



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**MİKRODALGA REZONATÖR TABANLI
SENSÖR KULLANARAK BİTKİSEL
YAĞLARIN DİELEKTRİK
KATSAYILARININ ISI DEĞİŞİMİNE
VE KULLANIM SIKLIĞINA GÖRE
KARAKTERİZASYONU**

Maide ERDOĞAN

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**





**MİKRODALGA REZONATÖR TABANLI SENSOR KULLANARAK
BİTKİSEL YAĞLARIN DİELEKTRİK KATSAYILARININ ISI
DEĞİŞİMİNE VE KULLANIM SIKLIĞINA GÖRE
KARAKTERİZASYONU**

Maide ERDOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**


**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2019

MAİDE ERDOĞAN tarafından hazırlanan "MİKRODALGA REZONATÖR TABANLI SENSOR KULLANILARAK BİTKİSEL YAĞLARIN DİELEKTRİK KATSAYILARININ ISI DEĞİŞİMİNE VE KULLANIM SIKLIĞINA GÖRE KARAKTERİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Emin ÜNAL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Bekir ÖZÇELİK

Atom ve Moleküler Fiziği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Doç. Dr. Emin ÜNAL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan AKGÖL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 31/05/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Tolga DEPCI
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Maide ERDOĞAN

31/05/2019



MİKRODALGA REZONATÖR TABANLI SENSOR KULLANILARAK, BİTKİSEL YAĞLARIN DİELEKTRİK KATSAYILARININ ISI DEĞİŞİMİNE VE KULLANIM SIKLIĞINA GÖRE KARAKTERİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Maide ERDOĞAN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Yağ günlük hayatımızda önemli bir yer eden akışkanlardan birisidir. Yağların, akışkanlık, baz sayısı, kırılma indisi, asit sayıları, yoğunluk, içerdiği su miktarı vb. gibi parametrelerini ölçmek için karmaşık laboratuvar ekipmanları gerekmektedir. Bahsi geçen bu karmaşık laboratuvar ekipmanları kullanılmadan dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları doğrudan ölçülebilmektedir. Ayrıca, mikrodalga ölçümleriyle de yağlar karakterize edilebilmektedirler ve bunun yanında mikrodalga ölçümleri kolaylığı ve net sonuçlar sunmasıyla yağ kalitesi belirlenmesinde tercih edilmektedir. Mikrodalga ölçümlerinde yansıma ve iletim parametreleri elde edilmekte, bu parametreler kullanılarak dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları hesaplanabilmektedir. Dielektrik sabitinin sanal ve reel kısımlarının oranı ise kayıp tanjantı $\tan\delta$ olarak bilinmektedir. Kızartma yağı olarak kullanılan ayçiçeği yağının dielektrik sabiti kullanım süresi, kullanım sayısı, sıcaklığı ve içerisinde kızartılan malzemenin özelliğine göre değişim göstermektedir. Bu değişimin sebebi kızartılan maddenin içerdiği su ve diğer parçacıklar gibi kirletici maddelerin varlığı veya yağın kimyasındaki değişikliklerdir. Bu çalışmada, kızartma yağı olarak ayçiçek yağı kullanım miktarını belirlemek için iki farklı sensör yapısı önerilmiştir. İlk olarak, ısının yağın dielektrik parametresi üzerindeki etkilerini görmek için patates örnekleri kullanmadan saf ayçiçeği yağı 16 kez ısıtıldı ve her ısıtma işleminden sonra yeterli miktarda yağ örneği alındı. Sonra, saf ayçiçeği yağı aynı miktarda patates numuneleriyle 16 kez kızartıldı ve benzer şekilde her kızartma işleminden sonra dielektrik ölçümleri için yeterli miktarda yağ numunesi alındı. Daha sonra, ayçiçeği yağı numunelerinin dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları mikrodalga laboratuvarında ağ analizörü tarafından ölçülmüştür. Ayçiçeği yağı karakterizasyonunun bir sonucu olarak, dielektrik sabiti 4-8 GHz bandında, 2,9 dan 3,3'e kadar kullanım sayısına bağlı olarak doğrusal bir artış göstermiştir. Dielektrik sabitindeki bu değişime, kızartma işlemi sırasında patates numunelerinden yağa karışan su ve diğer partiküller neden olmaktadır. Ayrıca, ölçülen dielektrik sabit değerleri yağ kullanım ömrünü belirlemek üzere sensör yapılarını tasarlamak için sonlu entegrasyon tekniğine dayalı mikrodalga simülatörüne eklenmiştir. Bu çalışmada iki farklı iletim hattı sensörü tasarlanmış ve sunulmuştur. İlk iletim hattı sensörünün iki avantajı vardır; geri yansıma-S11 üzerinde yaklaşık 5,45GHz'de rezonans kayması ve iletim-S21'de 4,5GHz, 5,3GHz ve 7,5GHz değerlerinde rezonans kaymaları oluşmuştur. İkinci iletim hattı sensörü, S21'de yaklaşık 5,4 GHz'de rezonans kaymalarına sahiptir. Son olarak, tasarlanmış sensör yapıları üretilmiştir ve vektör ağ analizörü kullanılarak deneysel ölçümler yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, tasarlanmış iki sensör yapısının kızartma yağı numunesinin parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Metamalzeme, iletim hattı sensörü, kızartma yağı, dielektrik

Sayfa Adedi : 55

Danışman : Doç. Dr. Emin ÜNAL

CHARACTERISATION OF DIELECTRIC COEFFICIENTS OF VEGETABLE OILS
BASED ON HEAT EXCHANGE AND FREQUENCY OF USAGE BY USING
MICROWAVE REZONATOR BASED SENSORS

(M. Sc. Thesis)

Maide ERDOĞAN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2019

ABSTRACT

To measure oil parameters such as oil usage, viscosity, base number, refractive index, acid numbers, density, water substances etc. complex laboratory equipments are required. Instead of these complex laboratory equipments, such oil properties can also be characterized by microwave measurements, and microwave measurements are preferred for oil quality determination due to ease and clear results. There are two main parameters in microwave measurements: dielectric constant value ϵ and loss tangent value $\tan\delta$. When the dielectric constant of the sunflower oil used as frying oil was measured, dielectric constant and loss tangent of used oil varied compared to unused pure sunflower oil. These differences were caused by the presence of pollutants, such as water and other particles, and by changes in the chemistry of the oil. In this study, two different sensor structures have been proposed to determine the amount of sunflower oil usage as frying oil. Firstly, to see the effects of heat on the dielectric parameter of the oil, pure sunflower oil was heated 16 times without using potato samples and a small amount of oil sample was taken after each heating process. Subsequently, pure sunflower oil was fried 16 times with the same amount of potato samples, and a small amount of oil sample was taken for each dielectric measurement. Then, the dielectric constant and loss tangents of the sunflower oil samples were measured by the vector network analyzer in the microwave laboratory. As a result of the characterization of sunflower oil, the dielectric constant has increased linearly from 2.9 to 3.3 between the 4 GHz and 8 GHz band, and this linear increase depends on the number of fries with the potato samples. This change in the dielectric constant is caused by water and other particles which are mixed with the oil from the potato samples during the frying process. In addition, the measured dielectric constant values were added to the microwave simulator which is based on the finite integration technique to design the sensor structures to determine the oil lifetime. In this paper, two different transmission line sensors are designed and presented. The first transmission line sensor has two advantages; resonance shift on S11 at about 5,45GHz and resonance shifts at 4,5GHz, 5,3GHz and 7,5GHz in transmission-S21. The second transmission line sensor has resonance shifts at about 5.4 GHz in S21. Finally, designed sensor structures were fabricated and experimental measurements were conducted by using the vector network analyzer. According to the experimental results, two sensor structures designed to determine the life of the frying oil sample are usable.

Key Words : Metamaterial, transmission line sensor, frying oil, dielectric

Page Number : 55

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Emin ÜNAL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince, sahip oldukları üstün bilgi birikimlerini benimle paylaşan ve yön göstericim olan değerli hocam Doç. Dr. Emin Ünal'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca, çalışmalarım sırasında bana tavsiyelerde bulunan Doç.Dr. Muharrem Karaaslan'a, Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Akgöl'e; ölçümlerde ve üretimde yardımcı olan Arş. Gör. Fatih Özkan Alkurt ve Arş. Gör. Olcay Altıntaş'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca, tez çalışmam boyunca her türlü desteği veren aileme en içten dileklerle teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
3.1. Maxwell Denklemleri.....	10
3.2. Elektromanyetikte Sonlu İntegrasyon Tekniği.....	11
3.3. Dielektrik Sabiti ve Kayıp Tanjant Değeri.....	12
3.4. Sınır Koşulları ve Port Bağlantıları.....	13
3.5. Materyal ve Üretim Cihazı.....	13
3.6. Ölçüm Metodları.....	14
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	16
4.1. Kızartma Yağı Numunelerinin Hazırlanması.....	16
4.2. Kızartma Yağının Dielektriksel Karakterizasyonu.....	17
4.3. İletim Hattı Sensör Tasarımları ve Simülasyon Çalışmaları.....	20
4.3.1. İletim Hattı Sensörü 1.....	20
4.3.2. İletim Hattı Sensörü 2.....	26
4.4. Üretim ve Deneysel Çalışmalar.....	29

	Sayfa
4.5. Tartışma.....	32
5. SONUÇLAR.....	34
KAYNAKLAR.....	36
ÖZGEÇMİŞ	42
DİZİN.....	43



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. İletim hattı 1 sensörü parametreleri	21
Çizelge 4.2. İletim hattı 2 sensörü parametreleri	27



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Mikroakışkan kanal bulunan iletim hattı sensörü [38].....	2
Şekil 3.1. Mikrodalga iletim hattı eşdeğer devresi.....	11
Şekil 3.2. Vektör ağ analizörü ve üretilen bir iletim hattı yapısı.....	14
Şekil 3.3. LPKF-E33 protomat ile örnek bir üretim düzeneği.....	15
Şekil 4.1. Ayçiçeği yağı numuneleri.....	16
Şekil 4.2. Kızartma yağı numunelerinin dielektrik sabiti ölçümü.....	18
Şekil 4.3. Isıtma sayısına bağlı olarak dielektrik sabitinin reel kısmındaki değişimi	18
Şekil 4.4. Kızartma yağının patates ile kızartılmasının dielektrik katsayısı üzerine etkisi.....	19
Şekil 4.5. Yağının patates ile kızartılmasının kayıp tanjant değeri üzerine etkisi.....	20
Şekil 4.6. İletim hattı sensörü 1.....	21
Şekil 4.7. Birinci iletim hattı sensör yapısının geri yansımaya (S11) karakteristiği.....	22
Şekil 4.8. Birinci iletim hattının kızarmış patates numuneleriyle iletim özellikleri a) 4-8GHz aralığı, b) 4,5GHz’de, c) 5,3GHz’ d) 7,5GHz’de.....	24
Şekil 4.9. Birinci sensör yapısının elektrik alan dağılımı, 5,45GHz.....	25
Şekil 4.10. Birinci sensör yapısının yüzey akım dağılımı, 5,45GHz.....	25
Şekil 4.11. İletim hattı sensörü 2.....	26
Şekil 4.12. İkinci iletim hattının kızarmış patates numuneleriyle iletim özellikleri... a) 4-8GHz bandı, b) 5-6GHz bandı aralığı.....	27
Şekil 4.13. İkinci sensör yapısının elektrik alan dağılımı, 5,45GHz.....	28
Şekil 4.14. İkinci sensör yapısının yüzey akım dağılımı, 5,45GHz.....	28
Şekil 4.15. Üretilen birinci iletim hattı sensör yapısı.....	29
Şekil 4.16. Birinci iletim hattının deneysel geri yansımaya S11 değerleri , 16 kez kullanılan ayçiçeği yağı ile.....	30
Şekil 4.17. Birinci iletim hattının deneysel iletim S21 değerleri , 16 kez kullanılan ayçiçeği yağı ile.....	30
Şekil 4.18. Üretilen iletim iletim hattı sensör yapısı.....	31
Şekil 4.19. İkinci iletim hattı sensörünün deneysel iletim S21 sonuçları.....	32

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

ϵ	dielektrik sabiti
μ	manyetik geçirgenlik
$\tan\delta$	kayıp tanjant değeri
mm	milimetre
dB	Desibel
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz
ω	açısal frekans
E	elektrik alan şiddeti
H	manyetik alan şiddeti

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
DNG	Çift Negatif (Double Negative)
EM	Elektromanyetik
FIT	Sonlu integrasyon yöntemi
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
FDTD	Zaman sölgesinde sonlu farklar yöntem
RF	Radyo frekansı
TEM	Enine Elektromanyetik (Transverse Electromagnetic)

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan teknoloji ile beraber günümüzde pek çok malzemenin karakterizasyonu farklı yöntemler ile yapılabilmektedir. Bahsi geçen malzemeler en basit molekülden en kompleks maddeye kadar uzanmaktadır. Bu kompleks maddelerden birisi de birçok evde besin maddesi olarak tüketilen ayçiçeği yağıdır. Ayçiçeği yağı tüm yağlarda olduğu gibi kendisine has özelliklere sahiptir ve bu özelliklerin başında akışkanlık, baz sayısı, asit sayısı, kırılma indisi, yoğunluğu, su içeriği ve diğer partikül oranları gelmektedir. Bu özellikleri ölçmek için karmaşık laboratuvar ekipmanları gerekmektedir, buna karşı bu malzemeleri elektromanyetik olarak karakterize etmek daha kolaydır ve üstelik yerinde ölçüm imkanı bulunmaktadır.

Bir maddeyi elektromanyetik olarak karakterize edip özelliklerini belirlemek için o maddenin elektriksel ve manyetik parametrelerini ayrı ayrı elde etmek gerekmektedir. Elde edilecek bu parametrelerin frekansa bağımlı olduğu da bilinen bir gerçektir. Bu parametreler başlıca dielektrik sabiti ϵ , manyetik geçirgenlik μ ve bunlardan elde edilen kırılma indisi n 'dir. Bu parametrelerin ölçülebilmesi için birçok farklı uygulama kullanılabilmektedir ve bunların başında da sensör uygulamaları yer almaktadır.

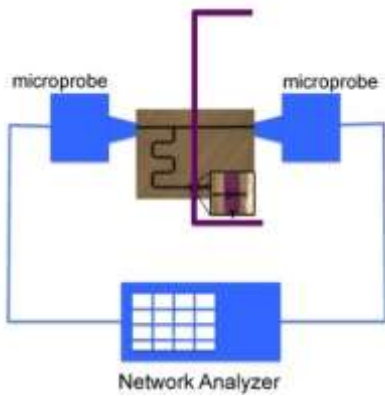
Ayçiçeği yağı yapısı itibariyle karmaşık bir maddedir ve günlük olarak tüketildiği için hayatımızda önemli bir yerdedir. Çoğunlukla kızartma işlemlerinde kullanılan ayçiçeği yağı insan besin kaynağının önemli bir parçasıdır. Literatüre bakıldığında ayçiçeği yağı üzerine pek çok çalışma ve analiz sonucu mevcuttur. Yapılan bir çalışmada rafine ayçiçeği yağının ve kullanılmış yağın metanolizi yapılmıştır ve yağların farklı karışımlar kullanılarak dizel yakıtı olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir [1]. Bununla beraber soya fasulyesi, mısır, ayçiçeği, keten tohumu ve zeytinyağları dahil birçok gıda yağının spektroskopik ile analizi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir [2]. Bu çalışmalara ek olarak kızartma yağının kimyasal analizi de ayrıntılı olarak gerçekleştirilmiştir [3]. Yapılan bu analiz çalışmaları gelişen teknoloji ile beraber pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir ve kızartma yağının zararlı etkisini en aza indirmek için referans oluşturmuştur.

