

**AŞAğI VE YUKARI FREKANS DÖNÜŞÜM
YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK TERAHERTZ
UYGULAMALARININ İNCELENMESİ**

**2016
DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİğİ**

Turgut ÖZTÜRK

**AŞAĞI VE YUKARI FREKANS DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİNİ
KULLANARAK TERAHERTZ UYGULAMALARININ İNCELENMESİ**

Turgut ÖZTÜRK

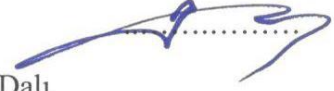
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
AĞustos 2016**

Turgut ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “AŞAĞI VE YUKARI FREKANS DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK TERAHERTZ UYGULAMALARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İhsan ULUER

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 09/ 08/ 2016

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. İhsan ULUER (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Şerafettin EREL (YBÜ)

Üye : Doç. Dr. Habibe TECİMER (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Tahir GÜNEŞER (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Serdar ÖZYURT (YBÜ)



19.08/2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Turgut ÖZTÜRK

ÖZET

Doktora Tezi

AŞAĞI VE YUKARI FREKANS DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK TERAHERTZ UYGULAMALARININ İNCELENMESİ

Turgut ÖZTÜRK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İhsan ULUER

Ağustos 2016, 125 sayfa

THz teknolojisi, insanlık yaşamını etkileyecek önemli alanlardan birisi haline gelmiştir. THz teknolojisindeki büyük gelişimin en büyük sebebi ise elektronik ve optik sistemlerdeki gelişmelerdir. THz frekans bölgesindeki malzeme karakterizasyonu işlemlerinde optik ve mikrodalga olmak üzere iki farklı ölçüm metodu kullanılmaktadır. Ölçümlerin sonucunda elde edilen veriler, çeşitli algoritmalar yardımı ile malzemelerin dielektrik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Ölçüm yöntemi ve hesaplama tekniklerinin etkisinden dolayı bir malzemeye ait parametreler farklılık gösterebilmektedir.

Çalışmanın hedefi üç grupta toplandığında ölçüm ve hesaplama sonucunu etkileyen etmenlerin iyileştirilmesi, ilk ölçüm verilerinin (S-parametreleri) aktif olarak kullanılması ve tahmin yöntemlerinin kullanılmasıyla işlem sürelerinin azaltılması şeklinde sıralanabilir. Ayrıca optik spektroskopi sisteminin daha ucuz bir şekilde

oluşturulması ile mikrodalga Serbest Ortam Ölçüm metodu sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Hesaplama tekniklerinin iyileştirilmesine yönelik Yapay Sinir Ağları, Yapay Arı Kolonisi, Kısmi En Küçük Kareler ve Tekil Spektrum Analizi algoritmaları kullanılmıştır. Optik sistemde ışın kaynağı olarak kullanılan Çok-Kipli Lazer Diyot için daha ucuz sürücü ve soğutucu birimi tasarlanarak mevcut sistem bu iki yönden optimize edilmiştir. Optik bir bileşen olan parabol ayna mikrodalga ölçüm metodunda kullanılarak bu metodun THz frekans bölgesinde kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Ham veri olan S-parametreleri hem dielektrik özelliklerin tahmininde hem de malzemelerin sınıflandırılmasında başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Newton-Raphson hesaplama tekniğinin başlangıç değer problemine bir öneri sunularak algoritmanın ıraksama problemine kısmi çözüm üretilmiştir. Dielektrik özelliklerin hesaplanma doğruluğu artırılarak mikrodalga ölçüm metodunun doğruluğu optik sistem ile sağlanmış ve iki metot arasındaki farklılıkların sebebi belirtilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Terahertz, milimetre dalga, mikrodalga, serbest ortam ölçüm metodu, zamana dayalı spektroskopi sistemi, çok-kipli lazer diyot.

Bilim Kodu : 905.1.034

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF TERAHERTZ APPLICATIONS USING UP AND DOWN FREQUENCY CONVERSION METHODS

Turgut ÖZTÜRK

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. İhsan ULUER

August 2016, 125 pages

THz technology has become one of the important areas that affect the human life. The greatest reason for major development in THz technology is improvement of electronic and optic devices. Two different methods, which are optic and microwave techniques, are used for material characterization processes in THz frequency range. Data obtained from the results of measurement are used to extract the dielectric properties of materials using various algorithms. Parameters of materials vary due to the effects of measurement methods and extracting techniques.

The goal of this study can be grouped in three steps: improvements of the factors which affect the measurement and extraction results, usage of the S-parameters first measurement data actively and reduction of processing time using estimation methods. In addition, formation of optical spectroscopy with a cheaper way was aimed to compare the results of Free Space Measurement method with the Time

Domain Spectroscopy system. Artificial Neural Networks, Artificial Bee Colony, Partial Least Squares and Singular Spectrum Analysis algorithms were used to improve the extracting techniques. Cheaper driving and cooler modules were designed for the Multimode Laser Diode, which was used as light source in optical system, to optimize the spectroscopy system. The availability of microwave measurement method was shown in THz frequency range using parabolic mirror, which is an optical component.

The raw data S-parameters were used successfully on both estimations of dielectric properties and classification of materials. A partial solution was procured for divergence problem of Newton-Raphson algorithm by presenting a proposal for the initial value problem of Newton-Raphson extracting technique. The accuracy of microwave measurement method was provided with optical system by increasing the calculation precision of dielectric properties and reasons of differences between the two methods were indicated.

Key Words : Terahertz, millimeter wave, microwave, free space measurement, time domain spectroscopy system, multimode laser diode.

Science Code : 905.1.034

TEŞEKKÜR

Terahertz konusunda alıőmam için beni ynlemdiren, her alanda ilgisini ve yardımını esirgemeyen, doktora tez alıőmam sürecinde engin bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren sayın hocam Prof. Dr. İhsan ULUER'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Doktora çalıőmama katkı sağlayan değerli tez izleme komitesi yeleri Prof. Dr. Őerfettin EREL ve Doç. Dr. Habibe TECİMER hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Osamu MORIKAWA, Dr. Amna ELHAWIL, Dr. İlhami ÜNAL, Dr. Martin HUDLICKA, Dr. Philip G. BARTLEY ve Doç. Dr. Hakan ALTAN'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerinden dolayı sevgili anne-babama ve eőime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu çalışmanın belli kısımları, Karabük niversitesi tarafından KB-BAAP-14/2-DR-008 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiőtir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|----------------------------------|
| KABUL..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xiv |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| 1.1. KAYNAK ÖZETİ | 2 |
| 1.2. PROBLEMİN TANIMLANMASI..... | 8 |
| 1.3. ÇALIŞMANIN AMACI..... | 10 |
| 1.4. TEZİN ANA HATLARI | 11 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 13 |
| MATERYAL VE YÖNTEM | 13 |
| 2.1. TERAHERTZ FREKANS BÖLGESİ..... | 13 |
| 2.1.1. Terahertz Dalgaları | 14 |
| 2.1.2. Mikro Ve Milimetre Dalgalar | 15 |
| 2.2. MALZEME KARAKTERİZASYONU | 15 |
| 2.2.1. Malzemenin Dielektrik Özellikleri | 16 |
| 2.2.2. Elektromanyetik Dalganın Malzeme İçerisinde İlerleyişi | 18 |
| 2.3. ZAMANA DAYALI THz SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ | 19 |
| 2.3.1. THz Sinyalinin Üretimi Ve Algılanması | 19 |
| 2.3.2. Foto İletken Anten İle THz Üretimi | 21 |
| 2.3.3. Çok-Kipli Lazer Diyotlar..... | 23 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 2.3.4. ÇKLD İle Zamana Dayalı Spektroskopi Sistemi | 25 |
| 2.4. SERBEST ORTAM ÖLÇÜM METODU | 27 |
| 2.4.1. Serbest Ortam Ölçüm Metodunun Çeşitleri | 29 |
| 2.4.2. Serbest Ortam Ölçüm Metodunun Özellikleri | 30 |
| 2.4.3. Ölçüm Sisteminin Kalibrasyonu | 31 |
| 2.5. KULLANILAN HESAPLAMA TEKNİKLERİ | 33 |
| 2.5.1. Nicolson-Ross-Weir Tekniği | 34 |
| 2.5.2. Newton-Raphson Tekniği | 36 |
| 2.5.3. Yapay Sinir Ağları | 37 |
| 2.5.4. Yapay Arı Koloni Algoritması | 38 |
| 2.5.5. Kısmi En Küçük Kareler Yöntemi | 39 |
| 2.5.6. Tekil Spektrum Analizi | 41 |
| BÖLÜM 3 | 43 |
| ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA | 43 |
| 3.1. ÖLÇÜMÜ YAPILAN MALZEMELERİN SEÇİMİ | 43 |
| 3.2. SOÖ METODU İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR | 45 |
| 3.2.1. Newton-Raphson Başlangıç Değer Problemi | 47 |
| 3.2.2. Yapay Sinir Ağları İle Farklı Bant Aralıklarının Tahmini | 54 |
| 3.2.3. YSA'nın Arı Algoritması İle Optimizasyonu | 59 |
| 3.2.4. Tekil Spektrum Analizi İle Sinyallerin Filtrelenmesi | 63 |
| 3.2.5. Kısmi En Küçük Kareler Yöntemi İle Sınıflandırma İşlemi | 67 |
| 3.3. OPTİK BENZERİ SOÖ METODU | 73 |
| 3.4. ÇKLD-ZDS SİSTEMİNİN OPTİMİZASYONU | 80 |
| 3.5. ÇKLD-ZDS VE SOÖ METOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI | 88 |
| BÖLÜM 4 | 93 |
| SONUÇ VE ÖNERİLER | 93 |
| KAYNAKLAR | 96 |
| ÖZGEÇMİŞ | 109 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. THz elektromanyetik dalga spektrum aralığı..... | 14 |
| Şekil 2.2. Karmaşık dielektriksel geçirgenliğin gösterimi. | 17 |
| Şekil 2.3. Elektromanyetik dalganın malzeme ile etkileşimi. | 18 |
| Şekil 2.4. Foto iletken antenin ön ve arka taraftan görünüşü. | 21 |
| Şekil 2.5. THz atımı ve güç spektrumu. | 22 |
| Şekil 2.6. Çok-kipli lazer diyotun içyapısı ve dış görünüşü. | 24 |
| Şekil 2.7. ÇKLD-ZDS sistemi. | 25 |
| Şekil 2.8. Serbest ortma ölçüm metodunun şematik gösterimi. | 29 |
| Şekil 2.9. TRL kalibrasyon tekniğinin şematik gösterimi. | 31 |
| Şekil 2.10. SOÖ metodu için TRL kalibrasyon tekniği. | 32 |
| Şekil 2.11. Yapay sinir ağları yönteminin yapısı. | 37 |
| Şekil 2.12. YAK algoritmasının modellenmesi. | 39 |
| Şekil 2.13. TSA algoritmasının modellenmesi. | 42 |
| Şekil 3.1. Serbest ortam ölçüm metodu. | 46 |
| Şekil 3.2. TRL kalibrasyon tekniklerinin karşılaştırılması. | 47 |
| Şekil 3.3. Teflon için NRW algoritma sonuçları. | 50 |
| Şekil 3.4. N-R ve NRW tekniklerinin karşılaştırılması. | 50 |
| Şekil 3.5. Başlangıç değer tahminlerinin karşılaştırılması. | 53 |
| Şekil 3.6. Teflon için elektriksel geçirgenliğin belirlenmesi. | 53 |
| Şekil 3.7. Newton-Raphson tekniğinin akış şeması. | 54 |
| Şekil 3.8. Önerilen YSA'nın modellenmesi. | 55 |
| Şekil 3.9. YSA ile elektriksel geçirgenliğin reel kısmının tahmini. | 56 |
| Şekil 3.10. Farklı frekans bandı için YSA'nın tahmini. | 56 |
| Şekil 3.11. Farklı kalınlığa sahip cam için YSA'nın tahmini. | 57 |
| Şekil 3.12. YSA'nın YAK ile optimize edilmesi. | 60 |
| Şekil 3.13. K-bandı için YAK-YSA modelinin sonuçları. | 61 |
| Şekil 3.14. W-bandı için YAK-YSA modelinin sonuçları. | 62 |
| Şekil 3.15. Camın öz değer spektrumu. | 64 |
| Şekil 3.16. Türevleri alınan ham ve filtrelenmiş sinyal. | 65 |

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 3.17. Ham ve filtrelenmiş sinyallerin genlikleri. | 66 |
| Şekil 3.18. Dört malzeme için elektriksel geçirgenlik değerleri. | 66 |
| Şekil 3.19. 9,84 mm kalınlığındaki cam için faz ve genlik (dB) değeri. | 69 |
| Şekil 3.20. 18,22 mm kalınlığındaki cam için faz ve genlik (dB) değeri. | 69 |
| Şekil 3.21. Elektriksel geçirgenlik değerleri ile sınıflandırma. | 70 |
| Şekil 3.22. Alt alta eklenen S-parametreleriyle sınıflandırma. | 71 |
| Şekil 3.23. Uç uca eklenen S-parametreleri ile sınıflandırma. | 71 |
| Şekil 3.24. Temel bileşenlerin sınıflandırmaya etkisi. | 72 |
| Şekil 3.25. SSÖ metodu ile elde edilen dielektrik sabitleri. | 74 |
| Şekil 3.26. Malzemelere ait kırılma indislerinin gösterilmesi. | 75 |
| Şekil 3.27. Optik-benzeri serbest ortam ölçüm metodu. | 76 |
| Şekil 3.28. Teflon malzemesine ait düzeltilmiş sinyal. | 78 |
| Şekil 3.29. Optik-benzeri SOÖ metodu ile elde edilen sonuçlar. | 79 |
| Şekil 3.30. Malzemelere ait kırılma indisleri. | 79 |
| Şekil 3.31. Geliştirilen ÇKDL sürücü devresi. | 80 |
| Şekil 3.32. OSA analizi ile spektrumda kiplerin gösterimi. | 82 |
| Şekil 3.33. ÇKLD'nin spektrumu. | 82 |
| Şekil 3.34. ÇKLD-ZDS sistemi. | 83 |
| Şekil 3.35. ÇKLD-ZDS ölçümü ile PVC malzemesinin analizi. | 84 |
| Şekil 3.36. PVC malzemesinin kırılma indisi. | 84 |
| Şekil 3.37. PVC'nin elektriksel geçirgenlik değeri. | 85 |
| Şekil 3.38. Malzemelerin THz sinyali ile etkileşimi. | 86 |
| Şekil 3.39. Malzemelere ait kırılma indisleri. | 86 |
| Şekil 3.40. Elektriksel geçirgenliğin reel kısımları. | 87 |
| Şekil 3.41. İki farklı sistem ile elektriksel geçirgenliklerin karşılaştırılması. | 89 |
| Şekil 3.42. Malzemelere ait kırılma indislerinin karşılaştırılması. | 90 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan metotların karşılaştırılması..... | 28 |
| Çizelge 3.1. Bazı malzemelerin elektriksel geçirgenlik değerleri..... | 44 |
| Çizelge 3.2. Başlangıç değer tahmin değişimi. | 52 |
| Çizelge 3.3. YSA ile elde edilen sonuçların N-R ile karşılaştırılması. | 58 |
| Çizelge 3.4. YAK-YSA sonuçlarının karşılaştırılması. | 62 |
| Çizelge 3.5. Ölçülen malzemelerin elektriksel geçirgenlik değerleri. | 67 |
| Çizelge 3.6. Sınıflandırma işleminde kullanılan malzemeler. | 68 |
| Çizelge 3.7. Geniş bant ölçümde kullanılan malzemeler. | 75 |
| Çizelge 3.8. Ölçümü yapılan malzemelerin özellikleri. | 88 |
| Çizelge 3.9. SOÖ ve ZDS ölçüm metotlarının karşılaştırılması. | 90 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|--------------|-------------------------------------|
| c | : ışık hızı |
| cm | : santimetre |
| D | : elektrik akı yoğunluğu |
| E | : elektrik alan |
| eV | : elektron volt |
| ϵ | : elektriksel geçirgenlik |
| ϵ_0 | : boşluğun elektriksel geçirgenliği |
| ϵ_r | : bağıl elektriksel geçirgenlik |
| f | : frekans |
| fs | : femto saniye |
| Hz | : hertz |
| mm | : mili metre |
| μ | : manyetik geçirgenlik |
| μm | : mikrometre |
| μ_0 | : boşluğun manyetik geçirgenliği |
| μ_r | : bağıl manyetik geçirgenlik |
| μW | : mikrowatt |
| N | : azot |
| n | : kırılma indisi |
| pA | : piko amper |
| ps | : piko saniye |
| v | : dalga hızı |
| ω | : açısal hız |
| Z | : empedans |
| σ | : elektriksel iletkenlik |
| λ | : dalga boyu |

KISALTMALAR

AFD : Aşağı Frekans Dönüşüm

BMK : Bulanık Mantık Kontrol

ÇKLD : Çok-Kipli Lazer Diyot

ESD : Elektro Statik Deşarj

FİA : Foto İletken Anten

FD : Fourier Dönüşümü

GA : Genetik Algoritma

GHz : Gigahertz

KBA : Kök Bulma Algoritması

MHz : Megahertz

N-R : Newton-Rahpson

NRW : Nicolson Ross Weir

OSA : Optik Spektrum Analizör

SOÖ : Serbest Ortam Ölçüm

TSA : Tekil Spektrum Analizi

TDA : Tekil Değer Ayrışımı

TBA : Temel Bileşenler Analizi

THz : Terahertz

TRL : Thru Reflect Line

VNA : Vektör Network Analizör

YAK : Yapay Arı Kolonisi

YSA : Yapay Sinir Ağları

YFD : Yukarı Frekans Dönüşüm

ZDS : Zamana Dayalı Spektroskopi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Elektromanyetik spektrumda mevcut olan bölümler ile ilgili birçok araştırma yapılmış olmasına rağmen Terahertz (THz) frekans aralığına yönelik çalışmalar son 30 yılda hız kazanmıştır. Bu bölgede yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler aşağı ve yukarı frekans dönüşüm yöntemleri şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Genel olarak lazer kaynağından çıkan ışını kızıl ötesi frekanslarından (10^{14} Hz) THz frekanslarına (10^{11} - 10^{12} Hz) düşürme yöntemi, aşağı frekans dönüşüm yöntemi olarak adlandırılır. Mikro dalga frekanslarından (10^9) THz frekanslarına (75-500 GHz) yükseltme yöntemi ise yukarı frekans dönüşüm yöntemi olarak isimlendirilir.

Aşağı Frekans Dönüşüm (AFD) yöntemi için en önemli kısıtlama bu teknolojinin diğerlerine nazaran geri kalmasının da en büyük etkeni olan THz ışınımı gerçekleştirecek ışık yayan aygıtların eksikliğidir. Gelişen teknoloji ile birlikte ilgi odağı haline gelen bu alanda yapılmış mevcut çalışmalar kullandıkları ışık kaynağından dolayı hem pahalı hem de yeterince kararlı değildir. Ayrıca bu sistemler için dengeli dağılım ve güvenli kip kilitleme mekanizmasına ihtiyaç duyulmasının yanı sıra femto saniye lazerler için iç soğutma sistemine ihtiyaç vardır [1,2]. Bu sebeple hedeflenen çalışmanın birinci kısmında alternatif lazer kaynağı olarak ticari olarak elde edilebilen, ucuz ve küçük Çok-Kipli Lazer Diyot (ÇKLD) kullanılarak fotoiletken antenin uyarılmasıyla THz ışınımının üretildiği ÇKLD Zamana Dayalı Spektroskopi (ZDS) sisteminde ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Yukarı Frekans Dönüşüm (YFD) yöntemi için mikro dalga ölçüm sistemlerinden biri olan geleneksel Serbest Ortam Ölçüm (SOÖ) metodu kullanılmaktadır. Sistem bileşenlerinden Vektör Network Analizör (VNA), çoğaltıcı (extender) yardımı ile 500 GHz'e (0,5 THz) kadar ışınım üretebilmektedir [3]. Bu ölçüm sistemindeki bileşenlerin teknolojik gelişmelerle yenilenmesinin yanı sıra ölçüm esnasındaki

kalibrasyon standartlarındaki iyileştirmelerin katkısı ile dielektrik özelliklerin hesaplanmasında kullanılan tekniklerin önemi yüksektir. Ayrıca parabolik aynalar yardımı ile üretilen ışının hizalanması ve yönlendirilmesi sağlanarak optik-benzeri ölçüm sistemleri oluşturulmaktadır.

Yukarıda bahsedilen ölçüm yöntemleri ile malzeme karakterizasyonları ve iki boyutlu görüntüleme işlemleri gerçekleştirilme imkânı vardır [4,5]. Malzeme karakterizasyonu ile hesaplanan dielektrik özellikler, malzemelerin elektriksel karakteristiklerini belirlediğinden malzemelerin davranışını ve birbirleri ile nasıl etkileşim yapabildiklerini anlamak için önemlidir.

1.1. KAYNAK ÖZETİ

Gelişen teknoloji ve araştırma olanaklarının artması ile THz ışınlarının avantajlarından yararlanılarak THz teknolojiye sahip ürünlerin yakın bir gelecekte yaygın olarak kullanılması mümkün görülmektedir. THz dalgalar, elektromanyetik spektrumdaki diğer bölümlerde bulunmayan bazı malzemelerden geçebilme veya yüzde yüze yakın yansiyabilme, X-ışınlarına nazaran zararsız olması ve farklı malzemeler arasında ayırım yeteneğinin olması gibi benzersiz özelliklere sahiptir. Bu özelliklere sahip THz dalgaları sayesinde havaalanı güvenliği, tehlikeli maddelerin tanımlanması, tıbbi görüntüleme ve gıda endüstrisinde kalite kontrolü gibi konularda yeni avantajlar sağlanacaktır.

Teknolojik gelişmelerin paralelinde oluşturulan ZDS sistemi, en önemli bileşeni olan femto saniye lazerlerden dolayı hala pahalıdır ve uzun vadeli endüstriyel kullanımlar için genellikle güvenilir ve yeterince kararlı değildir. ZDS sisteminde kullanılan ışın kaynağının sahip olduğu problemlere çözüm amacıyla alternatif olarak daha küçük, basit, ucuz, kararlı ve ticari olarak kolayca elde edilebilen ÇKLD kullanılmaya başlanmıştır. ÇKLD-ZDS her ne kadar ışın gücü, ışın verimliliği ve spektrum genişliği yönlerinden geleneksel THz-ZDS'ye göre zayıf olsa da bazı çalışmalarda bu noktaların iyileştirilebileceği gösterilmiştir [1,6-8].

15 yılı aşan bir süreçte ÇKLD (Multimode Laser Diode – MMLD) ile yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı deney sistemlerinde hedeflenen çalışmaları THz atımının üretimi, numune analizi ve 2D görüntüleme olarak gruplandırabiliriz. Şimdiye kadar konu hakkında Japon ve Alman çalışma grupları araştırma yapmışlardır. İki çalışma grubu geliştirmiş oldukları yeni sisteme poorman's THz-ZDS, benzer (Quasi) ZDS (QZDS) ve MLD-ZDS gibi değişik isimler vermişlerdir [1,5,7,8-11].

Foto İletken Anten tarafından (FİA) üretilen THz ışımının temeli, aygıtta piko saniye zaman aralığında akım dalgalanması oluşturmaktır. Bunu yapabilmek için ÇKLD'den çıkan ışın demetinin ani olarak dalgalanması yani ışın şiddetindeki değişim özelliği kullanılır [6,9,10,12]. Bu özelliğe sahip ÇKLD'nin THz atımı üretmek için Hangyo tarafından önerilmesiyle yapılan ilk çalışmada ÇKLD ile uyarılan FİA'nın THz atımı üretebildiği gösterilmiş ve THz atımının ölçümü algılayıcı anten yerine ısı değişimine duyarlı olan bolometre ile gerçekleştirilmiştir [8,13]. Yapılan bu ilk çalışmada Hyodo ve arkadaşlarının kurmuş oldukları deney düzeneği kullanılmış ve sadece ışın kaynağı olarak çift kipli mikro çip lazer yerine ÇKLD eklenmiştir [13,14]. Takip eden süreçte bu sistemin benzerleri kurulup farklı anten yapıları için THz atımının elde edilmesi karşılaştırılırken numune analizinin yapılabilmesi için numunenin geçirgenliği ve kırılım indisi ölçülmüştür [11,15,16].

ÇKLD kullanılan Zamana Dayalı Spektroskopi (Time Domain Spectroscopy – TDS / ÇKLD – ZDS) sistemlerinde bolometre yerine anten kullanılmasıyla ilk anten üretim - anten algılama sistemi olan çalışmada hem THz atımı üretilmiş hem de numunenin kırılım indisi ölçülmüştür [12]. Anten – anten ZDS sisteminin devamı niteliğindeki çalışmalarda genelde THz atımın frekans bant genişliğinin artırılmasının yanı sıra numune analizi ön plana çıkmıştır [1,5,7,9,17-20]. Bahsi geçen kaynaklardaki deney düzeneklerinden farklı olarak fiber kablo ile sinyalin iletimi sağlanarak özellikle elde edilen spektrumdaki sürekli bileşenlerin genlik değerlerinin artırılması hedeflenmiştir [6,10,21-24]. Ayrıca fiberli ve fibersiz anten – anten sistemi ve zayıf olarak elde edilen Sinyal-Gürültü oranının iyileştirilmesinin yanı sıra Drude Model ile elde edilen değerler ve ölçüm sonuçları karşılaştırılarak önerilen sistemin sunmuş olduğu başarı gösterilmiştir [5,9-12,16-21].

THz atımını iyi derece elde edebilmek ve Sinyal-Gürültü oranını artırmak için güçlü bir ışın kaynağına ihtiyaç vardır [22]. Sebebi ise ışıma gücü optik çıkış gücünün karesi ile orantılıdır [11]. Bu gereklilik için optik çıkış gücü yüksek olan bir ÇKLD tercih edilebilir. Fakat yüksek güç, FİA'nın yapısını bozacağı için ÇKLD'den çıkan güç zayıflatma filtresi ile azaltılarak antene odaklanır [21]. Bu eksikliği gidermek için anahtarlama mantığı kullanılarak ÇKLD'den sürekli dalga yerine atımlı dalga üretilip çıkış gücünün ortalama değeri artırılarak hem FİA'nın zarar görmesi engellenmiş hem de ışıma gücü artırılmıştır [23]. Benzer deney düzeneğine sahip ve antenlere kadar fiber kablo kullanıldığı için ışın bölücü ile aynalara ihtiyaç duymayan bu sistem, gecikme hattının tamamen tarandığı femto saniye (fs) lazer kullanan sistem ile karşılaştırılarak tarama süresinin daha hızlı olabileceği gösterilmiş ve önerilen sistemin ince nesnelere sayımında sensör görevinde kullanılabileceği ifade edilmiştir [22].

Üretilen THz atımının bant genişliği açısından yapılan çalışmalar incelendiğinde maksimum 0,7 THz olduğu veya 0,5 THz civarlarında olduğu gözlemlenmiştir [1,6,7,19,24]. Fakat deney düzeneğinde iki adet ÇKLD kullanan foto karıştırıcı çalışmaya göre bir adet ÇKLD kullanılmasıyla daha basit olan çalışma daha başarılı olmuştur [1,6]. Her ne kadar ilk 2D görüntüleme işlemi yapılmış olsada sistem geliştirilip Sinyal-Gürültü oranı artırılarak polimerik hava yastık kapağı ve cam elyaf destekli polimer olmak üzere iki ayrı 2D görüntüleme yapılmıştır [1,5,22].

Üretilen THz atımının frekans bant genişliğinin artırılabilmesi için bazı çalışmalarda özel yöntemler denenmiş veya ayrı ayrı yapılmış çalışmalar bir arada karşılaştırmalı olarak tekrarlanmıştır. Objektif mercekle aracılığıyla FİA elektrotlarına odaklanması gereken ışın demetinin boyutu optimize edilmiş veya FİA anten, üzerine düşürülen ışın demetinin odak noktasından biraz geri tarafa konularak anten aracılığıyla gerçekleştirilen ışımının daha verimli olması sağlanmıştır [9-11,16,18]. ÇKLD'den çıkan ışın hizalanıp FİA'ya odaklanması için uzaysal filtre kullanılarak elde edilen sonuçlar, aynı deney düzeneğinde uzaysal filtre olmadan ve fiber kablo kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda uzaysal filtre sayesinde ışıma spektrumundaki sürekli bileşenlerin genliği artırılmış ve Sinyal-Gürültü oranı fiberli sisteme göre on üç kat iyileştirilmiştir [10].

Yapılan çalışmalarda ilk olarak THz atımının elde edilmesi ve frekans bant genişliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bunun için özellikle lazer diyottan çıkan ışının hizalanması, farklı anten yapılarının etkileri ve değişik markalara ait lazer diyotların verimli bir şekilde üretim yapabilmesine ağırlık verilmiştir. Deney sisteminin oluşturulması için önemli olan elektriksel ve optik sistem elemanları hakkında detaylı veya genel bilgilerin verildiği çalışmaların yanı sıra özellikle anten ve lazer diyot hakkında ise ihtiyaç duyulan bilgilerin verilmediği çalışmalarda vardır [1,5,7,10,11,13,16,17,21,22]. Önerilen sistemden elde edilen sinyalin özellikleri ve avantajları verilirken elde edilen sonuçlar ışınım verimliliği, kararlılık, spektrum genişliği, ışınım gücü ve tarama süresi gibi yönlerden femto saniye lazer ile karşılaştırılmıştır [5,10,11,15,22]. ÇKLD'nin ışınım gücü, spektrum genişliği (fs lazer ~10 nm – ÇKLD ~2 nm) ve ışınım verimliliği yönünden hala iyileştirilmesi gerekirken her çalışmada vurgulanan ucuz, küçük ve kararlı bir yapıda olması gibi özelliklerinden dolayı önemli avantajlara sahiptir.

Geleneksel ZDS sistemlerinin alternatifi olarak YFD yöntemi olan mikrodalga ölçüm sistemleri THz frekans bölgesinde yapılan malzeme karakterizasyon işlemlerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Fakat bu metotlardan sadece bir tanesi malzemenin dielektrik özelliklerinin ölçümü için bütün frekans bandı üzerinde etkin olarak kullanılamaz. Ayrıca kayıplı ve düşük kayıplı malzemelerin yüksek doğrulukla ölçülebilmesinin zorlukları vardır. Bu yüzden her bant ve malzeme kayıplarına göre farklı bir metoda ihtiyaç vardır [25]. Mikrodalga ve milimetre dalga frekans bandında (3 MHz – 300 GHz) her malzemeye özgü olan elektriksel geçirgenliği yüksek doğrulukta ölçmek için zaman ve frekans bölgesinde test edilmiş birçok metot mevcuttur [26-29]. İlgili frekans bandına ve numune şartlarına uygun en iyi ölçüm metodunun belirlenmesi gerekmektedir [30]. Metodun belirlenmesine ölçüm yapılacak frekans aralığı, elektriksel geçirgenliğin beklenen değeri, ihtiyaç duyulan ölçüm doğruluğu, malzemenin özellikleri (homojen, izotropik), malzemenin formu (katı, sıvı, gaz) gibi etmenler etki etmektedir. Ayrıca, numune boyutu kısıtlamaları, sıcaklık, temaslı/temassız ölçüm, tahribatlı/tahribatsız ölçüm gibi durumlar da etki etmektedir [31].

Mikroldalga ve milimetre dalga bandında sıklıkla kullanılan ve çok klasik bir yöntem olan SOÖ metodu, 1940lı yıllardan beri geliştirilerek çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [32]. Bu ölçüm metodunun kullanıldığı çalışmaları birçok yönden incelemek mümkündür. Özellikle 0,5 THz'e kadar ölçüm yapma imkânı veren bu metot ile yapılan çalışmaları malzeme karakterizasyonunun iyileştirilmesi, iki boyutlu görüntüleme işleminin yapılması, ölçüm yapılan frekans bant aralığının artırılması, kalibrasyon yöntemlerinin geliştirilmesi, dielektrik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan hesaplama tekniklerinin optimizasyonu, simülasyon (CST, HFSS vb.) ortamında alınan sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırılması ve diğer ölçüm metotları ile SOÖ ölçüm metodunun karşılaştırılması gibi yönlerden değerlendirilebilir [3,33-45]. Bu çalışmalara ek olarak mercek ve parabolik ayna gibi optik bileşenlerin kullanılması ile farklı SOÖ metodunun geliştirilmesi ile malzeme üzerine odaklama işlemi kolaylaştırılmıştır [46-48].

İhtiyaç duyulan sonuçların elde edilmesi için yapılan çalışmalar farklı bant gruplarında toplanmıştır. Örneğin radar kesit alanı incelemesi, radar emici yapıların analizi, hava ve uzay iletişimi gibi konuların incelenmesi bakımından X-bandında (8,2-12,4 GHz) çok fazla çalışma yapılmıştır [35,37,49-51]. Çalışmaların W-bandı (75-111 GHz) frekans bölgesinde yapılması ile milimetre dalga boyundaki uygulamalar için farklı ölçüm metotlarının karşılaştırılması verilmiştir [52]. Son zamanlarda THz frekans bölgesindeki (100-1000 GHz) uygulamalarda malzeme davranışlarını gözlemlemek için ölçümler yapılmış ve optik bileşenlerin desteği ile daha küçük ve ucuz kullanılabilir SOÖ sistemi geliştirilmiştir [53,54]. Y-bandı (325-500 GHz) frekans bölgesinde tek katmanlı malzemenin dielektrik özellikleri tespit edilmiş ve THz-ZDS sisteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılma yapılarak SOÖ metodunun 0,5 THz'e kadar başarılı bir şekilde uygulanabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmanın bir benzeri G-bandı (220-235 GHz) için tekrar edilmiştir [38,39,55].

Analiz edilen malzemeler uygulandıkları alanlara göre farklılık gösterse de temel işlem tamamen dielektrik özelliklerin belirlenmesine yöneliktir. Bu bağlamda birçok malzeme çeşidinin analizine yönelik araştırmalar yapılmış ve ilgili malzemelerin dielektrik özelliklerinden yüksek derecede fayda sağlanması için elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Gıda endüstrisinde yiyeceklerin saklanması ve uzun süre tazeliğini

koruyabilmesi için oluşturulan ortam şartlarının malzemeler üzerindeki etkisi elektriksel geçirgenliğin değişimi ile saptanmaya çalışılmıştır [56,57]. Nem oranındaki değişimin takibi ile yiyeceklerin tazeliği incelenmesine yönelik başarılı çalışmalar yapılmıştır [58-60]. İnşaat sektöründe kullanılan malzemelerin içyapılarının değişimi yönünden analiz edilmelerinin yanı sıra çok katmanlı malzemeler ile metamalzemelerin özellik ve davranışlarının incelenmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [34,61-66]. Bu çalışmalara ilaveten sıvı malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi içinde çok katmanlı malzeme inceleme mantığı kullanılarak bazı çalışmalar ortaya konmuştur [67,68].

Yapılan çalışmalar teknik bakımından gruplandırıldığında ölçüm alınmadan önce yapılan ve sistemden düzgün veri elde edilmesini sağlayan kalibrasyon işlemi ile elde edilen verilen işlenerek dielektrik özelliklerin belirlendiği hesaplama süreci olmak üzere ikiye ayrılabilir. Var olan birçok kalibrasyon tekniğinin iyileştirilmesinin yanında yenilerinin yapılan ölçüme katkıları araştırılmıştır [69-72]. En temel hesaplama tekniği olan Nicolson-Ross-Weir (NRW) metodu yaygın olarak dielektrik özelliklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır [73,74]. Bu analitik metoda ek olarak Newton-Raphson (N-R), Genetik Algoritma (GA) ve Kök Bulma Algoritması (KBA) gibi nümerik yöntemlerden de faydalanılmıştır. Hesaplama tekniği ile elde edilen değerleri kullanarak eğitilen yapay zekâ tabanlı Yapay Sinir Ağları (YSA) algoritması da elektriksel geçirgenliğin tahmin edilmesinde kullanılmıştır [75-78].

