



**MİKRODALGA FREKANSLARINDA
MALZEMELERİN ELEKTROMANYETİK
KARAKTERİZASYONU ÜZERİNE YENİ
YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

Yunus KAYA

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Doktora Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2020

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**MİKRODALGA FREKANSLARINDA MALZEMELERİN ELEKTROMANYETİK
KARAKTERİZASYONU ÜZERİNE YENİ YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

(Development of New Methods on Electromagnetic Characterization of Materials at
Microwave Frequencies)

DOKTORA TEZİ

Yunus KAYA

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur Cem HASAR

Erzurum
Ekim, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Yunus KAYA tarafından hazırlanan “Mikrodalga Frekanslarında Malzemelerin Elektromanyetik Karakterizasyonu Üzerine Yeni Yöntemlerin Geliştirilmesi” başlıklı çalışması 05/10/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Tevhit KARACALI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Danışman:	Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ahmet CANSIZ <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ersin ARSLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ahmet DURLU <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	
İkinci Tez Danışmanı	Prof. Dr. Uğur Cem HASAR <i>Gaziantep Üniversitesi</i>	

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../10/2020 tarih ve
sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN

Enstitü Müdürü

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL danışmanlığında sunulan “Mikrodalga Frekanslarında Malzemelerin Elektromanyetik Karakterizasyonu Üzerine Yeni Yöntemlerin Geliştirilmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Yöntem	3	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	3	20
Sonuç	1	20
Tezin Geneli	3	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Yunus KAYA	Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
06/10/2020	06/10/2020
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bana her türlü desteğini ve yardımını esirgemeyen çok değerli danışman hocalarım Atatürk Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL ve Gaziantep Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Uğur Cem HASAR ile değerli eşi Sayın Hafize HASAR’a,

Tez İzleme Komitesi üyeliklerinde bulunan Atatürk Üniversitesi öğretim üyeleri Sayın Prof. Dr. Ersin ARSLAN ve Sayın Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK’e,

Bu tez kapsamındaki tüm ölçümler Gaziantep Üniversitesi, Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Laboratuvarı’nda yapıldığından Gaziantep Üniversitesi’ne,

3D elektromanyetik benzeşim programı CST Microwave Studio ve diğer imkanlarından yararlandığım 218M341 nolu “Radar Kesit Alanı Azaltma İçin Yeni Bir Ultra Geniş Bantlı Hibrit Mikrodalga Soğurucu Fabrikasyonu ve Analizi” başlıklı 1001 projesi için proje yürütücüsü Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL’a ve projeye destek sağlayan TÜBİTAK’a,

Doktora eğitimim boyunca BİDEB 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında sunduğu burs için TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Son olarak destekleriyle her an yanımda olan, her türlü zorluklara rağmen benden sevgilerini ve desteklerini asla esirgemeyen ve sonsuz hoşgörülerinden ötürü değerli eşim ve kızıma teşekkür eder ve sonsuz şükranlarımı sunarım.

Yunus KAYA

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MİKRODALGA FREKANSLARINDA MALZEMELERİN ELEKTROMANYETİK KARAKTERİZASYONU ÜZERİNE YENİ YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Yunus KAYA

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur Cem HASAR

Amaç: Bu çalışmada, yansıma-simetrik veya yansıma-asimetrik özelliğine sahip iletim-asimetrik (nonreciprocal) ağların veya hatların yayılma sabitlerinin ölçülmesi ve ayrıca yüksek hassasiyetle tasarlanacak olan sensör ile malzemelerin elektromanyetik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada, yeni bir kalibrasyon gerektirmeyen line-line yöntemi kullanarak yansıma-simetrik veya yansıma-asimetrik özelliğine sahip iletim-asimetrik ağların veya hatların yayılma sabitlerini ölçmek için metodolojiler önerilmiştir. Ayrıca malzemelerin elektromanyetik özelliklerinin belirlenmesi için ise çift taraflı dikdörtgen dalga kılavuzu yapılarına gömülü metamalzeme sensörü modellenerek tasarlanmıştır.

Bulgular: İletim-asimetrik ağların veya hatların yayılma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla önerdiğimiz formülasyonları doğrulamak için belirli ölçülerde hem X-bandı hem de Ku-bandı dalga kılavuzu düzlükleri ve ayrıca ferrit yüklü bir X-bandı dalga kılavuzu mikrodalga faz kaydırıcı kullanılmıştır. Benzeşim ve ölçüm sonuçları diğer referans yöntemler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca önerilen çift taraflı dikdörtgen dalga kılavuzu yapılarına gömülü metamalzeme sensörün benzeşim ve ölçüm sonuçları gerçekleştirilmiş ve sonuçların yine birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç: Diğer kalibrasyon gerektirmeyen ve kalibrasyon bağımlı yöntemlerle karşılaştırıldığında önerilen yöntemlerimiz, herhangi bir kalibrasyona başvurmaksızın iletim-simetrik (reciprocal) ve iletim-asimetrik ağların veya hatların ileri ve geri yönlerdeki yayılma sabitini belirlemek için özgün avantajlara sahiptir. Ayrıca önerilen çift taraflı dikdörtgen dalga kılavuzu yapılarına gömülü metamalzeme sensörü, sıcaklık, nem, yoğunluk veya konsantrasyondaki değişiklikleri algılamak için kullanılabileceği gibi malzemelerin dielektrik sabitinin belirlenmesi içinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: İletim-asimetrik ağlar, line-line yöntemi, yayılma sabiti, kalibrasyon gerektirmeyen, metamalzeme sensör, malzeme karakterizasyonu.

Ekim 2020, 112 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

DEVELOPMENT OF NEW METHODS ON ELECTROMAGNETIC CHARACTERIZATION OF MATERIALS AT MICROWAVE FREQUENCIES

Yunus KAYA

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Co-supervisor: Prof. Dr. Uğur Cem HASAR

Purpose: In this study, it is aimed to measure the propagation constants of transmission-asymmetric (nonreciprocal) networks or lines with reflection-symmetric or reflection-asymmetric property and also to determine electromagnetic properties of materials with the sensor to be designed with high sensitivity.

Method: In this study, methodologies are proposed to measure the propagation constants of transmission-asymmetric networks or lines with reflection-symmetric or reflection-asymmetric property using a new calibration-free line-line method. In addition, in order to determine electromagnetic properties of materials, a metamaterial sensor embedded in the double-sided rectangular waveguide structures was modeled and designed.

Findings: Both X-band and Ku-band waveguide straights of certain sizes, as well as a ferrite-loaded X-band waveguide microwave phase shifter were used to validate our proposed formulations in order to determine the propagation properties of transmission-asymmetric networks or lines. The simulation and measurement results were compared with the results obtained with other reference methods. It has been observed that the data are compatible with each other. In addition, the simulation and measurement results of the metamaterial sensor embedded in the proposed double-sided rectangular waveguide structures were realized and it was observed that the results were again compatible with each other.

Results: Compared to other calibration-free and calibration-dependent methods, our proposed methods have unique advantages for determining the forward and backward directions propagation constant of transmission-symmetric (reciprocal) and transmission-asymmetric networks or lines without resorting to any calibration. In addition, the metamaterial sensor embedded in the proposed double-sided rectangular waveguide structures can be used to detect changes in temperature, humidity, density or concentration, as well as determine the dielectric constant of materials.

Keywords: Transmission-asymmetric networks, line-line method, propagation constant, calibration-free, metamaterial sensor, materials characterization.

October 2020, 112 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xiii
GİRİŞ... ..	1
Motivasyon	1
Önerilen LL Yöntemi ile Kalibrasyon Kullanmaksızın Elde Edilen S-Parametrelerinden İletim-Asimetrik ve Yansıma-Simetrik/Asimetrik Mikrodalga Ağların/Hatların Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi	2
Yeni Bir Çift-Tarafli Yüksek Hassasiyetli MM Sensörün Önerilmesi	5
KURAMSAL TEMELLER.....	10
EM Karakterizasyon.....	10
MM'ler	13
Negatif dielektrik sabiti	16
Negatif manyetik geçirgenlik.....	18
Sol-elli MM'ler	19
MM'lerin Sensör Uygulamalarında Kullanımları.....	21
MATERYAL VE YÖNTEM	26
İletim-Asimetrik ve Yansıma-Simetrik Mikrodalga Ağların veya Hatların Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi	26
Empedans, genlik ve faz dönüşümünün analizi	26
Önerilen LL yöntemi	30
İletim-Asimetrik ve Yansıma-Asimetrik Mikrodalga Ağların veya Hatların Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi	35
İletim-asimetrik üniform bir iletim hattı için WCM gösterimi ve diyagonalleştirme	35
Önerilen LL yöntemi	39

Önerilen Çift Taraflı RW-MM Sensörünün Tasarımı ve Modeli	42
Önerilen Çift Taraflı RW-MM Sensörünün Fabrikasyonu	45
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	48
Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi	48
Ölçüm kurulumu	48
Doğrulama	49
Ferit yüklü bir dalga kılavuzunun yayılma özelliklerinin ölçülmesi	57
MM Sensör	63
Benzeşimler	63
Ölçümler	65
Benzeşim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	67
SONUÇ	70
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	87

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. $L = 9,40$ mm Uzunluğunda X-Bandı Dalga Kılavuzu Düzlüğü İçin Denklem (96)'dan Hesaplanan Normalize Edilmiş RMSE'ye Dayalı GoF Değerleri.....	56
Tablo 2. $d_{\text{int}} = 1,00$ mm ve Beş Farklı Algılama Katmanı ε Değeri ($\varepsilon_{\text{int}} = 1,00-5,00$) İçin Çift Taraflı RW-MM Sensörünün S_{21} Büyüklüğünün Rezonans Frekanslarının İncelenmesi	72



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. LL yöntemi kullanarak iletim-asimetrik ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi hakkında grafiksel özet.....	5
Şekil 2. Önerilen yüksek hassasiyetli çift taraflı RW-MM sensör ile malzeme özelliklerinin belirlenmesi hakkında grafiksel özet.	9
Şekil 3. Ortam 1 ve ortam 2 arasındaki bir ara yüzeyden bir ışık demetinin geçişinin gösterimi (1) gelen ışık demeti, (2) yansıyan ışık demeti, (3) 2. ortamdaki kırılan ışık demeti çift negatiftir ve (4) 2. ortamdaki kırılan ışık demeti, demet 1'in doğruluğuna sahiptir.....	16
Şekil 4. Periyodik bir dizi ince tel dizisi (Pendry <i>et al.</i> 1999).	17
Şekil 5. Ayırlara sahip iki silindirik tabakadan oluşan iç içe geçmiş bir yapay manyetik yapının üstten görünüşü (Pendry <i>et al.</i> 1999).	18
Şekil 6. $\varepsilon - \mu$ diyagramı.	19
Şekil 7. Bir SRR hücresinin yapısı (Pendry <i>et al.</i> 1999; Smith <i>et al.</i> 2000).	20
Şekil 8. Bir SRR ve ince bir tel ile birlikte sol-elli MM birim hücre yapısı (Smith <i>et al.</i> 2000).	20
Şekil 9. (a) Simetrik yansıma özelliğine (bir empedansa) sahip üniform iletim-asimetrik ağ veya asimetrik hat ($\gamma^+ \neq \gamma^-$) ve (b) bu hattın iki empedans dönüşüm bölgesine ve bir faz-genlik değişim bölgesine ayrıştırılması.	26
Şekil 10. Üniform iletim-asimetrik hatların yayılma sabitinin belirlenmesi için LL yönteminin uygulanması. T_A ve T_B eş olmayan dönüşümlerine yerleştirilmiş (a) L_1 uzunluğuna sahip daha uzun hat ve (b) L_2 uzunluğuna sahip daha kısa hat.	32
Şekil 11. (a) Asimetrik yansıma özelliğine (bir empedansa) sahip iletim-asimetrik ağ veya iletim hattı ($\gamma^+ \neq \gamma^-$) ve (b) bu hattın/ağın iki empedans dönüşüm bölgesine ve bir faz-genlik değişim bölgesine ayrıştırılması.	35
Şekil 12. İletim-asimetrik üniform ağların/hatların ileri ve geri yayılma sabitlerinin belirlenmesi için önerilen yöntemin uygulanması. (a) Eş olmayan T_A ve T_B dönüşümleri arasında L uzunluğunda ağ/hat bağlantısı ve (b) thru bağlantı (T_A ve T_B dönüşümlerini eşleme).	40
Şekil 13. Elektrik ve manyetik alanlarla rezonatörlerin yönelimi ve geometrik detayları (boyutlandırılması). (a) Perspektif görünüş (ölçekli değil) ve (b) ön görünüş.	43
Şekil 14. Manyetik alan yönündeki herhangi iki komşu SRR için eşdeğer devre.	44

Şekil 15. CST MWS benzeşim programı aracılığı ile tasarlanan çift taraflı RW-MM sensörü.	45
Şekil 16. Önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün FR4 substratı üzerine fabrikasyonu hakkında grafiksel özet.	46
Şekil 17. FR4 substratı üzerine kazınarak üretilen, 2 adet 1×4 dikey SRR inklüzyon hücresi.	47
Şekil 18. Yayılma sabiti ölçüm konfigürasyonlarının fotoğrafları. (a) Line bağlantısı ve (b) thru bağlantısı.	48
Şekil 19. $L_1 = 7,7$ mm olan X-bandı dalga kılavuzu düzlüğünden ölçülen yayılma özellikleri T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- . (a) T_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları, (b) T_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları, (c) γ_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları ve (d) γ_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “H” hesaplanan sonucu belirtirken, “ÖY” ve “RY” sırasıyla önerilen yöntemimiz ve Janezic and Jargon (1999) referans yöntemiyle elde edilen sonuçları ifade etmektedir).	50
Şekil 20. $L_1 = 200$ mm olan Ku-bandı dalga kılavuzu düzlüğünden ölçülen yayılma özellikleri T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- . (a) T_0^+ ’nın reel kısmı (b) T_0^+ ’nin imajiner kısmı, (c) T_0^- ’nin reel kısmı, (d) T_0^- ’nin imajiner kısmı, (e) γ_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları ve (f) γ_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “H” hesaplanan sonucu belirtirken, “ÖY” ve “RY” sırasıyla önerilen yöntemimiz ve Janezic and Jargon (1999) referans yöntemiyle elde edilen sonuçları ifade etmektedir).	51
Şekil 21. $L = 9,40$ mm olan X-bandı dalga kılavuzu düzlüğünden ölçülen yayılma özellikleri T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- . (a) T_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları, (b) T_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları, (c) γ_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları ve (d) γ_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “H” hesaplanan sonucu belirtirken, “ÖY” ve “RY” sırasıyla önerilen yöntemimiz ve Reynoso-Hernández (2003) referans yöntemiyle elde edilen sonuçları ifade etmektedir).	54
Şekil 22. Ölçümlerde kullanılan ferrit yüklü dalga kılavuzu mikrodalga faz kaydırıcının fotoğrafları.	58
Şekil 23. Şekil 22’de gösterilen ferrit yüklü dalga kılavuzu mikrodalga faz kaydırıcının ölçülen ileri ve geri S-parametrelerinin büyüklükleri.	59
Şekil 24. Mikrodalga faz kaydırıcı için yayılma özellikleri T_0^+ ve T_0^- . (a) T_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları ve (b) T_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “RY” kalibrasyon bağımlı referans yöntem (Zhao <i>et al.</i> 2010) ve “ÖY” iletim-	

asimetrik ve yansıma-simetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen yöntemimiz ile elde edilen sonuçları ifade etmektedir).	59
Şekil 25. Mikrodalga faz kaydırıcı için yayılma özellikleri γ_0^+ ve γ_0^- . (a) γ_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları ve (b) γ_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “RY” kalibrasyon bağımlı referans yöntem (Zhao <i>et al.</i> 2010) ve “ÖY” iletim-asimetrik ve yansıma-simetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen yöntemimiz ile elde edilen sonuçları ifade etmektedir).	60
Şekil 26. Mikrodalga faz kaydırıcı için yayılma özellikleri T_0^+ ve T_0^- . (a) T_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları ve (b) T_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “RY” kalibrasyon bağımlı referans yöntem (Zhao <i>et al.</i> 2010) ve “ÖY” iletim-asimetrik ve yansıma-asimetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen yöntemimiz ile elde edilen sonuçları ifade etmektedir).	61
Şekil 27. Mikrodalga faz kaydırıcı için yayılma özellikleri γ_0^+ ve γ_0^- . (a) γ_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları ve (b) γ_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “RY” kalibrasyon bağımlı referans yöntem (Zhao <i>et al.</i> 2010) ve “ÖY” iletim-asimetrik ve yansıma-asimetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen yöntemimiz ile elde edilen sonuçları ifade etmektedir).	62
Şekil 28. 3D EM benzeşim programı CST MWS’de, önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün ve X-bandı dalga kılavuzu portlarının yerleşimi.	63
Şekil 29. $d_{int} = 1,00$ mm kalınlığındaki (a) hava, (b) polietilen ve (c) FR4 ara katmanı için önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün 8,2-15 GHz frekans aralığında, benzeşimler ile elde edilen S_{21} parametre büyüklükleri.	64
Şekil 30. X-bandı dalga kılavuzu numune tutucu bölümü ön ve arka yüzeyleri.....	65
Şekil 31. (a) X-bandı dalga kılavuzu numune tutucu bölümüne, önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün yerleştirilmesi ve (b) Keysight Technologies N9918A VNA ve X-bandı dalga kılavuzu numune tutucu ile X-bandı dalga kılavuzu kurulumu.	66
Şekil 32. $d_{int} = 1,00$ mm kalınlığındaki (a) hava, (b) polietilen ve (c) FR4 ara katmanı için önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün 8,2-12,4 GHz frekans aralığında, ölçümler ile elde edilen S_{21} parametre büyüklükleri.	66

Şekil 33. $d_{\text{int}} = 1,00$ mm kalınlığındaki (a) hava, (b) polietilen ve (c) FR4 ara katmanı için önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün S_{21} parametre büyüklüklerinin benzeşim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	68
Şekil 34. Beş farklı algılama katmanı ε değeri ($\varepsilon_{\text{int}} = 1,00-5,00$) için çift taraflı RW-MM sıcaklık/nem/yoğunluk/konsantrasyon sensörü prototiplerinin 8,2-15 GHz frekans aralığında iletim büyüklüğü eğrileri ($ S_{21} $).....	71
Şekil 35. $\varepsilon_{\text{int}=s} \cong 2,235$ değeri için S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansı.	73
Şekil 36. Tablo 1'deki verilere göre ikinci dereceden bir eğri uydurma grafiği (denklemdaki x ve y değerleri sırasıyla GHz cinsinden S_{21} rezonans frekansını ve ara katmandaki örnek numunenin ε 'sini ifade etmektedir).....	73
Şekil 37. $\varepsilon_{\text{int}=s} \cong 2,20$ değeri için S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansı.	74



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

CMS	: Chiral Metamaterial Sensor (Kiral Metamalzeme Sensör)
DVSRR	: Double-Slot Vertical Split Ring Resonator (Çift Yuvalı Dikey Ayırık Halka Rezonatör)
EM	: Elektromanyetik
GoF	: Goodness of Fit (Uyum Derecesi)
H	: Hesaplanan Sonuç
LHM	: Left-Handed Media (Sol-Elli Medya)
LL	: Line-Line
LRL	: Line-Reflect-Line
LRM	: Line-Reflect-Match
MM	: Metamalzeme
MWS	: Microwave Studio
ÖY	: Önerilen Yöntem
PEC	: Perfect Electric Conductor (Mükemmel Elektrik İletken)
RF	: Radio Frequency (Radyo Frekansı)
RMSE	: Root-Mean-Square-Error (Kök-Ortalama-Kare-Hata)
RW	: Rectangular Waveguide (Dikdörtgen Dalga Kılavuzu)
RY	: Referans Yöntem
S-	: Saçılma
SRDS	: Split Ring Resonators With Double Split (Çift Ayırıklı Ayırık Halka Rezonatör)
SRR	: Split Ring Resonator (Ayırık Halka Rezonatör)
TRL	: Thru-Reflect-Line
XSR	: X Shaped Resonator (X Şekilli Rezonatör)
VNA	: Vector Network Analyzer (Vektör Ağ Analizörü)
WCM	: Wave-Cascading Matrix (Dalga Kaskat Matrisi)
A, B, C ve D	: Parametreler (ABCD parametreleri)
a	: Kare kafesin hücre kenarı
a_c	: Kafes sabiti

a_m ve b_m	: m modu için kompleks yarı-dalga genlikleri
a_n ve b_n	: n modu için kompleks yarı-dalga genlikleri
B	: Manyetik akı yoğunluğu
C	: Birim alandaki kapasitans
C_{mut}	: Karşılıklı kapasitans
C_{self}	: Öz kapasitans
c	: Işık hızı
c_0	: Serbest uzaydaki (vakumdaki) ışık hızı
D	: Elektrik akı yoğunluğu ve Diyagonal matris
D_s	: s modlu iletim-asimetrik (nonreciprocal) hat için diyagonal matris
d	: Substrat genişliği
d_c	: İki silindir arasındaki uzaklık
d_{int}	: Ara katman kalınlığı
d_{sub}	: Substrat kalınlığı
E	: Elektrik alan şiddeti
$\vec{E}_t$	: Elektrik alan şiddetinin teğet bileşeni
e	: Yük
f	: Çalışma frekansı
f_c	: Kesme frekansı
$f_{int=s}$	: Ara katmandaki örnek numunenin dielektrik sabitinin değeri için S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansı
$f_{int=2,00}$	: Ara katmandaki örnek numunenin dielektrik sabitinin değeri 2,00 için S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansı
$f_{int=3,00}$	: Ara katmandaki örnek numunenin dielektrik sabitinin değeri 3,00 için S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansı
f_{min}	: Minimum frekans
g	: Hava genişliği
H	: Manyetik alan şiddeti
H_0	: Dış manyetik alan şiddeti
h	: Substrat uzunluğu
I	: 2×2 birim matris

$\mathbf{i}$	: Akım dalgası
$\mathbf{i}_m$	: m modu için iletim-asimetrik üniform ağ/hattın akım dalgası
$\mathbf{K}$	: Saçılma parametreleri arasındaki işlemlerin kısaltma terimi
$\mathbf{K}_{p1}, \mathbf{K}_{p2}, \mathbf{K}_{p3}$ ve $\mathbf{K}_{p4}$	: Kısaltma parametreleri
$\mathbf{k}$	: Dalga vektörü
$\mathbf{k}_0$	: Serbest uzayın dalga sayısı
$\mathbf{k}_1$ ve $\mathbf{k}_2$	: Geometrik çarpanlar ($\mathbf{k}_1$ ve $\mathbf{k}_2 \in \mathbb{R}$)
$\mathbf{L}$	: Uzunluk
$\mathbf{L}_d$	: Ölçüm alınacak ağ/hattın uzunluğu
$\mathbf{L}_m$	: Metalizasyon uzunluğu
$\mathbf{L}_{mut}$	: Karşılıklı endüktans
$\mathbf{L}_{self}$	: Öz endüktans
$\mathbf{L}_1$ ve $\mathbf{L}_2$	: Sırasıyla daha uzun ve daha kısa hat
$\mathbf{M}$	: Dalga kaskat matrisi
$\mathbf{M}_s$	: s modlu iletim-asimetrik hattın dalga kaskat matrisi
$\mathbf{M}_1$	: $\mathbf{L}_1$ uzunluğundaki iletim-asimetrik hattın dalga kaskat matrisi
$\mathbf{M}_2$	: $\mathbf{L}_2$ uzunluğundaki iletim-asimetrik hattın dalga kaskat matrisi
$\mathbf{m}, \mathbf{n}$ ve $\mathbf{s}$	: Çalışma modları
$\mathbf{m}_e$	: Elektron kütlesi
$\mathbf{m}_{11}, \mathbf{m}_{21}, \mathbf{m}_{12}$ ve $\mathbf{m}_{22}$	: $\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2^{-1}$ matrisinin girdileri
$\mathbf{m}_a^{\mp}$ ve $\mathbf{m}_b^{\mp}$	: Branch indeksleri
$\mathbf{N}$	: Eş olmayan $\mathbf{T}_A$ ve $\mathbf{T}_B$ dönüşümleri arasında $\mathbf{L}$ uzunluğundaki ağ/hat bağlantısının dalga kaskat matrisi
$\mathbf{N}_f$	: Frekans noktalarının sayısı
$\mathbf{N}_0$	: Thru (direkt) bağlantı ($\mathbf{T}_A$ ve $\mathbf{T}_B$ dönüşümlerini eşleme) dalga kaskat matrisi
$\mathbf{n}$	: Ortamın kırılma indisi
$\mathbf{n}_e$	: Elektron yoğunluğu
$\mathbf{n}_{1(2)}$	: Ortam 1(2)'in kırılma indisi
$\mathbf{P}$	: Özuzaylardan oluşan tekil olmayan (ters çevrilebilir) matris

$\mathbf{P}_s$	: s modlu iletim-asimetrik hat için özuzaylardan oluşan tekil olmayan matris
$\mathbf{p}$	: Ortam doğrusu
$\mathbf{P}_M$	: Karakteristik polinom
$\mathbf{p}_1$ ve $\mathbf{p}_2$	: Ortam 1 ve ortam 2'nin doğruları
$\mathbf{Q}^{mm}$	: Z_{ref}^n 'den Z_m 'ye bir değişim için dönüşüm matrisi
$\mathbf{Q}^{mm}$	: Homojen bir iletim-asimetrik hattan homojen iletim-simetrik (reciprocal) hatta bir empedans değişimi için dönüşüm matrisi
$\mathbf{R}_{self}$	: Özdirenç
$\mathbf{R}^{mm}$	: Homojen bir iletim-asimetrik ağ veya hat boyunca genlik ve faz dönüşümleri
$\mathbf{R}_{L1}^{mm}$ ve $\mathbf{R}_{L2}^{mm}$	: Homojen bir iletim-asimetrik ağ veya hat boyunca L_1 ve L_2 uzunluklarına sahip hatlar için genlik ve faz dönüşüm matrisleri
$\mathbf{r}$	: İnce tellerin yarıçapı
$\mathbf{r}_c$	: Silindir yarıçapı
$\mathbf{S}_{11}$	: İleri yansıma saçılma parametresi
$\mathbf{S}_{12}$	: Geri iletim saçılma parametresi
$\mathbf{S}_{21}$	: İleri iletim saçılma parametresi
$\mathbf{S}_{22}$	: Geri yansıma saçılma parametresi
$\mathbf{S}^L$	: Üst simge "L", saçılma parametresinin hem empedans değişimi hem de genlik ve faz değişimi için gerçekleştirildiği anlamına gelir
$\mathbf{S}^{L0}$	: Üst simge "L0", saçılma parametresinin yalnızca genlik ve faz değişimleri için gerçekleştirildiği anlamına gelir
$\vec{\mathbf{S}}$	: Enerji akısı (Poynting) vektörü
$\mathbf{s}$	: Ayırık halka rezonatörün inklüzyonları arası mesafe
$\mathbf{T}$	: Yayılma faktörü
$\mathbf{T}_A$ ve $\mathbf{T}_B$	: Hata ve kusurları temsil eden eş olmayan dönüşümler
$\mathbf{T}_\lambda$	: Dönüşüm matrislerinin çarpımını içeren bir kısaltma terimi
$\mathbf{T}^+$	: İleri yayılma faktörü
$\mathbf{T}^-$	: Geri yayılma faktörü
$\mathbf{T}_m^+$	: m modlu homojen iletim-asimetrik hattın ileri yayılma faktörü

T_m^-	: m modlu homojen iletim-asimetrik hattın geri yayılma faktörü
T_s^+	: s modlu homojen iletim-asimetrik hattın ileri yayılma faktörü
T_s^-	: s modlu homojen iletim-asimetrik hattın geri yayılma faktörü
T_0^+	: Serbest uzayın ileri yayılma faktörü
T_0^-	: Serbest uzayın geri yayılma faktörü
t	: Zaman
t_m	: Metalizasyon kalınlığı
u	: Frekans noktası
v	: Gerilim dalgası
v_m	: m modu için iletim-asimetrik üniform ağ/hattın gerilim dalgası
v_0	: Sabit gerilim
v_0^+	: +z yönünde yayılan gerilim dalgasının kompleks (veya reel) genliği
v_0^-	: -z yönünde yayılan gerilim dalgasının kompleks (veya reel) genliği
w	: Metalizasyon genişliği
ω	: Açısal frekans
X	: Karşılaştırılacak terim
X^{cal}	: Hesaplanan X değerleri
X^{ext}	: Çıkarılan X değerleri
X_{mean}^{cal}	: Hesaplanan X değerlerinin ortalaması
X_u^{cal}	: u. frekans noktasında hesaplanan X değeri
X_u^{ext}	: u. frekans noktasında çıkarılan X değeri
x	: GHz cinsinden S_{21} rezonans frekansı
x_1 ve x_2	: Özdeğerler λ_1 ve λ_2 ile ilişkili özvektörler (2×1 sütun matrisleri)
y	: Ara katmandaki örnek numunenin dielektrik sabiti
Z_m	: m modu için dalga empedansı
Z_{ref}	: Referans empedansı
Z_0	: Karakteristik empedans
Z_m^+	: m modu için +z yönündeki dalga empedansı
Z_m^-	: m modu için -z yönündeki dalga empedansı
Z_{ref}^n	: n modu için referans empedansı

Z_s^+	: s modu için +z yönündeki karakteristik empedans
Z_s^-	: s modu için -z yönündeki karakteristik empedans
z	: Ağ/hattın koordinat eksenini yönündeki uzunluğu
Γ	: Yansıma katsayısı
Γ_{nm}	: n modundan m moduna dönüşümün yansıma katsayısı
Γ_1	: İleri yansıma katsayısı
Γ_2	: Geri yansıma katsayısı
Γ_{nm}^+	: n modundan m moduna dönüşümün +z yönündeki yansıma katsayısı
Γ_{nm}^-	: n modundan m moduna dönüşümün -z yönündeki yansıma katsayısı
Γ_{ns}^+	: n modundan s moduna dönüşümün +z yönündeki yansıma katsayısı
Γ_{ns}^-	: n modundan s moduna dönüşümün -z yönündeki yansıma katsayısı
ϵ	: Dielektrik (yalıtkanlık) sabiti (permittivite)
ϵ_{etkin}	: Etkin dielektrik sabiti
ϵ_{int}	: Ara katman dielektrik sabiti
$\epsilon_{\text{int=s}}$	: Ara katmandaki örnek numunenin dielektrik sabiti
ϵ_{metal}	: Metal dielektrik sabiti
ϵ_{sub}	: Substrat dielektrik sabiti
ϵ_0	: Serbest uzayın (boşluğun) dielektrik sabiti
$\epsilon_{1(2)}$	: Ortam 1(2)'in dielektrik sabiti
μ	: Manyetik geçirgenlik (permeabilite)
μ_{etkin}	: Etkin manyetik geçirgenlik
μ_0	: Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
$\mu_{1(2)}$	: Ortam 1(2)'in manyetik geçirgenliği
δ_{int}	: Ara katman kayıp tanjantı
δ_{sub}	: Substrat kayıp tanjantı
σ	: Birim alandaki silindirik yüzeyinin direnci
σ_c	: Bakırın iletkenliği
γ	: Yayılma sabiti
γ_m	: m modlu homojen iletim-asimetrik hattın yayılma sabiti

γ_0	: Serbest uzayın yayılma sabiti
γ_{0n}	: İletim-simetrik n modlu bir izotropik hatta serbest uzayın yayılma sabiti
γ^+	: İleri yayılma sabiti
γ^-	: Geri yayılma sabiti
γ_m^+	: m modlu homojen iletim-asimetrik hattın ileri yayılma sabiti
γ_m^-	: m modlu homojen iletim-asimetrik hattın geri yayılma sabiti
γ_s^+	: s modlu homojen iletim-asimetrik hattın ileri yayılma sabiti
γ_s^-	: s modlu homojen iletim-asimetrik hattın geri yayılma sabiti
γ_0^+	: Serbest uzayın ileri yayılma sabiti
γ_0^-	: Serbest uzayın geri yayılma sabiti
α_1^m ve α_2^n	: Birimsiz terim
λ	: Dalga boyu ve M matrisinin özdeğeri
$\lambda_{1(2)}$	: 1(2). özdeğer
ξ_0	: Manyeto-elektrik bağlantı katsayısı
κ, χ_1, χ_2 ve χ_3	: Bilinmeyen parametreler
ψ	: Kısaltma terimi
Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 ve Ψ_4	: Yansıma katsayıları ve yayılma faktörleri arasındaki işlemlerin kısaltma terimleri
Λ_1, Λ_2 ve Λ_3	: Determinant işlemleri sonuç ifadeleri
θ	: Işık demetinin gelme (ve de yansıma) açısı
ϕ	: Işık demetinin kırılma açısı
Δ, Δ_L ve Δ_{L0}	: S-parametreleri arasındaki bir fark terimi
$\det(*)$	: “*” kare matrisinin determinanı
$\ln(*)$	: “*”ın doğal logaritması
$\text{Re}\{*\}$	: Kompleks nicelik “*”ın reel kısmı
$\text{Im}\{*\}$	: Kompleks nicelik “*”ın imajiner kısmı
$ * $	: “*”ın büyüklüğü
$\ *\ $	: “*”ın 2-normu (büyüklüğü)

$[*]^T$	: “*” matrisinin transpozu
$[*]^{-1}$	: “*” matrisinin tersi
$\nabla \times *$	: “*”ın rotasyoneli
$* \times \dagger$	: “*” ve “†”ın vektörel çarpımı
$\frac{\partial *}{\partial t}$	: “*”ın t zaman değişkenine göre kısmi türevi



GİRİŞ

Motivasyon

Malzemelerin üretim, işleme ve test aşamalarını içeren malzeme bilimi, disiplinlerarası bir alandır. Malzeme bilimi alanı, malzeme mühendisliği, metalurji mühendisliği, maden mühendisliği, fizik mühendisliği, elektrik-elektronik mühendisliği, makine mühendisliği, mikrodalga mühendisliği, biyomühendislik, inşaat mühendisliği, kimya mühendisliği, gıda mühendisliği, ziraat mühendisliği, tıp, eczacılık, fizik, kimya ve biyoloji gibi birçok alanı da kapsamaktadır. Aynı zamanda, mikrodalga mühendisliği de mikrodalga frekanslarında malzemelerin elektromanyetik (EM) özelliklerinin kesin bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Çünkü mikrodalga haberleşmenin önemi, sivil yaşamda, endüstride ve askeri alanda giderek artmaktadır.

Bu ihtiyaçlar doğrultusunda tez kapsamında; mikrodalga frekanslarında malzemelerin EM karakterizasyonu (özellik belirleme), incelenen malzemeye EM dalgalar gönderilerek, malzemenin elektrik ve manyetik kaynaklı vermiş olduğu tepkiye bağlı olarak belirlenen iki farklı çalışma ile sunulmuştur.

İlk olarak, line-line (LL) yöntemi kullanarak belirli özelliklerde tanımlanan (iletim-asimetrik (nonreciprocal) ve yansıma-simetrik/asimetrik) ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için kalibrasyon gerektirmeyen metodolojiler sunulmuştur. Bu metodolojilerde, elde edilen saçılma (S-) parametrelerine ek olarak birtakım nümerik yöntemler kullanılarak ve hesaplamalar gerçekleştirilerek karakterizasyon işlemi yapılmıştır.

İkinci olarak ise içinde bulunduğumuz yüzyılda çığır açan ve konvansiyonel (geleneksel) malzemelerden farklı olarak yeni bir tip malzeme olan metamalzeme (MM) kullanılarak hazırlanan, dikdörtgen dalga kılavuzuna yerleştirilmiş yeni bir çift taraflı yüksek hassasiyetli MM sensörü önerilmiştir ve malzemeye gönderilen EM dalgaya karşı alınan tepkinin rezonans frekansındaki değişimlerine bağlı olarak hangi malzeme özelliklerinin nasıl belirleneceği ile ilgili detaylı anlatımlar gerçekleştirilmiştir.

Hem ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi ile ilgili çalışmalarda hem de önerilen MM sensör ile malzeme özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmada kullanılan yöntemler ve analizler benzeşim (simülasyon) programı ve ölçümler ile desteklenmiştir.

Önerilen LL Yöntemi ile Kalibrasyon Kullanmaksızın Elde Edilen S-Parametrelerinden İletim-Asimetrik ve Yansıma-Simetrik/Asimetrik Mikrodalga Ağların/Hatların Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi

Dalga kılavuzları veya iletim hatları gibi mikrodalga ağlarının EM karakterizasyonu, uygulanan bir EM uyartı için ağların/hatların yansıma ve iletim yanıtlarının anlanması önemlidir. Böyle bir karakterizasyon S-matrisi, ABCD matrisi, dalga kaskat matrisi (Wave-Cascading Matrix, WCM) ve empedans ya da admitans matrisleri kullanılarak gerçekleştirilebilir (Engen and Hoer 1979; Pozar 2011). Bu matrislerden S-matris gösterimi ile birlikte WCM gösterimi, özellikle yüksek frekanslarda kaskat mikrodalga ağlarının karakterizasyonu için oldukça kullanışlıdır. S-matris ve WCM gösterimleri, atanan referans empedansına (Z_{ref}) bağlı olduğundan, bir mikrodalga ağının karakteristik empedansı (Z_0) genellikle Z_{ref} olarak dikkate alınır. Bununla birlikte, bu düşünceyi sınırlayan bazı pratik uygulamalar için (örneğin, Z_0 'ın frekans bağımlılığından dolayı tüm frekans boyunca Z_0 'ın özgün olmayan değeri gibi), Z_{ref} 'in Z_0 'dan farklı seçilmesi tercih edilir (Marks 1992). Böyle bir durum için mikrodalga ağı, zıt yönlerde hareket eden yarı (pseudo)-dalgaların üzerinden S-matris ve WCM gösterimleri kullanılarak analiz edilmelidir. Bu adım, thru-reflect-line (TRL) tekniği, çok hatlı TRL tekniği, line-reflect-line (LRL) tekniği ve line-reflect-match (LRM) tekniği gibi hat standart ölçümlerini içeren birçok kalibrasyon tekniğinde kullanılan metodolojidir (Engen and Hoer 1979; Eul and Schiek 1991; Marks 1991; Reynoso-Hernández 2002; Fuh 2016). Bu teknikler, iki portlu bir ağın WCM gösteriminin, bir portta bir referans empedansından başka bir referans empedansına dönüşümündeki bir faz-genlik değişim dönüşüm bölgesi için sıfır olmayan diyagonal elemanlara (ve sıfır diyagonal olmayan elemanlara) sahip olacağı ortak noktasını paylaşmaktadır. Bu ortak nokta, iletim-simetrik (reciprocal) yansıtmayan (Engen and Hoer 1979; Marks 1991; Reynoso-Hernández *et al.* 1999; Reynoso-Hernández 2002; Fuh 2013) ve simetrik olarak yansıtan (Reynoso-Hernández 2003) üniform hatların yayılma sabitinin (γ) belirlenmesi için yukarıda belirtilen kalibrasyon tekniklerinden yararlanmaktadır. Hasar (2018a), asimetrik yansımaları olan (S_{11} ve S_{22} sırasıyla ileri ve geri yansıma S-parametreleri olmak üzere $S_{11} \neq S_{22}$) üniform iletim-simetrik (yani S_{21} ve S_{12} sırasıyla ileri ve geri iletim S-parametreleri olmak üzere $S_{21} = S_{12}$) hatların γ 'sını belirleyen bu çalışmaları genişletmiştir (Hasar *et al.* 2020b, 2020c).