Kızartma yağının insan sağlığı üzerine oluşturabileceği olumsuz etkileri görmek adına yağın farklı sıcaklıklarda kızartma numunesi üzerine fiziksel ve yapısal etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir [6]. Literatüre bakıldığında gıda ürünlerinin dielektrik karakteristiğinin çıkarıldığı çalışmalar mevcuttur, örneğin sütün dielektriksel özellikleri

elde edilmiş ve sıcaklık ve protein içeriğine göre değişimi verilmiştir [7, 8]. Bu çalışmalarda eksik kalan nokta ise herhangi bir sensör tasarımının gerçekleştirilmemesidir. Ayçiçeği yağının ve diğer tüketilebilir yağların dielektrik karakteristikleri ayrı ayrı çıkarılmıştır [18] ancak bu çalışmada da bir sensör tasarımı yapılmamıştır. Bununla beraber, kızartma yağının bozulduğunu belirlemek ve kalitesini ölçmek için dielektrik spektroskopi ile yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur [19, 20]. Tekrar tekrar kullanılarak kimyasal yapısı bozulan kızartma yağının belirlenmesi için, polar yapısı bozulan yağın kapasitansındaki değişiklikleri baz alan kapasitif prob sensörü geliştirilmiştir, 180 derecede kızartılan palmye yağının kapasitans değişimi ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır [21].

Literatür incelendiğinde kızartma yağının kullanılarak bozulmasının insan sağlığı üzerine zararlı olduğu görülmektedir. Bu yağlar ayçiçeği yağı, mısır yağı ve zeytinyağı olmakla beraber tüketilebilir bu yağların kullanımının belirlenmesi için elektron spin rezonans tekniği geliştirilmiştir ve bu tekniğin güvenilirliği ortaya konmuştur [24]. Bununla beraber, bitkisel yağların ayrıştırılması için fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi geliştirilip literatüre kazandırılmıştır [26]. Bitkisel yağların kullanım ömrü, bozulma durumu ve kalitesi de yapılan çalışmalarla gösterilmiştir, sıcaklığın yağ bozulmasını artırdığı görülmektedir [30].

Maddelerin dielektriksel olarak karakterize edilebildiği bilinmektedir. Bu şekilde elde edilen dielektrik değerlerine göre mikrodalga frekans bölgelerinde çalışabilen yüksek verimli sensörler geliştirilmiştir [37-43]. Chretiennot ve ark. yaptıkları çalışma ile glikoz çözeltisinin yoğunluk ölçümünü mikroakışkan kanallar bulunan sensör yapısını mikrodalga frekansı olan 5-55GHz bandı için geliştirmişlerdir [38].



Şekil 1.1. Mikroakışkan kanal bulunan iletim hattı sensörü [38]

Çift negatif (DNG) malzeme olarak ta bilinen metamalzeme yapıları da sensör yapılarında kullanılabilir. Bu malzemelerde dielektrik katsayısı ϵ ve manyetik geçirgenlik μ rezonans frekansında negatif değerler almaktadır ve ilk olarak V. Veselago tarafından ortaya atılmıştır [46]. Metamalzeme yapılarının kullanıldığı bir çalışmada kimyasal maddeler için sensör yapısı geliştirilmiştir, bu sensör yapısı ile kimyasalların dielektrik karakteristiklerine göre sınıflandırılması yapılmaktadır [47]. Benzer olarak bu yapıların sensör performansını artırdığı görülmüş olup literatürde sıklıkla mevcuttur [49-51].

Bu tez çalışmasında literatürdeki çalışmalar ışığında kızartma yağının ömrünü belirlemek için dielektriksel karakterizasyonu ve iki farklı iletim hattı sensörü tasarlanmış ve deneysel olarak desteklenmiştir. Kızartma yağı olarak ayçiçeği yağı kullanılmıştır ve ilk olarak yağ 16 kez aynı türde patates numuneleri ile kızartılmıştır. Elde edilen yağ numunelerinin dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları vektör ağ analizörü ve ona bağlı dielektrik probe kit ile 4-8GHz frekans aralığında ölçülmüştür ve yağ numunelerinin dielektrik sabitinin kızartma sayısına bağlı olarak arttığı görülmüştür. Bu artışa karşı patatesiz olarak 16 kez ısıtılan yağın dielektrik sabitinde küçük fakat lineer bir değişim gözlenmiştir. Elde edilen dielektrik sabiti mikrodalga simülasyon programına aktarılmıştır ve iki farklı iletim hattı sensörü tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıların iletim ve geri yansıma rezonans frekanslarında lineer kaymalar mevcuttur ve bu kaymalar önerilen yapıların sensör olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Son aşama olarak bu tez çalışmasında bir sıra deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir ve önerilen yapılar deneysel olarak ta desteklenmiştir. Geliştirilen iki farklı iletim hattı yapısı kızartma yağının parametrelerinde meydana gelen değişimleri belirleyebilme kabiliyetine sahip olması ve düşük üretim maliyeti ile literatürdeki çalışmalara göre daha fazla avantaja sahiptir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Mikrodalga ölçümleri ile maddelerin dielektrik özellikleri belirlenmektedir ve bu özellikler tarım endüstrisine adapte edilerek uygulama alanı oluşturmaktadır. Literatür incelendiğinde tarımsal ürünlerin (elma, avokado, muz, havuç, limon, mango, soğan, patates, çilek vb.) dielektrik sabitleri mikrodalga frekansında (915MHz ve 2,45GHz) elde edilmiş ve literatüre sunulmuştur, elde edilen dielektrik değerlerinin ısı altında değişimi de ayrıntılı şekilde incelenmiştir [4].

Lizhi ve ark. 2008 yılında yapmış oldukları çalışma ile 10 farklı yenilebilir yağın ve 6 farklı yağ asidinin dielektrik katsayılarının 20-45C derece aralığında değişimini incelemişlerdir, ek olarak %0,02-0,31 aralığında nem değişiminin de yağ dielektrik değeri üzerine etkisini de gözlemlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar artan nem oranının dielektrik sabiti değerinde artışa neden olduğunu göstermektedir [5].

Yapılan bir diğer çalışmada kızartılmış yağın lezzetinin kızartma yağına bağlı olduğu ortaya konmuştur, kızartma yağı kalitesinin değerlendirilmesi bu nedenle hem kızartma işletmecileri hem de resmi yiyecek kontrol ajansları için önemli bir konudur [9].

Yemeklik yağın elektriksel özellikleri literatüre bakıldığında toplam polar bileşenine, sıcaklığa ve uygulanan voltajın frekansına bağlı olduğu görülmektedir. Dielektrik sabit değeri, dielektrik kayıp ve elektriksel iletkenlik 20 ila 100°C sıcaklık aralığında pamuk tohumu, yer fıstığı, hardal ve ayçiçeği yağları için ölçülmüştür ve literatüre kazandırılmıştır. Yağların viskozitesi yani akışkanlığı da, işlenmesi ve kalite kontrolüyle ilgili diğer önemli bir fiziksel özelliktir ve yapılan çalışma ile yağların viskozitesi deneysel olarak ölçülmüştür. Viskozitenin dielektrik kayıp tanjantı ve viskozitenin elektrik iletkenliği ile korelasyonu olduğu ortaya çıkarılmıştır [10].

Kızartma yağının uzun süreli kullanımının yağ kimyası ve yağ rengi üzerine etkisi olduğu 2012 yılında yapılan çalışma ile literatüre kazandırılmıştır [11]. Buna paralel olarak bir diğer çalışmada Dielektrik sabitleri, dielektrik kayıp faktörleri, kalite faktörleri ve elektriksel iletkenlikleri 50Hz ila 2MHz frekanslarında ve 293,15 ila 323,15K sıcaklıklarında belirlenmiştir ve bu dielektrik parametrelerin baz yağ kalitesi endekslerine bağımlılığı araştırılmıştır [12].

Kapasitans ve dielektrik sabiti gibi elektriksel özellikler, yağ kalitesini algılamak için uygun faktörlerin başlıcalarıdır. Dielektrik sabitinin, ısınma süresi döngüleri ile yaklaşık

olarak doğrusal yönde değiştiği yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Ölçülen kapasitans varyasyonlarının, ısıtma sonrası döngülerde gözlenen yoğunluk ve kırılma indeksindeki değişim ile anlamlı bir korelasyon içerisinde olduğu literatürde görülmektedir ve yağın kalite analizinde dielektrik sabiti ölçümünü kullanarak bir cihaz geliştirme fikri sunulmuştur [13].

Ultrason ve mikrodalga kombine edilmiş vakumlu olarak kızartılan elma dilimlerinin dielektrik özelliklerinin dehidrasyon modellemesi ve analizi üzerine çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışma ile elma dilimlerinin deneysel kızartma verileri, on farklı matematiksel modele uyacak şekilde kullanılmıştır ve model parametrelerinin belirlenmesinde doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar gıda endüstrisinde büyük avantajlara sahiptir ve böylece kısa sürede çıtır, arzu edilen doku, sağlıklı ve görsel olarak çekici kızarmış gıdalar üretmek mümkün olacaktır [14]. Benzer olarak defalarca patates kızartılmasının kullanılan yağın dielektrik sabitini değiştirdiği Crosa ve Ark. tarafından ifade edilmiştir [15].

Aguilar ve Maldonado 2015 yılında yaptıkları çalışma ile sıvılarda dielektrik sabiti ölçümü için basit bir kapasitif hücre sunmuşlardır. Dielektrik ölçümü sunulan bu çalışmada, dielektrik sabitlerinin değerlendirilmesi yoluyla fazla ısıtılmış yemeklik yağın bozulmasının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir [16].

Song ve Ark. 2017 yılında yaptıkları çalışma ile kızartma sırasında tekrar tekrar kullanılan yağlarda oksidatif özellikler ve nem içeriği. Nem içeriği, kızartma işleminde oksidasyon ürünlerinin oluşumunda önemli rol oynamıştır. Bu nedenle, kızartma yiyeceklerinde ve kızartma yağlarında nem içeriğinin azaltılması, kızartma yağlarında oksidatif stabilitenin kontrol edilmesi için önemli adımlardır. Bununla birlikte, yiyecek türleri ve kızartma şartlarını içeren kızartma ortamlarındaki fark nedeniyle kızartma işlemi sırasında nem içeriğini kontrol etmenin basit ve uygun yollarını bulmak kolay değildir [17].

Gelişen teknoloji ile beraber spektroskopi yöntemi de yağ kalitesi belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Empedans spektroskopi sensörü Khaled ve Ark. tarafından 2014 yılında literatüre kazanılmıştır [22]. Benzer olarak yapılan bir diğer çalışmada, dielektrik spektroskopi yöntemi gündelik yaşamda tüketilen yağlarda domuz yağı tespiti amacıyla kullanılmıştır [23].

Dielektrik özelliklerin belirlenmesi için merkezinde boşluk bulunan bir mikroşerit hatlardan oluşan bir RF-mikrodalga mikroakışkan sensörü yapısı Suster ve Mohseni tarafından 2013 yılında önerilmiştir. Sadece bir S21 ölçümü gerektiren etanol, etilen glikol ve etil asetat için 14MHz ila 4GHz frekans aralığında sensör dielektrik değerleri dielektrik prob kiti kullanılarak ölçülmüştür [25].

Yağda bulunan aşınmış metal partikülleri tespit etmek için yeni bir mikro akışkan çipin sunuldu bir diğer çalışma ise Wu ve Ark. tarafından yapılmıştır. Önerilen sensör yapısı geleneksel tek bobinli endüktif sensöre kıyasla, çift bobinlerde bulunan karşılıklı endüktans prensibine dayanır. Önerilen endüktif sensör yapısının hassasiyeti 5-10um çapında demir partikülleri tespit edebilme kabiliyetine sahip olarak geliştirilmiştir. Bu basit ve ekonomik cihazın, endüstrideki izleme ve hata tespiti için kullanılması düşünülmektedir [27].

Meyve tespiti ve lokalizasyonu üzerine bir dizi veri analizi çalışması literatüre Gongal ve Ark. tarafından 2015 yılında kazandırılmıştır. Yapılan bu derleme çalışmasında çeşitli sensör sistem tipleri ve görüntü işleme yöntemleri ve bunların meyve tespiti için doğruluğu ayrıntılarıyla tartışılmıştır [28].

2017 yılında yapılan bir çalışma ile süt endüstrisi için bozulan süt numunelerinin insan sağlığı üzerine zararları tartışılmıştır ve bu zararları en aza indirmek için iki farklı dielektrik sensör yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen sensör yapıları süt katkısını hesaplamalı bir algoritma ile belirleyebilmektedir ve ayrıca burada sunulan tekniklerin süt endüstrisinde kullanım için potansiyel bir aday olduğu vurgulanmıştır [29].

Süt üzerine yapılan bir diğer çalışmada inek sütüne yağ katkı maddesi tespiti için dielektrik özellikleri elde edilip bir dizi çalışma yürütülmüştür. Farklı oranlarda katılan yağ miktarı üzerine yapılan bu çalışmada 20MHz'den 4,5GHz'e kadar analiz vektör ağ analizörü kullanılarak yapılmıştır ve ek olarak ısının da dielektrik sabitine etkisi görülmüştür [31].

Guarin ve Ark. tarafından 2015 yılında literatüre kazandırılan makalede sosyal, kültürel ve ekonomik etkenlerin insan sağlığına etkisi tartışılmıştır. Sunulan bu çalışmada mikrodalga bio-sensörlerin insan sağlığına faydalarına değinilmiş ve insan vücuduna entegre edilebilen sensörlerin önemine vurgu yapılmıştır [32].

Günümüzde gıda endüstrisinde kalite kontrol ve proses izleme için kimyasal sensör sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. 2004 yılında yapılan bir çalışma ile kızartma

yağları arasında kullanılabilirlik analizi üzerine kimyasal sensör sistemi kullanılmıştır. Fast-food restoranından elde edilen farklı yağ numuneleri incelenmiştir ve sonuçlar dielektrik sabiti, peroksit değeri ve serbest yağ asidi içeriği gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Kızartma yağlarının farklı nitelikleri, kimyasal sensör sistemi kullanılarak başarılı bir şekilde değerlendirilmiş ve ayırt etme işlemi başarı ile gerçekleştirilmiştir [33].

Kapilevich ve Litvak tarafından yapılan bir çalışma ile ikili sıvı karışımının çevrimiçi ölçümü ve karşılaştırılması için bir mikrodalga sensör yapısı geliştirilmiştir. Önerilen sensörün su-metanol, magnezyum-sülfat ve su-sodyum klorür-glikoz gibi karışımlarla analizine ilişkin sonuçlar elde edilmiş [34].

Literatürdeki bir diğer çalışmada biyodizel bileşimini ölçmek ucuz ve hassas bir sensör sistemi geliştirilmiştir. Burada, dielektrik sabiti kullanılarak, biyodizel/dizel ikili karışımlarındaki biyodizelin belirlenmesi için düşük maliyetli bir sensör önerilmiştir. Ek olarak, farklı oranlardaki her bir karışım için elde edilmiş olan dielektrik sabitinin değerleri kesin olarak ölçülmüştür [35].

Kalogianni ve Ark. 2017 yılında yaptıkları çalışma ile kızartma yağı kalitesini belirleyen ve prensipte farklılık gösteren beş hızlı test yöntemini kullanım kolaylığı, güvenlik ve performans açısından analitik yöntemlere göre incelemiştir. Genel olarak yapılan bu çalışma ile piyasada bulunanlar arasında uygulanabilecek yöntemlerin en güvenli, hızlı ve kolay olanları gösterilmiştir [36].

Otomobil motorlarının ömrünün büyük ölçüde kullanılan yakıtların optimum oranlarına bağlı olduğu bilinen bir gerçektir. Benzindeki kerosen katkı hilesini tespit etmek için, 2,47GHz'de çalışan metamalzeme yapısı bir kesikli halka rezonatörü ile sensör olarak önerilmiştir [44].

Harnsoongnoen ve Wanthong tarafından 2017 yılında yapılan çalışma ile gerçek zamanlı olarak sukroz, surbitol, glikoz-D ve fruktoz-D yoğunluğu elektromanyetik olarak belirlenmiştir. 2GHz ile 3,4GHz frekans aralığında tasarlanan sensör yapısı rezonans kayması temeline göre çalışmaktadır [45].

