

PAPER DETAILS

TITLE: ASİMETRİK ES-DÜZLEMSEL SERİT BESLEMELİ ANTEN İLE MOTOR YAĞ SEVİYE VE
KULLANIM ÖMRÜ TESPİTİ

AUTHORS: Mustafa YILDIRIM, Mahmut Ahmet GÖZEL

PAGES: 904-915

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2895654>



ASİMETRİK EŞ-DÜZLEMSEL ŞERİT BESLEMELİ ANTEN İLE MOTOR YAĞ SEVİYE VE KULLANIM ÖMRÜ TESPİTİ

Mustafa YILDIRIM^{1*}, Mahmut Ahmet GÖZEL¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>AEŞ Mikroşerit Anten, Motor Yağ Ömrü Tespiti, Motor Yağ Seviye Tespiti, Sensör Anten.</i>	Motorun aşınmasını ve ısınmasını engelleyen motor yağ (MY) ömrü araç performansı açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışma ile araç MY seviye ve kullanım ömrünü belirleyebilecek bir sensör gerçekleştirilmiştir. MY ömrü ve seviye tespiti için iki farklı yağ numunesi içerisine önerilen anten yerleştirilerek geri dönüş kaybı grafiğindeki rezonans frekansı ile bant genişlikleri incelenmiştir. Önerilen anten ile MY ömrünün gerçek zamanlı tespiti mikrodalga frekanslarda gerçekleştirilmiştir. Bu teknik MY değişim periyotları ile ilgili daha kesin bir çözümün gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Sensör için Asimetrik Eş-düzlemsel Şerit (AEŞ) beslemeli mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenin sıvı dışındaki çalışma frekansı 2.4 GHz bant genişliği ise 150 MHz olarak ölçülmüştür. Antenin MY içerisine 60 mm ve 70 mm uzunluklarında yerleştirildiğinde rezonans frekansı ve bant genişliğinde anlamlı bir değişim meydana gelmiştir. Bu antenin MY içerisindeki 60 mm uzunluk seviyesi için 0 km MY numunesinde rezonans frekansı ve bant genişlikleri sırasıyla 2,20 GHz ile 120 MHz, 10000 km için sırasıyla 2,18 GHz ile 130 MHz olarak ölçülmüştür.

ENGINE OIL LIFETIME AND LEVEL DETECTION WITH ASYMMETRIC CO-PLANAR STRIP-FED ANTENNA

Keywords	Abstract
<i>ACS Microstrip Antenna, Engine oil Lifetime Detection, Engine oil Level Detection, Sensor Antenna.</i>	Determination of engine oil (EO) lifetime, which prevents wear and heating of the engine, has great importance in terms of vehicle performance. In this study, a sensor antenna was designed to determine the level and service life of vehicle EO. For EO lifetime and level detection, the proposed antenna was placed in two different oil samples and the resonance frequency and bandwidth in the return loss graph were examined. Real-time detection of EO lifetime was performed at microwave frequencies with the proposed antenna. This technique, it is aimed to realize a more precise solution regarding EO change periods. Asymmetrical Co-planar Strip (ACS) fed microstrip antenna design has been carried out for the sensor. The operating frequency of the designed antenna without liquid was measured as 2.4 GHz and the bandwidth was measured as 150 MHz. A significant change occurred in the resonance frequency and bandwidth when the antenna was placed in the EO at 60 mm and 70 mm lengths. For the 60mm length level of this antenna in the EO, the resonance frequency and bandwidths of the 0 km EO sample were measured as 2.20 GHz and 120 MHz, and for 10000 km, 2.18 GHz, and 130 MHz, respectively.

Alıntı / Cite

Yıldırım, M., Gözel, M. A., (2023). Asimetrik Eş-Düzlemsel Şerit Beslemeli Anten ile Motor Yağ Seviye ve Ömür Tespiti, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(3), 904-915.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
M. Yıldırım, 0000-0002-5675-1714	Başvuru Tarihi / Submission Date
M. A. Gözel, 0000-0002-0360-7188	Revizyon Tarihi / Revision Date
	Kabul Tarihi / Accepted Date
	Yayın Tarihi / Published Date

* İlgili yazar / Corresponding author: mustfayildirim@gmail.com, +90-542-890-9779

ENGINE OIL LIFETIME AND LEVEL DETECTION WITH ASYMMETRIC CO-PLANAR STRIP-FED ANTENNA

Mustafa YILDIRIM^{1†}, Mahmut Ahmet GÖZEL¹

¹Department of Electric-Electronic Engineering, Isparta Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey

Highlights

- Depending on automobile usage, EO level decrease and can't be usable in the process of time.
- The permittivity properties of EO change depending on the service life, as in other fluids.
- The EO level can be detected by testing the proposed sensor antenna at different oil-liquid depths.
- The proposed sensor can also detect the life of the EO depending on the oil permittivity change.

Graphical Abstract

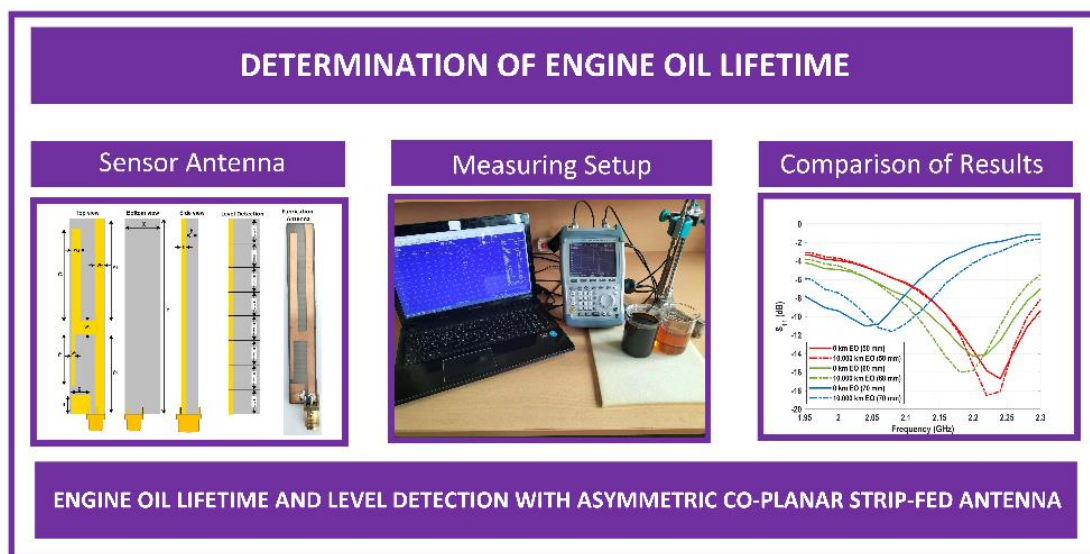


Figure. The Sensor Design, The Measurement Setup, And The Effective EO Depths Of The Results.

Purpose and Scope

The primary purpose of this study is to design a sensor antenna using microwave frequencies to detect the change in EO levels and the lifetime of motor oils used in automobiles.

Design/methodology/approach

In this study, an asymmetric co-planar strip-fed sensor antenna has been fabricated. This sensor was placed in Motul brand 5w-30 viscosity, never used and 10000 km used engine oil at different depths so, the engine oil level and lifetime were tested over the antenna return loss value, which is an S-parameter.

Findings

With the sensor antenna, measurements were performed for oil level and lifetime at different depths in the EO samples. It has been observed that the resonance frequency of the S_{11} parameter changes significantly for different EO depths of the sensor. In addition, in the S_{11} graphs for 50, 60, and 70 mm oil depths, it has been observed that there is a change of about 3 dB in the engine oil used at 10000 km compared to the engine oil that has never been used.