Yapılan kaynak taramasında ortaya çıkan problem ve eksikliklere yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır. Malzeme karakterizasyonu ile elde edilen dielektrik özelliklerin teorik sonuçlara daha yakın hesaplanabilmesi için mevcut teknikler geliştirilmiştir. Daha kısa sürede hesaplama işlemlerinin yapılabilmesi için yapay zekâ tabanlı yöntemler kullanılarak elektriksel geçirgenlik değerinin tahmin edilebilme doğruluğu artırılmıştır [79]. Ölçüm sinyallerindeki mevcut hata ve gürültüler elimine edilerek malzemelerin gruplandırılması S-parametrelerinin kullanılmasıyla başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir [80,81].

1.2. PROBLEMİN TANIMLANMASI

Dielektrik malzemeler, üzerlerine gelen elektromanyetik dalga ile önemli ölçüde etkileşime girerler. Bu etkileşim sonucunda hesaplanabilen dielektrik özellikler ile malzemeler hakkında önemli ölçüde bilgi elde edilir. Tespit edilmeye çalışılan bu dielektrik özellikler elektriksel geçirgenlik (permittivity), manyetik geçirgenlik (permeability), dielektrik kayıp, iletkenlik, öz direnç (resistivity) şeklinde sıralanmakta ve malzemenin elektromanyetik alandaki makroskopik davranışını bulmak için kullanılmaktadır [82-84].

Mikrodalga ölçüm metotları ile malzeme karakterizasyonu iki aşamada gerçekleştirilebilir: İlk aşamada malzemenin ölçümü, ikinci aşamada ise elde edilen verilerden ihtiyaç duyulan parametrelerin hesaplanması. Bu işlemleri yüksek doğrulukta yapmak için aşağıdaki adımlar uygulanabilir [25]:

1. Malzeme formunun belirlenmesi (katı, sıvı, toz vs.)
2. Malzeme şekil ve büyüklüğünün belirlenmesi (küçük, büyük, düz, pürüzlü, kalın, ince vs.)
3. Ölçüm yapılacak frekans aralığının belirlenmesi (dar bant, geniş bant, düşük frekans, yüksek frekans)
4. Hesaplanacak parametrenin belirlenmesi (dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik, kırılım indisi vs.)
5. Ölçüm ortamı – malzeme ilişkisinin belirlenmesi (tahribatlı, tahribatsız, temaslı, temassız, düşük sıcaklık, yüksek sıcaklık vs.)
6. İhtiyaç duyulan yüksek doğruluğun belirlenmesi
7. Maliyetin belirlenmesi

Yukarıda belirtilen maddeler doğrultusunda bütün şartlar için geçerli sadece bir ölçüm tekniği mevcut değildir [25]. Bu sebeple hangi ölçüm metodunun uygun olduğu belirlendikten sonra daha hassas bir ölçüm gerçekleştirilebilir. Ölçüm yapılacak frekans aralığının yüksek olması durumunda mevcut teknoloji bakımından en uygunu SOÖ metodudur. Bunun yanı sıra ÇKLD'nin kullanıldığı optik ZDS

sistemi ile yapılacak ölçümler geniş bir frekans bant aralığında yapılabildiği için bu yöntemi avantajlı hale getirmektedir [7].

THz frekans bölgesinde çalışma yapılması hedeflendiği için birçok avantajından dolayı mikrodalga ölçüm yöntemlerinden SOÖ metodu ön plana çıkmaktadır. Özellikle belirtilen kıstaslar çerçevesinde SOÖ metodu tahribatsız ve temassız ölçüm yapma, katı-sıvı-toz şeklindeki malzemelerin karakterize edilebilmesi, çok küçük olmamak şartı ile her büyüklükteki katı malzemelerin ölçülebilmesi imkânı sunmaktadır.

SOÖ metodu ile toplanan verilerin işlenip derlenmesi için kullanılan hesaplama teknikleri, matematiksel teori sonuçlarına yaklaşan bir değer vermektedir. Analitik ve nümerik olarak gruplandırılan bu tekniklerin optimize edilmesi ile daha küçük bir hata oranı yani yüksek doğruluk ile malzemelerin elektriksel geçirgenliği ve kırılım indisi hesaplanabilir. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için mevcut çalışmalarda ön plana çıkan hesaplama tekniklerinin karşılaştırılarak en uygun olanının belirlenmesi gerekmektedir. VNA ile toplanan verilerin de hata ve gürültüden arındırılmış olmasına ihtiyaç vardır. Özellikle uzun süren ölçüm işlemlerinde bozulan kalibrasyon hassasiyetinin tekrar sağlanması zor olacağından elde edilen verilerin bir filtreleme işlemine tabi tutulması hata ve gürültüyü elimine edebilir.

Kızılötesi frekans bölgesindeki ışınların THz frekanslarına dönüştürüldüğü optik sistemlerde ise durum biraz daha farklıdır. Bu sistemlerin kararlı olabilmesi ve ışının hizalanmış bir şekilde üretilip iletilebilmesi için birçok şartın yerine getirilmesi gerekmektedir. En pahalı bileşenin lazer kaynağı olduğu Zamanda Dayalı Spektroskopi (ZDS) sistemlerinde alternatif olarak daha ucuz lazer kaynaklarına ihtiyaç vardır. Ticari olarak çok kolay elde edilebilmeleri ve fiyat bakımından düşük maliyetli olmaları açısından Çok-Kipli Lazer Diyotlar (ÇKLD) mevcut lazer kaynaklarına alternatif olarak kullanılabilirler.

Genelde iki araştırma grubu tarafından aktif olarak kullanılan ÇKLD için hem sürücü hem de soğutucu devre sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu sistemler çok pahalı olmamalarının yanında daha ucuz olarak üretilebilecek olmaları önerilen

spektroskopi sistemini alternatifi olduğu THz-ZDS sistemlerine nazaran tercih edilmesini sağlamaktadır. KLD'nin çok çabuk ısınmasını önlemek için alüminyum veya prinçten yapılmış boyutu büyük soğutucular ile akım kontrolünün kolayca sağlanabildiği basit sürücü devreleri ucuzluk ve verim bakımından alternatif birimlerin tercih edilmesiyle daha ucuz bir spektroskopi sistemi oluşturulacaktır.

Malzeme karakterizasyonunda kullanılacak bir spektroskopi sistemindeki ışığın izlediği toplam yolun kısa olması gerekliliğinin yanında KLD-ZDS sistemlerinden üretilen THz sinyallerinin THz-ZDS sistemlerine göre zayıf olması lazer kaynağı ve foto iletken antenler arasındaki mesafenin azaltılması ile kısmen giderilebilir. Bu aşamada hizalama işlemi, uygun mercekler ile hizalansa da kısa bir mesafeden sonra hizalanması bozulan KLD'nin ve foto iletken antenlerin hemen önüne uygun aparatlar konumlandırılarak hizalama işlemi daha düzgün şekilde gerçekleştirilebilir.

1.3. ÇALIşMANIN AMACI

Yapılan çalışmada malzeme karakterizasyonunda kullanılan iki farklı ölçüm metodunun karşılaştırılması ve mikrodalga ölçüm metodunun THz frekans bölgesinde uygulanabilirliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Özellikle Serbest Ortam lm (SO) metodu ile yapılan ölçümler, optimize edilip geliştirilen teknikler ile elde edilen başarılar gösterilmiştir.

Optik KLD-ZDS sistemi için ticari olarak temin edilebilen sürücü ve soğutma birimlerinin yerine laboratuvarında yapılmış alternatifleri kullanılarak yaklaşık aynı kalitede THz sinyalleri üretilerek daha ucuz bir spektroskopi sistemi geliştirilmiştir. Mevcut sistemlerde verilen ışın yollarına nazaran daha kısa bir ışın yolu tercih edilerek hizalanmanın bozulması nlenmiştir.

Mikrodalga SO metodu ile elde edilen verilerin kullanılmasıyla elektriksel geçirgenliğin hesaplandığı NRW tekniği için geliştirilen algoritmaların birçoğu incelenerek en iyi sonuç değerini veren yöntem, Newton-Raphson tekniği ile karşılaştırılmıştır. Newton-Raphson tekniğinin başlangıç değer problemine bir çözüm nerisi sunularak tekniğin dezavantajları hesaplama sürecinde ortadan kaldırılmıştır.

Yapay zekâ tabanlı algoritma olan Yapay Sinir Ağlarının (YSA) eğitiminden sonra ham veri olan S-parametrelerin kullanılmasıyla farklı bir frekans bandında farklı bir kalınlığa sahip aynı malzemeler için elektriksel geçirgenlik başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Tahmin edilen elektriksel geçirgenliğin doğruluk yüzdesini artırmak için YSA'nın ağırlıkları Yapay Arı Koloni (YAK) algoritması ile optimize edilerek ölçüm değerine %99,5 oranının üzerinde benzeyen veriler elde edilmiştir.

Malzemelerin önceden verilen değerler doğrultusunda hangi gruba ait olduğunu tespit etmeye yarayan Temel Bileşenler Analizine (TBA) alternatif olarak Kısmi En Küçük Kareler (KEKK) yöntemi kullanılarak farklı kalınlık ve frekans ölçümlerine sahip malzemeler başarılı bir şekilde gruplandırılarak bilinmeyen malzemelerin de kolayca ayrıştırılabileceği gösterilmiştir.

Ortam şartlarından çok fazla etkilenen ölçümlerin gürültü ve hatadan arındırılması için numune ölçümünden önce kalibrasyon işleminin uygulanması gerekir. Buna rağmen hala mevcut olan hata ve gürültülerden kurtulmak için Tekil Spektrum Analizi (TSA) yöntemi önerilerek ölçülen verilerin çok iyi bir şekilde filtrelenmesi sağlanmıştır.

Optik sistemlerde aktif olarak kullanılan parabolik aynanın SOÖ metodunda kullanılmasıyla optik-benzeri SOÖ metodu oluşturulmuş ve 500 GHz'e kadar başarılı bir şekilde ölçüm yapılmıştır. SOÖ ve ÇKLD-ZDS sistemleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak SOÖ metodunun THz frekanslarında etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

1.4. TEZİN ANA HATLARI

Sunulan tez çalışması toplam dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, konu hakkında kısaca bilgi verilmiş ve literatür taraması farklı metotların dönüşüm yöntemlerinin farklılığından dolayı iki kısımda incelenmiştir. Geliştirilme aşamasında olan ÇKLD-ZDS sisteminin THz sinyali üretiminde elde ettiği başarı aşamalı olarak verilirken daha klasik olan SOÖ metodu ise özet halinde sunulmuştur.

Ayrıca bu bölümde çalışmanın amacından bahsedilip elde edilen başarılarla kısaca değinilmiştir.

İkinci bölümde, THz frekans bölgesi tanıtılmış ve bu frekans bölgesinde yapılan malzeme karakterizasyonu hakkında bilgi verilmiştir. ZDS sistemlerinin temel mantığı verilerek THz sinyalinin nasıl üretildiğinden ve ÇKLD' nin sisteme eklenmesinden bahsedilmiştir. Yüksek doğrulukta sonuç elde etmenin kriterlerinin yanı sıra problemlere sunulan öneriler ve bunlardan bir kısmının gerçekleştirilme durumlarına kısaca değinilmiştir. Yukarı dönüşüm yöntemi olan SOÖ metodu hakkında detaylı bilgi verilmiş ve bu metot ile malzeme karakterizasyonunun gerçekleştirilmesi anlatılmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan tekniklerden bahsedilerek belirlenen amaçlar doğrultusunda oluşturulan algoritmaları verilmiştir.

Üçüncü bölümde, ölçümü yapılan malzemeler kısaca tanıtıldıktan sonra başlangıç değer problemine yönelik çözüm ile geliştirilen Newton-Raphson tekniği, klasik NRW tekniği ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapay zekâ modellerinin elektriksel geçirgenliğin tahmininde göstermiş olduğu başarılı performansları verilmiştir. Optik elemanların kullanımı ile elde edilen optik-banzeri SOÖ metodu ve ÇKLD-ZDS sistemi karşılaştırılarak mikrodalga ölçüm sistemlerinin THz frekans bölgesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Dördüncü bölümde, elde edilen başarılı sonuçlar yorumlanmış ve yapılan katkılar bir arada sunulmuştur. Gelecek çalışmalara yön vermesi açısından bazı önerilerde bulunulmuştur. Önerilen mikrodalga ve optik sistemler için ayrı ayrı ifade edilmiştir.

BÖLÜM 2

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak THz frekans bölgesi tanıtılarak çalışmanın temel amacı olan malzeme karakterizasyonunun anlaşılması amaçlanmaktadır. Aşağı Frekans Dönüşüm (AFD) yöntemi olarak adlandırılan THz-ZDS ve geliştirilme aşamasında olan ÇKLD-ZDS sistemlerinin THz sinyal üretiminde kullanılmalarına değinilecektir. Bir başka yöntem olan ve Yukarı Frekans Dönüşüm (YFD) yöntemi olarak bilinen SOÖ metodunun özelliklerinden ve işlem basamaklarından bahsedilecektir. SOÖ ölçüm metodunda sıklıkla kullanılan kalibrasyon tekniğinin modellenmesi yapılarak avantajlarından bahsedilecektir. Dielektrik malzemelerin sahip olduğu özelliklerin hesaplanmasında kullanılan ve optimize edilen tekniklerden bahsedilecektir.

2.1. TERAHERTZ FREKANS BÖLGESİ

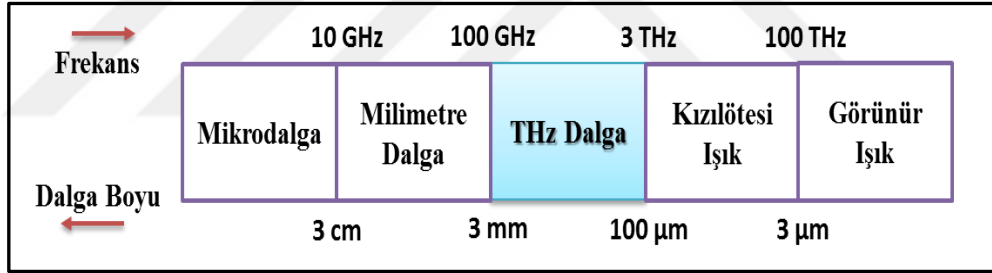
Canlı ve cansız bütün varlıklar mutlak sıcaklıkları sıfır olmadıkça moleküler hareketlilikten dolayı etraflarına ısı verirler. Bu ısı aslında THz ışımadır. THz ışımının varlığı ilk defa 1896 yılında keşfedilmiştir. 1923 yılında Nichols ve Tear, THz aralığındaki ışıma ile ilgili çalışmalarını tamamladıklarında spektrumdaki bu aralığa THz bölgesi adını vermişlerdir. THz bölgesini anlamak için bu çalışmadan önce de birçok çalışmalar yapılmıştır. Örneğin 1900 yılların başlarında Nichols'un çalışmalarına katkı sağlayacak deneyler yapılmıştır [85,86].

Gelişen teknoloji ve araştırma olanaklarının artması ile THz ışınlarının avantajlarından yararlanılarak THz teknolojiye sahip ürünlerin yakın bir gelecekte yaygın olarak kullanılması mümkün görülmektedir. THz dalgalar, elektromanyetik spektrumdaki diğer bölümlerde bulunmayan bazı malzemelerden geçebilme veya yüzde yüze yakın yansiyabilme, X-ışınlarına nazaran zararsız olması ve farklı

malzemeler arasında ayırım yeteneğinin olması gibi benzersiz özelliklere sahiptir. Bu özelliklere sahip THz dalgaları sayesinde havaalanı güvenliği, tehlikeli maddelerin tanımlanması, tıbbi görüntüleme ve gıda endüstrisinde kalite kontrolü vb. konularda yeni avantajlar sağlanacaktır [86].

2.1.1. Terahertz Dalgaları

100 GHz = 1×10^{11} Hz ile 3 THz = 3×10^{12} Hz frekans aralığındaki THz bölgesi alt-mm, T-ışınlar, Terahertz dalga gibi farklı şekillerde adlandırılmaktadır. Elektromanyetik spektrumda mikrodalga ile kızılötesi bölgeler arasında yer alır. 1 THz frekans noktasındaki dalganın özellikleri şöyle sıralanabilir: Enerjisi 4,1 meV, sıcaklığı 47,6 °K, dalga boyu 300 μ m (0,3 mm), atım süresi 1 piko saniye (ps) ve dalga sayısı 33 cm^{-1} dir [87,88]. THz frekans bölgesinin sınırları Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. THz elektromanyetik dalga spektrum aralığı.

THz üretim ve algılama sistemleri, elektronik ve optik tekniklerin birleşimine ihtiyaç duymaktadır. THz frekans bölgesi birçok benzersiz özelliklere sahip olduğu için bu birleşim zordur. THz ışımının malzemelerden geçebilmesi ve farklı malzemeler arasında ayırım yeteneğinin olması dikkat çekici bir yönüdür. THz dalga, radyo dalgaları gibi kâğıt, elbise ve her türlü beton tabaka içinden geçebilirken su tarafından emilir ve metalden geri yansır. Ayrıca THz dalga, bir malzemenin geçerken o malzemenin tanımlanmasına yardımcı olmak için spektral parmak izi bırakır [85,89].

2.1.2. Mikro Ve Milimetre Dalgalar

Mikrodalga ışımanın sahip olduğu bant aralığı 300 MHz'den (100 cm) 300 GHz'e (1 mm) kadar tanımlanmakla birlikte THz frekans bölgesi varlığının ortaya çıkmasından sonra elektromanyetik spektrumda dalga boyunun 1 cm'den kısa olduğu frekans bölgesine (30-300 GHz) milimetre dalga frekans bölgesi ismi verilmektedir [90]. Birçok çalışmada ise 100 GHz in (3 mm) üstü THz frekans bölgesi olarak geçmektedir [87]. Mikro dalga frekans bölgesi de sahip oldukları özelliklere göre kendi aralarında L (1-2 GHz), S (2-4 GHz), C (4-8 GHz), X (8-12 GHz) ve K (12-40 GHz) bant grupları şeklinde sınıflandırılmaktadır [91].

Mikro ve milimetre dalgalar, doğal atmosfer ortamında farklı dalga boyları için farklı oranlarda zayıflamaya uğrarlar. Bu özellik, ilgili frekans aralığındaki sinyalleri belirli uygulamalar için çok yararlı kılmaktadır. Milimetre dalganın atmosferik zayıflamasına doğal ortamda bulunan gaz ve bileşenleri neden olmaktadır. Atmosferik zayıflama karakteristiği, nem ve sisin çeşitli seviyeleri altında 10 GHz ve 1 THz frekans bandı aralığında meydana gelmektedir [90,92]. Mikrodalga ve milimetre dalgaların farklı özelliklerinden istifade edilerek iletişim, görüntüleme, güvenlik, radar ve atmosferik algılama gibi uygulama alanlarında kullanılmaları mümkündür [93].

2.2. MALZEME KARAKTERİZASYONU

Malzeme karakterizasyonu gıda mühendisliği, tıbbi tedavi, biyomühendislik, inşaat sektörü, haberleşme, iletişim ve askeri çalışmalarda önemli bir rol oynamaktadır [26,61,94]. Çünkü dielektrik özellikler, kimyasal konsantrasyon, biyo içerik, madde yoğunluğu, nem içeriği, gerilme-gerinim ilişkisi gibi özelliklerin belirlenmesinde kullanılabilir [61]. Bu alanlarda uygulama yapılırken malzemenin üretim, işleme ve yönetim aşamalarında gerçek zamanlı izleme ve kontrol yapılmasına imkân verecek temassız ve tahribatsız metotlar için uygun aygıtlara ihtiyaç vardır [25,62,94]. Çünkü araştırmacılar, pahalı olan deneme-yanılma tahmin çalışmasını kullanmak yerine ürün dizaynında mikrodalga performans ve optimizasyonuna ihtiyaç duyar [31].

Ayrıca, haberleşme sistemlerini geliştirmek için duvar, yer ve anten kaportası gibi yayılma ortamlarının dielektrik özelliklerini bilmek gerekir [38].

2.2.1. Malzemenin Dielektrik Özellikleri

Bir malzemenin dielektrik özellikleri, o malzemenin diğer özellikleri ile bağlantılıdır [61]. Mikrodalga, milimetre dalga ve THz frekanslar için ortamdaki nem, madde yoğunluğu, maddenin yapısı, su miktarı, gözenekli yapı, sıcaklık ve frekans malzemenin dielektrik özelliklerini değiştirebilmektedir [95,96]. Bunlara ek olarak malzemenin kalınlığı, kimyasal bileşeni ve özellikle kalıcı dipol momenti de değişime etki etmektedir. Ayrıca, çevresel şartlar göz önüne alındığında elektromanyetik girişimlerin etkileri de hesaba katılmaktadır [97].

Dışardan bir elektrik alan uygulandığında enerjiyi depo edebilen malzeme, dielektrik (yalıtkan) malzeme olarak adlandırılır. Dielektrik malzemelerde elektrik alan (E) ve elektrik akı yoğunluğu (D) arasındaki ilişki basit bir formül olan $D = \epsilon E$ ile gösterilmektedir. ϵ , dielektrik malzemenin elektriksel geçirgenliğini ifade eder ve birimi F/m dir. Yukarıda belirtilen ifade, lineer ve izotropik malzemelere uygulanır [98]. Bu bağlamda dielektrik özellikler, malzemelerdeki elektrik alana bağlı olarak polarizasyonun bir ölçümü şeklinde ifade edilir [30]. Yani, malzemelerin elektriksel geçirgenliği, malzemenin elektrik sinyallerine verdiği tepkiye göre değişir [99].

Malzeme ölçüm tekniğinden bağımsız bir iç özellik olan elektriksel geçirgenlik, elektrik mühendisliğinde kullanılan önemli bir malzeme karakterizasyonu olarak kabul edilir [100]. Malzemenin elektriksel özelliklerinden dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı yalıtkan ortamdaki elektromanyetik enerjinin ilerleyişinde önemli bir rol oynamaktadır. Yani, dielektrik sabiti, hem elektromanyetik dalganın ilerleyişinin hızını hem de malzemede ne kadar enerji depolandığını belirler.

Karmaşık bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) ve karmaşık bağıl manyetik geçirgenlik sabiti (μ_r) bir malzemenin dielektrik özelliklerini oluşturmaktadır. Bu ifadeler $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ve $\mu = \mu_0 \mu_r$ şeklinde gösterilir. Burada ifade edilen $\epsilon_0 = 8.52 \times 10^{-12}$ (F/m) boşluğun

dielektrik sabitini ve $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$ boşluğun manyetik geçirgenliğini göstermektedir [31].

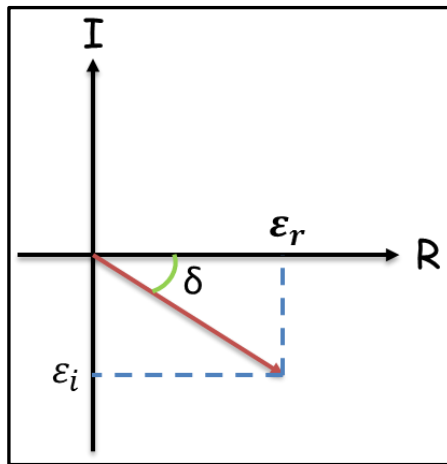
Bir malzemeye elektromanyetik dalga uygulandığında malzemenin etkileşimi, bağlı dielektrik ve manyetik geçirgenlik şeklinde iki temel fonksiyon ile ifade edilir. Bağlı elektriksel geçirgenlik reel ve sanal olmak üzere denklem 2.1'de gösterildiği gibi iki kısımdan oluşur [25]:

$$\varepsilon = \varepsilon_r - j\varepsilon_i \quad (2.1)$$

Burada ε_r ile ifade edilen reel kısım, malzemede depolanan elektrik alan enerjisinin miktarını göstermektedir. ε_i ise sanal kısımdır ve malzemenin elektrik alan kaybının ölçümüdür. Yukarıdaki 2.1 numaralı denklemde, $j = -1$ dir. Buradan hareketle sanal kısmın ($\varepsilon_i/\varepsilon''$) reel kısma ($\varepsilon_r/\varepsilon'$) oranı kayıp tanjant olarak bilinir,

$$\tan(\delta) = \varepsilon_i/\varepsilon_r \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Ayrıca sanal kısım, elektriksel iletkenlik olan σ ile de bağıntılıdır ve $\varepsilon_i = \sigma/\varepsilon_0\omega$ şeklinde gösterilir. Burada ω , açısal frekanstır. Reel ve imajiner kısımların ortogonal eksenlerde gösterimi Şekil 2.2'de ifade edildiği gibidir.

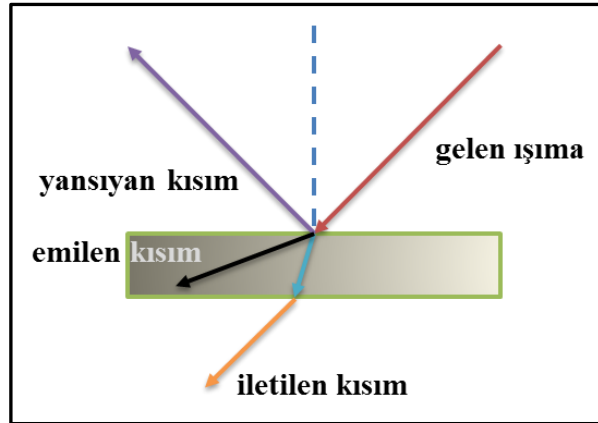


Şekil 2.2. Karmaşık dielektriksel geçirgenliğin gösterimi.

2.2.2. Elektromanyetik Dalganın Malzeme İçerisinde İlerleyişi

Elektromanyetik dalganın bir malzeme içerisinde ilerleyişi o malzemenin dielektriksel ve manyetik geçirgenliklerine bağlıdır. Dalganın malzeme içerisindeki empedansı (Z), serbest ortam empedansından (Z_0) düşük olduğu zaman empedans uyumsuzluğu ortaya çıkar. Dalganın malzeme içerisinde ilerleyişi esnasında enerjinin bir miktarı malzeme boyunca iletilirken bir kısmı da yansıtılır. Bir başka ifade ile malzeme ve dalga etkileşimi üç şekilde gerçekleşir: Yansıma, soğurma ve iletim [31]. Enerji değişim kanunundan dolayı bir sistemin giriş enerjisi ile çıkış enerjisi eşit olmalıdır. Bu yüzden yansıma, iletim ve emilme enerjilerinin toplamı dalganın ilk baştaki enerjisinin toplamına eşittir.

Malzeme içerisindeki dalganın hızı (v_m), ışık hızından (c) düşüktür. Bu durumda frekans (f) sabit kalacağından malzeme içerisindeki dalga boyu (λ_m), serbest ortam dalga boyundan (λ_0) daha kısadır. Bir malzemeye gelen dalganın, malzeme içerisinde geçişi ve ilerleyişi Şekil 2.3'te gösterildiği gibidir [33]. Buradaki gösterim sadece bir katmanlı malzemeler için geçerlidir.



Şekil 2.3. Elektromanyetik dalganın malzeme ile etkileşimi.

Elektromanyetik alanlarda bir TEM (transverse electromagnetic) düzlem dalga $+z$ yönündeki ilerleyiş fazör ifadesi $E(z, w) = E_0 e^{-\gamma z}$ şeklinde gösterilir. Burada açılal (radyal) frekans $\omega = 2\pi f$ dir. γ ise dalganın ilerleyişini ifade eder [27].

2.3. ZAMANA DAYALI THz SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ

Spektroskopi sistemleri, yarı iletken ve dökme malzeme yapılarının analiz edilip anlaşılması için kullanılmaktadır. Sistem, elektromanyetik bölgeye göre malzemenin gösterdiği tepkiyi belirler. THz-ZDS sistemi, zaman bölgesinde THz ışımının üretim ve algılaması şeklinde basitçe ifade edilebilir. Böyle sistemler iki optik kola sahiptir. Bu iki optik kol aynı deney düzeneğinde bulunan üretim ve algılama kollarıdır. Işın kaynağı olarak ultra hızlı lazerler kullanılır ve gelen ışın iki kola ayrılır ve bunlardan birisi THz ışımayı üretir. İnterferometrik adımlar ile algılama ışını taranırken THz dalga formu zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilir. THz dalga formunun ilk ölçümü referans bilgi olarak kullanılır. THz-ZDS ile elde edilen ölçümler, Fourier Dönüşümü (FD) altında incelendiğinde numune hakkında spektroskopik bilgiye sahip olunur. Genelde ana THz pikin zaman kayması kırılım indisi ve genlikteki değişim de numunenin güç soğurması ile ilgilidir. Bu durum, THz elektrik alanının hem genlik hem de faz ölçümlerinin doğrudan sonucudur [101].

THz spektroskopi sistemini kullanarak algılanan THz sinyalinin elektrik alan genliğinin tespit edilmesi gibi ışınma fazını da ölçmek mümkündür. Kızıl ötesi bölgedeki diğer spektroskopik teknikler ile karşılaştırıldığında daha iyi bir sinyal-gürültü oranını elde etmek için THz-ZDS sistemler için detektör soğutucuya ihtiyaç yoktur. Bunun sebebi THz atımlarının pik yoğunluğu termal arka plan gürültü seviyesinden yüksek olmasıdır [102]. Işın kaynağı olarak kullanılan Kip-kilitli femto saniye lazerlerin geliştirilmesi ile THz spektroskopi sistemlerinin önemi artmış ve elektromanyetik spektrumun THz bölgesi keşfedilmeye başlanmıştır [103].

2.3.1. THz Sinyalinin Üretimi Ve Algılanması

Atımlı (ultra hızlı) lazer, belirli tekrarlama oranlarında 10 femto saniyeden 100 piko saniyelere kadar atımlar üreten bir lazer çeşididir [101]. Genel olarak bu lazerler, özellikle THz-ZDS için THz üretim işlemlerinde kullanılır. Bu işlemde ultra hızlı lazerlerin kullanılma sebebi çok yüksek pik güçlerini elde etmek ve yapılan işlem hakkında mümkün olduğunca çabuk bilgi sahibi olmaktır [104]. Kip-kilitli Ti:Safir lazerler, pompalı diyot lazerler, kip-kilitli diyot lazerler ve kip-kilitli fiber lazerler

ultra hızlı lazer çeşitlerindedir. Çoğunlukla kip-kilitli lazerler, ultra kısa atımlar elde etmek için kullanılırlar [105]. 1 THz üretebilmek için 1 piko saniye (ps) atım üretilmelidir. Bu ps atım uzunluğunun elde edilebilmesi için de lazer kaynağı tarafından üretilen atım süresi femto saniye ($< 200 fs$) seviyelerinde olmalıdır. Bu lazer kaynağı, güçlü ve fazının sabit olması gerekmektedir. Kaynaktaki kararlılığa bağlı olarak faz farkı değişebilir [104].

Optik düzeltme, ani akım, yük aktarımı ve fotoiletken anten metotlar bilinen THz üretim metotlarıdır. İlk üç metot, düzeltme olarak adlandırılan aynı fiziksel işlem temeline sahiptir [106]. Fotoiletken anten metodu, görülebilir/yakın kızılötesi atımlarını THz ışımaya çevirebildikleri için THz-ZDS için en çok tercih edilen metottur. Fotoiletken metot kullanımında antenin rezonans karakteristiğinden ve algılama antenindeki üretilen taşıyıcıların (elektronlar ve delikler) sonlu yaşam ömürlerinden dolayı THz üretim işleminin yavaş gerçekleşmesi gibi bir kısıt vardır [107].

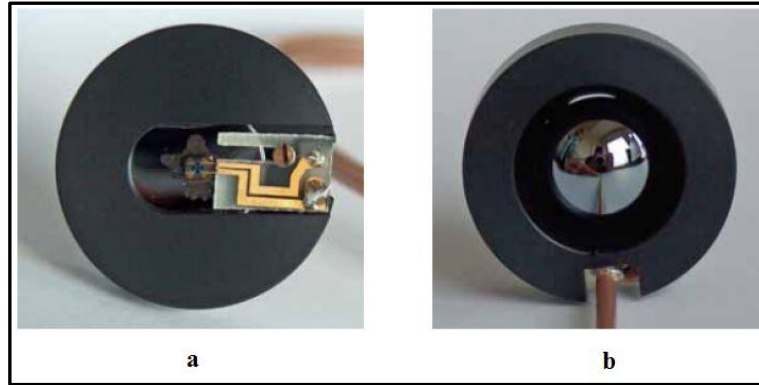
Fotoiletken anten üretim metodunda bir ultra kısa lazer atımı, antenin fotoiletken dipol boşluğunu aydınlatır. Eğer lazer atımının enerjisi yarıiletkenin bant aralığı enerjisinden daha büyük ise yarıiletken, enerjiyi soğurur. Her soğurulmuş foton, değerlik bandında bir delik oluştururken iletim bandında bir elektron üretir. Uyarılmış foto taşıyıcılar fotoiletken antene uygulanan polarizasyon gerilimi yardımıyla geçici fotoakım oluşturmak için hızlandırılır. Bu üretilen zamanla değişen geçici akım piko saniye altı THz ışımaya yayılır [108].

Terahertz üretiminin yanı sıra THz algılama işlemi de gelişen THz teknolojisi için çok önemlidir. Fotoiletken ve elektro optik metot THz algılama yöntemlerinde kullanılan iki yaygın metottur. Fotoiletken algılama yöntemi, yarıiletken malzemelerin özelliklerinden dolayı daha iyi sinyal-gürültü oranı ve duyarlılığa sahip olduğundan 3 THz den küçük frekanslarda daha verimlidir [109]. Bu algılama metodunda lazer atımı yarıiletken malzemeyi uyararak için algılayıcı fotoiletken antenin dipol boşluğuna odaklanır. Uyarma işlemi ile elektron ve delikler oluşturulur. THz ışımaya tarafından uyarılmış foto taşıyıcılar hızlandırılır. Bu hızlandırılmış

taşıyıcılar geçici fotoakım oluştururlar ve kilitlemeli yükselteç zamanla değişen geçici akımı algılar [108].

2.3.2. Foto İletken Anten İle THz Üretimi

Ultra hızlı lazerler ile üretilen optik atımın bütün enerjisi kısa bir süre periyodunda odaklandığından bu özellik, atımın yoğunluğunu oldukça yüksek hale getirir. Böylece bu kısa ve yüksek yoğunluklu atımlar malzemelerde optik özelliklerinin değişimine etki eder. FIA, ışık ile etkileşimi sonucunda elektriksel iletkenliğin artış gösterdiği yarı iletken tabanlı bir cihazdır. Fotoiletken antenler, düşük sıcaklıkta ince galyum arsenit (LT-GaAs) ve diğer yüzüne yapıştırılmış silikon mercekten oluşur. İnce tabakanın (metal elektrot) LT-GaAs'den yapılma sebebi ise büyük bir direnç, taşıyıcı hareketliliği ve çok kısa taşıyıcı ömrünün ($< 1 ps$) olmasıdır. Optik atımların birbiri arasındaki etkileşimi sonucunda femto saniye zaman aralığındaki yarıiletken malzeme THz atımının üretilip algılanmasını sağlar [108]. Şekil 2.4'te foto iletken antene ait lazerin odaklandığı çip (a) ve silikon merceğin (b) olduğu taraflar gösterilmiştir.