2018 yılında yapılan bir çalışmada metamalzeme tabanlı iletim hattı sensörü tasarlanmıştır. Bu iletim hattı yapısı sıvı sensörü olarak kullanılmasının yanında özellikle yakıt sensörü olması için tasarlanmıştır ve çalışma frekansı olarak X band bölgesi seçilmiştir. Önerilen

bu iletim hattı sensör yapısı X banda çalışmasının yanında diğer frekans bölgelerine de adapte edilir ve kullanılabilir niteliktedir ve bu sensör yapısında da rezonans kaymaları kullanılmıştır [48].

Bir başka çalışmada gerçek zamanlı sıvı özelliklerini algılamak için 1,4GHz'de çalışan ve yüksek kalite faktörlü ile mikrodalga frekanslarında çalışan yeni bir elektromanyetik sensör sunulmuştur. Sensörün merkez bölgesi, aktif bir geri besleme döngüsü kullanılarak geliştirilmiş düzlemsel bir mikro şerit rezonatörüne sahiptir ve önerilen sensör yapısı, ucuzluk ve yüksek çözünürlüğe sahiptir [52].

Liu ve Ark. yapmış oldukları çalışma ile kızartma yağının kalitesinin izlenmesinin tüketicilerin sağlığı için önemli olduğunu göstermişlerdir ve buna yönelik olarak kızartma yağının bozulmasını hızlı olarak ölçmek için mikro akışkan yapısı geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ışığında, yağda oluşan kararlı durumdaki damlacıkların uzunluğunun, kızartma yağı kalitesi bozulmasının açıkça değerlendirilmesinde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır [53]. Benzer olarak Li ve arkadaşları da kızartma yağı kalitesinin hızlı olarak ölçülmesi için elektronik bir burun; yani bir prob önermişlerdir [54].

Literatürdeki bir diğer çalışmada mikro akışkan sensör yapısı sıklıkla kullanılan sıvıların belirlenmesi için geliştirilmiştir. Mikroşerit boşluk halka rezonatöründen oluşan bu sensör yapısı 3-3,2GHz frekans bölgesinde çalışmaktadır ve çalışma prensibi rezonans kaymalarına dayanmaktadır [55].

Gennarely ve Ark. yapmış oldukları çalışma ile sıvı bileşiklerin konsantrasyon ölçümleri için bir mikrodalga rezonatörün tasarımını, üretimini ve karakterizasyonunu sunmuşlardır. Sensör cihazı, temel olarak TE₁₀₁ 1,91GHz'de çalışan dikdörtgen bir dalga kılavuzu kullanmakta olup yüksek bir Q faktörü elde etmek için sonlu elemanlar kodu ile optimize edilmiştir. Karışım içindeki madde türüne bağlı olarak S₂₁ saçılma parametresinde (iletim katsayısı) rezonans frekansı, bant genişliği ve rezonans frekansındaki genlik değişimi algılamada kullanılmıştır [56].

Gelişen teknoloji ile birlikte akıllı sensör yapıları geliştirilmiştir ve kablosuz olarak birbirine bağlanmıştır. Bu akıllı sensör yapılarına metamateryal entegre edilmesi ile sensörlerin kullanım verimliliği artırılmış ve geniş uygulama alanı bulmuştur, bahsi geçen bu metamateryal sensör yapıları ucuz, hassasiyet ve yüksek verimlilikleri gibi avantajlara sahip olmaktadır [57].

Yapılan bir diğerk çalışmada yeni bir metamalzeme tabanlı mikro-akışkan sensör yapısı önerilmiştir. Önerilen bu sensörün ana kısmı mikro şerit bağlı tamamlayıcı ayrıık halka rezonatörden oluşmaktadır. Bu rezonatörde yakındaki bir dielektrik malzemedeki herhangi bir değişikliği algılamak için çok hassas bir elektrik alan üreten rezonatör kullanılmıştır. Mikro kanal içerisinden akan sıvı numunesinin rezonans frekansını ve rezonatör rezonansının tepe değerini değiştirmesi sensör yapısının temelini oluşturmuştur [58].

Vélez ve Ark. 2017 yılında literature kazandırdıkları çalışma ile sıvıların gerçek zamanlı dielektrik karakterizasyonunu yapabilmek için mikrodalga frekansında çalışan mikro akışkan sensör yapısını geliştirmişlerdir. Önerilen sensör diferansiyel modda çalışmakta olup algılama işlemine frekans bölmeyle yapılmaktadır [59]. Yapılan bir diğerk çalışmada da mikroakışkan kanallar kullanılarak sensör yapısı çift mod için geliştirilmiştir [60].

Sıvı maddelerin dielektriksel karakterizasyonu mikrodalga frekans bölgesinde yapılabilmektedir ve elde edilen dielektrik değerlerine göre farklı amaçlara yönelik iletim hattı yapıları geliştirilebilmektedir [61, 62].

Altıntaş ve Ark. 2018 ve 2019 yılında yapmış oldukları çalışmalar ile katı dielektrik malzemeler ve sıvı kimyasallar üzerine sensör yapıları geliştirmişlerdir. Kesikli mendere hattı yapısının kullanıldığı çalışmada dalga kılavuzu ortamında çalışan dielektrik ve kalınlık sensörü geliştirilmiştir [63]. Yaptıkları bir diğerk çalışmada metamalzeme tabanlı sensör yapısı ile trafo yağı durum tespiti uygulaması gerçekleştirilmiştir [64].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Maxwell Denklemleri

Günümüzden uzun bir süre önce James Clerk Maxwell tarafından bir araya getirilen, geliştirilen ve hala kullanılmakta olan dört ana denklem elektromanyetiğin temelini oluşturmaktadır. Bu dört denklemin açıkladığı en önemli nokta zamanla değişen bir manyetik alanın zamanla değişen bir elektrik alan oluşturmasıdır ve aynı şekilde zamanla değişen bir elektrik alanın da zamanla değişen bir manyetik alan oluşturmasıdır. Maxwell tarafından düzenlenen denklemlerin kısmi diferansiyel formları aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} - \vec{J}_e \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} - \vec{J}_m \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

Denklemlerdeki notasyonlardan E elektrik alan şiddetini, H manyetik alan şiddetini, D elektrik akı yoğunluğunu, B manyetik akı yoğunluğunu, J_e elektrik akım yoğunluğunu, J_m manyetik akım yoğunluğunu ve ρ_e elektrik yük yoğunluğunu belirtmektedir. Elektrik akı vektörünün elektrik alan vektörü ile ve manyetik akı vektörünün manyetik alan vektörü ile olan bağlantısı da aşağıdaki gibidir;

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (3.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (3.6)$$

Verilen denklemlerde ϵ_0 ve μ_0 sırasıyla elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerini göstermektedir. Bununla beraber, P ve M vektörleri sırasıyla elektrik polarizasyon ve mıknatıslanma vektörlerini göstermektedir. Elektromanyetik dalga yayılımları, Maxwell denklemleri kullanılarak elde edilen aşağıdaki dalga denklemi ile ifade edilmektedir. (γ propagasyon sabiti, α zayıflama sabiti ve β ise EM dalganın faz sabiti);

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \quad (3.7)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \gamma^2 \vec{H} = 0 \quad (3.8)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.9)$$

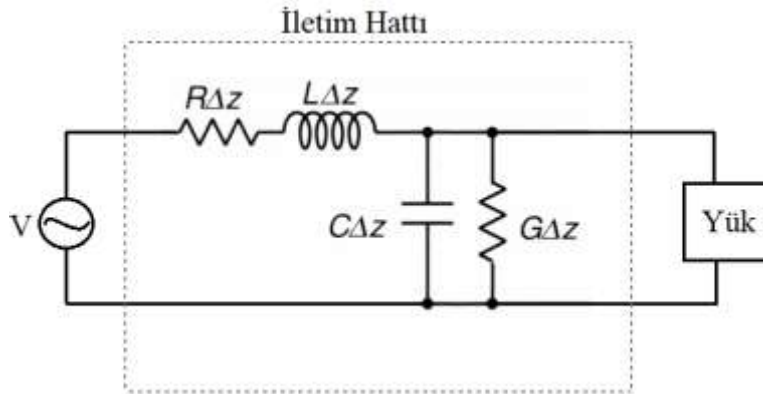
Dalga denkleminin çözümünden;

$$E(z) = E_0^+ e^{-\gamma z} + E_0^- e^{+\gamma z} \quad (3.10)$$

$$H(z) = H_0^+ e^{-\gamma z} + H_0^- e^{+\gamma z} \quad (3.11)$$

elde edilir. Burada + giden dalga genliğini, - ise yansıyan dalga genliğini ifade etmektedir.

İletim hattı yapıları için bir dizi analitik çözümlene sonucunda iki ana denklem çıkarılmıştır ve bu denklemler aşağıda verilmiştir. Mikrodalga iletim hatları devre elemanları cinsinden de ifade edilebilir. Şekil 3.1'de mikrodalga iletim hattının R,L,C elemanlar kullanılarak elde edilen eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 3.1. Mikrodalga iletim hattı eşdeğer devresi

3.2. Elektromanyetikte Sonlu İntegrasyon Tekniği

Gelişen teknoloji ve bilimsel yöntemlerle beraber elektromanyetik problemlerin çözümü için birçok farklı sayısal analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bahsi geçen yöntemlerden başlıcaları zaman bölgesinde sonlu farklar metodu (FDTD), sonlu elemanlar metodu (FEM) ve sonlu integrasyon yöntemidir (FIT). Sonlu integrasyon metodu (FIT) elektromanyetik çözümlene için frekans domeini ve uzay koordinatlarından yararlanmaktadır. Uzun bir süre sonucunda literatüre kazandırılan FIT metodu, enerjinin korunumuna dayanmaktadır ve integral formdaki Maxwell denklemlerini lineer denklemlere dönüştürerek çözümlene yapmaktadır [66, 67]. İhtiyaç dahilinde istenen her

frekans bölgesine uygulanabilen bu yöntemin en büyük artıları farklı ortamlar arası yüzeylerde ve karmaşık ortamlarda diğer metodlara göre çok daha iyi çözümlere yapıp sonuç elde etmesidir. Tasarlanan yapıyı birim hücrelere ayıran bu methodda birim ızgara hücresi etrafı boyunca oluşan gerilimler ve hücreden geçen akılar Maxwell denklemlerini kullanılarak çözümlere yapılmaktadır. Aşağıdaki denklemler Gauss, Faraday ve Amper yasalarının integral formunu göstermektedir.

$$\oint_{\partial V} D \cdot dA = \iiint_V \rho \cdot dV \quad (3.12)$$

$$\oint_{\partial V} B \cdot dA = 0 \quad (3.13)$$

$$\oint_{\partial A} E \cdot dl = \frac{\partial}{\partial t} \iint_A B \cdot dA \quad (3.14)$$

$$\oint_{\partial A} H \cdot dl = \iint_A \left(\frac{\partial}{\partial t} D + J \right) \cdot dA \quad (3.15)$$

Bu tez çalışmasında sonlu integrasyon tekniği tabanlı mikrodalga simülasyon programı kullanılmıştır ve tasarlanan her bir sensör yapısı çözümlere aşamasında ızgaralara ayrıştırılıp belirtilen Maxwell denklemleri yaklaşımlarıyla sonuçlar elde edilmiştir.

3.3. Dielektrik Sabiti ve Kayıp Tanjant Değeri

Bu tez çalışmasında ilk olarak yapılan işlem mikrodalga frekanslarında bir malzemenin dielektrik karakterizasyonunu yapmaktır. Vakum ortamını düşünecek olarsak bu ortamda denklem 3.16 ve 3.17'de verilen eşitlikler geçerli olmaktadır. Bu eşitliklerde ϵ_0 ve μ_0 boşluğun yani vakum ortamının dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değeridir.

$$D = \epsilon_0 E \quad (3.16)$$

$$B = \mu_0 H \quad (3.17)$$

Bununla beraber homojen bir malzeme ortamını ele alındığında yukarıdaki eşitlikler yeniden düzenlemelidir. Eşitlik 3.18 ve 3.19'a göre ortamın dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliği reel ve sanal kısımdan oluşmaktadır. Dielektrik kayıp tanjant değeri eşitlik 3.20'de verilen formülle hesaplanmaktadır.

$$D = \epsilon E = (\epsilon' - j\epsilon'')E \quad (3.18)$$

$$B = \mu H = (\mu' - j\mu'')H \quad (3.19)$$

$$\tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (3.20)$$

Bu tez çalışmasında kızartma yağının dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları ölçülmüştür ve kayıp tanjant değeri eşitlik 3.20'deki formülle hesaplanmıştır.

3.4. Sınır Koşulları ve Port Bağlantıları

Bu tez çalışmasında sınır koşulları olarak açık (open boundaries) sınır koşulları x, y ve z koordinatlarında seçilmiştir. Açık (open) sınır koşullarının seçilmesinin sebebi tasarlanan mikrodalga iletim hattı sensör yapılarının gerçek ortam altında çözümlenmesini sağlamaktır. Simülasyon ortamında sınır koşullarının yanında iletim hattının iki ucuna ayırık (discrete) portlar eklenmiştir ve böylece sensör hattı boyunca iki porttan elektromanyetik dalga akışı sağlanacaktır.

3.5. Materyal ve Üretim Cihazı

Bu tez çalışmasında yapılan analizlere ve tasarlanan yapılara ait çalışmalar aşağıda liste halinde verilmiştir.

- Kızartma yağı numunelerinin hazırlanması
- Kızartma yağı numunelerinin dielektriksel karakterizasyonunun yapılması
- İletim hattı sensörü 1 yapısının tasarımı ve sayısal analizi
- İletim hattı sensörü 2 yapısının tasarımı ve sayısal analizi
- İletim hattı sensörü 1 yapısının üretimi ve deneysel analizi
- İletim hattı sensörü 2 yapısının üretimi ve deneysel analizi

Bu tez çalışması boyunca sayısal veriler sonlu integrasyon tekniği tabanlı mikrodalga simülasyon programında tasarlanan yapılar ile analiz edilmiştir ve sonuçların verimliliği tartışılmıştır. Sensör tasarımından önce kızartma yağı numuneleri patatesli ve patatesiz olarak ayrı ayrı 16 numune olarak elde edilmiştir. Elde edilen yağ numuneleri dielektrik probe ile karakterize edilip simülasyon programına aktarılmıştır. Üretim kısmında ise tasarlanan iki farklı mikrodalga iletim hattı sensör yapısı CNC tabanlı LPKF-E33 baskı devre cihazı ile üretilmiştir. Tüm yapıların tasarım ve üretim aşamasında FR-4 dielektrik malzeme üzerine bakır plaka kazınması yapılarak iletim hattı rezonatörü oluşturulmuştur.

3.6. Ölçüm Metodları

Bu tez çalışmasındaki deneysel veriler Agilent Technologies PNA-L ve Rohde-Schwartz ZVL vektör ağ analizörleri ile elde edilmiştir. Vektör ağ analizörü hata oranını en aza indirmek için ilk olarak kalibrasyon ediliyor sonrasında ölçüm için kullanılmıştır. Üretilen bir iletim hattı sensörü ve vektör ağ analizörü Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Vektör ağ analizörü iki porttan oluşmasının yanında saçılma parametrelerini yani geri yansıma (S11) ve iletim (S21) değerlerini hesaplamaktadır. LPKF-E33 baskı devre üretim cihazına ait örnek bir üretim düzeneği de Şekil 3.3’te görülmektedir.



Şekil 3.2. Vektör ağ analizörü ve üretilen bir iletim hattı yapısı



Şekil 3.3. LPKF-E33 protomat ile örnek bir üretim düzeneği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Kızartma Yağı Numunelerinin Hazırlanması

Bu tez çalışmasının ilk adımı olarak kızartmalarda kullanılan ayçiçeği yağı numuneleri hazırlanmıştır. İlk olarak, ısının ayçiçeği yağının dielektrik sabiti üzerine etkilerini görmek amacıyla ayçiçeği yağları herhangi bir numune olmaksızın 16 kez ısıtıl işleme maruz bırakılmıştır. Bu işlem 10 dakika kızartma ve 30 dakika soğutmadan olmaktadır ve her ısıl işlem sonrasında ayçiçeği yağı numuneleri alınmıştır. Benzer olarak, patates numunelerinin kızartma yağının dielektrik sabiti üzerindeki etkileri görmek amacıyla ayçiçeği yağı 16 kez patates kızartma işleminde kullanılmıştır ve her kızartma işleminden sonra yağ numuneleri alınmıştır. Her bir kızartma işleminden sonra alınan ayçiçeği yağı numuneleri Şekil 4.1’de mikrodalga laboratuvar ortamında görülmektedir.



