüzeyi sırasıyla gösterilmektedir. Üst katmanda, ana iletim hattı, T-saplamalı rezonatör yapısı ve kuplaj bölgesi bulunurken; alt yüzeyi ise toprak yapısı oluşturmaktadır. Önerilen sensör yapısında bulunan kuplaj hattı elektrik alanı yoğunlaştırarak sensöre algılama hassasiyetini artırmaktadır. Sensör, ölçüm sistemine entegrasyonun sağlanabilmesi amacıyla SMA konnektörler ile donatılmıştır. Üretilen prototip, simülasyon ve eşdeğer devre çalışmalarında elde edilen tasarım parametreleri ile uyumlu olup, deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır.

3. Ölçüm Sistemi ve Sonuçları

Bu çalışmada önerilen stub yapılı mikrodalga sensörün motor yağı kullanım ömrünü ayırt edebilme yeteneğini değerlendirmek amacıyla kontrollü bir ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Deneysel düzenek Rohde & Schwarz FSH6 spektrum analizör, önerilen sensör, sabitleme mekanizması ve farklı kullanım kilometrelerine sahip motor yağı

numunelerinden oluşmaktadır. Deneysel ölçümlerden önce FSH6 spektrum analizör 4.5–5.7 GHz frekans aralığında S_{11} Açık (Open)-Kısa Devre (Short)-Yük (Load) kalibrasyon yöntemi kullanılarak, S_{21} ise kabloların birbirine doğrudan bağlanarak daha sonra Yük bağlanarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işleminde referans yük olarak 50 Ω standart yük kullanılmıştır. Ölçüm ve kalibrasyon işlemlerinde ise karakteristik empedansı 50 Ω olan ve 0–18 GHz frekans aralığında çalışabilen düşük kayıplı RF koaksiyel kablolar tercih edilmiştir. Böylece ölçüm sisteminden kaynaklanabilecek sistematik hataların en aza indirilmesi ve referans düzleminin sensör girişine taşınması sağlanarak ölçümlerin doğruluğu ve tekrarlanabilirliği artırılmıştır. Ölçümler sırasında çevresel etkilerin ve mekanik titreşimlerin azaltılması hedeflenmiş; sensör-numune etkileşiminin tekrarlanabilir ve kararlı koşullar altında gerçekleştirilmesine özen gösterilmiştir. Ölçüm sistemi ve kullanılan motor yağı numunelerine ait görseller Şekil 4'te sunulmaktadır.



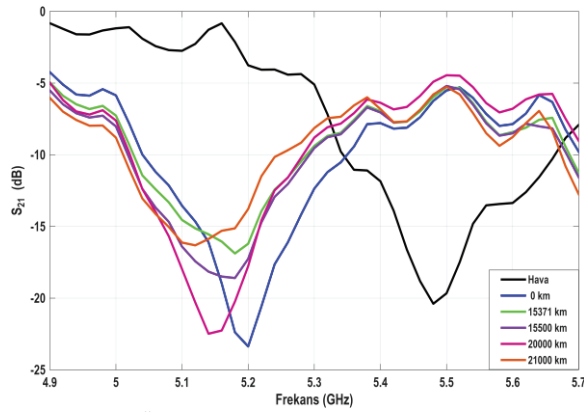
Şekil 4: Önerilen ölçüm sistemi ve farklı kullanım değerlerine sahip motor yağları

Şekil 4'te stub yapılı mikrodalga sensörün deneysel ölçüm düzeneği, motor yağı numuneleri ve ölçüm kurulumu yer almaktadır. Sensör, sabit bir mekanik düzenek yardımıyla konumlandırılmıştır. Ölçümler, hiç kullanılmamış motor yağı (0 km), yaklaşık 15.500 km ve 15.371 km kullanılmış yağlar, 20.000 km ve 21.100 km kullanılmış motor yağlarından oluşmaktadır. Deneysel çalışmada 0 km yeni motor yağı ile kullanım ömrü farklı dört adet ticari motor yağı numunesi kullanılmıştır. Numuneler; 15.371 km ve 15.500 km kullanım ömrüne sahip 5W30 viskozite sınıfındaki benzinli araç motor yağları ile 20.000 km ve 21.000 km kullanım ömrüne sahip

5W30 viskozite sınıfındaki dizel araç motor yağlarından temin edilmiştir. Yağ numunelerinin alındığı araçlar genellikle şehir içi ulaşımda kullanılmıştır.