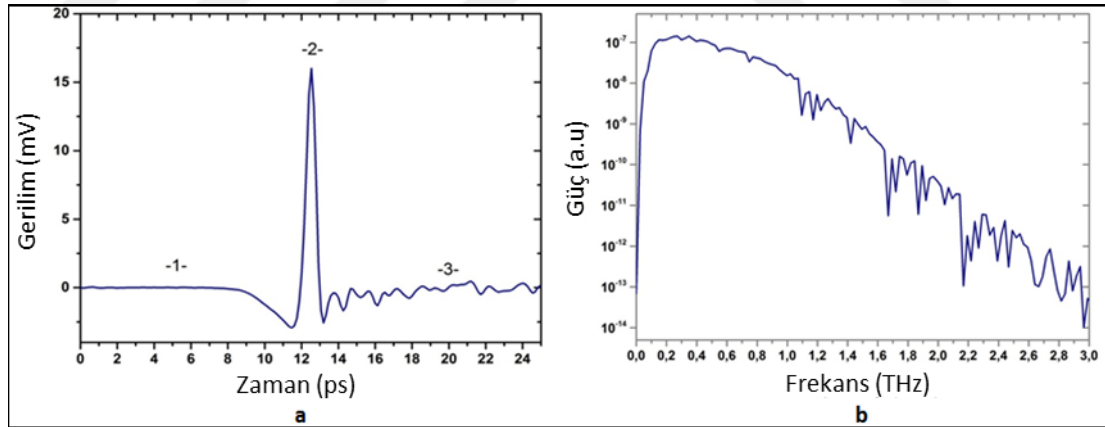


Şekil 2.4. Foto iletken antenin ön ve arka taraftan görünüşü.

THz ışımının elde edilmesi için yapılan işlem, yarıiletkende optik bir uyarmanın gerçekleştirilip malzemenin iletkenliğinin değiştirilmesidir. Yani foton enerjisinin yarıiletken malzemenin bant aralığı enerjisine eşit veya çok büyük olduğu fotoiletken boşluğun femto saniye lazer atımı tarafından aydınlatılmasıdır [110].

Yüksek taşıyıcı hareketliliği ve büyük direnç değeri, fotoiletken antenden yayılan yüksek foton salınımı için iki önemli parametredir. Bir diğer önemli parametre olan kısa yaşam süresi, algılayıcı fotoiletken antenin gürültüsünü azaltmak için gereklidir. Silikon mercek, algılama kolunda THz dalgaların oluşturulma verimini artırmak ve üretim kolunda daha pürüzsüz ve güçlü THz dalga formu oluşturmak için kullanılır. Ayrıca silikon mercek, salınan atımın ıraksamasını azaltır. Anten yapılarının geometrisi de FİA'nın kalitesini etkilemektedir. Bu sebeple birçok anten tasarımı (kelebek, çift kutup, sarmal) THz üretimini iyileştirmek için geliştirilmiştir [107,111].

Kilitlemeli yükselteçten alınan gerilim/akım değerleri Labview programı yardımı ile kaydedilir ve THz dalga profili olarak zamana göre çizdirilir. Kilitlemeli yükselteçten derlenen verilerin belirli zaman aralıklarında çizdirilen grafiği (a) ve hesaplanan güç spektrumu (b) Şekil 2.5'te gösterildiği gibidir. Güç spektrumunda görülen salınımların sebebi ortamda bulunan nemdir. Nem oranı THz sistemlerinin çalışma performansını etkilediği için oranının azaltılması gerekir [86].



Şekil 2.5. THz atımı ve güç spektrumu.

2 numara ile gösterilen yer ana THz atımına karşılık gelir. 1 numara ile gösterilen yer, gürültü seviyesini gösterir ve THz atımı henüz gelmediğinden gürültünün hesaplanmasında kullanılır. 3 numaralı bölge ise THz alanının soğrulmasından dolayı elektrik alandaki salınımları gösterir. Mevcut olan salınımların yok edilebilmesi için havadaki nem oranının azaltılması gerekmektedir. Burada THz sisteminin bulunduğu

ortamın içerisi kuru hava ile temizlendikten sonra azot (N) gazı ile nemin dşürölmesi sağlanır.

2.3.3. Çok-Kipli Lazer Diyotlar

Malzeme karakterizasyonu ve grüntölleme işlemlerinde sıkla kullanılan ZDS sistemlerini maliyet bakımından ucuz, boyut bakımında kk hale getirmek için alternatif işın kaynağı olarak çok-Kipli Lazer Diyotlar (KLD) nerilmektedir [13]. KLD ile elde edilen sinyallerin geleneksel ZDS sistemleri ile elde edilen sinyallere benzediği gösterilmiştir. KLD'nin boylamasına kiplerini karıştırıp st üste bindirdikten sonra 0,1-1 THz frekans aralığında THz atımı retilenmektedir [1,13].

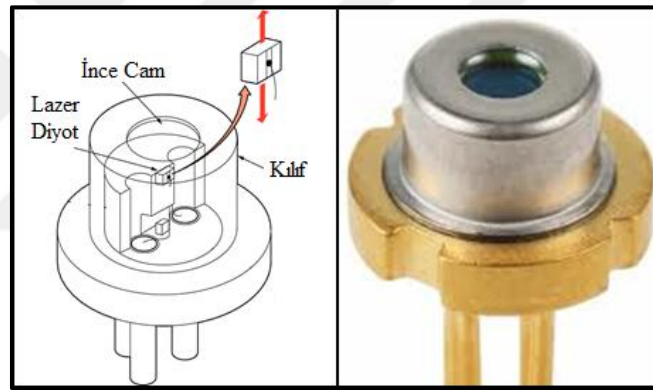
Lazer diyotlarda gerçekleşen işmanın prensibi kısaca şoyledir: Elektronlar, yüksek enerji seviyesinden daha kararlı olan dşuk enerjili seviyeye hızlı bir şekilde geçiş yaparlar. Bu olay meydana geldiğinde ortaya çıkan enerji işık formunda yayılır. Bu işlemin gerçekleşmesi için dışarıdan bir enerji girişinin olması gerekir ki bu olay uyarılmış yayılma olarak adlandırılır. Uyarılmış yayılmanın gerçekleşme basamakları şoyledir [112,113]:

1. Atom (ya da molekül veya iyon) içerisindeki elektron, temel durum olarak adlandırılan dşuk enerjili kararlı duruma doğru hareket başlar.
2. Enerji, dışarıdan temin edilir ve elektronu uyarılmış (yüksek enerji) duruma giren atom yapısı tarafından soğurulur.
3. Foton, elektronun kararlı olması için ihtiyaç duyduğu enerji miktarına ulaşır.
4. Enerji seviyesine ulaşan foton, uyarılmış elektron ile rezonansa girer.

Sonuç olarak uyarılmış elektron, fotonu uyarılmış durumda bırakır ve foton formunda enerji farkını bırakarak daha kararlı duruma geçer. Burada en kritik nokta, yeni salınan fotonun sahip olduğu dalga boyunun faz ve yn karakteristiklerinin uyarılmış foton ile aynı olmasıdır [113]. KLD'nin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1. Lazer diyotlar bir çip, çipi çevreleyen soğutucu, en dış koruyucu kap ve üç tane bacadan oluştuğu için küçüktür.
2. Diğer lazerlerde ihtiyaç duyulan güç kaynağına nazaran daha düşük elektriksel güce sahip olan güç kaynağı ile sürülebilir.
3. Küçük değerlerde elektrik akımları ile uyarılabilir.
4. Uygulanan akım ile doğrudan modülasyon imkânı vardır.
5. Diğer lazerlere göre çok ucuzdur.

Yukarıda belirtilen avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları vardır. Sıcaklığa oldukça duyarlıdır ve yaydıkları ışının yayılma açısı çok geniştir, yani yayılan ışın hizalanmış bir şekilde değildir [114]. Şekil 2.6'da ÇKLD'nin iç yapısı (sol) ve dış görünüşü (sağ) gösterilmektedir.



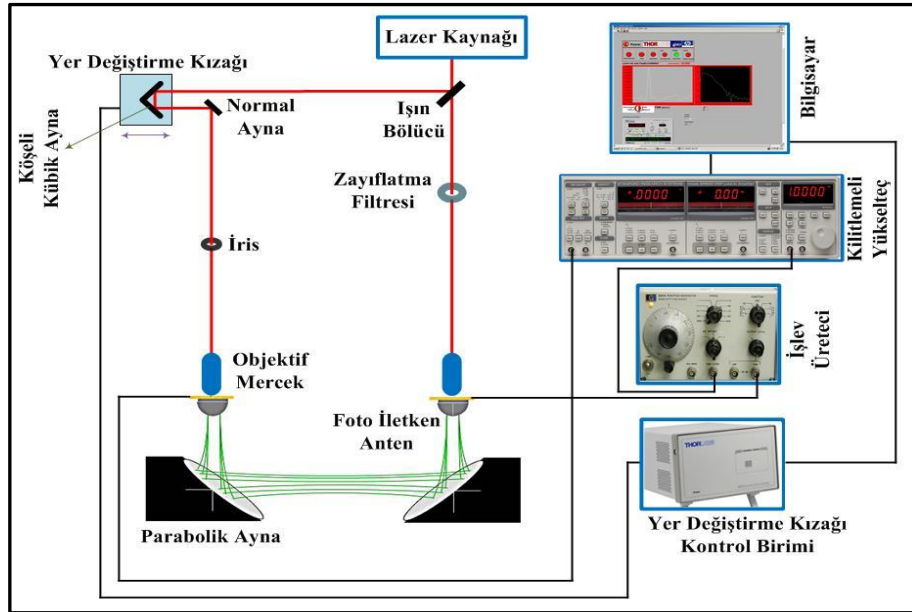
Şekil 2.6. Çok-kipli lazer diyotun iç yapısı ve dış görünüşü.

Lazer kaynağı olarak tercih edilen ÇKLD'nin daha uzun süre kullanılabilmesi için sürücü devresi, soğutucu, omik direnç tepkisi vb. hususlara dikkat etmek gerekmektedir. Lazer Diyot, uygun ve kararlı bir devre ile sürüldüğünde on binlerce saat çalışabilmektedir. ÇKLD'nin başlıca bozulma sebepleri ısıl gerilme, değişken akım ve kötü kullanımdır. Işımanın gerçekleştiği aktif bölgede ısı ve yüzeydeki ışın enerjisi artarken yüzey deforme olmaktadır. Belli bir süre sonra lazer diyot ışımaya yapmaz. Frekans kararlılığını etkileyen ısıl gerilim etkisini ortadan kaldırmak için çok iyi bir soğutucu kullanılmalıdır [115].

Lazer diyotun ışına yapması için verilen akım değeri artarken lazer diyotun jonksiyon ısısı artar ve böylece aktif bölgedeki sıcaklık arttığı için bant aralığı enerjisi azalır. Akım değerindeki ani değişimler optik çıkış gücünde anlık atlamalara sebep olur. Bu durum, lazer diyotun ömrünü azaltır. Çok turlu direnç yardımı ile akım değeri değişimi hızlı bir şekilde yapılmamalı. Aktif bölgede aşırı ısınmanın kaynağı olan Elektrostatik Deşarj (ESD), belki de lazer diyotun bozulmasına sebep olan en önemli etkindir. Bir insanın çıplak el ile dokunuşu veya bir havya ucu değmesi ESD oluşturabilir. Eğer sürücü devresi çalışıyorsa ESD, anlık olarak yüksek pikli bir lazer ışığına neden olur ve lazer diyot bir daha ışına yapmaz [115].

2.3.4. ÇKLD İle Zamana Dayalı Spektroskopi Sistemi

ÇKLD THz spektroskopi sisteminde Foto İletken Antenler (FİA) elektriksel değerleri ise pasif bileşendir. Öncelikle pasif bileşenler daha sonra elektriksel bileşenler yerleştirilir. Deney düzeneği üretici ve algılayıcı kollarından oluşur. Üretici kolu yayılatma filtresi, objektif merceği, FİA ve parabolik meydana gelir. Algılama kolu ise, köşeli ayna, düz ayna, objektif merceği, FİA, parabolik ayna, yer değiştirme kızıağı ve motorundan oluşur. ÇKLD-ZDS sistemindeki ışın yolları ve sistem elemanları Şekil 2.7’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.7. ÇKLD-ZDS sistemi.

Gelen ve yansıyan ışın demetinin aynı yükseklikte olmasına dikkat edilmelidir. FIA'lar ile birlikte bütün sistem bileşenleri yerleştirilip ışının hizalama işlemi tamamlandıktan sonra antenlerden okunan direnç değerlerinin ölçümü yapılır. Bu işlemle görülebilir lazer ışını altında direnç değerlerinin $k\Omega$ 'lar seviyesine düşmesi sağlanmalıdır.

Geliştirilen ölçüm sistemin çalışma prensibi THz-ZDS sistemine benzerdir. ÇKLD'den çıkan ışın demeti, ışın bölücü yardımı ile ikiye ayrılır. Üretim ve algılama kolları adı verilen iki yolu izleyen ışın objektif mercekle yardımı ile antenlere odaklanır. Antenlerin yaymış oldukları sinyaller ise parabolik aynalar yardımı ile yönlendirilir. Işık ile etkileşim sonucunda elektriksel iletkenliğin artış gösterdiği yarı iletken tabanlı bir cihaz olan Foto İletken Anten, kızıl ötesi ışınları THz'e çevirebilmektedir. Foto iletken antene odaklanan lazer ışın frekansları arasındaki etkileşim ile bir uyarma gerçekleştirilerek taşıyıcılar hızlandırılır. Böylece iletkenlik artar ve işlev üreticiden sağlanan bir ön gerilim yardımı ile fotoakım oluşturulur. Antenin silikon mercekle yönünden yayılan THz sinyali, THz elektrik alanı meydana getirir. Kilitlemeli yükselteç yardımı ile uyarıcı ışık şiddeti ve THz elektrik alanı arasındaki ilişki gecikme zamanının bir fonksiyonu olarak elde edilir. THz atımın elde edilebilmesi için oluşturulan gecikme zamanı mekaniksel olarak yapılır. Labview programı ile kilitlemeli yükselteçten alınan gerilim/akım değerleri kaydedilir ve THz dalga profili olarak zamana göre çizdirilir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde çok düşük enerjili THz elde edildiği görülmektedir. (Enerji yükselirse lineer olmayan etki azalır, ancak bu ÇKLD-ZDS sistemlerinde istenmeyen bir durumdur.) Elde edilecek sinyal, gürültünün en az 25 katı kadar olmalıdır. ÇKLD ile elde edilen THz atımının şiddeti, atımlı sistemde edilen sinyalin şiddetinin yüz binde ya da milyonda biridir [15]. Bu yüzden parabolik aynaların çapları büyük olmalı ve mümkün olduğunca antene yakın bir şekilde konumlandırılmalıdır. Bunun içinde kullanılacak parabolik aynanın odak uzaklığı küçük seçilip yüksek seviyede sinyal elde etmek için katı açısının büyük olmasına dikkat edilmelidir. Aynı zamanda, kullanılan anten ÇKLD – ZDS sistemleri için uygun olmalıdır.

2.4. SERBEST ORTAM ÖLÇÜM METODU

Analiz edilen malzemenin dielektrik özelliklerini tespit etmek için birçok metot mikrodalga frekans bölgesi için geliştirilirken milimetre dalga frekans bölgesi için de kullanılmaktadır. Bu metotlar, sahip oldukları avantaj ve dezavantajları ile malzeme karakterizasyonunda aktif olarak tercih edilmektedir. Bütün malzemelerin geniş bir frekans aralığında ölçümünü yapabilmek sadece bir metot ile mümkün olmadığından talep edilen veya ihtiyaç duyulan parametrelere göre en verimli olanın belirlenmesi gerekir.

Ölçüm teknikleri genel olarak mikrodalga ve milimetre dalga frekans bölgelerinde kullanılan metotlar rezonant ve rezonant olmayan metot şeklinde iki grupta sınıflandırılabilir. Rezonant metot, malzemeleri tek ya da ayrı frekanslarda analiz edebilir. Rezonant olmayan metot ise geniş bir frekans bandında ölçüm yapılmasına müsaade ederek malzemelerin analizini sağlar [25]. Ayrıca farklı bir gruplandırma ile son dönemlerde 1 GHz in üzerindeki frekans bantlarında en çok tercih edilen yöntemleri dalga kılavuzu, koaksiyal prob, rezonant kavite ve serbest ortam ölçüm metodu olarak sıralayabiliriz [28,31].

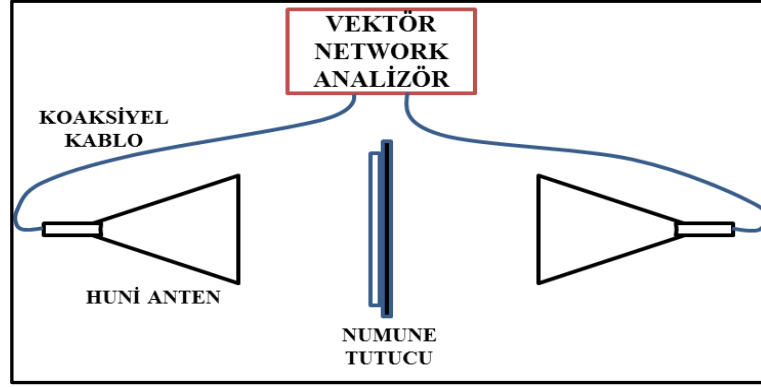
Rezonant olmayan metotlar, elektriksel ve manyetik özellikleri geniş bir frekans aralığı boyunca belirlemek için kullanılır. Rezonant metotlar ise sadece tek bir frekansta hesaplama yapmak için daha uygundur [116]. Mikro/milimetre dalga frekans bölgelerinde yapılan malzeme karakterizasyonu birçok uygulama için önemli olduğundan araştırmacılar dielektrik özelliklerin hesaplanmasına yönelik metotların geliştirilmesi için çalışmalar yapmışlardır [117]. Bir ölçüm metodunda bulunması gereken temel özellikler bakımından yaygın olarak kullanılan metotların karşılaştırılması yapılarak Çizelge 2.1'de sunulmuştur [25,31]. Bu tekniklerin bazıları katı bazıları ise sıvı malzemeler için daha uygundur. Aynı zamanda pahalı ya da ucuzluğunun yanında pratik çözümler için uygulamasının basit olması da ön plana çıkmaktadır [26].

Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan metotların karşılaştırılması.

| | SOÖ | Dalga Kılavuzu | Koaksiyel Prob | Rezonant Kavite |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Dielektrik Özellikler | $\epsilon_r - \mu_r$ | $\epsilon_r - \mu_r$ | ϵ_r | $\epsilon_r - \mu_r$ |
| S-parametresi | $S_{11} - S_{21}$ | $S_{11} - S_{21}$ | S_{11} | $f - Q$ Faktör |
| Frekans Bandı | Geniş | Parçalı | Geniş | Tek |
| Numune Ebatı | Büyük | Orta | Küçük | Küçük |
| Numune Testi | Tahribatsız | Tahribatlı | Tahribatsız | Tahribatlı |
| Numune Hazırlığı | Kolay | Zor | Kolay | Çok Zor |
| Malzeme Formu | Katı-Sıvı-Gaz | Katı | Katı-Sıvı | Katı-Sıvı |
| İzleme | Çok Kolay | Zor | Kolay | Çok Kolay |

Bir ölçüm sisteminde aranması gereken özellikler: Yüksek doğruluk, düşük maliyet, kolay işlem aşamaları ve hızlı ölçüm şeklinde sıralanabilir [99]. SOÖ metodunun sahip olduğu geniş bir frekans bandında ölçüm yapabilme imkanı, çok küçük boyutlu olmamak şartı ile her boyuttaki malzemelerin ölçümünü sağlayabilmesi, tahribatsız ve temassız bir şekilde herhangi bir ön hazırlığa ihtiyaç duymadan numunenin konumlandırılabilmesi ve 0,5 THz'e kadar geniş bir frekans aralığında ölçümleri destekleyebilmesi gibi özelliklerden dolayı en avantajlı ölçüm metodu olarak ortaya çıkmaktadır [3]. Ayrıca yüksek sıcaklık ve zararlı ortamlarda ölçüm performansları iyi olduğu için tercih edilmektedir [25].

Ölçüm için kullanılan aygıtların geliştirilmesi ile mikrodalga ölçüm metotlarının milimetre ve THz dalga frekans bandında kullanımı mümkün hale gelmiştir [3]. Böylece, elektriksel geçirgenliğin geniş bir frekans aralığında doğru bir şekilde ölçülebilmesi SOÖ metodu ile sağlanabilmektedir [118]. Ayrıca SOÖ metodunun iyi bir dinamik kapasiteye ve spektral çözünürlüğe sahip olması diğer metotlara göre daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır [39]. SOÖ metodu, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi Vektör Network Analizöre (VNA) bağlı iki adet anten ve iki anten arasındaki ölçüm yapılacak malzemenin yerleştirildiği numune tutucudan oluşmaktadır [25,62].



Şekil 2.8. Serbest ortma ölçüm metodunun şematik gösterimi.

Sert numune (teflon, cam vb.) için ölçüm alınacaksa quvartz levha kullanmaya gerek yoktur. Çünkü analiz edilecek malzeme numune tutucuya düzgünce yerleştirildiğinde bel verme ihmal edilebilir [33]. VNA, malzemelerin dielektrik özelliklerini hesaplamak için kullanılan S-parametrelerini eş zamanlı olarak ölçen mikrodalga ve milimetre dalga ölçüm sistemlerinin standart bileşenidir [3]. Ölçümler ve kalibrasyon işlemleri VNA aracılığı ile yapılır. Bütün veriler kaydedilerek gerçek zamanlı grafik çizimi gerçekleştirilirken ölçüm yapılan ortamda kaynağın veya serbest yük dağılımının olmadığı kabul edilir.

2.4.1. Serbest Ortam Ölçüm Metodunun Çeşitleri

Bir malzemeye ait dielektrik özelliklerin belirlenmesinde elektromanyetik dalganın malzeme ile farklı açılarda etkileşimini göstermek için farklı kurulum yapısına sahip olan SOÖ metotları ile ölçümler gerçekleştirilmektedir. Belirli mesafedeki karşılıklı iki anten arasına yerleştirilen numune yüzeyinden yansıyan ve geçen sinyallerin toplanması şeklinde yapılan uygulama düzeneği lineer (yansıma-geçiş) ölçüm sistemi olarak adlandırılır [33]. Bu sistemin daha yüksek frekanslarda kullanılabilmesi için optik bileşenlerin eklenmesi ile optik-benzeri SOÖ sistemi geliştirilmiştir [3]. İki antenin aynı konuma yerleştirilmesi ile malzeme yüzeyinden yansıyan sinyallerin toplanması ya da aynı düzende numunenin arkasına metal bir plaka eklenerek ihtiyaç duyulan bilgilerin elde edildiği tek portlu veya iki portlu deney sistemleri de mevcuttur [62,63]. Bunlara ek olarak farklı açılardan ölçüm yapılan ark tipi ölçüm

metodu da bazı çalışmalarda tercih edilmektedir [119]. Bu sistem, değişik açı ile ölçüm yapılması gereken uygulamalar için çok uygundur.

2.4.2. Serbest Ortam Ölçüm Metodunun Özellikleri

SOÖ metodu, kurulum için basit bir deney düzeneğine ihtiyaç duyarken yüksek zaman bölgesi çözümü ile ölçümlerin doğruluğunu geliştirmeye yardım eder [4]. Temassız, tahribatsız, yüksek sıcaklıkta, geniş frekans aralığında, farklı madde formlarında özellikle homojen olmayan maddeler için S-parametre ölçüm imkânı sunarken numune hazırlığına ihtiyaç duymamasından dolayı koaksiyel ve dalga kılavuzu ölçüm metotlarının yerine tercih edilmektedir [28,120]. Buna ek olarak dalga kılavuzu metodunda olduğu gibi numunenin çevresinde sızıntı problemi olmazken numunenin boyutu da sorun teşkil etmez [121]. Ayrıca bu iki sistemde numunenin uygun bir şekilde hazırlanmasına ihtiyaç duyulması işlenebilir olmayan maddelerin ölçüm doğruluğunu sınırlamaktadır [122].

SOÖ metodu ile yapılan ölçümler, numune kenarındaki kırınım etkisinden ve numune yüzeyi doğrultusunda iki anten arasında meydana gelen çoklu yansılardan etkilenmektedir [62,121]. Bir diğer problem ise numune ve antenler arasında hava boşluğunun olmasıdır. Bu yüzden deneysel ölçüm sonuçları teorik modelde olduğu gibi doğru tahmin edilemez [123]. Antenin odaklama derinliğinden ve sadece ince malzemelerin doğru bir şekilde ölçülebilmesinden dolayı kimi zaman dezavantajlıdır [118].

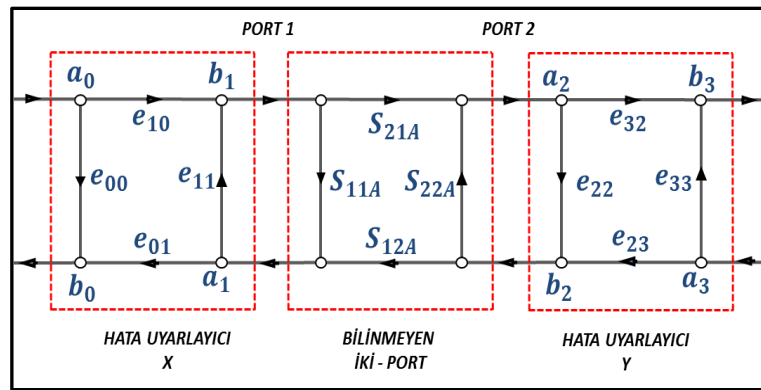
Yüksek doğrulukta ölçüm yapabilmek için kırınım etkisini minimize edecek lensler kullanılarak noktasal odaklama yapılır [118,120]. Işını hizalayıp çapını azaltan lensler sayesinde anten kazancını da artırılabilir [124]. Bu işlemlere ek olarak TRL kalibrasyon ve VNA kapılama tekniği ile ölçümde meydana gelen hatalar azaltılabilir [121]. Numunenin boyutu büyük seçilerek kırınım etkisi azaltılmaya çalışılsa da sert olmayan numunelerdeki bel verme olayından dolayı ölçüm performansı düşebilir [33]. Etkin kalınlık, yüksek doğrulukta sonuç gerektiğinde başka bir soruna sebep olmaktadır. Bu problem, numune üzerine gelen fazın düzlemsel olmamasıdır.

Lensten geçerek hizalanan ışın demetinin en ince olduğu noktanın, numunenin ortasına denk gelmesi için kalınlık etkisi göz önünde bulundurulmalıdır [125].

2.4.3. Ölçüm Sisteminin Kalibrasyonu

Çevresel şartlardan ve ölçüm sistemindeki anten-VNA arası kayıplardan meydana gelen hataları azaltmak için TRL (Thru Reflect Line), TRM (Thru Reflect Match) ve GRL (Gated Reflect Line) gibi kalibrasyon teknikleri uygulanmaktadır. Bu kalibrasyon teknikleri, kullanılan mekanik bileşenlerin kalitesine bağlı olarak mm/alt-THz dalga frekans bölgelerinde farklı performanslar gösterebilir [3]. Kendiliğinden kalibrasyon tekniği olarakta isimlendirilen TRL kalibrasyon tekniği ölçüm sistemlerinde kullanılmasının en önemli sebeplerinden birisi yüksek frekanslar için en iyi seçim olmasıdır [3,33].

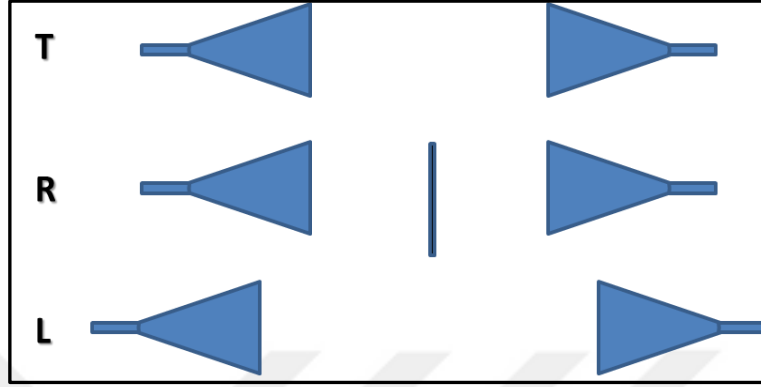
TRL kalibrasyon tekniğinin verimli şekilde uygulanabilmesi için test edilecek malzemenin uygun bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Malzeme, antenlere paralel şekilde aynı düzlemde numune tutucuya yerleştirilmelidir [100]. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi X ve Y, sırasıyla giriş ve çıkış hata kutuları şeklinde varsayılır [126].



Şekil 2.9. TRL kalibrasyon tekniğinin şematik gösterimi.

TRL kalibrasyon tekniği, ilgili karakteristik empedans ile birlikte doğrudan-yansıma-hat standartlarını kullanır [33]. TRL'de temel olarak ihtiyaç duyulan yansıma standart ölçümü ve iki farklı hat ölçümüdür. Uygulanacak aşamalar şu şekilde açıklanabilir: 1. Doğrudan Ölçüm: numune olmadan ölçüm alınır. 2. Yansıma

Ölçümü: metal plaka ile ölçüm alınır. 3. Hat ölçümü: Antenler arası mesafe bir miktar artırılarak ölçüm alınır [100]. Kalibrasyonun uygulama aşamaları Şekil 2.10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.10. SOÖ metodu için TRL kalibrasyon tekniği.

S-parametre şeklinde alınan ölçümler, yazılım yardımı ile T-parametreye dönüştürülür. Çünkü, TRL kalibrasyon tekniği T parametrelerini kullanır ve programlamada kullanmak için de ilk olarak Doğrudan T matrisi, ikinci olarak Hat T matrisi ve son olarak Yansıma T matrisi belirlenir ve aşağıdaki şekilde açıklanabilir [100,126].

$$[T_m] = [T_x][T_A][T_y] \quad (2.3)$$

T_m matrisi, T_x ve T_y hata matrislerini içeren ölçüm verileridir. T_A , test altındaki malzemenin parametreleridir. T-parametreleri, hata ve S-parametreleri arasındaki Şekil 2.9'da gösterildiği gibi ilgili bağıntılar aşağıda verilen denklemler ile açıklanabilir.

$$M = T_m^{LINE} (T_m^{THRU})^{-1} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

M matrisi, Hat ve Doğrusal standart ölçümlerinin elde edilen m_{ij} girişli (S-parametreleri) matris olarak tanımlanmaktadır. Eğer iki (N) porta sahipli bir sistem ise dört tane (N^2) S-parametresi olacaktır. Hata parametreleri olan ve Şekil 2.9'da gösterilen e_{00} ve e_{11} sıfıra yaklaşır. Buna karşılık iletim hata parametreleri olan e_{10}

ve e_{01} bire yaklaşır. Sonuç olarak tipik bir yansımaölçer için ' a ' değeri büyük ve ' b ' değeri küçüktür.

$$e_{00} = b \quad (2.5)$$

Aynı yol takip edildiğinde e_{33} değeri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$e_{33} = -d \quad (2.6)$$

Bu adımlardan sonra e_{11} ve e_{22} değerleri, S_{11}^{Rm} , S_{22}^{Rm} ve S_{11}^{Tm} ölçüm parametreleri ve hesaplanan a , b , c ve d değerleri kullanılarak kolayca elde edilebilir.

$$e_{11} = \sqrt{\left[\left(\frac{b - S_{11}^{Rm}}{a - S_{11}^{Rm}} \right) \left(\frac{c + S_{22}^{Rm}}{d + S_{22}^{Rm}} \right) \left(\frac{b - S_{11}^{Tm}}{a - S_{11}^{Tm}} \right) \right]} \quad (2.7)$$

$$e_{22} = \frac{1}{e_{11}} \left(\frac{b - S_{11}^{Tm}}{a - S_{11}^{Tm}} \right) \quad (2.8)$$

Kalibrasyonu yapılmış S-parametreleri yukarıda verilen dönüşümler yardımı ile aşağıdaki gibi elde edilir.

$$S_{21}^{Tm} = \frac{e_{10}e_{32}}{1 - e_{11}e_{22}} \quad (2.9)$$

Bu süreçte $[T_x]$ ve $[T_y]$ matris çözümlerinin yerine hata parametrelerinin çözümü yapılmıştır.

2.5. KULLANILAN HESAPLAMA TEKNİKLERİ

Malzemelerin elektriksel ve manyetik geçirgenliği saçılma parametreleri olan yansıma ve/veya geçiş (S_{11}, S_{21}) parametrelerinden hesaplanır [98]. Bu işlemi gerçekleştirmek için NRW, NIST, KBA, GA vb. birçok teknik kullanılmaktadır [40,46]. Hesaplama işlemlerinde kullanılan teknikler analitik ve nümerik olmak

üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Yapılan çalışmada tercih edilen NRW (analitik) ve Newton-Raphson (nümerik) hesaplama tekniklerinin ayrıntıları verilmiştir.

Analitik teknikler genelde kesin ve belirgin ifade temellidir. Bununla birlikte bu ifadeler, anlaşılır ve kullanımı kolaydır. Fakat NRW hesaplama tekniğinde numune kalınlığının belirli bir aralığında denklemler kararsız ve hatalı olur. Bu sebeple analitik teknikler evrensel hesaplama çözümleri için kararsızdır [41,123]. Dielektrik malzemelerde numune kalınlığı yarım dalga boyundan büyük olduğu zaman meydana gelen rezonansların üstesinden gelmek (anlık oluşan pikleri ortadan kaldırmak) için yinelemeli (iteratif) hesaplama yöntemi önerilmiştir [83]. Analitik tekniklerin aksine yinelemeli yöntem olan nümerik çözüm teknikleri çok geniş bir algoritma aralığını kapsar. Nümerik hesaplama tekniklerinin en büyük eksikliği ise hesaplama yöntemi başlatılmadan önce hesaplanacak değer için tahmin yapılması gerekmektedir [41,123].

2.5.1. Nicolson-Ross-Weir Tekniği

NRW olarak adlandırılan elektriksel geçirgenlik hesaplama tekniği, Nicolson, Ross ve Weir tarafından geliştirilmiştir [73,74]. Bu teknik, S-parametrelerini kullanarak elektriksel geçirgenlik için ihtiyaç duyulan iletim (T) ve yansıma (Γ) katsayılarını hesaplar. NRW hesaplama tekniği, diğer teknikler arasında nispeten basit olması sebebiyle önemli olmasının yanında diğer tekniklerin de temelini oluşturur [100]. SOÖ metodunda kesme dalga boyu (λ_c) sonsuz olurken kesme frekansı da sıfıra çok yakın olarak ifade edilir [31].

Vektör Network Analizör (VNA) ile ölçülen S-parametreler, NRW tekniği tarafından kullanılarak malzemenin elektriksel geçirgenliği (ϵ_r) aşağıdaki işlem basamakları takip edilerek hesaplanır [127]. Yansıma katsayısı (Γ), 2.10 denklemi ile ifade edilir:

$$\Gamma = X \mp \sqrt{X^2 - 1} \quad (2.10)$$

Doğru kökü bulabilmemiz için $|\Gamma| < 1$ şartının sağlanması gerekir. S-parametresi yerine yerine konularak bilinmeyen X ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (2.11)$$

İletim katsayısı, yansıma katsayısı bulunduğundan sonra

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - \Gamma(S_{11} + S_{21})} \quad (2.12)$$

denklemleri ile elde edilir. Ayrıca özel bir denklem olan ve ters üçgen (büyük lambda) ifadesi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{j}{2\pi d} \ln(T) \right)^2 \quad (2.13)$$

λ_c kesim dalga boyu ve λ_o açık alan dalga boyu ifadeleri kullanılarak

$$\lambda_{og} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_o^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (2.14)$$

Yukarıda verilen denklemlerle elektriksel ve manyetik geçirgenlik aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\mu^* = \frac{\lambda_{og}}{\Lambda} \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) \quad (2.15)$$

$$\epsilon^* = \frac{\lambda_o^2 \left(\frac{1}{\Lambda^2} + \frac{1}{\lambda_c^2} \right)}{\mu^*} \quad (2.16)$$

Yukarıda verilen ifadeler birçok analitik ve nümerik çözümlerinde temelini oluşturmaktadır.