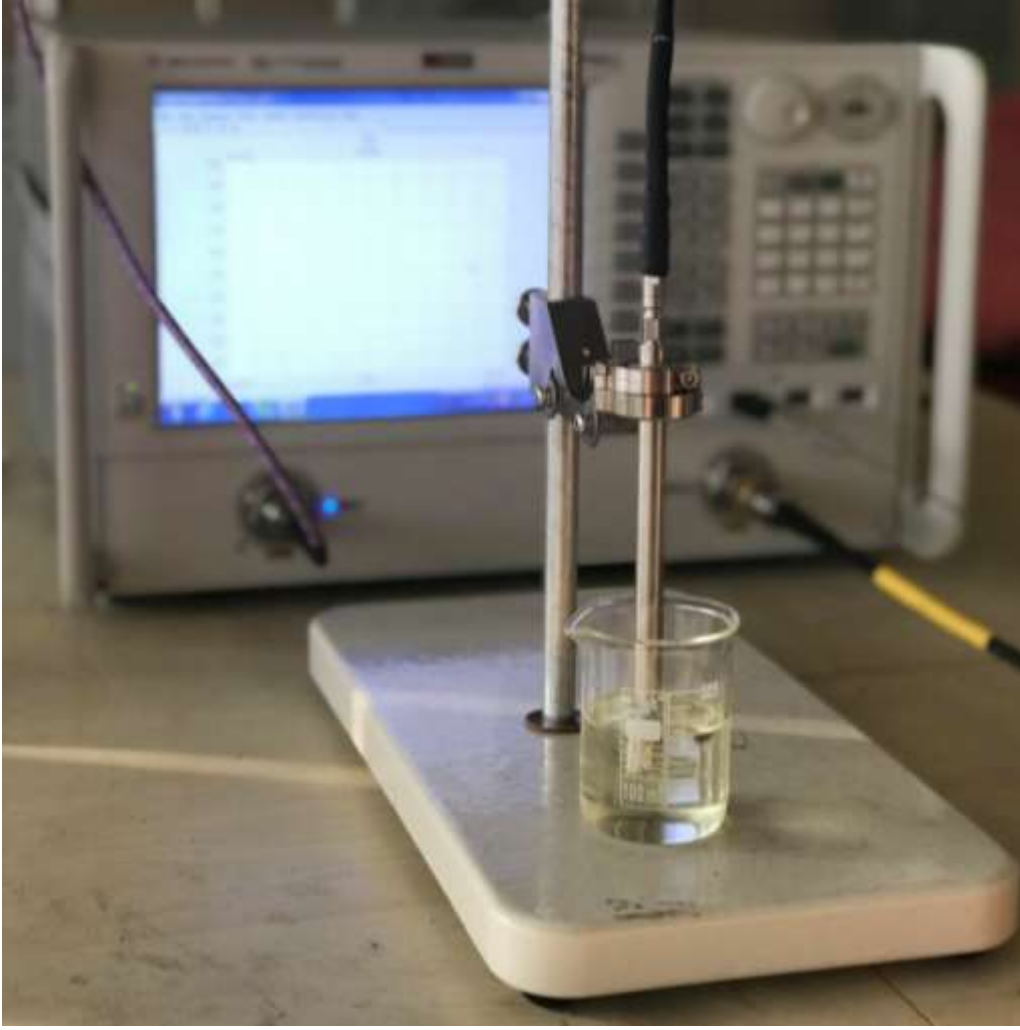
Şekil 4.1. Ayçiçeği yağı numuneleri

4.2. Kızartma Yağının Dielektriksel Karakterizasyonu

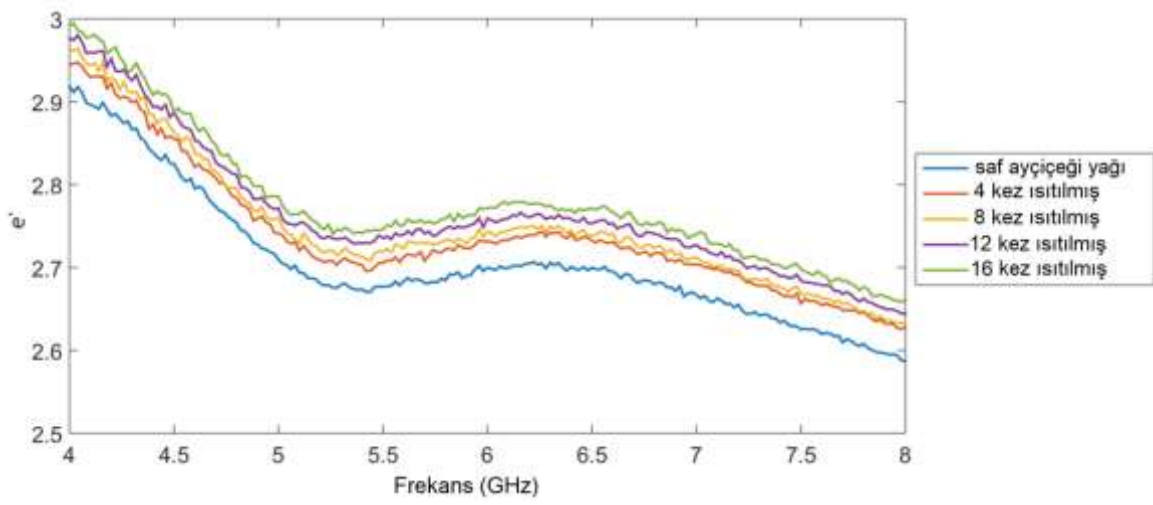
Tez çalışmasının bu aşamasında patates kızartmasında sıklıkla kullanılan ayçiçeği yağı elektromanyetik olarak analiz edilmiş ve karakterize edilmiştir. Elektromanyetik ölçümden önce kullanılmamış ve kullanılmış ayçiçeği yağı numuneleri bir önceki bölümde bahsedildiği gibi hazırlanmıştır.

Bu bölümde iki aşama mevcuttur; bunlardan ilki hiçbir katkı malzemesi olmayan kızartma yağı, diğeri patates örnekleriyle kullanılan kızartma yağıdır ve bu çalışmanın her bir adımında yağ numunesi 10 dakika kızartılmış ve 30 dakika soğutulmuştur, bu işlem basamakları patatesiz ve patatesli ayçiçeği yağları için 16 kez gerçekleştirilmiştir. Patates numunesi olan ve olmayan kullanılmış ayçiçeği yağlarının dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları mikrodalga laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.2’de görülen vektör ağ analizörü ve bu analizöre bağlı bir dielektrik prob kiti kullanılarak her bir numunenin dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları doğrudan ölçülmüştür.

Bu dielektrik ölçümlerinden önce ölçüm hatalarını en aza indirmek için dielektrik prob kiti ile vektör ağ analizörü kalibre edilmiştir. Dielektrik ölçüm sonucu olarak, patatesli ve patatesiz kızartılmış ayçiçeği yağı için toplamda 34 ölçüm yapılmıştır (her bir deney için 16 kez kızartılmış yağ ve 1 saf yağ). İlk önce, patates numunesi olmadan kızartılmış (ısıtılmış) ayçiçeği yağı ölçülmüştür; ölçülen dielektrik sabitinin reel kısmı Şekil 4.3’te verilmiştir. Şekilde verildiği gibi, ısı 4GHz’de 2,93 ila 3 arasında dielektrik sabitinin küçük bir artışına neden olmaktadır ve bu 0,07’lik artış 4-8GHz arasında süreklidir. Yağ içeriğinin ısı nedeniyle bozulması ve kimyasal reaksiyonların, dielektrik sabit değerlerinde bu küçük artışa neden olduğu düşünülmektedir. Isı etkisiyle oluşan kimyasal reaksiyonlar bir başka tartışma konusudur ve bu tez çalışmasının kapsamı dışındadır.



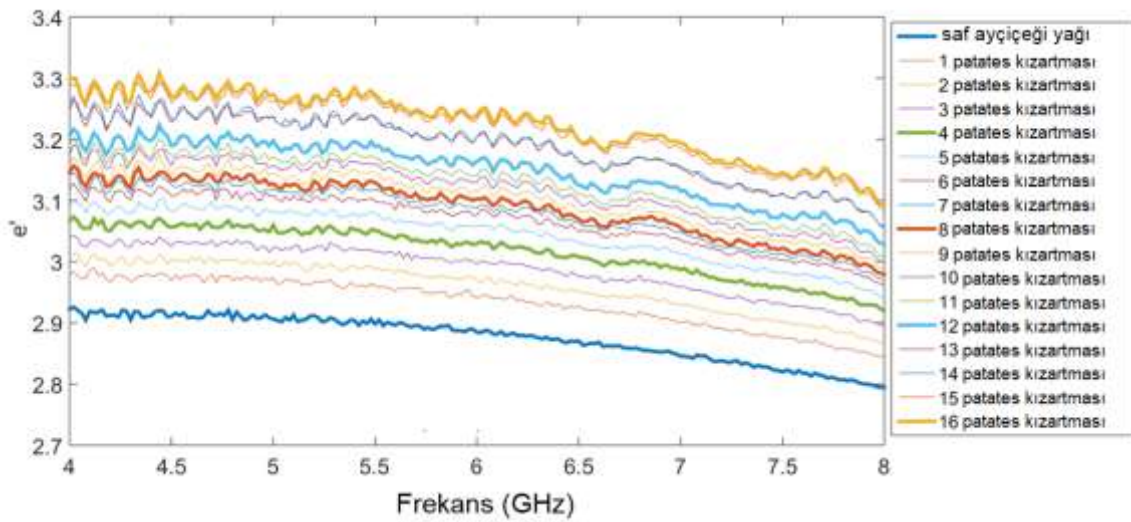
Şekil 4.2. Kızartma yağı numunelerinin dielektrik sabiti ölçümü



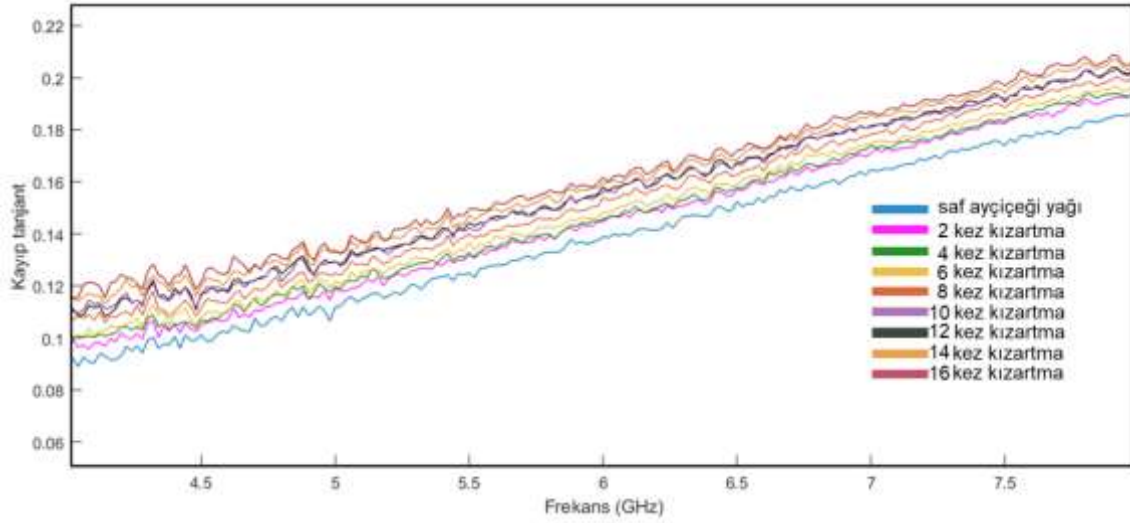
Şekil 4.3. Isıtma sayısına bağlı olarak dielektrik sabitinin reel kısmındaki değişim [65]

Patates örnekleriyle kullanılan ayçiçeği yağının dielektrik özelliklerini görmek için yağ numuneleri deneysel olarak vektör ağ analizörü ve dielektrik prob ile analiz edilmiştir. Ölçülen dielektrik sabitleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Görüldüğü gibi saf ayçiçeği yağı 4GHz ve 8GHz arasında yaklaşık 2,9 dielektrik sabitine sahiptir. Bununla birlikte, patates numuneleriyle 16 kez kızartılmış ayçiçeği yağlarının dielektrik sabitinin 2,98'den 3,3'e kadar değişim gösterdiği görülmektedir. Bu değişim 16 kez kızartılmış patates numuneleri için geçerlidir ve kızartma sayısı artırılırsa dielektrik değerindeki bu değişimin devam edeceği öngörülebilir. Gözlemlenen bu değişim dielektrik sabitlerinde 16 kez kızartılmış yağlar için yaklaşık 0,40'tır ve bu değişiklik şekilde gösterildiği gibi neredeyse doğrusal niteliktedir.

Bu artış; proteinler, su içeriği, nişasta ve karbonhidrat gibi patates bileşenlerinden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca, ıstma sayısının dielektrik sabitini doğrusal olarak etkilediği bir önceki grafikte, Şekil 4.3'de görülmüştür. Ek olarak, patates ile kızartılmış ayçiçeği yağının kayıp tanjant değerleri dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısmına oranı alınarak elde edilmiştir ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'e göre, tanjant değerleri 0,09 ile 0,12 arasındadır.



Şekil 4.4. Kızartma yağının patates ile kızartılmasının dielektrik katsayısı üzerine etkisi [65]



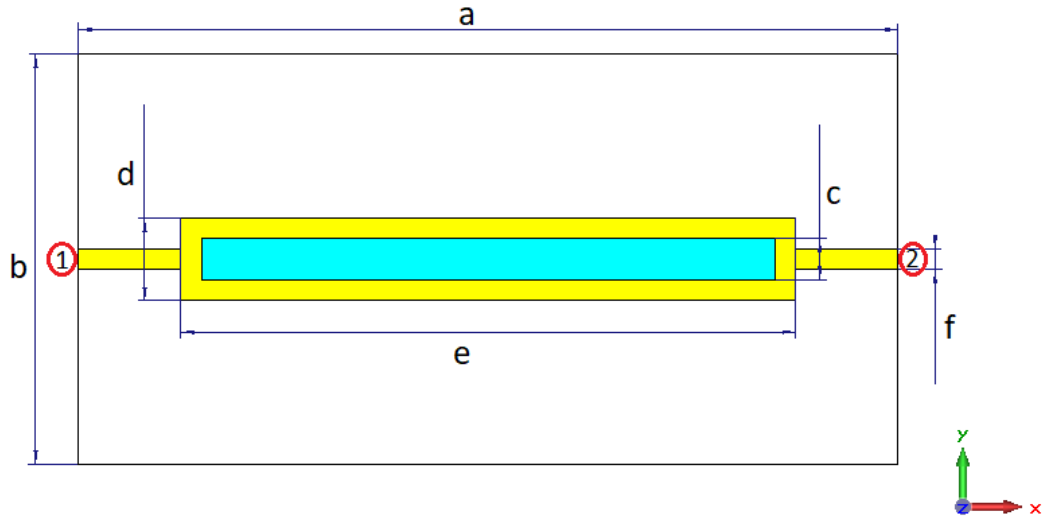
Şekil 4.5. Yağın patates ile kızartılmasının kayıp tanjant değeri üzerine etkisi [65]

4.3. İletim Hattı Sensör Tasarımları ve Simülasyon Çalışmaları

PNA-L N5234A Network Analizör ve ona bağlı probe kit aracılığı ile ölçülen dielektrik sabiti sonlu toplamlar metodu tabanlı mikrodalga simülatörüne aktarılmış ve ölçülen dielektrik sabitlerine göre iki farklı sensör yapısı dizayn edilmiştir. Her sensör yapısı iletim hattı tabanlıdır, bakır rezonatör hatlarından oluşmaktadır ve ayrıca her bir sensör yapısında sensör katmanı boşluk tabakası vardır.