Öte yandan, kalibrasyon (iletim-simetrik yansıtıcı kalibrasyonu) gerektirmeyen yöntemler (şu andan itibaren LL yöntemleri olarak adlandırılmıştır) yayılma sabiti ölçümü yoluyla numune yüklü hatların veya ağların EM karakterizasyonunu da yerine getirmektedir (Baek *et al.* 1995; Lee and Nam 1996; Wan *et al.* 1998b; Janezic and Jargon 1999; Huynen *et al.* 2001; Lanzi *et al.* 2002; Farcich *et al.* 2008; Hasar 2008b, 2008c, 2016, 2017, 2018b;

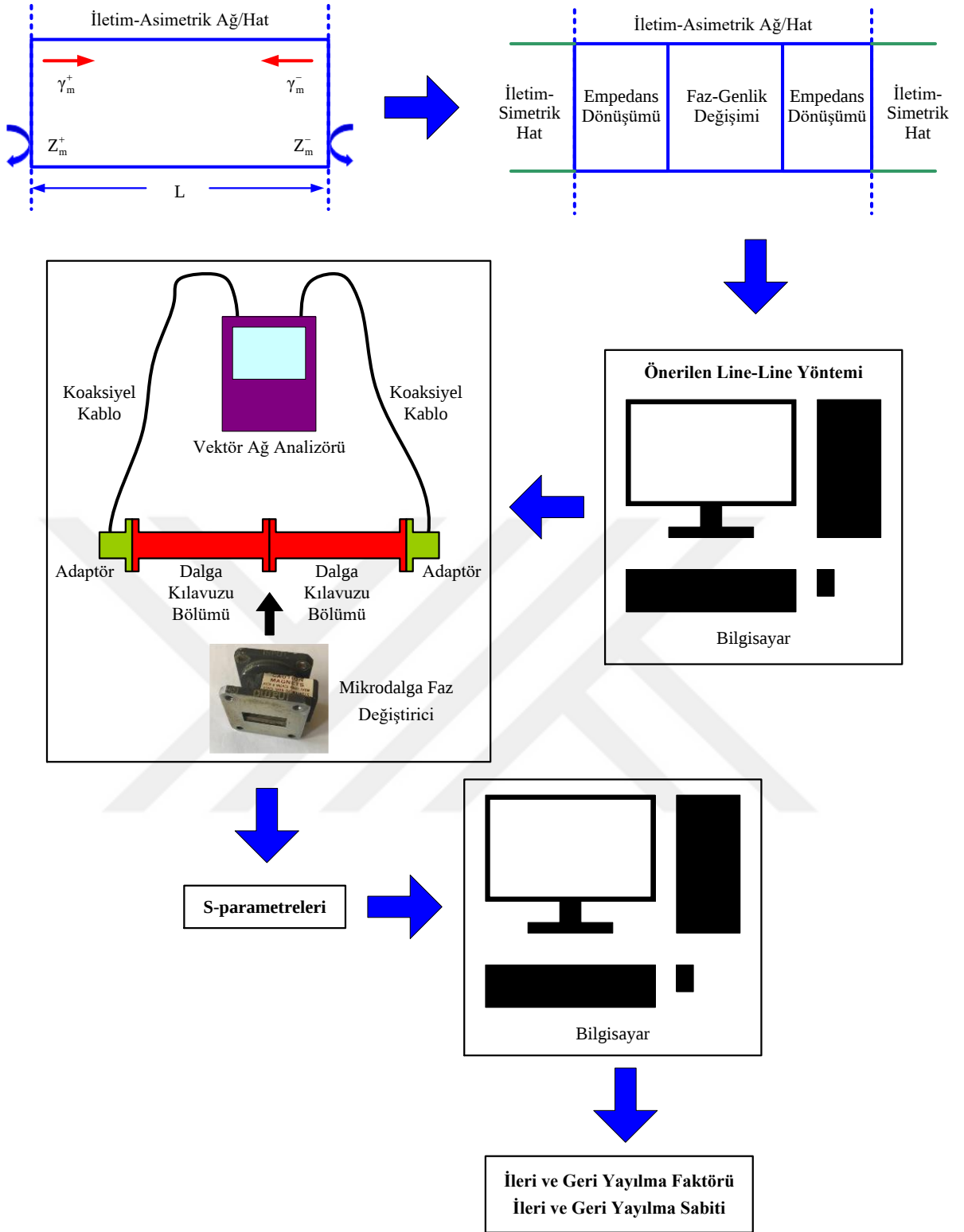
Caijun *et al.* 2011; Jebbor *et al.* 2013; Hasar and Kaya 2017, 2018; Hasar *et al.* 2017a, 2020a; Bao *et al.* 2018, 2019; Kalisiak and Wiatr 2019). Malzeme karakterizasyonu için iletim-simetrik yansıtıcı kalibrasyon standartı üzerinden kalibre edilmiş S-parametreleri kullanan geleneksel kalibrasyon bağımlı yöntemlerle (Nicolson and Ross 1970; Weir 1974; Baker-Jarvis *et al.* 1990; Chalapat *et al.* 2009; Hasar *et al.* 2015c; Hasar *et al.* 2017b) karşılaştırıldığında bu yöntemler, sadece yanlış yansıtıcı kalibrasyon standartlarından kaynaklanan ölçüm hatalarını ortadan kaldırmakla kalmaz aynı zamanda TRL gibi geleneksel kalibrasyon prosedürünü atlayarak iş yükünü de azaltmaktadır (Engen and Hoer 1979). Genelde kalibrasyon gerektirmeyen LL yöntemleri, iki özdeş fakat farklı uzunluktaki ağ/hat bölümlerinin S-parametrelerini ölçerler. Bu yöntemlerle ilgili tartışılması gereken iki ana konu vardır. İlk olarak mevcut kalibrasyon gerektirmeyen LL yöntemleri, ağ veya hattın simetrik yansıma özelliğine ($S_{11} = S_{22}$) (Baek *et al.* 1995; Lee and Nam 1996; Wan *et al.* 1998b; Janezic and Jargon 1999; Huynen *et al.* 2001; Lanzi *et al.* 2002; Farcich *et al.* 2008; Hasar 2008b, 2008c, 2016, 2017, 2018b; Caijun *et al.* 2011; Jebbor *et al.* 2013; Hasar and Kaya 2017, 2018; Hasar *et al.* 2017a; Bao *et al.* 2018, 2019; Kalisiak and Wiatr 2019) veya asimetrik yansıma özelliğine ($S_{11} \neq S_{22}$) (Hasar 2018a) sahip iletim-simetrisinin olduğunu varsaymaktadır. Literatürde yapmış olduğumuz incelemeler sonucunda, bu kalibrasyon gerektirmeyen LL yöntemlerinin hiçbirisi iletim-asimetrik ağlar veya hatların (yani $S_{21} \neq S_{12}$) γ (γ^+ ileri yayılma sabiti ve γ^- geri yayılma sabiti)'sını çıkaramaz. Böyle bir çalışma, mikrodalga faz kaydırıcı (Pozar 2011) veya kiral (chiral) (meta)malzemeler (Zhao *et al.* 2010) gibi iletim-asimetrik ağların araştırılması için önemli olabilir. İkinci olarak literatürdeki mevcut formlardaki bu kalibrasyon gerektirmeyen LL yöntemleri, yayılma sabitinin belirlenmesi için farklı uzunluklara sahip özdeş ağları/hatları kullanmayı gerektirmektedir. Fakat, gerçek ölçümlerde bu, bilhassa özellikleri frekansla değişen hatlar için böyle bir gereksinimi gerçekleştirmek zordur. Ayrıca, ikinci hatta bulunan herhangi bir fabrikasyon hatası, ölçümlerin doğruluğunu da azaltabilir. Bu nedenle, yalnızca bir ağın veya hattın kalibre edilmemiş S-parametre ölçümlerini kullanarak iletim-asimetrik ağların/hatların yayılma sabitinin belirlenmesi için yeni bir yöntem ihtiyacı vardır. Bu çalışmada, thru (direkt) bağlantıya sahip ağ/hat bağlantısının kalibre edilmemiş S-parametre ölçümleri kullanılarak bu ihtiyaca cevap verilmiştir. Ve yaptığımız çalışmalar sonucunda, yansıma-simetrik ($S_{11} = S_{22}$) ve yansıma-asimetrik ($S_{11} \neq S_{22}$) özelliğine sahip iletim-asimetrik ağların veya hatların yayılma sabitlerini ölçmek için yeni bir kalibrasyon gerektirmeyen LL yöntemi önerilmiştir ve önerdiğimiz yönteme ait iki farklı formülasyon sunulmuştur (Hasar *et al.* 2020b, 2020c).

Bu kapsamda çalışmamızda ilk olarak “Empedans, Genlik ve Faz Dönüşümünün Analizi” bölümünde homojen bir iletim-simetrik ağ veya hattın homojen bir iletim-asimetrik

ağ veya hatta (veya tam tersi de olabilir) bir dönüşüm için empedans değişimi, genlik değişimi ve faz değişiminin etkileri incelenmiştir. Sonrasında “Önerilen LL Yöntemi” bölümünde bu ağ veya hattın WCM gösterimini bir iletim-simetrik ağ veya hattı referans olarak ifade ettikten sonra, bir iletim-asimetrik ağ veya hat için ileri ve geri yönlerdeki γ ’nın belirlenmesi için önerilen metodoloji sunulmuştur. Böyle bir saptamayı gerçekleştirmek için iki farklı formülasyon kullanılmıştır. Daha sonra “Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi” bölümünde, yöntemimiz ve başka bir kalibrasyon gerektirmeyen yöntemle bir iletim-simetrik mikrodalga ağının ölçülen ileri ve geri yayılma sabitleri gösterilmiştir ve daha sonra yöntemimiz ve kalibrasyon bağımlı bir yöntemle iletim-asimetrik bir mikrodalga ağının ileri ve geri yayılma sabitlerinin çıkarımı gerçekleştirilerek verilmiştir (paragrafta anlatılan adımlar hakkında grafiksel özet için Şekil 1’e bakınız). Son olarak ise önerdiğimiz yöntemin önemli noktaları “Sonuç” bölümünün ilk paragrafında yeniden ifade edilmiştir. Böylece, LL yöntemi kullanarak iletim-asimetrik ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmamızın doğruluğu hem benzeşimlerle hem de ölçümlerle kanıtlanmıştır.

Çalışmamızda ikinci olarak ise “Bir İletim-Asimetrik Ağ/Hattın WCM Gösterimi” bölümünde asimetrik yansımalara sahip iletim-asimetrik üniform ağ/hattın WCM gösterimi, ABCD matris parametrelerinden S-parametrelerine yapılmıştır. Sonra “Diyagonalleştirme ve Dönüşüm Matrisi Ayırıştırma” bölümünde bu WCM matrisinin diyagonalize edilebileceği ve özdeğerleri, özvektörleri ve özbazları kullanılarak empedans dönüşüm ve genlik-faz dönüşüm matrislerine ayrıştırılabileceği gösterilmiştir. Daha sonra, iletim-asimetrik ağ/hattın kalibre edilmemiş S-parametrelerine ek olarak thru bağlantısının kalibre edilmemiş S-parametrelerine dayanan önerilen yöntem “Önerilen LL yöntemi” bölümünde sunulmuştur. Ardından, önerilen yöntem doğrulanmıştır ve doğruluğu, “Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi” bölümünde bir iletim-asimetrik ve bir iletim-simetrik mikrodalga ağının yayılma sabiti ölçümleriyle karşılaştırılmıştır (paragrafta anlatılan adımlar hakkında grafiksel özet için Şekil 1’e bakınız). Son olarak, yöntemimizin önemli noktaları “Sonuç” bölümünün ikinci paragrafında yeniden ifade edilmiştir.

Yukarıdaki iki paragrafta anlatılan adımlar, daha net ve anlaşılır olması bakımından Şekil 1’de, analiz edilecek ağ/hattı, ağ/hattın dönüşümünü, yöntemin uygulanmasını, ölçümlerin alınmasını, S-parametrelerinin elde edilmesini ve yayılma özelliklerinin çıkarılmasını içeren bir grafiksel özet olarak da vermiştir. Bu sayede hem tezin gidişatı daha net anlaşılmış olacaktır hem de ileriki bölümlerde hangi işlemlerin niçin yapıldığı daha iyi bir şekilde kavranacaktır.



Şekil 1. LL yöntemi kullanarak iletim-asimetrik ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi hakkında grafiksel özet.

Yeni Bir Çift-Tarafli Yüksek Hassasiyetli MM Sensörün Önerilmesi

Malzeme bilimi; tarım, gıda mühendisliği, tıbbi tedaviler, biyomühendislik, beton endüstrisi (Meyers and Inal 1985; Zoughi 2000; Chen *et al.* 2004a; Nelson and Trabelsi 2005) vb yerlerdeki malzemelerin imalatı, işlenmesi, taşınması ve yönetimini içeren çok disiplinli ve

geniş bir bilim dalıdır. Ultrason spektroskopisi (Khairi *et al.* 2015), fiber optik sensör (Narsaiah *et al.* 2012), yakın kızılötesi spektroskopisi (Porep *et al.* 2015), sıvı kromatografisi (Luna *et al.* 2006), kütle spektroskopisi (Supriyadi *et al.* 2004), radyo frekansı (Radio Frequency, RF) ve mikrodalga sensörleri (Gibson *et al.* 2008; Trabelsi and Nelson 2016) gibi pazarın ve endüstrinin özel gereksinimlerini karşılamak için literatürde mevcut her biri farklı özgün avantajlara sahip birçok teknik vardır. Bu teknikler arasında RF mikrodalga teknikleri, nispeten ucuz olmaları (kromatografiyle, yakın kızılötesi spektroskopisiyle ve optik sensörlerle kıyaslandığında), çevrimiçi ölçüm kapasitesi, tecrübeye daha az bağımlı olması (kromatografiye, yakın kızılötesi spektroskopisine ve kütle spektroskopisine kıyasla), hızlı algılaması, temassız, kirlenmeyen, tehlikeli olmayan özellikleri, çevre koşullarına daha az duyarlı olması (kızılötesi sensörlere referans olarak toz gibi), etiketsiz özelliği ve yüzey ve bulk bilgi sağlama yeteneği (yalnızca yüzey özellikleri sağlayan kızılötesi tekniklerle karşılaştırıldığında) açısından ön plana çıkmaktadırlar (Kharkovsky and Zoughi 2007).

Mikrodalga ve RF sinyalleri ile test edilen numune arasındaki etkileşim, belirli bir bileşenin yapısının, bileşiminin ve fonksiyonunun analizinin ilgi çekici olduğu çoklu uygulamalar için faydalıdır (Schueler *et al.* 2012). Bu etkileşim, aslında herhangi bir ortama özgü yapısal özellikler olan dielektrik (yalıtkanlık) sabiti (permittivite, ϵ) ve manyetik geçirgenlik (permeabilite, μ) gibi EM parametrelerin ölçümleri sayesinde test altındaki numunelerin fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyolojik özelliklerini tespit etmek için basit ve hızlı bir yöntem olarak belirlenebilir. Serbest uzay (free-space) yöntemleri (Akhter and Akhtar 2016), açık uçlu koaksiyel hat (open-ended coaxial-line) ve dalga kılavuzu yöntemleri (Baker-Jarvis *et al.* 1994), nonresonant dalga kılavuzu veya koaksiyel hat iletim/yansıma yöntemleri (Nicolson and Ross 1970), resonant yöntemleri (Kaatze 2013) ve metalik düzlemsel iletim hatları veya dalga kılavuzları (Hinjosa 2001) gibi geleneksel resonant ve nonresonant mikrodalga sensörleri ile karşılaştırıldığında MM rezonatörlerine/hücrelerine dayalı mikrodalga sensörleri aşağıdaki özelliklere sahiptirler.

i. Tespitte hızlıdır (Lee *et al.* 2011) ve güçlü bir lokalizasyonu geliştirilmiş seçicilik (Falcone *et al.* 2004; Lee and Yook 2008; Boybay and Ramahi 2009; Chen *et al.* 2012; Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Hu *et al.* 2014; Torun *et al.* 2014; Ali *et al.* 2016) sergileyebilirler.

ii. Evanescent (genliği azalan) spektrumunu yükselterek ölçüm doğruluğunu artırabilirler (Aydin *et al.* 2007; Torun *et al.* 2014).

iii. Algılama elemanlarının (MM'ler) çalışma dalga boyuna (λ 'ya) göre çok küçük üretilmesine izin verirler ve böylece elektriksel olarak ilaç kutusu boyutu kadar küçük rezonatörler tasarlanabilir (Lee *et al.* 2011; Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Ali *et al.* 2016).

iv. Test altındaki numune ve sensör arasındaki etkileşim, MM sensörlü alt dalga boyu (esasen $\lambda/10$) inklüzyonlarının biçim, şekil ve boyutunun seçici olarak ayarlanmasıyla optimize edilebilir ve geliştirilebilir.

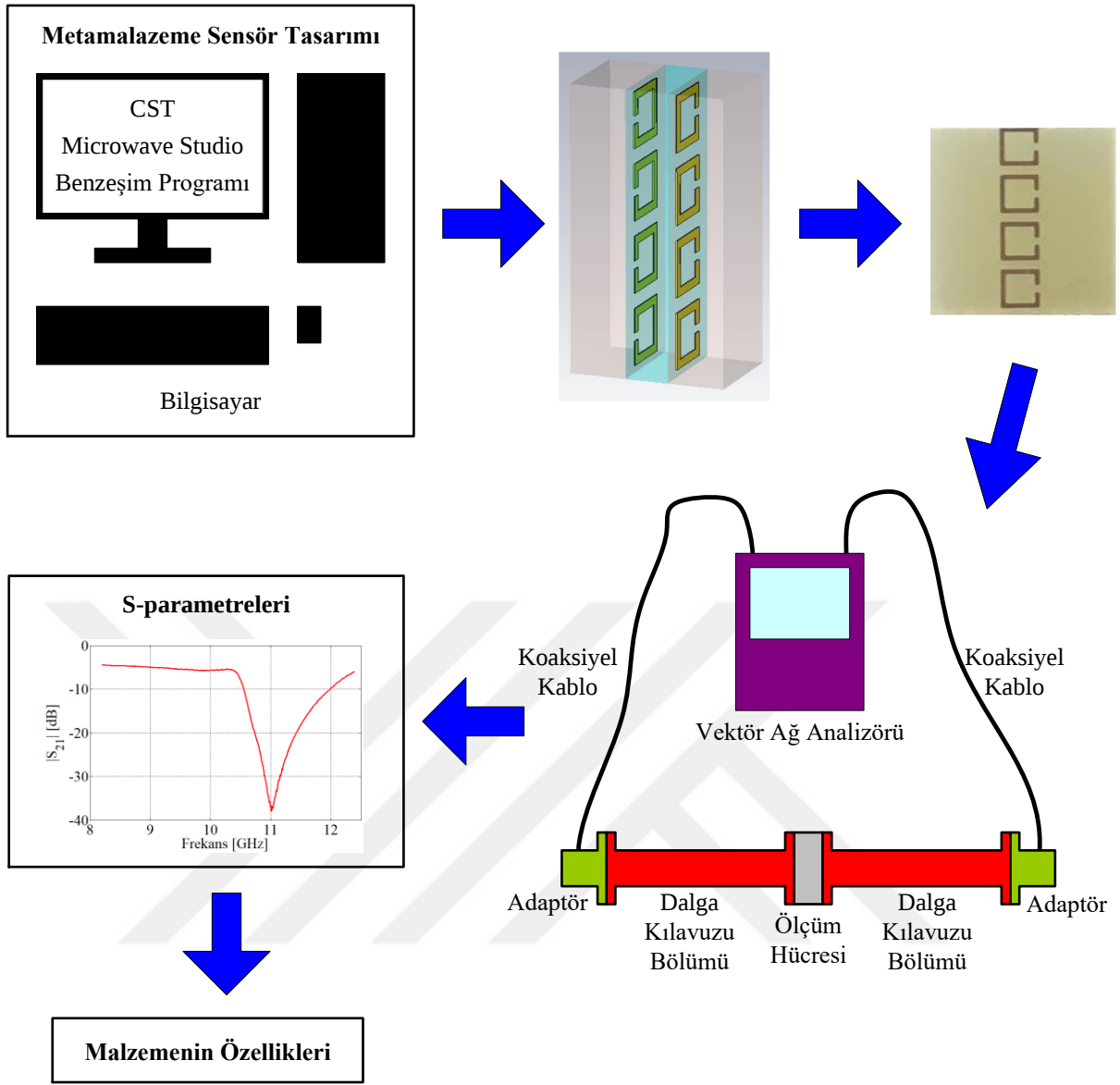
Literatürde, farklı amaçlar ve uygulamalar için tasarlanmış çeşitli mikrodalga MM sensörleri bulunmaktadır. Literatürdeki MM sensörlerinden sadece birkaçını belirtmek gerekirse, gerilme sensörü (Melik *et al.* 2010b), yer değiştirme sensörü (Wu *et al.* 2016), sıcaklık sensörü (Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Karim *et al.* 2015; Karim *et al.* 2017), kütle akış sensörü (Schueler *et al.* 2012), devir sensörü (Ebrahimi *et al.* 2014b), nem sensörü (Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Kim *et al.* 2018; Ekmekci *et al.* 2019), kimyasal konsantrasyon sensörü (Withayachumnankul *et al.* 2013; Ebrahimi *et al.* 2014a; Vélez *et al.* 2017; Altintas *et al.* 2019; Vélez *et al.* 2019), biyolojik sensör (Xu *et al.* 2011; Torun *et al.* 2014; Zhang *et al.* 2016; Li *et al.* 2019) ve çok fonksiyonlu sensördür (Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Karaaslan and Bakir 2014; Bakir *et al.* 2017). Bu MM sensörlerinin uygulanmasında, ayırık halka rezonatör (Split Ring Resonator, SRR) ve değişik formları, algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (He *et al.* 2010; Melik *et al.* 2010b; Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Withayachumnankul *et al.* 2013; Ebrahimi *et al.* 2014a; Hu *et al.* 2014; Torun *et al.* 2014; Ali *et al.* 2016; Vélez *et al.* 2017; Ekmekci *et al.* 2019; Vélez *et al.* 2019).

Yukarıda bahsedilen bu sensörler tek taraflı ve çift taraflı MM sensörleri olarak kategorize edilebilirler. Çift taraflı MM sensörleri (Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Karaaslan and Bakir 2014; Karim *et al.* 2015; Karim *et al.* 2017; Ekmekci *et al.* 2019) tek taraflı MM sensörleri (Withayachumnankul *et al.* 2013; Ebrahimi *et al.* 2014a; Torun *et al.* 2014) ile karşılaştırıldığında yakındaki malzemedan dolayı MM sensörünün kendisinin kapasitif/endüktif etkisinin değişimlerine ek olarak karşılıklı (mutual) kapasitif ve endüktif etkiler yoluyla malzeme özelliklerindeki dakikalık değişiklikleri izlemek için ek serbestlik derecesine sahiptirler. Bu ek serbestlik, çift taraflı MM sensörlerine gelişmiş seçicilik ve hassasiyet sağlamaktadır (Ekmekci *et al.* 2019). Bu çift taraflı MM sensörler arasında asıl ilginç; yüksek metalik dikdörtgen duvarlar, enine düzlemde kılavuz açıklığında yapının esasen sonsuz görüntülerini üreteceği (Trang *et al.* 2015; Hasar *et al.* 2017b) ve serbest uzay çift taraflı MM sensörleri, enine düzlemde periyodikliği gerçekleştirmek için (Karim *et al.* 2015) enine düzlemde birçok hücrenin inşasını/imalatını gerektireceği için

(Withayachumnankul *et al.* 2013) dikdörtgen dalga kılavuzu (Rectangular Waveguide, RW) yapılarına gömülü bu sensörlere odaklanmaktadır. Literatürde mevcut olan çift taraflı RW-MM sensörleri (Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Karaaslan and Bakir 2014; Ekmekci *et al.* 2019) incelendiğinde iki önemli dezavantajı not edilmiştir. İlk olarak, dalga kılavuzu açıklığı (dalga kılavuzu enine boyutu) sadece bir MM hücresi ile doldurulur. “Önerilen Çift Taraflı RW-MM Sensörünün Tasarımı ve Modeli” bölümünde gösterileceği gibi böyle bir dolgu, metalik muhafaza nedeniyle enine düzlemi üzerinde doğal görüntüleme etkisi olan çift taraflı RW-MM sensörlerinin verimliliğini azaltmaktadır. İkincisi, çift taraflı RW-MM sensörlerinin çalışma prensibi veya mekanizması eter (hava) manyetik rezonansa (manyetik alan, rezonatörlerin düzlemine normaldir) (Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Karaaslan and Bakir 2014; Karim *et al.* 2015; Karim *et al.* 2017; Ekmekci *et al.* 2019) veya elektrik rezonansa (elektrik alan, ayırık eksenine normaldir) (Ekmekci *et al.* 2019) dayanmaktadır. “Önerilen Çift Taraflı RW-MM Sensörünün Tasarımı ve Modeli” bölümünde doğrulanacağı gibi, elektrik ve manyetik rezonanslar arasındaki bağlantı, çift taraflı RW-MM sensörlerinin performansını optimize etmek için ek serbestlik derecesi sağlamaktadır.

Bu kapsamda çalışmamızda, çift taraflı RW-MM sensörlerinin yukarıda belirtilen iki dezavantajını ortadan kaldırmak için, ilk olarak “Önerilen Çift Taraflı RW-MM Sensörünün Tasarımı ve Modeli” bölümünde kılavuz enine düzlemde ve elektro-manyeto rezonans etkisi ile birden fazla rezonatör hücresine sahip yeni bir tip çift taraflı RW-MM sensörü önerilmiştir. Daha sonra “Önerilen Çift Taraflı RW-MM Sensörünün Fabrikasyonu” bölümünde önerdiğimiz bu RW-MM sensör yapısının fabrikasyonunu nasıl gerçekleştirdiğimizden bahsedilmiştir. Sonrasında “MM Sensör” bölümünde sensörümüzün benzeşimleri ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve elde ettiğimiz sonuçlar kıyaslanarak sensörümüz doğrulanmıştır (paragrafta anlatılan adımlar hakkında grafiksel özet için Şekil 2’ye bakınız). Son olarak ise önerdiğimiz MM sensörün önemli noktaları, bu sensör ile malzemelerin hangi özelliklerinin belirlenebileceği ve belirlemek için hangi yolların izleneceği “Sonuç” bölümünün üçüncü ve dördüncü paragraflarında yeniden ifade edilmiştir. Sonuç olarak, tasarlanan ve doğrulanan çift taraflı RW-MM sensörü sayesinde mikrodalga frekanslarında malzemelerin birtakım özelliklerinin belirlenmesini için literatüre daha hassas bir MM sensör kazandırılmıştır.

Yukarıdaki paragrafta anlatılan adımlar (sensör tasarlama, üretme, ölçüm ve malzeme özellikleri belirleme), daha net ve anlaşılır olması bakımından Şekil 2’de grafiksel özet olarak da gösterilmiştir. Bu sayede hem tezin gidişatı daha net anlaşılmış olacaktır hem de ileriki bölümlerde hangi işlemlerin niçin yapıldığı daha iyi bir şekilde kavranacaktır.



Şekil 2. Önerilen yüksek hassasiyetli çift taraflı RW-MM sensör ile malzeme özelliklerinin belirlenmesi hakkında grafiksel özet.

KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde tez çalışmasıyla ilgili konularda literatür özeti ile birlikte çok kısa ve öz olacak şekilde önemli bilgiler sunulmaktadır. Bu bölüm “EM Karakterizasyon”, “MM’ler” ve “MM’lerin Sensör Uygulamalarında Kullanımları” olarak üç kısımda incelenerek sunulmuştur.

EM Karakterizasyon

Malzemelerin üretim, işleme ve test aşamalarını içeren malzeme bilimi alanı, disiplinlerarası bir konu olup, malzeme mühendisliği, metalurji mühendisliği, maden mühendisliği, fizik mühendisliği, elektrik-elektronik mühendisliği, makine mühendisliği, mikrodalga mühendisliği, biyomühendislik, inşaat mühendisliği, kimya mühendisliği, gıda mühendisliği, ziraat mühendisliği, tıp, eczacılık, fizik, kimya ve biyoloji gibi birçok alanı kapsamaktadır. Aynı zamanda, mikrodalga mühendisliği mikrodalga frekanslarında malzemelerin EM özelliklerinin kesin bilgisine de ihtiyaç duymaktadır. Çünkü mikrodalga haberleşmenin önemi, sivil yaşamda, endüstride ve askeri alanda giderek artmaktadır. Malzemelerin istenen fiziksel, kimyasal ve mekaniksel gibi özelliklerini tespit etmek için, doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki tip yöntem bulunmaktadır. Doğrudan yöntemlerde malzemelerin istenen özellikleri, malzemenin özellikleri ile doğrudan bağlantılı ölçümlerden elde edilen verilerin analizi ile elde edilirken, dolaylı yöntemlerde ise bu özellikler dolaylı ölçümlerden elde edilen verilerin korelasyonu ile sağlanır. Birçok malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, bu malzemelerin EM özelliklerinin korelasyonu sağlanarak bulunabilir. Bu bağlamda malzemelerin EM özelliklerinin doğru ve kesin olarak bilinmesi çok ama çok önemlidir. Malzemelerin EM özellikleri, incelenen malzemeye EM dalgaların gönderilerek, malzemenin elektrik ve manyetik kaynaklı vermiş olduğu tepki ile belirlenmektedir. Bünye (kurucu) parametreleri olarak adlandırılan bu tepkiler, malzemenin uygulanan EM alana tepkisini gösteren bir nevi dürtü fonksiyonunu simgelerler (Hasar vd 2017).

Mikrodalga frekansları 300 MHz ile 30 GHz arasında olup bu değerlerde yaklaşık olarak 1 m ile 10 mm arasında bir dalga boyuna karşılık gelmektedir. Mikrodalgalar, malzemelerin mikroskobik ve makroskobik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan frekans spektrumunun başında gelmektedirler (Hasar vd 2017).

Malzemelerin EM karakterizasyonu için birçok mikrodalga yöntem geliştirilmiştir (Afsar *et al.* 1986; Baker-Jarvis *et al.* 1995; Kaatze 2000; Zoughi 2000; Chen *et al.* 2004a). Ultrason, infrared termografi, radyografi, yer penetrasyon radarı ve nükleer ölçümler ile kıyaslandığında, mikrodalga ölçümler zararlı değildirler, akustik dalgalara göre daha az saçılırlar, radyoaktif yöntemlere göre daha ucuzdurlar, iyi uzamsal çözünürlüğe sahiptirler ve metalik olmayan malzemelere rahatça nüfuz edebilmektedirler (Carriveau and Zoughi 2002; Kharkovsky and Zoughi 2007).

Mikrodalga ölçüm yöntemleri, resonant ve nonresonant yöntemler olarak iki grup altında toplanabilirler (Chen *et al.* 2004a). Resonant yöntemler hassas sonuçlar üretmesine karşın, çoğunlukla az kayıplı malzemelerin EM karakterizasyonunun analizi için kullanılmakta, özel malzeme işlemesi gerektirmekte ve sadece sınırlı bir frekans bandında ölçüm sonuçları üretebilmektedirler (Lonappan *et al.* 2009; Sheen 2009). Diğer taraftan, nonresonant yöntemlerin hassasiyetleri oldukça yüksek, daha az malzeme işlemesi gerektirmekte, geniş frekans spektrumunda sonuçlar üretebilmekte ve hem frekans hem de zaman uzayında analiz yapabilme imkanı sağlamaktadırlar (Afsar *et al.* 1986; Baker-Jarvis *et al.* 1995; Kaatze 2000; Zoughi 2000; Carriveau and Zoughi 2002; Chen *et al.* 2004a; Kharkovsky and Zoughi 2007; Lonappan *et al.* 2009; Sheen 2009; Hasar vd 2017).

Malzemelerin EM özelliklerinin belirlenmesi, çeşitli bileşenlerin ve kompozit yapıların analizi ve değişik uygulamaların gerçekleştirilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu da ancak malzemelerin EM özelliklerinin geniş bir frekans spektrumunda hassas ve doğru ölçümleri ile mümkün olacaktır. Nonresonant mikrodalga yöntemleri bu amaç doğrultusunda etkin yöntemler olarak kullanılabilirler. Resonant olmayan yansıma-iletim mikrodalga ölçüm yöntemleri de uzun yıllardan bu yana literatürde sıklıkla kullanılan yöntemler arasında bulunmaktadır (Nicolson and Ross 1970; Weir 1974; Baker-Jarvis *et al.* 1990; Boughriet *et al.* 1997; Hasar *et al.* 2014a, 2014d; Hasar vd 2017).

Malzemelerin EM karakterizasyonu için geliştirilen başka birçok mikrodalga yöntem de vardır (Nicolson and Ross 1970; Weir 1974; Chen *et al.* 2004a; Chalapat *et al.* 2009; Hasar and Westgate 2009). Bu yöntemler kalibrasyon bağımlı ve kalibrasyon bağımsız yöntemler olarak adlandırılabilirler. Kalibrasyon bağımlı yöntemler, malzemelerin EM özelliklerinin belirlenmesinde uygun bir kalibrasyon modeline ihtiyaç duyarlar (Nicolson and Ross 1970; Weir 1974; Chen *et al.* 2004a; Chalapat *et al.* 2009; Hasar an Westgate 2009). Bu amaç doğrultusunda, literatürde değişik tipte tek portlu ve çift portlu kalibrasyon modelleri önerilmiştir. Fakat bu modeller, kalibrasyon standartlarının mükemmel olmamasından ötürü, farklı ölçüm hatalarını beraberinde getirmektedirler (Hasar 2008a, 2008b; Hasar and Simsek

2009). Kalibrasyon bağımsız yöntemler, kalibrasyon standartlarından doğan ölçüm hatalarını ayıklamakta, toplam ölçüm zamanını azaltmakta ve ölçümlerin beklenmedik çevresel faktörlere karşı dirençli olmasını sağlamaktadırlar (Baek *et al.* 1995; Lee and Nam 1996; Wan *et al.* 1998a, 1998b; Janezic and Jargon 1999; Reynoso-Hernández *et al.* 1999; Huynen *et al.* 2001; Farcich *et al.* 2008; Hasar 2008a, 2008b, 2009; Hasar and Simsek 2009; Hasar and Barroso 2011a, 2012; Hasar *et al.* 2012a, 2014b; Guoxin 2015). Aynı zamanda, bu yöntemler geniş frekans spektrumlu kalibrasyon bağımlı ölçümler için gerekli olan çoklu standart kullanımı gereksinimini de ortadan kaldırmaktadırlar (Hasar 2008a, 2008b; Hasar and Simsek 2009; Hasar vd 2015).

Kimyasal katkılı konvansiyonel tip malzemelerin karakterizasyonuna ilaveten, şu anki eğilim değişik amaçlar için yeni yapay malzemeler üretmek ve onların karakterizasyonu için yeni yöntemler önermektir (Hasar vd 2015).

Literatürde yapılan araştırmaların çoğu, benzeşim programları kullanarak incelenen malzeme yapısı için S-parametreleri elde etmek ve bu S-parametrelerinden faydalanarak incelenen hücrenin/yapının EM özelliklerini belirleme üzerinedir (Smith *et al.* 2002, 2005; Chen *et al.* 2004b, 2005, 2006a; Driscoll *et al.* 2007b; Lubkowski *et al.* 2007; Menzel *et al.* 2008; Li *et al.* 2009; Hasar and Barroso 2011b; Jiang *et al.* 2011; Kim *et al.* 2011; Hasar *et al.* 2012b, 2012c; Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Cohen and Shavit 2015; Trang *et al.* 2015). Böyle bir yaklaşımdan elde edilen sonuçlar ile ölçümlerden elde edilen sonuçlar her zaman birbirleri ile örtüşmemektedir; çünkü benzeşim programları, hatalı veya uygun olmayan kalibrasyon standardı kullanımı, beklenmedik çevresel faktörler gibi ölçümlerden kaynaklanabilecek hataları dikkate almadan hesaplama yapmaktadırlar. Yine benzer şekilde, yapmış olduğumuz araştırmalar sonucunda, bazı özel durumlarda, benzeşim programları ile incelenen malzeme yapısı için elde edilen EM özelliklerin gerçeği yansıtmadığı gözlemlenmiştir (Lubkowski *et al.* 2007; Hasar and Barroso 2011b; Hasar *et al.* 2012b, 2012c; Hasar vd 2015).

Literatür araştırmaları sonucunda, yeni tip malzemelerin EM özelliklerinin belirlenmesi için yapılan ölçümlerde kullanılan yöntemlerin tümüyle kalibrasyon bağımlı yöntemler olduğu gözlemlenmiştir (Chen *et al.* 2006a; Driscoll *et al.* 2007b; Kim *et al.* 2011; Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Trang *et al.* 2015). Bu yöntemler kalibrasyon standartlarının mükemmel olmamasından ve geniş frekans spektrumlu ölçümlerde çoklu standart kullanımı gerektirmesinden dolayı, değişik tipte ölçüm hatalarını beraberinde getirmektedirler. Kalibrasyon bağımsız yöntemler, kalibrasyon bağımlı yöntemlerin bu dezavantajlarını ortadan kaldırarak hassas ve doğru ölçümlerin yapılmasına olanak sağlarlar

(Baek *et al.* 1995; Lee and Nam 1996; Wan *et al.* 1998a, 1998b; Janezic and Jargon 1999; Reynoso-Hernández *et al.* 1999; Huynen *et al.* 2001; Farcich *et al.* 2008; Hasar 2008a, 2008b, 2009; Hasar and Simsek 2009; Hasar and Barroso 2011a, 2012; Hasar *et al.* 2012a, 2014b; Guoxin 2015). Fakat, bu yöntemler genel olarak dielektrik malzemelerin dielektrik geçirgenlik değerlerinin ölçümü için kullanılmış olup, manyetik malzemelerin veya yeni tip malzemelerin EM özelliklerinin (bünye parametreleri) belirlenmesi için henüz adapte edilmemiştir (Hasar vd 2015).

MM'ler

Araştırmacılar, geçtiğimiz yüzyıl boyunca doğada bulunan konvansiyonel malzemelerin sınırlamalarından dolayı alternatif yollar aramışlardır. Çalışılan alternatifler, yapay malzemeler ya da dört gruba ayrılabilen ortamlar olarak adlandırılmaktadır. Birinci grup, yapay dielektrik maddeleri içermektedir. Bu alanda Kock tarafından yapılan bir başlangıç çalışması olarak çeşitli küçük metal parçacıklarından oluşan bir dielektrik lens, doğal bir dielektrik molekülüne benzer EM dalgalara cevap vermektedir (Kock 1948). İkinci yapay ortamlar grubu, yapay manyetiktir. Yapay manyetizasyon, ilk kez Schelkunoff tarafından incelenmiş ve düşük frekanslarda gelişmiş bir rezonans frekans aralığına sahip olan SRR'ler kullanılarak elde edilmiştir (Capolino 2009). Ve mikrodalga frekanslarında negatif manyetik geçirgenliğin ilk deneysel başarımını Lagarkov and Semenenko (1948) gerçekleştirmiştir. Üçüncü grup, negatif dielektrik sabitli bir tel ortamı olan yapay plazmadır (Brown 1960; Rotman 1962). Dördüncü grupta da bulk ortamda geriye doğru dalgalar vardır. Mandelshtam (1945), negatif dağılımdan dolayı bir ortamdaki dalganın geriye doğru negatif kırılmaya neden olduğunu göstermiştir. Ve Veselago (1968), bugün sol-elli medya (Left-Handed Media, LHM) olarak bilinen negatif EM parametrelere sahip malzemeler üzerine teorik bir çalışma yayınlamıştır (Buldu 2017).

EM özelliklerin tasarım parametreleri tarafından kontrol edilebildiği yapay ortam alanlarında yapılan bu tarih öncesi gelişmelerden sonra, Veselago'nun çığır açan yayını hatırlamak yararlı olacaktır (Veselago 1968). Bu yayında Veselago, aynı frekans aralığında negatif dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliğe sahip bir ortam önermiştir. Pendry (2000), Veselago (1968)'den yararlanarak, MM'ler (günümüzde iyi bilinen mühendislik malzemeleri) döneminin gelişmesine öncülük etmiştir. MM'ler, alışlagelmiş malzemelerin aksine negatif etkin dielektrik sabiti (ϵ_{etkin}) ve negatif etkin manyetik geçirgenlik (μ_{etkin}) özellikleriyle “meta” önekini almıştır (Ekmekçi 2016). Ayrıca MM'ler, optik/elektiriksel olarak küçük birim hücrelerden oluşan mühendislik kafesleridir. Bir birim hücre, dielektrik ana ortam ve üzerine uygulanan metal şeklinde parçacıklar içermektedir (Buldu 2017).

Günümüzde MM'ler en ilgi çekici bilim dallarından birisidir ve sıra dışı özelliklerinden ötürü antenler (Ziolkovski and Kipple 2003), filtreler (Garcia-Garcia *et al.* 2005), lensler (Pendry 2000; Rao and Ong 2003), görüntüleme (Rao and Ong 2003), güç bölücüsü (Antoniades and Eleftheriades 2005), saçılma (Li and Shen 2003), perdeleme (görünmezlik) (Pendry *et al.* 2006), dalga kılavuzu (Ozgun and Kuzuoglu 2007), soğurucular (Tao *et al.* 2008; Dincer *et al.* 2013) ve sensörler (Melik *et al.* 2010a; Ekmekci and Turhan-Sayan 2013) gibi pek çok uygulamada bilim adamlarının ilgisini çekmiştirler (Ekmekçi 2016).

MM tabanlı rezonatör yapılarının EM davranışları bir rezonans devresi ile modellenebildiğinden rezonans frekansları endüktif ve kapasitif etkilere oldukça bağımlıdır (Baena *et al.* 2004; Aydın *et al.* 2005; Chen *et al.* 2006b; Alici *et al.* 2007; Ekmekci and Turhan-Sayan 2009; Ekmekci *et al.* 2010, 2011). Endüktif etkiler tipik olarak rezonatör şekline ve boyutlarına bağlıdır. Diğer taraftan kapasitif etkiler ise taban malzemesi (substrat) dielektrik sabiti ve kalınlığı ile birlikte rezonatör topolojisine bağlıdır (Aydın *et al.* 2005; Alici *et al.* 2007; Ekmekci and Turhan-Sayan 2009; Ekmekci *et al.* 2010; Ekmekçi 2016).

Bir MM yapısının EM cevabı, birim hücrelerin uzunlukları ve bitişik hücreler arasındaki mesafeler, bu kompozit ortamdaki çalışma dalga boyundan (en az onda biri) çok daha küçük olması koşuluyla ϵ_{etkin} ve μ_{etkin} ile tanımlanabilir. MM'lerin alt dalga boylu yapısı sayesinde, ortamın homojenleştirilmesindeki bağımsız bileşenlerin etkileşimleriyle ilgili gecikmeler göz ardı edilebilir. MM'ler için dispersiyon (dağılım) denklemi aşağıdaki gibidir (Capolino 2009):

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \quad (1)$$

Burada ω , c ve k sırasıyla düzenli bir dalganın açısal frekansı, ışık hızı ve dalga vektörüdür. n ise ortamın kırılma indisidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$n = \sqrt{\epsilon_{\text{etkin}} \mu_{\text{etkin}}} \quad (2)$$

Denklem (2)'deki ϵ_{etkin} ve μ_{etkin} 'in kurucu parametreleri ortamın kendisine bağlı olup ϵ_{etkin} ve μ_{etkin} 'in işaretlerini ayrı ayrı analiz etmek için Maxwell denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Balanis 1999).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \mu = \mu_0 \mu_{\text{etkin}} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{etkin}} \quad (6)$$

Burada, ortamın doğrusal, homojen ve non-dispersif (saçılımsız) olduğu varsayılır ve $\varepsilon_{\text{etkin}}$ ve μ_{etkin} 'in bileşenleri reel değerlerdir. Ayrıca ε_0 ve μ_0 sırasıyla serbest uzayın (boşluğun) dielektrik sabitini ve serbest uzayın manyetik geçirgenliğini, E ve H sırasıyla elektrik alan şiddetini ve manyetik alan şiddetini, B ve D ise sırasıyla manyetik akı yoğunluğunu ve elektrik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. İlaveten, burada $\nabla \times$ "*"ın rotasyonelini ve $\frac{\partial}{\partial t}$ "*"ın t zaman değişkenine göre kısmi türevini göstermektedir. Zaman kuralının $e^{-i\omega t}$ olduğunu varsayarak bir düzlem dalga için fazör domeninde, E ve H arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir (Buldu 2017).