2.5.2. Newton-Raphson Tekniği

Newton-Raphson (N-R) tekniği iteratif yapısı ile ilgili fonksiyon için en iyi çözümü bulabilmektedir. Sadece yansıma (S_{11}) ya da sadece iletim (S_{21}) parametreleri ile ölçümü yapılan malzemenin dielektrik geçirgenliğini hesaplayabilmektedir. NRW tekniği bu iki paramtereye aynı anda ihtiyaç duyduğu için N-R'nin daha önemli olmasını sağlamaktadır. Bazı malzemelerde yansıma ya da iletim parametrelerinin zayıf olması durumunda N-R hesaplama tekniği ön plana çıkmaktadır [40,46]. N-R tekniğin kullanım aşamalarının anlatımı için öncelikle iletim parametresi olan S_{21} 'in yeniden tanımlanması gerekmektedir [39]:

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (2.17)$$

Yukarıda belirtilen ifadedeki iletim (T) ve yansıma (Γ) katsayıları malzeme ile elektromanyetik dalga arasındaki etkileşimdir. Denklem 2.17 ile ifade edilen iletim parametresi, N-R tekniği için tekrar düzenlenirse;

$$\phi(\varepsilon_r, \varepsilon_i) = S_{21_r}(\varepsilon_r, \varepsilon_i) - S_{21\ddot{o}_r} \quad (2.18)$$

$$\phi(\varepsilon_r, \varepsilon_i) = S_{21_i}(\varepsilon_r, \varepsilon_i) - S_{21\ddot{o}_i} \quad (2.19)$$

elektriksel geçirgenliğin reel (i) ve imajiner (r) kısımları elde edilir. Ölçülen parametre (\ddot{o}) ile gösterilmiştir. Tolerans değeri, 2.18 ve 2.19 denklemlerinin türevleri alınarak

$$D = \begin{vmatrix} \left(\frac{dS_{21_r}}{d\varepsilon_r}\right) & \left(\frac{dS_{21_r}}{d\varepsilon_i}\right) \\ \left(\frac{dS_{21_i}}{d\varepsilon_r}\right) & \left(\frac{dS_{21_i}}{d\varepsilon_i}\right) \end{vmatrix} \quad (2.20)$$

şeklinde elde edilir. Böylece ε_r ve ε_i değerlerinin bilinmeyen bir sonraki ifadeleri,

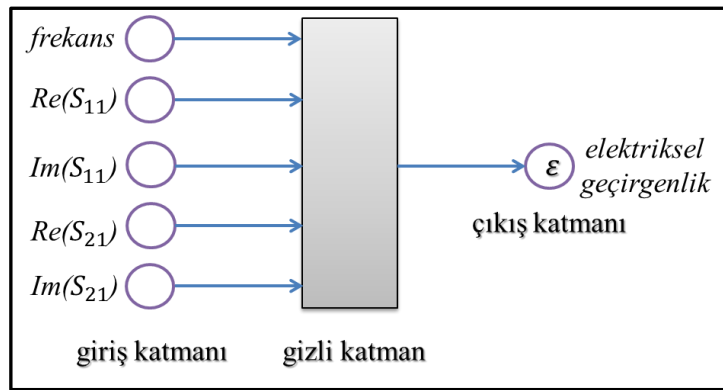
$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r_0} + h \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i_0} + k \quad (2.22)$$

denklemleri ile bulunur. Burada h ve k elde edilecek değerler için birer düzeltmedir, o ise ilk başlangıç değerini ifade eder. İstenilen değer elde edilinceye kadar iterasyon devam ettirilir.

2.5.3. Yapay Sinir Ağları

Bir malzemeye ait dielektrik özelliklerin hesaplanmasında kullanılan tekniklerin yanı sıra veri tabanında hazır olan bilgilerden faydalanarak yapay zekâ tabanlı algoritmalar eğitilip elektriksel geçirgenlik gibi parametreler tahmin edilebilir. Giriş ve çıkış parametreleri arasındaki ilişkiyi kullanarak yeni veri girişi ile istenilen çıkış değerini hesaplayabilen bir yöntem olan Yapay Sinir Ağları (YSA) algoritması alternatif bir hesaplama tekniği olarak düşünülebilir. YSA'nın temel yapısını oluşturan ağlar genellikle geri beslemeli mantık ile eğitilip ağ değerlerinin optimize olması kolaylaştırılır [128,129]. Giriş değerlerinin isteğe göre belirlendiği YSA'da çıkış değerleri de birden fazla seçilebilir. Önerilen metodun modellenmesi Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Yapay sinir ağları yönteminin yapısı.

Modellenen yapıda giriş değerleri olarak frekans bandı ile birlikte yansıma ve iletim parametrelerinin hem reel kısımları hem de imajiner kısımları tercih edilerek sadece

bir çıkış değeri olan elektriksel geçirgenlik tahmin edebilmektedir. Girişlerin her birisi bir sinir hücresini temsil ederken gizli (ara) katmandaki kullanıcı tarafından sayısı belirlenen sinir hücrelerine olan bağlantılar ağlar aracılığı ile yapılır. YSA'da önemli olan bir diğer husus ise aktivasyon fonksiyonunun en uygun şekilde seçilmesidir. Önerilen algoritmanın çıkış değeri pozitif olduğu için bu yapıya uygun olabilecek ve birçok çalışmada sıklıkla tercih edilen sigmoid fonksiyonudur [129]:

$$F(a\tilde{g}) = \frac{1}{1 + e^{-a\tilde{g}}} \quad (2.23)$$

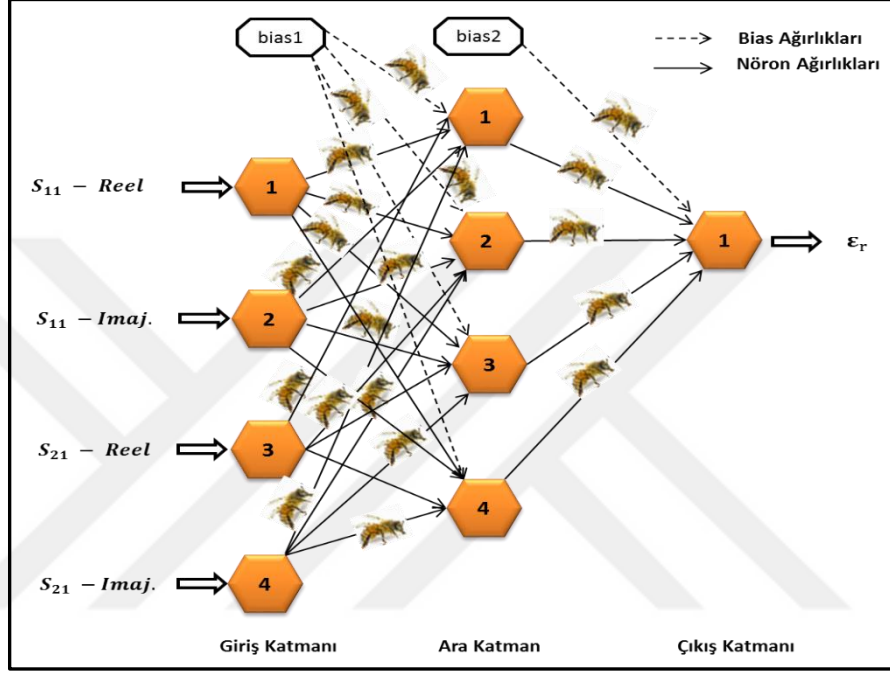
Burada ağ olarak nitelendirilen ifade, iki hücre arasındaki matematiksel işlemin bir sonucudur ve her bir ağın birbirleri ile toplanması sonucu çıkıştaki hücreye ulaşılır. Genelde verilerin yarısı eğitimde yarısı da algoritmanın başarısını göstermek için test işleminde kullanılır. Matlab uygulamasında kod yazımı veya hazır paket şeklinde uygulanabilmesi işlem süresini kısaltmaktadır. S-parametreler ve dielektrik özellikler arasındaki ilişkinin yüksek derecede olması bu algoritmanın kullanılmasını kolaylaştırmaktadır. Özellikle, S-parametre genlik değerlerinin -1 ile 1 arasında değişmesi normalize işlemine olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır.

2.5.4. Yapay Arı Koloni Algoritması

Gün geçtikçe önemleri artan yapay zekâ tabanlı algoritmaların eksik olan tarafları da başka bir algoritma ile telafi edilebilmektedir. Bunun en iyi örneği ise D. Karaboğa tarafından geliştirilen Yapay Arı Koloni (YAK) algoritmasının YSA'da büyük öneme sahip ağırlıkların optimize edilmesinde kullanılmasıdır [130,131]. Temel mantık, en iyi yiyecek bölgesi bulunurken arılar tarafından gösterilen davranışın modellenmesidir.

YAK algoritmasında üç çeşit arı vardır: Kâşif, görevli ve gözcü. Algoritmayı modellerken başlangıç kaynakları rastgele belirlenir ve görevli arılar rastgele seçilen yiyecek kaynaklarından nektar toplayarak kovana geri döndüklerinde kaynak hakkındaki bilgiyi gözcü arılar ile paylaşırlar. Gözcü arılar, belirli bir olasılık dâhilinde yiyecek kaynağını seçerek nektar toplamaya başlarlar. Kâşif arılar, tükenen

nektarların yerine yeni kaynaklar bulmak için araştırma yaparlar. Bu süreç, belirtilen şartlar yerine getirilene kadar devam eder ve algoritmada bir döngüyü oluşturur [132]. Önerilen algoritmanın S-parametreleri kullanıp bir malzemeye ait elektriksel geçirgenliğin reel kısmının tahmin edebilmesi Şekil 2.12’de gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 2.12. YAK algoritmasının modellenmesi.

Bu algoritmanın en iyi sonucu verebilmesi dikkat edilmesi gereken iki husus vardır. Bunlardan birincisi hedeflenen değere ulaşmak için belirlenmesi gereken popülasyon sayısıdır. Diğeri ise kaynaktaki nektar yetersizliğini belirtmek için deneme sayısı sayısını gösteren limit değeridir.

2.5.5. Kısmi En Küçük Kareler Yöntemi

Çok değişkenli verilerin analizinde ve çeşitli bilinen ya da bilinmeyen malzemelerin gruplandırılmasında Kısmi En Küçük Kareler (KEKK) yöntemi kullanılmaktadır. Birden fazla bağımlı değişken ile çalışabilen bu yöntem çoklu doğrusal bağlantı problemine çözüm üretmektedir. KEKK algoritması yanıt (Y) ve faktör (X) adlı iki

değişkenin değişimlerine dayanır. Yani, bu iki parametre arasındaki kuvvetli bağ ile gizli değişkenler ortaya çıkartılır [133,134].

X ve Y arasındaki kovaryans maksimize edilerek faktör değerleri elde edilir. Diğer bir ifade ile KEKK algoritması tarafından X ve Y arasındaki mevcut ilişkinin kullanılmasıyla gizli yapılar ortaya çıkarılır. Yanıt ve faktör matrislerinin merkez değerleri ($X = X_0$ ve $Y = Y_0$) belirlendikten sonra KEKK algoritması, belirleyicilerin lineer kombinasyonu ($t = X_0 w$) ile başlatılmış olur. Burada t gizli değişkeni ifade eder, w ise ağırlık vektörüdür. X_0 ve Y_0 değerleri aşağıda gösterildiği gibi belirlenir [135]:

$$\hat{X}_0 = tp', \quad (p' = ((t't)^{-1}t'X_0)) \quad (2.24)$$

$$\hat{Y}_0 = tc', \quad (c' = ((t't)^{-1}t'Y_0)) \quad (2.25)$$

c ve p parametreleri yanıt ve faktör ifadelerinin yükleri olarak adlandırılır ve $(t't)$ bileşenin kare boyutunu verir. Belirli lineer kombinasyon, yanıt kombinasyonu ($u = Y_0 \cdot q$) ile birlikte maksimum kovaryansa $(t'u)$ sahiptir. Burada, q yanıt matrisinin ağırlığını temsil eder. Böylece X ve Y parametrelerinin ilk değerleri aşağıdaki şekilde belirtildiği gibi bulunur:

$$X_1 = X_0 - \hat{X}_0 \quad (2.26)$$

$$Y_1 = Y_0 - \hat{Y}_0 \quad (2.27)$$

İlk değerleri elde edilen X ve Y değişkenlerinin ikinci değerleri de yukarıdaki 2.26 ve 2.27 denklemleri kullanılarak bulunur. Bu işlem döngüsü istenen değer elde edilinceye kadar devam eder.

Malzemelerin gruplandırılmasında kullanılacak olan KEKK algoritması için birçok hazır paket program mevcuttur. Bunlarda bazıları Minitab, R-programlama, Matlab, Smartpls, JMP ve Xlstat şeklinde sıralanabilir. Hiç bir ön şart gerektirmeden önerilen metodun kolayca uygulanabileceği paket program olarak JMP tespit edilmiştir. Bir

malzemeye ait dielektrik özelliklerin hesaplanmasında kullanılan tekniklerin sürekli kullanımı yerine sadece ham veri şeklinde elde edilen S-parametrelerin kullanılması ile birlikte bilinen ya da bilinmeyen malzemelerin belli bir ölçü dâhilinde sınıflandırılması yapılabilecektir.

2.5.6. Tekil Spektrum Analizi

Çevresel etki olan gürültü ile ölçüm sırasında ortaya çıkan hataların sebep olduğu sinyal bozukluğunun giderilebilmesi malzeme karakterizasyonu açısından önemlidir. Ölçüm sistemleri ile elde edilen sinyal, Tekil Spektrum Analizi (TSA) gibi yöntemler ile filtrelense dielektrik özelliklerin daha az bir hata ile hesaplanması mümkün olabilir. TSA yöntemi, eldeki veriyi parçalara ayırıp hata ve gürültüye neden olan kısımları elimine eder. Bu yöntem, ayrıştırma ve yeniden yapılandırma olarak isimlendirilen iki aşamadan meydana gelir [136,137].

Ayrıştırma aşamasında ilk önce mevcut verilerden yararlanılarak Henkel matrisi $X = [X_1, X_2, \dots, X_k]$ şeklinde oluşturulur (gömme). Tekil Değer Ayrışımı (TDA) yapılmadan önce,

$$K = N - L + 1 \quad (2.28)$$

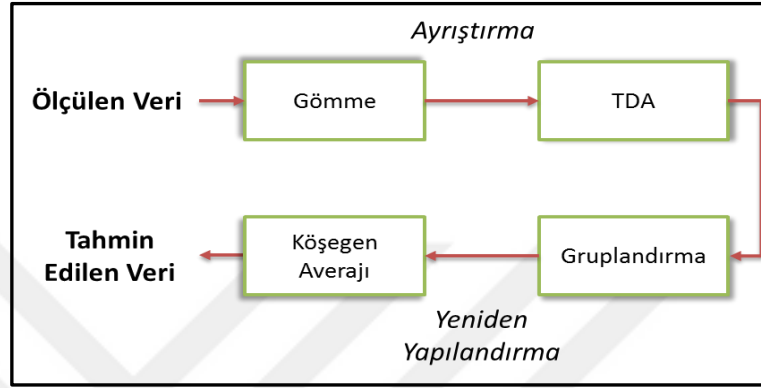
matrisi elde edilir. Burada, veri miktarı (N) ile pencere uzunluğu (L) arasındaki ilişkiye dikkat edilmelidir. Seçilen sinyalin toplam boyutunu temsil eden N , L 'den büyük olmalı ya da sonradan belirlenen L değeri küçük seçilmelidir. Bir lineer cebir metodu olan TDA uygulanarak Hankel matrisi aşağıdaki gibi tekrar düzenlenir:

$$X = E_1 + E_2 + \dots + E_L \quad (2.29)$$

Bu aşamadan sonra yeniden yapılandırma işleminin bir parçası olan gruplandırma esnasında yapılarak hangi verilerin atılacağına karar verilir. Bu işlemi yapmak için

$$(\bar{X} = X_1 + X_2 + \dots + X_r) \quad (2.30)$$

matrisinde belirtilen bileşenlerden orijinal veriyi temsil edecek verinin dışındaki istenmeyen hata ve gürültüyü barındıran veriler atılır. En iyi r değeri seçilerek tahmin edilecek veri elde edilir ve bu tahmin edilen yeni değer orijinal veriyi temsil edip etmediği kontrol edilir. Önerilen TSA modelinin işlem basamakları Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. TSA algoritmasının modellenmesi.

BÖLÜM 3

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Malzeme karakterizasyonu işlemleri THz frekans bölgesinde son yıllarda artmış olmasına rağmen genelde kullanılan yöntemler optik bileşenlerden oluşan THz spektroskopi sistemleridir. Mikrodalga ölçüm metotları ise parçalı frekans bölgesi olarak ihtiyaca göre yapılan uygulamalar şeklinde ortaya çıkmaktadır. THz-ZDS sistemi ile 100 GHz – 1 THz frekans bölgesinde tek seferde ölçüm yapabilmek mümkündür. Fakat SOÖ metodu ile geniş bantta ölçüm almak için birkaç değişik deney setine ihtiyaç vardır. Örneğin 75-110 GHz ve 220-325 GHz frekans bantlarında kullanılan antenler farklı olduğu için yeni bir ölçümden önce antenlerin ve frekans genişleticilerin değiştirilmesi gerekmektedir.

Yapılan çalışmalarda kullanılan iki farklı yöntem (AFD ve YFD) için sunulan iyileştirmeler de farklılık göstermektedir. AFD ölçüm sistemleri için malzeme ölçümü öncesinde deney sisteminde yapılan iyileştirme (maliyet ve ebat) söz konusu iken YFD ölçüm metotlarında ise ölçüm sonrasında ihtiyaç duyulan matematiksel tekniklerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Mevcut problemlere sunulan iyileştirmeler ile frekansın bir fonksiyonu olarak elde edilen elektriksel geçirgenliğin doğruluğu artırılmıştır.

3.1. ÖLÇÜMÜ YAPILAN MALZEMELERİN SEÇİMİ

Mevcut problemlere sunulan iyileştirmelerin hangi malzemelere uygulanacağı konusunda kaynak taraması yapılarak SOÖ metodu ile özellikle 100 GHz'in üstünde THz-ZDS sisteminin kullanılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Frekans bant aralığının gruplandırılmasında IEEE standartları esas alınmıştır.

Çizelge 3.1. Bazı malzemelerin elektriksel geçirgenlik değerleri.

| NUMUNE | FREKANS BANDI (GHz) | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|-----------|------------|
| | Mikro Dalga (3-30 GHz / 100-10 mm) | | | | | Milimetre Dalga (30-300 GHz / 10-1 mm) [THz-altı (110-300 GHz)] | | | | | Terahertz (THz) (300-3000 GHz/1 mm-100 µm) | | |
| | <i>C-Band</i> (4-8) | <i>X-Band</i> (8-12) | <i>Ku-Band</i> (12-18) | <i>K-Band</i> (18-26) | <i>Ka-Band</i> (26-40) | <i>V-Band</i> (40-75) | <i>W-Band</i> (75-110) | <i>D-Band</i> (110-170) | <i>G-Band</i> (140-220) | <i>H-Band</i> (220-325) | <i>Y-Band</i> (325-500) | (500-750) | (750-1100) |
| Teflon | 2.05/2 | 1.9/2 | 2.05 | 1.9/2 | 2.04 | 2.05 | 2 | 2.07 | - | 2.0-2.10 | | | |
| Naylon | 3,03 | 3,1 | 3.1/3.2 | - | 2.99-3 | 3/3.4 | 3/3.06 | 3.1 | - | - | - | - | - |
| PVC | - | 2.86 | 2.9 | - | - | - | 2.9/2.95 | 2.88 | | | - | - | |
| PMMA | 2,63 | 2.62 | - | - | 2.57 | 2.59-2.61 | | | - | - | - | - | |
| Akrilik | 2.5-2.61 | | 2.63 | 2.58 | - | 2.7 | 2.5 | 2.59-2.61 | | - | - | - | |
| Polipropilen | - | 2.28 | 2.25 | - | 2.24 | 2.2-2.3 | | | - | - | - | - | |
| Polietilen | - | 2.3 | 2.27 | - | 2.31 | 2.3 | 2.32 | 2.31 | - | - | - | - | |
| HDPE | - | - | - | - | 2.33/2.32 | - | 2.45-2.6 | - | - | 2.36/2.32 | | | |
| Polistren | 2.55 | 2.54 | - | 2.54 | - | 2.53 | 2.62 | - | - | - | - | - | |
| Pleksiglas | - | 2.56 | - | - | - | 2.56 | 2.58-2.6 | 2.59 | | - | - | - | |
| Mylar | 3.15-3.13 | | | | | - | - | - | - | - | - | - | |
| Rexolit | - | 2.5 | - | - | - | 2.52 | 2.53 | 2.54-2.53 | | 2.53 | - | - | |
| Kuartz | 3.8 | | | | | - | 3.8 | - | 3.8 | 3.8 | | | |
| Alüminyum | - | 9.8 | 10.03 | - | 9.72 | - | 9.78 | 9.9 | | | | | |

Yapılan çalışmalarda elektriksel geçirgenliği düşük olan malzemeler tercih edildiği için birçok araştırmacı tarafından yapılan deneysel sonuçların derlenmesi ile elde edilen bilgiler incelendiğinde seçilen malzemelerin elektriksel geçirgenlik değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu gözlenmiştir. Örneğin poliprolin ve polietilen malzemelerinin sahip oldukları değerler 2.20 – 2.35 arasında değişmektedir.

Deneysel ölçümler sonucundaki verilerin hesaplama teknikleri kullanılarak analiz edilmesi ile ortaya çıkan değerler arasında bazı farklılıkların olmasının nedenlerini ölçüm sisteminin performansını etkileyen kalibrasyon tekniği, ortam sıcaklığı ve malzemenin iç yapısının yanı sıra ikinci aşamada daha çok etkin olan hesaplama tekniklerinin farklı olması şeklinde sıralayabiliriz. Örneğin Teflon malzemesinin iç yapısı, üretici firmalardan dolayı farklılık göstereceğinden dolayı hesaplama sonucunda elde edilecek elektriksel geçirgenliği farklılık gösterip 2,0-2,1 arasında değişecektir. Ayrıca, ileriki bölümlerde gösterileceği üzere aynı teknik olan NRW'nin farklı algoritma mantığı ile yazılması sonucunda kısmi farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

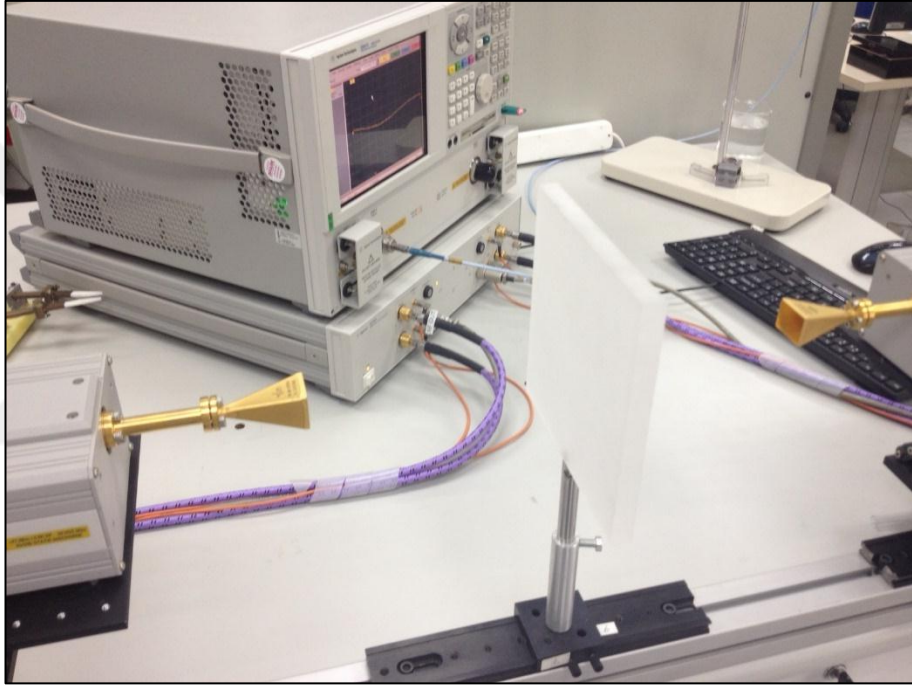
Dielektrik malzemelerin elektriksel cevabı olan elektriksel geçirgenlik (ϵ) frekansa bağlı olarak değişebildiği için SSÖ ve ÇKLD-ZDS yöntemleri kullanılarak analizi planlanan malzemelerin belirlenmesi (Rexolite, Ultralam 3850HT, RO3003, L1000HF gibi) için yapılan ön çalışmada elektriksel geçirgenlik değerinin belirli bir değişim payı ile birlikte sabit kalabilmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple önerilen iyileştirmelerin doğruluğu milimetre dalga boylarında gösterilmiş ve THz frekans bölgesinde temin edilen malzemeler için kullanılmıştır.

3.2. SOÖ METODU İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Öncelikle geliştirilen yazılımın doğruluğunu sağlamak için mikrodalga ve milimetre dalga frekans bandında daha önceden analiz edilen malzemelerin ölçümü yapılmış ve literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın önemli bir kısmını oluşturan SOÖ metodu ile elde edilen verilerin analizi için hesaplama teknikleri optimize edilmiş ve karakterizasyon sonucundaki çıktılar malzemelerin

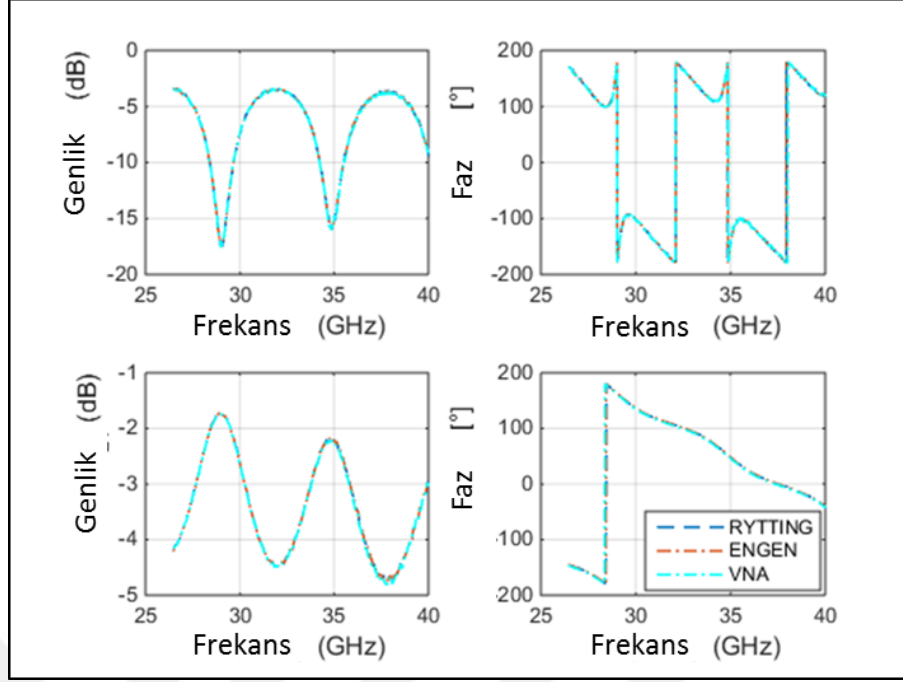
tanınmasında kullanılması için var olan algoritmalarından en uygunu belirlenip tespit edilen olumlu sonuçlar gösterilmiştir.

Daha önceki bölümlerde bahsedilen SOÖ metodunun kurulum düzeni Şekil 3.1’de gösterildiği gibidir. SOÖ metodu 75 GHz’in üzerinde yapılan bütün ölçümlerde kullanılmıştır. Diğer frekans bantları için antenler ve antenler arasındaki mesafe değiştirilerek sistem kullanılabilir hale getirilmiştir. Şekildeki numune tutucunun üzerinde Rexolite malzemesi mevcuttur.



Şekil 3.1. Serbest ortam ölçüm metodu.

Ölçüm sisteminin hazır hale gelmesinden önce yapılması gereken önemli işlerden birisi belirlenen kalibrasyon tekniğinin başarılı bir şekilde uygulanmasıdır. Çoğu çalışmamızda kullanılan TRL kalibrasyon tekniğinin başarılı bir şekilde uygulandığını göstermek için verilen bilgiler doğrultusunda Matlab kullanılarak bir kod yazılmış ve elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3.2’de verilmiştir [126]. Buradaki amaç, ölçüm sonuçlarının herhangi bir hesaplama tekniğinde kullanılmasından önce VNA tarafından yapılan kalibrasyon işleminin teorik olarak aynı olduğunu doğrulamak için oluşturulan algoritmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.2. TRL kalibrasyon tekniklerinin karşılaştırılması.

Önceki bölümde ayrıntılı bir şekilde anlatılan TRL tekniğinin sonuçları cam malzemesi için (9 mm) Ku-Bandı frekans aralığında incelenmiştir. Ölçüm sonucunda VNA ile elde edilen verilerin simülasyon analizinde bazı bölgelerdeki dalgalanmalar dışında diğer teknikler ile birebir örtüştüğü görülmüştür. Bu sonuçlar ile ölçülen yansıma ve iletim parametreleri olan S_{11} ve S_{21} değerlerinin malzemeye ait elektriksel geçirgenlik değerlerini hesaplamak için kullanılabilceği gösterilmiştir. G. Engen tarafından geliştirilen ve kodu paylaşılan teknik kendi ismi ile belirtilmiştir [138]. Doğruluğu gösterilen bu teknik, 110 GHz'e kadar başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

3.2.1. Newton-Raphson Başlangıç Değer Problemi

Dielektrik özelliklerin hesaplanmasında kullanılan ve analitik bir teknik olan NRW'nin sonuçlarının nümerik bir teknik olan Newton-Raphson ile karşılaştırılmasından önce en iyi sonuçları veren NRW algoritmasının belirlenmesi gerekir. Yapılan incelemeler sonucunda NRW tekniğini kullanan çalışmaların uyguladıkları algoritmaların farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu farklılığın daha

iyi anlatılabilmesi amacıyla kaynaklarda verilen bilgiler doğrultusunda NRW algoritmaları için bir kod yazılmıştır.

Takibinin kolay yapılabilmesi için incelenen 5 farklı NRW algoritması NRW1, NRW2, NRW3, NRW4 ve NRW5 olarak isimlendirilmiştir. NRW1, kesim dalga (λ_c) boyunu ve kesim frekansını (f_c) kullanarak

$$\lambda_{og} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (3.1)$$

ifadesini elde ederek elektriksel geçirgenliği (ϵ) hesaplar. NRW2’de ise S-parametreleri gerilimlerin toplam ve farkı şeklinde ifade edilir:

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (3.2)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (3.3)$$

ve bu değerlerden faydalanılarak empedans değeri (Z) aşağıda gösterildiği gibi elde edilir:

$$Z = \frac{\sqrt{1 + V_1} \sqrt{1 - V_2}}{\sqrt{1 - V_1} \sqrt{1 + V_2}} \quad (3.4)$$

S-parametrelerinin gerilim toplam ve farkı şeklinde düzenlenmesi NRW3 algoritması tarafından da kullanılmaktadır. Fakat burada empedans değerini hesaplamak yerine X ve T (iletim katsayısı) ifadeleri

$$X = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2} \quad (3.5)$$

$$T = \frac{V_1 - \Gamma}{1 - V_1 \Gamma} \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanır. İletim katsayısını hesaplayan denklem 3.6'nın denklem 2.12'den farklı olduğu ortaya çıkmaktadır. NRW4 ise iletim ve yansıma parametrelerini kullanarak doğrudan empedans (Z) değerini hesaplamaktadır:

$$Z = \frac{(S_{11} + 1)^2 - S_{21}^2}{(S_{11} - 1)^2 - S_{21}^2} \quad (3.7)$$

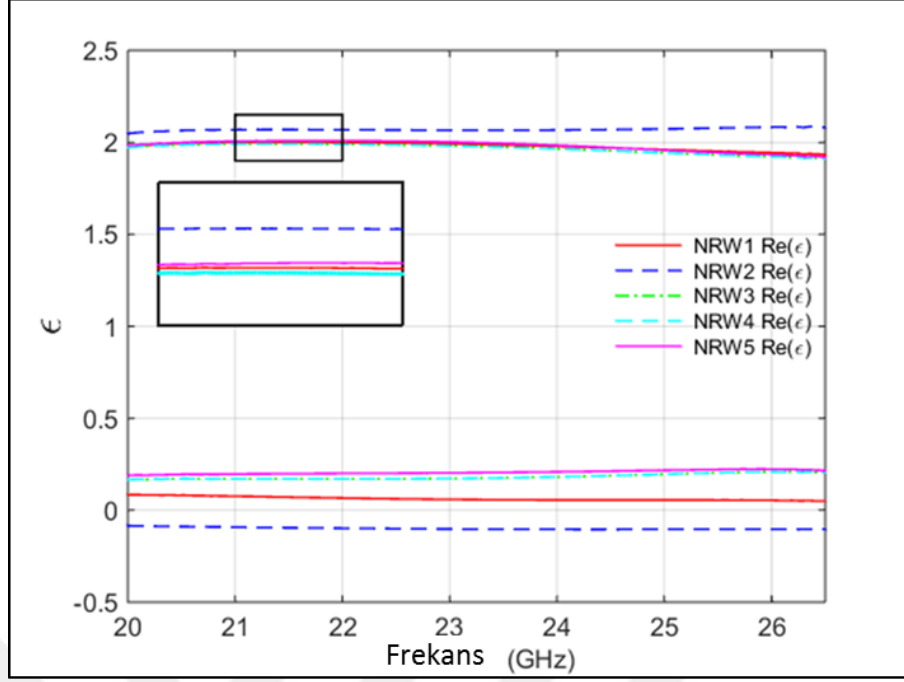
Farklı bir şekilde hesaplanan empedans değeri de NRW5'te iletim katsayısını bulmak için kullanılır:

$$T = \frac{S_{21}(Z + 1)}{(1 - S_{11})(Z - 1)} \quad (3.8)$$

Elde edilen sonuçlar iletim katsayısı için tekrar değerlendirildiğinde denklem 3.8'in denklem 3.6'dan farklı olduğu ortaya çıkmaktadır.

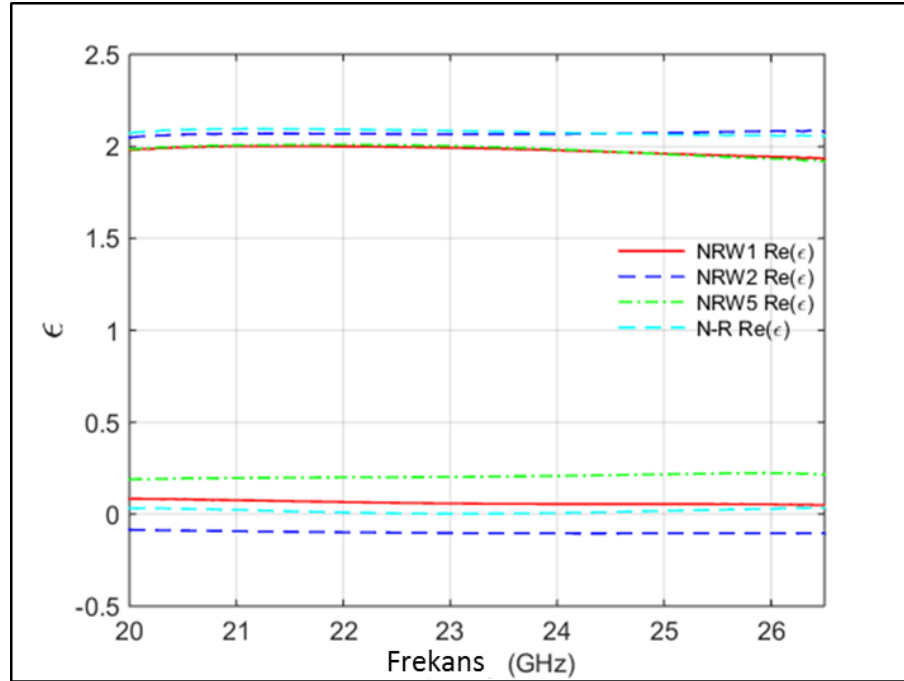
NRW algoritmasının kendi içerisinde farklı yaklaşımlarla modellenip malzeme karakterizasyonunda kullanılabileceğini göstermek için beş ayrı çalışmadan derlenen bilgiler doğrultusunda farklılıklar gösterilmeye çalışılmıştır. Çok kalın malzemelerin analizinde kullanılamasa da farklı bir teknik önerildiğinde doğruluğunu göstermek için NRW'ye ihtiyaç duyulur. Yapılan birçok çalışmada NRW ile karşılaştırma yapılarak sonuçlar verilmiştir.