Originality

The novel sensor antenna developed with this study adds innovation to the literature in terms of having the ability to measure oil levels and test oil lifetime at the same time.

[†] Corresponding author: mustfayildirim@gmail.com, +90-542-890-9779

1. Giriş (Introduction)

Mikroşerit antenlerin yüksek hassasiyeti, düşük üretim maliyeti ve tasarım kolaylığı sebebi ile günümüzde sağlık (Groumpas vd., 2022), sanayi (Zhu vd., 2020) ve gıda (Bakır ve Yaşar, 2020) sektörü başta olmak üzere birçok alanda sensör olarak kullanımı tercih edilmektedir. Sensör antenler (Sanders vd., 2015), mikrodalga iletim hatları (Meyne, Latus, vd., 2014), metamalzemeler (Withayachumnankul vd., 2013) ve dielektrik rezonatörler (Meyne, Cammin, vd., 2014) gibi yapılar, farklı dielektrik özellikteki sıvı veya katı malzemelerin karakterizasyonunu belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Mikrodalga iletim hatlarının (Abdelwahab vd., 2021) veya mikroşerit antenlerin (Lopato ve Herbko, 2018), malzeme karakteristiğini belirlemek için kullanıldığı uygulamalarda S-parametrelerinden ve rezonans frekanslarındaki değişimlerden faydalanılmaktadır (Al-Mudhafar ve Ra'ed, 2022). Son yıllarda yapılan çalışmalardan birinde, etanol ve metanol sıvıları içerisinde bulunan suyun oranını tespit etmek için Dairesel Mikroşerit Yama Anten (DMYA) tabanlı sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu sensör anten ile, etanol ve metanol sıvılarındaki 0 ile 100 arasındaki her %10'luk su değişiminin, anten çalışma frekansını sırasıyla 2,944-2,988 GHz ile 2,944-2,982 GHz arasında değiştirmiştir (Akgöl, 2018). Başka bir çalışmada birbirinden farklı sıvı solüsyonlarındaki pH oranının belirlenebilmesi için rezonans frekansı 3,87 GHz olan dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Tasarlanan bu antenin merkezinde, 0,2 ml miktarında solüsyon sıvı numunelerinin damlatılacağı, 10 mm² alanında kare bir yarık açılmıştır. Bu çalışma ile yarık içerisine damlatılan sıvıların pH seviyesi azaldıkça antenin yansıma genliğinde artışlar ve rezonans frekansında doğrusal bir azalma olduğu gösterilmiştir (Bouchalkha ve Karli, 2019). Literatürde yapılan bir diğer çalışma ise deniz suyunun tuzluluk oranını mikroşerit antenle tespit edilmesine yönelik çalışmadır. Bu çalışmada antenin yama ve toprak düzlemi arasına bir sıvı numune haznesi tasarlanarak, haznenin içerisine deniz suyu doldurulmuştur. Bu haznenin içerisine yerleştirilen farklı tuz oranlarındaki su örnekleri ile antenin yansıma genliğinde ve rezonans frekansındaki değişimler incelenmiştir. Tasarlanan sensör anten ile her 0,01 ppt (tuzluluk miktarı) için antenin rezonans frekansında 48 kHz 'lık değişimler elde edilmiştir (Lee vd., 2017). Mikroşerit anten tabanlı sensörlerin kullanımı sanayi alanında da hızla yaygınlaşmaktadır (Zhu vd., 2020). Sanayide ve günlük hayatta kullandığımız makinaların hareketli parçaları çalışma esnasında birbirine sürtünerek aşınmalara sebep olmaktadır. Bu aşınmaların ortadan kaldırılması için genellikle bu makine parçalarında makine yağları kullanılmaktadır. Makine yağlarında çevresel etkilere bağlı olarak nemlenme meydana gelmektedir. Bu nemlenme makine yağlarının işlevini kaybetmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple makine yağının nem miktarının tespit edilmesi ve tolere edilebilecek nem oranların belirlenmesi gerekmektedir. Günümüzde makine yağlarının işlevini sürdürüp sürdüremeyeceğini anlık olarak tespit edemeyen birçok sistem bulunmaktadır. Örneğin araç motor yağ bakımları böyle bir sistemin olmaması sebebi ile önceden belirlenmiş tahmini periyotlarda yapılabilir. Bir çalışmada makine yağlarındaki nem oranı belirlenebilmesi için yeni bir düzenek gerçekleştirilerek mikroşerit antenler sensör olarak kullanılmıştır (Zhu vd., 2020). Bu çalışmada yağ nem oranlarının tespiti için 2,26 GHz çalışma frekansındaki antenin geri dönüş kaybındaki (S_{11}) değişimler izlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında yağlama yağının içerisindeki nem oranı artışının antenin rezonans frekansında anlamlı değişimlere sebep olduğu anlaşılmaktadır. Mikroşerit iletim hattının sensör olarak kullanıldığı bir çalışmada legal ve illegal akaryakıt tespiti için X bandında çalışmak üzere tasarlanan iletim hattı tabanlı sensör, akaryakıtta hileleri tespit etmek için kullanılmaktadır (Tamer, 2019). Bu çalışmada tasarlanan iletim hattının üzerinde akaryakıt numunelerinin damlatıldığı boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklara damlatılan farklı akaryakıt numunelerinin iletim hattının X bandında iletim oranında gözle görülebilir değişimler medyana geldiği anlaşılmıştır. Böylece iletim orandaki bu değişimlerden yararlanılarak kaçak akaryakıt ve markalı akaryakıtların tespiti sağlanmaktadır. Bir başka çalışmada etanol içerisinde su oranının tespit edilebilmesi için iletim hattı tabanlı sensör tasarlanmıştır (Chuma vd., 2018). Bu çalışmada etanol içerisinde bulunan su oranının değişimi, antenin çalışma frekansını 2,25-2,40 GHz arasında değiştirmiştir. Sıvı numunelerin karakterizasyonunu daha hassas tekniklerle belirleyebilmek için farklı yöntemlerin birlikte kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Bakır ve Yaşar, 2020), (Withayachumnankul vd., 2013). Bir çalışmada metamalzeme tabanlı omega şekilli rezonatör yapılı iletim hattı kullanılarak sıvı numuneler test edilmiştir (Abdulkarim vd., 2020). Tasarlanan bu iletim hatlı sensör ile trafo yağı, etanol ve metanol numuneleri incelenmiştir. İncelenen bu numunelerden trafo yağı için eskimiş ve temiz trafo yağının iletim oranında meydana getirdiği farktan faydalanarak trafo yağının ömrünün tespit edilebilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca aynı çalışmada etanol ve metanol içerisinde bulunan su oranının tespitinin yapıldığı da anlaşılmaktadır. Etanol ve metanol içerisinde su oranı arttıkça iletimin azaldığı rezonans frekansında su oranına paralel bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada sağlık alanında biyolojik sıvıların dielektrik özelliklerinin tespit edilebilmesine yönelik yapılan çalışmalarda minyatür boyutlarda 0-40 GHz frekans spektrumunda çalışan iletim hattı tasarımları kullanılmıştır (née Haase vd., 2015). Tasarlanan iletim hattı ile biyolojik numunelerin dielektrik katsayılarının frekans bölgesinde değişimleri incelenmiştir. Bu değişimler elde edilerek biyolojik sıvıların karakteristik özellikleri kategorize edilebilmektedir. Bir çalışmada metanolle kirlenmiş yerel ispirto numunesindeki metanol miktarını hem sayısal hem de deneysel olarak tespit etmek için metamalzeme tabanlı bir iletim hattı sensörü kullanılmıştır (Dalgac vd., 2021). Tasarlanan bu iletim hattının çalışma frekansı 1-8 GHz arasındadır. Bu frekans aralığında ispirtoya eklenen metanol oranı ile iletim oranının ve iletim hattının rezonans frekansındaki değişimlerinin incelendiği gözlemlenmiştir.