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H} \quad (7)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \varepsilon \vec{E} \quad (8)$$

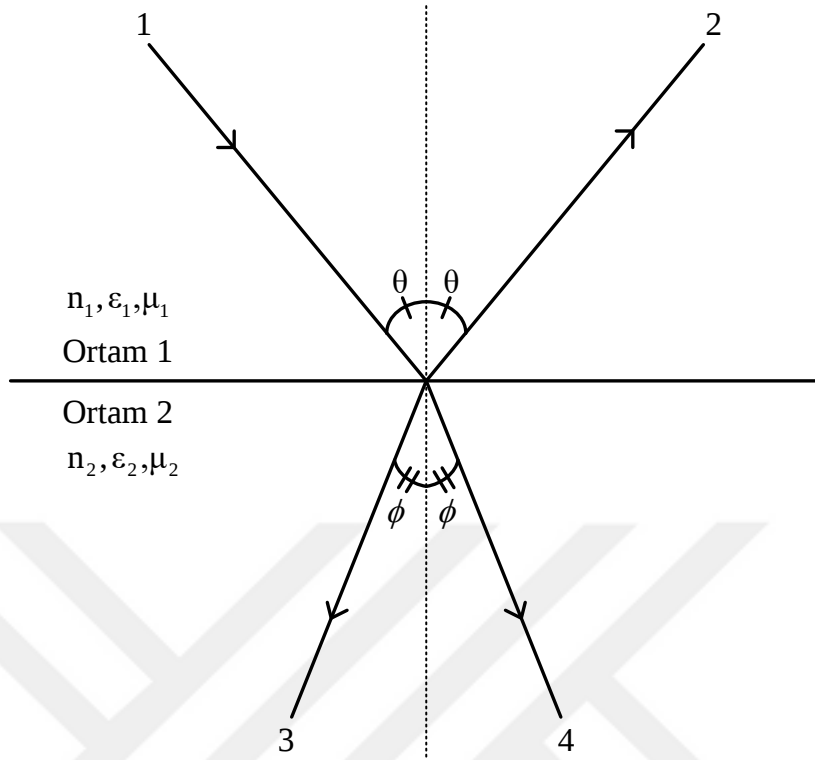
Burada $\times$ † "*" ve "†"ın vektörel çarpımını gösterir. Hem ε hem de μ pozitif değerlere sahip olurken $\vec{k}$, $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ vektörlerinin sağ-elli bir üçlü oluşturduğu denklem (7) ve (8)'den anlaşılabilir. Eğer ε ve μ değerleri aynı anda negatif ise, $\vec{k}$, $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ vektörlerinin üçlü seti sol-elli'dir (Veselago 1968). Enerji akısı (Poynting) vektörü $\vec{S}$, aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (9)$$

Denklem (9)'da $\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $\vec{S}$ vektör üçlü setinin sağ-elli olduğu açıktır. $\vec{S}$ ve $\vec{k}$ vektörleri sağ-elli bir ortamda aynı yönde, sol-elli bir ortamda zıt yönde oldukları bilinmektedir (Pafomov 1959). Grup hızı, Poynting vektörü $\vec{S}$ ile aynı doğrultuda olduğundan, grup hızının ve faz hızının, sol-elli bir ortamda zıt yönlerde olduğu açıktır (faz hızı, $\vec{k}$ vektörü ile aynı yönde olduğu için (Veselago 1968)).

İki farklı ortam arasındaki bir arayüze gelen dalganın kırılması analiz edilmek zorundadır. Şekil 3'ten, gelen bir ışık demetinin ortam 1'de, optik yol 1 boyunca ortam 2'ye doğru yayıldığı görülmektedir. Şekil 3'teki her iki ortam sağ-elli ise denklem (10)'daki olağan Snell yasası geçerlidir. Denklem (10)'a göre, yol 1 boyunca yayılan gelen ışık ışını, yol 4 boyunca kırılır ve ara yüzeyde yol 2 boyunca yansıtılır (Buldu 2017). Burada 1. ortamın kırılma indisi, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliği sırasıyla n_1 , ε_1 ve μ_1 'dir ve aynı

şekilde 2. ortamın kırılma indisi, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliği sırasıyla n_2 , ϵ_2 ve μ_2 'dir.



Şekil 3. Ortam 1 ve ortam 2 arasındaki bir ara yüzeyden bir ışık demetinin geçişinin gösterimi (1) gelen ışık demeti, (2) yansıyan ışık demeti, (3) 2. ortamdaki kırılan ışık demeti çift negatiftir ve (4) 2. ortamdaki kırılan ışık demeti, demet 1'in doğruluğuna sahiptir.

$$\frac{\sin \theta}{\sin \phi} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}} \quad (10)$$

Burada θ ve ϕ sırasıyla ışık demetinin gelme (ve de yansıma) ve kırılma açısıdır. Diğer taraftan, eğer ortam 2 sol-elli iken, ortam 1 sağ-elli ise, denklem (11) kullanımda olur (Veselago 1968). Denklem (11)'e göre, yol 1 boyunca yayılan gelen ışık demeti, yol 3 boyunca kırılır ve ara yüzeyde yol 2 boyunca yansıtılır (Buldu 2017).

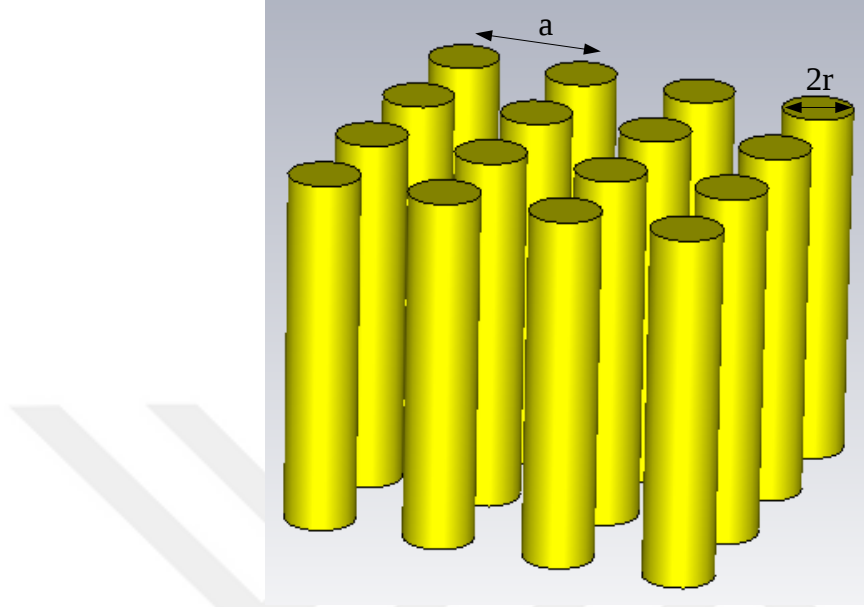
$$\frac{\sin \theta}{\sin \phi} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{p_2}{p_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}} \quad (11)$$

Burada p ortam doğrusu olmak üzere p_1 ve p_2 sırasıyla ortam 1 ve ortam 2'nin doğrularını temsil eder (ortam sağ-elli olduğu zaman $p = 1$ iken eğer ortam sol-elli olursa $p = -1$ olur) ve $|*|$ “*”ın büyüklüğünü belirtir.

Negatif dielektrik sabiti

Şekil 4'te, ince iletken tellerin periyodik bir dizisi gösterilmektedir. Bu ince metalik yapılar sayesinde radyasyon, yapıya derinlemesine nüfuz edebilir ve yapının üç boyutlu

özellikleri harekete geçirilebilir (Pendry *et al.* 1999). Elektron gazının plazma rezonansının, metallerin EM radyasyona karşı içsel bir reaksiyonunun sonucu olarak gerçekleştirilebileceği bilinmektedir (Pines and Bohm 1952; Bohm and Pines 1953). Bu formun dielektrik sabiti (ϵ_{metal}) fonksiyonunun tanımlaması şöyle verilir:



Şekil 4. Periyodik bir dizi ince tel dizisi (Pendry *et al.* 1999).

$$\epsilon_{\text{metal}} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (12)$$

Burada ω_p plazma frekansıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\omega_p^2 = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \quad (13)$$

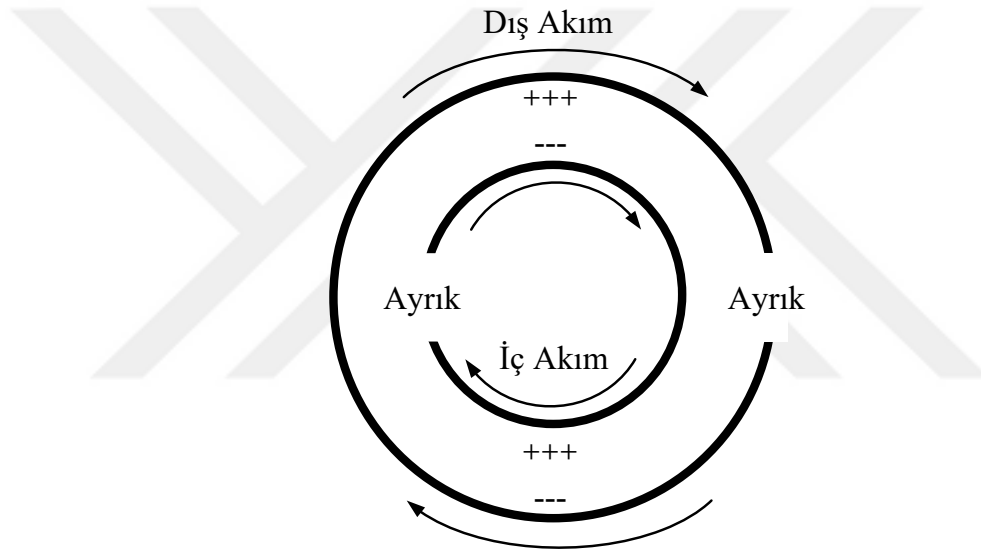
Bu ifade de n_e , m_e ve e sırasıyla elektron yoğunluğu, elektron kütlesi ve yüküdür. Şekil 4'te verilen ortam (ortamın elektrik alan bileşeni tel ekseninin yönündedir) GHz aralığında plazma frekansları altında denklem (12)'ye göre negatif dielektrik sabiti değerleri oluşturur. Bu ortamda plazma frekansı şöyle verilir (Pendry *et al.* 1999):

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (14)$$

Burada, Şekil 4'te gösterildiği gibi a ve r sırasıyla kare kafesin hücre kenarı ve ince tellerin yarıçapı iken c_0 serbest uzaydaki (vakumdaki) ışık hızıdır. Ayrıca burada $\ln(*)$, “*”ın doğal logaritmasını göstermektedir. Dielektrik sabiti değeri, doğru dizi parametrelerini seçerek düzenlenebilir.

Negatif manyetik geçirgenlik

Özellikle GHz frekanslarında en geleneksel malzemelerin manyetik tepkisi yok olur. Ayrıca, az çok aktif kalabilen bazı malzemeler (ferritler gibi) vardır. Bununla birlikte, ferritler ağır malzemelerdir ve mekanik özellikleri çoğu durumda yeterince uygun değildir. Pendry *et al.* (1999), doğal malzemelerin sınırlı manyetik tepkisini aşmak için bazı manyetik olmayan alt dalga boyu yapıları (baskın davranışı etkili manyetik geçirgenlik olan) önermişlerdir. Bu mikroyapılı malzemeler (mükemmel iletkenlik), önemli manyetik tepki (düşük frekanslarda) ve aşırı derecede düşük ağırlık ile tasarlanabilirler. Ayrıca, tasarlanan yapay manyetik yapılar, kritik yerlerde onları doğrusal olmayan malzeme ile doping ederek güçlü lokal tepkiye sahip olabilirler (Pendry *et al.* 1999). Pendry *et al.* (1999)'da önerilen yapay manyetik mikroyapının biri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Ayrıklara sahip iki silindirik tabakadan oluşan iç içe geçmiş bir yapay manyetik yapının üstten görünüşü (Pendry *et al.* 1999).

Şekil 5'te, SRR'ler dış manyetik alan şiddeti H_0 (silindir eksenine paralel veya sayfaya dik) ile uyarılarak etkin manyetik geçirgenlik, Pendry *et al.* (1999) gibi hesaplanır.

$$\mu_{\text{etkin}} = 1 - \frac{\frac{\pi r_c^2}{a_c^2}}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega r_c \mu_0} - \frac{2}{\pi^2 \mu_0 \omega^2 C r_c^3}} \quad (15)$$

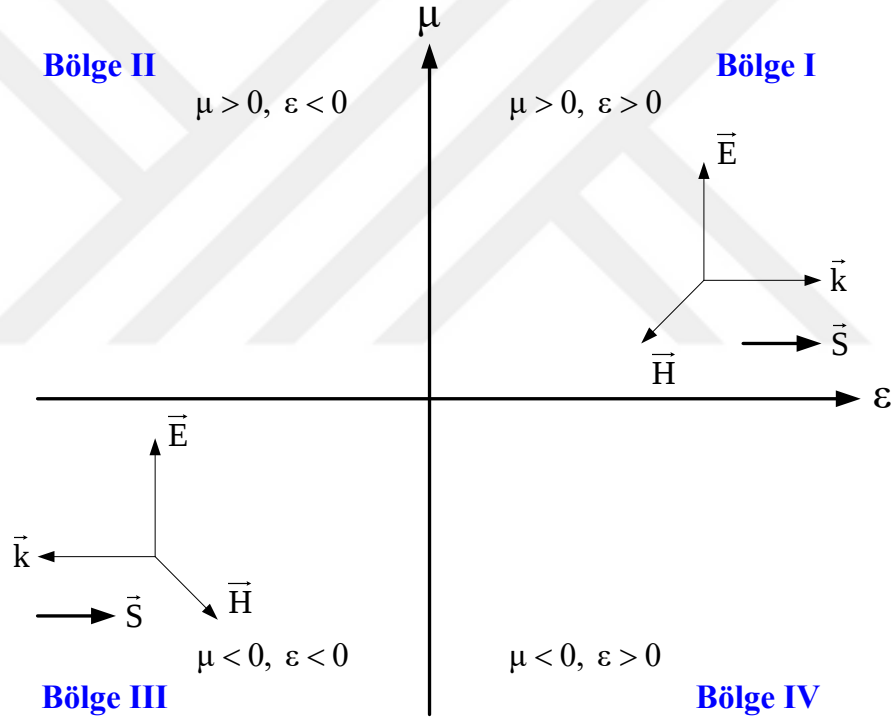
Burada σ birim alandaki silindir yüzeyinin direncidir, a_c ve r_c sırasıyla kafes sabiti ve silindirin yarıçapıdır, C birim alandaki kapasitanstır ve şöyle verilir:

$$C = \frac{\epsilon_0}{d_c} = \frac{1}{d_c c_0^2 \mu_0} \quad (16)$$

Burada d_c iki silindir arasındaki uzaklıktır. μ_{etkin} , silindirin manyetik endüktansı ve silindirik ayırık tabakalar arasındaki kapasitanstan dolayı bir rezonant forma sahiptir. Şekil 5'te gösterilen mükemmel iletken bir yapı için rezonans frekansının altında μ_{etkin} 'in önemli derecede artmış pozitif bir büyüklüğe (rezonans frekansına yakın daha büyük bir pozitif büyüklüğe) sahip olduğu, fakat rezonans frekansının üstünde μ_{etkin} 'in birden daha az olduğu ve rezonansa yakın doğal malzemelerde gözlenmeyen daha büyük negatif büyüklük değerlerine sahip olduğunu Pendry *et al.* (1999) kanıtlamışlardır (Buldu 2017).

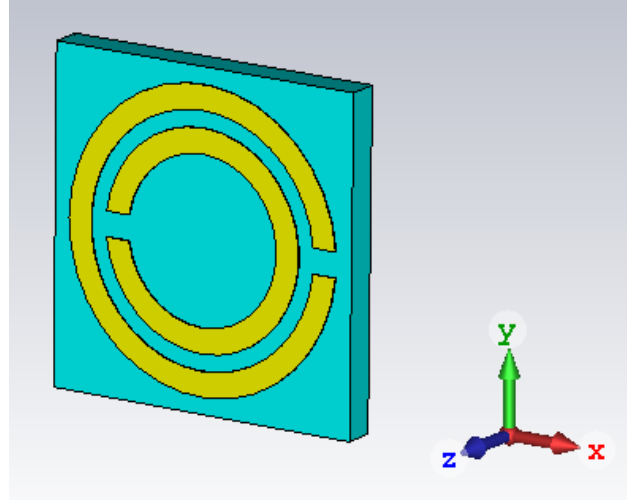
Sol-elli MM'ler

Sol-elli bir ortam, ilk kuramsal gerçekleştirilmesinden itibaren dikkat ve ilgi çekici olmuştur (Veselago 1968). Şekil 6'da gösterildiği gibi bir $\epsilon - \mu$ diyagramı, ϵ ve μ 'nin olası değerlerini göstermek için öğretici ve yol göstericidir.



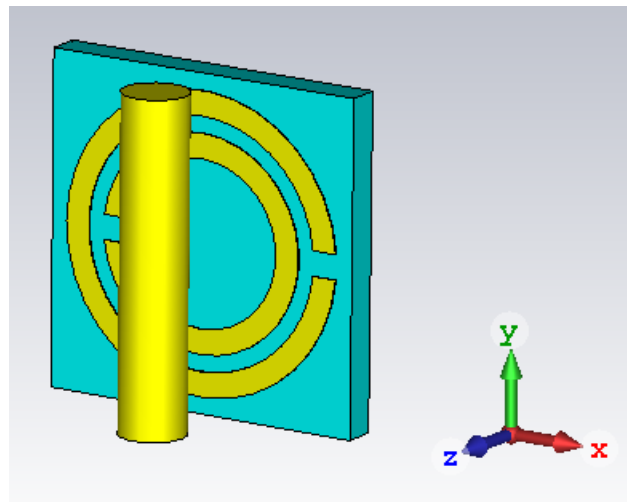
Şekil 6. $\epsilon - \mu$ diyagramı.

Şekil 6'da bölge I, hem ϵ hem de μ sıfırdan büyük olduğunda, sağ-elli olarak adlandırılan doğal malzemelerin özelliklerini temsil etmektedir. Sağ-elli malzemeler için, $\vec{S}$ vektörü $\vec{k}$ vektörü ile aynı doğrultudadır. Bölge II, elektrik plazma özelliğini temsil etmektedir. Bölge II'de ve ayrıca manyetik plazmanın özelliklerini temsil eden bölge IV'te dalga yayılımı (evanescent dalgalar) yoktur. Bizim ilgi alanımız olan bölge III, negatif ϵ ve μ değerlerine sahip sol-elli malzemelerin özelliklerini temsil etmektedir. Bu bölgede, $\vec{S}$ vektörünün $\vec{k}$ vektörü ile zıt yönde olduğu görülmektedir (Buldu 2017).



Şekil 7. Bir SRR hücresinin yapısı (Pendry *et al.* 1999; Smith *et al.* 2000).

Smith *et al.* (2000) bazı sayısal benzetimlerle, Şekil 7’deki birim hücre yapısının, ya ϵ_{etkin} ’in ya da μ_{etkin} ’in negatif olduğu bir bant boşluğu (dalga yayılımı yok) bölgesine sahip olduğunu kanıtlamışlardır. Bant boşluğunun negatif ϵ_{etkin} veya negatif μ_{etkin} ’den kaynaklanıp kaynaklanmadığını özgün olarak belirlemede, Şekil 7’de gösterilen SRR’lerden oluşan sonlu periyodik bir yapının EM yanıtını simüle etmek için bir EM simülatör kullanılmıştır. İlk olarak, periyodik yapı, halka eksenine paralel olan harici bir manyetik alan $\vec{H}$ tarafından ve ikinci olarak halka eksenine dik olan harici bir manyetik alan $\vec{H}$ tarafından aydınlatılmıştır. Böyle bir SRR yapısının, rezonans frekans bölgesine yakın negatif μ_{etkin} ile bir dış paralel manyetik alana tepki verdiği zaten kanıtlanmıştır (Pendry *et al.* 1999). Dolayısıyla, ikinci durumda bant boşluğunun negatif μ_{etkin} değerinden dolayı olduğu açıktır. Tüm durumlarda elektrik alan vektörü $\vec{E}$ halkaların düzlemine paraleldir (Buldu 2017).



Şekil 8. Bir SRR ve ince bir tel ile birlikte sol-elli MM birim hücre yapısı (Smith *et al.* 2000).

Yayılmadaki bu bant boşluğunu ortadan kaldırmak için, negatif ϵ_{etkin} ve negatif μ_{etkin} ile eşzamanlı olarak harici bir manyetik alana (halka eksenine paralel) yanıt veren yeni bir

tasarıma ihtiyaç duyulmuş olup bu amaçla, ince silindirik teller Şekil 8’de gösterildiği gibi, gelen elektrik alanı yönünde SRR’lerin arasına eklenmiştir (Smith *et al.* 2000).

MM’lerin Sensör Uygulamalarında Kullanımları

Veselago (1968), dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliğin belirli bir frekans aralığında birlikte negatif olması durumunda buna bağlı olarak ortamın negatif kırılma indisine sahip olacağına dair ilk teorik çalışmayı gerçekleştirmiştir.

Mok *et al.* (1988), iki ofset frekans seçicinin performansını belirlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Mittra *et al.* (1988), mikrodalga ve optikte filtreler olarak önemli uygulamalar bulan frekans seçici yüzeyleri analiz etmek için bir dizi tekniklerden bahsetmişlerdir.

Pendry *et al.* (1996, 1999), negatif kırılma indisinin elde edilebileceğine yönelik çalışmalar ortaya koymuşlardır ve negatif dielektrik katsayısı ve negatif manyetik geçirgenlikten bahsetmişlerdir. Pendry ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar MM’lerin üretimine yönelik önemli bir adım olmuştur (Bakır 2016).

Smith *et al.* (2000), mikrodalga frekanslarında aynı anda negatif etkin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip bir frekans bölgesi sergileyen, manyetik olmayan SRR’leri ve sürekli tellerin periyodik dizisini temel alan kompozit bir ortam olan ilk MM’yi üretmişlerdir. Smith and Kroll (2000), sol-elli malzemede negatif kırılma indisini ispatlamışlardır.

Munk (2000), frekans seçici yüzeyleri, üzerlerinde periyodik olarak yerleştirilmiş metalik rezonatörler bulunan bant durdurma ve bant geçirme filtre özellikli yapılar olarak gerçekleştirmiştir (Bakır 2016).

Shelby *et al.* (2001), etkin kırılma indisinin negatif olduğu bir frekans bandı sergileyen yapılandırılmış bir MM üzerinde mikrodalga frekanslarında deneysel saçılma verilerini sunmuşlardır.

Smith *et al.* (2002), etkin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerini belirlemek için, EM MM’lerin sonlu uzunlukları üzerindeki transfer matrisi benzeşimlerinden hesaplanan yansıma ve iletim katsayılarını analiz etmişlerdir. Bu analizi, tellerin, SRR’lerin ve hem tellerin hem de SRR’lerin periyodik düzenlemelerinden oluşan yapılar üzerinde gerçekleştirmişlerdir.

Ziolkowski (2003), X-bandı frekanslarında çift negatif ortam (hem dielektrik sabiti hem de manyetik geçirgenliğin birlikte negatif olduğu ortam) özellikleri sergileyen birkaç

MM'nin tasarımını, üretimini ve testini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada benzeşimler ve deneysel sonuçlar verilmiştir.

Bilotti *et al.* (2006), kompakt bir mikrodalga soğurucu için yeni bir fikir önermişlerdir ve uygun bir dizi SRR ile yapılan rezonant bir mikrodalga soğurucu tasarlamışlardır. Bu çalışmada, MM'lerin sinyal emici özelliğine ilk olarak rastlanılmıştır (Bakır 2016).

Sabah *et al.* (2006), EM dalgaların çift negatif bir levha ile etkileşimi nedeniyle yansıyan ve iletilen güçleri ayrıntılı olarak incelemişlerdir ve MM'lerin potansiyel uygulama alanlarını araştırmışlardır.

Sabah and Uckun (2008), birim hücresi üçgen SRR ve tel şeridi olan yeni bir MM tasarımı yapmışlardır. Tasarlanan yeni MM'nin ilgilenilen frekans bölgesinde çift negatif özellikler sergilediğini ve MM'lerin potansiyel uygulamaları için üretilebileceğini göstermişlerdir.

Zhu *et al.* (2008), üçgen SRR'ler ve tellerden oluşan yeni bir tip sol-elli malzeme türü sunmuşlardır. Yine Zhu *et al.* (2009), iki çeşit üçgen SRR'ler ve tellerden oluşan yeni bir sol-elli malzeme türü sunmuşlar ve yapının üretim ve testini gerçekleştirmişlerdir.

MM'ler ilerleyen zamanlarda farklı bir uygulama alanı da bulmuştur. Bu uygulama alanı; MM'ler sensörlere entegre edilerek, sensörlerin algılama hassasiyetini ve kazancını arttırmaya yöneliktir (Ünal 2017).

Melik *et al.* (2009b) mekanik deformasyona son derece duyarlı olan MM tabanlı gerinim sensörleri önermişlerdir. SRR'leri kullanarak, yumuşak dokuda (örneğin, kırık iyileşmesi) biyoplantın algılanmasına izin vererek, diğer RF yapılarına kıyasla birim alan başına daha düşük rezonans frekansları elde etmişlerdir. 5×5 SRR mimarisindeki kablosuz sensörler, düşük doğrusal olmayan hatayla yüksek hassasiyet vermiştir.

He *et al.* (2010), tip-şeklindeki SRR MM'yi, cihaz boyutunu ve rezonans frekansını azaltmak ve kalite faktörünü iyileştirmek için ince film sensörü olarak sunmuşlardır. Yapı, farklı durumlarda rezonans frekans kaymasını sayısal yöntemle araştırmak için X-bandı dalga kılavuzunun içine yerleştirilmiştir. Geleneksel yapıların aksine tip şeklindeki tasarım, önerilen ince film sensörüne yüksek hassasiyet kazandırmıştır.

Sun *et al.* (2011), oldukça geniş bir frekans bandında çalışan soğurucu tasarlamışlar ve tasarlanan yapının kullanım alanlarından bahsetmişlerdir.

Chen *et al.* (2012), temel olarak MM'lere dayalı algılama ile ilgili son ilerlemeleri sunmuşlardır ve MM'lere dayalı üç farklı sensör tipinin (mikrodalga biyosensör, terahertz

biyosensör ve plazmonik biyosensör) tespit sürecini, hassasiyetini, bunların zorluklarını ve beklentilerini ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir. Ayrıca, her bir sensörün tasarım yönergelerini ve performanslarını karşılaştırmışlardır.

Ramahi *et al.* (2012), MM'lerin EM enerji toplama hücresi olarak kullanılabileceğini SRR kullanarak kanıtlamışlardır.

Cimen (2013), yeni bir çift bant frekans seçici yüzey sunmuştur. Tasarlanan ve imal edilen yapı, birbirine yakın aralıklı çalışma bantlarına ve her çalışma bandında yüksek seçici frekans tepkisine sahiptir. Hem ölçüm hem de benzeşim sonuçları, frekans seçici yüzey yapısının birbirine çok yakın değerlerde olan 8,80 ve 9,54 GHz frekanslarında çalıştığını göstermiştir.

Cheng *et al.* (2013), fraktal frekans seçici yüzey ve dirençli filmlere dayanan geniş bantlı bir MM soğurucu tasarlamışlardır ve 19 GHz'lik güçlü bir soğurucu bant genişliği oluşturmuşlardır.

Ekmekci and Turhan-Sayan (2013), çok katmanlı bir substrata sahip broad-side coupled SRR topolojisine dayanan çok fonksiyonlu bir MM sensör tasarlamışlardır. Mikrodalga ve terahertz uygulamalarında kimyasal, biyolojik ve basınç algılama için etkili bir şekilde kullanılabilen MM sensörü, çok iyi hassasiyetleri ile nem sensörü, yoğunluk sensörü ve sıcaklık sensörü olarak da kullanabilmişlerdir.

Karaaslan and Bakir (2014), çift ayrıklı ayırık halka rezonatörlerine (Split Ring Resonators With Double Splits, SRDS'lere) dayanan bir kiral MM'nin sensör yeteneklerini hem teorik hem de deneysel olarak X-bandı aralığında göstermişlerdir. Ve bu çalışmada, yoğunluk, basınç, nem ve sıcaklık sensör konfigürasyonlarını da çalışmışlardır (Bakır 2016).

Ali *et al.* (2015), MM elemanlarla yüklü bir dalga kılavuzu sensöründen elde edilen bir veri kümesinde metalik yüzeylerde gözle görülemeyen milimetre altı çatlakları tespit etmek için yapay bir zeka modeli uygulayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Sabah (2016), sıcaklık, basınç, nem ve yoğunluk gibi MM soğurucu tabanlı sensörlerin birkaç önemli uygulamasını sunmuştur. Algılama yeteneği çoğunlukla rezonans frekansını göz önünde bulundurduğundan, rezonans frekansındaki kaymaların sıcaklık, basınç, nem ve yoğunluk değişikliklerine bağlı olarak doğrusal veya doğrusal olmayan bir şekilde meydana geldiği frekans aralığının dikkatlice seçildiği model, sırayla x şekilli rezonatörler (X Shaped Resonators, XSR'ler), dielektrik substrat, algılama tabakası (ara katman), tekrar dielektrik substrat ve metalik plakadan oluşmaktadır. Algılama katmanı, sıcaklık, basınç, nem ve yoğunluk değişimlerine bağlı olarak dielektrik davranışını değiştirmektedir ve söz konusu

parametrelerin bilinmeyen değerlerinin belirlenmesine izin vermektedir. Sonuçlara göre, önerilen model çalışılan mikrodalga frekans bandı için sayısız algılama uygulamalarında kullanılabilmektedir.

Yoo *et al.* (2016), bir MM soğurucu kullanarak gerçekleştirilen yeni bir EM tabanlı kimyasal sensör önermişlerdir. Gerçekleştirilen kimyasal sensör, soğurma rezonans frekansındaki kaymayı analiz ederek sıvıların konsantrasyonundaki özellikleri ve değişiklikleri tespit etmektedir.

Dincer *et al.* (2016), polarizasyon bağımsızlığına sahip silindirik bir dalga kılavuzuna dayanan çok bantlı mükemmel MM soğurucuyu sayısal olarak sunmuşlar ve ayrıntılı olarak araştırmışlardır. Önerilen soğurucu çok basit bir konfigürasyona sahiptir ve yapının boyutlarını ayarlayarak mikrodalga frekans rejimi içindeki esnek frekans aralıklarında çalışmaktadır. Önerilen MM soğurucu, tıbbi teknolojiler, sensörler ve savunma endüstrisinde sayısız potansiyel uygulama alanına sahiptir.

Bakir *et al.* (2016), mikrodalga frekans rejiminde MM soğurucu tabanlı bir EM enerji toplama ve yoğunluk sensörü uygulaması sunmuşlardır. Yapının soğurma davranışını doğrulamak için soğurma davranışı, enerji toplama ve algılama yetenekleri ile birlikte deneysel olarak test edilmiştir. Sonuçlar MM soğurucunun enerji hasat uygulamaları için kolay ve verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, modelin ek bir özelliği olarak, bir yoğunluk sensörü uygulaması da gerçekleştirilmiştir. Bu yapının çok fonksiyonlu bir cihaz olarak kullanılabileceği ve diğer birçok algılama uygulaması için yapılandırılabilmesi de gösterilmiştir.

Wang *et al.* (2017), çift yuvalı dikey ayırık halka rezonatörlerine (Double-Slot Vertical Split Ring Resonators, DVSRR'lere) dayanan ultra hassas bir MM sensörünü terahertz frekansında tasarlamış ve sayısal olarak hesaplamışlardır. Araştırma sonuçlarına bakıldığında, DVSRR tasarımının yapısal simetrisi ile indüklenen bianizotropinin ortadan kaldırılmasının, yüksek kalite faktörü rezonansının elde edilmesine yardımcı olduğunu göstermektedir. SRR'lerin substrattan yukarı kaldırılması, substrattan kaynaklanan dielektrik kaybını keskin bir şekilde azaltmıştır.

Bakir *et al.* (2018), SRR kullanılarak tasarlanan kiral MM sensör (Chiral Metamaterial Sensor, CMS) aracılığıyla metanol, etanol, izopropil alkol ve benzinin yakıt karışımının saflığını araştıran ilk çalışmayı yapmışlardır.

Abdulkarim *et al.* (2019), sıvı kimyasalların elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için MM tabanlı bir soğurucu tasarlamışlar ve ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, X-bandı

frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Kimyasal sıvıların (asetonitril, aseton, metanol, etil alkol ve benzen) kısmi dielektrik sabitleri, ilgili frekans aralığında vektör ağ analizörü (Vector Network Analyzer, VNA) kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin, benzeşim değerleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca önerilen yapının, gelecekte anlık tepkiye sahip elektrokimyasal sensör için iyi bir aday olduğu da düşünülmektedir.

Yukarıdaki literatüre bakıldığında MM tabanlı sensörlerin özellikle son zamanlarda SRR yapılarının biyolojik ve kimyasal sensör uygulamaları, mikrodalgadan optik bölgelerine kadar uzanan geniş bir spektrumda rapor edilmektedir. Çok ince dielektrik tabakalarına ya da analiz altındaki çok düşük madde miktarlarına yüksek hassasiyet göstermeleri, etiketsiz (label free) algılama özellikleri, düşük maliyetlerle kolayca üretilebilmeleri, elektriksel küçük (ve fiziksel küçük) olmaları ve kullanım alanlarının çokluğu bu sensör yapılarına olan ilgiyi arttırmıştır (Tao *et al.* 2010; Ekmekçi 2016).

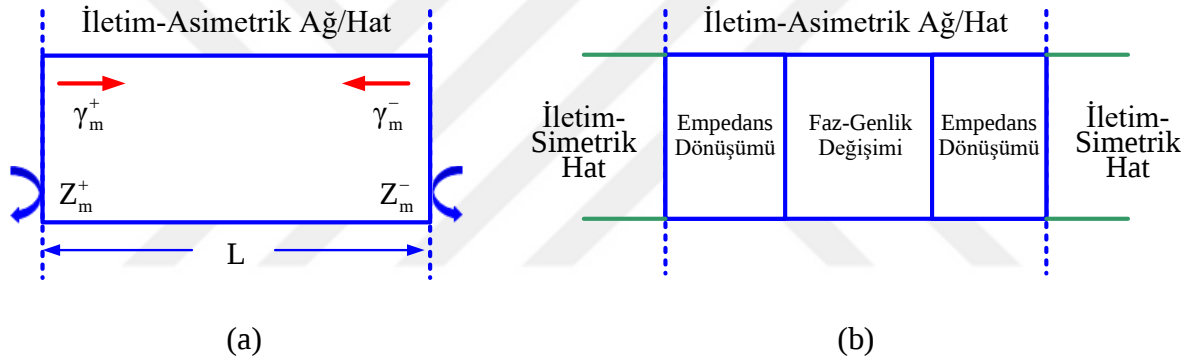
SRR tabanlı sensör uygulamaları temelde çevresel parametrelerdeki değişimlerin, rezonans frekansında neden olduğu değişimlerin gözlemlenmesine dayalıdır. Bu sebeple, algılanacak olan ortam parametresinin (örneğin basınç, sıcaklık, nem, algılanacak olan biyolojik ya da kimyasal ajanlar) en az bir SRR tasarım parametresi üzerinde etkisinin olması ve böylece rezonans frekansını kaydırması gerekmektedir (Ekmekci and Turhan-Sayan 2013). Pek çok SRR tabanlı çalışmada algılama amacıyla SRR yapısının ayrıık kapasitansının değiştirilmesi amaçlanmıştır (Driscoll *et al.* 2007a; Jaksic *et al.* 2007, 2011; Al-Hanib *et al.* 2008; O'Hara *et al.* 2008; Melik *et al.* 2009a; Arritt *et al.* 2010; Chang *et al.* 2010; He *et al.* 2010, 2011; Jaksic 2010; Jeppesen *et al.* 2010; Elhawil *et al.* 2011; Lee *et al.* 2011; Pryce *et al.* 2011; Xu *et al.* 2011; Chen *et al.* 2012). SRR topolojisi ve kullanılan taban malzemelerinin özellikleri değiştirilerek yapıların algılama yeteneklerinin geliştirilebildiği gösterilmiştir (Aydin *et al.* 2005; Ekmekci and Turhan-Sayan 2009, 2013; Melik *et al.* 2009a, 2009b, 2010a, 2010b; Ekmekci *et al.* 2010; Tao *et al.* 2010). Bu çalışmalarda, işlem koşullarına ve meta-yüzeyin tasarımına bağlı olarak moleküllerin SRR yapıları üzerine seçici olarak tutunması sağlanacak ve bu da rezonans frekansında kayma olarak karşımıza çıkacaktır (Ekmekçi 2016).

MATERYAL VE YÖNTEM

İletim-Asimetrik ve Yansıma-Simetrik Mikrodalga Ağların veya Hatların Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi

Empedans, genlik ve faz dönüşümünün analizi

Bu bölümde ilk olarak homojen bir iletim-simetrik ağ veya hattın homojen bir iletim-asimetrik ağ veya hatta (veya tam tersi de olabilir) empedans dönüşümünün etkisi incelenecektir (Şekil 9(a)). Daha sonra homojen bir iletim-asimetrik hat boyunca (Şekil 9(b)) genlik ve faz değişimlerinin etkisi gösterilecektir. Çalışmamız boyunca, bu iletim-simetrik ve iletim-asimetrik ağların (veya hatların) simetrik yansıma özelliğine (bir empedansa) sahip olduğu varsayılmaktadır (Hasar *et al.* 2020c).



Şekil 9. (a) Simetrik yansıma özelliğine (bir empedansa) sahip üniform iletim-asimetrik ağ veya asimetrik hat ($\gamma^+ \neq \gamma^-$) ve (b) bu hattın iki empedans dönüşüm bölgesine ve bir faz-genlik değişim bölgesine ayrıştırılması.

Empedans dönüşümü

Homojen bir iletim-simetrik hattın homojen bir iletim-asimetrik hatta (veya tam tersi de olabilir) empedans dönüşümü problemi Şekil 9(b)'de gösterilmiştir. Empedans değişiminin analizi için, m modlu ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$) homojen iletim-asimetrik hattın gerilim (v) ve akım (i) dalgaları şu şekilde ifade edilebilir:

$$v(z) = v_0 \left(a_m e^{+\gamma_m^- z} + \alpha_1^m b_m e^{-\gamma_m^+ z} \right) \quad (17)$$

$$i(z) = \frac{v_0}{Z_m} \left(-a_m e^{+\gamma_m^- z} + \alpha_1^m b_m e^{-\gamma_m^+ z} \right) \quad (18)$$

Burada Z_m m modu için dalga empedansıdır, sabit v_0 (V) birimleri dengelemek için kullanılır, a_m ve b_m m modu için kompleks yarı-dalga genlikleridir, α_1^m (birimsiz) birazdan

belirlenecek olan bir terimdir, z ağ/hattın koordinat eksenı yönündeki uzunluğudur ve γ_m^+ ve γ_m^- ise sırasıyla m modlu homojen iletım-asimetrik hattın ileri ve geri yayılma sabitleridir. Benzer bir şekilde, iletım-asimetrik hattın sol tarafındaki iletım-simetrik bir izotropik hattın (çalışma modu $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ile) gerilim ve akım dalgaları da şu şekilde ifade edilebilir:

$$v(z) = v_0 \alpha_2^n (a_n e^{-\gamma_{0n} z} + b_n e^{+\gamma_{0n} z}) \quad (19)$$

$$i(z) = v_0 \frac{\alpha_2^n}{Z_{ref}^n} (a_n e^{-\gamma_{0n} z} - b_n e^{+\gamma_{0n} z}) \quad (20)$$

Burada α_2^n yakında belirlenecek birimsiz bir terimdir, $Z_{ref}^n \operatorname{Re}\{Z_{ref}^n\} \geq 0$ özelliğine sahip bir referans empedansıdır ve burada $\operatorname{Re}\{*\}$ kompleks nicelik “*”ın reel kısmını gösterir, γ_{0n} iletım-asimetrik hattın sol tarafındaki iletım-simetrik n modlu bir izotropik hatta serbest uzayın yayılma sabitidir ve a_n ve b_n ise bu hattın yarı-dalgalarının genlikleridir.

Sonrasında homojen iletım-simetrik hattan homojen iletım-asimetrik hatta empedans dönüşümünü gerçekleştirmek için $v(z=0)$ ve $i(z=0)$ cinsinden a_n ve b_n aşağıdaki gibi elde edilir.

$$a_n = \frac{1}{2v_0 \alpha_2^n} [v(z=0) + Z_{ref}^n i(z=0)] \quad (21)$$

$$b_n = \frac{1}{2v_0 \alpha_2^n} [v(z=0) - Z_{ref}^n i(z=0)] \quad (22)$$

Daha sonra, denklem (17) ve (18)’den $v(z=0)$ ve $i(z=0)$ ’yi yerine koyarak, gelen ve giden yarı-dalgalar arasında bir ilişki ortaya çıkacaktır.

$$\begin{bmatrix} b_n(Z_{ref}^n, \gamma_0) \\ a_n(Z_{ref}^n, \gamma_0) \end{bmatrix} = Q^{nm} \begin{bmatrix} a_m(Z_m, \gamma^+, \gamma^-) \\ b_m(Z_m, \gamma^+, \gamma^-) \end{bmatrix} \quad (23)$$

Burada γ_0 serbest uzayın yayılma sabitidir ve Q^{nm} , Z_{ref}^n ’den Z_m ’ye bir değişim için dönüşüm matrisini gösterir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q^{nm} = \frac{1}{2Z_m \alpha_2^n} \begin{bmatrix} (Z_m + Z_{ref}^n) & \alpha_1^m (Z_m - Z_{ref}^n) \\ (Z_m - Z_{ref}^n) & \alpha_1^m (Z_m + Z_{ref}^n) \end{bmatrix} \quad (24)$$

Hasar (2018a), α_1^m ve α_2^n terimlerini uygun şekilde seçerek Q^{nm} matrisinin diyagonal (köşegen) terimlerinin bir (1) olma durumunun mümkün olduğunu göstermiştir. Buna göre

denklem (24)'te $\alpha_1^m = 1$ ve $\alpha_2^n = 0,5 \left(1 + \frac{Z_{\text{ref}}^n}{Z_m}\right)$ ifadeleri yerine konulursa Q^{nm} matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$Q^{nm} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{nm} \\ \Gamma_{nm} & 1 \end{bmatrix}, \quad \Gamma_{nm} = \frac{Z_m - Z_{\text{ref}}^n}{Z_m + Z_{\text{ref}}^n} \quad (25)$$

Burada Γ yansıma katsayısı olmak üzere Γ_{nm} , n modundan m moduna dönüşümün yansıma katsayısıdır. γ^+ ve γ^- genlik ve faz değişimleri ile ilgili terimler olduğu için, Q^{nm} 'nin beklendiği gibi, simetrik yansımalara sahip izotropik hatlar için Marks (1992)'deki denklem (86)'daki ifadeye benzer olduğu görülmektedir.