Basit bir algoritma çerçevesinde yukarıda belirtilen denklemlerin iterasyon üretecek şekilde kod yazımı gerçekleştirilen NRW hesaplama tekniğindeki farklılıklar (NRW1, NRW2, NRW3, NRW4 ve NRW5), diğer hesaplama teknikleri (Newton-Raphson, Genetik Algoritma, Kök Bulma Algoritması vb.) için de geçerli olabilir. Bu sebeple, elektriksel geçirgenliğin reel ve imajiner kısımları birlikte incelenerek en iyi performansı gösteren algoritmanın sonuçları bütün çalışmalarda tercih edilen N-R tekniğinin sonuçları ile karşılaştırılıp uygulanabilirliği başarılı bir şekilde gösterilmiştir [79]. 2 mm kalınlığındaki Teflonun 20-26,5 GHz frekans aralığındaki ölçümleri için elde edilen sonuçlar Şekil 3.3'te gösterilmiştir. NRW3 ile NRW5 yaklaşımlarının sonuçları birebir örtüşmektedir.



Şekil 3.3. Teflon için NRW algoritma sonuçları.

Geliştirilen algoritmaların ilk olarak bilinen malzemeler üzerinde uygulanması ile elde edilen başarının gösterilmesi daha kolay olacağından bu karşılaştırmada Teflon kullanılmıştır. N-R ve NRW tekniklerinin sonuçları Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. N-R ve NRW tekniklerinin karşılaştırılması.

N-R hesaplama tekniğinin temel mantığı ilk belirlenen başlangıç değerinin (x_0) ilgili fonksiyonu kestiği noktaya çizilen teğetin yeni bir kök belirlemesi olarak açıklanabilir. Bu teğet, x-eksenini kestiği nokta yeni kök değeri olurken bu işlem fonksiyonun kestiği nokta bulunana kadar devam eder. Kullanımı kolay olan bu tekniğin başlangıç değerinin iyi belirlenmesi gerekir. Aksi takdirde ıraksama probleminde dolayı çözüm kümesinin elde edilmesi zorlaşmaktadır. Örneğin yukarıda analizi yapılan Teflonun elektriksel geçirgenlik değeri 2 (F/m) olarak bilindiği için başlangıç değeri (x_0) 2 olarak belirlenirse oluşturulan algoritmanın fonksiyon köklerini frekansa bağlı olarak elde etmesi beklenmektedir. Eğer bu değer 3,5 olarak belirlenirse algoritma hata vermektedir, yani 401 veri noktası için kökleri bulamamaktadır. Bu durum, ölçümü yapılan bir malzemenin ne olduğu bilinmiyorsa önerilen algoritmanın uygulanabilirliğini zorlaştıracaktır.

Başlangıç değer tahmin problemini ortadan kaldırmak için verilen denklemler yeniden düzenlenip ilave yapılarak ihtiyaç duyulan katsayılar [139],

$$C1_i = x_{min}^{\frac{2^{i-1}-1}{2^i}} \quad (3.9)$$

$$C2_i = x_{max}^{\frac{2^{i-1}-1}{2^i}} \quad (3.10)$$

şeklinde elde edilir. Burada $C1$ ve $C2$ katsayı olarak kullanılmaktadır. x_{min} ve x_{max} ifadeleri ise önceden belirlenen başlangıç değerinin yerine kullanılan tahmini en küçük ve en büyük değerlerdir. İndis i ile belirtilen ise iterasyon (adım) sayısıdır. Bu aşamadan sonra başlangıç değeri ($x_0 - \epsilon_r$),

$$x_0 = \frac{\frac{C1_i}{x_{min}} + \frac{C2_i}{x_{max}}}{C1_i + C2_i} \quad (3.11)$$

ifadesi ile bulunmaktadır. Bu yaklaşım ile değerlerin $0 < x_0 < 1$ aralığında çıkması beklenmektedir. Bazı durumlarda $x_0 < 1$ olduğu için eğer program yanıt vermez ise

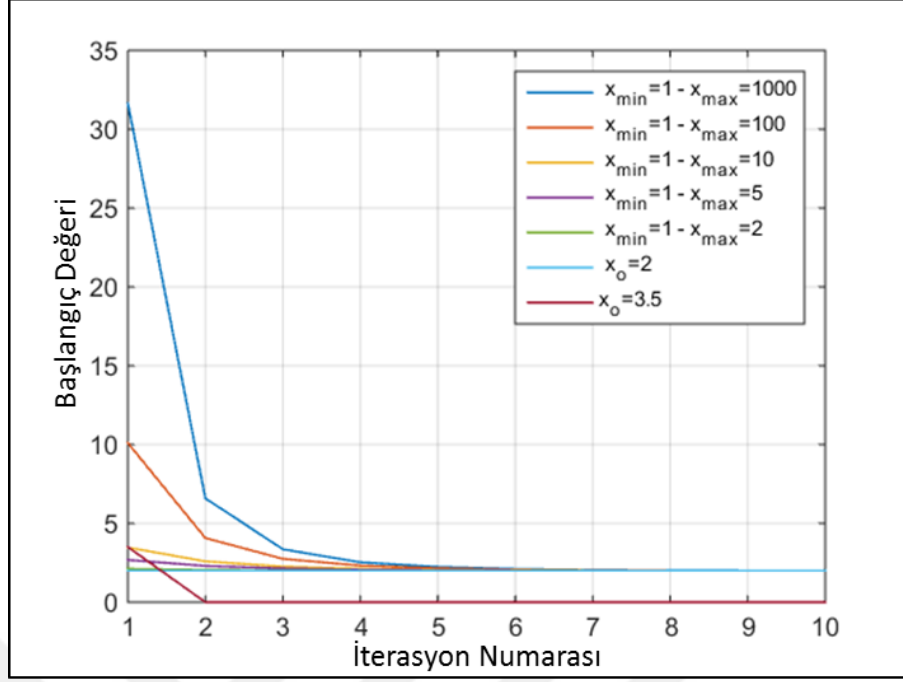
$$x_0 = x_0(x_{min} + x_{max}) \quad (3.12)$$

denklemini yardımı ile $1 < x_0$ şartı sağlanır ve hatalı durum engellenmiş olur. Teflon örneği üzerinden metod doğrulamasına devam ettiğimizde önerilen algoritmanın başlangıç değer tahmini için farklı sayılar bulması Çizelge 3.2’de gösterilmektedir. Bulunan değerlerin belli bir iterasyon sayısına (54) ulaşıktan sonra tamamen 2.0 olarak elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 3.2. Başlangıç değer tahmin değişimi.

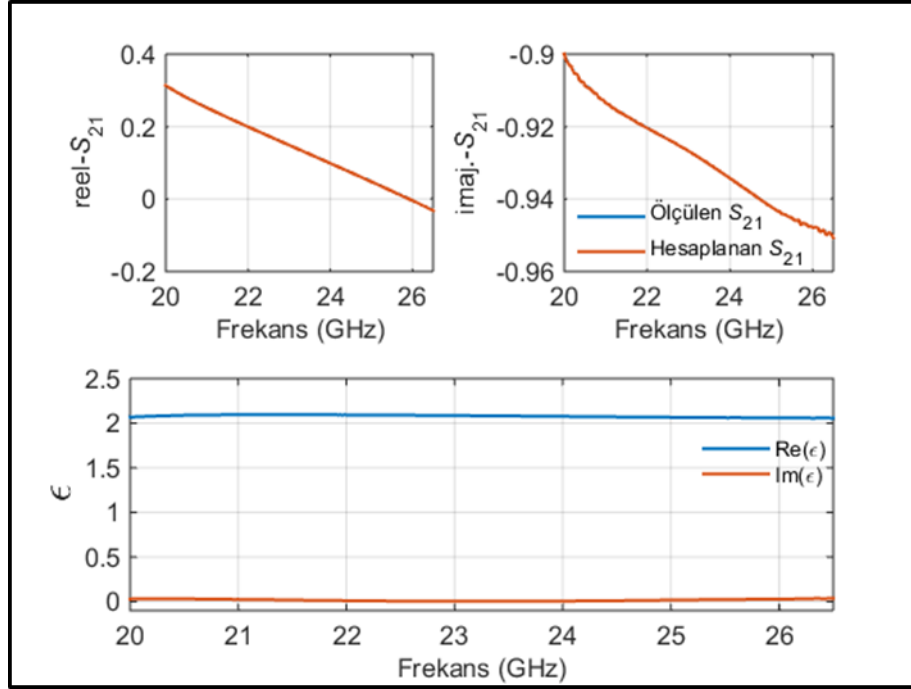
| | | İterasyon Sayısı | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| x_{min} | x_{max} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 1000 | 31.65 | 6.59 | 3.36 | 2.53 | 2.24 | 2.11 | 2.05 | 2.02 | 2.01 | 2.00 |
| | 100 | 10.10 | 4.07 | 2.75 | 2.32 | 2.15 | 2.07 | 2.03 | 2.01 | 2.00 | 2.00 |
| | 10 | 3.47 | 2.59 | 2.26 | 2.12 | 2.06 | 2.02 | 2.01 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | 5 | 2.68 | 2.30 | 2.14 | 2.06 | 2.03 | 2.01 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | 2 | 2.12 | 2.05 | 2.02 | 2.01 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | 1 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| Klasik | $(x_0 = 2)$ | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |

Yukarıda verilen değerlerde maksimum belirlenen değer 1000 olması durumunda bile algoritmanın tam kök değerine yakınsadığı görülür. Klasik yöntem olan tek değer belirlendiği yöntemde bazı durumlar için algoritma çalışmamakta ve istenilen değere ulaşamamaktadır. Ölçümü yapılan malzeme bilindiği takdirde her iki öneri içinde bir problem söz konusu olmayabilir, fakat eğer malzeme bilinmiyorsa N-R’nin başlangıç değeri için deneme yanılma prensibine göre farklı değerler belirlenecektir. Bunlardan bazılarının da çalışmadığı Teflon analizinden ortaya çıkmaktadır. Örneğin Teflon için başlangıç değeri 3.5 olarak belirlendiğinde hesaplama tekniği iraksamakta ve çözüm üretilmemektedir. Ayrıca, 2’den başlayarak 10’a kadar tek tek sayıları denediğimizde 3.5-4.5 ve 7-10 arasında çözüm kümesi oluşturulamadığı tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 3.5’te gösterilmektedir.



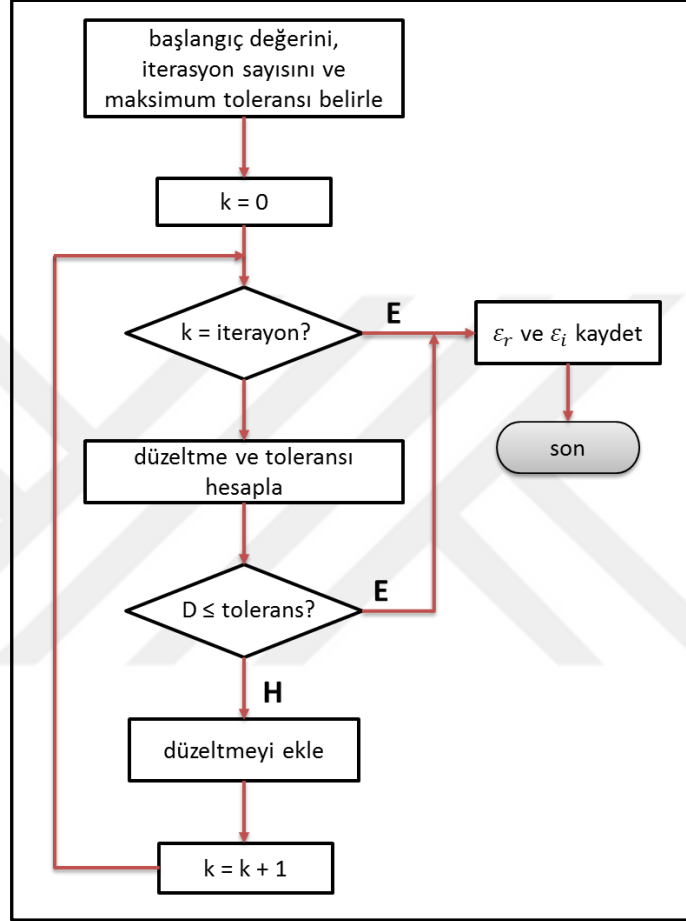
Şekil 3.5. Başlangıç değeri tahminlerinin karşılaştırılması.

Elde edilen elektriksel geçirgenlik ile birlikte VNA tarafından ölçülen iletim parametresinin (S_{21}) reel ve imajiner kısımları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Teflon için elektriksel geçirgenliğin belirlenmesi.

Başarılı bir şekilde geliştirilen N-R hesaplama tekniği, gerektiğinde sadece yansıma veya sadece iletim katsayılarını kullanabilmesi açısından bundan sonraki uygulamalarda referans değer olarak kullanılmıştır. N-R hesaplama tekniği için düzenlenen algoritmanın akış şeması Şekil 3.7’de gösterildiği gibidir.



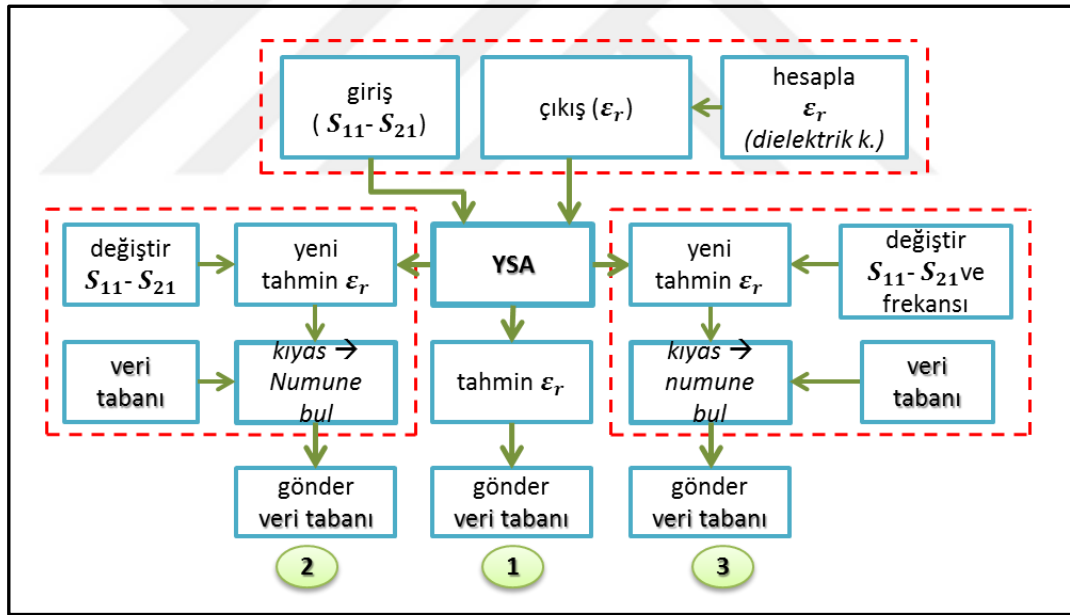
Şekil 3.7. Newton-Raphson tekniğinin akış şeması.

3.2.2. Yapay Sinir Ağları İle Farklı Bant Aralıklarının Tahmini

Malzemelerin tanınması ve ayırt edilebilmesi için önemli bir parametre olan elektriksel geçirgenlik değerinin her defasında tekrar tekrar hesaplanması işlem sonucunu geciktirmektedir. Bu işlemi gerçekleştirmek için YSA kullanılarak bazı çalışmalar yapılmış ve elektriksel geçirgenlik değeri ölçüm yapılmadan tahmin edilebilmiştir [128,140]. Fakat bu çalışmada ham veri olan S-parametrelerinin kullanılmasıyla eğitilecek bir yapay zekâ seti ile hesaplama tekniğinin kullanıldığı adım bir sonraki işlemde ortadan kaldırılıp komşu frekans bandındaki S-

parametreleri ile elektriksel geçirgenliğin tahmin edilmesi gösterilecektir. Ölçülen S-parametreleri, bir önceki veya bir sonraki frekans bandında çok az farklılıklar göstereceğinden YSA'nın çıkışı olan elektriksel geçirgenliğin reel kısmı belirli bir hata payı ile tespit edilecektir.

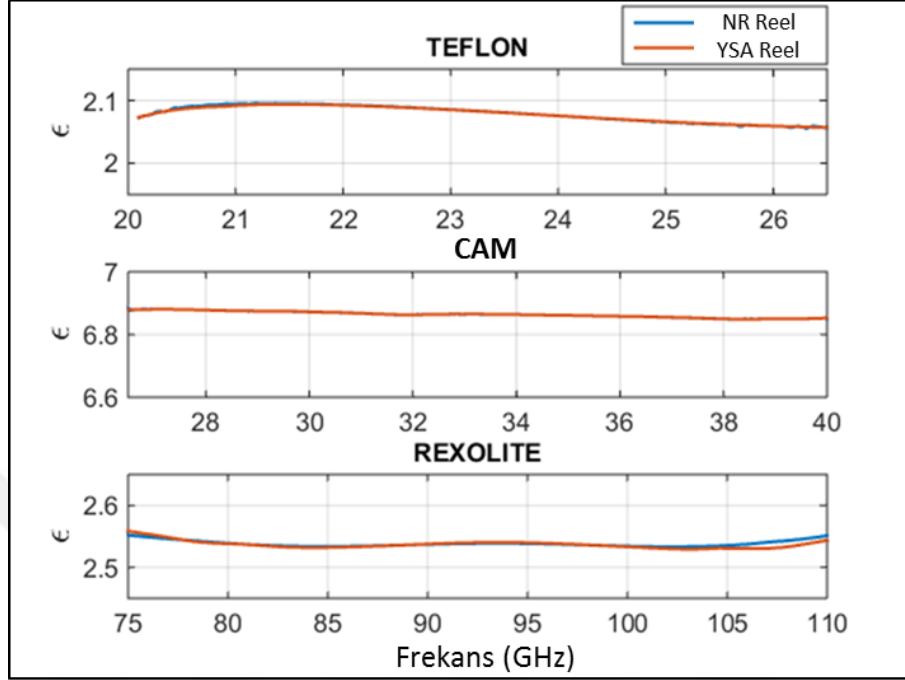
Ağlarının eğitilmesi için kendi içerisinde hata-düzeltilme metodunu kullanan YSA, gerçek değer ile beklenen değer arasındaki farkı azaltarak hatayı minimize etmeye çalışır. Giriş değerleri olarak kullanılan yansımaya ve iletim parametrelerinin yarısından fazlası eğitim için kullanılırken geri kalan kısmı da test için kullanılmaktadır. Aynı durum, çıkış değeri olan elektriksel geçirgenlik için de geçerlidir. Şekil 3.8'de gösterilen modelleme için bir önceki basamak olan elektriksel geçirgenliğin reel kısmının NRW, N-R ve GA vb. hesaplama teknikleri ile belirlenmesi gerekir.



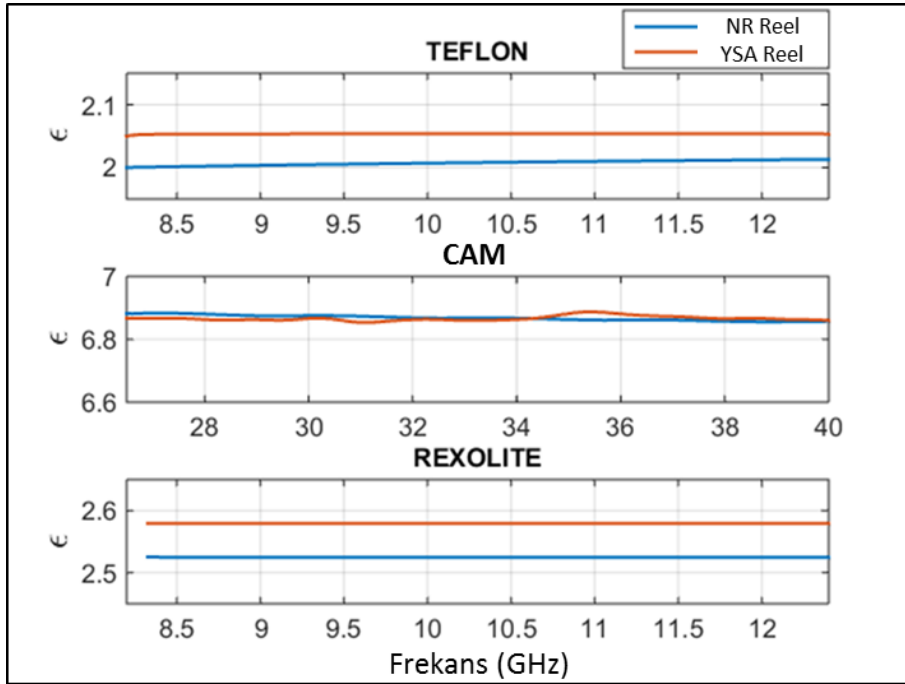
Şekil 3.8. Önerilen YSA'nın modellenmesi.

Üç kısımdan oluşan modellemede 1 numaralı kısım YSA'nın eğitilmesi ve test edilerek elektriksel geçirgenliğin hesaplanması ile alakalıdır. Burada tahmin edilen her değer veri tabanına gönderilerek bir sonraki tahmin işlemi için kullanılacaktır. Bu işlemin sonucunda elde edilen değerler Şekil 3.9'da gösterilmiştir. 2 numaralı kısımda ise aynı frekans bandında farklı kalınlık ölçümüne ait S-parametreler, yeni

değer tahmininde bulunmak için kullanılmaktadır. 3 numaralı kısımda ise farklı frekans bant aralığı için tahmin kabiliyetinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.



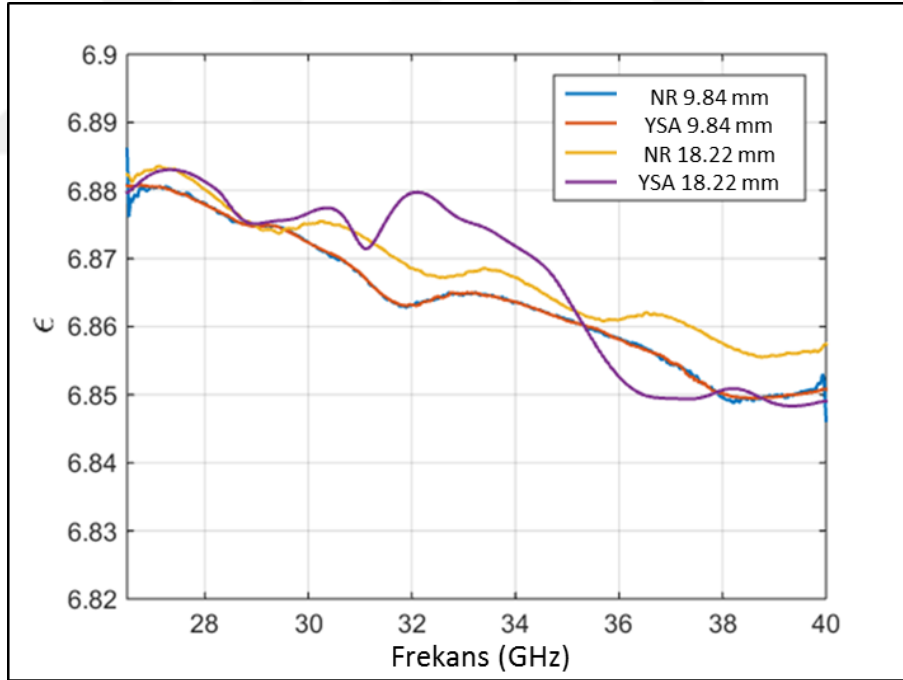
Şekil 3.9. YSA ile elektriksel geçirgenliğin reel kısmının tahmini.



Şekil 3.10. Farklı frekans bandı için YSA'nın tahmini.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde normalizeye ihtiyaç duymayan S-parametreleri ile elektriksel geçirgenlik değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu ilişki kullanılarak farklı frekans bandına ait S-parametreler ile tahmin edilen değerler Şekil 3.10’da verilmiştir.

Bu başarılı sonucun elde edilmesi iki açıdan önemlidir: 1. Aynı malzeme için ikinci kez hesaplama tekniği ile elektriksel geçirgenliğin bulunmasına ihtiyaç duyulmayacaktır. Veri tabanında eşleşme sağlandığı sürece YSA’nın tahmin algoritması iyi bir performans ile çalışacaktır. 2. Farklı bir malzemeye ait S-parametreleri giriş olarak tanımlandığında eğer daha önceden veri tabanına bilgisi gönderilmiş ise YSA, ilgili malzemenin elektriksel geçirgenliği kolayca tahmin edebilecektir. Aynı frekans bandında farklı kalınlıktaki (9.84 ve 18.22 mm) cam numuneleri için elde edilen YSA performansı Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Farklı kalınlığa sahip cam için YSA'nın tahmini.

N-R hesaplama tekniği ile elde edilen sonuçlar, YSA sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. YSA eğitildikten sonra test sonucu elde edilen 18.22 mm kalınlığındaki cam numunesine ait S-parametreler giriş olarak tanımlandıktan sonra elde edilen sonuçları, N-R hesaplama tekniği ile karşılaştırdığımızda büyük oranda bir benzerlik

olduğu ortaya çıkmaktadır. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere farklı kalınlık ve S-parametreleri olmasına rağmen YSA ile yapılan tahmin sonucunda elektriksel geçirgenliğin reel kısmı düzgün bir şekilde elde edilebilmektedir. YSA algoritması kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Belirli frekans bölgelerinde değişen ve üç malzemeye ait olan ortalama elektriksel geçirgenlik değerleri çizelgeye eklenmiştir.

Çizelge 3.3. YSA ile elde edilen sonuçların N-R ile karşılaştırılması.

| | | K - Band | X - Band |
|-----------------|-----|--------------------------|---------------------------|
| TEFLON | N-R | 2.05 | 2.02 |
| | YSA | 2.05 | 2.05 |
| | | Ka - Band 9.84 mm | Ka - Band 18.22 mm |
| CAM | N-R | 6.87 | 6.87 |
| | YSA | 6.87 | 6.86 |
| | | W - Band | X - Band |
| REXOLITE | N-R | 2.54 | 2.52 |
| | YSA | 2.54 | 2.57 |

Bir malzemeye ait S-parametrelerinin davranışları parmak izi niteliğinde olduğu için frekans bandı değişse bile davranışının aynı kalması beklenir. Bunun gerçekleşmesi için de ortam sıcaklığının, ölçüm metodunun, malzeme yapısının aynı olması gerekmektedir. Ortamdaki nem oranının 100 GHz'in üzerinde etkili olmaya başlaması ile üretilen sinyallerde kayıplar yaşanacağı için ölçüm zamanının da birbirlerine yakın olması gerekmektedir.

Rexolite ve teflon için iki farklı frekans bandında karşılaştırma yapılmış ve cam için ise farklı kalınlığın etkisini göstermek amacıyla aynı frekans bandı tercih edilmiştir. Newton-Raphson tekniği ile elde edilen sonuçlar YSA modelinin eğitilmesinde kullanıldığı için test sonucunun hemen hemen aynı olması beklenen bir durumdur. Çizelge 3.3'te verilen bilgiler doğrultusunda ilk sütundakiler test sonuçlarını, ikinci sütundakiler ise farklı frekans bandına ait olan S-parametrelerinin giriş olarak

kullanılmasıyla tahmin edilen sonuç değerlerini vermektedir. Bu değerler cam için çok iyi, teflon için normal ve rexolite için ise kabul edilebilir seviyededir.

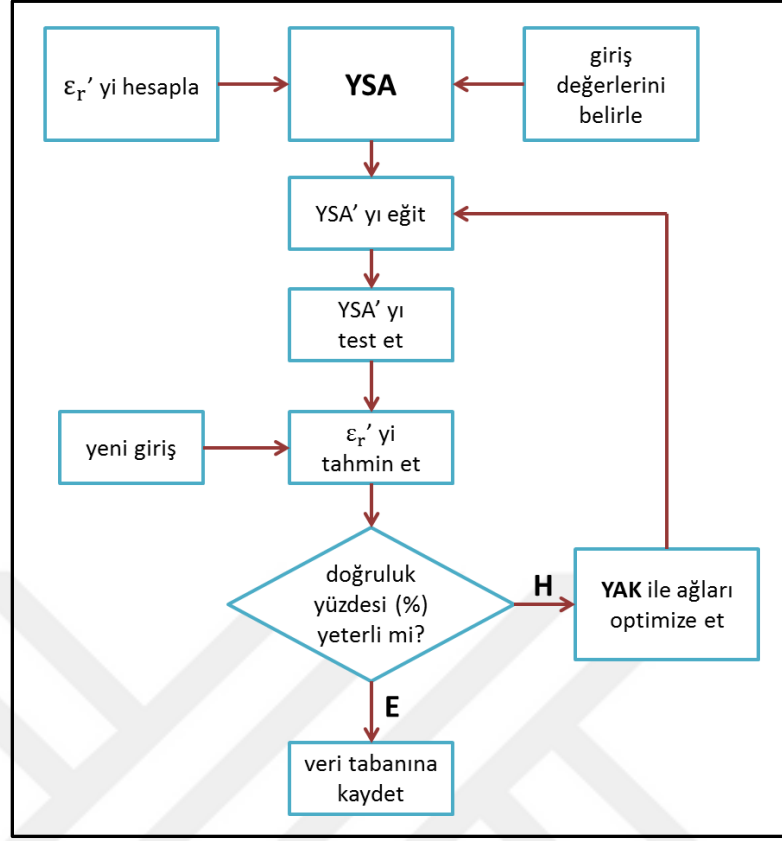
3.2.3. YSA'nın Arı Algoritması İle Optimizasyonu

Elektriksel geçirgenliğin tahmin edilebilme olasılığını artırmak için YSA ile elde edilen sonuçların doğruluk oranlarının artırılması amacıyla YSA'ya ait ağların optimize edilmesi fikri ön plana çıkmaktadır. Bu yaklaşım ile ilgili iki örnek verilebilir: YSA ağlarının Yapay Arı Koloni (YAK) algoritması ve ya Bulanık Mantık Kontrol (BMK) algoritması ile eğitilmesi sonucunda elde edilecek tahmin değerlerinin gerçek değere yaklaşması sağlayacaktır [130,140].

YAK algoritmasının katkısı ile tahmin yeteneği geliştirilen bir YSA modelindeki aşamalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Eğitilmiş YSA modeli için yeni giriş değerlerini belirle
2. En iyi ağ değerlerini tespit et (en iyi nektar kaynağının bulunması)
3. Tespit edilen değerlerin doğru çıkışın elde edilmesine katkısını belirle (yiyecek kaynağındaki nektar miktarının gözcü arılar tarafından belirlenmesi)
4. Eğer istenilen doğruluk yüzdesine ulaşılamamış ise yeni değerleri araştır (kâşif arıların yeni kaynak araştırması)
5. Model için uygun değere karar ver ve değeri kaydet (en iyi yiyecek kaynağının hafızaya kaydedilmesi)
6. İşlemi sona erdir

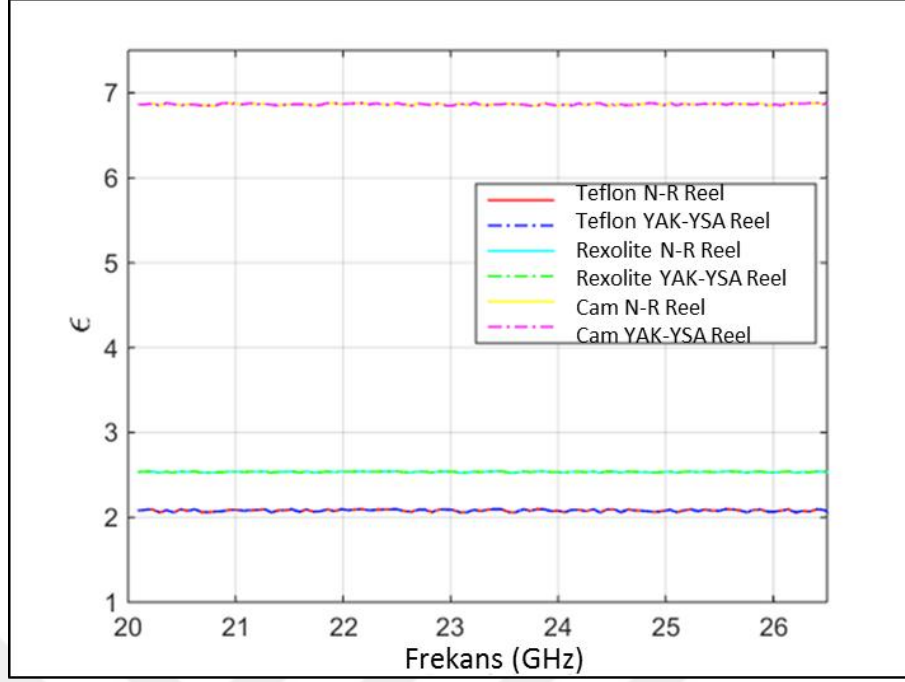
Yukarıda belirtilen bu döngü istenen değere ulaşıncaya kadar devam ettirilir. Önerilen algoritma iki farklı yapay zekâ yaklaşımından oluştuğu için işlem sürecinin uzaması istenmediğinden Matlab yerine Java yazılımı tercih edilmiştir. Tahmin yeteneğinin hemen gerçekleşmesi ve hesaplama süresinin azalmasıyla bilinmeyen malzemelerin teşhisinin kısa sürede yapılabilmesi bakımından Java yazılımı hedeflenen beklentiyi karşılamaktadır. YAK algoritmasının katkısını gösteren modellemeye ait akış şeması Şekil 3.12'de verilmiştir. Bu yaklaşım Şekil 2.12 ile ilişkilidir.



Şekil 3.12. YSA'nın YAK ile optimize edilmesi.

Önerilen model için giriş değerleri olan S-parametreleri arasındaki güçlü bağ bilindiğinden sistemin doğru tahmin değerini artırmak amacıyla eğitimde kullanılan kısım kendi arasında 10 defa karıştırılmıştır. 2500 iterasyon sayısı ile 30 defa tekrar yapılarak en iyi elde edilen sonuç referans değer olarak alınmıştır. Bunun sonucunda önerilen model ile ortaya çıkan sonuç değerlerinin gerçek değerlere benzerliği %99.2'nin üzerinde gerçekleşmiştir. Sadece YSA ile bu değer %98 olarak tespit edilmişti. YAK' ın kullanıldığı bu modelde kimi noktalardaki benzerliklerin %99.9'un üzerinde olması önerilen yaklaşımın kullanılabilirliğini artırmaktadır [79].