4.3.1. İletim Hattı Sensörü 1

Şekil 4.6’da gösterildiği gibi tasarlanan birinci iletim hattı sensörü iki ayrıık porta sahiptir. İletim hattında rezonatör olarak bakır ($5,8 \times 10^7$ iletkenlik ve 0,035mm kalınlık) ve ara katman olarak FR-4 dielektrik (4,3 dielektrik sabiti, 0,025 kayıp tanjantı ve 1.6mm kalınlık) kullanılmıştır. Birinci iletim hattı sensör yapısının boyut parametreleri listesi Çizelge 4.1’de verilmiştir, bu parametreler mikrodalga simülatöründe parametrik çalışma ile elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, sensörün orta kısmında bir algılayıcı katman bulunmaktadır ve yağ örnekleri bu sensör katmanına yerleştirilip yağ dielektrik özelliklerine göre simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

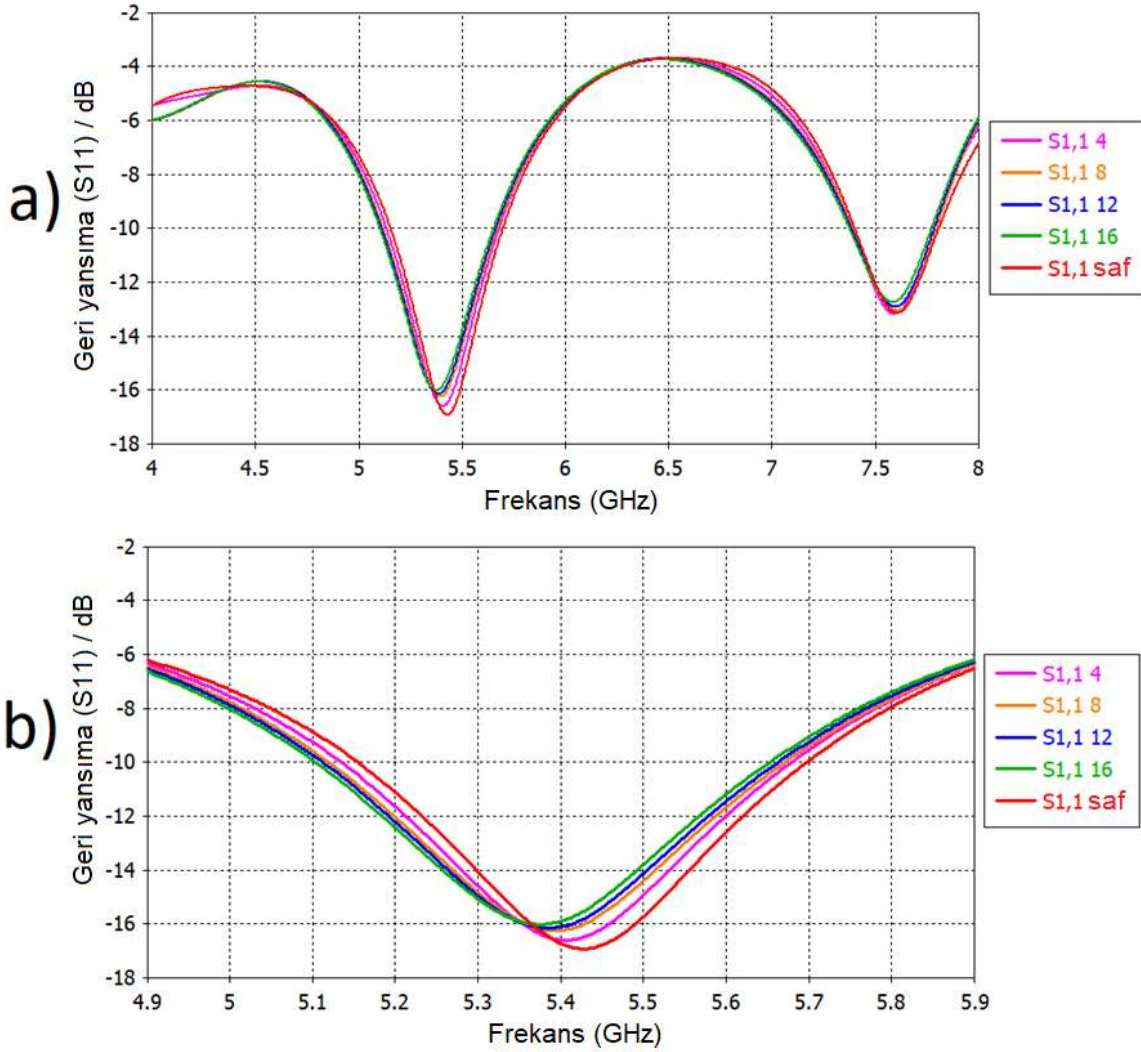


Şekil 4.6. İletim hattı sensörü 1

Çizelge 4.1. İletim hattı 1 sensörü parametreleri

Parametre	a	b	c	d	e	f
Değeri(mm)	40	20	2	4	30	1

Tasarlanmış iletim hattı sensörünün ayçiçeği yağının parametrelerini belirlemek üzere iki yönden avantajı vardır; bunlardan ilki, S11 geri dönüş kaybı üzerinde rezonans kaymaları, diğeri S21 iletim değerlerindeki rezonans kaymalarıdır. Birinci sensör yapısının yansımaya yani S11 karakteristiği Şekil 4.7.a'da 4-8GHz frekans aralığında gösterilmektedir. Rezonans değişimleri yaklaşık 5,4GHz'de meydana gelmektedir, saf ayçiçeği yağı geri dönüş kaybı rezonansı -5,45GHz'de -17dB'dir ve 16 kez patatesle kızartılmış ayçiçek yağı 5,37GHz'de -16dB'lik geri dönüş rezonansına sahiptir. Rezonans frekansında yaklaşık olarak 80MHz'lik bir frekans kayması tespit edilmiştir ve bu kayma Şekil 7.b'de görüldüğü gibi yaklaşık olarak lineerdir. Rezonans frekansında gözlenen bu frekans kaymasının sebebi, yağın dielektrik sabitindeki değişim olarak algılanmıştır.

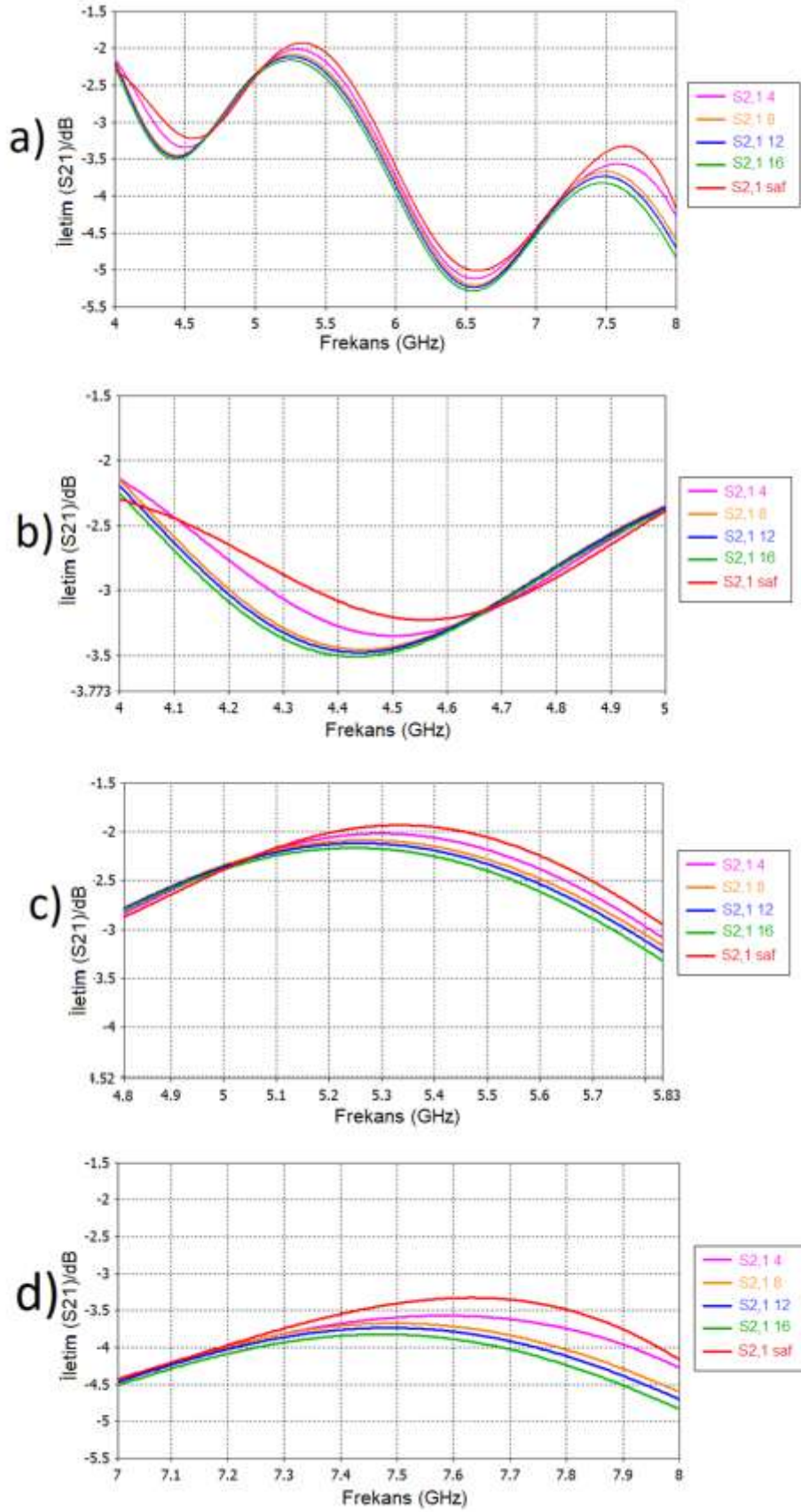


Şekil 4.7. Birinci iletim hattı sensör yapısının geri yansımaya (S_{11}) karakteristiği

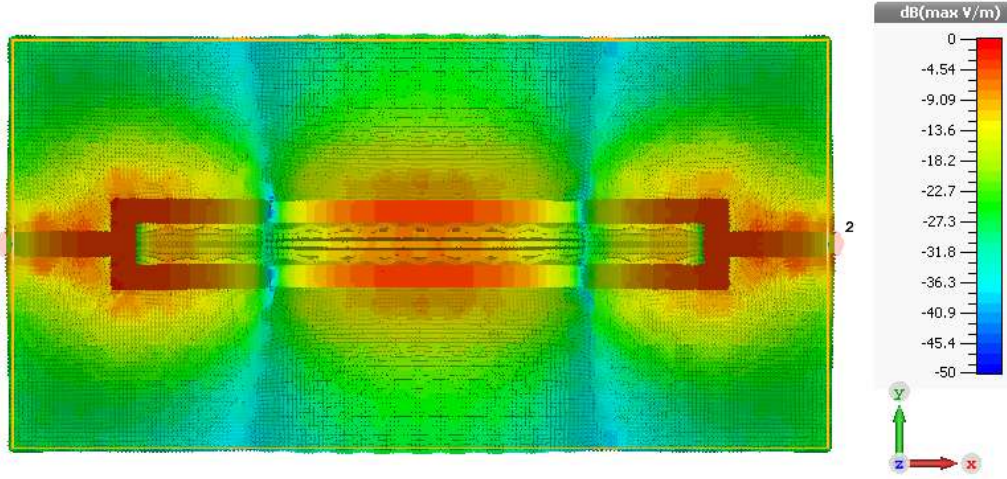
Ayrıca, tasarlanan birinci sensör yapısı, iletim yani S_{21} özelliklerinde de rezonans kaymalarına sahiptir, patates numuneleri ile kızarmış ayçiçeği yağı ile elde edilen iletim özellikleri Şekil 4.8.a'da 4-8GHz band aralığında gösterilmiştir. Bu frekans bandında, 4,4GHz, 5,4GHz ve 7,6GHz de oluşan üç rezonans noktasında yaklaşık olarak lineer bir kayma gözlenmiştir. Rezonans frekanslarındaki bu kayma, 1-16 defa kızartılan patateslerin etkisiyle dielektrik sabitinde meydana gelen değişikliklerdir. Elde edilen her üç rezonans kaymasını daha ayrıntılı incelemek için Şekil 4.8'deki b,c,d grafikleri verilmiştir. Şekil 4.8.b'deki iletim sonuçlarına göre, saf ayçiçeği yağı 4,58GHz'de -3,3dB'lik bir rezonansa sahiptir. Ayrıca, patates ile 16 kez kızartılmış ayçiçeği yağı 4,43GHz'de rezonansa sahip olmasının yanında saf yağ ile 16 kez kullanılmış ayçiçeği yağının rezonans frekansları arasında yaklaşık 150MHz doğrusal kaymalar oluşmuştur. Saf ayçiçeği yağı 5,35GHz'de en yüksek rezonansa yani iletme sahiptir, ancak patates ile 16 kez kızartılmış ayçiçeği

yağı 5,25GHz'de en yüksek rezonansa sahiptir, Şekil 4.8.c'de gösterildiği gibi gözlemlenen yaklaşık 100MHz doğrusal kaymalara sahiptir. Son olarak, saf ayııeği yağı için 7,65GHz'de başka bir rezonans daha oluşmuştur, ancak patates ile 16 kez kızartılmış ayııeği yağı için bu rezonans 7,45GHz'e kaymıştır ve yaklaşık 200MHz lik bu kayma Şekil 4.8.d'de görülmektedir. Böylece, ilk sensör yapısının yansıma ve iletim sonuçlarına göre, tasarlanmış yapı patates kızartmasında ayııeek yağının parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir nitelikte olduğu anlaşılmıştır.