Öte yandan, homojen bir iletim-asimetrik hattan homojen iletim-simetrik hatta bir empedans değişimi için (Şekil 9(b)'de sağ taraftaki empedans değişimi) Q^{mn} dönüşüm matrisini türetmek amacıyla, a_m ve b_m terimleri $v(z=0)$ ve $i(z=0)$ ile denklem (17) ve (18)'den aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$a_m = \frac{1}{2v_o} [v(z=0) - Z_m i(z=0)] \quad (26)$$

$$b_m = \frac{1}{2v_o \alpha_1^m} [v(z=0) + Z_m i(z=0)] \quad (27)$$

Daha sonra, denklem (19) ve (20)'deki $v(z=0)$ ve $i(z=0)$ denklem (26) ve (27)'de a_m ve b_m 'ye konularak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{bmatrix} b_m(Z_m, \gamma_m^+, \gamma_m^-) \\ a_m(Z_m, \gamma_m^+, \gamma_m^-) \end{bmatrix} = Q^{mn} \begin{bmatrix} a_n(Z_{\text{ref}}^n) \\ b_n(Z_{\text{ref}}^n) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Burada Q^{mn} dönüşüm matrisi şöyledir:

$$Q^{mn} = \frac{\alpha_2^n}{2Z_{\text{ref}}^n} \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_1^m} (Z_m + Z_{\text{ref}}^n) & -\frac{1}{\alpha_1^m} (Z_m - Z_{\text{ref}}^n) \\ -(Z_m - Z_{\text{ref}}^n) & (Z_m + Z_{\text{ref}}^n) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Buna göre önceden belirlenmiş α_1^m ve α_2^n denklem (29)'da yerine konularak aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$Q^{mn} = \frac{1}{1 - \Gamma_{nm}^2} \begin{bmatrix} 1 & -\Gamma_{nm} \\ -\Gamma_{nm} & 1 \end{bmatrix} = (Q^{nm})^{-1} \quad (30)$$

Burada “*” bir matris olmak üzere $(*)^{-1}$ “*” matrisinin tersi anlamına gelmektedir.

Genlik ve faz dönüşümleri

Genlik ve faz dönüşümlerini gerçekleştirmek için, önce Şekil 9(a)'daki L uzunluğuna sahip homojen bir iletim-asimetrik ağın veya hattın ABCD parametrelerini gerçekleştirmek gereklidir. Bunun için hat boyunca genlik ve faz değişimlerinin analizi için, m (m = 0, 1, 2, 3, ...) moduna sahip homojen iletim-asimetrik ağın veya hattın gerilim (v) ve akım (i) dalgaları şöyle yazılabilir:

$$v(z) = v_0^+ e^{-\gamma_m^+ z} + v_0^- e^{+\gamma_m^- z} \quad (31)$$

$$i(z) = \frac{1}{Z_m} \left(v_0^+ e^{-\gamma_m^+ z} - v_0^- e^{+\gamma_m^- z} \right) \quad (32)$$

Burada v_0^+ ve v_0^- sırasıyla +z ve -z yönlerinde yayılan gerilim dalgalarının kompleks (veya reel) genlikleridir. Bu ifadeleri kullanarak, A, B, C ve D parametreleri aşağıdaki gibi belirlenir.

$$A = \frac{v(z=L)}{v(z=0)} \Big|_{i(z=0)=0} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_m^+} + T_m^- \right) \quad (33)$$

$$B = \frac{v(z=L)}{v(z=0)} \Big|_{v(z=0)=0} = \frac{Z_m}{2} \left(\frac{1}{T_m^+} - T_m^- \right) \quad (34)$$

$$C = \frac{i(z=L)}{v(z=0)} \Big|_{i(z=0)=0} = \frac{1}{2Z_m} \left(\frac{1}{T_m^+} - T_m^- \right) \quad (35)$$

$$D = \frac{i(z=L)}{i(z=0)} \Big|_{v(z=0)=0} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_m^+} + T_m^- \right) = A \quad (36)$$

Burada, T yayılma faktörü olmak üzere T_m^+ ve T_m^- sırasıyla m modlu homojen iletim-asimetrik hattın ileri ve geri yayılma faktörüdür ve değeri $T_m^\mp = e^{-\gamma_m^\mp L}$ 'dir. Denklem (33)-(36) 'dan $AD - BC = \frac{T_m^-}{T_m^+}$ olduğu ve hattın iletim-simetrik olmadığı görülmektedir.

ABCD parametrelerinden S-parametrelerine dönüşüm şu şekilde yapılabilir:

$$S_{11}^{L0} = \frac{A + \frac{B}{Z_m} - Z_m C - D}{A + \frac{B}{Z_m} + Z_m C + D} = 0 \quad (37)$$

$$S_{12}^{L0} = \frac{2(AD - BC)}{A + \frac{B}{Z_m} + Z_m C + D} = T_m^- \quad (38)$$

$$S_{21}^{L0} = \frac{2}{A + \frac{B}{Z_m} + Z_m C + D} = T_m^+ \quad (39)$$

$$S_{22}^{L0} = \frac{-A + \frac{B}{Z_m} - Z_m C + D}{A + \frac{B}{Z_m} + Z_m C + D} = S_{11}^{L0} = 0 \quad (40)$$

Burada üst simge “L0”, S-parametrelerinin yalnızca genlik ve faz değişimleri için gerçekleştirildiği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, homojen bir iletim-asimetrik ağ veya hat boyunca genlik ve faz dönüşümleri (R^{mm}) kare matris şeklinde yazılabilir (Engen and Hoer 1979; Fuh 2016).

$$R^{mm} = \frac{1}{S_{21}^{L0}} \begin{bmatrix} -\Delta_{L0} & S_{11}^{L0} \\ -S_{22}^{L0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_m^- & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_m^+} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Burada, Δ_{L0} ifadesi S-parametreleri arasındaki bir fark terimidir ve değeri $\Delta_{L0} = S_{11}^{L0}S_{22}^{L0} - S_{21}^{L0}S_{12}^{L0}$ ’dır.

Önerilen LL yöntemi

Bu bölümde, önce empedans değişim ve genlik ve faz değişim matrislerinden oluşan iletim-asimetrik bir ağ veya hattın WCM’si ifade edilecek, sonra kalibrasyon bağımsız S-parametresi ölçümleri kullanılarak LL yöntemi uygulanacak ve sonunda özgün özfaktörler T_m^+ ve T_m^- ’yi çıkarmak için WCM’nin sonuç formundan yararlanılacaktır (Hasar *et al.* 2020c).

WCM gösterimi

Denklem (33)-(36)’daki ifadeleri denklem (37)-(40)’da yerine koyarak ve Z_m ’yi referans empedans Z_{ref}^n ile değiştirerek, üniform bir iletim-asimetrik ağ veya hattın (simetrik yansıma özelliğine sahip) S-parametreleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$S_{11}^L = \frac{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} - Z_{ref}^n C - D}{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} + Z_{ref}^n C + D} = \frac{\Gamma(1 - T_m^+ T_m^-)}{1 - \Gamma^2 T_m^+ T_m^-} \quad (42)$$

$$S_{12}^L = \frac{2(AD-BC)}{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} + Z_{ref}^n C + D} = \frac{T_m^-(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 T_m^+ T_m^-} \quad (43)$$

$$S_{21}^L = \frac{2}{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} + Z_{ref}^n C + D} = \frac{T_m^+(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 T_m^+ T_m^-} \quad (44)$$

$$S_{22}^L = \frac{-A + \frac{B}{Z_{ref}^n} - Z_{ref}^n C + D}{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} + Z_{ref}^n C + D} = S_{11}^L \quad (45)$$

Burada üst simge “L”, S-parametrelerinin hem empedans değişimi hem de genlik ve faz değişimi için gerçekleştirildiği anlamına gelmektedir.

Denklem (42)-(45)’teki S-parametrelerinin denklem (41)’de yerine konulması, referans empedansı Z_{ref}^n olan üniform bir iletim-simetrik hatta (simetrik yansıma özelliğine sahip) gömülü üniform bir iletim-asimetrik hattın (simetrik yansıma özelliğine sahip) WCM gösterimiyle sonuçlanır.

$$M = \frac{1}{S_{21}^L} \begin{bmatrix} -\Delta_L & S_{11}^L \\ -S_{22}^L & 1 \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$M = \frac{1}{T_m^+(1-\Gamma^2)} \begin{bmatrix} T_m^+ T_m^- - \Gamma^2 & \Gamma(1 - T_m^+ + T_m^-) \\ -\Gamma(1 - T_m^+ T_m^-) & 1 - \Gamma^2 T_m^+ T_m^- \end{bmatrix} \quad (47)$$

Burada M WCM gösterimidir ve $\Gamma = \frac{Z_m - Z_{ref}^n}{Z_m + Z_{ref}^n}$ ’dir. Ayrıca, Δ_L ifadesi de S-parametreleri arasındaki bir fark terimidir ve değeri $\Delta_L = S_{11}^L S_{22}^L - S_{21}^L S_{12}^L$ ’dir.

Empedans dönüşümü ve genlik-faz dönüşümü matrislerinden aynı WCM gösteriminin elde edilemeyeceğini kontrol etmek gidişatımızın doğru olup olmadığını anlamak için yol göstericidir. Buna göre denklem (25), (29) ve (41)’den denklem (47)’deki WCM gösterimi M aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$M = Q^{nm} R^{mm} Q^{mn} = Q^{nm} R^{mm} (Q^{nm})^{-1} \quad (48)$$

Denklem (48)’deki WCM gösteriminin önemi sonraki bölümlerde daha açık hale gelecektir.

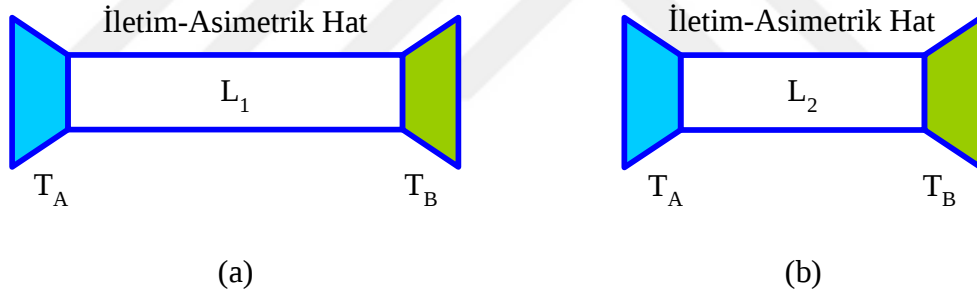
LL yönteminin uygulanması

LL yönteminin uygulanması, farklı uzunluklarda iki özdeş hat gerektirir. Şekil 10(a) ve Şekil 10(b), sırasıyla L_1 ile daha uzun hattı ve L_2 ile daha kısa hattı göstermektedir. Bu hatların kaynak ve yük eşleme hatalarını, izleme (frekans) hatalarını, VNA'nın donanım kusurlarını vb temsil eden eşit olmayan T_A ve T_B dönüşümlerine gömüldüğü varsayılmaktadır (Reynoso-Hernández 2002; Hasar 2008b). Daha sonra, Şekil 10(a) ve Şekil 10(b)'deki tüm konfigürasyonların WCM matrisi, denklem (48)'deki M ifadesi kullanılarak şöyle yazılabilir:

$$M_1 = T_A Q^{nm} R_{L_1}^{mm} (Q^{nm})^{-1} T_B \quad (49)$$

$$M_2 = T_A Q^{nm} R_{L_2}^{mm} (Q^{nm})^{-1} T_B \quad (50)$$

Burada $R_{L_1}^{mm}$ ve $R_{L_2}^{mm}$ sırasıyla Şekil 10'daki L_1 ve L_2 uzunluklarına sahip hatlar için genlik ve faz dönüşüm matrislerini ve M_1 ve M_2 ise denklem (46)'daki ifadeler kullanılarak ölçülen S-parametrelerinden elde edilen Şekil 10'daki tüm konfigürasyonların WCM gösterimleridir (yani M_1 ve M_2 sırasıyla, L_1 ve L_2 uzunluğundaki iletim-asimetrik hattın WCM gösterimleridir).



Şekil 10. Üniorm iletim-asimetrik hatların yayılma sabitinin belirlenmesi için LL yönteminin uygulanması. T_A ve T_B eş olmayan dönüşümlerine yerleştirilmiş (a) L_1 uzunluğuna sahip daha uzun hat ve (b) L_2 uzunluğuna sahip daha kısa hat.

Denklem (49) ve (50)'yi kullanarak, $M_1 M_2^{-1}$ matrisini aşağıdaki gibi yazmak mümkündür.

$$M_1 M_2^{-1} = T_X T_\lambda T_X^{-1} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$T_X = T_A Q^{nm} = \kappa \begin{bmatrix} \chi_1 & \chi_2 \\ \chi_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$T_\lambda = R_{L_1}^{mm} (R_{L_2}^{mm})^{-1} = \begin{bmatrix} e^{-\gamma_m^- L_d} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma_m^+ L_d} \end{bmatrix} \quad (53)$$

Burada m_{11} , m_{21} , m_{12} ve m_{22} parametreleri $M_1 M_2^{-1}$ matrisinin girdileridir, T_λ dönüşüm matrislerinin çarpımını içeren bir kısaltma terimidir ve κ , χ_1 , χ_2 ve χ_3 bilinmeyen parametrelerdir. Ayrıca L_d ölçüm alınacak ağ/hattın uzunluğudur. Yine burada κ 'nın $e^{-\gamma_m^+ L_d}$ ve $e^{-\gamma_m^- L_d}$ değerlerini etkilemeyen bir ağırlıklandırma terimi olarak davrandığına dikkat edilmelidir (Engen and Hoer 1979). Bilinmeyen dönüşüm matrisi T_B 'nin etkisinin analizden elimine edildiği denklem (51)-(53)'ten görülmektedir.

Denklem (52) ve (53)'ü kullanarak denklem (51)'deki $M_1 M_2^{-1}$ genişletildikten ve bazı manipülasyonlar yapıldıktan sonra T_λ aşağıdaki gibi türetilir.

$$T_\lambda = \frac{1}{(\chi_1 - \chi_2 \chi_3)} \begin{bmatrix} \chi_3 K_{p1} & -K_{p2} \\ \chi_3^2 K_{p3} & \chi_3 K_{p4} \end{bmatrix} \quad (54)$$

Denklem (54)'teki K_{p1} , K_{p2} , K_{p3} ve K_{p4} parametreleri kısaltma parametreleri olup sadece matrisi kısaltmak için kullanılmıştır ve bu ifadeler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} K_{p1} &= (m_{11} - m_{21} \chi_2) \frac{\chi_1}{\chi_3} + (m_{12} - m_{22} \chi_2) \\ K_{p2} &= m_{21} \chi_2^2 + (m_{22} - m_{11}) \chi_2 - m_{12} \\ K_{p3} &= m_{21} \left(\frac{\chi_1}{\chi_3} \right)^2 + (m_{22} - m_{11}) \frac{\chi_1}{\chi_3} - m_{12} \\ K_{p4} &= (m_{22} + m_{21} \chi_2) \frac{\chi_1}{\chi_3} - (m_{11} \chi_2 + m_{12}) \end{aligned} \quad (55)$$

Denklem (54)'ten iki farklı ifade dizisi türetilir. Bu ilk diziden, bilinen katsayılarla sahip aşağıdaki ikinci dereceden denklemler, $\frac{\chi_1}{\chi_3}$ oranının ve χ_2 teriminin belirlenebileceği şekilde çıkarılır.

$$m_{21} \left(\frac{\chi_1}{\chi_3} \right)^2 + (m_{22} - m_{11}) \frac{\chi_1}{\chi_3} - m_{12} = 0 \quad (56)$$

$$m_{21} \chi_2^2 + (m_{22} - m_{11}) \chi_2 - m_{12} = 0 \quad (57)$$

İkinci diziden, aşağıdakilerden birisi belirlenebilir.

$$e^{-\gamma_m^+ L_d} = \frac{\frac{\chi_1}{\chi_3} - \chi_2}{(m_{22} + m_{21} \chi_2) \frac{\chi_1}{\chi_3} - (m_{11} + m_{12} \chi_2)} \quad (58)$$

$$e^{-\gamma_m^- L_d} = \frac{(m_{11} - m_{21}\chi_2) \frac{\chi_1}{\chi_3} + (m_{12} - m_{22}\chi_2)}{\frac{\chi_1}{\chi_3} - \chi_2} \quad (59)$$

Daha önce belirlenen $\frac{\chi_1}{\chi_3}$ ve χ_2 terimlerini denklem (58) ve (59)'a dahil ederek $e^{-\gamma_m^+ L_d}$ ve $e^{-\gamma_m^- L_d}$ 'nin elde edilebileceği denklem (58) ve (59)'dan görülmektedir. Ayrıca, denklem (58) ve (59)'daki $e^{-\gamma_m^+ L_d}$ ve $e^{-\gamma_m^- L_d}$ ifadelerindeki işaret belirsizliğinin aldatıcı olduğu ve ikinci dereceden ikili denklemler (56) ve (57)'nin çözümünde sunulduğu görülmektedir (Reynoso-Hernández 2003). Başka bir deyişle, denklem (58) ve (59)'daki $e^{-\gamma_m^+ L_d}$ ve $e^{-\gamma_m^- L_d}$ için yeni ifadeler herhangi bir işaret belirsizliği içermez, ancak bilinmeyen $\frac{\chi_1}{\chi_3}$ ve χ_2 terimlerinin bazı yollarla elde edilmesini gerektirir. Denklem (56) ve (57)'den $\frac{\chi_1}{\chi_3}$ ve χ_2 için doğru işaretlerin belirlenmesinde güvenilir kriter $|\chi_2| < \left| \frac{\chi_1}{\chi_3} \right|$ olarak türetilmiştir (Engen and Hoer 1979). Son olarak, denklem (49)-(59)'dan $e^{-\gamma_m^+ L_d}$ ve $e^{-\gamma_m^- L_d}$ derivasyonlarında kullanılan metodolojinin, TRL yaklaşımından biraz farklı olduğu belirtilmelidir (Engen and Hoer 1979). Ayrıca, denklem (58) ve (59)'dan görülebileceği gibi, önerdiğimiz formülasyon $\gamma_m^+ \neq \gamma_m^-$ özelliğine sahip iletim-asimetrik ağlar veya hatlar (ek olarak $\gamma_m^+ = \gamma_m^- = \gamma_m$ özelliğine sahip iletim-simetrik ağlar veya hatlar) için uygundur ve bu yüzden geleneksel TRL yaklaşımının bir uzantısıdır (Engen and Hoer 1979). Ayrıca burada, denklem (49) ve (50)'deki çarpım formunda olduğu gibi M_1 ve M_2 terimlerini ifade etmeden denklem (58) ve (59)'daki $e^{-\gamma_m^+ L_d}$ ve $e^{-\gamma_m^- L_d}$ için yeni formülasyonlar elde etmenin mümkün olmayacağı vurgulanmalıdır.

Sonuç olarak, γ_m^+ ve γ_m^- denklem (58) ve (59)'dan elde edilebilir.

$$\gamma_m^+ = -\frac{\ln(e^{-\gamma_m^+ L_d})}{L_d}, \quad \gamma_m^- = -\frac{\ln(e^{-\gamma_m^- L_d})}{L_d} \quad (60)$$

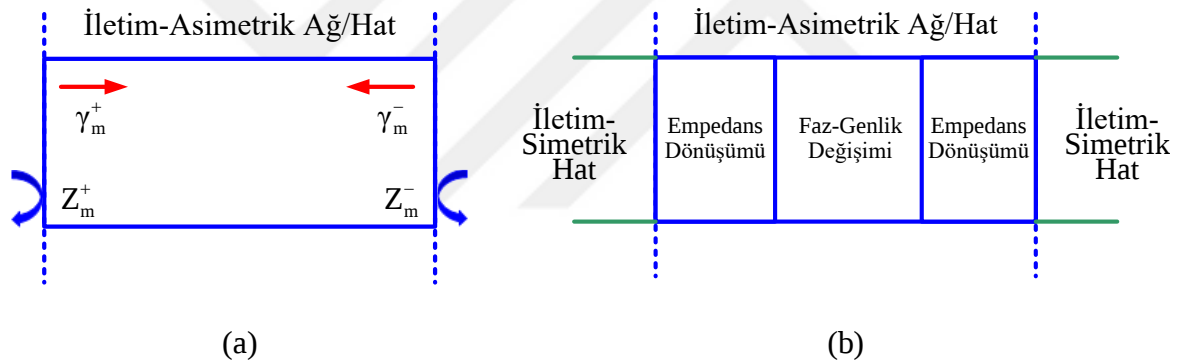
Yukarıdaki analiz üç önemli noktayı göstermektedir. Birincisi γ_m^+ ve γ_m^- , Z_{ref}^n bilgisine başvurmadan denklem (60)'tan basitçe hesaplanabilir. İkincisi, belirlenen γ_m^+ ve γ_m^- değerleri herhangi bir kalibrasyon gerektirmez (kalibrasyon gerektirmeyen). Üçüncüsü, γ_m^+ ve γ_m^- 'nin belirlenmesi için önerilen yaklaşım Γ_1 ve Γ_2 (ileri ve geri yansıma katsayısı)

hesaplamasına gerek duymaksızın γ değerini doğrudan belirlediği için Hasar (2018b)'deki yöntemden farklıdır.

İletim-Asimetrik ve Yansıma-Asimetrik Mikrodalga Ağların veya Hatların Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi

İletim-asimetrik üniform bir iletim hattı için WCM gösterimi ve diyagonalleştirme

Bu bölümde, ilk olarak Telegrapher'ın standart gerilim ve akım denklemleri kullanılarak, Şekil 11(a)'da (Şekil 11, Şekil 9 ile aynı olup tek farkı iletim-asimetrik ağ/hattın asimetrik yansıma özelliğine sahip olmasıdır) gösterildiği gibi asimetrik yansımalara sahip iletim-asimetrik üniform bir ağ/hattın (farklı yayılma sabitlerine sahip) WCM formu belirlenecektir. Daha sonra, bu matris diyagonalize edilecek (köşegenleştirilecek) ve bu hattın aynı karakteristiğe sahip iki iletim-simetrik üniform ağ/hat arasında konumlandırıldığını varsayarak Şekil 11(b)'de gösterildiği gibi empedans ve genlik-faz dönüşümlerine karşılık gelen özgün WCM'ler açısından ayrıştırılacaktır (Hasar *et al.* 2020b).



Şekil 11. (a) Asimetrik yansıma özelliğine (bir empedansa) sahip iletim-asimetrik ağ veya iletim hattı ($\gamma^+ \neq \gamma^-$) ve (b) bu hattın/ağın iki empedans dönüşüm bölgesine ve bir faz-genlik değişim bölgesine ayrıştırılması.

Bir iletim-asimetrik ağ/hattın WCM gösterimi

m modu ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$) için $+z$ ve $-z$ yönlerindeki dalga empedansı Z_m^+ ve Z_m^- olan bir iletim-asimetrik üniform ağ/hattın (asimetrik yansımalara sahip) voltaj (v_m) ve akım (i_m) dalgaları şu şekilde yazılabilir:

$$v_m(z) = v_0^+ e^{-\gamma_m^+ z} + v_0^- e^{+\gamma_m^- z} \quad (61)$$

$$i_m(z) = \frac{v_0^+}{Z_m^+} e^{-\gamma_m^+ z} - \frac{v_0^-}{Z_m^-} e^{+\gamma_m^- z} \quad (62)$$

Denklem (61) ve (62)'yi kullanarak L uzunluğuna sahip bu ağ/hattın ABCD parametreleri aşağıdaki gibi olur.

$$A = \frac{v_m(z = -L)}{v_m(z = 0)} \bigg|_{i(z=0)=0} = \frac{\frac{Z_m^+}{T_m^+} + Z_m^- T_m^-}{Z_m^+ + Z_m^-} \quad (63)$$

$$B = \frac{v_m(z = -L)}{i_m(z = 0)} \bigg|_{v(z=0)=0} = \frac{Z_m^+ Z_m^- \left(\frac{1}{T_m^+} - T_m^- \right)}{Z_m^+ + Z_m^-} \quad (64)$$

$$C = \frac{i_m(z = -L)}{v_m(z = 0)} \bigg|_{i(z=0)=0} = \frac{\frac{1}{T_m^+} - T_m^-}{Z_m^+ + Z_m^-} \quad (65)$$

$$D = \frac{i_m(z = -L)}{i_m(z = 0)} \bigg|_{v(z=0)=0} = \frac{\frac{Z_m^-}{T_m^+} + Z_m^+ T_m^-}{Z_m^+ + Z_m^-} \quad (66)$$

$$T_m^+ = e^{-\gamma_m^+ L}, \quad T_m^- = e^{-\gamma_m^- L} \quad (67)$$

Denklem (61)-(67)'den $AD - BC = \frac{T_m^-}{T_m^+}$ olduğu görülmekte olup bu da ağ/hattın iletim-asimetrik olduğunu göstermektedir. Mod n ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) için karakteristik (referans) empedansı Z_{ref}^n olan iki iletim-simetrik üniform ağ/hat arasına konumlandırılmış iletim-asimetrik ağ/hat için S-parametreleri şu şekilde hesaplanabilir:

$$S_{11} = \frac{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} - Z_{ref}^n C - D}{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} + Z_{ref}^n C + D} = \frac{\Gamma_{nm}^+ (1 - T_m^+ T_m^-)}{1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^- T_m^+ T_m^-} \quad (68)$$

$$S_{12} = \frac{2(AD - BC)}{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} + Z_{ref}^n C + D} = \frac{T_m^- (1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^-)}{1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^- T_m^+ T_m^-} \quad (69)$$

$$S_{21} = \frac{2}{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} + Z_{ref}^n C + D} = \frac{T_m^+ (1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^-)}{1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^- T_m^+ T_m^-} \quad (70)$$

$$S_{22} = \frac{-A + \frac{B}{Z_{ref}^n} - Z_{ref}^n C + D}{A + \frac{B}{Z_{ref}^n} + Z_{ref}^n C + D} = \frac{\Gamma_{nm}^- (1 - T_m^+ T_m^-)}{1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^- T_m^+ T_m^-} \quad (71)$$

Burada Γ_{nm}^+ ve Γ_{nm}^- n modundan m moduna dönüşümün sırasıyla +z ve -z yönlerindeki yansıma katsayısı olup değerleri aşağıdaki gibidir:

$$\Gamma_{nm}^+ = \frac{Z_m^+ - Z_{ref}^n}{Z_m^+ + Z_{ref}^n}, \quad \Gamma_{nm}^- = \frac{Z_m^- - Z_{ref}^n}{Z_m^- + Z_{ref}^n} \quad (72)$$

O halde, Şekil 11(b)'de gösterildiği gibi, aynı karakteristik empedans Z_{ref}^n 'e sahip iki iletim-simetrik ağ/hatta gömülü iletim-asimetrik üniform tekdüze bir ağ/hattın WCM gösterimi şöyle yazılabilir (Engen and Hoer 1979):

$$M = \frac{1}{S_{21}} \begin{bmatrix} -\Delta & S_{11} \\ -S_{22} & 1 \end{bmatrix} \quad (73)$$

$$M = \frac{1}{\Psi} \begin{bmatrix} T_m^+ T_m^- - (\Gamma_{nm}^+)^2 & \Gamma_{nm}^+ (1 - T_m^+ T_m^-) \\ -\Gamma_{nm}^- (1 - T_m^+ T_m^-) & 1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^- T_m^+ T_m^- \end{bmatrix}$$

Burada Δ ifadesi S-parametreleri arasındaki bir fark terimidir ve değeri $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12}$ 'dir. Ψ ifadesi ise kısaltma terimidir ve değeri $\Psi = T_m^+ (1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^-)$ 'dir.

Diyagonalleştirme ve dönüşüm matrisi ayrıştırma

Denklem (73)'teki WCM matrisinin (M) diyagonalleştirilebilir olup olmadığını kontrol etmek için, öncelikle özdeğer(ler)ini ve özvektör(ler)ini elde etmemiz gerekmektedir. Lineer cebirden (Kryszig 2005), matrisin (M) λ özdeğerlerinin şu şekilde hesaplanabileceği bilinmektedir:

$$\det(M - \lambda I) = 0 \quad (74)$$

Burada I, 2×2 birim matrisidir ve det(*) “*” kare matrisinin determinantını göstermektedir. Denklem (73)'teki M matrisini denklem (74)'e yerleştirerek, aşağıdaki karakteristik polinom p_M elde edilir.

$$p_M = T_m^- - (1 + T_m^+ T_m^-) \lambda + T_m^+ \lambda^2 = 0 \quad (75)$$

Denklem (75)'teki p_M 'yi sağlayan iki farklı özdeğer olduğu (cebirsal çarpan her özdeğer için bir (1)'dir) not edilir.

$$\lambda_1 = T_m^-, \quad \lambda_2 = \frac{1}{T_m^+} \quad (76)$$

Daha sonra, özdeğerler λ_1 ve λ_2 ile ilişkili özvektörler x_1 ve x_2 (2×1 sütun matrisleri) şu şekilde bulunabilir:

$$(M - \lambda_1 I)x_1 = 0, \quad (M - \lambda_2 I)x_2 = 0 \quad (77)$$

Denklem (73)'teki M matrisini denklem (77)'de yerine koyarak ve bazı manipölasyonlardan sonra x_1 ve x_2 şöyle belirlenir:

$$x_1 = k_1 \begin{bmatrix} 1 \\ \Gamma_{nm}^- \end{bmatrix}, \quad x_2 = k_2 \begin{bmatrix} \Gamma_{nm}^+ \\ 1 \end{bmatrix} \quad (78)$$

Burada k_1 ve k_2 geometrik çarpanları $\in \mathbb{R}$ 'dir ve sütun vektörleri $\begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{nm}^- \end{bmatrix}^T$ ve $\begin{bmatrix} \Gamma_{nm}^+ & 1 \end{bmatrix}^T$ üst simge "T"nin transpoz işlemi anlamına geldiği özbazları belirtir. Denklem (78)'den, hem özdeğer λ_1 hem de özdeğer λ_2 için geometrik çarpanların bir (1) olduğu not edilmelidir ($k_1 = k_2 = 1$).

M matrisinin her özdeğeri için, geometrik çarpan cebirsel çarpana eşittir, o zaman WCM M 'nin diyagonalleştirilebilir olduğu söylenir ve aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$P^{-1}MP = D \quad (79)$$

Burada P özuzaylardan oluşan tekil olmayan (ters çevrilebilir) matristir (determinantı sıfır(0)a eşit olmayan matris) ve D diyagonal matristir. Böylece türetilmiş özuzayları kullanarak P matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{nm}^+ \\ \Gamma_{nm}^- & 1 \end{bmatrix} \quad (80)$$

Türetilmiş D matrisi ise şöyledir:

$$D = \begin{bmatrix} T_m^- & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_m^+} \end{bmatrix} \quad (81)$$

Böylece M matrisinin diyagonalleştirilebilir olduğu doğrulanır. Dalganın iletim-asimetrik iletim hattına yayıldığı varsayıldığı için P matrisinin tekil olmadığı not edilmelidir; yani, denklem (73)'te $S_{21} \neq 0$ ve dolayısıyla $|\Gamma_{nm}^+| \neq 1$ ve $|\Gamma_{nm}^-| \neq 1$ 'dir.

Sonuç olarak, denklem (79)'dan WCM M şu şekilde yazılabilir:

$$M = PDP^{-1} \\ M = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{nm}^+ \\ \Gamma_{nm}^- & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m^- & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_m^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{nm}^+ \\ \Gamma_{nm}^- & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (82)$$

Ağ/hat iletim-simetrik ($T_m^+ = T_m^- = T$) ve yansıma-simetrik ($\Gamma_{nm}^+ = \Gamma_{nm}^- = \Gamma$) olduğunda, denklem (82)'deki M matris ifadesinin denklem (73)-(75)'teki ifadelere indirgeniği (Reynoso-Hernández 2003) ve böylece iletim-simetrik ve iletim-asimetrik üniform ağ/hatlar için M matrisinin genelleştirilmiş bir form olduğu denklem (82)'den not edilir. Ayrıca denklem (82)'den P matrisinin yalnızca Γ_{nm}^+ ve Γ_{nm}^- yansıma katsayısı ile oluşturulmasına rağmen, D matris ifadesinin T_m^+ ve T_m^- yayılma terimlerinin bir fonksiyonu olduğu da not edilmektedir. Bu nedenle P matrisi, Şekil 11(b)'deki iletim-simetrik ve iletim-asimetrik üniform ağların/iletim hatlarının birleşimindeki empedans dönüşümü ile ilişkilidir ve D matrisi iletim-asimetrik ağ/iletim hattı boyunca genlik ve faz dönüşümleri ile ilgilidir.

Önerilen LL yöntemi

“Önerilen LL Yöntemi ile Kalibrasyon Kullanmaksızın Elde Edilen S-Parametrelerinden İletim-Asimetrik ve Yansıma-Simetrik/Asimetrik Mikrodalga Ağların/Hatların Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi” bölümünde belirtildiği gibi, Janezic and Jargon (1999), Reynoso-Hernández (2003) ve Farcich *et al.* (2008) gibi LL yöntemlerinin dezavantajlarından biri, farklı L_1 ve L_2 uzunluklarına sahip iki özdeş hat gerektirmesidir. Gerçek ölçümlerde, bilhassa özellikleri frekansla değişen ağ/hatlar için; örneğin, bir mikroşerit hattının karakteristik empedansı için, böyle bir gereksinimi gerçekleştirmek zordur (Panduro and Reynoso-Hernández 2012). Ayrıca, ikinci hatta bulunan herhangi bir fabrikasyon hatası, ölçümlerin doğruluğunu etkileyebilir. Bu sorunları gidermek için bu çalışmada, Şekil 12(a) ve Şekil 12(b)'de gösterildiği gibi, T_A ve T_B hata ağları arasındaki thru bağlantıya (sıfır uzunluk) ek olarak, iletim-asimetrik bir üniform ağ/hat ölçümüne dayanan basit bir yöntem önerilmektedir (Hasar *et al.* 2020b). Daha fazla ilerlemeden önce, ilk olarak L_2 uzunluğunda, farklı mod s ($s = 0, 1, 2, 3, \dots$), bu modun $+z$ ve $-z$ yönündeki karakteristik empedansları sırasıyla Z_s^+ ve Z_s^- ve ileri ve geri yayılma sabitleri sırasıyla γ_s^+ ve γ_s^- olan iletim-asimetrik bir hattı düşünersek bu hattın WCM gösterimi M_s aşağıdaki formu alacaktır.

$$M_s = P_s D_s (P_s)^{-1}$$

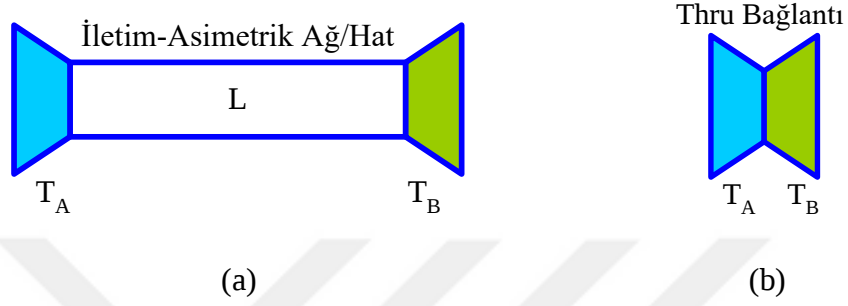
$$M_s = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{ns}^+ \\ \Gamma_{ns}^- & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s^- & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_s^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{ns}^+ \\ \Gamma_{ns}^- & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (83)$$

Burada P_s , D_s , T_s^+ ve T_s^- ifadeleri s modlu iletim-asimetrik hat için sırasıyla özuzaylardan oluşan tekil olmayan matrisi, diyagonal matrisi, ileri ve geri yayılma faktörünü ifade etmektedir. Ayrıca burada Γ_{ns}^+ ve Γ_{ns}^- n modundan s moduna dönüşümün sırasıyla $+z$ ve

$-z$ yönlerindeki yansıma katsayısıdır ve denklem (83)'teki $\Gamma_{ns}^{\mp}$ ve $T_s^{\mp}$ ifadeleri aşağıdaki gibi verilir:

$$\Gamma_{ns}^{\mp} = \frac{Z_s^{\mp} - Z_{ref}^n}{Z_s^{\mp} + Z_{ref}^n}, \quad T_s^{\mp} = e^{-\gamma_s^{\mp} L_2} \quad (84)$$

$L_2 = 0$ olduğunda, denklem (83)'teki D_s matrisi 2×2 birim matrisi haline gelecektir. Bu durum formülasyonumuzun temelini oluşturacaktır.



Şekil 12. İletim-asimetrik üniform ağ/hatların ileri ve geri yayılma sabitlerinin belirlenmesi için önerilen yöntemin uygulanması. (a) Eş olmayan T_A ve T_B dönüşümleri arasında L uzunluğunda ağ/hat bağlantısı ve (b) thru bağlantı (T_A ve T_B dönüşümlerini eşleme).

Şimdi Şekil 12(a)'da gösterildiği gibi analiz edilen iletim-asimetrik ağ/hattın, kaynak ve yük eşleme hataları, VNA'nın donanım kusurları gibi vb kusurlarını (Reynoso-Hernández 2002; Hasar 2008b) temsil eden, eş olmayan T_A ve T_B dönüşümleri arasında bağlı olduğunu düşünelim. Daha sonra, böyle bir bağlantının genel WCM gösterimi N , şu şekilde yazılabilir:

$$N = T_A P D P^{-1} T_B \quad (85)$$

Benzer bir şekilde, Şekil 12(b)'deki thru bağlantısının genel WCM gösterimi N_0 , denklem (83) kullanılarak yazılabilir.

$$N_0 = T_A P_s I (P_s)^{-1} T_B \quad (86)$$

Yöntemimizin iki adımı vardır. İlk adımda, N matrisinin determinantı N_0 matrisinin determinantına bölünür ve aşağıdaki ifade (Λ_1) bulunur.

$$\begin{aligned} \Lambda_1 &= \frac{\det(N)}{\det(N_0)} = \frac{\det(T_A) \det(P) \det(D) \det(P^{-1}) \det(T_B)}{\det(T_A) \det(P_s) \det(I) \det((P_s)^{-1}) \det(T_B)} \\ \Lambda_1 &= \frac{\det(T_A) \det(D) \det(T_B)}{\det(T_A) \det(T_B)} \\ \Lambda_1 &= \det(D) = \frac{e^{-\gamma_m L}}{e^{-\gamma_m^* L}} \end{aligned} \quad (87)$$

Denklem (87)'de matris cebirinin özelliği kullanılmaktadır (Kryszig 2005); yani, bir matrisin determinantı, matristeki her bir terimin determinantının görüldüğü sırayla çarpımına eşittir. Ek olarak, $\det(P)\det(P^{-1})$ ve $\det(P_s)\det((P_s)^{-1})$ çarpımlarının ikisinin de birim matrise eşit olduğu, sadece sadeleştirmenin değil aynı zamanda denklem (87)'deki Λ_1 'in nihai sonucundaki Γ_{nm}^+ ve Γ_{ns}^+ bağımlılıklarının ortadan kaldırılmasına da yol açtığı not edilir.