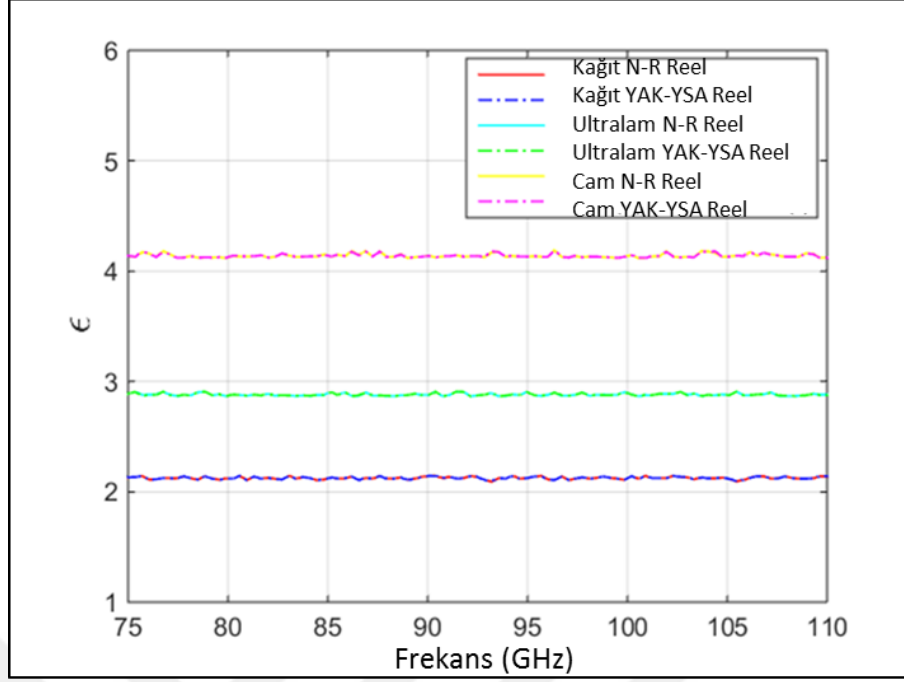
Farklı frekans bantlarının az da olsa ölçülen S-parametrelerine ve ölçüm değerlerinin sonucunda elde edilen dielektrik özelliklere etkisi mevcut olduğundan sonuçlar iki farklı frekans bandı için gösterilmiştir. Altı farklı malzeme önerilen yaklaşımın doğruluğunu göstermek için kullanılmıştır. Şekil 3.13'te Teflon, Rexolite ve Cam (borosilikat) malzemelerinin elektriksel geçirgenlik reel kısımları K-bandı için başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir.



Şekil 3.13. K-bandı için YAK-YSA modelinin sonuçları.

Sonuçlar incelendiğinde %99'un üzerinde elde edilen başarılı ile hesaplama tekniklerine olan anlık ihtiyaç azalmaktadır. Elektriksel geçirgenliğin reel kısmına yönelik olan bu tahminler, imajiner kısmın sanal kısma oranı ile elde edilen kayıp tanjantın ($\tan\delta = \varepsilon_i/\varepsilon_r$) tahmin edilmesinde de kullanılabilir. Aynı şekilde, dielektrik katsayısı (elektriksel geçirgenliğin reel kısmı) bilinen bir malzemenin kırılma indisi de önerilen yaklaşım ile tahmin edilebilir. Yapılması gereken adım, YAK-YSA çıkışının yeniden tanımlanarak S-parametreleri ile kırılma indisi ve kayıp tanjant arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılmasıdır. Bu ilişkinin neticesinde veri tabanında hazır bulunan bilgiyi kullanarak yeni malzemeye ait S-parametrelerinin hangi değerlerde çıkış vermesi gerektiği kolaylıkla tahmin edilmesi mümkün hale gelecektir.

K-bandında yapılan ölçüm ve tahmin değerlerine ilaveten W-bandındaki sonuçlar Şekil 3.14'te gösterilmektedir. Böylelikle, önerilen yaklaşımın farklı bant aralıkları için geçerli olduğu ortaya çıkmaktadır. Tahmin sonucu elde edilen ile gerçek değerler karşılaştırıldığında aralarındaki fark virgülden sonraki 3. Basamakta ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.14. W-bandı için YAK-YSA modelinin sonuçları.

En iyi sonuç değerlerine ulaşmak için geliştirilen algoritma içerisinde YSA'nın ara (gizli) katmanlarını temsil eden ayrı bir kısım eklenerek 2, 4, 8 ve 12 hücreli olanları sırasıyla denenmiştir. Gizli katmanın hücre sayısı, Şekil 2.12'de gösterildiği gibi 4 olarak belirlenmiştir. Hücre sayısı 8 olarak değiştirildiğinde çok küçük boyutlarda bir iyileşme olduğundan algoritma işlem süresini azaltmak için modellemede daha az hücre sayısı kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. YAK-YSA sonuçlarının karşılaştırılması.

| Frekans | Numune | NRW | N-R | ABC-ANNs |
|---------|----------|------|------|----------|
| K Band | Teflon | 2.03 | 2.05 | 2.05 |
| | Rexolite | 2.54 | 2.53 | 2.53 |
| | Cam (S) | 6.88 | 6.87 | 6.87 |
| W Band | Paper | 2.11 | 2.12 | 2.12 |
| | Ultralam | 2.89 | 2.88 | 2.88 |
| | Cam (B) | 4.12 | 4.13 | 4.13 |

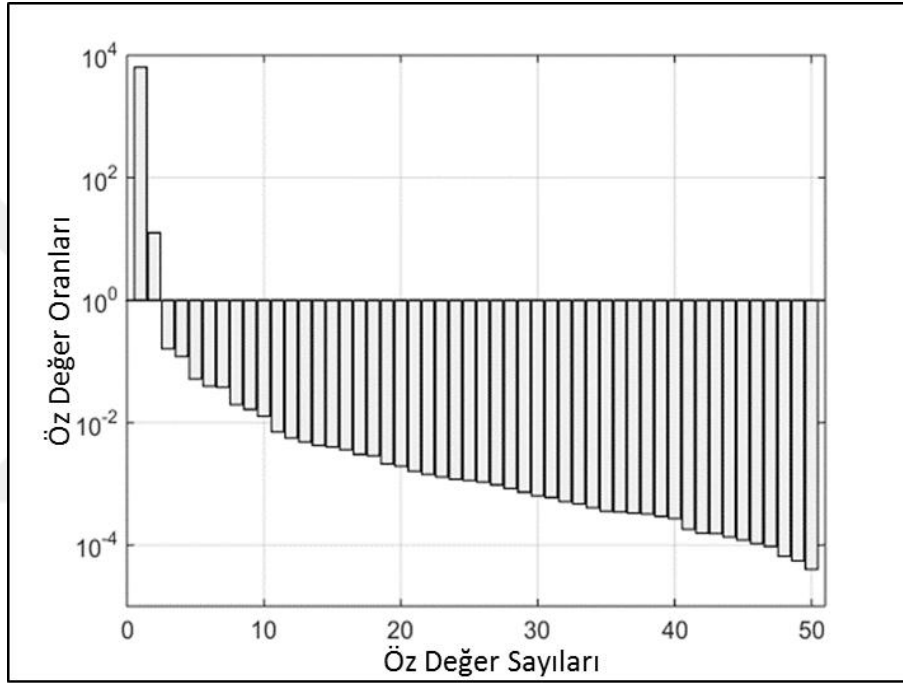
Sonuçların yorumlanmasında dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta vardır. Yapılan çalışmalarda, YSA için sunulan giriş ve çıkış değerlerinin işlem sürecinden önce normalize yapılması gerektiği belirtilmekte ve çıkan sonucun tekrar eski haline dönüştürülmesi tavsiye edilmektedir. SOÖ metodu ile toplanan veriler (S-parametre genlik değerleri) -1 ile 1 arasında değiştiği için giriş değerlerinin normalize edilmesine ihtiyaç yoktur. Diğer taraftan, eğer sigmoid aktivasyon fonksiyonu yerine lineer aktivasyon fonksiyonu kullanılırsa 1'den büyük olan çıkış değerleri için de herhangi bir normalize işlemine ihtiyaç kalmayacaktır. Önerilen metodun başarı yüzdesi hesaplanırken normalize değerler referans alınırsa sonuç %95'in altına kadar düşmektedir. Bu hatadan kaçınmak için aynı değer grubundaki verilerin karşılaştırılması gerekmektedir.

Önerilen YAK-YSA yaklaşımının göstermiş olduğu yüksek başarı ile elektriksel geçirgenlik değerleri birbirine yakın olan yani S-parametrelerindeki frekansa bağlı değişim hareketleri birbirine benzeyen malzemeler için yapılacak tahmin işlemlerinde ortaya çıkabilecek problemler ortadan kaldırılmıştır. Örneğin elektriksel geçirgenliğin reel kısımları bakımından Polistren (2.54 – 2.62) ile Pleksiglas (2.56 – 2.60) incelendiğinde hemen hemen aynı aralık içerisinde yer aldıkları görülmektedir. Bu iki malzeme için yapılacak tahmin değerleri için yüzde yüze yakın bir doğruluğa ihtiyaç vardır. YAK-YSA modelinin %99.2'nin üzerinde göstermiş olduğu başarı performansı, malzemeler arasında gruplandırma işleminin kolayca yapılabileceğini göstermiştir [79].

3.2.4. Tekil Spektrum Analizi İle Sinyallerin Filtrelenmesi

Ölçüm sisteminin kararlılığı ve çevresel etmenler yapılan ölçümü etkilemektedir. Elde edilen verilerin işlenmesi esnasında var olan hata ve gürültü etkileri ortaya çıkmaktadır. Çok iyi kalibre edilmiş ölçüm sisteminde bile gürültünün varlığı devam etmektedir. Bu problemin ortadan kaldırılması için Tekil Spektrum Analizi (TSA) önerilmiştir. VNA tarafından sadece iletim (S_{21}) parametresi ölçülerek hata ve gürültünün azaltılmasında TSA'nın sunmuş olduğu katkı gösterilmiştir. Önerilen algoritma, ilgili referans esas alınarak Matlab programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir [136].

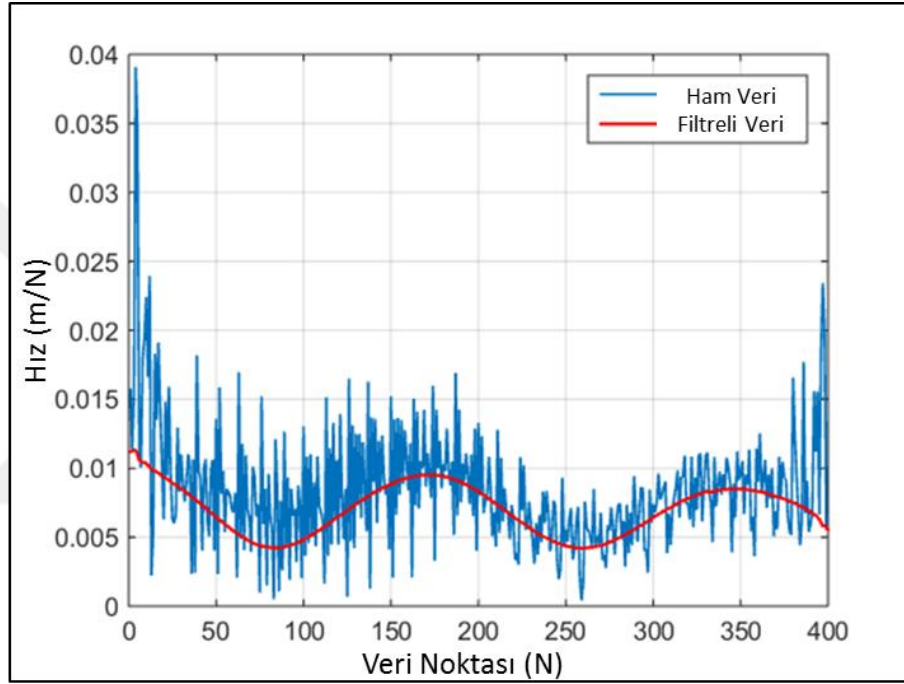
Önceki bölümde temel mantığı açıklanan TSA modelinin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalarda birisi, belirlenecek pencere uzunluğunun (L) veri uzunluğundan (N) küçük olmasıdır. Diğer önemli nokta ise öz değerin (r) tespit edilmesidir. Eğer öz değer, hatalı tespit edilirse gürültünün yerine farklı veriler elimine edileceğinden filtrenelen sinyal, orijinal sinyale benzemeyecektir. Pencere uzunluğu 50 ve öz değer 2 olarak belirlendiğinde Cam için elde edilen öz değer spektrum analiz sonuçları Şekil 3.15'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.15. Camın öz değer spektrumu.

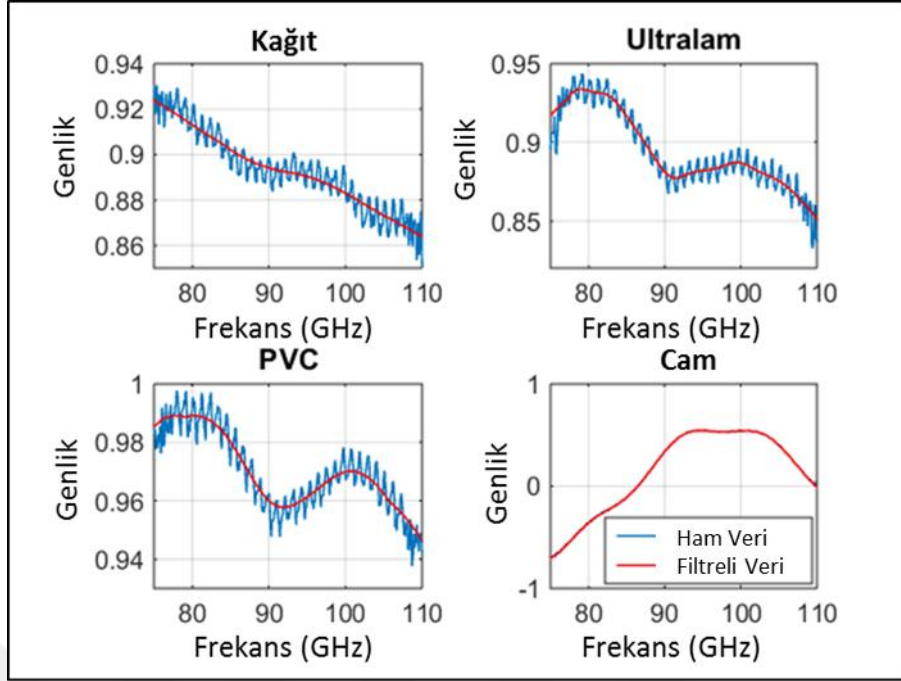
Pencere uzunluğu 50'nin altında bir değer seçilseydi öz değerin de değişmesi gerekirdi. Yani eğer pencere uzunluğu 30 olarak belirlenirse öz değer 1 olmak zorundadır. Birbiri ile bağlantılı olan bu iki parametre arasındaki ilişki, hata ve gürültünün azaltılması için deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. En iyi filtrenilmiş sinyal elde edilinceye kadar bu parametreler kullanıcı tarafından değiştirilerek uygun olan değerleri tespit edilir. Eğer uyum sağlanamaz ise tahmin edilen yeni sinyal orijinal sinyalden farklı bir genlik ve özelliğe sahip olarak ortaya çıkacaktır. Bunu ortadan kaldırmak için iki parametreye ait değerlerin seçimine özen gösterilmesi gerekmektedir.

W-bandında gerçekleştirilen dört farklı malzemelerin (Ultralam, PVC, Kâğıt ve Cam) TSA ile analizi gerçekleştirilmiştir. Hiçbir gürültü ve hatayı barındırmayan bir sinyal gibi görünen Cama ait ham ve filtrelenmiş verilerin türevleri alındıktan sonraki dalga formları Şekil 3.16’da gösterilmiştir. İki sinyalin genlikleri arasındaki fark ham veriye ait sadece birinci ve ikinci öz değerlerin seçilmesinden dolayı oluşmaktadır. Yani, 50 olan pencere uzunluğuna karşı Şekil 3.15’te belirtildiği gibi öz değer 2 alınarak mevcut sinyal en iyi şekilde filtrelenmiştir [80].



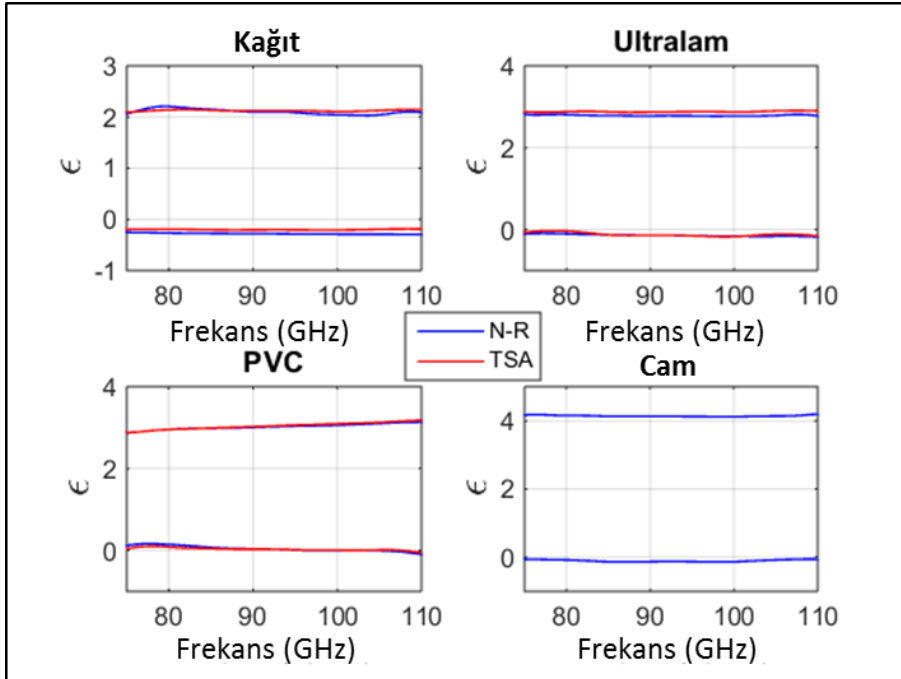
Şekil 3.16. Türevleri alınan ham ve filtrelenmiş sinyal.

Sinyallerin türevleri alındıktan sonra filtrelenmiş veri dizisinin başarılı bir şekilde elde edildiği tespit edilmiştir. Öz değerler toplamından orijinal sinyale %99 benzediği anlaşılan yeni sinyalin gerçek formu TSA’nın ikinci kısmı olan yeniden yapılandırmanın son basamağındaki işlem sonucunda Şekil 3.17’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Ultralam ve PVC malzemelerinin sinyal genlikleri birbirine benzemektedir. Kalibrasyonu iyi yapılmış Cam malzemesine ait sonuçlar, normalde birbiri üzerine çakışmasına rağmen Şekil 3.16’da gösterildiği gibi iki sinyal arasındaki farklılık TSA ile ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 3.17. Ham ve filtrelenmiş sinyallerin genlikleri.

TSA'nın performansı ile ulaşılan elektriksel geçirgenliğe ait sonuçlar Şekil 3.18'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.18. Dört malzeme için elektriksel geçirgenlik değerleri.

Ölçüm metodu ile alınan bütün değerlerin TSA gibi filtreleme işlemine tabi tutulması hedeflenen doğru ve kesin dielektrik özellikleri elde edebilmek için önemlidir. Hata ve gürültüden temizlenen ve orijinal verinin bütün özelliklerini taşıyan yeni sinyal, hesaplama tekniklerinin yardımı ile elektriksel geçirgenliği ortaya çıkarmak için kullanılabilir [80].

Ultralam 3850HT ve PVC malzemelerinin yaklaşık aynı elektriksel geçirgenlik değerlerine sahip olmasının sebeplerinden birisi elektromanyetik dalgaya vermiş oldukları tepkinin bir göstergesi olan iletim parametresi (S_{21}) genliklerinin hemen hemen aynı değer ve forma sahip olmasıdır. İki malzemenin de elektriksel geçirgenlik değerleri 2.9 ile 3.1 arasında frekans bandına bağlı olarak değişmektedir.

Hesaplama tekniklerinden Newton-Raphson ve İnce Levha (Thin Sheet) Yaklaşımı kullanılarak elde edilen değerler Çizelge 3.5'te sunulmuştur. Newton-Raphson sonuçlarının doğruluğunu göstermek için ikinci bir hesaplama tekniği olarak kullanılan Thin Sheet Yaklaşımı, 1 mm nin üzerindeki kalınlıklarda başarı gösterememektedir. Bu sebeple 3 mm kalınlığa sahip Cam malzemesi için elektriksel geçirgenlik değerinin reel kısım hesaplaması mevcut değildir.

Çizelge 3.5. Ölçülen malzemelerin elektriksel geçirgenlik değerleri.

| Malzeme | Kalınlık (mm) | Elektriksel Geçirgenlik | |
|----------|---------------|-------------------------|----------------------|
| | | Newton Raphson | İnce Levha Yaklaşımı |
| Ultralam | 0.17 | 2.87-2.91 | 2.82-2.88 |
| PVC | 0.15 | 2.95-3.05 | 2.90-3.10 |
| Kâğıt | 0.25 | 2.10-2.14 | 2.15-2.20 |
| Cam | 3 | 4.12-4.16 | - |

3.2.5. Kısmi En Küçük Kareler Yöntemi İle Sınıflandırma İşlemi

Malzemelerin gruplandırılabilmesi için onları tanımlayıcı etiketlerinin yani belirleyici özelliklerinin olması gerekir. Bu özellikleri S-parametreleri, elektriksel

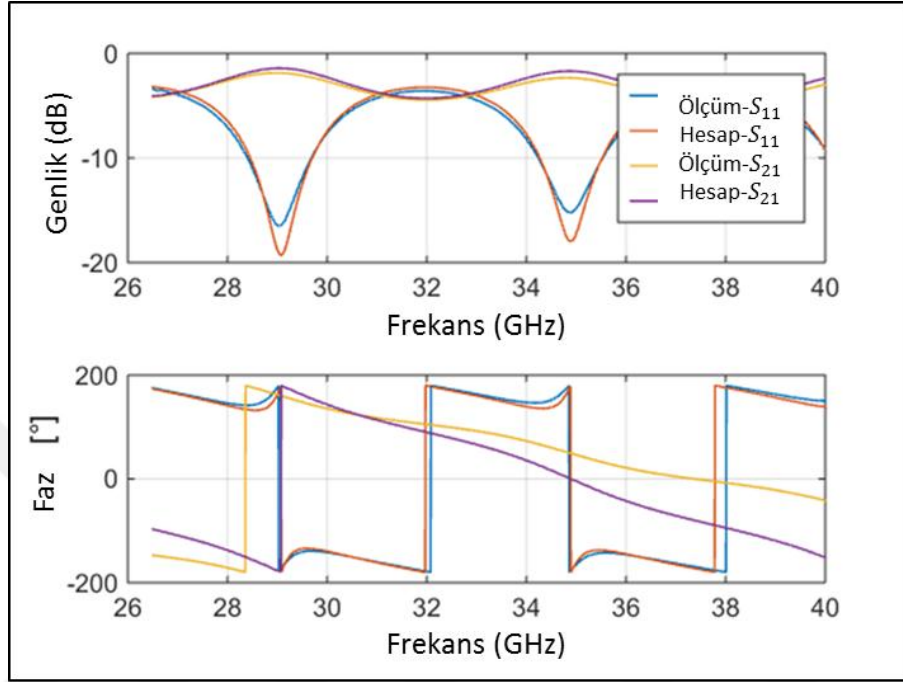
geçirgenlik veya kırılım indisleri şeklinde sıralayabiliriz. Bunlardan herhangi birisini kullanarak malzemelerin birbirinden farklı olduklarını göstermek patlayıcı ve tehlikeli maddelerin ayırt edilebilmesi için çok önemlidir. Temel Bileşenler Analizi (TBA), bu uygulama için uygun bir araç olsa da veri setinin boyutları farklı olduğunda yani oluşturulan veri setinin satır sayısı sütun sayısından fazla olma zorunluluğu olumsuz bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Kısmi En Küçük Kareler (KEKK) yönteminde ise herhangi bir ön şart bulunmaması kullanılabilirliğini artırmaktadır.

Önceki bölümde bahsedildiği üzere KEKK metodunun uygulanabilmesi için birçok yazılım veya program vardır. Kullanıcı ara yüzünün basit olmasından dolayı kullanımı kolay olan JMP (SAS Enstitü) paket programı yapılan çalışmada tercih edilmiştir. S-parametrelerinden oluşan veri setleri satır-sütun sayısına bağlı olmadan düzenlenebildiğinden birkaç farklı kombinasyonu denenmiş ve ayrışmanın en iyi şekilde yapılabildiği veri seti belirlenmiştir [81]. Üç farklı malzeme için farklı kalınlıklarda örnekler seçilmiştir. Bu malzemelere ait isimlendirme, kalınlık, frekans bant aralığı ve dielektrik sabitlerinin verildiği bilgiler Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

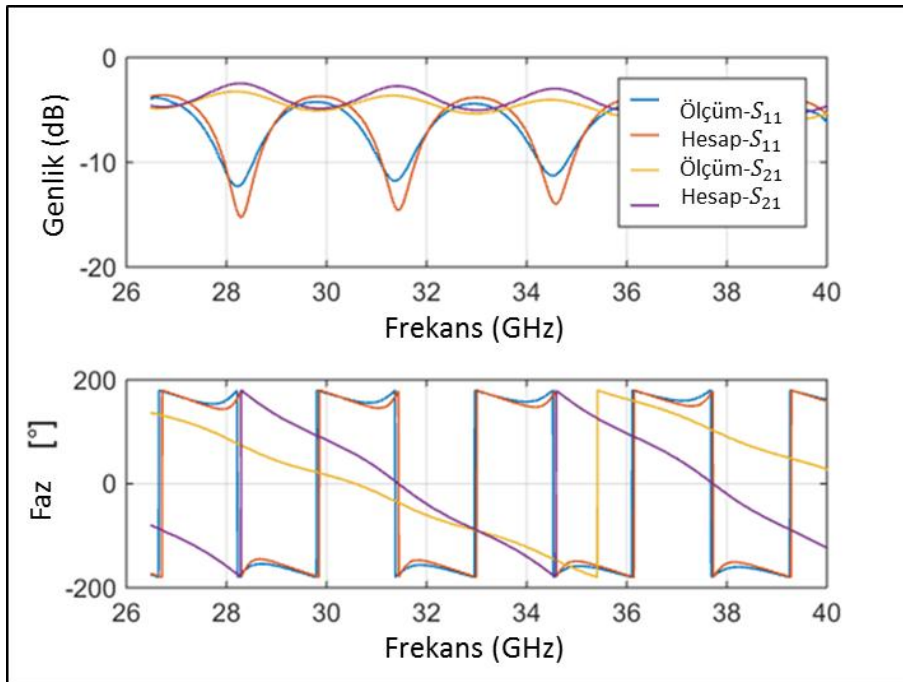
Çizelge 3.6. Sınıflandırma işleminde kullanılan malzemeler.

| Malzeme | Kalınlık (mm) | Frekans Bandı | Elektriksel Geçirgenlik | |
|----------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------|------|
| T1 | 2 | K-Band | 2.05 | |
| Teflon | T2 | 9 | X-Band | 1.99 |
| | T3 | 5 | W-Band | 2.04 |
| R1 | 0.95 | X-Band | 2.52 | |
| Rexolite | R2 | 5 | Ka-Band | 2.52 |
| | R3 | 12.85 | W-Band | 2.54 |
| G1 | 1.92 | Ka-Band | 6.86 | |
| Cam | G2 | 9.84 | Ka-Band | 6.87 |
| | G3 | 18.22 | Ka-Band | 6.87 |

Kalınlıklara göre S-parametrelerin genlik ve fazındaki değişimi, Cam malzemesi için 26,5-40 GHz frekans aralığındaki ölçüm sonuçlarından Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de verildiği gibi görebiliriz.

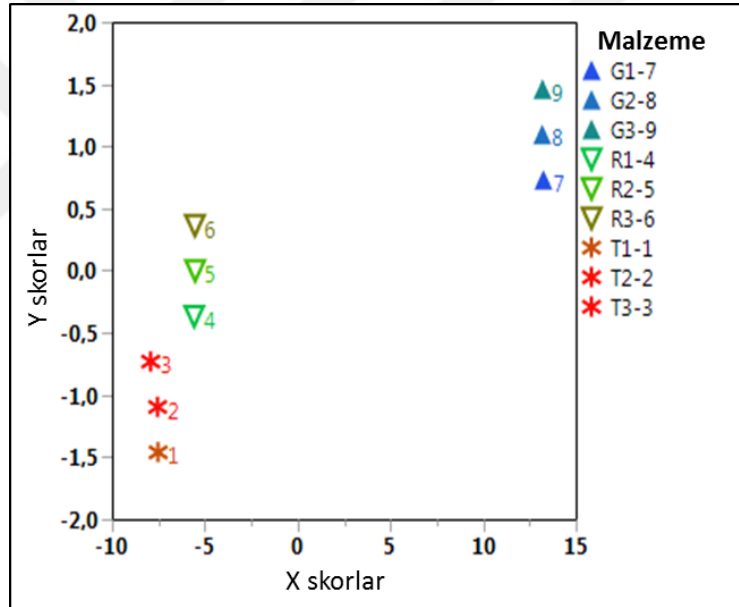


Şekil 3.19. 9,84 mm kalınlığındaki cam için faz ve genlik (dB) değeri.



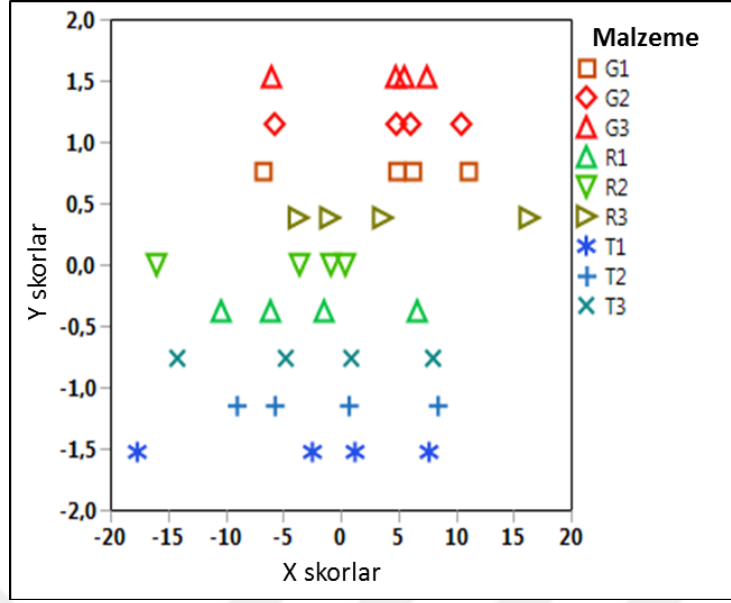
Şekil 3.20. 18,22 mm kalınlığındaki cam için faz ve genlik (dB) değeri.

Her malzeme için üç farklı kalınlık seçilmesinin sebebi, ölçülen S-parametrelerinin dolayısıyla elektriksel geçirgenlik değerlerinin çok az da olsa değişmesidir. Bu değişime rağmen elektriksel geçirgenliklerindeki değişim çok küçüktür ve kalınlık farkı büyük değilse ihmal edilebilir. İki farklı kalınlığa sahip aynı malzemenin genlik (dB) ve faz değerlerinin farklı olmasının sebebi, malzeme ile elektromanyetik dalga arasındaki etkileşimin frekans bant aralığına göre değişmesindedir. S-parametre değeri değişen malzemelerin sınıflandırılması için öncelikle hesaplanmış elektriksel geçirgenlikleri kullanılmış ve sonuçlar Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Oluşturulan veri setinin boyutu 9x401’dir. Ayrışmanın net olarak belirli olması ve malzemelerin kendi aralarında gruplanması ayırt edici bir özellik olan elektriksel geçirgenlik değerlerinden kaynaklanmaktadır.



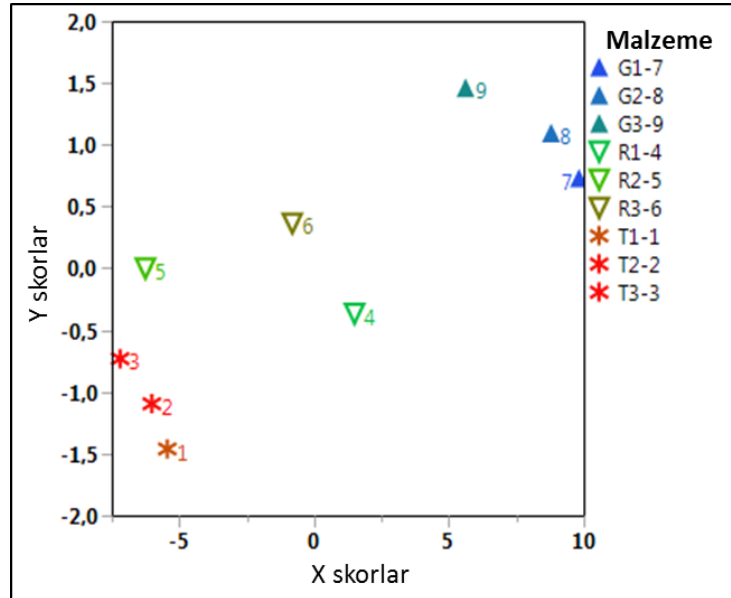
Şekil 3.21. Elektriksel geçirgenlik değerleri ile sınıflandırma.

KEKK metodunun kullanılmasının sebeplerinden birisi ayırt edici özellik olarak S-parametrelerinin belirlenebilmesidir. Bu işlemi yapmak için S-parametrelerinin reel ve imajiner kısımlarından oluşan veriler dokuz malzeme için alt alta derlendiğinde 36x401 boyutlarında bir matris ortaya çıkmaktadır. Bu veri seti ile elde edilen sınıflandırma sonuçları Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Bu işlem sonucunda sadece bir tane S-parametresinin reel ya da imajiner kısmı bile bir malzemeyi tanımlamak için yeterli olabileceği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.22. Alt alta eklenen S-parametreleriyle sınıflandırma.

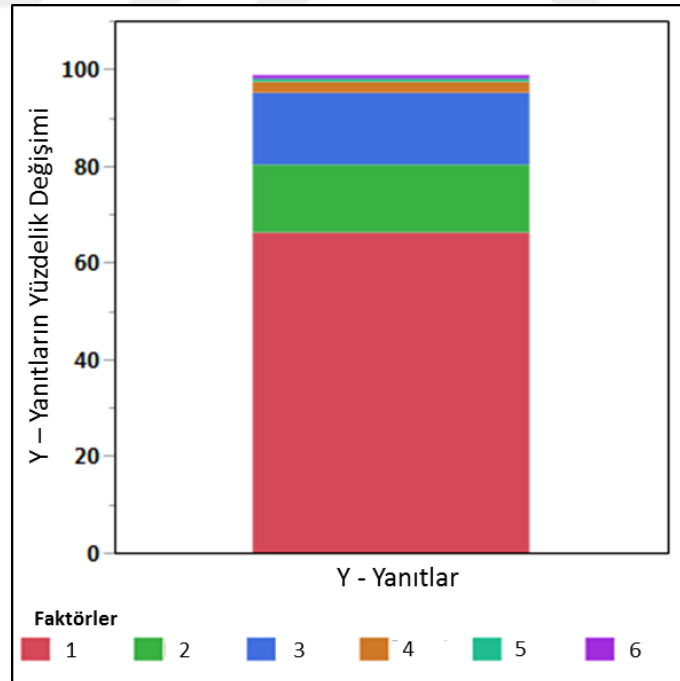
Alt alta eklenen değerlerin oluşturduğu her bir satır farklı bir malzemeye aitmiş gibi algılsada şekilden anlaşılacağı üzere KEKK'in tespit ettiği katsayıdan dolayı her malzemenin Y-skor (yanıt) değerleri aynıdır. Sadece X-skor (faktör) değerlerinde değişiklik vardır.



Şekil 3.23. Uç uca eklenen S-parametreleri ile sınıflandırma.

Satır ve sütun sayıları değiştirilerek oluşturulan yeni matrisin boyutu 9x3609'dur. Sütun sayısının fazla olmasının sebebi bir malzemeye ait olan dört farklı S-parametre değerlerinin uç uca eklenmesinden dolayıdır. Matris boyutunun büyük olması sınıflandırma için belirlenen faktör sayısını artırabilir. Fakat yapılan değişikliklere rağmen Y-skorum (yanıt) değişmediği görülür. Oluşturulan yeni veri setinin kullanılmasıyla elde edilen sınıflandırma sonuçları Şekil 3.23'te verilmiştir.