Sensör anten uygulamalarında hasiyeti artırmak için kullanılan metamalzeme tabanlı sensörlerin kullanımının yakın geçmişte arttığı gözlemlenmektedir (Uysal vd.,2021). Metamalzemeler negatif kırılma indeksi ve negatif dielektrik sabitleri olan doğada bulunmayıp laboratuvar ortamında üretilen malzemelerdir (Tamer, 2019). Bir çalışmada gıda alanında kullanılmak üzere tasarlanan metamalzeme tabanlı X bandında çalışan halka rezonatörlü sensör anten yağlı ve yağsız sütün tespitinde kullanılmıştır (Bakır ve Yasar, 2020). Tasarlanan sensör ile yağlı sütün 8,64 GHz 'de yağsız sütün ise 8,7 GHz 'de rezonansa girdiği gözlemlenmiştir. Belirtilen iki farklı rezonans frekansı arasındaki 60 MHz 'lik fark ile yağlı ve yağsız sütün ayrımı yapılabilmektedir. Yapılan diğer bir çalışmada çok yakın dielektrik sabitlerine sahip sıvı numunelerinin rezonans frekansında daha belirgin kaymalar elde edebilmek için metamalzeme tabanlı iletim hattı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sensörün ana bileşeni, metamalzemelerde temel bir bileşen olan bir Ayırık Halka Rezonatörü (AHR) olmuştur. AHR yapı ile temas ettirilen numuneler iletim hattının rezonans frekansında anlamlı bir şekilde ilişkilendirilebilecek sonuçlar ortaya koymaktadır (Withayachumnankul vd., 2013). Yapılan bir diğer çalışmada ise yüksek hassasiyetli negatif metamalzeme tabanlı iletim hattı tasarlanmıştır. Sıvıların karakterizasyonun daha hassas sağlanabilmesi için sensör üzerinde kare spiral rezonatörler tasarlanmıştır. Rezonatör üzerine damlatılan farklı su oranlara sahip metanol-su karışımlarının iletim oranını ve iletim frekansını değiştirdiği gözlemlenmiştir. Metanol-su karışımındaki su oranı yüzde 20'lik artışlarla yapılan ölçümlerden saf metanolün 2 GHz bandında saf su ise 1,40 GHz bandında rezonansa girdiği ve su oranının artışıyla frekansın doğrusal bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir (Kayal vd., 2020). Yapılan başka bir çalışmada çeşitli yağların, sıvıların ve kimyasalların tespit edilmesi için metamalzeme tabanlı sensör tasarlanmıştır (Islam vd., 2022). Bu sensör ile ölçülen zeytinyağı ve mısır yağı numuneleri arasında 10,74 dB'lik geri dönüş kaybı büyüklüğü değişimi ile 100 MHz frekans farkı gözlemlenmiştir. Dielektrik rezonatörler metamalzemelerden ilham alınarak tasarlanan sıvıların daha hassas karakterizasyonunun belirlenebilmesi için geliştirilen mikrodalga yöntemlerindendir (Iqbal vd., 2019; Omer vd., 2020; Soffiatti vd., 2018). Dielektrik rezonatörlerle yapılan bir çalışmada kimyasal sıvıların algılanması için dairesel dielektrik rezonatör tabanlı sensör anten tasarlanmıştır (Iqbal vd., 2019). Tasarlanan bu dairesel dielektrik sensör ile metanol, su, etanol, izopropil numuneleri test edilmiştir. Test edilen numuneler 4,5- 5,5 GHz frekans bölgesinde farklı frekanslarda rezonansa girdiği gözlemlenmiştir. Bu gözlemden faydalanarak numune tespiti yapılabilmektedir. Yapılan bir diğer çalışmada ise sıvı örneklerinin belirlenebilmesi için toprak yüzeyine dairesel dielektrik rezonatör eklenen mikroşerit iletim hattı uygulanmıştır (Omer vd., 2020). Tasarlanan bu dielektrik rezonatör üzerinden mikroakışkan bir kanal yardımı ile geçirilen etanol, metanol, tuzlu su, damıtılmış su, bakteriyostatik su ve glikoz numuneleri incelenmiştir. İletim oranı, yansıma genliklerinde ve rezonans frekansındaki değişimler numune örnekleri ile ilişkilendirilmiştir. Bu ilişkilendirme sayesinde incelenecek numune örneklerinin tespit edilerek kategorize edilmesi sağlanmaktadır. Bir diğer çalışmada ise metamalzeme tabanlı Tamamlayıcı Ayırık Halka Rezonatörüne (TAHR) dayalı kompakt ve oldukça hassas bir mikrodalga sensör tasarlanmıştır (Mosbah vd., 2022). Bu sensör sıvı numunelerin bulunduğu cam tüp etrafında silindirik bir yapıda tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sensör ile etanol içerisine yüzde 10 artışlarla eklenen su oranlarının iletim ve yansıma oranında meydana getirdiği farklılıklar incelenmiştir. Yapılan bu çalışma literatürde yer alan diğer çalışmalarla kıyaslandığında yüzde yüz su ve yüzde sıfır su oranındaki karışımlarda rezonans frekansının 394,5 MHz değiştiği gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan bir diğer çalışma ise hava basıncını algılamak için esnek ve deforme olabilen bir sıvı dielektrik rezonatör antenin tasarlanmıştır (Low vd., 2020). Tasarlanan rezonatör içinde bulunan sıvının ortasında küçük bir hava boşluğu bulunmaktadır. Hava basıncını daha hassas algılanması için rezonatör içerisinde asetonitril ve su eklenmiştir. Rezonatör kısmına asetonitril eklenen yapının anten kazancı 2 dB daha arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda bar başına 270 MHz 'lik bir rezonans kayması meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yarı katı malzemelerin tespiti için yapılan bir çalışmada üç halkalı tamamlayıcı bölünmüş halkalı rezonatör tabanlı 2,5 GHz 'de çalışan iletim hattı tasarlanmıştır (Al-Gburi vd., 2023). Tasarlanan bu yapının merkezinde numunelerin yerleştirilmesi için bir alan açılmıştır. Bu alan içerisine polipropilen tüp içinde zerdeçal, siyah zerdeçal, mangolu zerdeçal ve deiyonize su numuneleri test edilmiştir. Bu numunelerin S_{21} ölçüm sonuçları zerdeçal için 2,324 GHz 'de -11,9063 dB, siyah zerdeçal 2,288 GHz 'de -11,4268 dB, mangolu zencefil 2,24 GHz 'de -11,6293 dB ve deiyonize su 2,112 GHz 'de -13,0072 dB olarak gözlemlenmiştir. Zeytin yağına karıştırılan diğer yağların tespitinin yapıldığı bir çalışmada 5,25 GHz 'de çalışan ayırık halka rezonatör yapılı iletim hattı tasarlanmıştır (Bhatti vd., 2022). Saf zeytin yağına %10'luk artışlarla eklenen hardal yağ numuneleri rezonans frekansı 4,95 GHz 'den 4,69 GHz'e kaydırıldığı belirtilmiştir. Yapılan bir diğer çalışmada sıvı karakterizasyonu belirlemek için yüksek hassasiyetli mikroşerit iletim hatlı sensör tasarlanmıştır (Parvathi ve Gupta, 2022). Su içerisine %10'luk artışlarla eklenen etanolün mikrodalga sensörün 1,4-1,6 GHz arasında iletim oranındaki değişimleri gözlemlenmiştir.