İkinci adımda, N matrisinin ve $\mp N_0$ matrisinin toplamının determinantı N_0 matrisinin determinantına bölünür ve aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{\det(N \mp N_0)}{\det(N_0)} = \det\left(PDP^{-1} \mp P_s I(P_s)^{-1}\right)$$

$$\frac{\det(N \mp N_0)}{\det(N_0)} = \det \begin{bmatrix} \frac{T_m^+ T_m^- - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^-}{T_m^+ (1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^-)} \mp \Psi_1 & \frac{\Gamma_{nm}^+ (1 - T_m^+ T_m^-)}{T_m^+ (1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^-)} \mp \Psi_2 \\ -\frac{\Gamma_{nm}^- (1 - T_m^+ T_m^-)}{T_m^+ (1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^-)} \pm \Psi_3 & \frac{1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^- T_m^+ T_m^-}{T_m^+ (1 - \Gamma_{nm}^+ \Gamma_{nm}^-)} \mp \Psi_4 \end{bmatrix} \quad (88)$$

Burada, Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 ve Ψ_4 ifadeleri yansıma katsayıları ve yayılma faktörleri arasındaki işlemlerin kısaltma terimleri olup değerleri $\Psi_1 = 1 = \Psi_3$ ve $\Psi_2 = 0 = \Psi_4$ 'dür. s modlu iletim-asimetrik hattın uzunluğu sıfıra eşit değilse (yani $L_2 \neq 0$), o zaman Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 ve Ψ_4 ifadelerinin aşağıdakileri içereceğine dikkat edilmelidir.

$$\Psi_1 = \frac{T_s^+ T_s^- - \Gamma_{ns}^+ \Gamma_{ns}^-}{T_s^+ (1 - \Gamma_{ns}^+ \Gamma_{ns}^-)}, \quad \Psi_2 = \frac{\Gamma_{ns}^+ (1 - T_s^+ T_s^-)}{T_s^+ (1 - \Gamma_{ns}^+ \Gamma_{ns}^-)}$$

$$\Psi_3 = \frac{\Gamma_{ns}^- (1 - T_s^+ T_s^-)}{T_s^+ (1 - \Gamma_{ns}^+ \Gamma_{ns}^-)}, \quad \Psi_4 = \frac{1 - \Gamma_{ns}^+ \Gamma_{ns}^- T_s^+ T_s^-}{T_s^+ (1 - \Gamma_{ns}^+ \Gamma_{ns}^-)} \quad (89)$$

Buna göre aşağıdaki terimler (Λ_2 ve Λ_3) tanımlanır.

$$\Lambda_2 = \frac{\det(N + N_0)}{\det(N_0)}, \quad \Lambda_3 = \frac{\det(N - N_0)}{\det(N_0)} \quad (90)$$

Denklem (88)'de, bu ifadeleri kullanarak aşağıdaki ifade türetilir.

$$T_m^- + \frac{1}{T_m^+} = \frac{\Lambda_2 - \Lambda_3}{2} = \Lambda_4 \quad (91)$$

Yayılma sabitlerini bulmak için denklem (91)'deki ifadenin Γ_{nm}^+ ve Γ_{nm}^- 'ye bağlı olmadığı belirtilmelidir. Sonuç olarak, denklem (87) ve (91)'den T_m^+ , T_m^- , γ_m^+ ve γ_m^- şu şekilde çıkarılabilir:

$$T_m^+ = \frac{\Lambda_4 \mp \sqrt{\Lambda_4^2 - 4\Lambda_1}}{2\Lambda_1} \quad (92)$$

$$T_m^- = \Lambda_1 T_m^+ \quad (93)$$

$$\gamma_m^\mp = -\frac{\ln(T_m^\mp) + 2\pi m_a^\mp}{L} \quad (94)$$

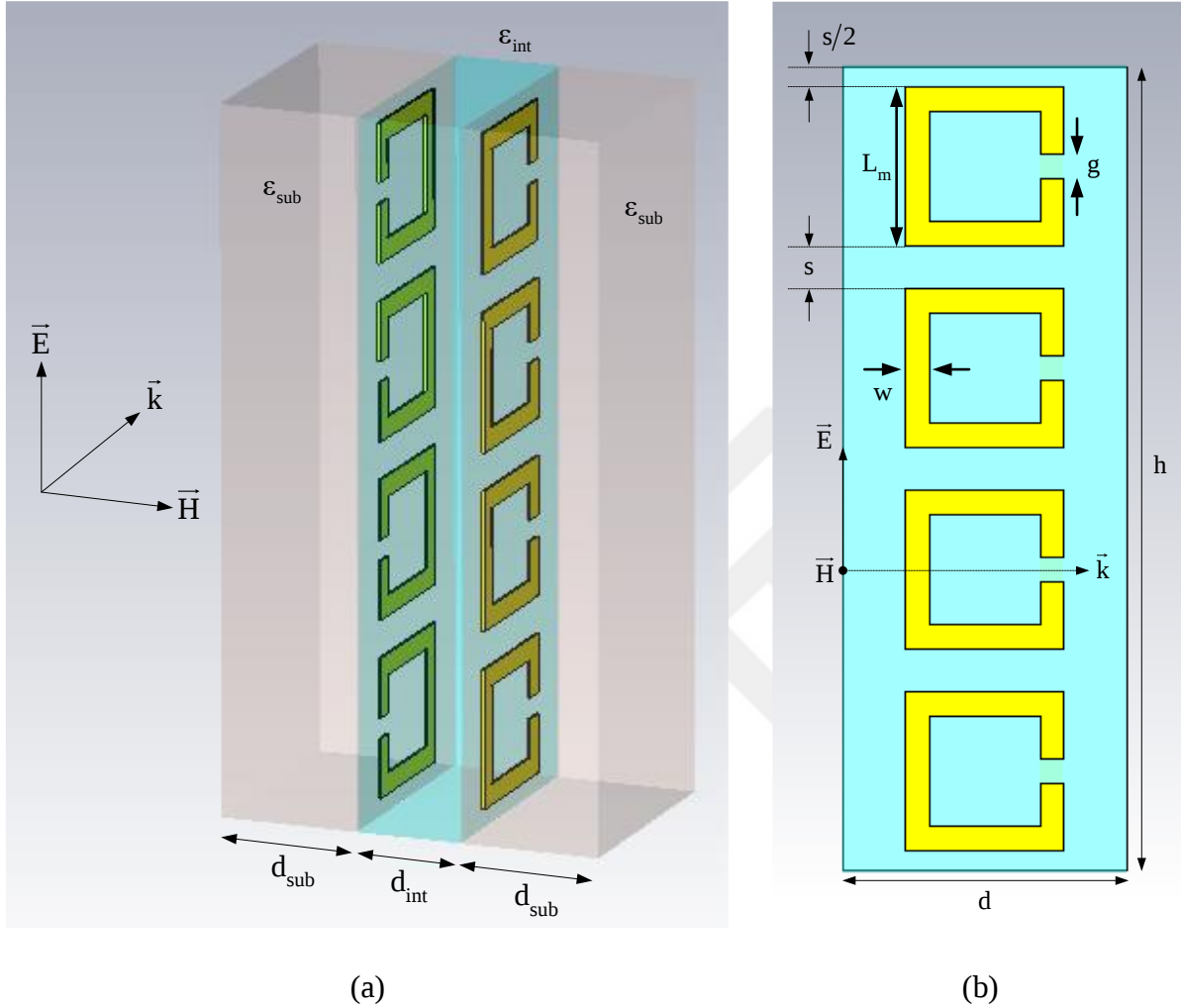
Burada $m_a^\mp$ değerleri, doğru değeri phase unwrapping yöntemi (Barroso and Hasar 2012) ve/veya stepwise (Hasar *et al.* 2013) yöntemi kullanılarak belirlenebilen branch indeksi ($m_a^\mp = \dots, -1, 0, 1, \dots$) değerleridir. Denklem (92)'deki T_m^+ için doğru işaret, pasiflik ilkesi uygulanarak belirlenebilir; yani, $|T_m^+| \leq 1$.

Yukarıdaki analiz dört önemli noktayı göstermektedir. İlk olarak, γ_m^+ ve γ_m^- değerleri, Z_{ref}^n , Z_s^+ ve Z_s^- bilgisine başvurmadan denklem (92)-(94)'ten hesaplanabilir. İkinci olarak, elde edilen γ_m^+ ve γ_m^- değerleri, TRL tekniği (Engen and Hoer 1979) gibi herhangi bir iletim-simetrik yansıtıcı kalibrasyon standartı gerektirmez. Üçüncü olarak, γ_m^+ ve γ_m^- 'yi belirlemek için önerilen yaklaşım Hasar (2018b) yönteminden farklıdır, çünkü Γ_1 ve Γ_2 hesaplamasına başvurmadan doğrudan yayılma sabitlerini belirler. Dördüncü olarak ise, önerdiğimiz yöntem, uygulamasında farklı uzunluklara sahip iki iletim-asimetrik hat gerektiren Reynoso-Hernández (2003) gibi LL yöntemlerinin aksine, yayılma sabitlerinin zıt yönlerde tespit edilmesi için yalnızca bir iletim-asimetrik hat (kolayca uygulanabilen thru bağlantı ile birlikte) gerektirir.

Önerilen Çift Taraflı RW-MM Sensörünün Tasarımı ve Modeli

Önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün doğrulanması ve doğruluğunun ve hassasiyetinin diğer çift taraflı RW-MM sensörleriyle karşılaştırılması için, literatürdeki çok yönlü kullanımı nedeniyle SRR referans rezonatör olarak dikkate alınmıştır (Melik *et al.* 2010b; Ekmekci and Turhan-Sayan 2013; Withayachumnankul *et al.* 2013; Ebrahimi *et al.* 2014a; Hu *et al.* 2014; Torun *et al.* 2014; Ali *et al.* 2016; Vélez *et al.* 2017, 2019). Şekil 13(a) ve Şekil 13(b) sırasıyla, sensör yapısına elektrik ve manyetik alanların yönelimleri ile birlikte geometrik detayları (boyutlandırılması) ve tasarlanmış sensör topolojisinin perspektif ve ön görüşlerini göstermektedir. Burada SRR'nin, metalizasyon uzunluğu $L_m = 2,00$ mm, metalizasyon genişliği $w = 0,30$ mm, hava genişliği $g = 0,30$ mm, SRR inklüzyonları arası mesafe $s = 0,54$ mm'dir. Hücrenin yapısında, kalınlığı $t_m = 35$ μ m ve iletkenliği $\sigma_c = 5,8 \times 10^7$

S/m olan metalik bakır tabakası FR4 substratı üzerinde C-şeklinde bir forma sokulmuştur. Substrat, $d_{\text{sub}} = 1,50$ mm kalınlığına, $h = 10,16$ mm uzunluğuna, $d = 3,60$ mm genişliğine, $\epsilon_{\text{sub}} = 4,30$ dielektrik sabitine ve $\delta_{\text{sub}} = 0,025$ kayıp tanjantına sahiptir. Son olarak ise ara katman kalınlığı $d_{\text{int}} = 1,00$ mm'dir.

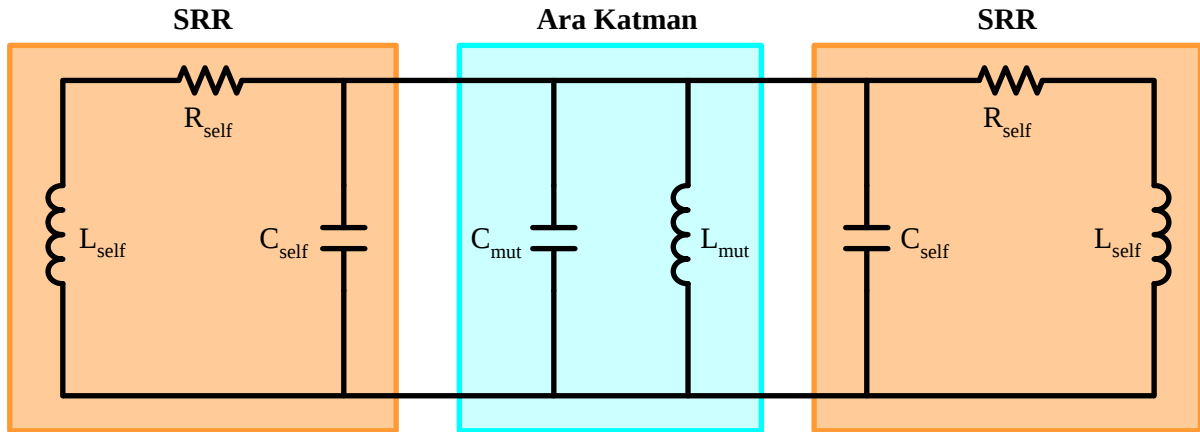


Şekil 13. Elektrik ve manyetik alanlarla rezonatörlerin yönelimi ve geometrik detayları (boyutlandırılması). (a) Perspektif görünüş (ölçekli değil) ve (b) ön görünüş.

Ayrıca Şekil 13'te manyetik alan, SRR üzerinde sirkülasyon akımı akışı üreten SRR düzlemine normaldir ve bu da boşluklarda yük birikimine (elektrik dipol oluşumuna) neden olmaktadır (Ekmekci *et al.* 2011; Hasar and Barroso 2015). Bununla birlikte, ayrı eksenine normal olan elektrik alanı (Şekil 13(b)'deki kesikli çizgilere bakınız) SRR'nin kollarındaki yüklerin ters polaritesini zorlamakta ve simetrik akım akışı (manyetik dipol oluşumu) sağlamaktadır. Böyle bir mod konfigürasyonu, elektrik ve manyetik alanlar arasında güçlü bir EM kuplaj üretmektedir (Marqués *et al.* 2002; Chen *et al.* 2005; Li *et al.* 2009; Hasar *et al.* 2013, 2016, 2018). Böylece bu konfigürasyonun, farklı ileri ve geri yansıma S-parametreleri (Li *et al.* 2009; Hasar *et al.* 2013), iletimde daha geniş bir durdurma bandı (Katsarakis *et al.* 2004), manyeto-elektrik bağlantı katsayısı ξ_0 (Marqués *et al.* 2002; Chen *et al.* 2005; Li *et al.*

2009; Hasar *et al.* 2013, 2016, 2018), ileri ve geri yönlerde farklı yansıyan ve emilen güçler (Hasar *et al.* 2014c, 2015b) ve farklı yarı sonsuz yansıma katsayıları (Hasar *et al.* 2015a) dahil olmak üzere çeşitli özgün özelliklerle sonuçlandığı görülmektedir. Bu özelliklere ek olarak, aslında çalışmamızda, çift taraflı RW-MM sensörlerinin algılama performansını optimize etmek için bu tür kuplajdan faydalanılabileceğini de göstermekteyiz.

Yarı statik koşullar altında (radyasyon etkisi olmadan), uygulanan EM dalga ile incelenen bir MM hücresi arasındaki etkileşimin, elektrik devre elemanları açısından basit ve uygun bir şekilde incelenebileceği bilinmektedir. Şekil 13(a)'daki herhangi bir SRR, yakın diğer rezonatörler arasında kuplaja ek olarak bir öz endüktans (L_{self}) ve bir öz kapasitansa (C_{self}) sahiptir. L_{self} , metalik inklüzyonların boyutlarının ve şeklinin bir fonksiyonu iken, C_{self} , substrat dielektrik sabitine, substrat kalınlığına ve rezonatör topolojisine bağlıdır (Bilotti *et al.* 2007; Ekmekci and Turhan-Sayan 2009). İletken ve dielektrik kayıpları da bir öz direnç (R_{self}) ile açıklanır. Bu devre elemanlarının yanı sıra, çift taraflı RW-MM sensörleri karşılıklı endüktans (L_{mut}) ve karşılıklı kapasitans (C_{mut}) terimlerine sahiptir. L_{mut} , metalik inklüzyonların boyutları ve şekli ve komşu SRR'ler (test edilen numunenin dielektrik bir ortam olduğu varsayılarak) arasındaki mesafe ile değişen bir terimken, C_{mut} terimi, Şekil 13(a)'da gösterildiği gibi SRR'ler arasındaki ara katmanın dielektrik sabiti (ϵ_{int}) ve kalınlığı ile değiştirilir. Bu nedenle, manyetik alan yönündeki herhangi iki komşu SRR için eşdeğer devre Şekil 14'teki gibi modellenenebilir.



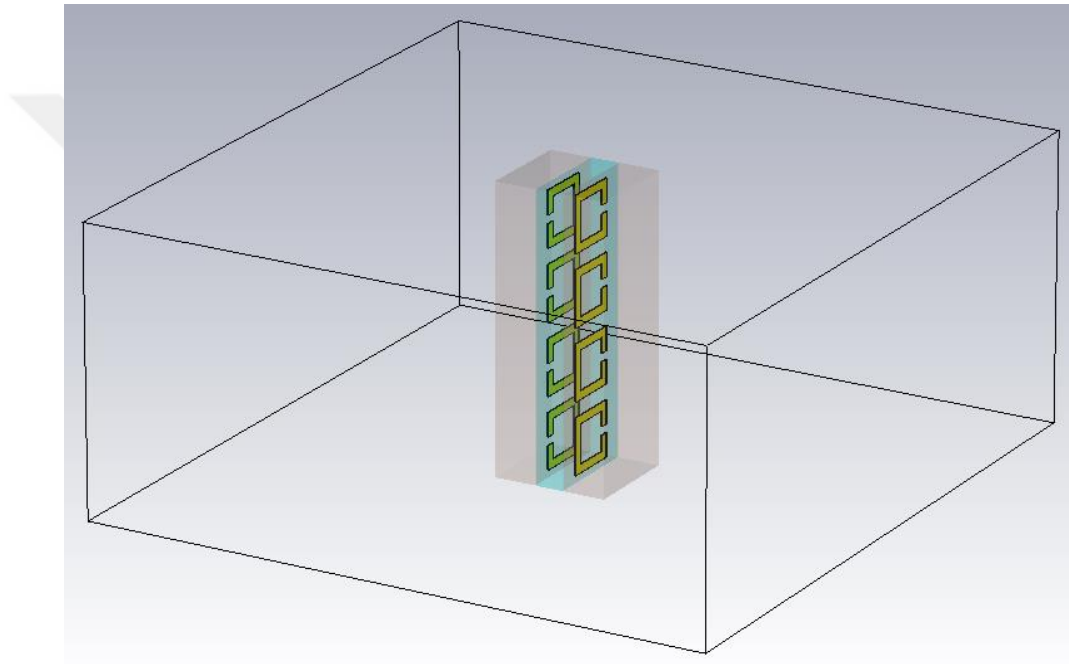
Şekil 14. Manyetik alan yönündeki herhangi iki komşu SRR için eşdeğer devre.

Çalışmamızda, Şekil 13(a) ve Şekil 13(b)'de gösterildiği gibi, özgün rezonans davranışına (elektrik ve manyetik) ek olarak, önerilen sensörün, algılama kabiliyetini optimize etmek ve geliştirmek için enine düzlemin dikey boyutunda (y) tekrarlama (1×4) olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, Şekil 13'teki dört çift taraflı RW-MM sensörünün her biri için sadece dört eşdeğer devre olmayacaktır, aynı zamanda ek (kuplaj) karşılıklı endüktans ve karşılıklı kapasitans terimleri de olacaktır. Dolayısıyla, d_{int} ve/veya ϵ_{int} 'teki herhangi bir

andaki değişim, hem rezonans frekansında bir değişim hem de L_{mut} , C_{mut} ve ek kuplaj karşılıklı endüktans ve kapasitans terimleriyle yansıma ve iletim S-parametrelerinin büyüklüklerinin (sırasıyla $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$) tepe değerinde bir değişim meydana getirecektir.

Önerilen Çift Taraflı RW-MM Sensörünün Fabrikasyonu

Şekil 13'te gösterilen 1×4 dikey SRR inklüzyon hücresi, 3D EM benzeşim programı CST Microwave Studio (MWS) aracılığıyla modellenmiştir ve Şekil 15'te gösterilmiştir. Şekil 13(a)'ya dikkatle bakılırsa ön ve arka FR4 substrat yüzeyinde var olan 1×4 dikey SRR inklüzyon hücreleri, aslında birbirlerinin 180° döndürölmüş halleridir. Dolayısıyla bir hücrenin modellenip üretilmesi yeterli olacaktır.



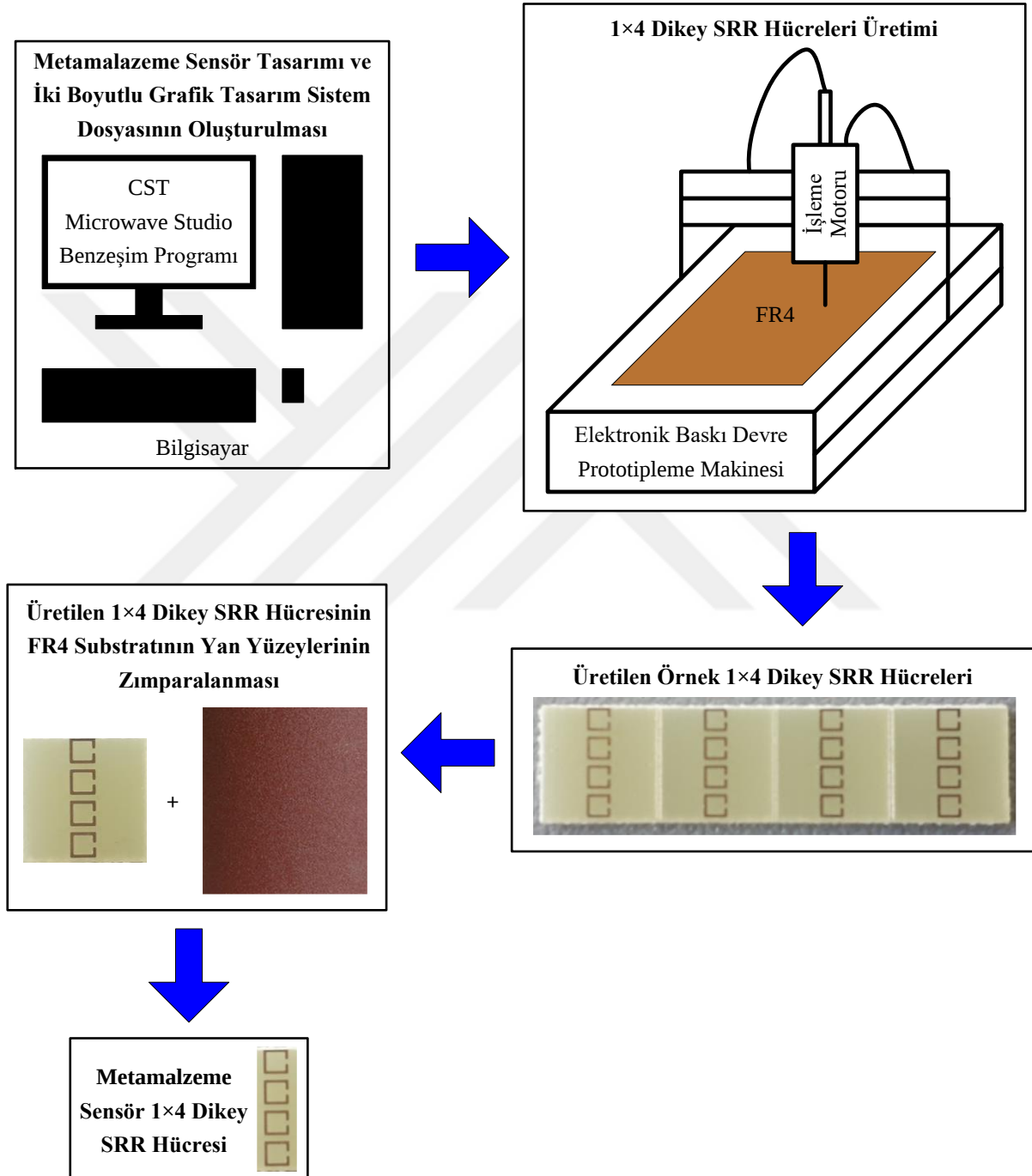
Şekil 15. CST MWS benzeşim programı aracılığı ile tasarlanan çift taraflı RW-MM sensörü.

Bu kapsamda Şekil 15'te CST MWS'de tasarlanan yapının yine aynı program aracılığıyla iki boyutlu grafik tasarım sistem dosyası oluşturulmuştur. Daha sonra elektronik baskı devre prototipleme makinesi (baskı devre frezesi) aracılığıyla daha önceden dielektrik özellikleri tanımlanan FR4 substratı üzerine 1×4 dikey SRR inklüzyon hücreleri, kazıma yöntemi ile (frezelenerek) üretilmiştir.

Genel olarak levha yüzey işlemede kullanılan, hassasiyet ve diğer özellikleri sayesinde farklı materyaller (FR4, CEM, Teflon, Duroid başta olmak üzere piyasadaki pekçok baskı devre materyali) işleyebilen, çözünürlükleri $0,25 \mu m$ ve tekrarlamı hassasiyeti $\pm 1 \mu m$ civarında olan, kimyasal kullanmadan kazıma yöntemi ile yüzey desenleri oluşturan aynı zamanda da delme ve kesme işlemi de yapabilen elektronik baskı devre prototipleme

makineleri, tüm bu özellikleri nedeniyle 1×4 dikey SRR inklüzyon hücrelerini üretmek amacıyla kullanılmıştır.

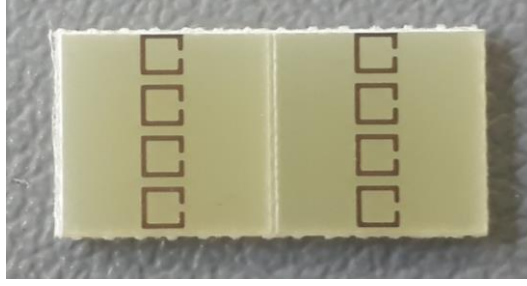
Bu bölümde anlatılan adımların daha net ve anlaşılır olması bakımından önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün fabrikasyonu hakkında detaylı bir grafiksel özet Şekil 16’da sunulmaktadır.



Şekil 16. Önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün FR4 substratı üzerine fabrikasyonu hakkında grafiksel özet.

FR4 substratı üzerine kazınarak üretilen 1×4 dikey SRR inklüzyon hücreleri aşağıda Şekil 17’de daha detaylı olarak gösterilmiş olup belirtilen ölçülerdeki çift taraflı RW-MM

sensör boyutları ise Şekil 16'daki grafiksel özetle de bahsedildiği gibi FR4 substratının yan kenarları zımparalanarak elde edilmiştir.



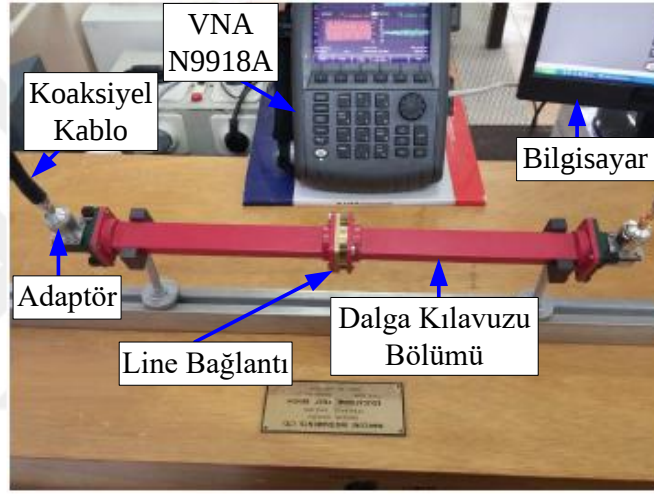
Şekil 17. FR4 substratı üzerine kazınarak üretilen, 2 adet 1×4 dikey SRR inklüzyon hücresi.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yayılma Özelliklerinin Ölçülmesi

Ölçüm kurulumu

İletim-asimetrik ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için X-bandı (8,2-12,4 GHz) ve Ku-bandı (12,4-18,0 GHz) frekans bölgelerinde çalışan iki dalga kılavuzu ölçüm kurulumu yapılmıştır. Örneğin Şekil 18, X-bandında çalışan dalga kılavuzu kurulumunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 18. Yayılma sabiti ölçüm konfigürasyonlarının fotoğrafları. (a) Line bağlantısı ve (b) thru bağlantısı.

Her bir kurulum, EM sinyaller üretmek ve aynı zamanda ölçülen kompleks S-parametreleri sayesinde ağların yanıtını ölçmek için Keysight Technologies'den satın alınan N9918A (30 kHz-26,5 GHz) modeline sahip bir VNA'yı içermektedir. VNA'dan analiz edilen ağlara EM sinyalleri bağlamak için iki adet faz kararlı 3,5 mm koaksiyel kablolar görevlidir. EM sinyalleri koaksiyel kablodan dalga kılavuzu bölümlerine aktarmak için iki adet koaksiyel-dalga kılavuzu adaptör ve Keysight Technologies'in fieldfox veri bağlantı yazılımı ise ölçülen S-parametrelerini işlem sonrası VNA'dan bilgisayara aktarmak için kullanılmıştır. Çalışmamızdaki herhangi bir dalga kılavuzu ölçümü için, her dalga kılavuzu kurulumunun baskın modda ($m = 0$ ve $n = 0$) çalıştığı varsayılmıştır. Her ağ ile baskın mod yayılımını gerçekleştirmek için, iki dalga kılavuzu kurulumunun minimum frekansına ($f_{\min} = 8,2$ GHz) karşılık gelen dalga boyunun 2 katından daha büyük uzunluklara sahip yeterince uzun iki dalga kılavuzu düzlüğü kullanılmıştır (Şekil 18(a) ve Şekil 18(b)'de kırmızı renk ile görülen). Ayrıca yöntemlerimizin doğrulanması ve doğruluklarının da karşılaştırılması için 1001 noktalı S-parametre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonraki alt bölümlerde sunulacak olan önerdiğimiz yöntemlerimiz ile iletim-simetrik ve iletim-asimetrik ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçümlerinde, basitlik için ikinci hattın sıfır uzunlukta line-thru bağlantısı olduğu varsayılmıştır (Hasar *et al.* 2020b, 2020c).

Doğrulama

İletim-asimetrik ve yansıma-simetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen formülasyonun doğrulanması

Önerdiğimiz formülasyonumuzu doğrulamak ve doğruluğunu değerlendirmek için, önce farklı uzunluklarda bazı dalga kılavuzu düzlüklerinin (iletim-simetrik hatlar) yayılma sabitleri ölçülmüştür. Örneğin Şekil 19 ve Şekil 20, 60 MHz civarında bir frekans aralığı için rolling ortalama yöntemini (Jebbor *et al.* 2013) uyguladıktan sonra, önerdiğimiz metodolojimizle (kalibrasyon adımı yok), $L_1 = 7,7$ mm uzunluğundaki X-band dalga kılavuzu düzlüğünden ve $L_1 = 200$ mm uzunluğundaki Ku-band dalga kılavuzu düzlüğünden ölçülen yayılma özellikleri T_0^+ (serbest uzayın ileri yayılma faktörü), T_0^- (serbest uzayın geri yayılma faktörü), γ_0^+ (serbest uzayın ileri yayılma sabiti) ve γ_0^- (serbest uzayın geri yayılma sabiti)'yi göstermektedir ($\text{Im}\{*\}$ kompleks nicelik “*”ın imajiner kısmını gösterir) (Hasar *et al.* 2020c).

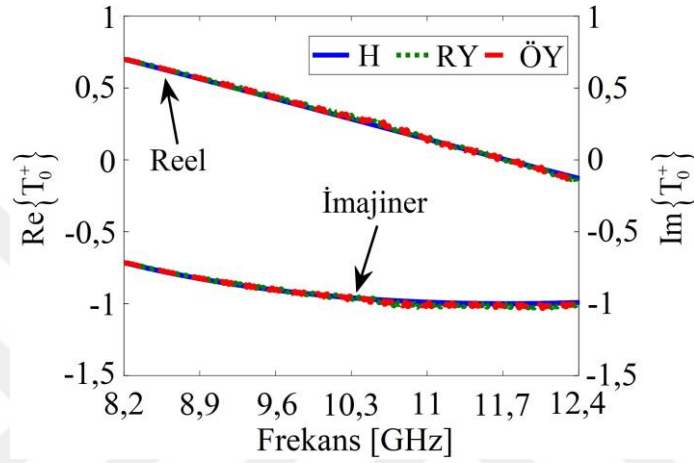
Yöntemimizin uygulanmasında önce $\frac{\chi_1}{\chi_3}$ ve χ_2 terimleri, $|\chi_2| < \left| \frac{\chi_1}{\chi_3} \right|$ kriteri uygulanarak

denklem (56) ve (57)'den belirlenmiştir. Daha sonra, $e^{-\gamma_m^+ L_d}$ ve $e^{-\gamma_m^- L_d}$ büyüklükleri denklem (58) ve (59)'dan hesaplanmıştır. Sonunda γ_0^+ ve γ_0^- , denklem (60)'tan elde edilmiştir. Ayrıca

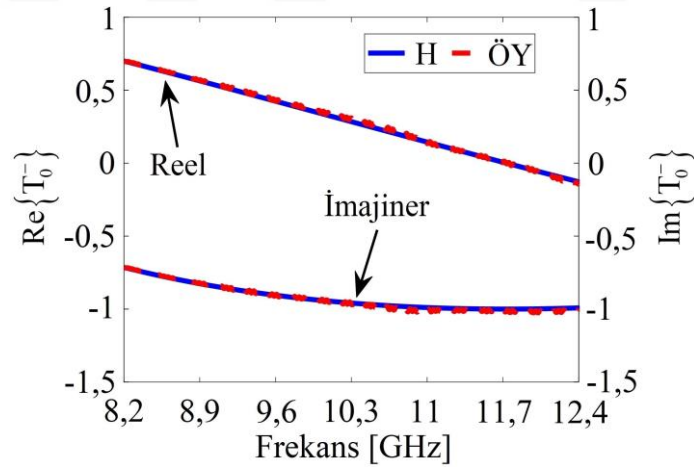
T_0^+ ve γ_0^+ 'yı elde etmek için Janezic and Jargon (1999)'daki yöntem uygulanmıştır ve aşağıdaki denklemler kullanılarak T_0^+ ve γ_0^+ hesaplanmıştır.

$$T_0^+ = T_0^- = T_0 = e^{-\gamma_0 L_1}, \quad \gamma_0 = ik_0 \sqrt{1 - \frac{f_c^2}{f^2}} \quad (95)$$

Burada f ve f_c sırasıyla çalışma ve kesme frekanslarıdır ve k_0 serbest uzayın dalga sayısıdır. X-bandı ölçümleri için $f_c = 6,557$ GHz ve Ku-band ölçümleri için $f_c = 9,488$ GHz kullanılmıştır.

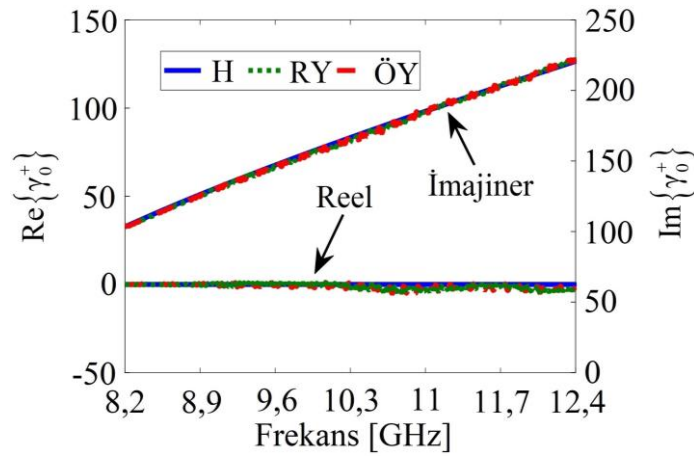


(a)

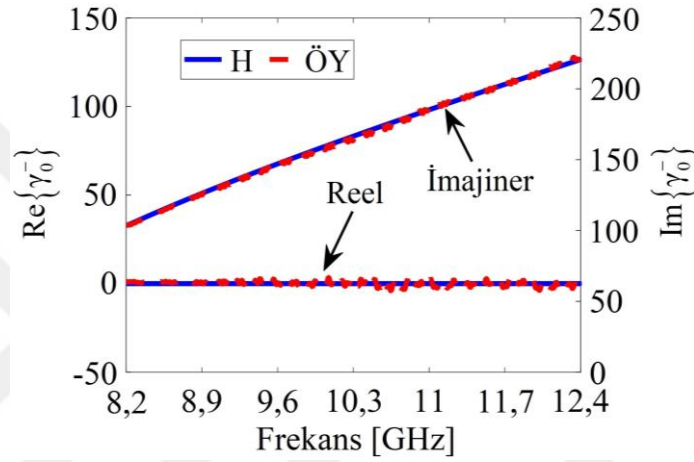


(b)

Şekil 19. $L_1 = 7,7$ mm olan X-bandı dalga kılavuzu düzlüğünden ölçülen yayılma özellikleri T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- . (a) T_0^+ 'nin reel ve imajiner kısımları, (b) T_0^- 'nin reel ve imajiner kısımları, (c) γ_0^+ 'nin reel ve imajiner kısımları ve (d) γ_0^- 'nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “H” hesaplanan sonucu belirtirken, “ÖY” ve “RY” sırasıyla önerilen yöntemimiz ve Janezic and Jargon (1999) referans yöntemiyle elde edilen sonuçları ifade etmektedir).

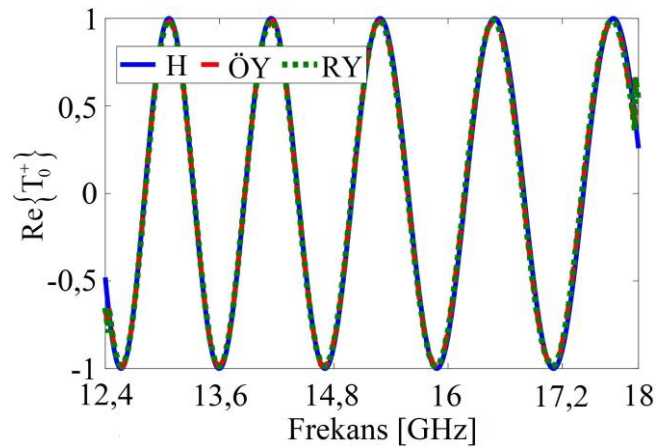


(c)



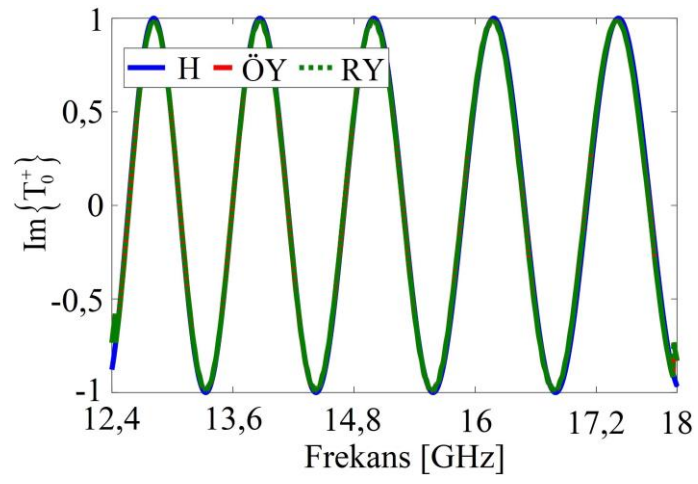
(d)

Şekil 19. (devam)

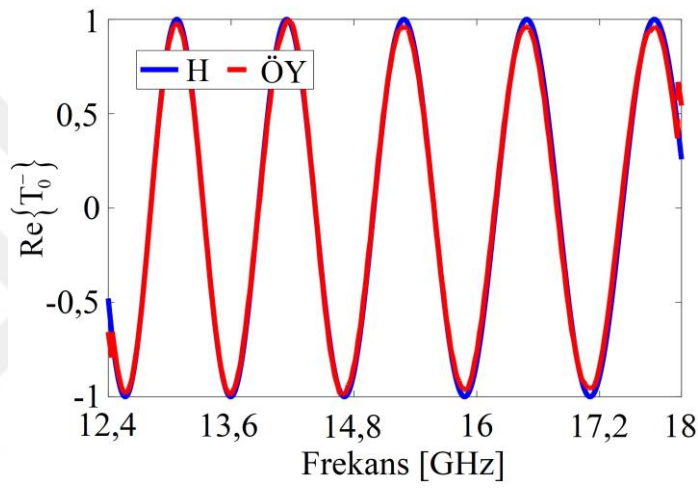


(a)

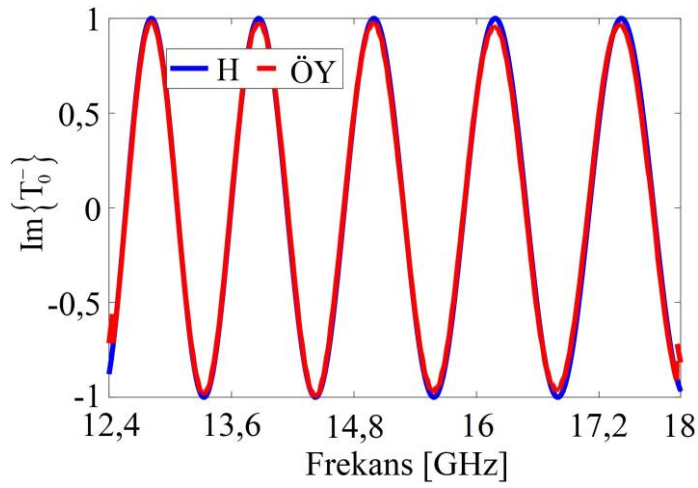
Şekil 20. $L_1 = 200$ mm olan Ku-bandı dalga kılavuzu düzlüğünden ölçülen yayılma özellikleri T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- . (a) T_0^+ ’nin reel kısmı (b) T_0^+ ’nin imajiner kısmı, (c) T_0^- ’nin reel kısmı, (d) T_0^- ’nin imajiner kısmı, (e) γ_0^+ ’nin reel ve imajiner kısımları ve (f) γ_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “H” hesaplanan sonucu belirtirken, “ÖY” ve “RY” sırasıyla önerilen yöntemimiz ve Janezic and Jargon (1999) referans yöntemiyle elde edilen sonuçları ifade etmektedir).



(b)

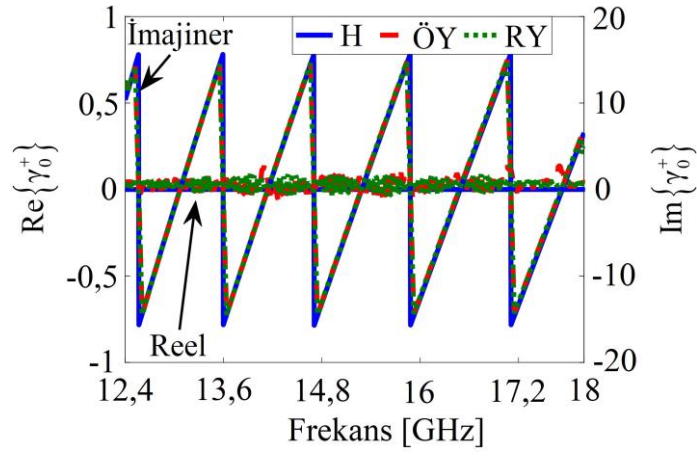


(c)

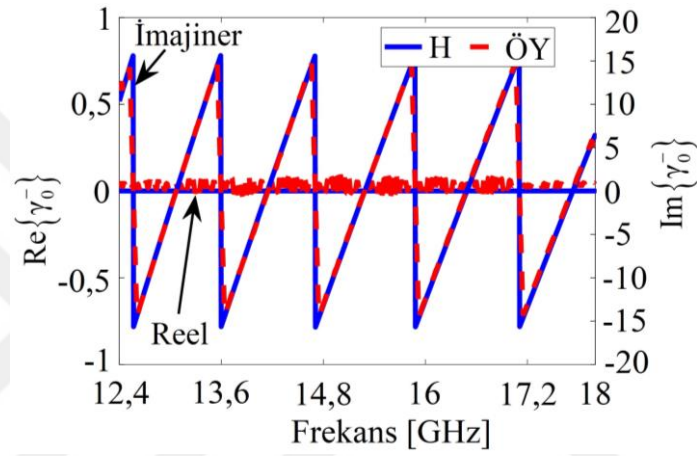


(d)

Şekil 20. (devam)



(e)



(f)

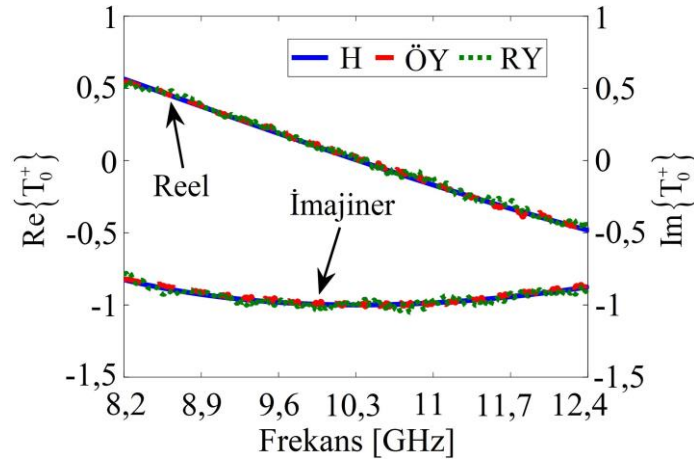
Şekil 20. (devam)

Aşağıdaki iki nokta, Şekil 19 ve Şekil 20'deki bağımlılıklardan not edilir. Birincisi, yöntemimizle ve Janezic and Jargon (1999)'daki yöntem ile elde edilen T_0^+ ve γ_0^+ ve de yöntemimizle elde edilen T_0^- ve γ_0^- , tüm frekans bandı boyunca teorik değerler ile uyumludur. İkincisi, yöntemimiz ve Janezic and Jargon (1999)'daki yöntem ile çıkarılan X-bandı dalga kılavuzu için T_0^+ , γ_0^+ , T_0^- ve γ_0^- parametreleri, Ku-bandı dalga kılavuzu için olanlardan daha fazla salınım göstermektedir. Bunun X-bandı dalga kılavuzu bölümünün daha küçük uzunluğu nedeniyle gerçekleştiği düşünülmektedir. Çünkü dalga kılavuzunun yapısından kaynaklanan herhangi bir tekillik veya boyutsal problem olasılığı dalga kılavuzu uzunluğunun artmasıyla en aza indirilebilir (Hasar *et al.* 2020c).