Sensörün kompakt boyutları ve sade geometrik yapısı yüzeyin hızlı ve kalıntısız temizlenmesine imkân tanımakta; böylece ardışık ölçümler arasındaki çapraz bulaşma riski ortadan kaldırılarak sistem bir sonraki teste hızla hazır hale getirilmektedir. Ölçümler öncesinde tüm numuneler aynı laboratuvar ortamında muhafaza edilmiş ve oda sıcaklığında bekletilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Motor yağının kullanım süresi boyunca maruz kaldığı termal, mekanik ve kimyasal etkiler; yağın dielektrik sabiti, kayıp faktörü ve viskozitesi gibi elektromanyetik parametrelerinde ölçülebilir değişimlere neden olmaktadır. Bu değişimler, mikrodalga frekanslarında çalışan rezonans tabanlı sensörler aracılığıyla, temaslı veya temassız olarak izlenebilmektedir. Özellikle stub yapılı ve kuplajlı rezonatör mimarileri, elektromanyetik alanın örneklerle etkileşimini artırarak küçük dielektrik değişimlere karşı belirgin rezonans frekansı kaymaları üretmektedir. Bu çalışmada önerilen stub yapılı mikrodalga sensör kullanılarak, motor yağı numuneleri oda sıcaklığında S_{21} iletim parametresi üzerinden değerlendirilmiştir. Şekil 5'te, hava ortamı referansı ile farklı kullanım kilometrelerine sahip motor yağı numuneleri için elde edilen S_{21} frekans yanıtları sunulmaktadır.



Şekil 5: Önerilen sensör ile gerçekleştirilen S_{21} ölçüm sonuçları

Şekil 5'te görüldüğü üzere, stub yapılı mikrodalga sensörün rezonans frekansı, ortamda bulunan motor yağının kullanım kilometresi arttıkça daha düşük frekanslara doğru kaymaktadır. Referans olarak alınan hava ortamında rezonans frekansı yaklaşık 5.48 GHz civarında gözlemlenirken, kullanılmamış motor yağına karşılık gelen 0 km numunesinde bu değer yaklaşık 5.20 GHz seviyesine gerilemiştir. Benzer şekilde, 15.500 km ve 15.371 km kullanılmış yağ numuneleri için rezonans frekansı yaklaşık 5.18 GHz, 20.000 km için 5.14 GHz ve 21.100 km için ise yaklaşık 5.12 GHz olarak ölçülmüştür. Rezonans frekansındaki bu aşağı yönlü kayma, motor yağının kullanım süresi arttıkça dielektrik sabitinin ve kayıp mekanizmalarının değişmesiyle ilişkilendirilmektedir. Yağ içerisindeki oksidasyon ürünleri, metal aşınma partikülleri ve katkı maddelerinin bozulması, sensörün rezonans frekansını düşük frekanslara taşımaktadır.

Tablo 2: Önerilen sensör ile farklı kullanım oranına sahip numunelerin S_{21} ölçüm sonuçları

Ölçümler	Rezonans frekansı	Rezonans frekansı Değişimi
Hava (Yüksüz)	5.480	-
0 km (Kullanılmamış)	5.200	280 MHz
15.371 km	5.180	300 MHz
15.500 km	5.180	300 MHz
20.000 km	5.140	340 MHz
21.100 km	5.120	360 MHz

Tablo 2 incelendiğinde, yağın kullanım mesafesi arttıkça rezonans frekansının 5.200 GHz seviyesinden 5.120 GHz seviyesine doğru değişim sergilediği görülmektedir. Yapılan ölçümlerde 15.371 km ve 15.500 km numunelerinin her ikisinde de 5.18 GHz rezonans frekansı elde edilmiştir. Bu durum, söz konusu kilometre aralığında yağın dielektrik özelliklerinde meydana gelen değişimin, sensörün spektrum analizörü üzerindeki frekans çözünürlük limitlerinin altında kaldığını ve yağın bu evrede kimyasal olarak benzer karakteristikler sergilediğini göstermektedir.