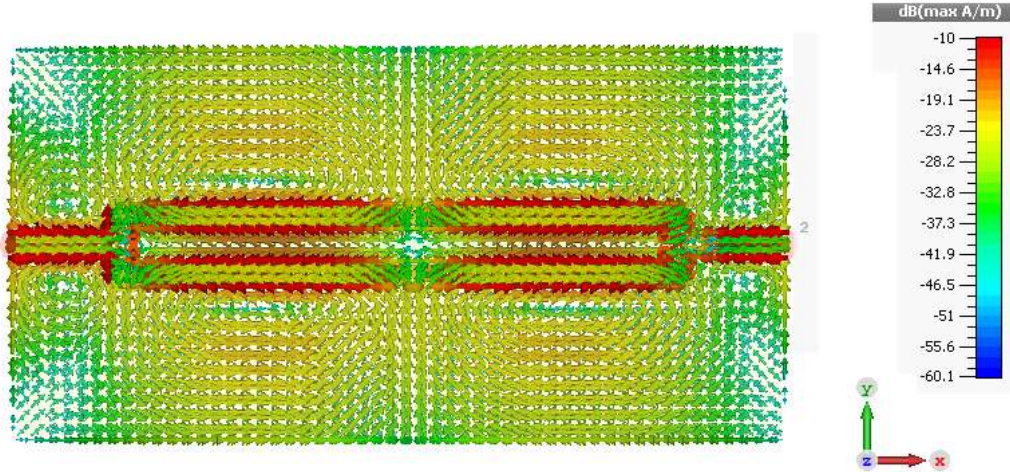




Şekil 4.8. Birinci iletim hattının kızarmış patates numuneleriyle iletim özellikleri a) 4-8GHz aralığı, b) 4,5GHz'de, c) 5,3GHz' d) 7,5GHz'de



Şekil 4.9. Birinci sensör yapısının elektrik alan dağılımı, 5,45GHz

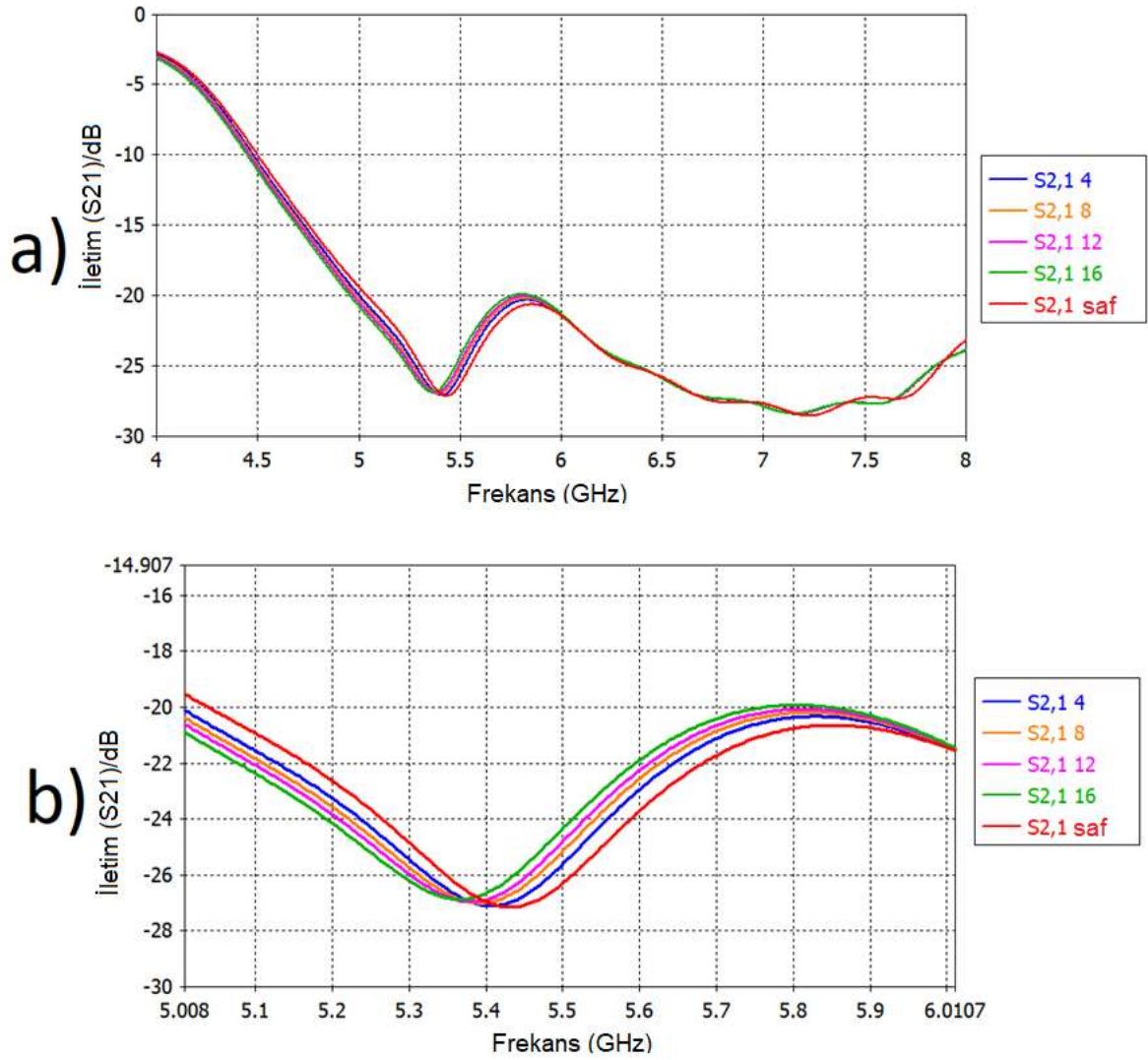


Şekil 4.10. Birinci sensör yapısının yüzey akım dağılımı, 5,45GHz

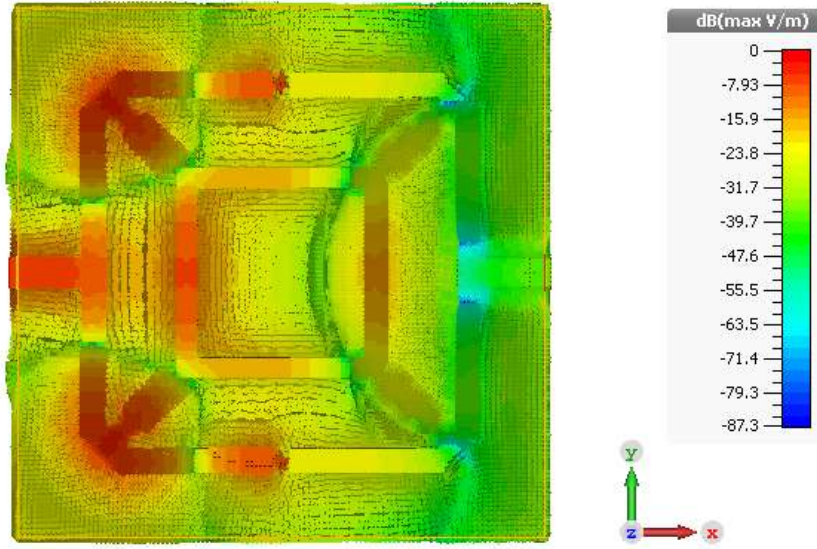
Ayrıca, birinci sensör yapısının elektrik alan ve yüzey akım dağılımları da simüle edilmiş ve çıkarılmıştır, elde edilen elektrik alan ve yüzey akım dağılımları, sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Elektrik alan ve yüzey akımları rezonans frekansı olan 5,45GHz frekansında çıkarılmıştır ve Şekil 4.9'da görüldüğü gibi elektrik alan rezonatör üzerinde dalga boyunun katları olacak şekilde bir maksimum-minimum yayılım şekline sahiptir. Ek olarak, Şekil 4.10'da görüldüğü yüzey akımları rezonatör hattı boyunca rezonatör kenarlarında yoğunlaşmıştır, bunun sebebi yayılan dalganın yüksek frekanslı bir elektromanyetik dalga sinyali olduğudur. Benzer şekilde dalga boyunun katı olarak bir maksimum-minimum akım gözlenmektedir.

Çizelge 4.2. İletim hattı sensörü 2 parametreleri

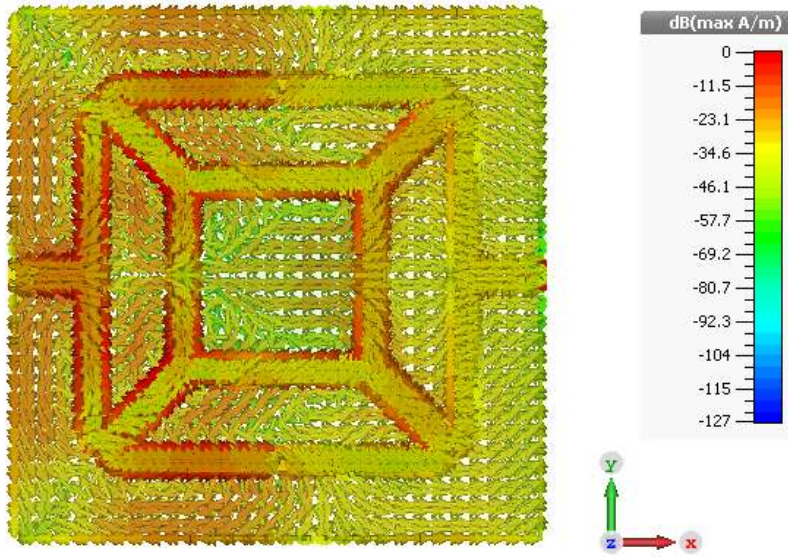
Parametre	a	b	c	d	e	f	g
Değeri(mm)	40	40	11.33	1.2	1.5	2	12.96



Şekil 4.12. İkinci iletim hattının kızarmış patates numuneleriyle iletim özellikleri a) 4-8GHz bandı, b) 5-6GHz bandı aralığı



Şekil 4.13. İkinci sensör yapısının elektrik alan dağılımı, 5,45GHz



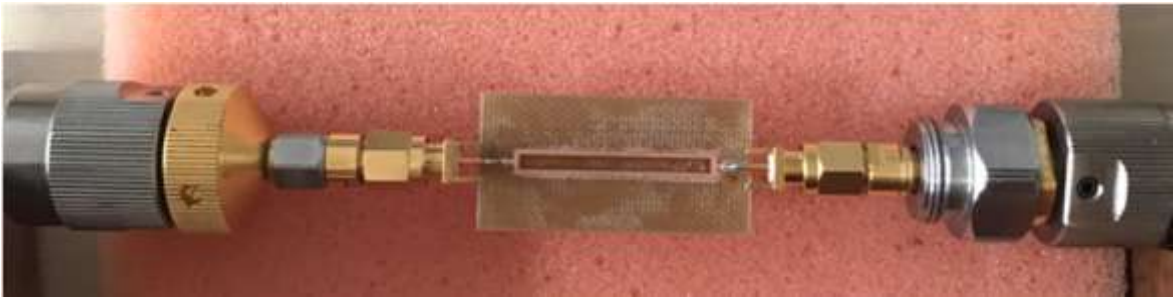
Şekil 4.14. İkinci sensör yapısının yüzey akım dağılımı, 5,45GHz

Ek olarak, ikinci sensör yapısının elektrik alan ve yüzey akım dağılımları simüle edilmiş ve Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir. Elektrik alan ve yüzey akımları rezonans frekansı olan 5,45GHz frekansında çıkarılmıştır ve Şekil 4.13'te görüldüğü gibi birinci porttan çıkan sinyaller rezonatörün ikinci portuna doğru akmaktadır. Bununla beraber Şekil 4.14'te görüldüğü yüzey akımları rezonatör hattı boyunca rezonatör kenarlarında yoğunlaşmıştır, bu yoğunlaşma yayıcı port tarafından alıcı olan ikinci porta akmaktadır.

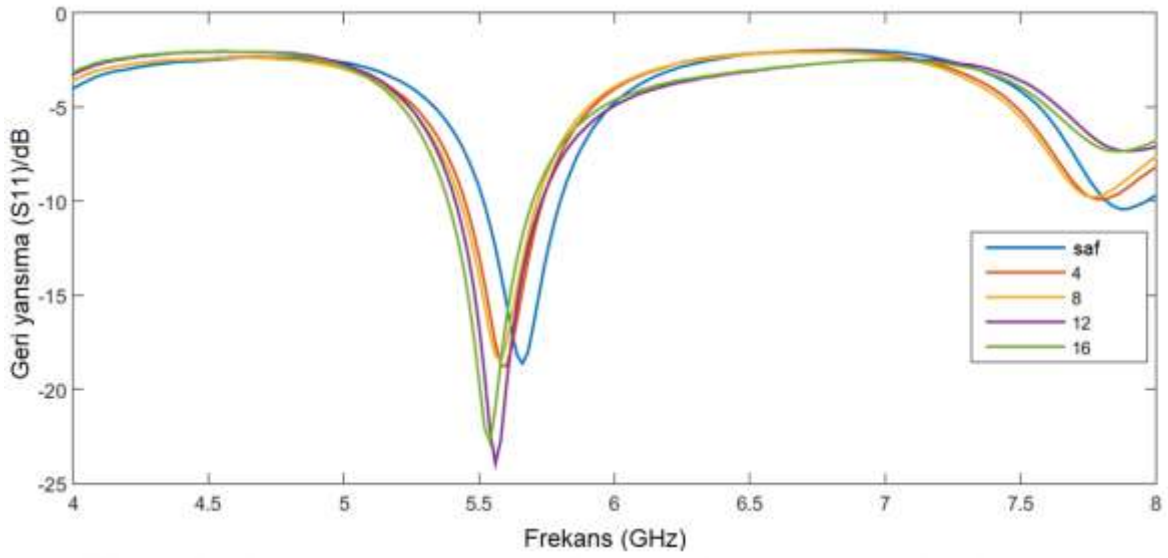
4.4. Üretim ve Deneysel Çalışmalar

Tasarlanan iki farklı iletim hattı sensör yapıları simülasyon sonuçlarını doğrulamak için deneysel olarak incelenmiştir. Öncelikle tasarlanan sensör yapılar LPKF-E33 baskı devre yazıcısı kullanılarak üretilmiş ve mikrodalga laboratuvarında vektör ağ analizörü ile deneysel ölçümler yapılmıştır.

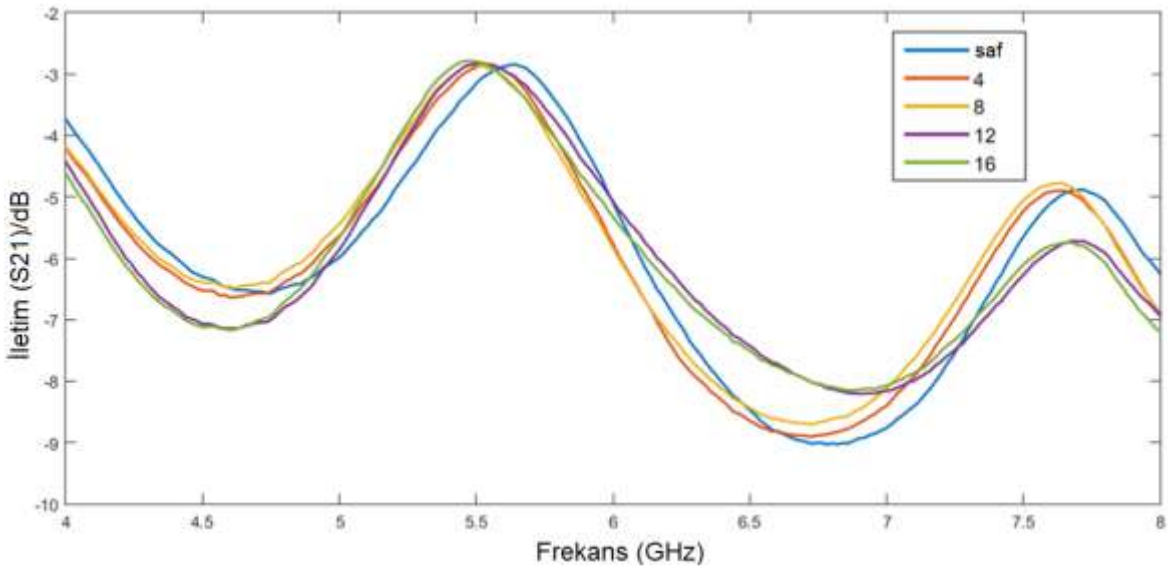
Üretilen birinci sensör yapısı, Şekil 4.15'te gösterilmektedir ve vektör ağ analizörüne her uçtaki portlarla bağlanmıştır. Vektör ağ analizörü ile ölçülen geri dönüş kaybı-yansıma-S11 ve birinci sensör'ün iletim-S21 karakteristikleri sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir. S11 rezonans değişimleri simülasyonda yaklaşık 5,45 GHz'de meydana gelmişti, ancak Şekil 4.16'da görüldüğü gibi deneysel ölçümde yaklaşık 5,60 GHz'de rezonans gözlemlenmiştir. Saf ayçiçeği yağı 5,70GHz'de -18dB geri dönüş kaybı yani S11 değerine sahip iken, patates ile 16 kez kızartılmış ayçiçek yağının 5,53GHz'de -23dB'ye sahip olduğu görülmektedir, bu deneysel çalışmada yaklaşık olarak 170MHz doğrusal rezonans kayması gözlemlenmiştir. Yansıma değerinin yanında, birinci sensör yapısının iletim yani S21 özellikleri de Şekil 4.17'de verilmiştir ve rezonans kaymaları açıkça görülebilmektedir. Saf ayçiçeği yağı 5,65GHz'de maksimum iletim rezonansına sahip iken patates ile 16 kez kızartılmış ayçiçeği yağı 5,40GHz'de maksimum iletim değerine sahiptir. Kullanım sayısı arttıkça rezonans frekansında meydana gelen aşağı yöndeki kayma, dielektrik sabitinin arttığını göstermektedir. Rezonans frekansında meydana gelen kayma kullanım sayısına bağlı olarak doğrusaldır ve hem simülasyon, hem de dielektrik probe kit ile yapılan ölçümler ile uyum içerisindedir. Bu sonuçlar simülasyondaki sonuçlarla uyum içinde olmasından dolayı tasarlanan birinci iletim hattı sensörü kızartma uygulamalarında kullanılabilir niteliktedir.