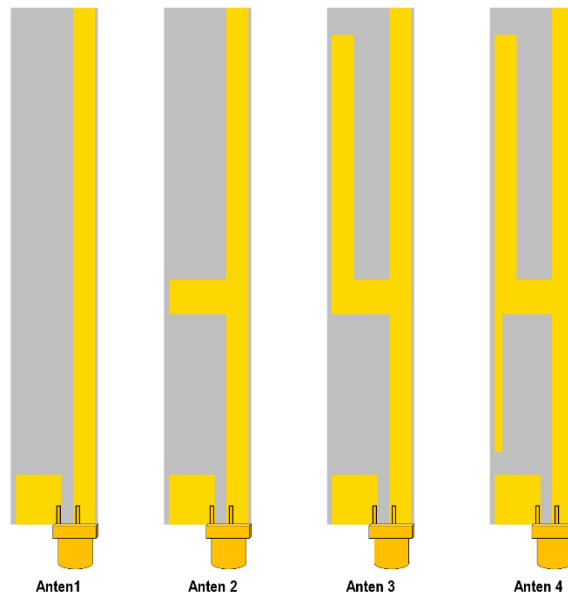
Motor yağları, ham petrolden elde edilen yağların içerisinde farklı katkı maddeleri eklenmesiyle elde edilen sıvıdır. Bu yağlar motor içerisinde bulunan hareketli metal parçaların birbirine sürtünerek ısınmasını ve aşınmasını engellemek böylelikle motor ömrünü arttırmak amacıyla kullanılır. Kritik bir öneme sahip olan ve motorun aşınmasını engelleyen bu yağların bir kullanım süresi bulunmaktadır. Üretici firmalar motor kullanılan motora göre ortalama değişim süreleri öngörmektedir (Cebeci,2022). Motor yağının değişimi için ortalama kullanım süreleri olsa da aracın kullanım durumuna göre ve kullanıldığı mevsime göre motor yağının değişim süreleri

değişebilmektedir. Motor yağının ömrünün tespiti için geçmişte yapılan bir çalışmada yağ seviyesinin kontrol edildiği ve motor yağ çubuğunun yerine tasarlanan bir monopollü anten önerilmiştir (Kopmaz, 2020). Böylelikle hem motor yağının ömrünün hem de motor yağının seviyesinin belirlenmesini sağlanmıştır. Tasarlanan bu anten ile kullanılmamış motor yağ (MY), 5000 KM kullanılmış MY ve 10000 km kullanılmış motor yağ numunelerinin içerisinde ölçümler gerçekleştirildiği gözükmemektedir. Motor yağının farklı miktardaki ve farklı kullanıma durumları için yapılan ölçümlerde 360 MHz rezonans frekansında ve -12 dB sınırında hesaplanan bant genişliği ile motor yağının ömrü ve miktarı ilişkilendirmeye çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmada tasarlanan monopollü antenin uzunluğunun fazla olmasından dolayı antenin çalışma frekansı düşük olduğu için motor yağının ömrünün hassas bir düzeyde tespit edilmesi çok mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. Oysa literatürdeki çalışmalarda birbirine çok yakın değerlerdeki dielektrik özelliklere sahip sıvıların karşılaştırılması veya ayırt edilebilmesi için genellikle yüksek hassasiyetli RF/mikrodalga frekanslarda devre tasarımları gerçekleştirilmektedir (Bakır vd., 2019; Dalgıç vd., 2021; Dinçer vd., 2017; Kuzu, 2019). Motor yağının tespiti için yapılan bir diğer çalışmada ise metamalzeme tabanlı dairesel halka rezonatörler kullanılarak bir sensör tasarlanmıştır (Dalgıç vd., 2021). X bandında çalışan bu sensör ile temiz ve 10000 km kullanılmış MY ölçümlerinin gerçekleştirildiği gözükmemektedir. Tasarlanan bu sensör ile yapılan ölçümlerde temiz ve 10000 km kullanılmış motor yağının rezonans frekansında 20 MHz 'lık bir değişim elde edildiği anlaşılmaktadır.

Bu makale ile önerilen sensör anten çalışması ile geçmişte yapılmış çalışmalardaki eksikliklerin giderilmesi ve yeni bir ölçüm sisteminin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla sensör olarak Asimetrik Eş-düzlemsel Şerit beslemeli (AEŞ) anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın AEŞ yapısında seçilmesindeki en önemli sebep geçmiş çalışmalarda motor yağ uygulamalarında uygulama zorluklarının ve seviye ölçümlerindeki kısıtların ortadan kaldırılmak istenmesidir. Bu çalışma ile tasarlanan yeni sensör anten ile aynı markanın iki farklı kullanım ömrüne sahip numuneleri hem MY seviyesinin belirlenmesi hem de MY kullanım ömrünün tespiti için benzetim ve ölçümler gerçekleştirilmiştir.

2. Sensör Anten Tasarımı (Sensor Antenna Design)

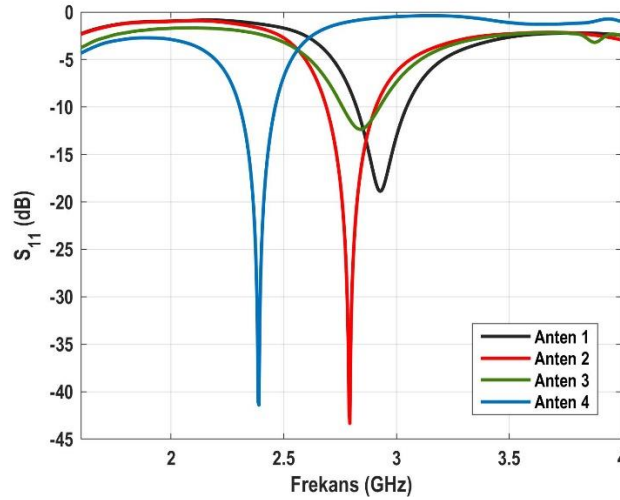
Bu çalışmada motor yağ ömrü tespiti için sensör olarak AEŞ beslemeli bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımı için dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2,55$, kalınlığı $h = 0,762 \text{ mm}$, boyutları $12 \times 80 \text{ mm}^2$, kayıp tanjantı $\tan \delta = 0,0013$ olan Rogers AD255C taban malzemesi kullanılmıştır. Şekil 1 ile gösterilen antenin besleme hattı; toprak düzlem ile arasında $0,6 \text{ mm}$ boşluklu, genişliği $w_2 = 3 \text{ mm}$ eş-düzlemsel besleme benzeri bir teknik olan AEŞ besleme kullanılarak tasarlanmıştır. Önerilen anten ve tasarımlar için bir elektromanyetik simülasyon yazılımı olan CST Microwave Studio kullanılmıştır. Önerilen antenin oluşturulabilmesi için gerçekleştirilen tasarım aşamaları Şekil 1. ile gösterilmiştir



Şekil 1. Sensör Anten Tasarım Aşamaları (Sensor Antenna Design Stages)