Tablo 3'te, motor yağı kullanım ömrünün ve kalitesinin belirlenmesine yönelik olarak literatürde rapor edilen seçilmiş çalışmalar özetlenmiş ve kullanılan sensör türleri, çalışma frekansları, elde edilen rezonans frekansı değişimleri, ölçülen S-parametreleri ve test edilen sıvı türleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 3: Motor yağı kullanım ömrünün tespit edilmesi için yapılan çalışmalar

Referans	Sensör türü	f_0 (GHz)	Δf (MHz)	S-param.	Numune
[15]	Mikroşerit Anten	2.40	130	S_{11}	Motor yağı
[21]	Dalga kılavuzu	X bandı	120	S_{11} - S_{22}	Motor yağı
[28]	CSRR Yapılı Anten	7.32	810	S_{11}	Motor yağı
[29]	Dipol Anten	2.40	510	S_{11}	Motor yağı
Bu çalışma	Stub yapılı İletim Hattı	5.48	360	S_{21}	Motor yağı

Tablo 3'te sunulan literatür karşılaştırması incelendiğinde, bu çalışmada elde edilen rezonans frekansı değişiminin bazı anten ve metamalzeme tabanlı yaklaşımlara kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak önerilen yaklaşım, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak iletim hattı (stub yapılı) tabanlı bir sensör mimarisi kullanmakta ve yansımaya katsayıları (S_{11} , S_{22}) yerine doğrudan iletim parametresi S_{21} üzerinden değerlendirme yapmaktadır. S_{21} parametresinin kullanılması, sensör-numune etkileşiminin iletim karakteristiği üzerinden

değerlendirilmesine ve motor yağının kullanım durumuna bağlı değişimlerin rezonans frekansındaki kaymalar aracılığıyla karakterize edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen iletim hattı tabanlı sensör yapısı, spektrum analizörü ile gerçekleştirilebilecek ölçümler açısından pratik bir yapı sunmaktadır. S_{11} parametresine dayalı yansıma ölçümlerinde ölçüm sistemine uygun bir yönlü bağlaştırıcı veya benzeri yansıma ölçüm bileşenlerinin gerekebilmesine karşın, iletim hattı tabanlı yapıda sensörün giriş ve çıkış portları arasındaki iletim karakteristiğinin doğrudan değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir. Bu yönüyle önerilen yapı, motor yağı kullanımına bağlı dielektrik değişimlerin S_{21} rezonans frekansındaki değişimler üzerinden değerlendirilmesi için pratik bir ölçüm yaklaşımı sunmaktadır. Bu yönüyle önerilen sensör, yüksek frekans kayması hedefleyen anten tabanlı yaklaşımlardan ziyade, kestirimci bakım ve sürekli durum izleme uygulamalarına uygun, kararlı ve güvenilir bir ölçüm altyapısı sağlamaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, literatüre motor yağı kullanım ömrünün belirlenmesinde S_{21} tabanlı, iletim hattı destekli mikrodalga sensör yaklaşımını kazandırması bakımından özgün bir katkı sunmaktadır.