Şekil 4.15. Üretilen birinci iletim hattı sensör yapısı



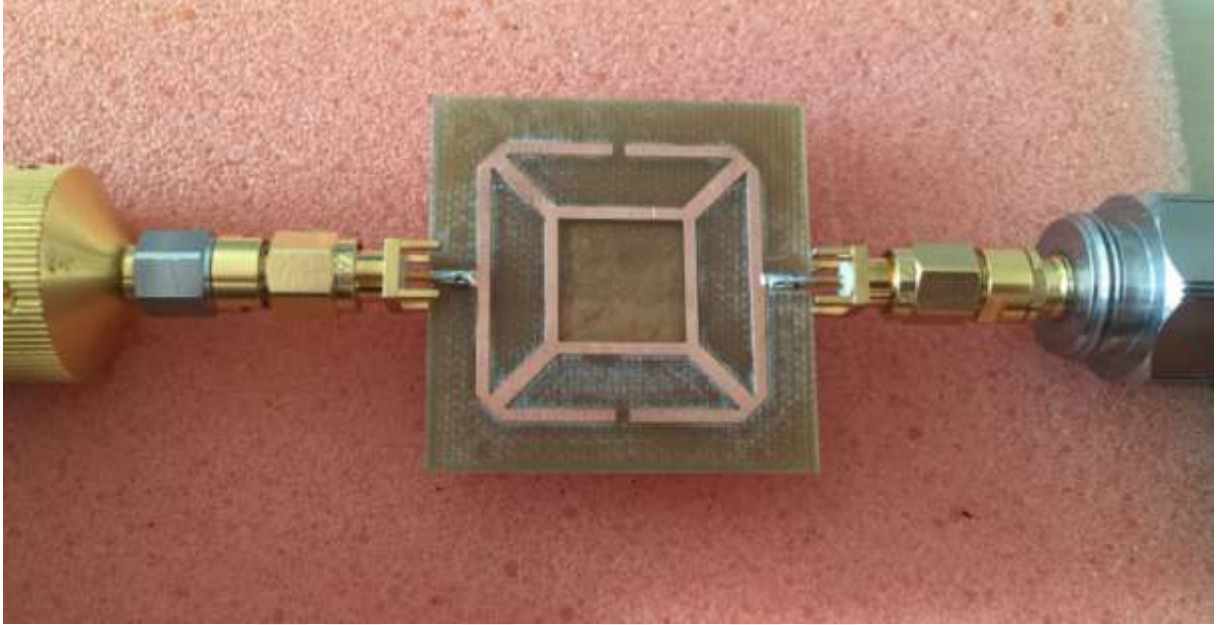
Şekil 4.16. Birinci iletim hattının deneysel geri yansımaları S11 değerleri, 16 kez kullanılan ayçiçeği yağı ile



Şekil 4.17. Birinci iletim hattının deneysel iletim S21 değerleri, 16 kez kullanılan ayçiçeği yağı ile

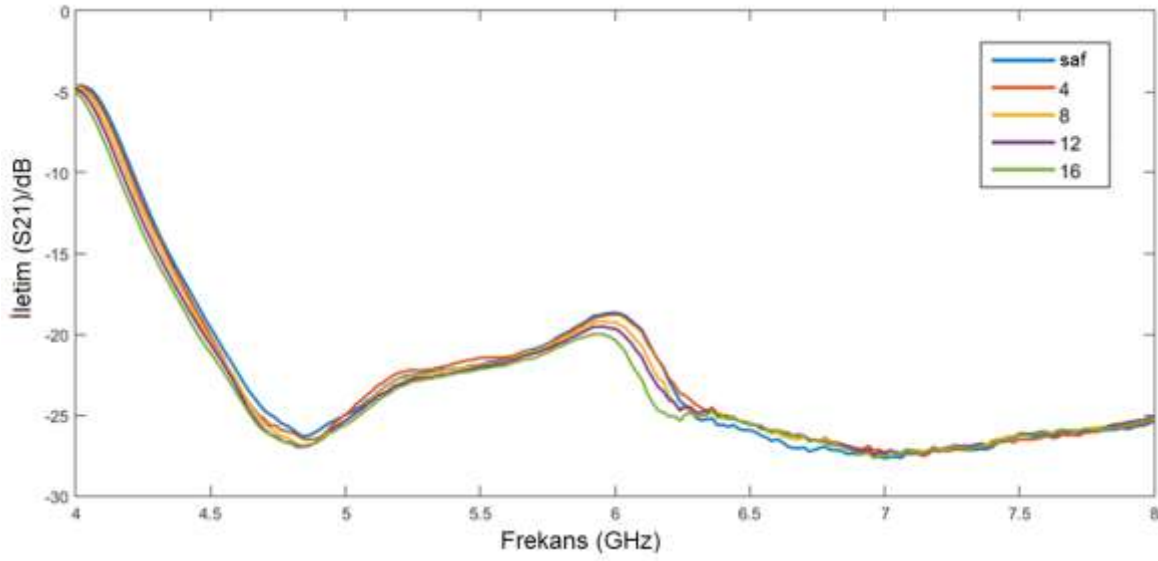
Ek olarak, ikinci bir iletim hattı sensörü de ilk iletim hattı sensöründe olduğu gibi üretilerek, ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen ikinci sensör yapısı, vektör ağ analiz cihazına bağlı iki port ile Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Saf ve kızartılmış ayçiçeği yağı numuneleri algılama katmanına enjekte edilip ağ analizörü ile çeşitli ölçümler yapılmıştır. Ölçülen iletim yani S21 karakteristiği Şekil 4.19'da verilmiştir. Bu sonuçlar, simülasyon ile elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir. İletim özelliklerinde gösterildiği gibi, rezonans değişimleri 4GHz ve 5GHz rejimleri arasında net bir şekilde görülmektedir. 16 kez patates kızarmış ayçiçeği yağı ile saf yağ arasında yaklaşık 100MHz rezonans farkı

bulunmaktadır. Ayrıca, 6GHz bandında yaklaşık 80MHz olan başka bir rezonans kayması oluşmuştur.



Şekil 4.18. Üretilen ikinci iletim hattı sensör yapısı

Simülasyon ve deneysel sonuçlara göre, kızartma yağı parametrelerinin belirlenmesi amaçlanan uygulamalarda, bu tez çalışmasında tasarlanan iki farklı iletim hattı sensörü kullanılabilir niteliktedir. Her bir sensör yapısının rezonansı saf ve 16 kez patates numunesi ile kızarmış ayçiçek yağı örnekleri için yaklaşık olarak 100MHz civarında kaymaktadır. Bu rezonans kaymaları yaklaşık olarak doğrusaldır ve bunlar kızartma yağının dielektrik sabiti değerlerindeki doğrusal değişimden kaynaklanmaktadır. Ayçiçek yağının patates ile kızartılması, yağ bileşenlerinin maddelerini değiştirmektedir örneğin viskozite yani akışkanlık, asitlik, yoğunluk, baz sayısı vb. ve böylece kullanılan yağın dielektrik sabiti de değişmektedir ve yağın dielektrik parametrelerine etki eden önemli parametrelerdendir.



Şekil 4.19. İkinci iletim hattı sensörünün deneysel iletim S21 sonuçları

4.5. Tartışma

Yapılan bu simülasyon ve deneysel çalışmalarda, patates kızartma işlemlerinde kullanılan ayçiçek yağının kullanım miktarına göre dielektrik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir ve iki farklı iletim hattı sensör tasarımı sunulmuştur. İlk adım olarak, ayçiçeği yağının patates örnekleriyle birlikte kullanılması ile elde edilen yağ numuneleri elektromanyetik olarak karakterize edilmiştir ve ikinci adım olarak da ölçülen dielektrik değerleri kullanılarak mikrodalga simülatöründe 4-8 GHz frekans bandında çalışan iki iletim hattı sensörü tasarlanmıştır.

Patatesin dielektrik sabitleri üzerindeki etkisini görmek için patates numunesi olan ve olmayan ayçiçeği yağı 16 kez kızartılmıştır ve patatesin dielektrik sabit değerlerinde önemli bir değişikliğe neden olduğu görülmüştür. Bu önemli değişikliğin sebebi patatesin protein, su, nişasta ve karbonhidrat gibi bileşenler içermesidir ve bu bileşenler yağ üzerinde değişikliğe neden olmaktadır. Kızarmış ayçiçeği yağının patatesle kızartılması ile elde edilen yağ numuneler ölçülmüştür ve ölçülen dielektrik sabitlerine göre yağın dielektrik değerinde 2,9 ile 3,3 arasında doğrusal bir artış gözlenmiştir. Bu dielektrik değerleri mikrodalga simülasyon programına aktarılmıştır ve sensör tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan ilk iletim hattı sensörünün iki avantajı ortaya çıkmıştır; hem geri dönüş kaybı-S11'de hem de iletim-S21 değerlerinde lineer rezonans kaymaları oluşmuştur. Ayrıca,

ikinci iletim hattı sensörü iletim-S21’de rezonans kaymaları sergilemiştir. Son olarak, tasarlanmış sensör yapıları üretilmiştir ve vektör ağ analizörü kullanılarak deneysel ölçümler yürütülmüştür. Ölçülen yansıma ve iletim hattı sensörlerine göre, kızarmış yağ numunesinin dielektrik parametrelerinde meydana gelen değişikliklerin belirlenmesi için önerilen yapılar kullanılabilir niteliktedir. Literatürde bulunan çalışmalara kıyasla düşük maliyet, kolay üretilebilirlik, taşınabilirlik, yerinde ölçüm ve hassas sonuçları gibi avantajlarından dolayı bu tez çalışmasında önerilen yapılar yağ analizi uygulamalarında tercih edilebilir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, sayısal ve ölçüm sonuçlarının birbirleri ile uyum içerisinde olduğunu görülmektedir. Birinci iletim hattı sensörü için Şekil 4.7 ile Şekil 4.16’ya ve Şekil 4.8 ile Şekil 4.17’ye bakıldığında tasarlanan iletim hattı sensörü geri yansıma ve iletim özellikleri yönünden deneysel olarak desteklenmiştir. Benzer olarak, Şekil 4.12 ile Şekil 4.19’a bakıldığında önerilen ikinci iletim hattı yapısı iletim özellikleri yönünden deneysel olarak desteklenmiştir.

Literatürdeki iletim hattı sensörleri incelendiğinde bu tez çalışmasında elde edilen rezonans kaymaları önerilen iletim hattı yapılarının sensör olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Gelecekte bu yapılar taşınabilir mikrodalga alıcı-verici devrelerine entegre edilip ticarileştirilebilir durumdadır. Uygulama alanları olarak çoğunlukla gıda-tüketim sektörü hedef kitle durumunda olacaktır ve kolay üretimi, düşük maliyeti ve dielektrik parametrelerinde meydana gelen değişiklikleri belirlemedeki hassasiyeti sebebiyle de bu yapılar oldukça avantajlı durumdadır.

5. SONUÇLAR

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte doğada bulunan tüm maddelerin karakterizasyonu mümkün kılınmaktadır. Doğada pek çok farklı madde bulunmaktadır bunlardan en önemlilerinin başında gıda endüstrisinde tüketilen maddeler gelmektedir. Bahsi geçen bu tüketim ürünlerinin karakterizasyonu insan sağlığı için büyük öneme sahip olmaktadır. İnsan sağlığı için önemli olan bu maddelerden birisi de gıda malzemesi olan kızartma yağıdır. Kızartma yağı olarak çoğunlukla ayçiçeği yağı gelmektedir ve bu yağ maddesi tüm yağlarda olduğu gibi kendisine has özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin başında akışkanlık, baz sayısı, asit sayısı, kırılma indisi, yoğunluğu, su içeriği ve diğer partikül oranları gelmektedir. Bu özellikleri ölçmenin zorluğu bilinen bir gerçektir ve ölçüm için karmaşık laboratuvar ekipmanlarının gerekmesi de ayrıca dezavantajdır. Bu zorluklara karşı bir yağı elektromanyetik olarak karakterize etmek kolaylığı açısından tercih edilebilir.

Doğada bulunan her maddenin elektromanyetik özellikleri vardır ve bu özelliklere göre karakterize edilebilmektedirler. Bir maddeyi elektromanyetik olarak karakterize edip özelliklerini belirlemek için o maddenin elektriksel ve manyetik parametrelerini elde etmek gerekmektedir. Elde edilen elektromanyetik özellikler frekansa bağımlı olmaktadır. Bu parametreler başlıca dielektrik sabiti ϵ ve manyetik geçirgenlik μ değeridir. Gelişen teknoloji ile beraber bu parametrelerin ölçülebilmesi için farklı teknik ve sensör cihazları geliştirilmiştir.

Ayçiçeği yağı yapısı itibariyle karmaşık bir maddedir ve günlük olarak tüketildiği için hayatımızda önemli bir yerde bulunmaktadır. Çoğunlukla kızartma işlemlerinde kullanılan ayçiçeği yağı insan besin zincirinin önemli bir parçasıdır. Bu tez çalışmasında ilk olarak ayçiçeği yağının dielektrik değişimi kullanım sıklığına göre karakterize edilmiştir. Ayçiçeği yağı 16 kez patatesli ve patatesiz olarak ısıtılmıştır ve kızartma deneyi sonucunda 16'sı patatesli kızartma, 16'sı patatesiz olarak yağ numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen yağ numunelerinin dielektrik parametreleri mikrodalga laboratuvarında ayrı ayrı ölçülmüştür. Yapılan ölçümler 4GHz ile 8GHz arasındaki mikrodalga frekans bölgesinde yapılmıştır. Bu deneysel çalışma için vektör ağ analizörü ve dielektrik probu kullanılmıştır. Elde edilen dielektrik özellikleri kızartma işleminin ayçiçeği yağına etkisini göstermektedir. Patatesiz yani boş olarak 16 kez ısıtılan ayçiçeği yağı dielektrik değerinde 0,07'lik bir artış gözlenmiştir. Buna karşı, 16 kez patates ile kızartılan ayçiçeği yağı dielektrik değeri 2,9 ile 3,3 arasında doğrusal olarak artmaktadır.

Bu tez çalışmasında ikinci olarak elde edilen ve artan kızartma döngüsü ile doğrusal olarak artan dielektrik değerleri sonlu integrasyon tekniği (FIT) tabanlı mikrodalga simülasyon programına aktarılmıştır. Aktarılan dielektrik özelliklerine göre simülasyon ortamında iki farklı mikrodalga iletim hattı sensörü tasarlanmıştır. Dielektrik ölçümünde olduğu gibi frekans aralığı 4GHz ile 8GHz aralığındadır ve tasarlanan iletim hattı yapılarında yağ haznesi bulunmaktadır. İlk iletim hattı yapısının iki farklı sensör özelliği vardır, bunlar geri yansıma (S11) üzerindeki frekans kaymaları, ve iletim (S21) üzerindeki frekans kaymalarıdır. İlk iletim hattı yapısı S11 üzerinde 5,45GHz'de ve S21 üzerinde de sırasıyla 4,5GHz, 5,3GHz ve 7,5GHz'de frekans kaymalarına sahiptir. Bu rezonans kaymaları tasarlanan yapı sensör olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Tasarlanan bir diğer iletim hattı yapısı da benzer olarak yağ haznesine sahiptir ve iletim yani S21 üzerinde yaklaşık 5,4GHz'de frekans kaymasına sahiptir. Bu yönü ile ikinci iletim hattı yapısı da sensör özelliğindedir.