Veri seti boyutunun değişmesiyle belirlenen faktör (X) sayısı, önerilen metodun uygulanabilirliği açısından önemlidir. Çünkü kısa sürede analiz yapıp istenen bilgileri vermesi açısından faktör sayısının düşük olması beklenir. Uç uca eklenen S-parametre değerlerinin analizinde belirlenen faktör sayılarının gösterimi Şekil 3.24'te verildiği gibidir. JMP programı tarafından otomatik olarak belirlenen faktör sayısı değiştirilerek bu parametrenin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Programın belirlediği minimum sayı üçtür ve ilgili şekilde de ayrıntılı olarak görülmektedir. Dışarıdan müdahale ile değiştirilebilen faktör sayısı 10'a kadar artırılmış fakat Y-skorda (yanıt) herhangi bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 3.24. Temel bileşenlerin sınıflandırmaya etkisi.

KEKK metodunda faktör (X) olarak belirtilen parametre, TBA'da temel bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı veri seti kullanıldığında aynı sonuçların elde edilebilmesi için yaklaşık 10 tane temel bileşen seçilmesi gerekirken KEKK metodunda sadece üç faktör yeterli olmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere belirlenen üç faktörün yüzdelik toplamı yanıtların (Y) %95'ini kapsamaktadır [81].

Bilinen ya da bilinmeyen malzemelerin sınıflandırılmasında başarılı bir şekilde uygulanan KEKK metodu, test edeceği parametreye bağlı olarak çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bilinmeyen bir malzemeye ait olan değerler (S -parametresi, dielektrik sabiti, kırılım indisi), önerilen metot ile analiz edildiğinde oluşturulacak veri tabanı sayesinde hangi malzemeye ait olduğu hızlı bir şekilde belirlenebilir.

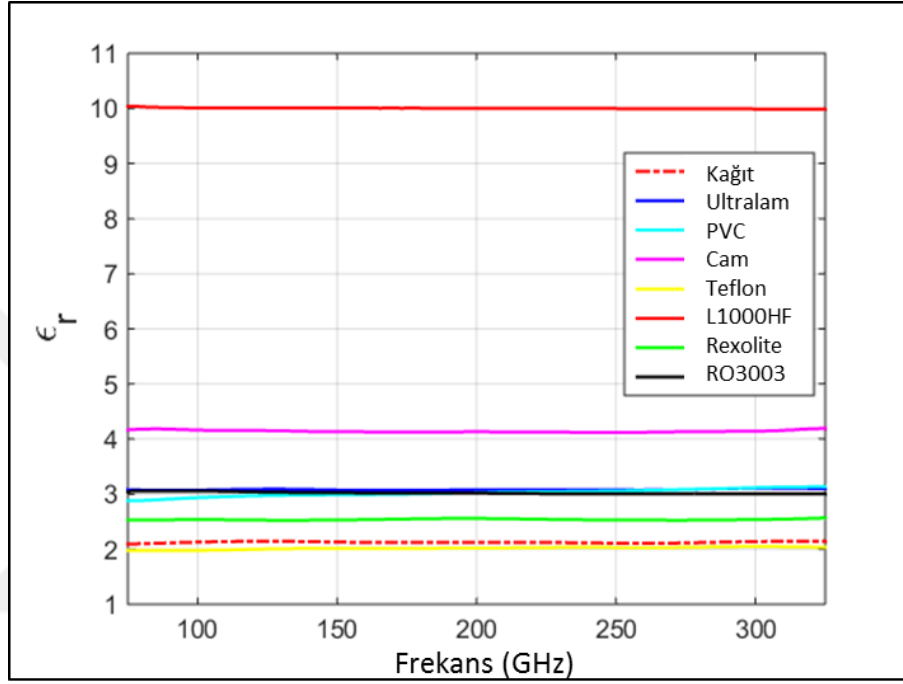
3.3. OPTİK BENZERİ SOÖ METODU

Serbest Ortam Ölçüm (SOÖ) metodunda dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi antenler arasındaki mesafe, düzlemsel dalga oluşması için belirli bir aralıkta tutulmalıdır. Ayrıca, optik bileşenlerden mercekle ve parabolik aynalar kullanılarak düzlemsel dalganın daha kısa bir mesafede oluşturulması sağlanarak antenler arasındaki uzaklık azaltılabilir.

SOÖ metodu ile 75-325 GHz frekans aralığında ölçüm yapabilmek için dört farklı deney düzeneğinin kurulması gerektiğinden anten yapıları (WR10, WR8.0, WR5.1 ve WR3.4) değiştirilerek dört farklı aşamada ölçümler alınmıştır. 500 GHz'e kadar ölçüm alınabilmesi için beşinci aşamada kullanılmak üzere WR2.2 anten yapısının kullanılması gerekmektedir. Yüksek frekanslarda üretilecek THz sinyalinin ortam şartlarından dolayı zayıflayacağı düşünüldüğünden optik bileşenlerden parabol aynanın kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca kullanılacak parabol ayna yardımı ile üretilen sinyalin malzeme üzerine odaklanması sağlanarak ölçüm sonucunda daha doğru veriler elde edilecektir.

Parabol ayna kullanılmadan yapılan ölçümler 75-325 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiş olup analiz edilen malzemelere (Kâğıt, Ultralam, PVC, Cam,

Teflon, L1000HF, Rexolite, RO3003) ait elde edilen sonuçlar Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Hesaplamalarda Newton-Raphson tekniği kullanılarak klasik başlangıç değer ataması yerine algoritmanın tahmin etmesi için en düşük ve en yüksek değerler girilmiştir. Sadece her malzemeye ait olan iletim parametre (S_{21}) verileri elektriksel geçirgenliğin belirlenmesinde kullanılmıştır.

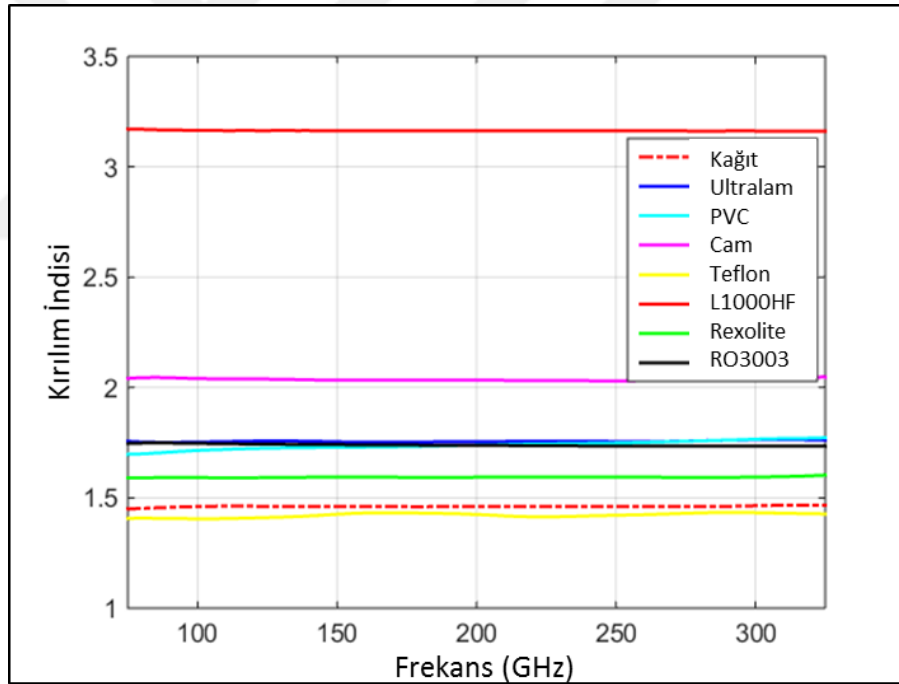


Şekil 3.25. SSÖ metodu ile elde edilen dielektrik sabitleri.

Analizi yapılan malzemelerden elde edilen sonuçlar bu frekans aralığında ilk defa paylaşılmıştır. Farklı deney düzeneği ile yapılacak ölçümlerin, farklı bir hesaplama tekniğinde kullanılmasından dolayı sonuçlarda ihmal edilebilecek çok az bir fark ortaya çıkabilir. Frekans bandı genişlediği için elektriksel geçirgenlik değerindeki değişim sabit olmadığından her malzemeye ait kalınlık ve elektriksel geçirgenlik değerleri Çizelge 3.7'de gösterilmiştir. Kalınlıkların farklı olmasının sebebi Ultralam, L1000HF, RO3003, Rexolite malzemelerinin üretici firmadan temin edildiği gibi ölçüme tabi tutulmasındandır. Cam malzemesi normal pencerelerde kullanılan bir malzeme olup PVC ve Kâğıt ise ticari olarak kolaylıkla temin edilebilen malzemelerdir.

Çizelge 3.7. Geniş bant ölçümde kullanılan malzemeler.

| Malzeme | Kalınlık (mm) | Elektriksel Geçirgenlik |
|----------|---------------|-------------------------|
| Kâğıt | 0.15 | 2.10-2.14 |
| Ultralam | 0.17 | 2.95-3.10 |
| PVC | 0.25 | 2.90-3.05 |
| Cam | 3 | 4.12-4.16 |
| Teflon | 4 | 1.98-2.05 |
| L1000HF | 3.20 | 10.05-9.95 |
| Rexolite | 12.85 | 2.52-2.55 |
| RO3003 | 1.53 | 2.99-3.05 |



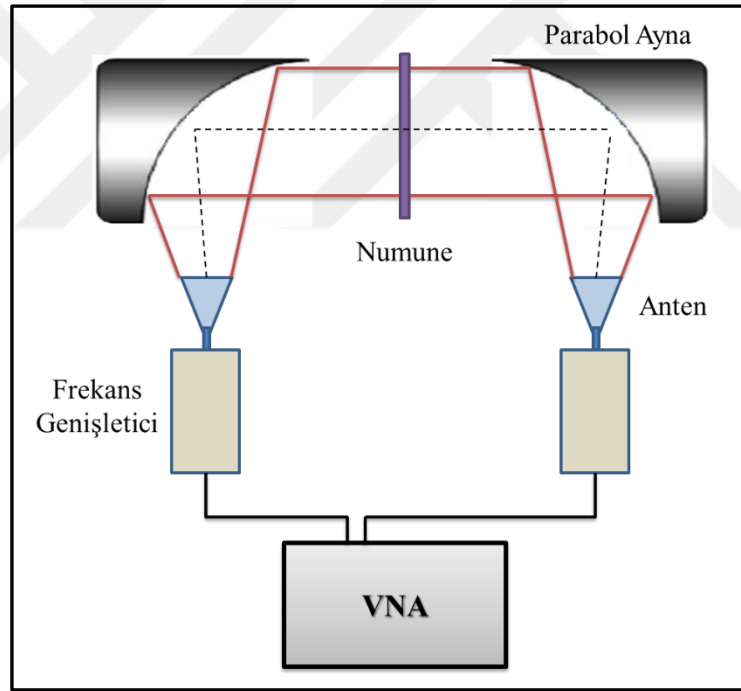
Şekil 3.26. Malzemelere ait kırılım indislerinin gösterilmesi.

Malzemelere ait kırılım indislerinin bulunması için;

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3.13)$$

denkleminde yararlanılır. ϵ_r ve μ_r malzemeye ait elektriksel ve manyetik geçirgenliği ifade eder. Denklem 3.13 kullanılarak elde edilen malzemelere ait kırılma indisleri Şekil 3.26’da gösterilmiştir.

Üretilen THz sinyallerinin daha iyi hizalanması ve numune üzerine ortalı bir şekilde gönderilebilmesi için parabol aynalar kullanılmakta ve ölçüm sistemi, optik sistem bileşenleri ile mikrodalga sistem bileşenlerinden oluştuğundan dolayı yeni sisteme optik-benzeri ölçüm sistemi adı verilmektedir. Parabol aynaların kullanılmasının bir diğer katkısı da SOÖ metodu ile küçük ebatlı malzemelerin analizine imkân sağlamasıdır. Böylece numune boyutu problemini SOÖ metodu için ortadan kaldırmaktadır. Şekil 3.27’de optik benzeri ölçüm sistemi ve ışın yolları gösterilmektedir.



Şekil 3.27. Optik-benzeri serbest ortam ölçüm metodu.

Gelen ışını hizalamak için kullanılan parabol aynaların konumlandırılmasına dikkat edilmelidir. Optik sistemlerde (ZDS) kızılötesi kamera yardımı ile FİA kullanılmadan önce gelen ışının hizalanması sağlanır. Üretilen THz sinyali parabol aynaya gönderilir ve buradan dairesel şekilde hizalanarak diğer parabol aynaya iletilir. ZDS sistemlerindeki ışının dalga boyu 800 nm civarında olduğu için kızıl

ötesi kamera ile hizalanması kolaydır, fakat bu durum SOÖ metodu için mümkün değildir. Bundan dolayı parabol aynaların konumu belirlenirken defalarca ölçüm almak gerekebilir.

Optik benzeri SOÖ metodu ile alınan ölçüm sonuçlarına geçmeden önce bazı matematiksel yaklaşımların verilmesi faydalı olacaktır. SOÖ metodu ile THz sinyallerin üretilme zorluğu göz önünde bulundurulduğunda elde edilen sinyallerdeki hataların ve istenmeyen durumların ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu sebeple ölçülen sinyallerin aslına uygun şekilde düzeltilmesi ve elektriksel özelliklerin hesaplanması için aşağıdaki işlemler yapılmalıdır. Sinyal düzeltme işleminin yapılabilmesi için numuneli ve numunesiz iki farklı ölçüm alınmıştır. Bu ölçümler sonucunda elde edilmek istenen iletim (S_{21}) ve yansıma (S_{11}) parametreleri iki ölçüm (numuneli ve numunesiz) değerini kullanarak

$$S_{21_d} = \frac{S_{21_m}}{S_{21_h} e^{(j\beta l)}} \quad (3.14)$$

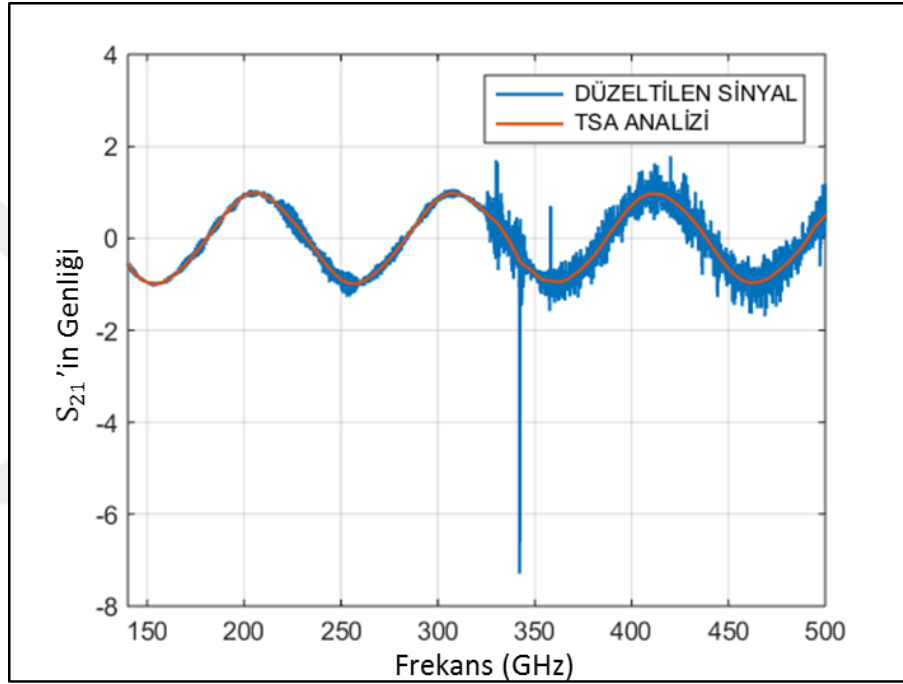
$$S_{11_d} = \frac{S_{11_m} - S_{11_h}}{S_{21_h} e^{(j\beta l)}} \quad (3.15)$$

şeklinde yeniden düzenlenir. Kullanılan indisler sırasıyla m : malzeme, d : düzeltme ve h : hava şeklindedir. l ise ölçülen malzemenin kalınlığını göstermektedir. Beta değeri

$$\beta = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (3.16)$$

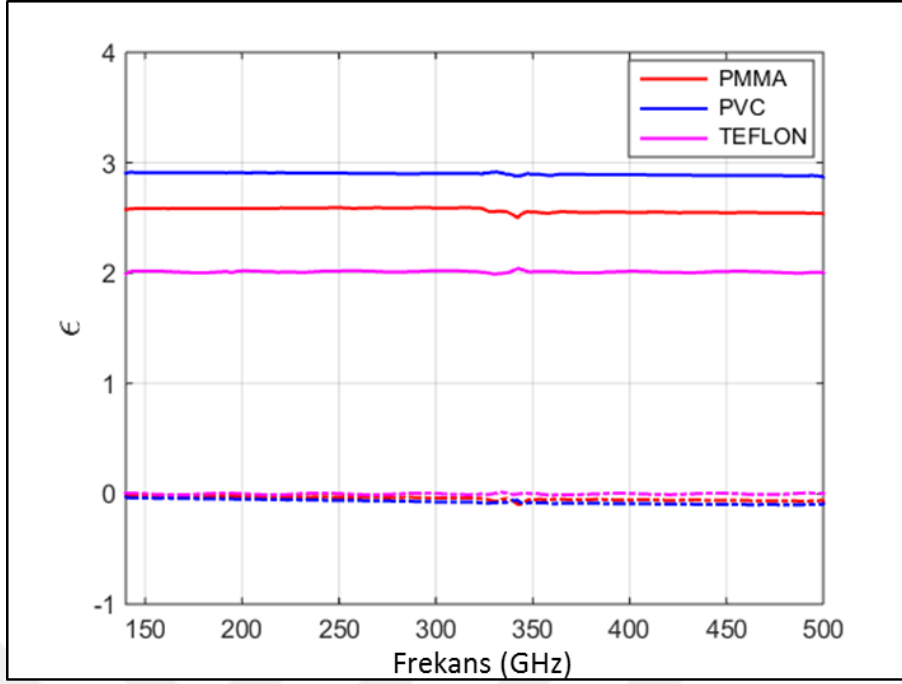
eşitliğinden elde edilir. 140-500 GHz frekans aralığında analiz edilen malzemelerin (PVC, Teflon ve PMMA-polimetilmetakrilat) dielektrik özellikleri hesaplanırken Newton-Raphson tekniği kullanılacağı için sadece iletim parametresi (S_{21}) denklem 3.14 ile yeniden elde edilmiştir. Bazı sinyallerde hala mevcut olan gürültü ve hataların azaltılması için filtreleme yöntemlerine ihtiyaç duyulabilir.

Optik-benzeri SOÖ metodu kullanılarak 325 GHz'e kadar yapılan ölçümler birkaç defa tekrarlanarak kalibrasyon işlemi düzgün yapıldığında malzemeye ait doğru sinyalin ölçümünü gerçekleştirmek mümkündür. Fakat 325-500 GHz frekans aralığındaki ölçümler için yukarıda verilen düzeltme adımları yapılmış olmasına rağmen kalan hata ve gürültüleri ortadan kaldırmak için Şekil 3.28'de gösterildiği gibi TSA yöntemine başvurulmuştur. Ölçümler, 140-500 GHz frekans bant aralığında gerçekleştirilmiştir.

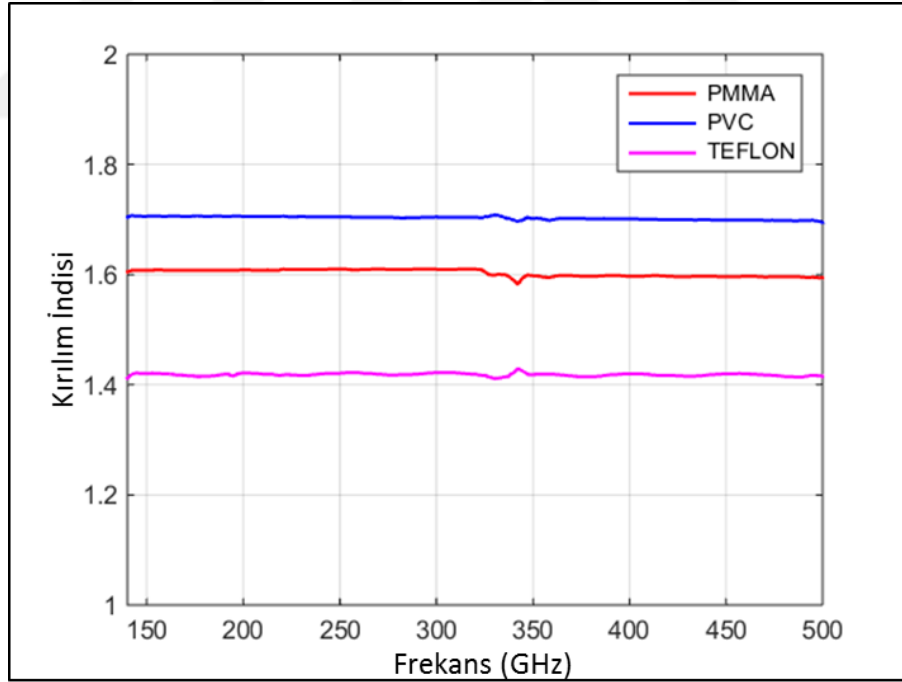


Şekil 3.28. Teflon malzemesine ait düzeltilmiş sinyal.

Yukarıda sıralanan aşamalardan geçirilmiş iletim parametresi (S_{21}) kullanılarak hesaplanan malzemelere ait elektriksel geçirgenlik değerleri Şekil 3.29'da verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, ölçülen malzemelere ait iletim parametre genliklerinin yüksek olması yani ölçülebilir olması bir avantaj sağlamaktadır. PMMA, 325 GHz'e kadar 2,6 (F/m) civarındayken elektrik katsayı değerine sahipken, 325 GHz'den sonra bu değer 2,55'e kadar düşmektedir. Aynı durum, PVC malzemesi için de geçerlidir. PVC'nin elektriksel geçirgenlik değeri, 325 GHz'e kadar 2,9 (F/m) civarındayken 325-500 GHz arasında 2,87'ye kadar düşmektedir. Bu malzemelere ait kırılım indisleri 140-500 GHz frekans aralığında Şekil 3.30'da verildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.29. Optik-benzeri SOÖ metodu ile elde edilen sonuçlar.



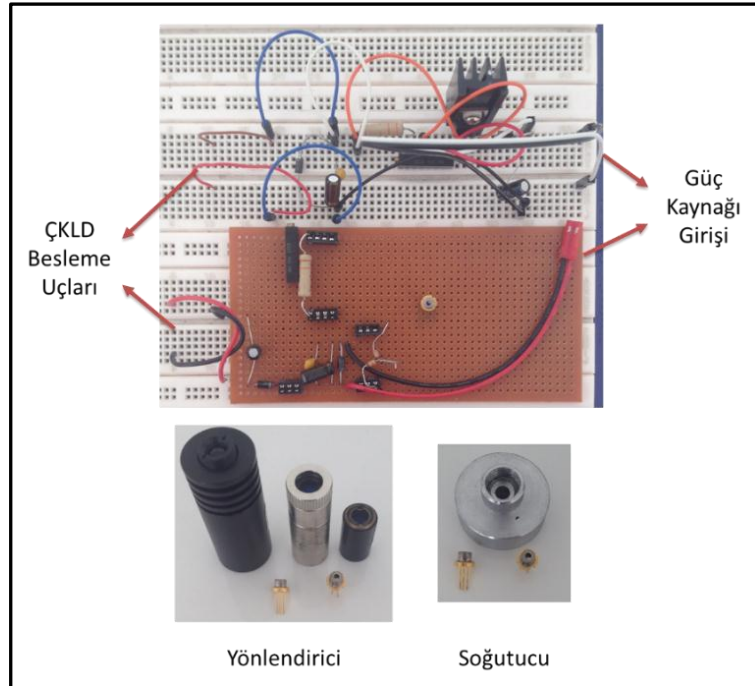
Şekil 3.30. Malzemelere ait kırılım indisleri.

THz frekans bölgesinde (0,1 – 0,5 THz) SOÖ metodunun aktif olarak kullanılabilmesi için malzemeden yansıyan ve geçen sinyallerin gürültü ve hatadan arındırılmış olması gerekmektedir. Özellikle üretilen THz sinyallerinin ortam

şartlarından çok fazla etkilendiği gerçeğinden dolayı 0,3 THz'den sonra yapılan ölçümlerde laboratuvar içerisindeki sıcaklık ve nem değerleri önem kazanmaktadır. İdeal olarak nem oranı %50'nin altında olması gerekirken sıcaklık değerinin ise 22 °C'nin altında olması yapılacak ölçümleri daha başarılı hale getirecektir. Eğer ortamdaki nem oranı yüksek değerlerde ise üretilen THz sinyali ortamdaki su zerrecikleri tarafından emileceği için ölçüm işleminde iyi bir başarı performansı sağlanamayacaktır.

3.4. ÇKLD-ZDS SİSTEMİNİN OPTİMİZASYONU

Aşağı Frekans Dönüşüm (AFD) yöntemlerinden Terahertz Zamana Dayalı Spektroskopi (THz-ZDS) sistemlerine alternatif olarak önerilen ve başarılı sonuçlar elde edilen Çok-Kipli Lazer Diyotların ışın kaynağı olarak kullanıldığı spektroskopi sistemleri (ÇKLD-ZDS) henüz geliştirilme aşamasındadır. Pahalı olan lazer ve soğutucu sürücü sistem elemanlarının yerine daha ucuz ve basit olanları tasarlanmıştır. Laboratuvar ortamında birçok denemesi yapılarak geliştirilen akım kontrollü sürücü devresinin bağlantı yolları Şekil 3.31'de gösterilmiştir.

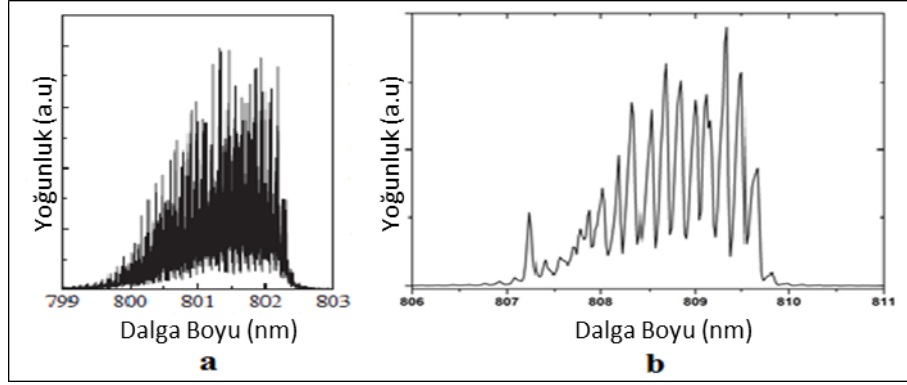


Şekil 3.31. Geliştirilen ÇKDL sürücü devresi.

ÇKLD'nin ışıması başarılı bir şekilde gerçekleştirildikten sonra ölçüm zamanını ısınmadan tamamlayabilmesi için alüminyumdan yapılmış 2,54 cm çapında bir soğutucu kullanılmıştır. THz sinyal üretimine geçilmeden önce soğutucunun performansı sıcaklık ölçer ile takip edilmiş ve 10 dakikadan sonra soğutucu sıcaklığının 0,1 mertebesinde arttığı gözlemlenmiştir. Kısa süreli ölçümler için yeterli olan bu soğutucu, uzun sürecek ölçümlerde yetersiz kalacağından ÇKLD'den çıkan sinyallerde (808 nm) kip kaymalarına sebep olacaktır.

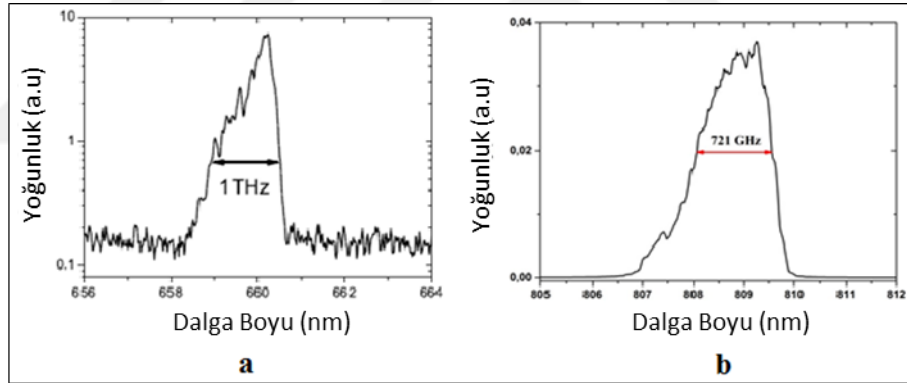
ÇKLD'nin çıkışındaki ışın, dairesel ve hizalanmış bir şekilde üretilmemektedir. Işının hizalanarak antenlere gönderilmesi için mercek yapıların kullanıldığı yönlendiricilere ihtiyaç vardır. Kırılım indislerinin farklı olmasından dolayı lazer ışınının dalga boyu aralığına göre belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 3.31'de gösterilen ve farklı odak noktasına sahip merceklerin kullanıldığı yönlendiriciler sırasıyla test edilmiştir. Buradaki amaç, hizalanmış ışının gidebildiği mesafeyi artırmaktır. Çünkü en az 60 cm uzunluğa sahip bir yol izleyerek algılayıcı Foto İletken Antene (FİA) ulaşacak olan ışının yatay ve dikey doğrultudaki yönlerinin değişmemesinin yanında dairesel boyutunun da (2 mm çapında) bozulmaması gerekmektedir.

Optik Spektrum Analizör (OSA), optik dalga boylarının güç dağılımını (spektrumunu) ölçer. ÇKLD'nin sahip olduğu her bir kipi aralıkları nanometre olarak tespit edilir. Bu değer, frekansa çevrildiğinde Koch grubu tarafından yapılan çalışmalarda 24 GHz olarak belirtildiği görülür [1]. ÇKLD sürücü devresinin akım değeri yaklaşık olarak 340 mA, OSA'nın çözünürlüğü 0.03 nm ye ayarlandığında üretilen sinyalin OSA' da okunan güç değeri yaklaşık 75 μ W olarak görülmüştür. Tarama genişliği (span) 10 nm ve frekans 10 Hz değerleri ile kip aralığı (mode spacing) 0,16 nm olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin frekans karşılığı ise 73,4 GHz dir. Şekil 3.32'de Morikawa grubunun kullanmış olduğu lazer diyot (a) ile analizi yapılan lazer diyotun (b) kiplerinin spektrumları gösterilmiştir. Spektrum ölçümü neticesinde ÇKLD dalga boyu (λ_c) 808 nm olarak elde edilmiştir [15].



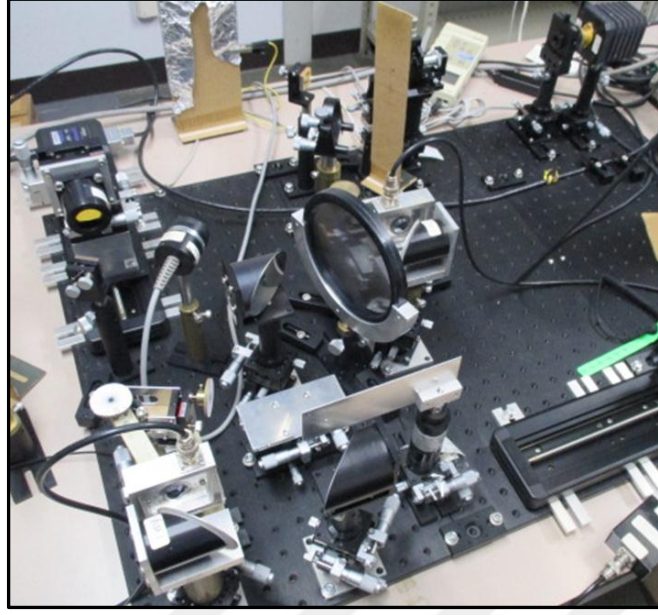
Şekil 3.32. OSA analizi ile spektrumda kiplerin gösterimi.

Koch grubunun kullanmış olduğu ÇKLD (a) ile analizi yapılan ÇKLD'nin (b) spektrumları Şekil 3.33'te gösterilmektedir [1]. Spektrum analizi sonucunda lazer diyotun spektrumu 721 GHz olarak tespit edildi. Bu durumda THz üretimi esnasında bant genişliği 0,3 – 0,4 THz aralığında olacaktır.



Şekil 3.33. ÇKLD'nin spektrumu.

Koch grubu tarafından yapılan çalışmalarında tekrarlama zamanı 41 ps iken spektrum analizi yapılan lazer diyotun tekrarlama zamanı 13,6 ps dir. Bu değer Morikawa çalışma grubu için 20 ps dir. Δf değerinin küçük olmasının avantajı tekrarlama süresinin artmasına neden olmaktadır. Böylelikle ekonun etkisi azaltılabilir. Kip aralığı geniş olunca THz atımları birbirine daha yakın olur ve bu durum THz üretim kalitesini etkiler.



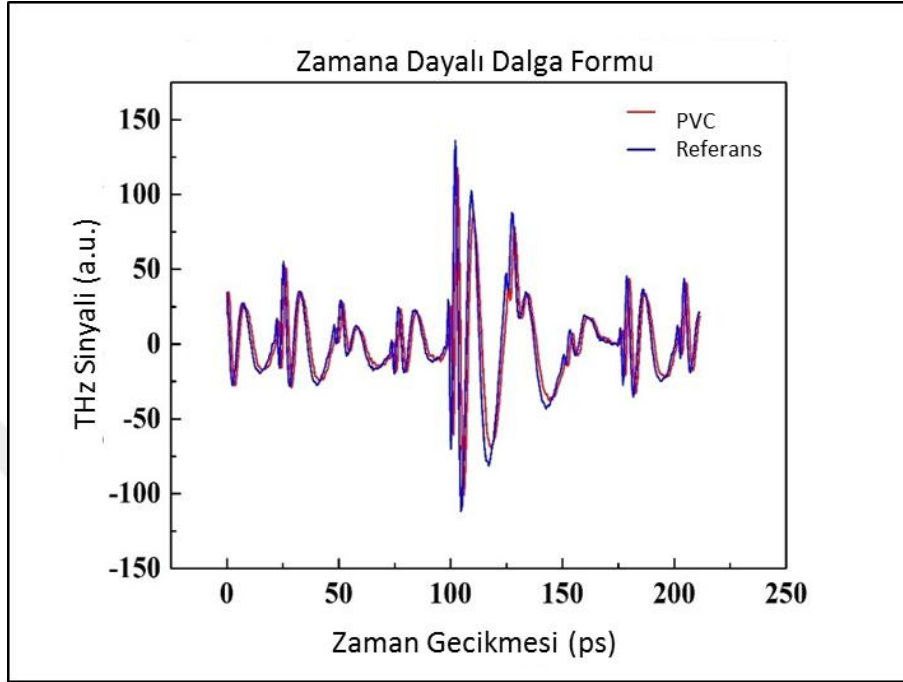
Şekil 3.34. ÇKLD-ZDS sistemi.

Üretilen THz sinyallerinin daha iyi toplanıp hizalanarak gönderilmesi için kullanılan parabol aynaların odak noktaları 10 cm'nin altında olursa ortam şartlarından dolayı zayıflayan THz sinyallerinin güçleri korunmuş olur. Bir başka dikkat edilmesi gereken nokta ise ÇKLD-ZDS ile üretilen THz sinyallerinin genlik değerleri (Volt ya da Amper) THz-ZDS sistemlerine göre çok düşük olduğundan THz sinyali hem düzgünce toplanıp hizalanmalı hem de izlediği mesafe kısa olmalıdır. Şekil 3.34'te ÇKLD'nin kullanıldığı anten-anten spektroskopi sistemi gösterilmiştir.