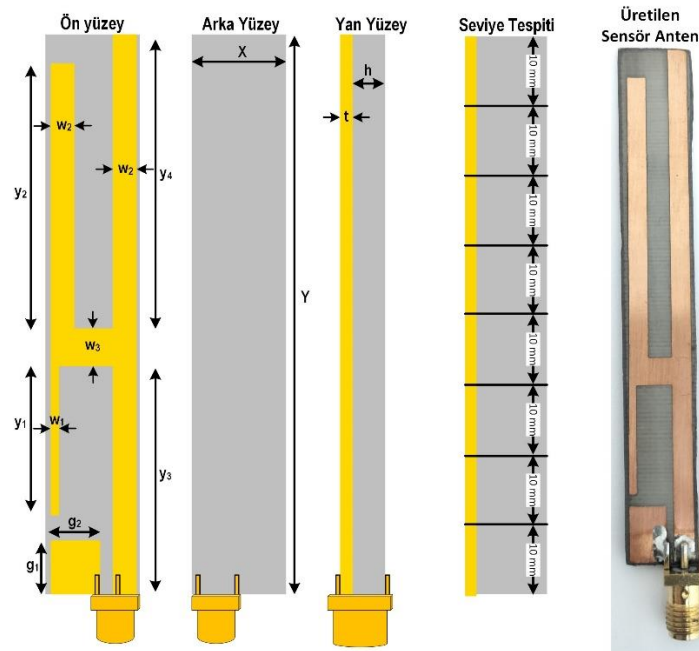
Önerilen sensör antenin oluşturulabilmesi için 4 farklı anten tasarım aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalarda anten çalışma frekansının anlaşılabilmesi için 4 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 1 ile gösterilen antenlerden, Anten 4 bu çalışma için önerilen antendir. Şekil 2 önerilen antenin oluşturulması sürecinde

tasarlanan Anten 1, Anten 2, Anten 3 ile önerilen anten olan Anten 4 tasarımına ait geri dönüş kaybı benzetim sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 2. Anten Tasarım Sürecinde Gerçekleştirilen Tasarımlara Ait Geri Dönüş Kaybı (S_{11}) Grafikleri (Return Loss (S_{11}) Graphs for the Designs Realized in the Antenna Design Process)

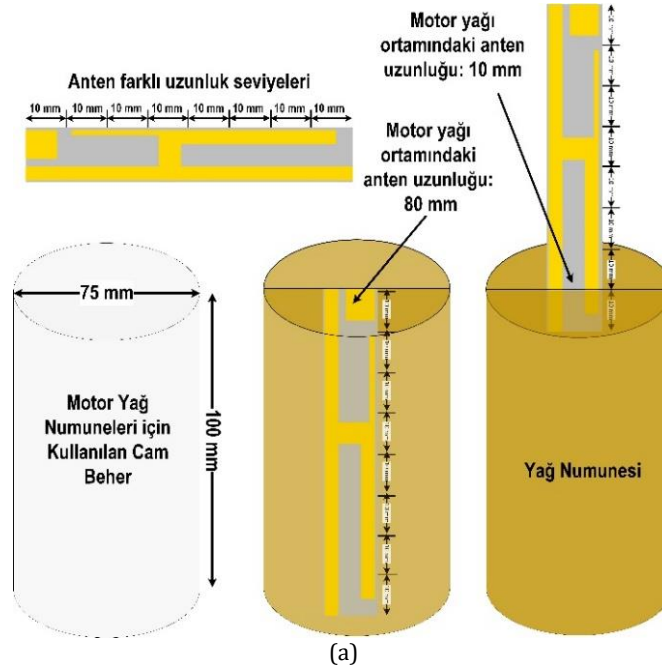
Şekil 2 tasarım süreçlerinde tasarlanan antenlerle elde edilen çalışma frekansları ve geri dönüş kaybı benzetim sonuçlarının sırasıyla Anten 1 için 2,9 GHz ile -18,81 dB, Anten 2 için 2,8 GHz ile -43 dB, Anten 3 için 2,84 GHz ile -12 dB, bu çalışma için önerilen Anten 4 için 2,39 GHz ile -41 dB olduğu gösterilmiştir. Çalışma frekansı, yağ seviye ölçüm kriterleri ve çalışma ortamına uygunluğu için fiziksel uzunluklar düşünülerek bu çalışma için Anten 4 önerilmiştir. Önerilen antenin ön ve arka yüzeylerini ve fiziksel uzunluklarını içeren ayrıntılı çizimi Şekil 3 ile gösterilmektedir.



Şekil 3. Önerilen Anten Ön, Arka ve Yan Yüzeylerine Ait Geometri ve Fiziksel Parametreleri ile Üretilen Anten Görüntüsü (The Figure of Produced Antenna by Geometry and Physical Parameters of the Proposed Antenna Front, Back, and Side Surfaces)

Tasarlanan antenin optimize edilmiş tasarım parametre değerleri $w_1=1,1$ mm, $w_3=4$ mm, $g_1=8$ mm, $g_2=5,6$ mm, $y_1=16$ mm, $y_2=45$ mm, $y_3=26$ mm, $y_4=50$ mm, $h=0,762$ mm, $t=0,035$ mm, $X=12$ mm, $Y=80$ mm olarak verilmiştir. Şekil 4 tasarlanan antenin ölçüm yapılacak motor yağı ortamını ve antenin motor yağı içerisindeki konumunun değişimini ve anten ölçüm düzeneğini göstermektedir. Önerilen anten 10 mm aralıklarla 8 eşit bölmeye ayrılarak, her bir bölmedeki seviye için Şekil 4 ile gösterilen yağ ortamında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu düzencele yağ ortamındaki antenin geri dönüş kaybı (S_{11}), yağ içerisindeki 8 farklı anten seviyesi için ölçülmüştür. Böylece geri dönüş kaybı değişimindeki farklar ortaya çıkarılarak en uygun değişimi sağlayan seviye için çalışma frekansı

tespit edilmiştir. Ölçümlerde kullanılan yağ ortamı için iki farklı numune test edilmiştir. Bu iki farklı numune için Motul 5W-30 motor yağının hiç kullanılmamış (0 km) ve 1.6 vvti motor ile 10000 km kullanılmış örnekleri tercih edilmiştir.



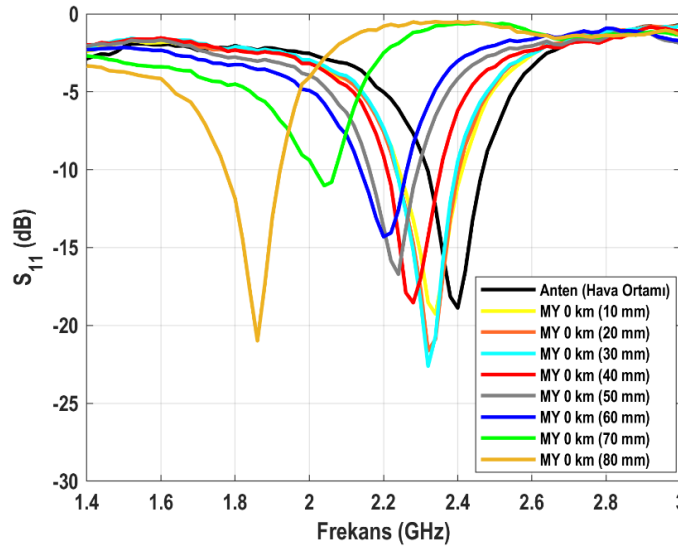
Şekil 4. Geri Dönüş Kaybı Ölçümleri İçin Motor Yağı Numune Ortamı ve Önerilen Antenin Motor Yağı İçerisindeki Farklı Uzunluk Seviyeleri(a) ile Sensör Ölçüm Düzenliği (b) (Engine Oil Sample Medium for Return Loss Measurements and Sensor Measurement Setup (b) with Different Length Levels of the Proposed Antenna in Engine Oil (a))

Önerilen antenin 8 farklı yükseklik seviyesi için motor yağı içerisine yerleştirilerek her bir anten uzunluk seviyesinde geri dönüş kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede motor yağ seviyesi ve kullanılmış yağ ile hiç kullanılmamış yağ arasındaki geri dönüş kaybı değerlerindeki değişim incelenmiştir.