Simülasyon ortamında tasarlanan iletim hattı yapıları sonuçların doğruluğunu test etmek için üretilmiştir ve bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Sonuçlar, sayısal ve ölçüm sonuçlarının birbirleri ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Vektör ağ analizörü ile yapılan ölçümler sonucunda her iki iletim hattı yapısının uygulanabilirliği kanıtlanmıştır. Deneysel sonuçlara göre kızartma yağı numunesinin elektromanyetik özelliklerini belirlemek için tasarlanan iki sensör yapısı kullanılabilir özelliktedir. Literatüre kıyasla bu yöntem düşük maliyeti, taşınabilirliği, yerinde ölçüm yapabilme kabiliyeti ve net sonuçlar elde etmesi özellikleriyle kullanılabilir potansiyele sahiptir.

KAYNAKLAR

1. Tomasevic, A. V., & Siler-Marinkovic, S. S. (2003). Methanolysis of used frying oil. *Fuel Processing Technology*, 81(1), 1-6.
2. Sikorska, E., Romaniuk, A., Khmelinskii, I. V., Herance, R., Bourdelande, J. L., Sikorski, M., & Koziol, J. (2004). Characterization of edible oils using total luminescence spectroscopy. *Journal of Fluorescence*, 14(1), 25-35.
3. Choe, E., & Min, D. B. (2007). Chemistry of deep fat frying oils. *Journal of food science*, 72(5), R77-R86.
4. Venkatesh, M. S., & Raghavan, G. S. V. (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems engineering*, 88(1), 1-18.
5. Lizhi, H., Toyoda, K., & Ihara, I. (2008). Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition. *Journal of Food Engineering*, 88(2), 151-158.
6. Millin, T. M., Medina-Meza, I. G., Walters, B. C., Huber, K. C., Rasco, B. A., & Ganjyal, G. M. (2016). Frying oil temperature: impact on physical and structural properties of French fries during the par and finish frying processes. *Food and bioprocess technology*, 9(12), 2080-2091.
7. Zhu, X., Guo, W., Jia, Y., & Kang, F. (2015). Dielectric properties of raw milk as functions of protein content and temperature. *Food and bioprocess technology*, 8(3), 670-680.
8. Zhu, X., Guo, W., & Jia, Y. (2014). Temperature-dependent dielectric properties of raw cow's and goat's milk from 10 to 4,500 MHz relevant to radio-frequency and microwave pasteurization process. *Food and bioprocess technology*, 7(6), 1830-1839.
9. Weisshaar, R. (2014). Quality control of used deep-frying oils. *European journal of lipid science and technology*, 116(6), 716-722.
10. Kumar, D., Singh, A., & Tarsikka, P. S. (2013). Interrelationship between viscosity and electrical properties for edible oils. *Journal of food science and technology*, 50(3), 549-554.
11. Totani, N., Tateishi, S., Chiue, H., & Mori, T. (2012). Color and chemical properties of oil used for deep frying on a large scale. *Journal of oleo science*, 61(3), 121-126.
12. Prevc, T., Cigić, B., Vidrih, R., Poklar Ulrih, N., & Šegatin, N. (2013). Correlation of basic oil quality indices and electrical properties of model vegetable oil systems. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(47), 11355-11362.

13. Valantina, S. R., Angeline, D. P., Uma, S., & Prakash, B. J. (2017). Estimation of dielectric constant of oil solution in the quality analysis of heated vegetable oil. *Journal of Molecular Liquids*, 238, 136-144.
14. Faruq, A. A., Zhang, M., & Fan, D. (2018). Modeling the dehydration and analysis of dielectric properties of ultrasound and microwave combined vacuum frying apple slices. *Drying Technology*, 1-15.
15. Crosa, M. J., Skerl, V., Cadenazzi, M., Olazábal, L., Silva, R., Suburú, G., & Torres, M. (2014). Changes produced in oils during vacuum and traditional frying of potato chips. *Food chemistry*, 146, 603-607.
16. Aguilar, H. M., & Maldonado, R. F. (2015). Capacitive cells for dielectric constant measurement. *Physics Education*, 50(6), 662.
17. Song, J., Kim, S., Kim, J., Kim, M. J., Lee, S. M., Jang, M. I., & Lee, J. (2017). Oxidative properties and moisture content in repeatedly used oils for French fries and breaded chickens during frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(6), 1600279.
18. Ulrych, J., & Mentlík, V. (2016, May). Dielectric properties of sunflower, rapeseed and commonly used mineral oil. In 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) (pp. 1-4). IEEE.
19. Yang, J., Zhao, K. S., & He, Y. J. (2016). Quality evaluation of frying oil deterioration by dielectric spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 180, 69-76.
20. Žiga, M., Galajda, P., Slovák, S., & Kmec, M. (2015, June). Determination of the quality of frying oil based on UWB impedance spectrometer. In 2015 16th International Radar Symposium (IRS) (pp. 955-960). IEEE.
21. Khaled, A. Y., Aziz, S. A., & Rokhani, F. Z. (2015). Capacitive sensor probe to assess frying oil degradation. *Information Processing in Agriculture*, 2(2), 142-148.
22. Khaled, A. Y., Aziz, S. A., & Rokhani, F. Z. (2014). Development and evaluation of an impedance spectroscopy sensor to assess cooking oil quality. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(3), 299.
23. Sairin, M. A., Aziz, S. A., Nizar, N. N. A., Latiff, N. A. A., Ismail, A., Hashim, D. M., & Rokhani, F. Z. (2017). Lard Detection in Edible Oil Using Dielectric Spectroscopy. In *Sensors for Everyday Life* (pp. 245-271). Springer, Cham.
24. Chen, H., Cao, P., Li, B., Sun, D., Li, J., & Liu, Y. (2017). High sensitive and efficient detection of edible oils adulterated with used frying oil by electron spin resonance. *Food control*, 73, 540-545.
25. Suster, M. A., & Mohseni, P. (2013, June). An RF/microwave microfluidic sensor based on a center-gapped microstrip line for miniaturized dielectric spectroscopy. In 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT) (pp. 1-3). IEEE.

26. Zhang, Q., Liu, C., Sun, Z., Hu, X., Shen, Q., & Wu, J. (2012). Authentication of edible vegetable oils adulterated with used frying oil by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Food chemistry*, 132(3), 1607-1613.
27. Wu, Y., Zhang, H., Zeng, L., Chen, H., & Sun, Y. (2016). Determination of metal particles in oil using a microfluidic chip-based inductive sensor. *Instrumentation Science & Technology*, 44(3), 259-269.
28. Gongal, A., Amatya, S., Karkee, M., Zhang, Q., & Lewis, K. (2015). Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 8-19.
29. Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghatreh-Samani, N., Naderi-Boldaji, M., Forina, M., & Bonyadian, M. (2017). Development of two dielectric sensors coupled with computational techniques for detecting milk adulteration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 266-278.
30. Stevan, S., Paiter, L., Galvão, J., Roque, D., & Chaves, E. (2015). Sensor and methodology for dielectric analysis of vegetal oils submitted to thermal stress. *Sensors*, 15(10), 26457-26477.
31. Zhu, X., Guo, W., & Liang, Z. (2015). Determination of the fat content in cow's milk based on dielectric properties. *Food and Bioprocess Technology*, 8(7), 1485-1494.
32. Guarin, G., Hofmann, M., Nehring, J., Weigel, R., Fischer, G., & Kissinger, D. (2015). Miniature microwave biosensors: Noninvasive applications. *IEEE Microwave Magazine*, 16(4), 71-86.
33. Innawong, B., Mallikarjunan, P., & Marcy, J. E. (2004). The determination of frying oil quality using a chemosensory system. *LWT-Food Science and Technology*, 37(1), 35-41.
34. Kapilevich, B., & Litvak, B. (2011). Optimized microwave sensor for online concentration measurements of binary liquid mixtures. *IEEE Sensors Journal*, 11(10), 2611-2616.
35. Diniz Carvalho, C., Barros, A. K., Lopes, M. V., Silva, F. C., Santana, E. E., & Sinfrônio, F. S. M. (2016). Determination of the composition of biodiesel-diesel blends using the dielectric constant. *Instrumentation Science & Technology*, 44(4), 377-385.
36. Kalogianni, E. P., Georgiou, D., Romaidi, M., Exarhopoulos, S., Petridis, D., Karastogiannidou, C., ... & Karakosta, P. (2017). Rapid methods for frying oil quality determination: evaluation with respect to legislation criteria. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 94(1), 19-36.
37. Choi, H., Naylor, J., Luzio, S., Beutler, J., Birchall, J., Martin, C., & Porch, A. (2015). Design and in vitro interference test of microwave noninvasive blood glucose monitoring sensor. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 63(10), 3016-3025.

38. Chretiennot, T., Dubuc, D., & Grenier, K. (2016). Microwave-based microfluidic sensor for non-destructive and quantitative glucose monitoring in aqueous solution. *Sensors*, 16(10), 1733.
39. Tümkaya, M. A., Karaaslan, M., & Sabah, C. (2018). Metamaterial-based high efficiency portable sensor application for determining branded and unbranded fuel oil. *Bulletin of Materials Science*, 41(4), 91.
40. Tümkaya, M. A., Dinçer, F., Karaaslan, M., & Sabah, C. (2017). Sensitive metamaterial sensor for distinction of authentic and inauthentic fuel samples. *Journal of Electronic Materials*, 46(8), 4955-4962.
41. Altintas, O., Aksoy, M., Akgol, O., Unal, E., Karaaslan, M., & Sabah, C. (2017). Fluid, strain and rotation sensing applications by using metamaterial based sensor. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(12), B567-B573.
42. Bakir, M. (2017). Electromagnetic-based microfluidic sensor applications. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(9), B488-B494.
43. Karaaslan, M., & Bakir, M. (2014). Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 149, 55-67.
44. Rawat, V., Nadkarni, V. and Kale, S.N. (2016), "Highly sensitive electrical metamaterial sensor for fuel adulteration detection", *Defence Science Journal*, Vol. 66, pp. 421-424
45. Harnsoongnoen, S., & Wanthong, A. (2017). Real-time monitoring of sucrose, sorbitol, d-glucose and d-fructose concentration by electromagnetic sensing. *Food chemistry*, 232, 566-570.
46. Veselago, V. G. (1967). Electrodynamics of substances with simultaneously negative and. *Usp. Fiz. Nauk*, 92, 517.
47. Sadeqi, A., Nejad, H. R., & Sonkusale, S. (2017). Low-cost metamaterial-on-paper chemical sensor. *Optics express*, 25(14), 16092-16100.
48. Tamer, A., Alkurt, F. O., Altintas, O., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., ...& Sabah, C. (2018). Transmission Line Integrated Metamaterial Based Liquid Sensor. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(7), B251-B257.
49. Bakır, M., Karaaslan, M., Unal, E., Karadag, F., Alkurt, F. Ö., Altıntaş, O., ...& Sabah, C. (2018). Microfluidic and Fuel Adulteration Sensing by Using Chiral Metamaterial Sensor. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(11), B475-B483.
50. Rawat, V., Nadkarni, V., & Kale, S. N. (2017). ISM (Industrial Scientific and Medical standard) bandf lex fuel sensor using electrical metamaterial device. *Applied Physics A*, 123(1), 75.
51. Tümkaya, M. A., Karaaslan, M., & Sabah, C. (2018). Metamaterial-based fluid sensor for identifying different types of fuel oil samples. *Chinese Journal of Physics*, 56(5), 1872-1878.

52. Zarifi, M. H., Farsinezhad, S., Shankar, K., & Daneshmand, M. (2015). Liquid sensing using active feedback assisted planar microwave resonator. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 25(9), 621-623.
53. Liu, M., Xie, S., Ge, J., Xu, Z., Wu, Z., Ru, C., ... & Sun, Y. (2016). Microfluidic assessment of frying oil degradation. *Scientific reports*, 6, 27970.
54. Li, J., Wang, C. T., Liu, G. R., Zhao, L., & Yang, P. Q. (2013). Fast detection of fried oil quality by electronic nose. *Food Sci*, 34, 236-239.
55. Abduljabar, A. A., Rowe, D. J., Porch, A., & Barrow, D. A. (2014). Novel microwave microfluidic sensor using a microstrip split-ring resonator. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 62(3), 679-688.
56. Gennarelli, G., Romeo, S., Scarfi, M. R., & Soldovieri, F. (2013). A microwave resonant sensor for concentration measurements of liquid solutions. *IEEE Sensors Journal*, 13(5), 1857-1864.
57. Schueler, M., Mandel, C., Puentes, M., & Jakoby, R. (2012). Metamaterial inspired microwave sensors. *IEEE Microwave Magazine*, 13(2), 57-68.
58. Ebrahimi, A., Withayachumnankul, W., Al-Sarawi, S., & Abbott, D. (2014). High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization. *IEEE Sensors Journal*, 14(5), 1345-1351.
59. Vélez, P., Su, L., Grenier, K., Mata-Contreras, J., Dubuc, D., & Martín, F. (2017). Microwave microfluidic sensor based on a microstrip splitter/combiner configuration and split ring resonators (SRRs) for dielectric characterization of liquids. *IEEE Sensors Journal*, 17(20), 6589-6598.
60. Jankovic, N., & Radonic, V. (2017). A microwave microfluidic sensor based on a dual-mode resonator for dual-sensing applications. *Sensors*, 17(12), 2713.
61. 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.
62. Meyne, N., Latus, S., & Jacob, A. F. (2014, March). Corrugated coplanar transmission-line sensor for broadband liquid sample characterization. In *GeMiC 2014; German Microwave Conference* (pp. 1-4). VDE.
63. Altintas, O., Aksoy, M., Unal, E., Karakasli, F., & Karaaslan, M. (2018). A split meander line resonator-based permittivity and thickness sensor design for dielectric materials with flat surface. *Journal of Electronic Materials*, 47(10), 6185-6192.
64. Altintaş, O., Aksoy, M., Ünal, E., & Karaaslan, M. (2019). Chemical Liquid and Transformer Oil Condition Sensor Based on Metamaterial-Inspired Labyrinth Resonator. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(6), B482-B488.

65. Erdoğan, M., Alkurt, FO., Ünal, E., Karaaslan, M. (2019). Sensing of Oil Usage and Dielectric Characterisation of Frying Oil. EJONS VI, International Conference on Mathematics-Engineering-Natural&Medical Sciences
66. Weiland, T. (1996). Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 9(4), 295-319.
67. Thoma, P., & Weiland, T. (1995, September). A subgridding method in combination with the finite integration technique. In Microwave Conference, 1995. 25th European (Vol. 2, pp. 770-774). IEEE.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERDOĞAN, MAİDE
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 15.08.1994, Adana
 Medeni hali : Bekar
 e-mail : maiderdogan92@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2016
Lise	Hacı Ahmet Atıl Anadolu Lisesi	2011

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- WiMAX Bandında Metamalzeme Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı, 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress, 2016
- SENSING OF OIL USAGE AND DIELECTRIC CHARACTERISATION OF FRYING OIL, EJONS 6, INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICS, ENGINEERING & NATURAL SCIENCES, 2019

Hobiler

Müzik, Resim

DİZİN

A

Ayçiçeği yağı · 1

Ç

Çift Negatif · 3

DDielektrik · 5, 13, 15, 16, 17, 25,
28, 30, 33

EElektrik Alan · 9, 10, 24, 27
Elektromanyetik · 1, 7, 8, 10, 11,
16, 24, 31, 33

FFIT · 11, 12, 13, 34
FR4 · 13, 19, 25

İİletim hattı · 3, 7, 8, 9, 11, 12, 19,
20, 23, 25, 28, 29, 30, 32

KKızartma yağı · 1, 3, 7, 12, 15,
16, 18, 25, 30, 33

MMikrodalga · 2, 3, 6, 12, 13, 15,
16, 19, 25, 28, 31, 32

PProb · 2, 3, 6, 8, 11, 13, 16, 18,
19, 28, 33
Port · 12, 13, 19, 27, 28, 29

RRezonans · 2, 3, 7, 20, 21, 22, 25,
28, 30, 32
Rezonatör · 7, 8, 13, 19, 24, 25,
27

SSensör · 2, 3, 5, 6, 7, 12, 13, 21,
24, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 33,
34

VVektör ağ analizörü · 3, 6, 10, 13,
16, 18, 28, 32, 33, 34

Y

Yüzey akımı · 24, 27



TEKNOVERSITE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