İletim-asimetrik ve yansıma-asimetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen formülasyonun doğrulanması

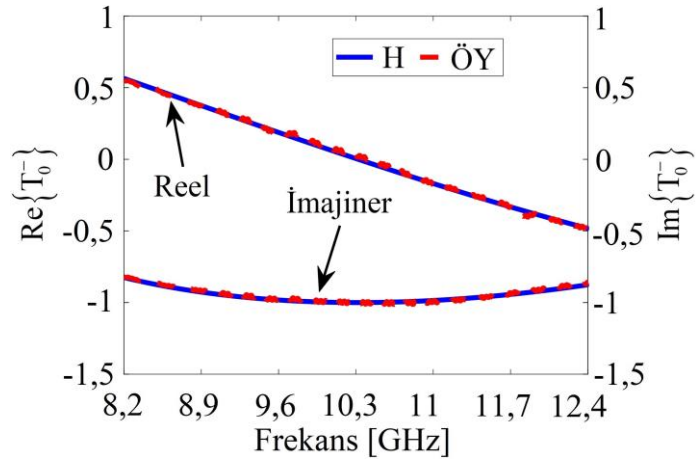
Formülasyonumuzu doğrulamak ve doğruluğunu değerlendirmek için, önce farklı uzunluklarda (Şekil 18'de görüldüğü gibi) bazı üniform iletim-simetrik dalga kılavuzu

düzlüklerinin yayılma sabitleri ölçülmüştür. Örneğin, 60 MHz civarında bir frekans aralığı için rolling ortalama yöntemini (Jebbor *et al.* 2013) uyguladıktan sonra Şekil 21(a)-Şekil 21(d), önerdiğimiz metodolojimizle (kalibrasyon adımı yok) $L = 9,40$ mm uzunluğunda X-bandı dalga kılavuzu düzlüğünden ölçülen yayılma özellikleri T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- 'yi göstermektedir. Yöntemimizin uygulanmasında önce pasiflik ilkesini uygulayarak denklem (92)'den T_0^+ 'nın doğru kökü belirlenmiştir ve sonrasında denklem (93)'ten T_0^- hesaplanmıştır. Ondan sonra denklem (94)'ten γ_0^+ ve γ_0^- elde edilmiştir. Ayrıca T_0^+ ve γ_0^+ 'yi elde etmek için Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemleri uygulanmıştır ve denklem (95)'i kullanarak T_0^+ ve γ_0^+ hesaplanmıştır (Hasar *et al.* 2020b). Ölçümler için $f_c = 6,557$ GHz ayarlanmıştır. Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemleri farklı uzunluklarda iki özdeş ağ (veya hat) gerektirdiğinden, X-bandında $L_1 = 20,55$ mm ve $L_2 = 11,15$ mm ($L_d = L_1 - L_2 = 9,40$ mm) uzunluklarına sahip iki dalga kılavuzu düzlüğünün kalibre edilmemiş S-parametresi ölçümleri kullanılmıştır. Ayrıca, referans yöntemlerin biçimsellikleri benzer olduğu için benzer sonuçlar üretirler. Bu nedenle, özlülük için yalnızca Şekil 21(a) ve Şekil 21(c)'deki Reynoso-Hernández (2003) yönteminin sonuçları sunulmuştur. Bununla birlikte, önerdiğimiz yöntem ve Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemleri arasındaki niceliksel karşılaştırma kısa bir süre içinde sunulacaktır.

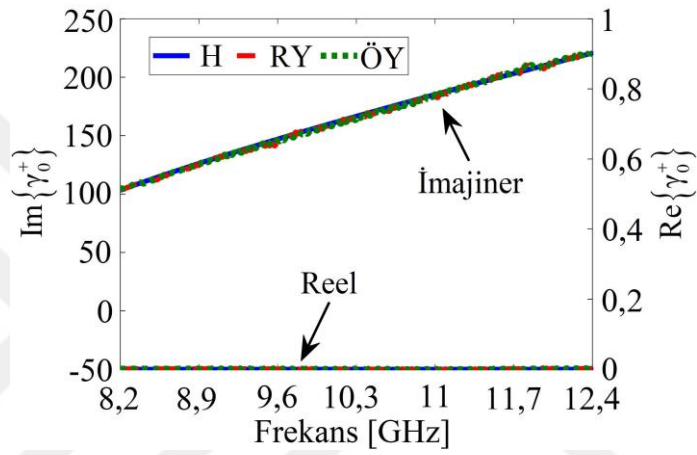


(a)

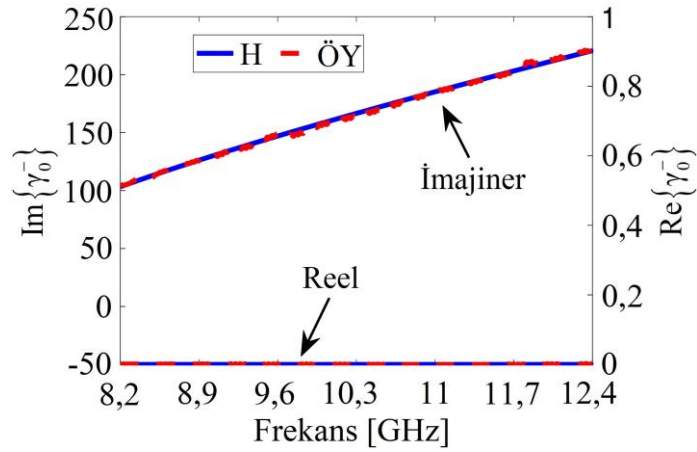
Şekil 21. $L = 9,40$ mm olan X-bandı dalga kılavuzu düzlüğünden ölçülen yayılma özellikleri T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- . (a) T_0^+ 'nin reel ve imajiner kısımları, (b) T_0^- 'nin reel ve imajiner kısımları, (c) γ_0^+ 'nin reel ve imajiner kısımları ve (d) γ_0^- 'nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “H” hesaplanan sonucu belirtirken, “ÖY” ve “RY” sırasıyla önerilen yöntemimiz ve Reynoso-Hernández (2003) referans yöntemiyle elde edilen sonuçları ifade etmektedir).



(b)



(c)



(d)

Şekil 21. (devam)

Aşağıdaki hususlar, Şekil 21(a)-Şekil 21(d)'deki bağımlılıklardan not edilir. Birincisi, yöntemimizle ve Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemleri ile elde edilen T_0^+ ve γ_0^+ ve de yöntemimizle elde edilen T_0^- ve γ_0^- , tüm frekans bandı boyunca teorik

değerler ile uyumludur. İkinci olarak, yöntemimiz ile elde edilen T_0^+ ve γ_0^+ değerleri, Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemleri ile elde edilenlerden daha az salınımına sahiptir. Yöntemimizin ve Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemlerinin doğruluğunu nicel olarak göstermek için, normalleştirilmiş kök-ortalama-kare-hata (Root-Mean-Square-Error, RMSE)'ya dayalı uyum derecesi (Goodness of Fit, GoF) hesaplanmıştır (Hasar *et al.* 2020b).

$$\text{GoF} = 1 - \frac{\|X^{\text{cal}} - X^{\text{ext}}\|^2}{\|X^{\text{cal}} - X_{\text{mean}}^{\text{cal}}\|^2}, \quad X_{\text{mean}}^{\text{cal}} = \frac{1}{N_f} \sum_{u=1}^{N_f} X_u^{\text{cal}} \quad (96)$$

Burada X karşılaştırılacak terimdir (bizim durumumuzda T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- 'nin reel veya imajiner kısmı), X^{cal} hesaplanan X değerleridir, X^{ext} çıkarılan X değerleridir, $X_{\text{mean}}^{\text{cal}}$ hesaplanan X değerlerinin ortalamasıdır, N_f frekans noktalarının sayısıdır (analizimizde 1001'e eşittir), u frekans noktasıdır ($u = 1, 2, 3, \dots, 1000, 1001$), X_u^{cal} ve X_u^{ext} sırasıyla u . frekans noktasında hesaplanan ve çıkarılan X değerleridir. X^{cal} ve X^{ext} $N_f \times 1$ sütun vektörleridir ve $\|\cdot\|$ “*” in 2-normunu (büyüklüğünü) göstermektedir (Hasar *et al.* 2020b).

Tablo 1. $L = 9,40$ mm Uzunluğunda X-Bandı Dalga Kılavuzu Düzlüğü İçin Denklem (96)'dan Hesaplanan Normalize Edilmiş RMSE'ye Dayalı GoF Değerleri

Yöntem	$\text{Re}\{T_0^+\}$	$\text{Re}\{T_0^-\}$	$\text{Im}\{\gamma_0^+\}$	$\text{Im}\{\gamma_0^-\}$
Önerilen Yöntem	0,9551	0,9532	0,9531	0,9514
Reynoso-Hernández (2003) Yöntemi	0,9369	–	0,9318	–
Janezic and Jargon (1999) Yöntemi	0,9387	–	0,9328	–

Tablo 1, $\text{Re}\{T_0^+\}$, $\text{Re}\{T_0^-\}$, $\text{Im}\{\gamma_0^+\}$ ve $\text{Im}\{\gamma_0^-\}$ için hesaplanan GoF değerlerini göstermektedir. Daha yüksek bir GoF değerinin (bire yakın) X^{cal} ve X^{ext} değerleri arasında iyi bir uyum olduğu anlamına geldiği belirtilmelidir. Yöntemimiz ile hesaplanan $\text{Re}\{T_0^+\}$ ve $\text{Im}\{\gamma_0^+\}$ için GoF değerlerinin, Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemleri ile aynı parametreler için hesaplanan GoF değerlerinden daha büyük olduğu Tablo 1'den not edilir. Bu farkın, dalga kılavuzu düzlüklerinin uzunluklarındaki belirsizliklerden ve iki dalga kılavuzu düzlüğünden dolayı artan fabrikasyon toleranslarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Çünkü yöntemimiz sadece bir ağ gerektirse de, Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemleri farklı uzunluklarda iki özdeş ağ gerektirmektedir.

Örneğin, yöntemimiz ile $\text{Re}\{T_0^+\}$ için GoF değeri 0,9551 iken Janezic and Jargon (1999) yöntemi için 0,9387'dir. Ayrıca, yöntemimiz için $L = 9,40$ mm uzunluğunda dalga kılavuzu düzlüğü için elde edilen T_0^- 'nin, yöntemimiz ile aynı düzlük için elde edilen $T_0^+ (\gamma_0^+)$ 'dan daha fazla dalgalanmaya sahip olduğu not edilir. Çünkü $T_0^- (\gamma_0^-)$, denklem (92)'den T_0^+ elde edildikten sonra denklem (93)'ten hesaplanmaktadır. Tablo 1'den $\text{Im}\{\gamma_0^-\}$ için GoF değerinin $\text{Im}\{\gamma_0^+\}$ için olandan (biraz) daha küçük olduğu görülmektedir ve bu da bizim noktamızı doğrulamaktadır (Hasar *et al.* 2020b).

Ferrit yüklü bir dalga kılavuzunun yayılma özelliklerinin ölçülmesi

Önceki bölümde ele alınan hatlar (X-bandı ve Ku-bandında farklı uzunluklara sahip dalga kılavuzu düzlükleri) iletim-simetrik özelliklere sahiptir ve önerdiğimiz formülasyonları doğrulamak için kullanılmıştır. İletim-asimetrik ağlar için önerilen yöntemlerimizin performansını değerlendirmek için, uzunluğu 28,7 mm olan ($L = L_1 = L_d = 28,7$ mm) ferrit yüklü bir X-band dalga kılavuzu mikrodalga faz kaydırıcı incelenmiştir (bunun için Şekil 22'ye bakınız). Herhangi bir kalibrasyona başvurmaksızın bu faz kaydırıcının T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- 'sini çıkarmak için önerilen metodolojilerimiz uygulanmıştır. Yöntemimizle çıkarılan parametrelerin doğruluğunu karşılaştırmak için, Janezic and Jargon (1999) ve Reynoso-Hernández (2003) yöntemleri iletim-asimetrik mikrodalga ağlar için uygulanabilir olmadığından ve laboratuvarımızda sadece aynı tip kaydırıcılara sahip olduğumuz için (farklı uzunluktaki kaydırıcılar yok), uzunlukları farklı olan özdeş ağlar gerektiren bu yöntemler uygulanamamıştır. Bunun yerine, iletim-simetrik yansıtıcı kalibrasyon standardı ile kalibre edilen S-parametrelerini kullanan bir metodoloji (Zhao *et al.* 2010) uygulanmıştır (Hasar *et al.* 2020b, 2020c). Bu yöntemi (Zhao *et al.* 2010) takiben iletim-asimetrik ve yansıma-simetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için verilen metodolojiye uygun olarak denklem (42)-(45)'teki S-parametreleri ifadelerinden γ^+ ve γ^- değerleri, aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanarak bulunur.

$$\Gamma^2 = \frac{T^- - S_{12}}{T^- (1 - S_{12} T^+)}, \quad S_{21} = S_{12} \frac{T^+}{T^-} \quad (97)$$

$$S_{11}^2 T^- = (1 - S_{12} T^+) (T^- - S_{12}) \quad (98)$$

$$T^+ = \frac{K \mp \sqrt{K^2 - 4S_{21}S_{12}}}{2S_{12}} \quad (99)$$

$$K = 1 - S_{11}^2 + S_{21}S_{12}, \quad T^- = T^+ \frac{S_{12}}{S_{21}} \quad (100)$$

$$\gamma^+ = -\frac{\ln(T^+)}{L}, \quad \gamma^- = -\frac{\ln(T^-)}{L} \quad (101)$$

Burada, K S-parametreleri arasındaki işlemlerin kısaltma terimidir, T^+ ve T^- ise sırasıyla ileri ve geri yayılma faktörleridir. Denklem (99)'daki T^+ için doğru işaret, pasif ağlar için pasiflik ilkesi $|T^+| \leq 1$ 'i (ilaveten denklem (100)'den $|T^-| \leq 1$) uygulayarak bulunabilir.



Şekil 22. Ölçümlerde kullanılan ferrit yüklü dalga kılavuzu mikrodalga faz kaydırıcının fotoğrafları.

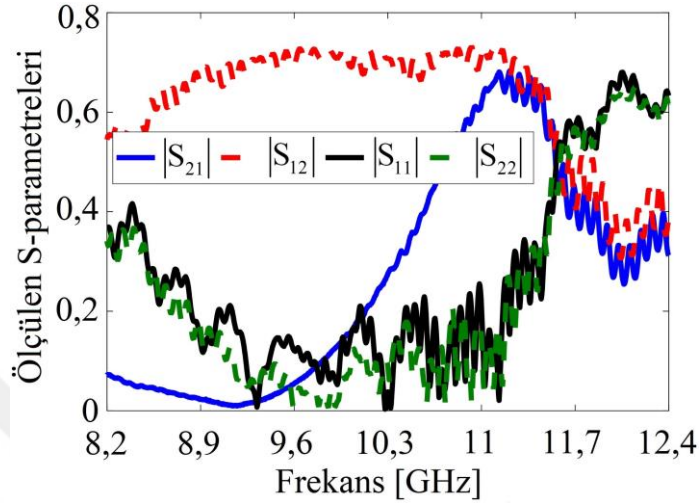
İletim-asimetrik ve yansıma-asimetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için verilen metodolojiye uygun olarak ise, denklem (68)-(71)'deki S-parametreleri ifadelerinden γ^+ ve γ^- değerleri denklem (97)-(100)'e ek olarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanarak bulunur.

$$\gamma^\mp = -\frac{\ln(T^\mp) + 2\pi m_b^\mp}{L} \quad (102)$$

Burada $m_b^\mp$ değerleri, Barroso and Hasar (2012) ve Hasar *et al.* (2013) yöntemleri kullanılarak uygun değeri belirlenebilen branch indeksi değerleridir ($m_b^\mp = \dots, -1, 0, 1, \dots$). Denklem (99)'daki T^+ için doğru işaret, yine pasif ağlar için pasiflik ilkesi $|T^+| \leq 1$ 'i uygulayarak bulunabilir (ilaveten denklem (100)'den $|T^-| \leq 1$). Buna göre yukarıda bahsedilen metodolojinin ifadelerinin, Zhao *et al.* (2010) yöntemiyle aynı olduğu not edilir.

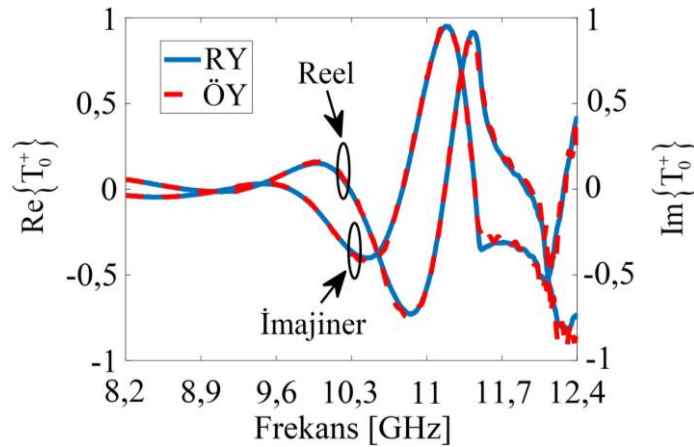
Zhao *et al.* (2010)'daki yöntem kalibrasyon gerektirdiği için hat standartı olarak 9,40 mm uzunluğunda bir X-bandı dalga kılavuzu düzlüğü (90° 'den yaklaşık 70° 'ye kadar kayma özelliğine sahip) ve yansıma standartı olarak ise oldukça yansıtıcı bir sonlandırma kullanılarak TRL kalibrasyon tekniği uygulanmıştır (Engen and Hoer 1979). Şekil 23, analiz

edilen mikrodalga faz kaydırıcının ölçülen S-parametrelerinin büyüklüklerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde özellikle 8,2-11,2 GHz frekans aralığında $|S_{21}| \neq |S_{12}|$ olduğu yani iletimin asimetrik olduğu görülmektedir. Ek olarak, özellikle 8,2-10,0 GHz boyunca $|S_{11}| \neq |S_{22}|$ olduğu yani yansımanın asimetrik olduğu ve verilen frekans aralığı dışında $|S_{11}| = |S_{22}|$ olduğu yani yansımanın simetrik olduğu da görülmektedir.



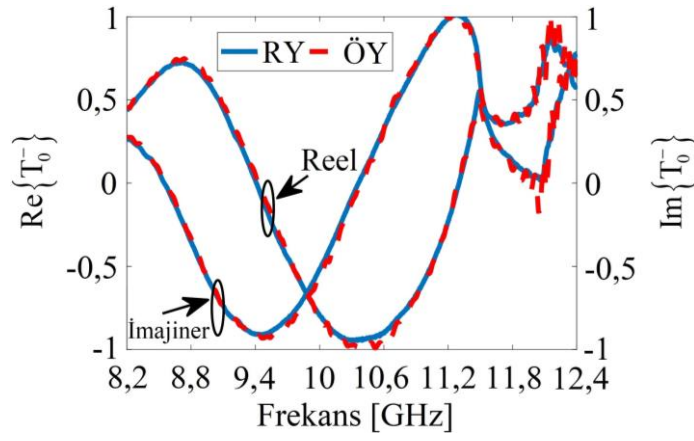
Şekil 23. Şekil 22’de gösterilen ferrit yüklü dalga kılavuzu mikrodalga faz kaydırıcının ölçülen ileri ve geri S-parametrelerinin büyüklükleri.

Şekil 24 ve Şekil 25 sırasıyla, iletim-asimetrik ve yansıma-simetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerdiğimiz ve Zhao *et al.* (2010)’daki yöntem ile mikrodalga faz kaydırıcının T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- parametrelerinin çıkarılan reel ve imajiner kısımlarını göstermektedir (Hasar *et al.* 2020c).



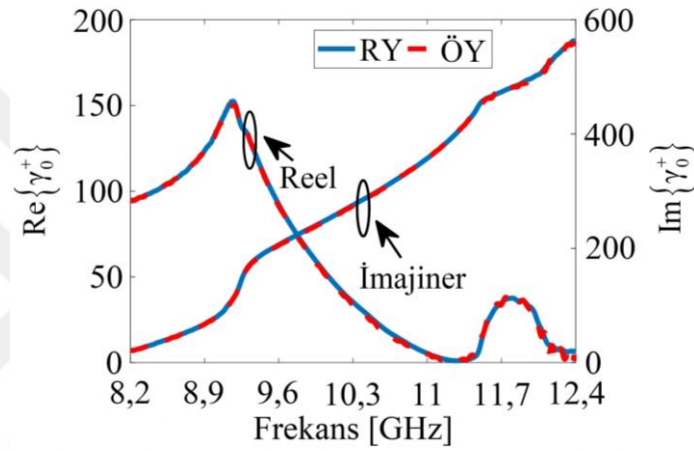
(a)

Şekil 24. Mikrodalga faz kaydırıcı için yayılma özellikleri T_0^+ ve T_0^- . (a) T_0^+ ’nın reel ve imajiner kısımları ve (b) T_0^- ’nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “RY” kalibrasyon bağımlı referans yöntem (Zhao *et al.* 2010) ve “ÖY” iletim-asimetrik ve yansıma-simetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen yöntemimiz ile elde edilen sonuçları ifade etmektedir).

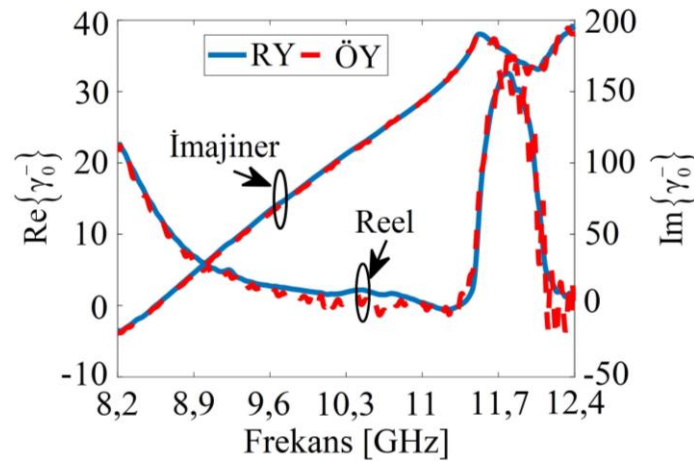


(b)

Şekil 24. (devam)



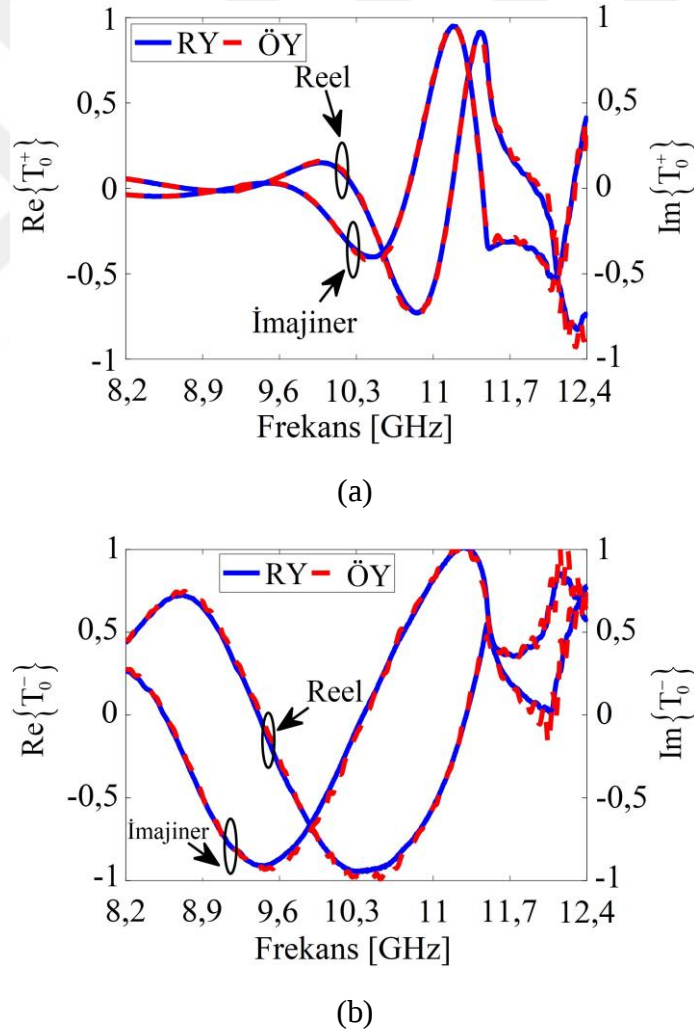
(a)



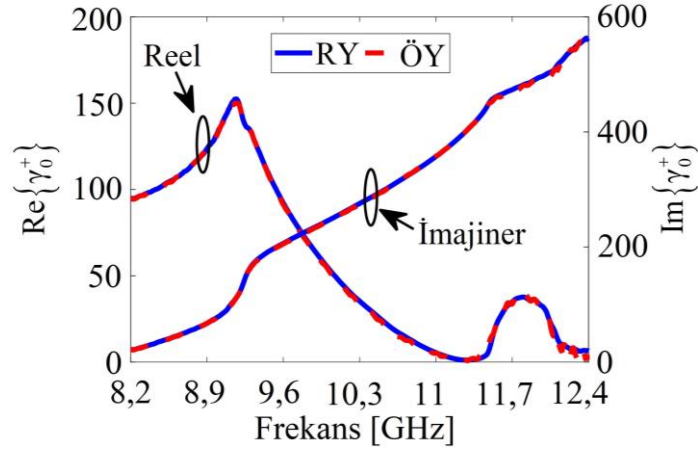
(b)

Şekil 25. Mikrodalga faz kaydırıcı için yayılma özellikleri γ_0^+ ve γ_0^- . (a) γ_0^+ 'nin reel ve imajiner kısımları ve (b) γ_0^- 'nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “RY” kalibrasyon bağımlı referans yöntemi (Zhao *et al.* 2010) ve “ÖY” iletim-asimetrik ve yansımaya-simetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen yöntemimiz ile elde edilen sonuçları ifade etmektedir).

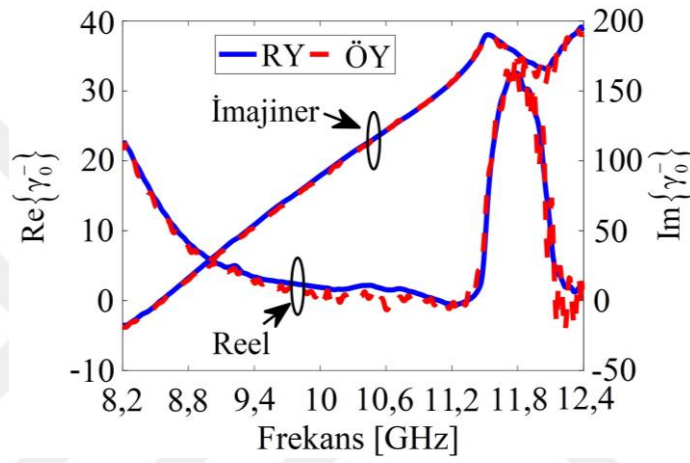
Şekil 24 ve Şekil 25'e göre aşağıdaki hususlar not edilir. İlk olarak, önerdiğimiz kalibrasyon gerektirmeyen yöntem ve kalibrasyon bağımlı yöntem ile elde edilen, dikkate alınan iletim-asimetrik mikrodalga ağından çıkarılan T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- parametrelerinin reel ve imajiner kısımları, tüm frekans bandı boyunca iyi bir uyum içindedir. İkincisi, önerdiğimiz ve kalibrasyon bağımlı yöntem ile çıkarılan $T_0^+(\gamma_0^+)$ ve $T_0^-(\gamma_0^-)$ parametreleri birbirinden farklıdır. Bu da dikkate alınan ağın bir iletim-asimetrik ağ olduğunu göstermektedir. Üçüncü olarak, yöntemimiz ve kalibrasyon bağımlı yöntemle elde edilen γ_0^+ ve γ_0^- 'nin reel kısımları, $e^{+i\omega t}$ zaman referansı için sıfırdan büyük olup bu da dikkate alınan mikrodalga ağının pasif bir ağ olduğunu göstermektedir. Son olarak ise yöntemimiz herhangi bir kalibrasyon gerektirmezken uygulanan kalibrasyon bağımlı yöntem, mikrodalga ağlarının karakterizasyonundan önce bir tür kalibrasyon gerektirmektedir (Hasar *et al.* 2020c).



Şekil 26. Mikrodalga faz kaydırıcı için yayılma özellikleri T_0^+ ve T_0^- . (a) T_0^+ 'nin reel ve imajiner kısımları ve (b) T_0^- 'nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “RY” kalibrasyon bağımlı referans yöntem (Zhao *et al.* 2010) ve “ÖY” iletim-asimetrik ve yansıma-asimetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen yöntemimiz ile elde edilen sonuçları ifade etmektedir).



(a)



(b)

Şekil 27. Mikrodalga faz kaydırıcı için yayılma özellikleri γ_0^+ ve γ_0^- . (a) γ_0^+ 'nin reel ve imajiner kısımları ve (b) γ_0^- 'nin reel ve imajiner kısımları (Burada, “RY” kalibrasyon bağımlı referans yöntem (Zhao *et al.* 2010) ve “ÖY” iletim-asimetrik ve yansıma-asimetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerilen yöntemimiz ile elde edilen sonuçları ifade etmektedir).

Şekil 26 ve Şekil 27 sırasıyla, iletim-asimetrik ve yansıma-asimetrik mikrodalga ağların veya hatların yayılma özelliklerinin ölçülmesi için önerdiğimiz ve Zhao *et al.* (2010) yöntemi ile mikrodalga faz kaydırıcının T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- parametrelerinin çıkarılan reel ve imajiner kısımlarını göstermektedir. Buna göre, Şekil 26 ve Şekil 27’den aşağıdaki hususlar not edilir. İlk olarak, önerilen kalibrasyonsuz yöntemimiz ve bir iletim-simetrik yansıtıcı standartı ile kalibre edilmiş S-parametreleri gerektiren Zhao *et al.* (2010) yöntemi ile dikkate alınan iletim-asimetrik mikrodalga ağından elde edilen T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- parametrelerinin reel ve imajiner kısımları, tüm frekans bandı boyunca iyi bir uyum içindedir. İkincisi, önerdiğimiz ve Zhao *et al.* (2010) yöntemi ile çıkarılan $T_0^+(\gamma_0^+)$ ve $T_0^-(\gamma_0^-)$ parametreleri birbirinden farklıdır. Bu da dikkate alınan mikrodalga ağının (faz kaydırıcı) bir iletim-

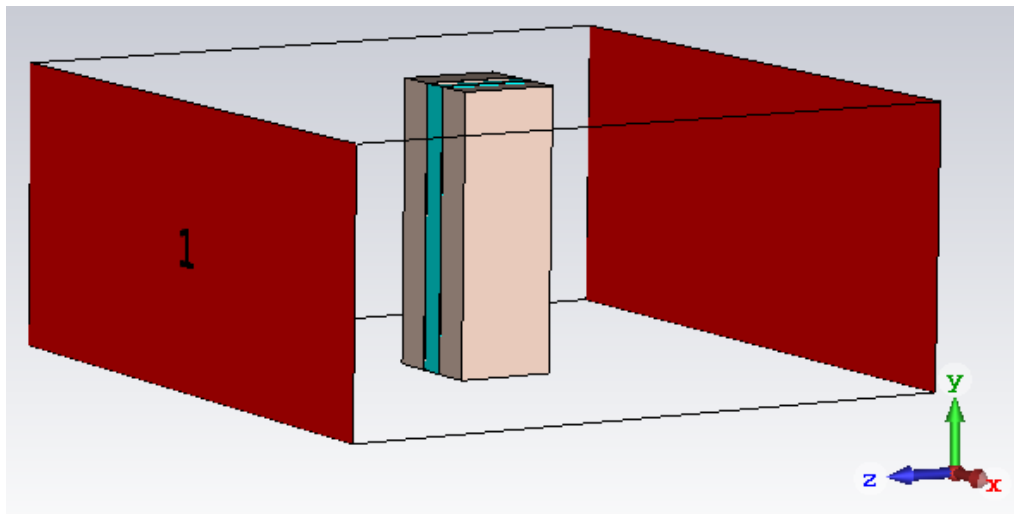
asimetrik ağ olduğunu göstermektedir. Üçüncü olarak, yöntemimiz ve Zhao *et al.* (2010) yöntemi ile elde edilen γ_0^+ ve γ_0^- 'nin reel kısımları, $e^{+i\omega t}$ zaman referansı için sıfırdan büyük olup bu da dikkate alınan mikrodalga ağının pasif bir ağ olduğunu göstermektedir. Son olarak ise yöntemimiz herhangi bir yansıtıcı kalibrasyon standartı gerektirmeksizin γ_0^+ ve γ_0^- 'yi çıkartırken, Zhao *et al.* (2010) yöntemi aynı amaç için bu kalibrasyon standartının ölçümüne ihtiyaç duymaktadır (Hasar *et al.* 2020b).

Şekil 24 ile Şekil 25 ve Şekil 26 ile Şekil 27 ile ilgili olarak ayrıca şunu da belirtmek gerekir ki; örnek olarak aynı mikrodalga faz kaydırıcının T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- parametrelerinin reel ve imajiner kısımları çıkartıldığından ve bu sonuçlar aynı referans yöntem (Zhao *et al.* 2010) ile karşılaştırıldığından hem Şekil 24 ve Şekil 26 hem de Şekil 25 ve Şekil 27 birbiri ile uyum içindedir (hemen hemen aynıdır).

MM Sensör

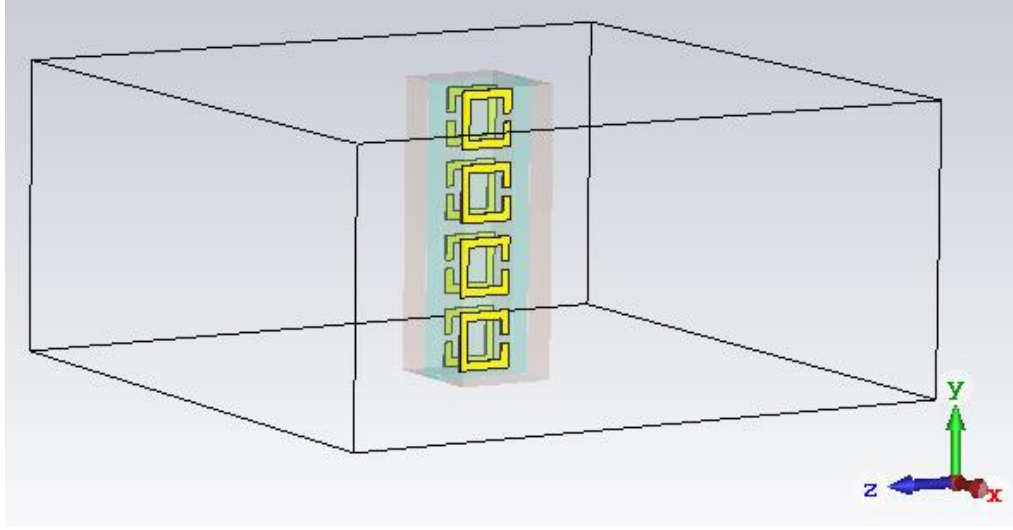
Benzeşimler

S-parametreleri için benzeşimler 3D EM benzeşim programı CST MWS aracılığıyla yapılmıştır. Mükemmel elektrik iletken (Perfect Electric Conductor, PEC) sınır koşulları (elektrik alan şiddetinin teğet bileşeni, $\vec{E}_t = 0$) ayarlanarak içi boş bir metalik X-bandı dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Burada, dalganın kılavuz boyunca z yönünde yayıldığı ve koordinat referansının kılavuz kesitinin merkezinde bulunduğu varsayılmakta olup tasarlanan çift taraflı RW-MM sensörünün sol ve sağ taraflarına eşit mesafede olan X-bandı dalga kılavuzu portları (22,86 mm × 10,16 mm) yerleştirilmiştir.



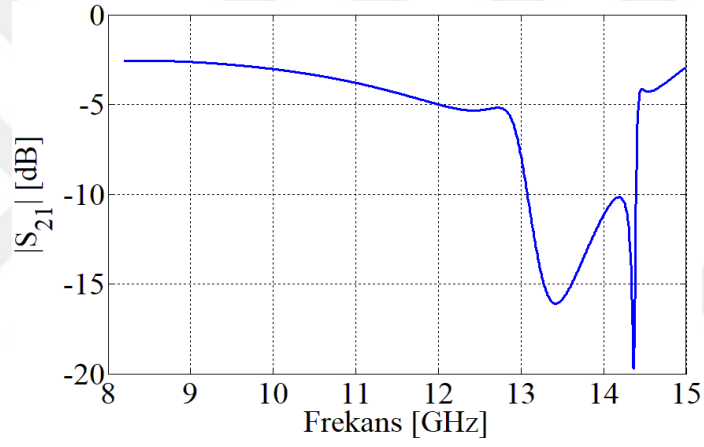
(a)

Şekil 28. 3D EM benzeşim programı CST MWS'de, önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün ve X-bandı dalga kılavuzu portlarının yerleşimi.

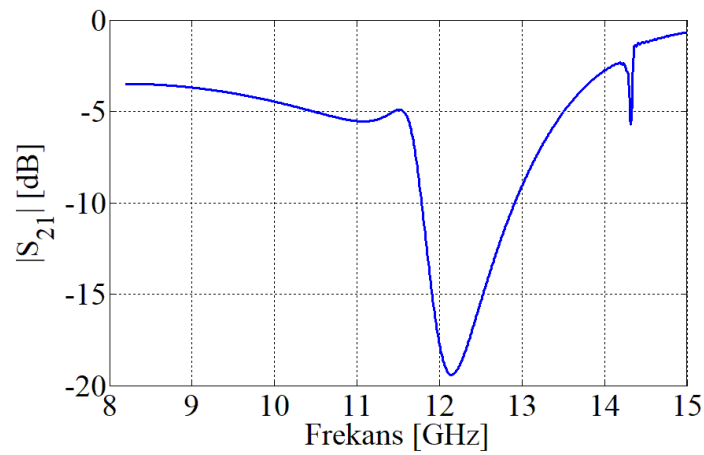


(b)

Şekil 28. (devam)

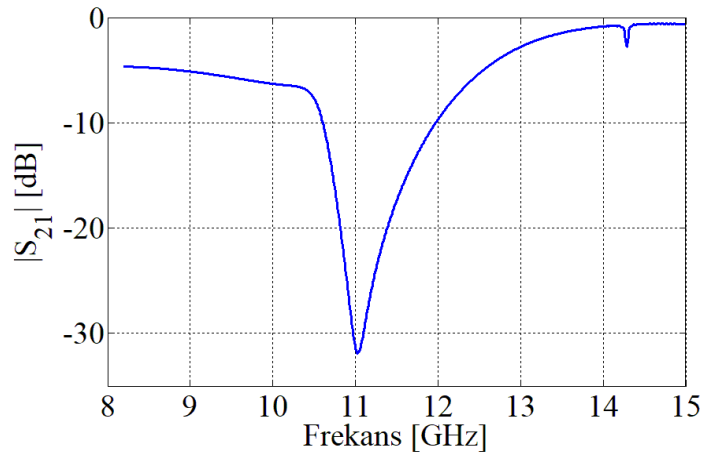


(a)



(b)

Şekil 29. $d_{\text{int}} = 1,00$ mm kalınlığındaki (a) hava, (b) polietilen ve (c) FR4 ara katmanı için önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün 8,2-15 GHz frekans aralığında, benzeşimler ile elde edilen S_{21} parametre büyüklükleri.



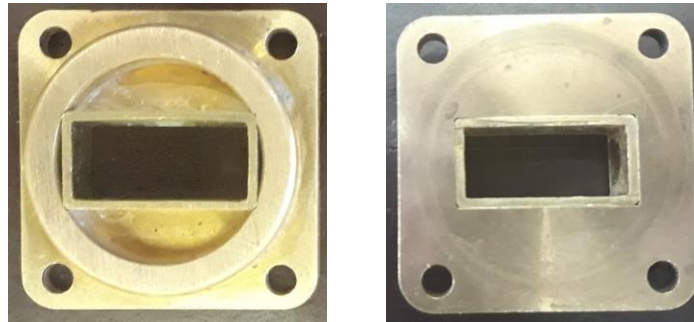
(c)

Şekil 29. (devam)

Şekil 28'deki tasarıma bağlı olarak çift taraflı RW-MM sensör tabakaları arasındaki ara katmana; çift taraflı RW-MM sensör tabakası ile aynı uzunluk ve genişliğe sahip, 1,00 mm kalınlığındaki ($d_{int} = 1,00$ mm) ve farklı özelliklerdeki (dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı (δ_{int}) farklı) malzemeler yerleştirilerek sensörün benzeşim sonuçları elde edilmiştir (Şekil 29'a bakınız). Bu benzeşimlerde, ϵ_{int} ve δ_{int} değerleri tanımlı olan hava ($\epsilon_{int} = 1,00$ ve $\delta_{int} = 0$), polietilen ($\epsilon_{int} = 2,25$ ve $\delta_{int} = 4,44 \times 10^{-5}$) ve FR4 ($\epsilon_{int} = 4,30$ ve $\delta_{int} = 0,025$) ara katman kullanılmıştır. Çift taraflı RW-MM sensörünün çalışmasını daha iyi görebilmek için ise benzeşimler X-bandında değil 8,2-15 GHz frekans aralığında yapılmıştır.