3. Anten Benzetim ve Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Antenna Simulation and Measurements)

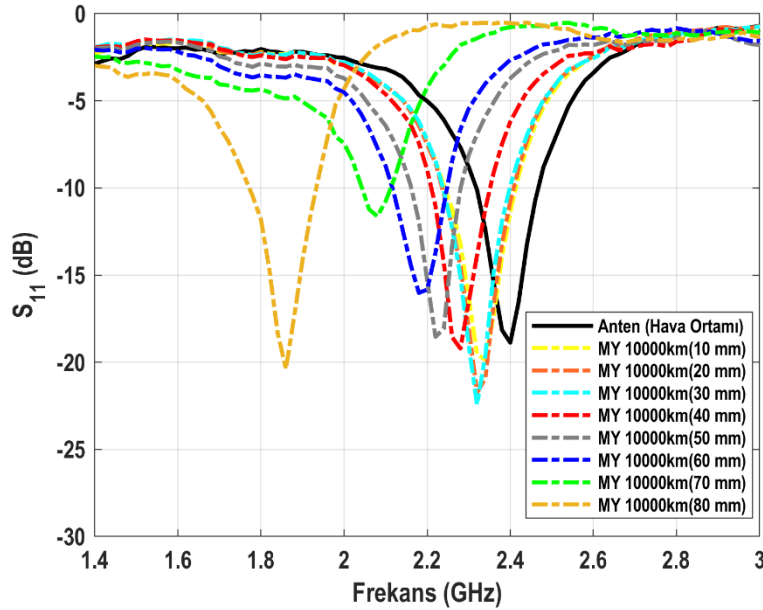
Bu çalışma ile Şekil 4 ile verilen düzeneğe 0 km ve 10000 km kullanıma sahip motor yağı (MY) numuneleri yerleştirilerek, tasarlanan sensör antenin bu numuneler içerisindeki farklı uzunluk seviyeleri için 1,4 GHz ile 3 GHz arasında geri dönüş kaybı (S_{11}) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler antenin 8 farklı uzunluk seviyesi için her iki MY numunesinde ayrı ayrı elde edilmiştir. Şekil 5, önerilen sensör antenin boş hava ortamındaki geri

dönüş kaybı ve hiç kullanılmamış MY içerisinde antenin 0-80 mm arasında 10 mm aralıklarla değişen uzunluk seviyelerindeki 8 farklı geri dönüş kaybı (S_{11}) ölçümlerini göstermektedir.



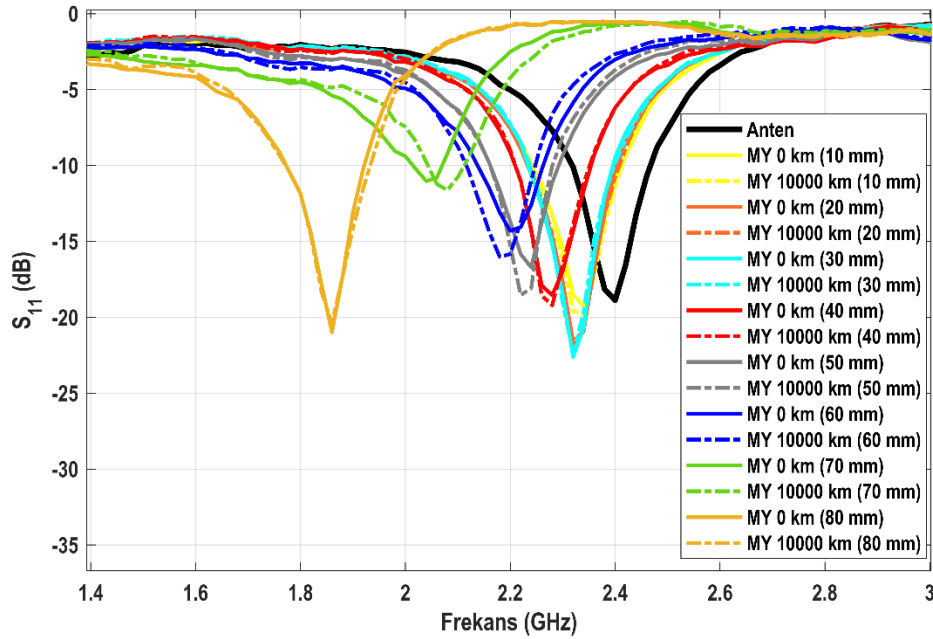
Şekil 5. Hiç Kullanılmamış (0 km) MY İçerisindeki Antenin Farklı Uzunlukları İçin Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafikleri (Return Loss Measurement Graphs for Different Lengths of Antenna in Brand-New (0 km) EO)

Ölçümler için Rohde & Schwarz marka FSH6 model spektrum analizör kullanılmıştır. Şekil 6 ile 1.6 motor hacmine sahip bir aracın 10000 km sonrası yağ değişimi sırasında alınmış bir yağ numunesi içerisinde antenin farklı uzunluk seviyelerindeki değerleri için 1,4 GHz ile 3 GHz arasındaki geri dönüş kaybı ölçümleri gösterilmektedir. Ayrıca antenin boş hava ortamındaki geri dönüş kaybı ölçüm sonucu da bu grafik ile gösterilmektedir.



Şekil 6. 10000 km MY İçerisindeki Antenin Farklı Uzunlukları İçin Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafikleri (Return Loss Measurement Graphs for Different Lengths of Antenna within 10000 km EO)

Şekil 5 ve şekil 6, 0 km ve 10000 km kullanıma sahip motor yağlarının tasarlanan sensör anten ile elde edilen s-parametre sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlar bu sensör antenin farklı sıvı derinliklerinde birbirinden farklı rezonans frekansı ve geri dönüş kaybı değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu sayede motor içerisindeki yağ seviye tespiti yapılabilmesi mümkündür. Şekil 7 ile verilen grafikte 0 ve 10000 km MY içerisinde antenin farklı uzunluklarındaki S-parametreleri birlikte verilmiştir.



Şekil 7.0 0 ve 10000 km MY İçinde Antenin Farklı Uzunluk Seviyelerinde Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafiği (Return Loss Measurement Graph at Different Length Levels of the Antenna at 0 and 10000 km EO)