4. Sonuçların Tartışılması

Bu çalışmada, motor yağı kullanım durumunun mikrodalga frekans bölgesinde temassız ve yüksek hassasiyetle izlenebilmesi amacıyla stub yapılı, kuplaj hattı destekli kompakt bir mikrodalga sensör tasarlanmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Ölçüm sonuçları, sensörün rezonans frekansının motor yağının kullanım kilometresi arttıkça sistematik biçimde daha düşük frekanslara kaydığını açıkça göstermiştir. Hava ortamında 5.48 GHz olarak ölçülen rezonans frekansı, kullanılmamış motor yağı (0 km) için 5.20 GHz'e düşerken, 15.371–15.500 km aralığındaki yağlarda 5.18 GHz, 20 000 km'de 5.14 GHz ve 21 100 km'de 5.12 GHz olarak ölçülmüştür. Buna karşılık rezonans frekansı değişimi, hava referansına göre maksimum 360 MHz'e ulaşmıştır. Stub yapısının çeyrek dalga koşullarına göre optimize edilmesi ve kuplaj bölgesinin güçlendirilmesi sayesinde elektromanyetik alanın numune ile etkileşimi artırılmış, böylece küçük dielektrik değişimlere karşı yüksek frekans seçiciliği elde edilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular, önerilen sensörün motor yağı durum izleme uygulamalarında anlık, düşük maliyetli ve saha koşullarına uygun bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalarda, daha yüksek hassasiyet sağlayan algılama teknikleri kullanılarak sensörün performansının geliştirilmesi ve farklı kullanım durumlarına sahip çeşitli motor yağı türleri ile kapsamlı ölçümlerin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında, 1919B012415165 proje numarası ile desteklenmiştir. Yazarlar,

sağlanan maddi ve akademik destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Schueler, M., vd., "Metamaterial inspired microwave sensors", IEEE Microwave Magazine, 13(2), 57-68, 2012.
- [2] Martín, F., vd., Planar Microwave Sensors, John Wiley & Sons, 2022.
- [3] Ebrahimi, A., Beziuk, G. ve Ghorbani, K., "Amplitude variation microwave sensors for high-sensitivity detection of solid and microfluidic dielectrics", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 72(11), 6460-6472, 2024.
- [4] Genç, İ., Gözel, M.A. ve Kahrman, M., "Microwave sensor design with directional coupler-based CSRR structure for the characterization of the dielectric properties of solid materials", Measurement, 119548, 2025.
- [5] Ebrahimi, A. ve Ghorbani, K., "High-sensitivity detection of solid and liquid dielectrics using a branch line coupler sensor", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 71(12), 5233-5245, 2023.
- [6] Mohammadi, P., Mohammadi, A. ve Kara, A., "A differential and high-sensitivity thickness measurement sensor for dielectric solid materials using a branch line coupler", IEEE Sensors Journal, 24(10), 16077-16084, 2024.
- [7] Yıldırım, M. ve Gözel, M.A., "High-sensitivity microwave sensor for buffalo milk fat rate and adulteration analysis with branch line coupler", Engineering Science and Technology, an International Journal, 71, 102172, 2025.
- [8] Zhang, N., vd., "Dual-mode anti-interference humidity detection: Differential microwave sensor based on microstrip circuit", Sensors and Actuators B: Chemical, 390, 133944, 2023.
- [9] Gulsu, M.S., vd., "Metamaterial-based sensor with a polycarbonate substrate for sensing the permittivity of alcoholic liquids in a WR-229 waveguide", Sensors and Actuators A: Physical, 312, 112139, 2020.
- [10] Araujo, J., vd., "Non-invasive antenna sensor for dielectric material identification at a distance", Measurement, 224, 113842, 2024.
- [11] Dalgac, S., vd., "Investigation of methanol contaminated local spirit using metamaterial based transmission line sensor", Measurement, 178, 109360, 2021.
- [12] Erdoğan, M., vd., "Determination of frying sunflower oil usage time for local potato samples by using microwave transmission line based sensors", Measurement, 163, 108040, 2020.
- [13] Hakim, M.L., vd., "Intensified electric field based highly sensitive backbone-shaped C and X band microwave metamaterial sensor for permittivity characterization applications", Engineering Science and Technology, an International Journal, 60, 101877, 2024.