Ölçümler

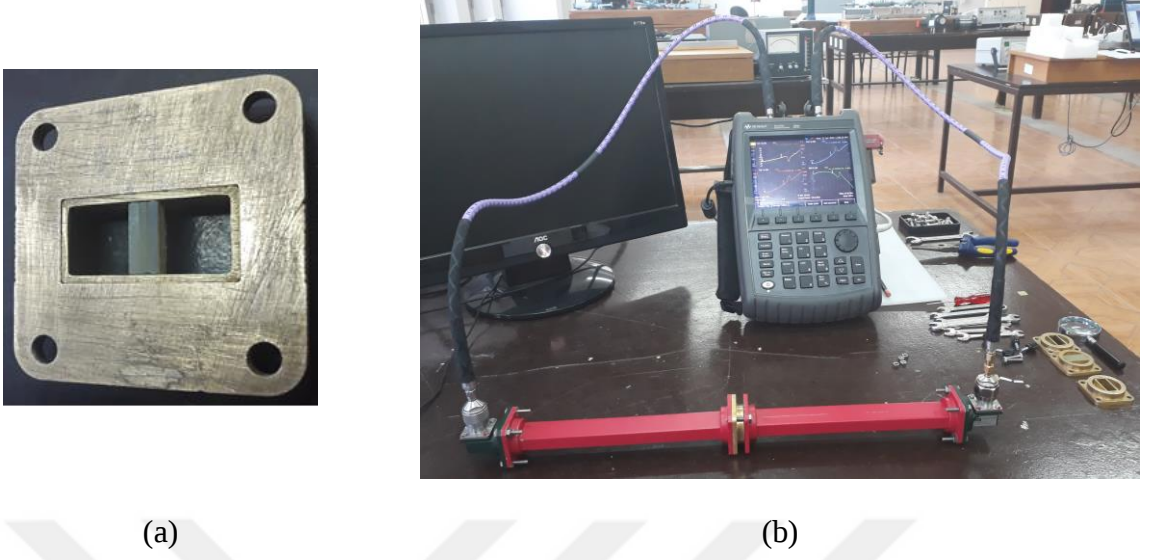
İlk olarak, daha iyi ölçüm sonuçları için çift taraflı RW-MM sensörü ve numunelerin yerleştirileceği X-bandı dalga kılavuzu numune tutucunun ön ve arka yüzeyleri zımparalanarak pürüzsüz hale getirilmiştir.



Şekil 30. X-bandı dalga kılavuzu numune tutucu bölümü ön ve arka yüzeyleri.

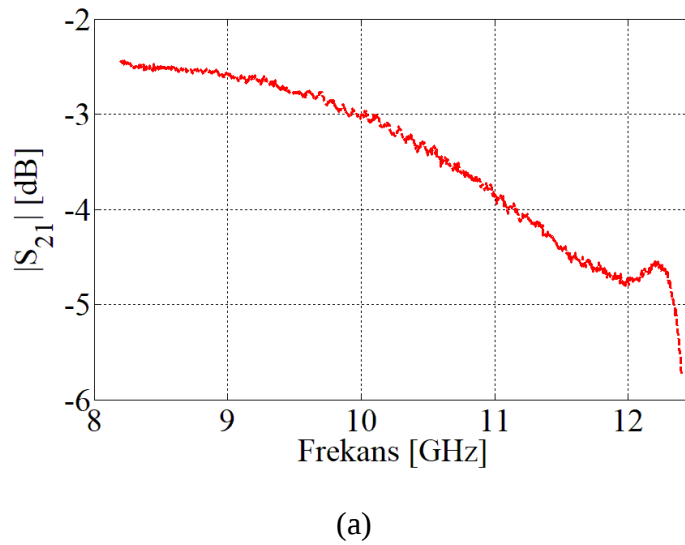
İkinci olarak, dalga kılavuzu numune tutucu bölümüne ara katmanda 1,00 mm boşluk kalacak şekilde çift taraflı RW-MM sensörü yerleştirilmiştir. Daha sonra tipik bir X-bandı dalga kılavuzu kurulumu, Keysight Technologies N9918A VNA ile yapılmıştır (Hasar *et al.* 2017b). Son olarak ise TRL kalibrasyon tekniği (Engen and Hoer 1979), 9,40 mm

uzunluğunda bir düz dalga kılavuzu düzlüğü kullanılarak uygulanmıştır (cihazın kalibrasyonu yapılmıştır).

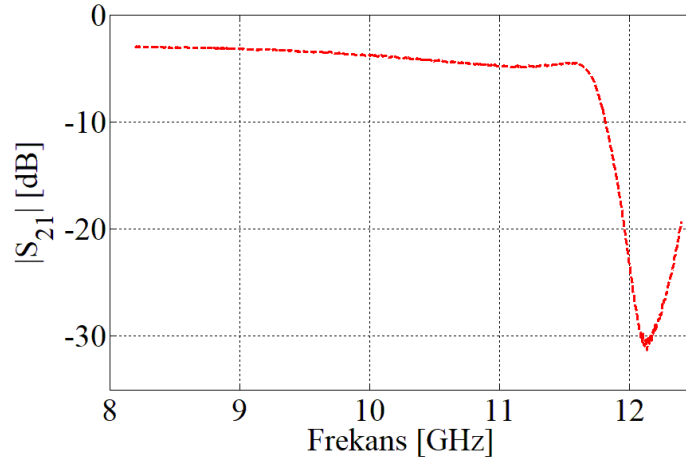


Şekil 31. (a) X-bandı dalga kılavuzu numune tutucu bölümüne, önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün yerleştirilmesi ve (b) Keysight Technologies N9918A VNA ve X-bandı dalga kılavuzu numune tutucu ile X-bandı dalga kılavuzu kurulumu.

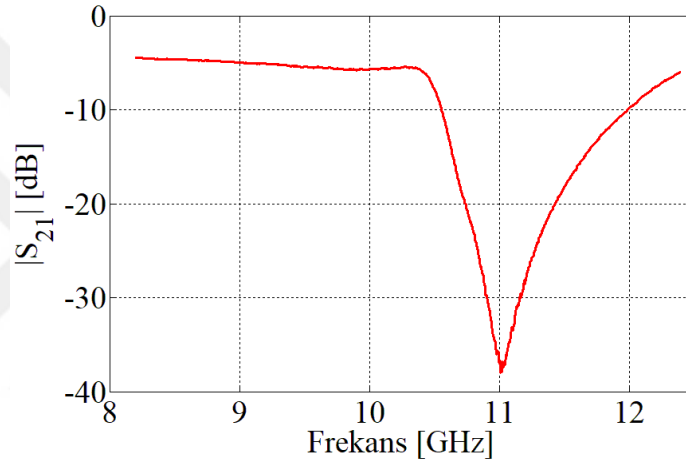
Yukarıda belirtilen tüm bu işlemler gerçekleştirildikten sonra ise önceki bölümde benzeşimleri yapılan 1,00 mm kalınlığındaki hava, polietilen ve FR4 ara katman için aşağıda Şekil 32'deki ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Ölçümlerde kullanılan numuneler, benzeşimler yapılırken belirtilen ϵ_{int} ve δ_{int} değerlerine sahip olup benzeşimler ve ölçümler arasındaki doğruluğu (aslında tasarladığımız çift taraflı RW-MM sensörünün doğruluğunu) ispatlayabilmek için güvenilir firmalardan satın alınan numunelerdir (polietilen ve FR4 için). Ölçümler, 8,2-12,4 GHz frekans aralığında yani X-bandında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 32. $d_{\text{int}} = 1,00$ mm kalınlığındaki (a) hava, (b) polietilen ve (c) FR4 ara katmanı için önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün 8,2-12,4 GHz frekans aralığında, ölçümler ile elde edilen S_{21} parametre büyüklükleri.



(b)

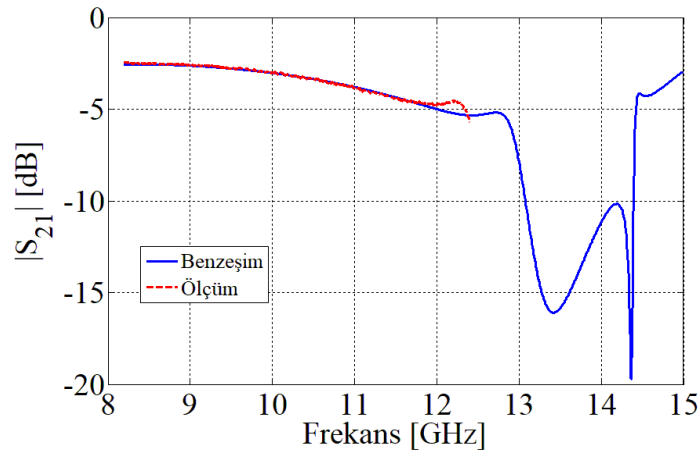


(c)

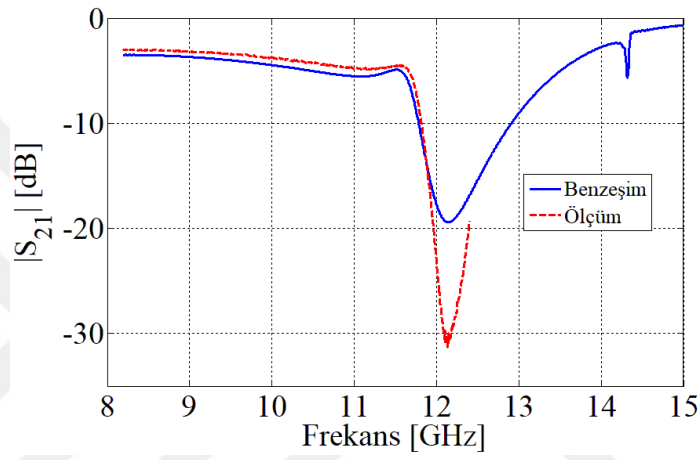
Şekil 32. (devam)

Benzeşim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

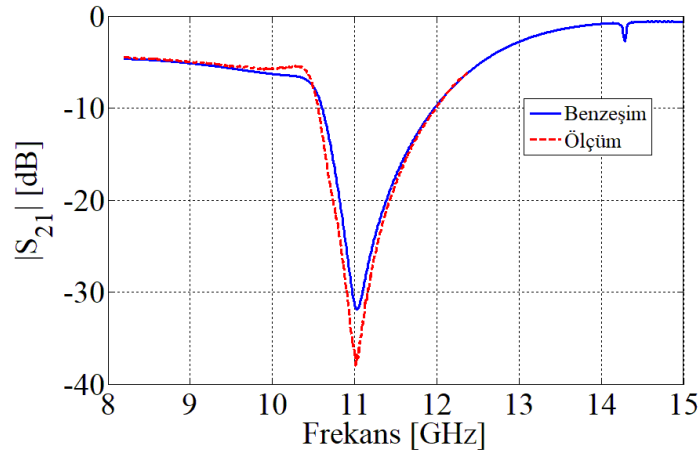
Tasarladığımız çift taraflı RW-MM sensörünün doğruluğunu ispatlayabilmek için benzeşimler ve ölçümlerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması gerekmektedir. Bunun için ise tasarlanan çift taraflı RW-MM sensörünün hava, polietilen ve FR4 ara katmanları için benzeşim ve ölçümlerden elde edilen sonuçların yani Şekil 29 ve Şekil 32'deki sonuç grafiklerinin aynı numune için üst üste oturtulması gerekir. Bu gerekliliği yerine getirmek için, aynı numuneler için 1001 noktalı benzeşim ve ölçüm sonuçları ele alınmıştır ve $|S_{21}|$ parametreleri üst üste oturtulmuştur. Bu işlem MATLAB programı yardımıyla yapılmıştır ve benzeşimler mavi çizgi ile ölçümler ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Buna göre oluşturulan ve aşağıda verilen Şekil 33'teki grafikler incelenerek tasarladığımız çift taraflı RW-MM sensörünün doğruluğu ile alakalı benzeşim ve ölçüm sonuçları arasında karşılaştırma yapılabilir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 33. $d_{\text{int}} = 1,00$ mm kalınlığındaki (a) hava, (b) polietilen ve (c) FR4 ara katmanı için önerilen çift taraflı RW-MM sensörünün S_{21} parametre büyüklüklerinin benzeşim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Ölçümlerin 8,2-12,4 GHz frekans aralığında, benzeşimlerin ise 8,2-15 GHz frekans aralığında yapıldığı daha önce ifade edilmişti. Buna göre benzeşim ve ölçümlerin ortak frekans aralığı olan ölçüm alınan aralıkta Şekil 33 incelendiğinde benzeşim ve ölçüm

sonuçlarının genel olarak uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Sadece Şekil 33(b) ve Şekil 33(c)'deki S_{21} 'in rezonans büyüklüğünün dB değerinin ölçümlerde daha büyük çıktığı görülmektedir. Bu farklılığın da dalga kılavuzu numune tutucu bölümüne çift taraflı RW-MM sensörünün tam olarak ortalı ve dik bir şekilde yerleştirilememesi ve çift taraflı RW-MM sensörü ile ara katmandaki malzeme arasında olabilecek boşluktan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.



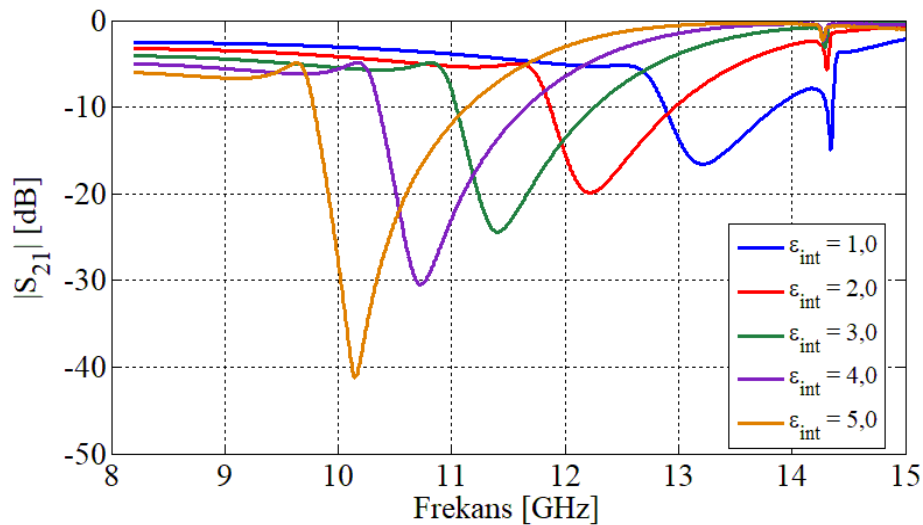
SONUÇ

Bu tez çalışmasında ilk olarak, simetrik yansıma özelliğine sahip üniform iletim-asimetrik ağların veya hatların ileri ve geri yönlerdeki γ 'sının belirlenmesi için LL yaklaşımına dayanan yeni bir kalibrasyon gerektirmeyen yöntem önerilmiştir. Bu amaçla, öncelikle homojen bir iletim-simetrik hattan homojen bir iletim-asimetrik hatta (veya tam tersi de olabilir) bir dönüşüm için empedans, genlik ve faz değişimlerinin ifadeleri türetilmiştir. Sonra, iki farklı analiz (belirleyici faktör işlemi ve doğrudan hesaplama) kullanılarak LL yaklaşımına dayanan önerilen metodoloji sunulmuştur. Sonrasında, her bir analiz için özgün γ belirlenmesinde kriter gösterilmiştir. Önerdiğimiz metodolojiyi doğrulamak için farklı uzunluklarda (iletim-simetrik hatlar) iki boş dalga kılavuzu düzlüğünün (X- ve Ku-bandlarında) ileri ve geri yönlerdeki γ ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra, önerdiğimiz yöntemin performansını değerlendirmek için bir mikrodalga faz kaydırıcının (bir iletim-asimetrik ağ) ileri ve geri yönlerdeki γ ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Diğer kalibrasyon gerektirmeyen ve kalibrasyon bağımlı yöntemlerle karşılaştırıldığında önerilen yöntemimizin, herhangi bir kalibrasyona başvurmaksızın iletim-simetrik ve iletim-asimetrik ağların veya hatların (simetrik yansıma özelliğine sahip) ileri ve geri yönlerdeki γ 'sını belirlemede özgün avantajlara sahip olduğu belirtilmelidir.

İkinci olarak, asimetrik yansımalara sahip iletim-asimetrik (ve de iletim-simetrik) ağların veya hatların ileri ve geri yönlerdeki kompleks yayılma sabiti γ 'nın doğru belirlenmesi için yeni bir mikrodalga yöntem önerilmiştir. Bu amaçla, ilk önce iletim-asimetrik bir ağ/hattın WCM gösterimi elde edilmiştir, sonra bu matris diyagonalize edilmiştir ve daha sonra empedans dönüşümü ve genlik-faz dönüşümü matrislerine ayrıştırılmıştır. Sonrasında, önerilen metodolojimizi doğrulamak için farklı uzunluklarda X-bandında iletim-simetrik dalga kılavuzu düzlüklerinin ileri ve geri yönlerdeki γ ölçümleri yapılmıştır. Önerdiğimiz yöntemle belirlenen $\text{Re}\{T_0^+\}$ ve $\text{Im}\{\gamma_0^+\}$ için GoF değerlerinin, literatürde sadece iletim-simetrik ağlar için geçerli olan diğer benzer yöntemlere göre biraz daha büyük olduğu görülmektedir. Böyle bir farkın, bu yöntemlerin kullandığı ek hattaki belirsizlikten kaynaklandığını düşünmekteyiz. Ayrıca, yöntemimiz ile belirlenen $\text{Re}\{T_0^-\}$ ve $\text{Im}\{\gamma_0^-\}$ için GoF değerleri yöntemimiz ile belirlenen sırasıyla $\text{Re}\{T_0^+\}$ ve $\text{Im}\{\gamma_0^+\}$ değerlerinkinden daha küçüktür. Çünkü $T_0^-(\gamma_0^-)$, $T_0^+(\gamma_0^+)$ 'dan sonra belirlenmektedir. Daha sonra, önerdiğimiz

yöntemin performansını değerlendirmek için, iletim-asimetrik bir ağın (bir mikrodalga faz kaydırıcı) ileri ve geri yönlerdeki γ ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerden, yöntemimizle çıkarılan T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- değerlerinin pasiflik ilkesini karşıladığı ve kalibre edilmiş S-parametresi ölçümleri kullanan başka bir yöntemle çıkarılan T_0^+ , T_0^- , γ_0^+ ve γ_0^- değerleri ile iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmelidir. Farklı uzunluklarda aynı ağları gerektiren LL yöntemler ve iletim-simetrik yansıtıcı standartın (örneğin, TRL gibi bir tür kalibrasyon tekniği) ölçümlerini gerektiren geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldığında önerdiğimiz yöntemin, bir yansıtıcı standarta başvurmada ağ/hat ve thru bağlantılardan (sadece bir ağ veya hat) iletim-asimetrik (ve iletim-simetrik) ağ/hatların ileri ve geri yönlerdeki γ 'sını çıkartmasının eşsiz avantajı vardır.

Üçüncü olarak, önerilen çift taraflı RW-MM sensörü, sıcaklık, nem, yoğunluk veya konsantrasyondaki değişiklikleri algılamak için de kullanılabilir. Bu tür sensör uygulamalarında, ara tabakanın kalınlığı sabit tutulur ve algılama ortamı, çift taraflı RW-MM sensörünün rezonans frekansında bir kaymaya yol açan sıcaklık, nem, yoğunluk veya konsantrasyondaki değişikliklere yanıt olarak kısmi ϵ 'si değişen bir malzeme ile doldurulur (Tao *et al.* 2010). Konseptin kanıtı için, $d_{\text{int}} = 1,00$ mm sabit kalınlığa sahip algılama ortamında dolgu maddeleri olarak $\epsilon_{\text{int}} = 1,00-5,00$ olarak değişen malzemeler kullanarak CST MWS'de benzeşimler ile beş farklı algılama senaryosu incelenmiştir (Şekil 34'e bakınız). ϵ_{int} 1,00'dan 5,00'a yükselirken, çift taraflı RW-MM sensörünün rezonans frekansları, benzeşimlerde 13,212 GHz'den 10,152 GHz'e düşmüştür ki aradaki 3,060 GHz'lik yani % 23,16'lık değişim (Tablo 2'ye bakınız) muazzamdır ve daha önce literatürde var olan tek ya da çift taraflı RW-MM sensörlerine kıyasla on kata kadar daha iyi bir hassasiyete sahiptir.



Şekil 34. Beş farklı algılama katmanı ϵ değeri ($\epsilon_{\text{int}} = 1,00-5,00$) için çift taraflı RW-MM sıcaklık/nem/yoğunluk/konsantrasyon sensörü prototiplerinin 8,2-15 GHz frekans aralığında iletim büyüklüğü eğrileri ($|S_{21}|$).

Tablo 2. $d_{int} = 1,00$ mm ve Beş Farklı Algılama Katmanı ϵ Değeri ($\epsilon_{int} = 1,00-5,00$) İçin Çift Taraflı RW-MM Sensörünün S_{21} Büyüklüğünün Rezonans Frekanslarının İncelenmesi

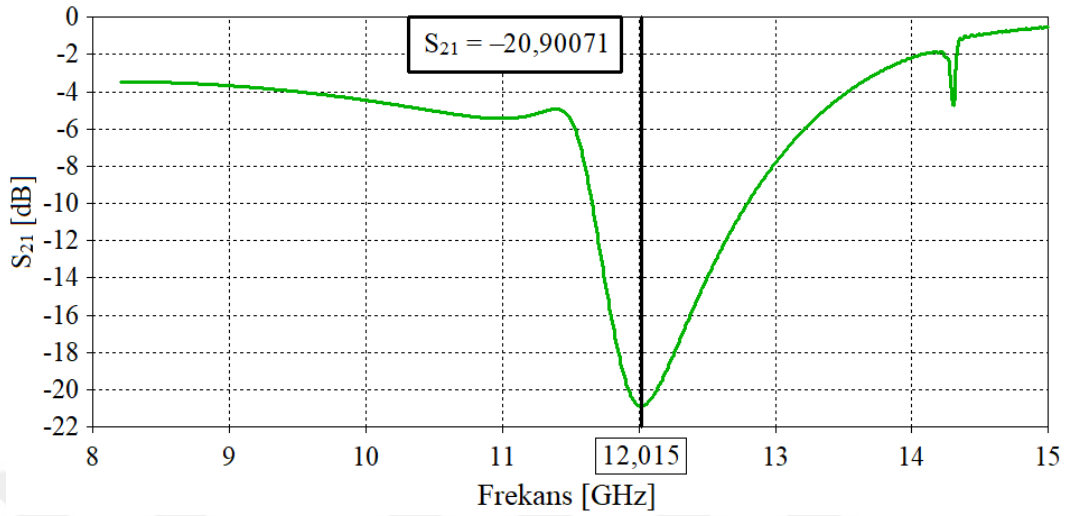
ϵ_{int} ($\delta_{int} = 0$)	S_{21} Büyüklüğü [dB]	S_{21} Rezonans Frekansı [GHz]	İki Rezonans Arası Değişim [MHz]	İlk Rezonans Frekansına Göre	
				Değişim [GHz]	% Değişim
1,00	-16,578	13,212	—	—	—
2,00	-19,887	12,226	986	0,986	7,46
3,00	-24,414	11,410	816	1,802	13,64
4,00	-30,470	10,730	680	2,482	18,79
5,00	-41,259	10,152	578	3,060	23,16

Dördüncü olarak ise önerdiğimiz ve yukarıda belirtildiği gibi hassasiyeti yüksek olarak tasarlanan çift taraflı RW-MM sensörü, yine malzemelerin dielektrik sabitinin belirlenmesi amacıyla da rahatlıkla kullanılabilir. Çünkü, Şekil 34'teki benzeşim sonuçları incelendiğinde ara tabakadaki malzemenin ϵ değeri arttıkça S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansında sola doğru bir kayma görülmektedir. Buna göre çift taraflı RW-MM sensörünün ara tabakasına herhangi bir malzeme yerleştirildiğinde ve ölçüm yapıldığında elde edilen S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansına bağlı olarak Şekil 34 veya bu şeklin sonucu olan Tablo 2'ye göre ara tabakadaki malzemenin ϵ değeri tahmin edilebilir. Bu tahmin şu şekilde gerçekleştirilebilir: Örneğin, önerilen çift taraflı RW-MM sensörü ile bir numunenin S_{21} 'inin büyüklüğünün rezonans frekansı 12,034 GHz olarak belirlenmiş olsun. Tablo 1'e bakıldığında bu rezonans frekansı, $\epsilon_{int} = 2,00$ için 12,226 GHz ve $\epsilon_{int} = 3,00$ için 11,410 GHz'in arasına tekabül etmektedir. ϵ_{int} 'in değeri 2,00'dan 3,00'a çıktığında rezonans frekansının 0,986 GHz sola kaydığı görülmektedir. Bu da demek oluyor ki ϵ_{int} 'teki % 1'lik değişim 9,86 MHz'lik bir frekans kaymasına yol açmaktadır. Bu açıklamalara istinaden en basit yol olarak doğrusal interpolasyon (eğri uydurma) ile aşağıdaki denklem çıkarılabilir:

$$f_{int=s} = f_{int=2,00} + \frac{f_{int=3,00} - f_{int=2,00}}{3,00 - 2,00} (\epsilon_{int=s} - 2,00) \quad (103)$$

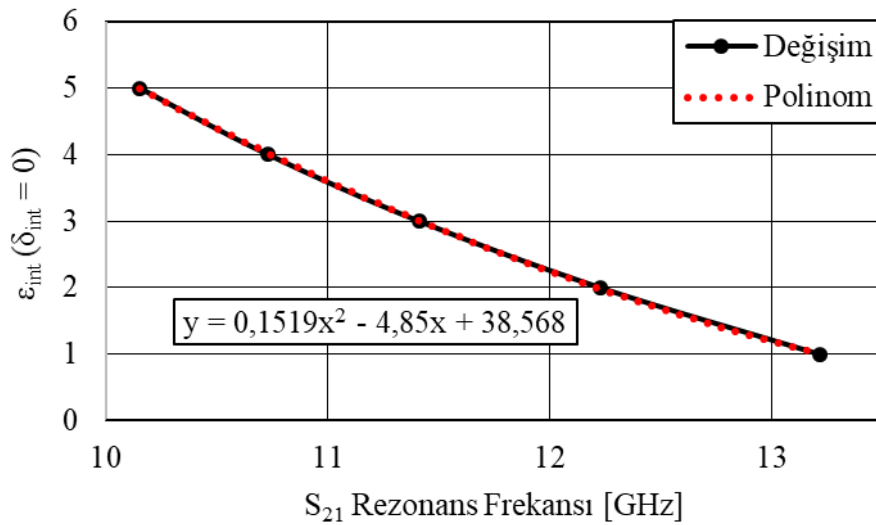
Burada $\epsilon_{int=s}$ ara katmandaki örnek numunenin dielektrik sabitini, $f_{int=s}$, $f_{int=2,00}$ ve $f_{int=3,00}$ sırasıyla $\epsilon_{int=s}$, $\epsilon_{int} = 2,00$ ve $\epsilon_{int} = 3,00$ değerleri için S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansını (yani sırasıyla 12,034 GHz, 12,226 GHz ve 11,410 GHz değerlerini) göstermektedir. Tüm değerler denklem (103)'de yerine konulup $\epsilon_{int=s}$ değeri çözüldüğünde $\epsilon_{int=s} \cong 2,235$ değeri elde edilir. Bu değer için CST MWS'de benzeşim yapıldığında S_{21} 'in

büyükliğünün rezonans frekansı 12,015 GHz olarak belirlenir (Şekil 35'e bakınız). Buna göre önerilen çift taraflı RW-MM sensörü ile elde edilen rezonans frekansı ve elde edilen benzeşim sonuçları arasındaki hata % 0,158'dir.

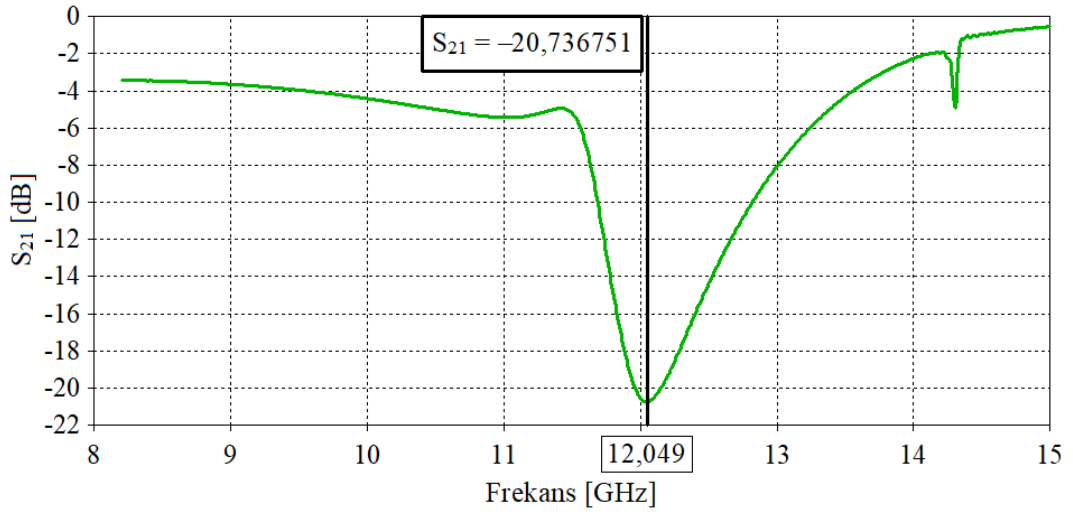


Şekil 35. $\epsilon_{\text{int-s}} \cong 2,235$ değeri için S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansı.

Daha net ve hassas bir hesap için ise Tablo 1 için daha yüksek derecelerde interpolasyon (örneğin, yüksek derecede polinom uydurma gibi) yapılabilir. Örnek olarak Microsoft Excel'de Tablo 1'deki verilere göre ikinci dereceden bir eğri uydurulursa Şekil 36 elde edilir ve bu uydurulan eğri denklemine göre $\epsilon_{\text{int-s}} \cong 2,20$ bulunur. Bu değer için CST MWS'de benzeşim yapıldığında S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansı 12,049 GHz olarak belirlenir (Şekil 37'ye bakınız). Buna göre önerilen çift taraflı RW-MM sensörü ile elde edilen rezonans frekansı ve elde edilen benzeşim sonuçları arasındaki hata % 0,124'dür.



Şekil 36. Tablo 1'deki verilere göre ikinci dereceden bir eğri uydurma grafiği (denklemdaki x ve y değerleri sırasıyla GHz cinsinden S_{21} rezonans frekansını ve ara katmandaki örnek numunenin ϵ 'sini ifade etmektedir).



Şekil 37. $\epsilon_{\text{int-s}} \cong 2,20$ değeri için S_{21} 'in büyüklüğünün rezonans frekansı.

Buna göre sonuç olarak, mikrodalga frekanslarında malzemelerin EM karakterizasyonu; ilk olarak sunulan nümerik yöntemler ve birtakım hesaplamalar ile yapılabileceği gibi ikinci olarak sunulan, tasarlanan çift taraflı RW-MM sensörü vasıtasıyla (rezonans frekansındaki değişimlere bağlı olarak) da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdulkarim, Y.I., Deng, L.W., Karaaslan, M., and Unal, E., 2019. Determination of the liquid chemicals depending on the electrical characteristics by using metamaterial absorber based sensor. *Chemical Physics Letters*, 732, UNSP 136655.
- Afsar, M.N., Birch, J.R., and Clarke, R.N., 1986. The measurement of the properties of materials. *Proceedings of the IEEE*, 74 (1), 183-99.
- Akhter, Z. and Akhtar, M.J., 2016. Free-space rime domain position insensitive technique for simultaneous measurement of complex permittivity and thickness of lossy dielectric samples. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65 (10), 2394-2405.
- Al-Hanib, A.I., Jansen, C., and Koch, M., 2008. Thin-film sensing with planar asymmetric metamaterial resonators. *Applied Physics Letters*, 93 (8), 083507.
- Ali, A., Hu, B., and Ramahi, O.M., 2015. Intelligent detection of cracks in metallic surfaces using a waveguide sensor loaded with metamaterial elements. *Sensors*, 15 (5), 11402-11416.
- Ali, A., El Badawe, M., and Ramahi, O.M., 2016. Microwave imaging of subsurface flaws in coated metallic structures using complementary splitting resonators. *IEEE Sensors Journal*, 16 (18), 6890-6898.
- Alici, K.B., Bilotti, F., Vegni, L., and Ozbay, E., 2007. Miniaturized negative permeability materials. *Applied Physics Letters*, 91 (7), 071121.
- Altintas, O., Aksoy, M., Unal, E., and 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.
- Antoniades, M.A. and Eleftheriades, G.V., 2005. A broadband series power divider using zero-degree metamaterial phase-shifting lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 15 (11), 808-810.
- Arritt, B., Adomanis, B., Khraishi, T., and Smith, D., 2010. Parametric analysis of the strain-dependent behavior of a metamaterial electric resonator. *Applied Physics Letters*, 97 (19), 191907.
- Aydin, K., Bulu, I., Guven, K., Kafesaki, M., Soukoulis, C.M., and Ozbay, E., 2005. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs. *New Journal of Physics*, 7, 168.
- Aydin, K., Bulu, I., and Ozbay, E., 2007. Subwavelength resolution with a negative-index metamaterial superlens. *Applied Physics Letters*, 90 (25), 254102.
- Baek, K.H., Sung, H.Y., and Park, W.S., 1995. A 3-position transmission reflection method for measuring the permittivity of low-loss materials. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 5 (1), 3-5.
- Baena, J.D., Marqués, R., Medina, F., and Martel, J., 2004. Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators. *Physical Review B*, 69 (1), 014402.
- Baker-Jarvis, J., Vanzura, E.J., and Kissick, W.A., 1990. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 38 (8), 1096-1103.
- Baker-Jarvis, J., M. Janezic, D., Domich, P.D., and Geyer, R.G., 1994. Analysis of an open-ended coaxial probe with lift-off for nondestructive testing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 43 (5), 711-718.
- Baker-Jarvis, J., Jones, C., Riddle, B., Janezic, M., Geyer, R.G., Grosvenor Jr., R.G., and Weil, C.M., 1995. Dielectric and magnetic measurements: A survey of nondestructive,

- quasinondestructive, and process-control techniques. *Research in Nondestructive Evaluation*, 7, 117-36.
- Bakır, M., 2016. *Metamalzeme Tabanlı Sensör Sinyal Emici ve Frekans Seçici Yüzey Uygulaması*. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Bakır, M., Karaaslan, M., Dincer, F., Akgöl, O., and Sabah, C., 2016. Electromagnetic energy harvesting and density sensor application based on perfect metamaterial absorber. *International Journal of Modern Physics B*, 30 (20), 1650133.
- Bakır, M., Karaaslan, M., Akgöl, M., and Sabah, C., 2017. Multifunctional metamaterial sensor applications based on chiral nihility. *Optical and Quantum Electronics*, 49 (11), 346.
- Bakır, M., Karaaslan, M., Unal, E., Karadag, F., Alkurt, F.O., Altintas, O., Dalgac, S., and Sabah, C., 2018. Microfluidic and fuel adulteration sensing by using chiral metamaterial sensor. *Journal of the Electrochemical Society*, 165 (11), B475-B483.
- Balanis, C.A., 1999. *Advanced Engineering Electromagnetics*. Wiley, 1045 p, New York, USA.
- Bao, X., Liu, S., Ocket, I., Bao, J., Kil, D., Zhang, M., Puers, B., Schreurs, D., and Nauwelaers, B., 2018. A multiline multimaterial calibration method for liquid characterization. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28 (8), 732-734.
- Bao, X., Bao, J., Ocket, I., Liu, S., Schreurs, D., Kil, D., Liu, Z., Zhang, M., Puers, R., and Nauwelaers, B., 2019. A simplified dielectric material characterization algorithm for both liquids and solids. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 61 (5), 1639-1646.
- Barroso, J.J. and Hasar, U.C., 2012. Constitutive parameters of a metamaterial slab retrieved by the phase unwrapping method. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 33, 237-244.
- Bilotti, F., Nucci, L., and Vegni, L., 2006. An SRR based microwave absorber. *Microwave and Optical Technology Letters*, 48 (11), 2171-2175.
- Bilotti, F., Toscano, A., Vegni, L., Aydin, K., Alici, K.B., and Ozbay, E., 2007. Equivalent-circuit models for the design of metamaterials based on artificial magnetic inclusions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55 (12), 2865-2873.
- Bohm, D. and Pines, D., 1953. A collective description of electron interactions: III. coulomb interactions in a degenerate electron gas. *Physical Review*, 92 (3), 609-625.
- Boughriet, A.-H., Legrand, C., and Chapoton, A., 1997. Noniterative stable transmission/reflection method for low-loss material complex permittivity determination. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 45 (1), 52-57.
- Boybay, M.S. and Ramahi, O.M., 2009. Waveguide probes using single negative media. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 19 (10), 641-643.
- Brown, J., 1960. Artificial dielectrics. *Progress in Dielectrics*, 2, 195-225.
- Buldu, G., 2017. *Microwave Calibration-Independent Measurement Methods for Determination of Electromagnetic Properties of Isotropic Metamaterials*. MS Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gaziantep.
- Caijun, Z., Quanxing, J., and Shenhui, J., 2011. Calibration-independent and position-insensitive transmission/reflection method for permittivity measurement with one sample in coaxial line. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 53 (3), 684-689.
- Capolino, F., 2009. *Theory and Phenomena of Metamaterials*. CRC Press, 974 p, New York, USA.
- Carriveau, G.W. and Zoughi, R., 2002. Nondestructive evaluation and characterization of complex composite structures. *Proceedings of the 11th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials*, Berlin, Germany.

- Chalapath, K., Sarvala, K., Li, J., and Paraoanu, G.S., 2009. Wideband reference-plane invariant method for measuring electromagnetic parameters of materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 57 (9), 2257-2267.
- Chang, Y.-T., Lai, Y.-C., Li, C.-T., Chen, C.-K., and Yen, T.-J., 2010. A multi-functional plasmonic biosensor. *Optics Express*, 18 (9), 9561-9569.
- Chen, L.F., Ong, C.K., Neo, C.P., Varadan, V.V., and Varadan, V.K., 2004a. *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. Wiley, 552 p, West Sussex, England.
- Chen, X.D., Grzegorzczak, T.M., Wu, B.I., Pacheco, J., and Kong, J.A., 2004b. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials. *Physical Review E*, 70 (1), 016608.
- Chen, X., Wu, B.I., Kong, J.A., and Grzegorzczak, T.M., 2005. Retrieval of the effective constitutive parameters of bianisotropic metamaterials. *Physical Review E*, 71 (4), 046610.
- Chen, H., Zhang, J., Bai, Y., Luo, Y., Ran, L., Jiang, Q., and Kong, J.A., 2006a. Experimental retrieval of the effective parameters of metamaterials based on a waveguide method. *Optics Express*, 14 (26), 12944-12949.
- Chen, H., Ran, L., Huangfu, J., Grzegorzczak, T.M., and Kong, J.A., 2006b. Equivalent circuit model for left-handed metamaterials. *Journal of Applied Physics*, 100 (2), 024915.
- Chen, T., Li, S., and Sun, H., 2012. Metamaterials application in sensing. *Sensors*, 12 (3), 2742-2765.
- Cheng, Y.Z., Nie, Y., and Gong, R.Z., 2013. Design of a wide-band metamaterial absorber based on fractal frequency selective surface and resistive films. *Physica Scripta*, 88 (4), 045703.
- Cimen, S., 2013. Novel closely spaced planar dual-band frequency-selective surface. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 7 (11), 894-899.
- Cohen, D. and Shavit, R., 2015. Bi-anisotropic metamaterials effective constitutive parameters extraction using oblique incidence S-parameters method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63 (5), 2071-2078.
- Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., and Sabah, C., 2013. Dual-band polarization independent metamaterial absorber based on omega resonator and octa-star strip configuration. *Progress in Electromagnetics Research*, 141, 219-231.
- Dincer, F., Karaaslan, M., Colak, S., Tetik, E., Akgol, O., Altintas, O., and Sabah, C., 2016. Multi-band polarization independent cylindrical metamaterial absorber and sensor application. *Modern Physics Letters B*, 30 (8), 1650095.
- Driscoll, T., Andreev, G.O., Basov, D.N., Palit, S., Cho, S.Y., Jokerst, N.M., and Smith, D.R., 2007a. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors. *Applied Physics Letters*, 91 (6), 062511.
- Driscoll, T., Basov, D.N., Padilla, W.J., Mock, J.J., and Smith, D.R., 2007b. Electromagnetic characterization of planar metamaterials by oblique angle spectroscopic measurements. *Physical Review B*, 75 (11), 115114.
- Ebrahimi, A., Withayachumnankul, W., Al-Sarawi, S., and Abbott, D., 2014a. High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization. *IEEE Sensors Journal*, 14 (5), 1345-1351.
- Ebrahimi, A., Withayachumnankul, W., Al-Sarawi, S.F., and Abbott, D., 2014b. Metamaterial-inspired rotation sensor with wide dynamic range. *IEEE Sensors Journal*, 14 (8), 2609-2614.
- Ekmekci, E. and Turhan-Sayan, G., 2009. Comparative investigation of resonance characteristics and electrical size of the double-sided SRR, BC-SRR and conventional SRR type metamaterials for varying substrate parameters. *Progress in Electromagnetics Research B*, 12, 35-62.