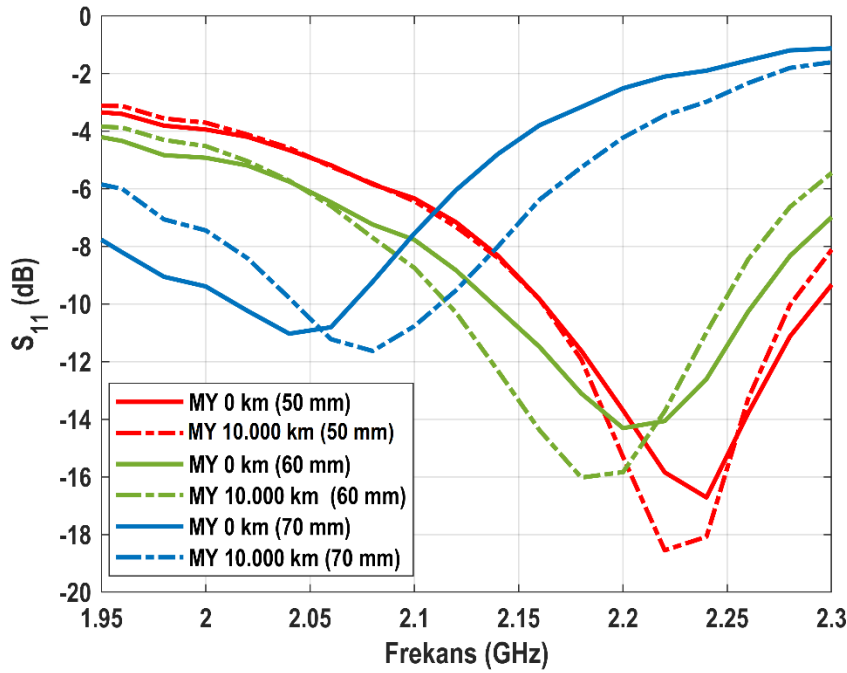
Şekil 7 ile gösterilen grafiğe bakıldığında 0 ve 10000 km MY içindeki antenin 20, 30 ve 80 derinlik seviyeleri için geri dönüş kaybında değişimin çok düşük değerlerde olduğu, 50, 60 ve 70 mm uzunluk seviyelerinin bulunduğu 2- 2,3 GHz bandında geri dönüş kaybı değişiminin hem frekans hem de geri dönüş kaybı oranı açısından diğer uzunluk değerlerine göre daha fazla değiştiği anlaşılmaktadır. Tablo 1 0 km ve 10000 km kullanıma sahip motor yağlarının Şekil 7'deki grafikten okunabilecek bant genişliği ve geri dönüş kaybı oranlarını 8 farklı sıvı derinliği için nümerik olarak göstermektedir.

Tablo 1. Farklı Kullanım Mesafelerine Sahip Motor Yağ Numunelerinin Ölçümünde Kullanılan Sensör Antenin Farklı Sıvı Seviyelerindeki Rezonans Frekansı ve Bant Genişliği Parametrelerinin Karşılaştırılması (Comparison of Resonance Frequency and Bandwidth Parameters at Different Fluid Levels of a Sensor Antenna for Measurement of Engine Oil Samples with Different Operating Distances)

Anten Ölçüm Parametreleri	MY İçerisindeki Anten Uzunluğu (mm)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
(MY-0 km) Rezonans frekansı (GHz)	2,34	2,32	2,32	2,28	2,24	2,20	2,04	1,86
(MY-0 km) S_{11} (dB)	-19,26	-21,63	-22,61	-18,54	-16,71	-14,31	-11,03	-20,99
(MY-10000km) S_{11} (dB)	-19,85	-21,74	-22,43	-19,21	-18,08	-15,83	-9,78	-20,99
(MY-0 km) Bant Genişliği (MHz)	180	170	170	160	140	120	50	140
(MY-10000 km) Rezonans frekansı (GHz)	2,34	2,32	2,32	2,28	2,22	2,18	2,08	1,86
(MY-10000 km) S_{11} (dB)	-19,85	-21,74	-22,43	-19,21	-18,55	-16,02	-11,63	-20,38
(MY-0 km) S_{11} (dB)	-19,26	-21,63	-22,61	-18,54	-15,84	-13,01	-9,22	-20,38
(MY-10000 km) Bant Genişliği (MHz)	180	160	160	140	120	130	80	160

Tablo 1. ile gösterilen değerlere bakıldığında sensör antenin 0 km ve 10000 km MY'leri içerisindeki 8 farklı uzunluk seviyesi için rezonans frekansı sadece 60 mm ile 70 mm de sırasıyla 20 MHz ve 40 MHz değiştiği anlaşılmıştır. Buradan yola çıkarak bu uzunluk seviyeleri için MY ömrünün tespitinde kullanılabileceği çıkarımı yapılabilir. Diğer MY içerisindeki farklı uzunluk seviyeleri için rezonans frekansının her numune için ayrı ayrı değerlendirildiğinde anlamlı bir değişimin olduğu gözükmemektedir. Sensör antenin 10 mm uzunluk değeri için 0 km MY numunesinde 2,34 GHz olan rezonans frekansı 80 mm için 1,86 GHz değerine düşmüştür. Fakat antenin MY içerisindeki 20 mm ile 30 mm ölçümlerinde rezonans frekansının değişmediği anlaşılmaktadır. Şekil 8'de bulunan

grafikte 0 ve 10000 km MY içerisinde antenin farklı uzunluklarındaki S-parametrelerinin 2-2,3 GHz bandında bulunan 50, 60, 70 mm derinlik seviyelerinin S-parametreleri verilmiştir.



Şekil 8. 0 ve 10000 km MY İçin Yağ Numunesi İçerisindeki En Verimli Sensör Uzunluklarında Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafiklerinin Karşılaştırılması (Comparison of Return Loss Measurement Graphs at the Most Efficient Sensor Lengths in the Oil Sample for 0 and 10000 km EO)

Şekil 8 ile verilen grafiğe bakıldığında 0 ve 10000 km kullanılmış motor yağ numuneleri için 50 mm derinlik seviyesinde 2,22 GHz frekansında 2,71 dB, 60 mm derinlik seviyesinde 2,18 GHz frekansında 3,01 dB ve 70 mm derinlik seviyesinde 2,08 GHz frekansında 2,41 dB farkların olduğu anlaşılmaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma (Results Discussion)