- [14] Sim, M.S., vd., "Microwave sensors loaded with metamaterial-inspired resonators for dielectric material characterization: A review", *Sensors and Actuators A: Physical*, 372, 115322, 2024.
- [15] Yıldırım, M. ve Gözel, M.A., "Asimetrik eş-düzlensel şerit beslemeli anten ile motor yağ seviye ve kullanım ömrü tespiti", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(3), 904-915, 2023.
- [16] Wang, B.-X., vd., "Sensitivity optimization of differential microwave sensors for microfluidic applications", *Sensors and Actuators A: Physical*, 330, 112866, 2021.
- [17] Palandoken, M., vd., "Novel microwave fluid sensor for complex dielectric parameter measurement of ethanol-water solution", *IEEE Sensors Journal*, 23(13), 14074-14083, 2023.
- [18] Gao, M., vd., "RFID-based microwave biosensor for non-contact detection of glucose solution", *Biosensors*, 11(12), 480, 2021.
- [19] Palandoken, M. ve Gocen, C., "RFID-enabled ML-assisted microwave liquid sensor design for complex dielectric characterization of water-methanol mixture", *Sensors and Actuators A: Physical*, 382, 116142, 2025.
- [20] Islam, M.R., vd., "Metamaterial sensor based on reflected mirror rectangular split ring resonator for the application of microwave sensing", *Measurement*, 198, 111416, 2022.
- [21] Dalgacı, Ş., vd., "Chiral metamaterial-based sensor applications to determine quality of car lubrication oil", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43(7), 1640-1649, 2021.
- [22] Korkmaz, H., Hasar, U. ve Delihacıoğlu, K., "Mikrodalga frekanslarda yakıt içeriğindeki değişimlerin karakterizasyonu", *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1), 1-12, 2026.
- [23] Korkmaz, H., "Süt taşıma tespitinde mikrodalga sensör yöntemi", *EMO Bilimsel Dergi*, 15(1), 143-152, 2025.
- [24] Korkmaz, H., "Metamalzeme tabanlı hassas mikrodalga sensör ile zeytinyağındaki taşıma tespiti", *EMO Bilimsel Dergi*, 15(1), 41-52, 2025.
- [25] Korkmaz, H. ve Hasar, U., "Sensitivite microwave sensor for adulteration detection in olive oil", *Natural Sciences and Engineering Bulletin*, 1(2), 27-37, 2024.
- [26] Hasar, H., vd., "Sensitive microwave sensor for detection and quantification of water in adulterated honey", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 74, 1-13, 2025.
- [27] Zaarour, Y., vd., "Engine oil quality monitoring using an additively manufactured X-band microwave waveguide sensor", *IEEE Access*, 12, 181341-181350, 2024.
- [28] Kumar, K.S. ve Madhan, M.G., "A novel metamaterial-based microwave sensor design for the characterization of lubricating engine oils and alcohols", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 27(9-10), 427-438, 2025.
- [29] Mejri, F. ve Aguil, T., "Design of a passive microwave sensor for the characterization of mobile engine oil", 2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2017, 266-269.

Özgeçmişler



Berkay Pehlivan, 2001 yılında Eskişehir’de doğmuştur. 2025 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Lisans Programı’ndan mezun olmuştur. Araştırma ilgi alanları mikrodalga sensörler ve otomasyon sistemleridir.



Mustafa Yıldırım, 1999 yılında İzmir’de doğmuştur. 2022 yılında Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden lisans derecesini, 2025 yılında ise Süleyman Demirel Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden yüksek lisans derecesini almıştır. Halen Süleyman Demirel Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde doktora öğrencisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir. Araştırma ilgi alanları arasında materyal karakterizasyonu ve içerik analiz için mikrodalga rezonatör sensörler yer almaktadır.



Doç. Dr. Mahmut Ahmet GÖZEL, 1987 yılında İstanbul’da doğmuştur. Lisans, yüksek lisans ve doktora derecelerini sırasıyla 2011, 2015 ve 2020 yıllarında Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda tamamlamıştır. Halen aynı üniversitenin Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Doçent Dr. ünvanıyla öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Başlıca araştırma alanları; antenler ve RF enerji hasadı, RFID sistemleri, mikrodalga aktif/pasif devre tasarımı, geniş bant teknolojileri ile materyal karakterizasyonuna yönelik mikrodalga rezonatör sensör tasarımlarıdır.