- Ekmekci, E., Averitt, R.D., and Turhan-Sayan, G., 2010. Effects of substrate parameters on the resonance frequency of double-sided SRR structures under two different excitations. *Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium in Cambridge, Cambridge, USA*.
- Ekmekci, E., Strikwerda, A.C., Fan, K., Keiser, G., Zhang, X., Turhan-Sayan, G., and Averitt, R. D., 2011. Frequency tunable terahertz metamaterials using broadside coupled splitting resonators. *Physical Review B*, 83 (19), 193103.
- Ekmekci, E. and Turhan-Sayan, G., 2013. Multi-functional metamaterial sensor based on a broad-side coupled SRR topology with a multi-layer substrate. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 110 (1), 189-197.
- Ekmekçi, E., 2016. Mikrodalga ve Terahertz Bölgelerinde Metamalzeme Tabanlı Özgün Sensörler: Tasarım, Üretim ve Çeşitli Sensör Uygulamalarında Kullanılması, TÜBİTAK Projesi (Program Kodu: 3501 ve Proje No: 113E632) Sonuç Raporu, Isparta.
- Ekmekci, E., Kose, U., Cinar, A., Ertan, O., and Ekmekci, Z., 2019. The use of metamaterial type double-sided resonator structures in humidity and concentration sensing applications. *Sensors and Actuators A-Physical*, 297, 111559.
- Elhawil, A., Stiens, J., Tandt, C.D., Ranson, W., and Vounckx, R., 2011. Thin-film sensing using circular split-ring resonators at mm-wave frequencies. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 103 (3), 623-626.
- Engen, G.F. and Hoer, C.A., 1979. Thru-reflect-line: An improved technique for calibrating the dual 6-port automatic network analyzer. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 27 (12), 983-987.
- Eul, H.J. and Schiek, B., 1991. A generalized theory and new calibration procedures for network analyzer self-calibration. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 39 (4), 724-731.
- Falcone, F., Lopetegi, T., Baena, J.D., Marqués, R., Martín, F., and Sorolla, M., 2004. Effective negative- ϵ stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 14 (6), 280-282.
- Farcich, N.J., Salonen, J., and Asbeck, P.M., 2008. Single-length method used to determine the dielectric constant of polydimethylsiloxane. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56 (12), 2963-2971.
- Fuh, K.F., 2013. Broadband continuous extraction of complex propagation constants in methods using two-line measurements. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 23 (12), 671-673.
- Fuh, K.F., 2016. Formulation for propagation factor extractions in thru-reflectline/line-reflect-line calibrations and related applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64 (5), 1594-1606.
- Garcia-Garcia, J., Martin, F., Falcone, F., Bonache, J., Baena, J.D., Gil, I., Amat, E., Lopetegi, T., Laso, M.A.G., Iturmendi, J.A.M., Sorolla, M., and Marques, R., 2005. Microwave filters with improved stopband based on sub-wavelength resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53 (6), 1997-2006.
- Gibson, A.A.P., Ng, S.K., Noh, B.B.M., Chua, H.S., Haigh, A.D., Parkinson, G., Ainsworth, P., and Plunkett, A., 2008. An overview of microwave techniques for the efficient measurement of food materials. *Food Manufacturing Efficiency*, 2 (1), 1-8.
- Guoxin, C., 2015. Calibration-independent measurement of complex permittivity of liquids using a coaxial transmission line. *Review of Scientific Instruments*, 86 (1), 014704.
- Hasar, U.C., 2008a. A calibration-independent method for accurate complex permittivity determination of liquid materials. *Review of Scientific Instruments*, 79 (8), 086114.
- Hasar, U.C., 2008b. A new calibration-independent method for complex permittivity extraction of solid dielectric materials. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 18 (12), 788-790.

- Hasar, U.C., 2008c. Calibration-independent method for complex permittivity determination of liquid and granular materials. *Electronics Letters*, 44 (9), 585-586.
- Hasar, U.C., 2009. A new microwave method for electrical characterization of low-loss materials. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 19 (12), 801-803.
- Hasar, U.C. and Sismsek, O., 2009. A calibration-independent microwave method for position-insensitive and nonsingular dielectric measurements of solid materials. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 42 (7), 075403.
- Hasar, U.C. and Westgate, C.R., 2009. A broadband and stable method for unique complex permittivity determination of low-loss materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 57 (2), 471-477.
- Hasar, U.C. and Barroso, J.J., 2011a. Electrical characterization of 3-D periodic microwire media using calibration-independent techniques. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 25 (14-15), 2110-2119.
- Hasar, U.C. and Barroso, J.J., 2011b. Retrieval approach for determination of forward and backward wave impedances of bianisotropic metamaterials. *Progress in Electromagnetics Research-PIER*, 112, 109-124.
- Hasar, U.C. and Barroso, J.J., 2012. Permeability measurement of metamaterials with split-ring-resonators using free-space calibration-independent methods. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 33 (2), 218-227.
- Hasar, U.C., Barroso, J.J., and Ertugrul, M., 2012a. Permeability measurement of split-ring-resonator metamaterials from free-space transmission-only calibration-independent methods. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 26 (1), 54-63.
- Hasar, U.C., Barroso, J.J., Sabah, C., Kaya, Y., and Ertugrul, M., 2012b. Differential uncertainty analysis for evaluating the accuracy of S-parameter retrieval methods for electromagnetic properties of metamaterial slabs. *Optics Express*, 20 (27), 29002-29022.
- Hasar, U.C., Barroso, J.J., Sabah, C., Ozbek, I.Y., Kaya, Y., Dal, D., and Aydin, T., 2012c. Retrieval of effective electromagnetic parameters of isotropic metamaterials using reference-plane invariant expressions. *Progress in Electromagnetics Research-PIER*, 132, 425-441.
- Hasar, U.C., Barroso, J.J., Sabah, C., Kaya, Y., and Ertugrul, M., 2013. Stepwise technique for accurate and unique retrieval of electromagnetic properties of bianisotropic metamaterials. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 30 (4), 1058-1068.
- Hasar, U.C., Barroso, J.J., Bute, M., Kaya, Y., Kocadagistan, M.E., and Ertugrul, M., 2014a. Attractive method for thickness-independent permittivity measurements of solid dielectric materials. *Sensors and Actuators A-Physical*, 206, 107-20.
- Hasar, U.C., Buldu, G., Bute, M., Barroso, J.J., Karacali, T., and Ertugrul, M., 2014b. Determination of constitutive parameters of homogeneous metamaterial slabs by a novel calibration-independent method. *AIP Advances*, 4 (10), 107116.
- Hasar, U.C., Bute, M., Barroso, J.J., Sabah, C., Kaya, Y., and Ertugrul, M., 2014c. Power analysis of multilayer structures composed of conventional materials and bi-anisotropic metamaterial slabs. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 31 (5), 939-947.
- Hasar, U.C., Kaya, Y., Bute, M., Barroso J.J., and Ertugrul, M., 2014d. Microwave method for reference-plane-invariant and thickness-independent permittivity determination of liquid materials. *Review of Scientific Instruments*, 85 (1), 014705.
- Hasar, U.C. and Barroso, J.J., 2015. Scattering parameter analysis of cascaded bi-anisotropic metamaterials. *Optics Communications*, 348, 13-18.
- Hasar, U.C., Ertugrul, M. ve Karacali, T., 2015. Farklı Tipteki Metamalzemelerin Elektromanyetik Özelliklerinin Kalibrasyon-Bağımsız Ölçüm Yöntemleri Kullanılarak

- Özgün Olarak Belirlenmesi, TÜBİTAK Projesi (Program Kodu: 1001 ve Proje No: 112R032) Sonuç Raporu, Gaziantep.
- Hasar, U.C., Barroso, J.J., Karacali, T., and Ertugrul, M., 2015a. Semi-infinite reflection coefficients of bi-anisotropic metamaterial slabs including boundary effects. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 25 (5), 283-285.
- Hasar, U.C., Barroso, J.J., Kaya, Y., Karacali, T., and Ertugrul, M., 2015b. Investigation of transmitted, reflected, and absorbed powers of periodic and aperiodic multilayered structures composed of bi-anisotropic metamaterial slab and conventional material. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 13, 106-119.
- Hasar, U.C., Kaya, Y., Barroso, J.J., and Ertugrul, M., 2015c. Determination of reference-plane invariant, thickness-independent, and broadband constitutive parameters of thin materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63 (7), 2313-2321.
- Hasar, U.C., 2016. Explicit permittivity determination of medium-loss materials from calibration-independent measurements. *IEEE Sensors Journal*, 16 (13), 5177-5182.
- Hasar, U.C., Barroso, J.J., Bute, M., Muratoglu, A., and Ertugrul, M., 2016. Boundary effects on the determination of electromagnetic properties of bianisotropic metamaterials from scattering parameters. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64 (8), 3459-3469.
- Hasar, U.C., 2017. Thickness-invariant complex permittivity retrieval from calibration-independent measurements. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27 (2), 201-203.
- Hasar, U.C. and Kaya, Y., 2017. Noniterative complex permittivity retrieval using calibration-independent waveguide measurements. *Sensors and Actuators A-Physical*, 263, 654-666.
- Hasar, U.C., Daşdemir, M., Sabah, C., Boybay, M.S. ve Kaya, A., 2017. Mikrodalga Frekanslarında Yansıma-İletim Ölçüm Yöntemlerinin Hassasiyetlerinin Arttırılmasına Yönelik Yeni Yaklaşımlar, TÜBİTAK Projesi (Program Kodu: 1001 ve Proje No: 114E495) Sonuç Raporu, Gaziantep.
- Hasar, U.C., Buldu, G., Bute, M., and Muratoglu, A., 2017a. Calibration-free extraction of constitutive parameters of magnetically coupled anisotropic metamaterials using waveguide measurements. *Review of Scientific Instruments*, 88 (10), 104702.
- Hasar, U.C., Muratoglu, A., Bute, M., Barroso, J.J., and Ertugrul, M., 2017b. Effective constitutive parameters retrieval method for bianisotropic metamaterials using waveguide measurements. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65 (5), 1488-1497.
- Hasar, U.C., 2018a. Propagation constant measurement of microwave networks with symmetric/asymmetric reflections. *IEEE Sensors Journal*, 18 (12), 4940-4946.
- Hasar, U.C., 2018b. Self-calibrating transmission-reflection technique for constitutive parameters retrieval of materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66 (2), 1081-1089.
- Hasar, U.C. and Kaya, Y., 2018. Self-calibrating noniterative complex permittivity extraction of thin dielectric samples. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60 (2), 354-361.
- Hasar, U.C., Buldu, G., Kaya, Y., and Ozturk, G., 2018. Determination of effective constitutive parameters of inhomogeneous metamaterials with bianisotropy. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66 (8), 3734-3744.
- Hasar, U.C., Ince, T., and Bute, M., 2020a. Application of the singular spectrum analysis technique for phase constant determination of symmetric reflecting and nonreflecting lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62 (2), 571-579.

- Hasar, U.C., Kaya, Y., Ozturk, G., and Ertugrul, M., 2020b. Propagation constant measurements of reflection-asymmetric and nonreciprocal microwave networks from S-parameters without using a reflective standard. *Measurement*, 165, 108126.
- Hasar, U.C., Kaya, Y., and Ertugrul, M., 2020c. Measurement of propagation characteristics of non-reciprocal networks/lines using a line-line method. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* (Accepted).
- He, X.-J., Wang, Y., Wang, J.-M., and Gui, T.-L., 2010. Thin-film sensor based tip-shaped split ring resonator metamaterial for microwave application. *Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems*, 16 (10), 1735-1739.
- He, X.-J., Qui, L., Wang, Y., Geng, Z.-X., Wang, J.-M., and Gui, T.-L., 2011. A compact thin-film sensor based on nested split-ring-resonator (SRR) metamaterials for microwave applications. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 32 (7), 902-913.
- Hinjosa, J., 2001. S-parameter broadband measurements on-coplanar and fast extraction of the substrate intrinsic properties. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 11 (2), 80-82.
- Hu, B., Ren, Z., Boybay, M.S., and Ramahi, O.M., 2014. Waveguide probe loaded with split-ring resonators for crack detection in metallic surfaces. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 62 (4), 871-878.
- Huynen, I., Steukers, C., and Duhamel, F., 2001. A wideband line-line dielectrometric method for liquids, soils, and planar substrates. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50 (5), 1343-1348.
- Jaksic, Z., Jaksic, O., Djuric, Z., and Kment, C., 2007. A consideration of the use of metamaterials for sensing applications: Field fluctuations and ultimate performance. *Journal of Optics A-Pure and Applied Optics*, 9 (9), S377- S384.
- Jaksic, Z., 2010. Optical metamaterials as the platform for a novel generation of ultrasensitive chemical or biological sensors. *Metamaterials: Classes, Properties and Applications*, Ed: E. J. Tremblay. Nova Science Publishers, New York, USA, 1-42.
- Jaksic, Z., Vukovic, S., Matovic, J., Tanaskovic, D. 2011. Negative refractive index metasurfaces for enhanced biosensing. *Materials*, 4, 1-36.
- Janezic, M.D. and Jargon, J.A., 1999. Complex permittivity determination from propagation constant measurements. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 9 (2), 76-78.
- Jebbor, N., Bri, S., Sánchez, A.M., and Chaibi, M., 2013. A fast calibration-independent method for complex permittivity determination at microwave frequencies. *Measurement*, 46 (7), 2206-2209.
- Jeppesen, C., Xiao, S., Mortensen, N.A., and Kristensen, A., 2010. Metamaterial localized resonance sensors: Prospects and limitations. *Optics Express*, 18 (24), 25075-25080.
- Jiang, Z.H., Bossard, J.A., Wang, X.D., and Werner, D.H., 2011. Synthesizing metamaterials with angularly independent effective medium properties based on an anisotropic parameter retrieval technique coupled with a genetic algorithm. *Journal of Applied Physics*, 109 (1), 013515.
- Kaatze, U., 2010. Techniques for measuring the microwave dielectric properties of materials. *Metrologia*, 47, S91-S113.
- Kaatze, U., 2013. Measuring the dielectric properties of materials. ninety-year development from low-frequency techniques to broadband spectroscopy and high-frequency imaging. *Measurement Science and Technology*, 24 (1), 012005.
- Kalisiak, M. and Wiatr, W., 2019. Complete meniscus removal method for broadband liquid characterization in a semi-open coaxial test cell. *Sensors*, 19 (9), 2092.
- Karaaslan, M. and Bakir, M., 2014. Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. *Progress in Electromagnetics Research-PIER*, 149, 55-67.

- Karim, H., Delfin, D., Shuvo, M.A.I., Chavez, L.A., Garcia, C.R., Barton, J.H., Gaytan, S.M., Cadena, M.A., Rumpf, R.C., Wicker, R.B., Lin, Y., and Choudhuri, A., 2015. Concept and model of a metamaterial-based passive wireless temperature sensor for harsh environment applications. *IEEE Sensors Journal*, 15 (3), 1445-1452.
- Karim, H., Delfin, D., Chavez, L.A., Delfin, L., Martinez, R., Avila, J., Rodriguez, C., Rumpf, R.C., Love, N., and Lin, Y., 2017. Metamaterial based passive wireless temperature sensor. *Advanced Engineering Materials*, 19 (5), 1600741.
- Katsarakis, N., Koschny, T., Kafesaki, M., Economou, E.N., and Soukoulis, C.M., 2004. Electric coupling to the magnetic resonance of split ring resonators. *Applied Physics Letters*, 84 (15), 2943-2945.
- Khairi, M.T.M., Ibrahim, S., Yunus, M.A.M., and Faramarzi, M., 2015. Contact and non-contact ultrasonic measurement in the food industry: A review. *Measurement Science and Technology*, 27 (1), 012001.
- Kharkovsky, S. and Zoughi, R., 2007. Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation - overview and recent advances. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 10 (2), 26-38.
- Kim, S., Kuester, E.F., Holloway, C.L., Scher, A.D., and Baker-Jarvis, J., 2011. Boundary effects on the determination of metamaterial parameters from normal incidence reflection and transmission measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59 (6), 2226-2240.
- Kim, H.S., Cha, S.H., Roy, B., Kim, S., and Ahn, Y.H., 2018. Humidity sensing using THz metamaterial with silk protein fibroin. *Optics Express*, 26 (26), 33575-33581.
- Kock, W.E., 1948. Metallic delay lenses. *Bell Labs Technical Journal*, 27 (1), 58-82.
- Kreyszig, E., 2005. *Advanced Engineering Mathematics*. Wiley, 1246 p, USA.
- Lagarkov, A.N. and Semenenko, V.N., 1948. Resonance properties of bihelix media at microwaves. *Electromagnetics*, 17 (3), 213-237.
- Lanzi, L., Carla, M., Gambi, C.M.C., and Lanzi, L., 2002. Differential and double-differential dielectric spectroscopy to measure complex permittivity in transmission lines. *Review of Scientific Instruments*, 73 (8), 3085-3088.
- Lee, M.Q. and Nam, S.W., 1996. An accurate broadband measurement of substrate dielectric constant. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 6 (4), 168-170.
- Lee, H.-J. and Yook, J.-G., 2008. Biosensing using split-ring resonators at microwave regime. *Applied Physics Letters*, 92 (25), 254103.
- Lee, H.-J., Lee, J.-H., and Jung, H.-I., 2011. A symmetric metamaterial element-based RF biosensor for rapid and label-free detection. *Applied Physics Letters*, 99 (16), 163703.
- Li, C. and Shen, C., 2003. Electromagnetic scattering by a conducting cylinder coated with metamaterials. *Progress In Electromagnetics Research-PIER*, 42, 91-105.
- Li, Z.F., Aydin, K., and Ozbay, E., 2009. Determination of the effective constitutive parameters of bianisotropic metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Physical Review E*, 79 (2), 026610.
- Li, Y., Chen, X., Hu, F., Li, D., Teng, H., Rong, Q., Zhang, W., Han, J., and Liang, H., 2019. Four resonators based high sensitive terahertz metamaterial biosensor used for measuring concentration of protein. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 52 (9), 095105.
- Lubkowski, G., Schuhmann, R., and Weiland, T., 2007. Extraction of effective metamaterial parameters by parameter fitting of dispersive models. *Microwave and Optical Technology Letters*, 49 (2), 285-288.
- Luna, G., Morales, M., and Aparicio, R., 2006. Characterisation of 39 varietal virgin olive oils by their volatile compositions. *Food Chemistry*, 98 (2), 243-252.
- Lonappan, A., Thomas, V., Jacob, J., Rajasekaran, C., and Mathew, K.T., 2009. A novel method of detecting malaria using microwaves. *Microwave and Optical Technology Letters*, 51 (4), 915-918.

- Mandelstam, L., 1945. Group velocity in a crystal lattice. *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 15, 476-478.
- Marqués, R., Medina, F., and Ráfii-El-Idrissi, R., 2002. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials. *Physical Review B*, 65 (14), 144440.
- Marks, R.B., 1991. A multiline method of network analyzer calibration. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 39 (7), 1205-1215.
- Marks, R.B. and Williams, D.F., 1992. A general waveguide circuit theory. *Journal of Research (NIST JRES)*, 97 (5), 533-562.
- Melik, R., Unal, E., Perkgoz, N.K., Puttlitz, C., and Demir, H.V., 2009a. Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*, 95 (18), 181105.
- Melik, R., Unal, E., Perkgoz, N.K., Puttlitz, C., and Demir, H.V., 2009b. Metamaterial-based wireless strain sensors. *Applied Physics Letters*, 95 (1), 011106.
- Melik, R., Unal, E., Perkgoz, N.K., Puttlitz, C., and Demir, H.V., 2010a. Metamaterial based telemetric strain sensing in different materials. *Optics Express*, 18 (5), 5000-5007.
- Melik, R., Unal, E., Perkgoz, N., Santoni, B., Kamstock, D., Puttlitz, C., and Demir, H., 2010b. Nested metamaterials for wireless strain sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 16 (2), 450-458.
- Menzel, C., Rockstuhl, C., Paul, T., Lederer, F., and Pertsch, T., 2008. Retrieving effective parameters for metamaterials at oblique incidence. *Physical Review B*, 77 (19), 195328.
- Meyers, M.A. and Inal, O.T., 1985. *Frontiers in Materials Technologies*. Elsevier, 574 p, New York, USA.
- Mittra, R., Chan, C.H., and Cwik, T., 1988. Techniques for analyzing frequency selective surfaces - A review. *Proceedings of the IEEE*, 76 (12), 1593-1615.
- Munk, B.A., 2000. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. Wiley, 440 p, New York, USA.
- Mok, T.S., Allam, A., Vardaxoglou, J.C., and Parker, E.A., 1988. Curved and plane frequency selective surfaces - A study of 2 offset subreflectors. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, 58 (6), 284-290.
- Narsaiah, K., Jha, S.N., Bhardwaj, R., Sharma, R., and Kumar, R., 2012. Optical biosensors for food quality and safety assurance-A review. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 49 (4), 383-406.
- Nelson, S.O. and Trabelsi, S., 2005. Permittivity measurements and agricultural applications. *Electromagnetic Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances*, Ed: K. Kupfer. Springer, Berlin, Germany, 419-442.
- Nicolson, A.M. and Ross, G., 1970. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 19 (4), 377-382.
- O'Hara, F., Singh, R., Brener, I., Smirnova, E., Han, J., Taylor, A.J., and Zhang, W., 2008. Thin-film sensing with planar terahertz metamaterials: sensitivity and limitations. *Optics Express*, 16 (3), 1786-1795.
- Ozgun, O. and Kuzuoglu, M., 2007. Utilization of anisotropic metamaterial layers in waveguide miniaturization and transitions. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 17 (11), 754-756.
- Pafomov, V.E., 1959. Transition radiation and cerenkov radiation. *Soviet Physics JETP*, 36 (6), 1321-1324.
- Panduro, M.A. and Reynoso-Hernández, J.A., 2012. A method for determining the characteristic impedance of transmission lines embedded in transitions. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 66 (3), 185-188.
- Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J., and Youngs, I., 1996. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical Review Letters*, 76 (25), 4773-4776.

- Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J., and Stewart, W.J., 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47 (11), 2075-2084.
- Pendry, J.B., 2000. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*, 85 (18), 3966-3969.
- Pendry, J.B., Schuring, D., and Smith, D.R., 2006. Controlling electromagnetic fields. *Science*, 312, 1780-1782.
- Pines, D. and Bohm, D., 1952. A collective description of electron interactions: II. collective vs individual particle aspects of the interactions. *Physical Review*, 85 (2), 338-353.
- Porep, J.U., Kammerer, D.R., and Carle, R., 2015. On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production. *Trends in Food Science & Technology*, 46 (2), 211-230.
- Pozar, D.M., 2011. *Microwave Engineering*. Wiley, 752 p, West Sussex, England.
- Pryce, M., Aydin, K., Kelaita, Y.A., Briggs, R.M., and Atwater, H.A., 2011. Characterization of the tunable response of highly strained compliant optical metamaterials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 369 (1590), 3447-3455.
- Ramahi, O.M., Almoneef, T.S., Alshareef, M., and Boybay, M.S., 2012. Metamaterial particles for electromagnetic energy harvesting. *Applied Physics Letters*, 101 (17), 173903.
- Rao, X.S. and Ong, C.K., 2003. Subwavelength imaging by a left-handed material superlens. *Physical Review E*, 68 (6), 067601.
- Reynoso-Hernández, J.A., Estrada-Maldonado, C.F., Parra, T., Grenier, K., and Graffeuil, J., 1999. An improved method for the wave propagation constant estimation in broadband uniform millimeter-wave transmission line. *Microwave and Optical Technology Letters*, 22 (4), 268-271.
- Reynoso-Hernández, J.A., 2002. Reliable method for computing the phase shift of multilayer LRL calibration technique. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 12 (10), 395-397.
- Reynoso-Hernández, J.A., 2003. Unified method for determining the complex propagation constant of reflecting and nonreflecting transmission lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 13 (8), 351-353.
- Rotman, W., 1962. Plasma simulation by artificial dielectrics and parallelplate media. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 10 (1), 82-95.
- Sabah, C., Ogucu, G., and Uckun, S., 2006. Reflected and transmitted powers of electromagnetic wave through a double-negative slab. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 8 (5), 1925-1930.
- Sabah, C. and Uckun, S., 2008. Triangular split ring resonator and wire strip to form new metamaterial. *Proceedings of XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science*, Chicago, Illinois, USA.
- Sabah, C., 2016. Metamaterial absorber based multifunctional sensors. *Journal of the Electrochemical Society*, 163 (7), B319-B324.
- Schueler, M., Mandel, C., Puentes, M., and Jakoby, R., 2012. Metamaterial inspired microwave sensors. *IEEE Microwave Magazine*, 13 (2), 57-68.
- Sheen, J., 2009. Comparisons of microwave dielectric property measurements by transmission/reflection techniques and resonant techniques. *Measurement Science and Technology*, 20 (4), 042001.
- Shelby, R.A., Smith, D.R., and Schultz, S., 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292 (5514), 77-79.
- Smith, D.R. and Kroll, N., 2000. Negative refractive index in left-handed materials. *Physical Review Letters*, 85 (14), 2933-2936.

- Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C., and Schultz, S., 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*, 84 (18), 4184-4187.
- Smith, D.R., Schultz, S., Markos, P., and Soukoulis, C.M., 2002. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Physical Review B*, 65 (19), 195104.
- Smith, D.R., Vier, D.C., Koschny, T., and Soukoulis, C.M., 2005. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. *Physical Review E*, 71 (3), 036617.
- Sun, J.B., Liu, L.Y., Dong, G.Y., and Zhou, J., 2011. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference. *Optics Express*, 19 (22), 21155-21162.
- Supriyadi, Shimizu, K., Suzuki, M., Yoshida, K., Muto, T., Fujita, A., Tomita, N., and Watanabe, N., 2004. Maturity discrimination of snake fruit (*salacca edulis* reinw.) cv. Pondoh based on volatiles analysis using an electronic nose device equipped with a sensor array and fingerprint mass spectrometry. *Flavour and Fragrance Journal*, 19 (1) 44-50.
- Tao, H., Landy, N.I., Bingham, C.M., Zhang, X., Averitt, R.D., and Padilla, W.J., 2008. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization. *Optics Express*, 16 (10), 7181-7188.
- Tao, H., Strikwerda, A.C., Liu, M., Mondia, J.P., Ekmekci, E., Fan, K., Kaplan, D.L., Padilla, W.J., Zhang, X., Averitt, R.D., and Omenetto, F.G., 2010. Performance enhancement of terahertz metamaterials on ultrathin substrates for sensing applications. *Applied Physics Letters*, 97 (26), 261909.
- Torun, H., Top, F.C., Dundar, G., and Yalcinkaya, A.D., 2014. An antenna-coupled split-ring resonator for biosensing. *Journal of Applied Physics*, 116 (12), 124701.
- Trabelsi, S. and Nelson, S.O., 2016. Microwave sensing of quality attributes of agricultural and food products. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 19 (1), 36-41.
- Trang, F., Rogalla, H., and Popovic, Z., 2015. Effective constitutive parameters of high-temperature superconducting split-ring resonator arrays. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25 (1), 1800107.
- Ünal, H., 2017. Metamalzeme Tabanlı Çok Amaçlı Sensör Uygulamaları. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Veselago, V.G., 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10 (4), 509-514.
- Vélez, P., Su, L., Grenier, K., Mata-Contreras, J., Dubuc, D., and 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.
- Vélez, P., Muñoz-Enano, J., Grenier, K., Mata-Contreras, J., Dubuc, D., and Martín, F., 2019. Split ring resonator-based microwave fluidic sensors for electrolyte concentration measurements. *IEEE Sensors Journal*, 19 (7), 2562-2569.
- Wan, C.H., Nauwelaers, B., and De Raedt, W., 1998a. A simple error correction method for two-port transmission parameter measurement. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 8 (2), 58-59.
- Wan, C.H., Nauwelaers, B., De Raedt, W., and Van Rossum, M., 1998b. Two new measurement methods for explicit determination of complex permittivity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46 (11), 1614-1619.
- Wang, W., Yan, F.P., Tan, S.Y., Zhou, H., and Hou, Y.F., 2017. Ultrasensitive terahertz metamaterial sensor based on vertical split ring resonators. *Photonics Research*, 5 (6), 571-577.
- Weir, W.B., 1974. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. *Proceedings of the IEEE*, 62 (1), 33-36.

- Withayachumnankul, W., Jaruwongrungrsee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., and Abbott, D., 2013. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors and Actuators A-Physical*, 189, 233-237.
- Wu, W., Ren, M., Pi, B., Cai, W., and Xu, J., 2016. Displacement sensor based on plasmonic slot metamaterials. *Applied Physics Letters*, 108 (7), 073106.
- Xu, X., Peng, B., Li, D., Zhang, J., Wong, L.M., Zhang, Q., Wang, S., and Xiong, Q., 2011. Flexible visible-infrared metamaterials and their application in highly sensitive chemical and biological sensing. *Nano Letters*, 11 (8), 3232-3238.
- Yoo, M., Kim, H.K., and Lim, S., 2016. Electromagnetic-based ethanol chemical sensor using metamaterial absorber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 222, 173-180.
- Zhang, C., Liang, L., Ding, L., Jin, B., Hou, Y., Li, C., Jiang, L., Liu, W., Hu, W., Lu, Y., Kang, L., Xu, W., Chen, J., and Wu, P., 2016. Label-free measurements on cell apoptosis using a terahertz metamaterial-based biosensor. *Applied Physics Letters*, 108 (24), 241105.
- Zhao, R., Koschny, T., and Soukoulis, C.M., 2010. Chiral metamaterials: Retrieval of the effective parameters with and without substrate. *Optics Express*, 18 (14), 14553-14567.
- Zhu, C., Liang, C.H., and Chen, L., 2008. A novel left-handed material composed of triangular open-loop resonators. *Proceedings of the 2008 International Workshop on Metamaterials*, Nanjing, Peoples R. China.
- Zhu, C., Ma, J.J., Chen, L., and Liang, C.H., 2009. Negative index metamaterials composed of triangular open-loop resonator and wire structures. *Microwave and Optical Technology Letters*, 51 (9), 2022-2025.
- Ziolkowski, R.W., 2003. Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51 (7), 1516-1529.
- Ziolkowski, R.W. and Kipple, A.D., 2003. Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51 (10), 2626-2640.
- Zoughi, R., 2000. *Microwave Non-Destructive Testing and Evaluation*. Kluwer Academic Publishers, 263 p, Dordrecht, Netherlands.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Yunus KAYA
Doğum Tarihi	12 Eylül 1990
Doğum Yeri	Çekerek/YOZGAT
Uyruğu	T.C.
Adres	Bayburt Üniversitesi
E-mail	yunus_kaya66@hotmail.com
Eğitim	
İlköğretim	Çekerek Kamile Akbay İlköğretim Okulu (2004)
Lise	Çekerek Şehit Özgür Ocak Çok Programlı Lisesi, Fen Bilimleri Alanı (2007)
Lisans	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü (2011)
Lisans	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2013)
Yüksek lisans	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalı (2013)
Doktora	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalı (2020)
İş Deneyimi	
Araştırma Görevlisi	Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Patnos Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü (2013-2013)
Öğretim Görevlisi	Bayburt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Elektrik Programı (2013-...)
Çalışma Alanları	
Mikrodalgalar, Metamalzemeler, Malzeme Karakterizasyonu, Elektromanyetik Ölçüm Metotları, Metamalzeme Sensör Tasarımı.	
SCI & SCI-Expanded İndeksli Dergilerde Yayımlanan Makaleler	
22. Hasar, U.C., Kaya, Y. , and Ertugrul, M., 2020. Measurement of propagation characteristics of non-reciprocal networks/lines using a line-line method. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (Accepted).	
21. Hasar, U.C., Kaya, Y. , Ozturk, G., and Ertugrul, M., 2020. Propagation constant measurements of reflection-asymmetric and nonreciprocal microwave networks/lines from S-parameters without using a reflective standard. Measurement, 165, 108126.	

20. Hasar, U.C., **Kaya, Y.**, and Barroso, J.J., 2019. Transient plane-wave transmission through an N-layer structure by the method of subregions. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18 (9), 1868-1872.
19. Hasar, U.C., Buldu, G., **Kaya, Y.**, and Ozturk, G., 2018. Determination of effective constitutive parameters of inhomogeneous metamaterials with bianisotropy. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66 (8), 3734-3744.
18. Hasar, U.C. and **Kaya, Y.**, 2018. Self-calibrating noniterative complex permittivity extraction of thin dielectric samples. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60 (2), 354-361.
17. Hasar, U.C. and **Kaya, Y.**, 2017. Noniterative complex permittivity retrieval using calibration-independent waveguide measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 263, 654-666.
16. Hasar, U.C., **Kaya, Y.**, Barroso, J.J., and Ertugrul, M., 2015. Determination of reference-plane invariant, thickness-independent, and broadband constitutive parameters of thin materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63 (7), 2313-2321.
15. Hasar, U.C., Barroso, J.J., Buldu, G., Bute, M., **Kaya, Y.**, Karacali, T., and Ertugrul, M., 2015. Reference-plane-invariant effective thickness and electromagnetic property determination of isotropic metamaterials involving boundary effects. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 21 (4), 301-311.
14. Hasar, U.C., Barroso, J.J., **Kaya, Y.**, Karacali, T., and Ertugrul, M., 2015. Investigation of transmitted, reflected, and absorbed powers of periodic and aperiodic multilayered structures composed of bi-anisotropic metamaterials slab and conventional material. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 13, 106-119.
13. Hasar, U.C., Barroso, J.J., **Kaya, Y.**, Ertugrul, M., Bute, M., and Catala-Civera, J.M., 2014. Two-step numerical procedure for complex permittivity retrieval of dielectric materials from reflection measurements. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 116 (4), 1701-1710.
12. Hasar, U.C., Barroso, J.J., **Kaya, Y.**, Bute, M., and Ertugrul, M., 2014. Simple procedure for robust and accurate complex permittivity measurements of low-loss materials over a broad frequency band. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 28 (8), 903-915.
11. Hasar, U.C., Bute, M., Barroso, J.J., Sabah, C., **Kaya, Y.**, and Ertugrul, M., 2014. Power analysis of multilayer structures composed of conventional materials and bianisotropic metamaterial slabs. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 31 (5), 939-947.
10. Hasar, U.C., Barroso, J.J., Bute, M., **Kaya, Y.**, Kocadagistan, M.E., and Ertugrul, M., 2014. Attractive method for thickness-independent permittivity measurements of solid dielectric materials. *Sensors and Actuators A-Physical*, 206, 107-120.
9. Cansiz, A., Yildizer, I., Oral, E.A., and **Kaya, Y.**, 2014. An effective noncontact torque mechanism and design considerations for an evershed type superconducting magnetic bearing system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24 (1), 3600108.
8. Hasar, U.C., **Kaya, Y.**, Bute, M., Barroso, J.J., and Ertugrul, M., 2014. Microwave method for reference-plane-invariant and thickness-independent permittivity determination of liquid materials. *Review of Scientific Instruments*, 85 (1), 14705.
7. Hasar, U.C., Barroso, J.J., **Kaya, Y.**, Ertugrul, M., and Bute, M., 2013. Reference-plane invariant transmission-reflection method for measurement of constitutive parameters of liquid materials. *Sensors and Actuators A: Physical*, 203, 346-354.
6. Hasar, U.C., Barroso, J.J., Sabah, C., **Kaya, Y.**, and Ertugrul, M., 2013. Stepwise technique for accurate and unique retrieval of electromagnetic properties of bianisotropic metamaterials. *Journal*

of the Optical Society of America B-Optical Physics, 30 (4), 1058-1068.

5. **Kaya, Y.**, Cansiz, A. , and Yildizer, I., 2013. Driving mechanism of a superconducting magnetic bearing system. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 26 (4), 1233-1239.

4. Hasar, U.C., Barroso, J.J., Sabah, C., **Kaya, Y.**, and Ertugrul, M., 2012. Differential uncertainty analysis for evaluating the accuracy of S-parameter retrieval methods for electromagnetic properties of metamaterial slabs. Optics Express, 20 (27), 29002-29022.

3. Hasar, U.C., Barroso, J.J., Sabah, C., Ozbek, I.Y., **Kaya, Y.**, Dal, D., and Aydin, T., 2012. Retrieval of effective electromagnetic parameters of isotropic metamaterials using reference-plane invariant expressions. Progress in Electromagnetics Research, 132, 425-441.

2. Hasar, U.C., Barroso, J.J., Sabah, C., and **Kaya, Y.**, 2012. Resolving phase ambiguity in the inverse problem of reflection-only measurement methods. Progress in Electromagnetics Research, 129, 405-420.

1. Hasar, U.C. and **Kaya, Y.**, 2011. Reference-independent microwave method for constitutive parameters determination of liquid materials from measured scattering parameters. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 25 (11-12), 1708-1717.

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

2. **Kaya, Y.** ve Coşkun, A., 2019. 3 fazlı 600 kW gücünde kısa devre kafesli rotorlu asenkron motorun tasarımı: fiziksel boyutlandırılması ve elektriksel hesaplamaları. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12 (3), 1651-1665.

1. Kaya, B. ve **Kaya, Y.**, 2019. Elektrik kaynaklı yanma ve yangın. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2 (1), 152-157.

Ulusal/Uluslararası Konferanslarda Sunulan Bildiriler

10. **Kaya, Y.** and Coskun, A., 2019. Design of a turbo synchronous generator with 10 MVA round rotor. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET), Bayburt, TR.

9. **Kaya, Y.** and Coskun, A., 2019. Asynchronous motor design with 600 kW short circuit cage rotor. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET), Bayburt, TR.

8. **Kaya, Y.**, Ozturk, G., Hasar, U.C., and Ertugrul, M., 2018. Determination of negative constitutive parameters based on a square split ring resonator left handed metamaterial using waveguide,” International Symposium on Applied Sciences and Engineering (ISASE2018), Erzurum, TR.

7. **Kaya, Y.** and Kosunalp, S., 2017. On the limited-energy problem in wireless sensor networks: Solar energy harvesting. 2nd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET), Bayburt, TR.

6. **Kaya, Y.** and Kosunalp, S., 2017. An example application for smart city with internet of things architecture: A smart bin. 2nd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET), Bayburt, TR.

5. Ozturk, G., **Kaya, Y.**, Hasar, U.C., and Ertugrul, M., 2017. Metamaterials and usage areas. 2nd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET), Bayburt, TR.

4. **Kaya, Y.**, Ozturk, G., Hasar, U. C., and Ertugrul, M., 2017. Application areas of CST in microwave engineering. 2nd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET), Bayburt, TR.

3. Alacadagli, E. and Kaya, Y., 2017. Problems of vocational high school students and suggested solutions: Bayburt University Vocational School example. VI. International Vocational Schools Symposium, Sarajevo, Bosna i Hercegovina. 2. Alacadagli, E. and Kaya, Y., 2017. Employment opportunities of vocational school graduates and contributions to the urban economy: Bayburt University Vocational School example. VI. International Vocational Schools Symposium, Sarajevo, Bosna i Hercegovina. 1. Hasar, U.C., Kaya, Y., and Ertugrul, M., 2013. Determination of electromagnetic properties of bianisotropic metamaterials using a new microwave technique. 9th Nanoscience and Nanotechnology Conference, Erzurum, TR.
Kitap Bölümü
Kaya, Y., Hasar, U.C. ve Hasar, H., 2019. Radyofrekans Elektromanyetik Radyasyonun Bal Arılarına Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmaların Derlemesi. Organik Arıcılık, Ed: V. Aksakal, Y. Erdoğan ve Y. Kaya. Gündüz Ofset Matbaacılık, Bayburt, TR, 82-96.
Editörlük
Organik Arıcılık, Bilimsel Kitap, Ed: V. Aksakal, Y. Erdoğan ve Y. Kaya, Gündüz Ofset Matbaacılık, ISBN: 978-605-7563-02-6.
Atıflar
Web of Science (WOS) Toplam Atıf Sayısı: 215, h-indeksi (WOS): 10 Google Scholar Toplam Atıf Sayısı: 266, h-indeksi (Google Scholar): 10
Uluslararası Dergilerde Hakemlikler
Progress in Electromagnetics Research (PIER, PIER B,C,M, PIER Letters), Waves in Random and Complex Media, Measurement
Projeler
7. Proje Koordinatörü, Avrupa Birliği Destekli Proje (Türkiye Ulusal Ajansı 2019-1-TR01-KA107-063399), Erasmus+ Ortak Ülkelerle Hareketlilik Projesi, 25.040 Avro, 2019-2022. 6. Araştırmacı, Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje (Bayburt Üniversitesi BAP-2018/01-69001-03), Zaman Bölmeli Çoklu Erişim Tekniğinin Nesnelerin İnterneti Mimarisine Uyarlanması ve Performans Analizi, 7.000 TL, 2018-2019. 5. Araştırmacı, Uluslararası Destekli Proje (TANAP-SEIP C01/S/M/01242), Organik Arıcılığın Geliştirilmesi ve Yaygınlaştırılması, 902.900 TL, 2018-2019. 4. Araştırmacı, Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje (Bayburt Üniversitesi BAP-2017/02-69001-22), Bayburt Üniversitesi Öğrencilerinin Eğitime Devam, Mezuniyet, İstihdam Durumu ve Aldıkları Eğitimin İş Yaşamına Etkisi Üzerine Bir Araştırma, 4.000 TL, 2018-2018. 3. Araştırmacı, Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje (Bayburt Üniversitesi BAP-2016-2016/01-11), Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Güneş Enerjisi Kullanımıyla Yeni Bir Ortam Erişim Kontrol Protokol Tasarımı ve Pratik Uygulaması, 11.000 TL, 2016-2017. 2. Araştırmacı, Kalkınma Bakanlığı Destekli Proje (KUDAKA TRA1-17-TD-0002), İş Sağlığı ve Güvenliği Alanında Bayburt Üniversitesi Personelinin Eğitilmesi Projesi, 15.000 TL, 2017-2017. 1. Bursiyer, TÜBİTAK 1001 Projesi (108E178), Süperiletken Manyetik Yatakların Statik ve Dinamik Denge Kararlık Parametrelerinin Belirlenmesiyle Süperiletken-Mıknatıs Histeritik Modelinin Oluşturulması, 254.327 TL, 2009-2012.