Motor yağları, aracın hareketli parçalarından biri olan motor için büyük önem arz etmektedir. Motor içerisine hava ve yakıt ile metal parçacıklar, tortular ve motora zarar verebilecek çeşitli maddeler girebilmektedir. Ayrıca motorun çalışmasına bağlı olarak da kullanım özelliğinin yitiren motor yağının değiştirilmesi, motorun daha verimli çalışabilmesi ve ömrünün daha uzun olabilmesi için gerekmektedir. Geleneksel olarak motor yağının değiştirilme süreleri bulunsu da aracın kullanımına bağlı olarak bu süreden çok daha önce değiştirilmesi gerektiği durumları oluşabilmektedir. Bu çalışmada da MY ömrünün ve MY seviyesinin tespit edilebilmesi için bir sensör tasarımı ve bu sensör ile iki farklı numunenin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda asimetrik eş-düzlemsel şerit beslemeli mikroşerit antenin tasarım aşamaları da verilerek 2,40 GHz 'de rezonans frekansına sahip bir anten tasarlanmıştır. Tasarlanan anten kullanılmamış motor yağı (0 km) ve 10.000 km kullanılmış motor yağı içerisine farklı anten seviyelerde çalıştırılarak MY içerisindeki en hassas değişimlerin olduğu anten uzunlukları tespit edilmiştir. Sensör antenin MY numunesi içerisinde 60 mm'de 2,18 GHz 'de elde edilen verilere göre temiz (0 km) ve 10000 km kullanılmış motor yağ numunesi arasında 3,01 dB fark olduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle MY ömrü tespiti için MY içerisindeki en uygun uzunluk değerlerinin 60 mm olduğu belirlenmiştir. Ayrıca aynı sensör anten ile MY içerisinde 10-80 mm uzunluk seviyeleri için yapılan ölçümlerde rezonans frekansının 2,34-1,86 GHz arasında MY içerisindeki antenin seviyesine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Bu çalışma ile sıvı seviye tespitinin ve MY ömrünün belirlenebileceği sonucuna varılmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abdelwahab, H., Ebrahimi, A., Tovar-Lopez, F. J., Beziuk, G., & Ghorbani, K. (2021). Extremely sensitive microwave microfluidic dielectric sensor using a transmission line loaded with shunt LC resonators. *Sensors*, 21(20), 6811.
- Abdulkarim, Y. I., Deng, L., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Awl, H. N., Muhammadsharif, F. F., Liao, C., Unal, E., & Luo, H. (2020). Novel metamaterials-based hypersensitized liquid sensor integrating omega-shaped resonator with microstrip transmission line. *Sensors*, 20(3), 943.
- Akgöl, O. (2018). PCB Dairesel Yama Anten Tabanlı Etanol ve Metanol Algılayıcı Tasarımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 287-296.
- Al-Gburi, A. J. A., Rahman, N. A., Zakaria, Z., & Palandoken, M. (2023). Detection of Semi-Solid Materials Utilizing Triple-Rings CSRR Microwave Sensor. *Sensors*, 23(6), 3058.
- Al-Mudhafar, A. A., & Ra'ed, A. M. (2022). High-Precise Microwave Active Antenna Sensor (MAAS) formulated for sensing liquid properties. *Sensors and Actuators A: Physical*, 341, 113567.
- Bakır, M., Dalgac, Ş., Karaaslan, M., Karadağ, F., Akgöl, O., Unal, E., Depci, T., & Sabah, C. (2019). A comprehensive study on fuel adulteration sensing by using triple ring resonator type metamaterial. *Journal of the Electrochemical Society*, 166(12), B1044.
- Bakır, M., & Yaşar, İ. (2022). Metamalzeme Tabanlı Hassas Süt ve Sıvı Sensörü Uygulaması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10-16.
- Bhatti, M. H., Jabbar, M. A., Khan, M. A., & Massoud, Y. (2022). Low-cost microwave sensor for characterization and adulteration detection in edible oil. *Applied Sciences*, 12(17), 8665.
- Bouchalkha, A., & Karli, R. (2019). Planar Microstrip Antenna Sensor for pH Measurements. 2019 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA).
- Cebeci, T. Motor Yağı Analiz Yöntemi İle Motor Yağı Kullanım Sürelerinin İyileştirilmesi. (2022). *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 1(33), 24-35.
- Chuma, E. L., Iano, Y., Fontgalland, G., & Roger, L. L. B. (2018). Microwave sensor for liquid dielectric characterization based on metamaterial complementary split ring resonator. *IEEE Sensors Journal*, 18(24), 9978-9983.
- Dalgac, S., Akdoğan, V., Kiris, S., Incesu, A., Akgöl, O., Unal, E., Basar, M. T., & Karaaslan, M. (2021). Investigation of methanol contaminated local spirit using metamaterial based transmission line sensor. *Measurement*, 178, 109360.
- Dalgac, Ş., Karadağ, F., Bakır, M., Akgöl, O., Ünal, E., & Karaaslan, M. (2021). Chiral metamaterial-based sensor applications to determine quality of car lubrication oil. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43(7), 1640-1649.
- Diñer, F., Delihacıoğlu, K., Tümkaya, M. A., Karaaslan, M., & Sabah, C. (2017). Akaryakıt sektörü için metamalzeme tabanlı sensör tasarımı ve uygulaması.
- Groumpas, E. I., Koutsoupidou, M., & Karanasiou, I. S. (2022). Biomedical Passive Microwave Imaging and Sensing: Current and future trends [Bioelectromagnetics]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 64(6), 84-111.
- Iqbal, A., Smida, A., Saraereh, O. A., Alsafasfeh, Q. H., Mallat, N. K., & Lee, B. M. (2019). Cylindrical dielectric resonator antenna-based sensors for liquid chemical detection. *Sensors*, 19(5), 1200.
- Islam, M. R., Islam, M. T., Bais, B., Almalki, S. H., Alsaif, H., & Islam, M. S. (2022). Metamaterial sensor based on rectangular enclosed adjacent triple circle split ring resonator with good quality factor for microwave sensing application. *Scientific reports*, 12(1), 6792.
- Kayal, S., Shaw, T., & Mitra, D. (2020). Design of metamaterial-based compact and highly sensitive microwave liquid sensor. *Applied Physics A*, 126(1), 1-9.
- Kopmaz, C. (2020). *Anten tabanlı mikrodalga sensörlerin çeşitli alanlardaki uygulamaları* İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü ...].
- Kuzu, A. (2019). *PCB dikdörtgen yama anten ve monopol anten tabanlı çok amaçlı sıvı sensörü uygulamaları* İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü ...].
- Lee, K., Hassan, A., Lee, C. H., & Bae, J. (2017). Microstrip patch sensor for salinity determination. *Sensors*, 17(12), 2941.
- Lopato, P., & Herbko, M. (2018). A circular microstrip antenna sensor for direction sensitive strain evaluation. *Sensors*, 18(1), 310.
- Low, J.-H., Chee, P.-S., Lim, E.-H., & Lee, K.-Y. (2020). Compact organic liquid dielectric resonator antenna for air pressure sensing using soft material. *Scientific reports*, 10(1), 1-10.
- Meyne, N., Cammin, C., & Jacob, A. F. (2014). Accuracy enhancement of a split-ring resonator liquid sensor using dielectric resonator coupling. 2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON).
- Meyne, N., Latus, S., & Jacob, A. F. (2014). Corrugated coplanar transmission-line sensor for broadband liquid sample characterization. GeMiC 2014; German Microwave Conference.
- Mosbah, S., Zebiri, C., Sayad, D., Elfergani, I., Bouknia, M. L., Mekki, S., Zegadi, R., Palandoken, M., Rodriguez, J., & Abd-Alhameed, R. A. (2022). Compact and Highly Sensitive Bended Microwave Liquid Sensor Based on a Metamaterial Complementary Split-Ring Resonator. *Applied Sciences*, 12(4), 2144.
- née Haase, N. M., Fuge, G., Trieu, H. K., Zeng, A.-P., & Jacob, A. F. (2015). Miniaturized transmission-line sensor for broadband dielectric characterization of biological liquids and cell suspensions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(10), 3026-3033.
- Omer, A. E., Shaker, G., Safavi-Naeini, S., Ngo, K., Shubair, R. M., Alquie, G., Deshours, F., & Kokabi, H. (2020). Multiple-cell microfluidic dielectric resonator for liquid sensing applications. *IEEE Sensors Journal*, 21(5), 6094-6104.
- Parvathi, K. S., & Gupta, S. R. (2022). Ultrahigh-sensitivity and compact EBG-based microwave sensor for liquid characterization. *IEEE Sensors Letters*, 6(4), 1-4.
- Sanders, J. W., Yao, J., & Huang, H. (2015). Microstrip patch antenna temperature sensor. *IEEE Sensors Journal*, 15(9), 5312-5319.

- Soffiatti, A., Max, Y., G. Silva, S., & M. de Mendonça, L. (2018). Microwave metamaterial-based sensor for dielectric characterization of liquids. *Sensors*, 18(5), 1513.
- Tamer, A. (2019). *İletim hatları ve metamatzemeler kullanılarak legal-illegal benzin ve mazot ayrıştırılması* İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü ...].
- Uysal, E., Ercek, E., Sabah, C., Nesimoğlu, T. (2021). Kıbrıs, O. D. T. Ü. K., & Kampusu, E.-E. M. B. Varaktör Diyotlar ile Yüksek Oranda Frekansı Ayarlanabilir Elmas Şekli Metamatzeme Rezonatör.
- Withayachumnankul, W., Tuantranont, A., Fumeaux, C., & Abbott, D. (2013). Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 189, 233-237.
- Zhu, L., Li, W., Han, X., & Peng, Y. (2020). Microfluidic flexible substrate integrated microstrip antenna sensor for sensing of moisture content in lubricating oil. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2020.