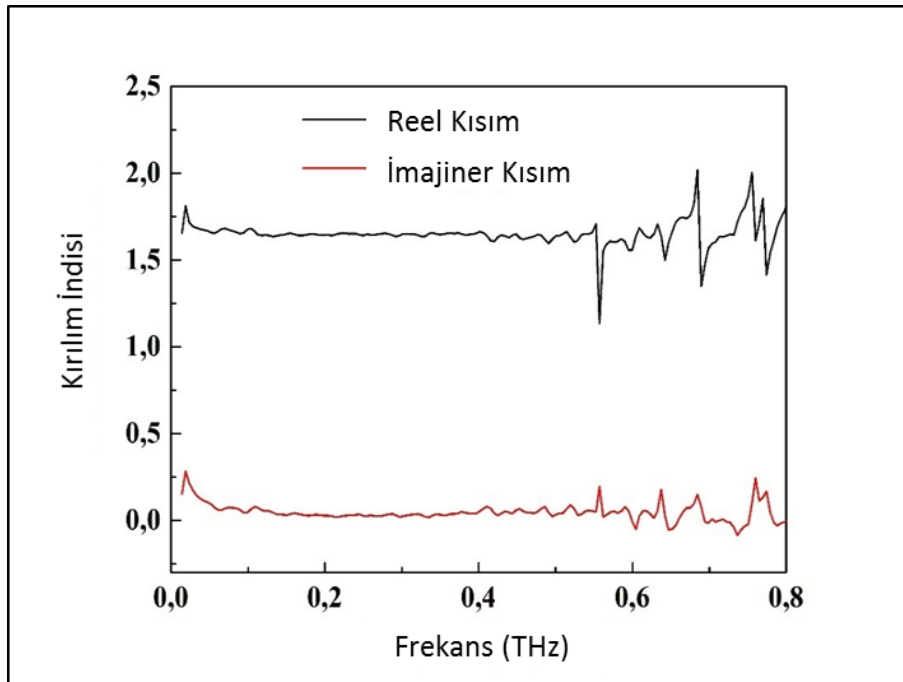
ZDS sistemleri ile yapılan malzeme karakterizasyonu sonucunda elektriksel geçirgenlik değerini tespit etmek için öncelikle kırılım indisinin hesaplanması gerekmektedir. THz spektroskopi sistemlerinde temel olarak ölçülen iki sinyal (numuneli ve numunesiz) arasındaki genlik farkı ile malzemenin soğurma kabiliyeti hesaplanırken üretilen THz sinyalinin piko saniyeler mertebesindeki zamanda kayması ise kırılım indisini vermektedir.

Hazır kurulu sistemde sürücü ve soğutucu birimlerinin yanı sıra daha ucuz ÇKLD kullanılarak oluşturulan spektroskopi sistemi ile yapılan ölçüme ait PVC örneği için toplanan sinyalin zamanda dayalı dalga formu (numuneli ve numunesiz ölçüm için) Şekil 3.35'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Hesaplama işlemleri için genelde

Origin ve Pkgraph paket programları tercih edilmektedir. Origin programının görsel sunum imkânlarının Pkgraph programına göre daha iyi olmasından dolayı analiz çalışmalarında Origin paket programı tercih edilmiştir.



Şekil 3.35. ÇKLD-ZDS ölçümü ile PVC malzemesinin analizi.



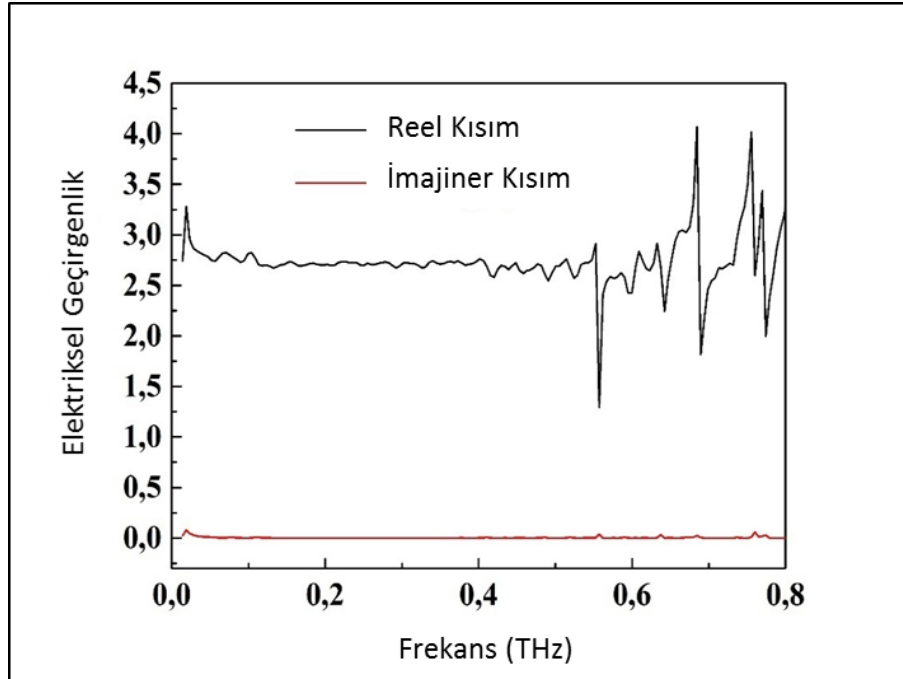
Şekil 3.36. PVC malzemesinin kırılma indisi.

Kırılım indisinin hesaplanmasında iki farklı formül zamana ve frekansa bağılı olarak kullanılmaktadır. Malzeme ile etkileşime giren THz sinyalinin referans ölçüme göre zamandaki kayması Δt (s) ile kırılım indisi;

$$n = \frac{c\Delta t}{2d} \quad (3.17)$$

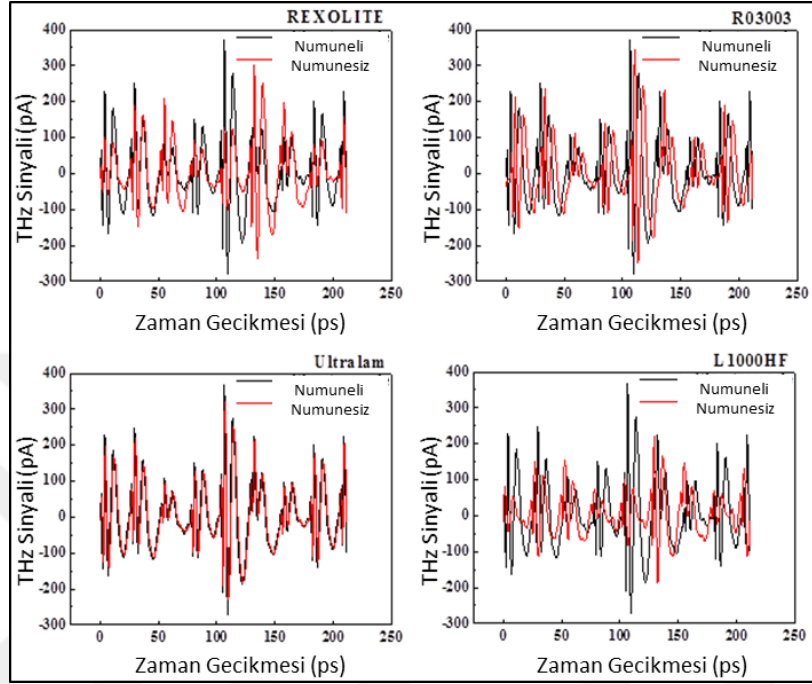
şeklinde hesaplanır. İfadede kullanılan c ışık hızını (mm/s) ve d malzemenin kalınlığını (mm) belirtir. Denklem 3.17 yardımı ile PVC'ye ait kırılım indisi Şekil 3.36'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Spektroskopi sistemi ile elde edilen bu ölçümler sonucunda 0,6 THz'den sonra sinyalde bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Bazı malzemelere ait ölçümler için ise THz sinyallerinin 0,8 THz'e kadar iyi olduğu gözlenmiştir. Ölçüm kabiliyeti yaklaşık 1,2 THz'e kadar mümkündür fakat üretilen THz sinyalinin kalitesi bakımından malzeme karakterizasyonunun doğru bir şekilde yapılabilmesi için sonuçların gösterimi 0,8 THz ile sınırlandırılmıştır. Denklem 3.13 kullanılarak PVC'ye ait elektriksel geçirgenlik (ϵ) Şekil 3.37'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

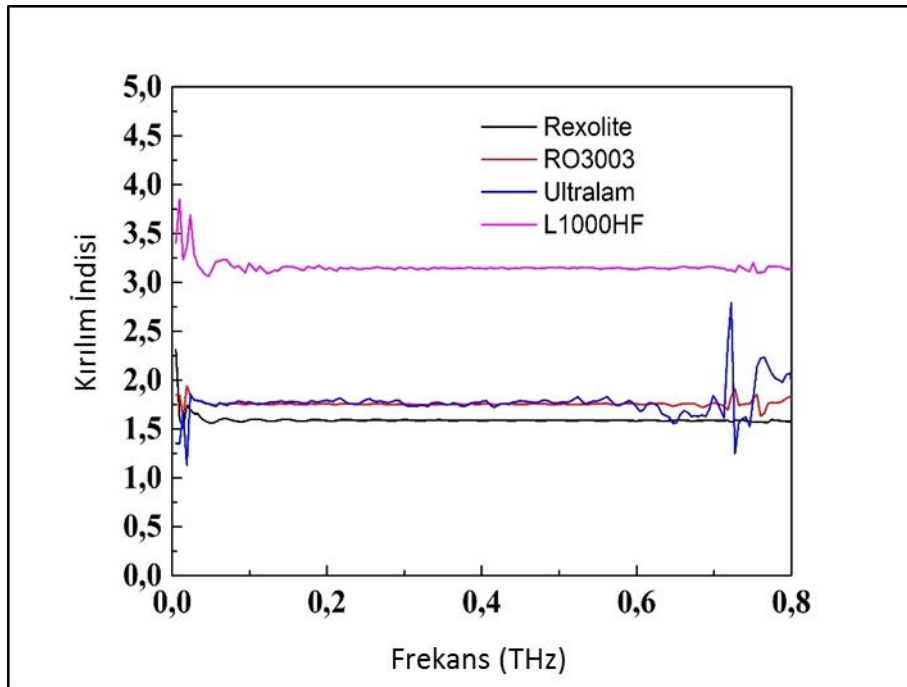


Şekil 3.37. PVC'nin elektriksel geçirgenlik değeri.

Analizi yapılan Rexolite, RO3003, Ultralam 3850HT ve L1000HF malzemelerinin THz sinyaline göstermiş oldukları tepkiler, referans ölçümle aralarındaki farklılıkların da gösterilmesiyle Şekil 3.38’de verilmiştir.

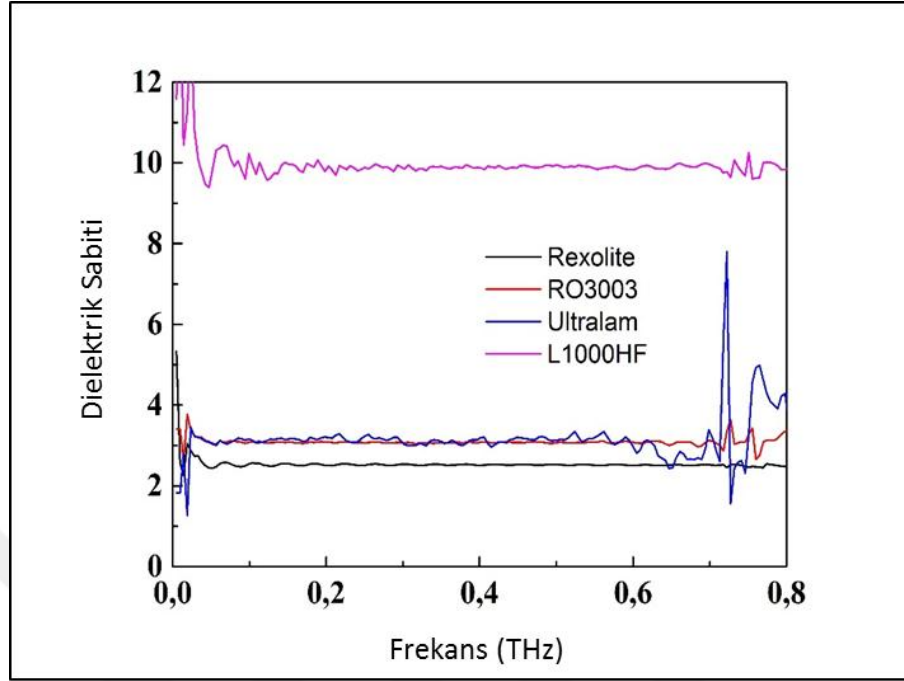


Şekil 3.38. Malzemelerin THz sinyali ile etkileşimi.



Şekil 3.39. Malzemelere ait kırılım indisleri.

Aynı malzemelere ait kırılım indisleri hesaplanarak Şekil 3.39’da gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Elektriksel geçirgenliğin reel kısımları.

Kırılım indislerinden yola çıkarak elde edilen elektriksel geçirgenlik değerlerinin reel kısımları Şekil 3.40’ta verilmiştir. ÇKLD-ZDS sistemi kullanılarak üretilen THz sinyalinin kalitesi ultra-hızlı lazer kaynaklarının kullanıldığı spektroskopi (THz-ZDS) sistemleri ile aynı değil ama elde edilen sonuçlar onun kadar başarılıdır. THz-ZDS sistemine nazaran ÇKLD-ZDS sisteminin ucuz ve kompakt oluşu sistem üzerindeki araştırmaların artırılması için yeterli bir sebeptir. Ayrıca, bu çalışmada mevcut lazer sürücü ve soğutucu birimlerinin yerine daha ucuz sürücü devresi ve soğutucu biriminin kullanılması artı bir avantaj sağlamıştır.

Çok-kipli lazer diyot ışımaya başladığında iyi derecede soğutulmaz ise kip aralıklarında (mode spacing) meydana gelebilecek kaymalardan dolayı THz sinyali üretilmeyecektir. Soğutucu basit ve düşük performansta olduğu için en fazla 15 dakika sürecek kısa süreli ölçümlerde başarı sağlanmıştır. Akım kontrollü sürücü devresinin kullanımı esnasında ÇKLD’ye uygulanabilecek akım değeri aşıldığında ÇKLD artık normal bir led gibi davranmaya başlar ve 808 nm dalga boyunda lazer ışını üretimi durur.

3.5. ÇKLD-ZDS VE SOÖ METOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar gözden geçirildiğinde 100 GHz in üzerinde yani THz frekans bölgesinde genelde ZDS sistemi ile malzemelerin dielektrik özellikleri incelenmiştir. Son yıllarda 300 GHz'e kadar SOÖ metotları kullanılmaya başlanmıştır. SOÖ metodu ile elde edilen sonuçlar ise Aşağı Frekans Dönüşüm (AFD) yöntemlerinden THz-ZDS ile iki çalışma grubu tarafından karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ise SOÖ metodunun sonuçları THz-ZDS'den daha ucuz olan ve ışın kaynağı olarak Çok-Kipli Lazer Diyot (ÇKLD) kullanan ZDS sistemi ile karşılaştırılarak metotlar arasındaki farklılıklar ortaya konmuştur.

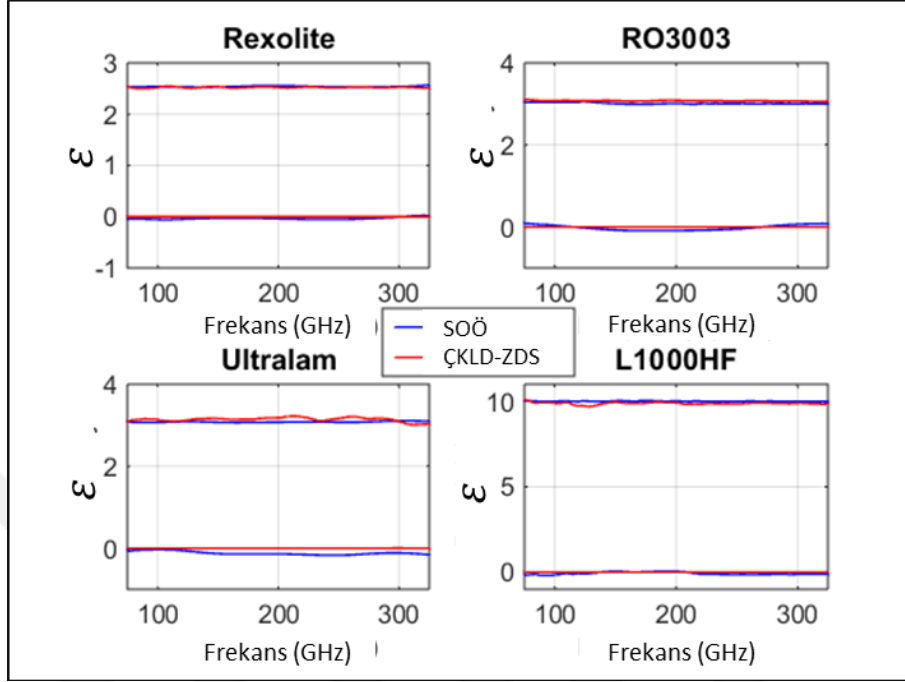
Çeşitli kalınlıkta farklı malzemelere ait ölçümler, iki farklı ölçüm metodu (SOÖ ve ÇKLD-ZDS) analiz edilip ihtiyaç duyulan hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu iki sistemden elde edilen ölçümler neticesinde elektriksel geçirgenlik ve kırılım indisi parametrelerin karşılaştırılması 75-325 GHz frekans aralığında yapılmış ve ölçümleri yapılan malzemelerin özellikleri Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Ölçümü yapılan malzemelerin özellikleri.

| Malzemeler | Kalınlık (mm) | Ölçüm Metodu | | Teorik |
|------------|------------------|--------------|----------|--------|
| | | SOÖ | ÇKLD-ZDS | |
| Rexolite | 12.85 | 2.537 | 2.528 | 2.53 |
| RO3003 | 1.53 | 3.016 | 3.054 | 3.0 |
| Ultralam | 0.17 | 3.072 | 3.154 | 3.14 |
| L1000HF | 3.20 | 10.025 | 9.965 | 10.0 |

Malzemelere ait elektriksel geçirgenlik değerlerinin genel ortalaması alınarak çizelgeye eklenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde belirli bir sapmanın dışında karşılaştırma sonucunda değerlerin birbirine yakın çıkması beklenmektedir. Çünkü sistemler farklı olsa da ürettikleri sinyal aynı frekans ve dalga boyuna sahip THz atımı olacaktır. Fakat iki ölçüm sisteminin farklı ortamlarda çalışmasının yanında ölçümden sonra tercih edilen hesaplama tekniklerindeki farklılıkların da sonuçlara

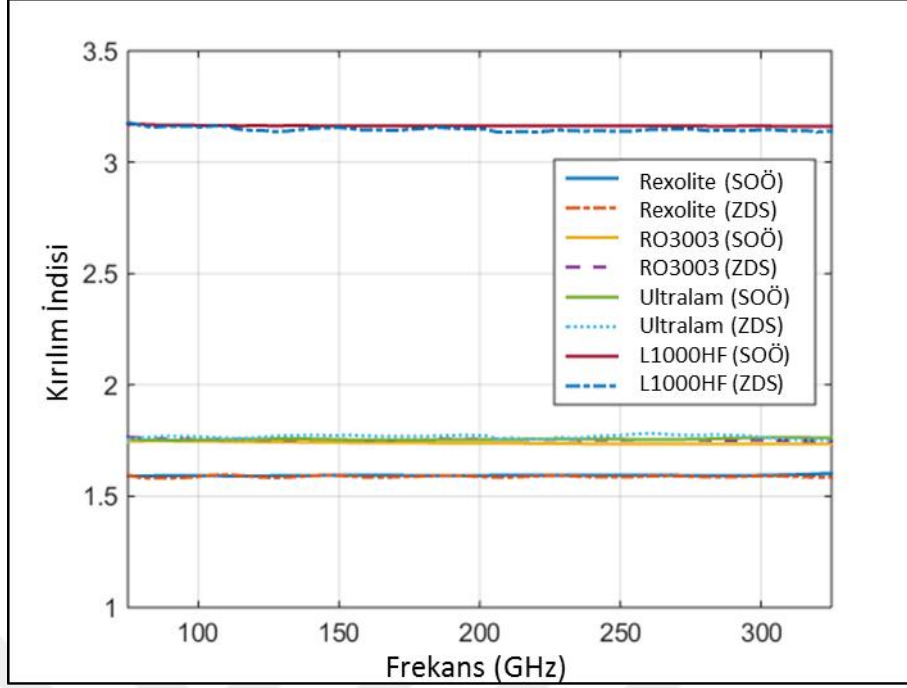
etki ettiği görülmüştür. Ölçümü yapılan dört malzemeye ait elektriksel geçirgenliklerinin gösterimi Şekil 3.41’de verilmiştir.



Şekil 3.41. İki farklı sistem ile elektriksel geçirgenliklerin karşılaştırılması.

Yapılan ölçümlerin doğru olduğundan emin olmak ve elektriksel özellikler hesaplanırken sonuçları karşılaştırıp en doğrusunu seçmek için birden fazla ölçüm alınmasına ihtiyaç duyulabilir. SOÖ metodu için yapılmış kalibrasyon ayarlarındaki değişim çok küçükte olsa ölçülen S-parametrelerinin genliğinde bir miktar farklılığa neden olursa bu parametrelerin kullanılmasıyla hesaplanan elektriksel geçirgenliğin değeri de değişecektir. Bunun sonucunda elektriksel geçirgenlik değerleri birbirine çok yakın olan RO3003 ile Ultralam ve ya Polistren ile Plexiglas malzemelerinin birbirinden ayırt edilmesi zorlaşacaktır. Aynı şekilde iki farklı ölçüm metodunun sonuçları bilinmeyen malzemeler için hatalı bir sınıflandırmaya sebep olacaktır.

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen değerler arasındaki farkın 0,3 ü geçmediği görülmüştür. Oluşan bu farklılık, geniş frekans bandı boyunca bazı yerlerde ortaya çıkmıştır. SOÖ ve ÇKLD-ZDS sistemlerinde ölçümleri yapılan aynı malzemelere ait elde edilen kırılım indislerinin karşılaştırılması 75-325 GHz frekans aralığı için Şekil 3.42’de verilmiştir.



Şekil 3.42. Malzemelere ait kırılım indislerinin karşılaştırılması.

Karşılaştırılan iki farklı ölçüm sisteminin çalışma prensibi farklı olsa da temassız ve tahribatsız ölçüm yapmaları yönünden birçok uygulamada tercih edilmektedir. İki ölçüm metoduna ait sonuçların yorumlanması neticesinde hangi metodun daha iyi olduğuna karar vermek için Çizelge 3.9'da belirtilen hususların göz önünde bulundurulmasında fayda vardır.

Çizelge 3.9. SOÖ ve ZDS ölçüm metodlarının karşılaştırılması.

| | SOÖ | ÇKLD-ZDS |
|-------------------|----------|----------|
| Fiyat | Pahalı | Ucuz |
| Ölçüm Frekansı | Parçalı | Tek |
| Kurulum Süresi | Kısa | Çok Uzun |
| Ölçüm Süresi | Çok Kısa | Uzun |
| Hesaplama Süresi | Uzun | Kısa |
| Sistem Elemanları | Az | Çok |
| Kararlılık | Sabit | Değişken |
| Hassasiyet | İyi | Normal |

SOÖ metodu bileşenlerinden en pahalısı Vektör Network Analizör (VNA) olduğu için bu durum SOÖ metodunu lazer diyotlu sisteme göre dezavantajlı hale getirmektedir. ÇKLD-ZDS sisteminin ucuz olmasının en büyük sebebi pahalı ışın kaynakları yerine çok ucuz olan ÇKLD kullanılmasıdır. Sistem elemanları olarak karşılaştırıldığında SOÖ metodu az bileşene sahip olduğu için kurulumu ve yapısı basittir. Fakat spektroskopi sistemlerinin kurulum aşaması ve ölçüm doğruluğunun test edilmesi çok uzun bir süreye ihtiyaç duymaktadır.

Spektroskopi sistemi ile geniş bant ölçümü bir seferde yapmak mümkünken aynı durum SOÖ metodu için geçerli değildir. Dalga boylarına göre anten yapıları geliştirildiği için belirli frekans aralıklarında ölçüm imkânı sunmaktadır. Parçalı ölçüm bu metot için frekans limitine sebep olmaktadır. Analiz edilecek numune için yapılacak işlemleri ölçüm esnası ve ölçüm sonrası olarak ikiye ayırabiliriz.

SOÖ metodunda kalibrasyon işlemi yapıldıktan sonra malzemeden geçen ve yansıyan sinyallerin ölçülmesi saniyeler mertebesinde tamamlanmaktadır. Aynı durum spektroskopi sistemleri için geçerli değildir. Çünkü sadece numuneli ve numunesiz ölçüm almak için yaklaşık 15 dakikalık bir süre geçmektedir. Bu olumsuz durumu ortadan kaldırmak için saniyede 60 defa ölçüm alabilen hızlı yer değiştirme kızakları üretilmeye başlanmıştır. Fakat her bir yeniliğin fiyat yönünden artı bir maliyet olacağı unutulmamalıdır.

Ölçüm sonrasında dielektrik özelliklerin hesaplanmasında kullanılan teknikler iki metot için farklıdır. Bu farklılık SOÖ metodu için oluşturulan algoritmanın yapısından dolayı ortaya çıkmaktadır. Spektroskopi sisteminde ise Origin paket programı sayesinde bu işlemler çok kısa sürmektedir. Fakat son yıllarda üretilen VNA modelleri ölçüm yaptıktan sonra hemen dielektrik özellikleri belirleyebilecek şekilde satışa sunulmaya başlanmıştır.

ZDS'nin bileşenlerinin fazla olması sistemin kararlılığını etkilemektedir. Spektroskopi sistemi bir muhafaza içerisinde korunsa bile zamanla mikron boyutundaki hareketlenmelerden dolayı lazer ışınının aldığı yolda bir değişiklik meydana gelebilmektedir. Bu durum yapılan ölçümün doğruluğunu etkileyeceğinden belirli bir

süre kullanılan ZDS'nin tekrar baştan kurulması gerekebilir. SOÖ metodunda ise kısa süre içerisinde kalibrasyon yapıldıktan sonra sistem ölçüme hazır hale gelmektedir.

Yapılan karşılaştırmalar THz frekans bölgesinde yeni kullanılmaya başlayan SOÖ metodu ile elde edilen sonuçların doğrulanması açısından önemlidir. Karşılaştırma sonucunda bant genişliği dar olsa da SOÖ metodunun 0,3 THz civarında iyi bir spektral çözünürlüğe ve dinamik aralığa sahip olduğu görülmüştür. Elektriksel geçirgenliğin reel kısımları arasında çok fazla fark olmamasının yanında imajiner kısımlar için ZDS sisteminin sonuçları daha iyidir. Bu durumun bir sebebi SOÖ metodunda alınan ölçümlerin çoklu yansılardan etkilenmesi olabilir. 100 GHz'in altında sinyal-gürültü oranının iyi seviyede olmamasından dolayı ZDS ile elde edilen değerlerin istenilen aralıkta olmadığı görülür. THz frekans bölgesinin 100 GHz'den başlamasından dolayı yapılan çalışmalarda düşük frekans bölgesine ait sonuçlar genellikle paylaşılmaz.

Her iki ölçüm metodunda belirli yönlerden büyük avantajlara sahip oldukları göz önünde bulundurulduğunda hangi uygulamada kullanılacaklarına göre tercih edilmeleri daha başarılı sonuçların elde edilmesini sağlar. Özel bir frekans bölgesinde uygulanacak çalışmalar için SOÖ daha avantajlı sonuçlar verebilirken daha geniş bir frekans aralığı için en kısa çözüm ZDS sistemi olacaktır. Gelişen teknoloji ile birlikte bu ölçüm metotları optimize edilirken tıp, biyoloji, gıda, güvenlik, askeri vb. uygulama alanlarında aktif olarak kullanılmalarının önü açılmaktadır.

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

THz frekans bölgesi sahip olduğu avantajlarından dolayı birçok uygulama alanı için yeni araştırmalara öncülük etmektedir. Her geçen gün artan bu çalışmalarını malzeme karakterizasyonu ve görüntüleme şeklinde ikiye ayırabiliriz. Çoğunlukla optik yöntemler ile yapılan çalışmalara son yıllarda mikrodalga ölçüm yöntemleri de eklenmiştir. İki farklı metodun malzeme karakterizasyonu işlemlerinin karşılaştırmalı olarak ele alındığı bu çalışmada ölçüm öncesi ve sonrası uygulamaların iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Önerilen yaklaşımlar, sonuçları bilinen malzemelerde denendikten sonra THz frekans bölgesinde analiz edilmemiş veya birkaç araştırmacı tarafından incelenmiş malzemeler tercih edilerek doğruluk ve katkıları gösterilmiştir. Birbirlerine göre avantajları bulunan iki farklı ölçüm metodunun sonuçları karşılaştırılmış ve yaklaşık değerler elde edilmiştir. Böylece Serbest Ortam Ölçüm (SOÖ) metodunun THz frekans bölgesinde kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bazı dezavantajlarına rağmen geniş bant spektrumda ölçüm yeteneği ve sistem bileşenlerinin daha ucuz olmasından dolayı Çok-Kipli Lazer Diyotun (ÇKLD) kullanıldığı spektroskopi sistemi, SOÖ metoduna göre daha fazla tercih edilebilir konumdadır.

Pahalı ışın kaynaklarının yerine çok daha ucuz Çok-Kipli Lazer Diyotların (ÇKLD) kullanıldığı spektroskopi sistemi için mevcut olan sürücü ve soğutucu birimlerinin yerine daha ucuz olarak geliştirilmiş birimler kullanılmış ve kısa sürelide olsa başarılı ölçümler elde edilmiştir. Işının hizalanması THz sinyalinin üretim kalitesini etkilediği için üretici ve algılayıcı kolların mesafesi biraz daha kısa tutulmuştur.

Klasik bir yöntem olan SOÖ metodu ile yapılan ölçümler, dielektrik özelliklerin hesaplanmasında çeşitli tekniklerle kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. En

temel hesaplama tekniği olan Nicolson-Ross-Weir (NRW) yöntemi kullanılarak oluşturulan çeşitli algoritmalar karşılaştırılıp nümerik analiz yöntemi olan Newton-Raphson yaklaşımının doğruluğu sağlanmıştır.

Yapılan ölçümler için Newton-Raphson tekniği başarılı sonuçlar vermiş fakat bilinmeyen bir malzemeye ait ölçüm için başlangıç değeri tahmin edilemediği zaman algoritmanın çalışmadığı ve ıraksama problemi ortaya çıkmıştır. Bu probleme çözüm üretmek için en düşük ve en yüksek değerlerin belirlendiği ve asıl kök değerinin algoritma tarafından tespit edildiği başlangıç-değer tahmin yöntemi önerilmiştir. Genelde problemsiz çalışan bu algoritmanın daha iyi performans göstermesi için geliştirilmesi gerekmektedir.

Yapay zekâ yöntemleri birçok uygulamada kullanılmakta ve araştırmacılar tarafından geliştirilmektedir. Daha az iş yükü için yapay zekâ yöntemi olan eğitilmiş bir Yapay Sinir Açı (YSA) modelinin malzemelere ait parametreleri tahmin edebilmesinin önemi büyüktür. Bu amaç doğrultusunda YSA ile daha iyi sonuçlar elde edebilmek için YSA'nın ağları bir başka yapay zekâ yöntemi olan Yapay Arı Koloni (YAK) algoritması ile eğitilerek tahmin edilen değerin doğruluk oranı %99,95'in üzerine çıkartılmıştır.

Ölçülen sinyallerdeki hata ve gürültü oranlarının azaltılması hesaplanacak parametrelerin doğruluğunu etkileyeceği için klasik sinyal filtreleme yöntemlerine alternatif olarak Tekil Spektrum Analizi (TSA) önerilmiştir. Özellikle seri ölçümlerde kalibrasyon hatalarının yanı sıra sinyalde var olan gürültülerin elimine edilmesinde büyük başarı sağlamıştır. Özellikle 325 GHz'den sonraki mikrodalga ölçüm sonuçlarının düzeltilmesi için kullanılmıştır.

Malzemelerin tanımlanması ayrıştırılıp gruplandırılabilmesi için çok önemlidir. Örneğin patlayıcı maddenin THz sinyaline vermiş olduğu tepkinin önceden bilinmesi yapılacak ölçümlerin işlenmesi sırasında malzemenin tanınmasına yardımcı olacaktır. Ham veri olan S-parametrelerinin bu hedef doğrultusunda kullanılması Kısmi En Küçük Kareler (KEKK) yöntemi ile yapılmış ve her maddeye özgü olan bu parmak izlerinin yüksek frekanslarda ayırt edici özellik olarak kullanılabilceği

gösterilmiştir. Özellikle S-parametrelerinin kullanılması hesaplama tekniklerine olan ihtiyacın azalması yönünden önemlidir.

Ortam şartlarından etkilenen THz sinyalinin hizalanıp malzeme ile iyi derecede etkileşime girebilmesinin yanında SOÖ metodunun THz frekans bölgesinde verimli şekilde kullanılabilmesi için optik bir bileşen olan parabol aynanın sunmuş olduğu avantajlar gösterilmiştir. Ölçüm metodu içerisinde optik bir bileşen olduğu için optik-benzeri SOÖ metodu olarak isimlendirilmektedir. İlerleyen zamanlarda 0,5-1 THz frekans aralığında optik ve mikrodalga ölçüm metotlarından oluşan hibrit sistemlerin daha yaygın olarak kullanılacağı öngörülmektedir.

Son yıllarda artan araştırmalara katkı sağlamak için yapılan bu çalışmalara ek olarak geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gereken yönler hala mevcuttur. Örneğin analizi yapılacak malzemelerin pürüzsüz bir yüzeye sahip olması gerekliliği THz frekans bölgesinde yapılacak ölçümler için önemlidir. Bu olumsuz durumu ortadan kaldırmak için çoklu yansımalar hesaba katılarak hesaplama algoritmaları optimize edilebilir. Ayrıca 0,5 THz frekans civarında çok katmanlı ve sıvı yapıların analizi için çalışmalar yapılabilir. Son dönemlerde popüler olan kompozit ve meta materyal malzemeler üretilerek askeri savunma ve güvenlik alanları için uygulanabilirlikleri ve sağlayacakları faydalar incelenebilir.

Optik sistem için istenilen özelliklere sahip ÇKLD üretimi yapılabilir. Foto İletken Anten (FİA) yapılarının geometrik yapıları değiştirilerek THz sinyalinin üretim kalitesi artırılabilir. Sürücü ve soğutucu birimleri geliştirilerek daha uzun süre ölçüm alma imkânı sağlanabilir. Ses Bobin Kızağı (Voice Coil Stage) benzeri yapılar ile ZDS sistemlerindeki sinyaller daha hızlı taranarak uzun süren malzeme karakterizasyon süreci kısaltılabilir.

KAYNAKLAR

1. Scheller, M. and Koch, M., "Terahertz quasi time domain spectroscopy", *Optics Express*, 17 (20): 17723 (2009).
2. Keskin, H., Altan, H., Yavas, S., Ilday, F. O., Eken, K., and Sahin, A. B., "Development of a rapid-scan fiber-integrated terahertz spectrometer", *Optical and Quantum Electronics*, 46 (4): 495–503 (2014).
3. Kazemipour, A., Hudlicka, M., See-Khee Yee, Salhi, M. A., Allal, D., Kleine-Ostmann, T., and Schrader, T., "Design and calibration of a compact quasi-optical system for material characterization in millimeter/submillimeter wave domain", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64 (6): 1438–1445 (2015).
4. Zhang, J., Nakhkash, M., and Huang, Y., "Electromagnetic imaging of layered building materials", *Measurement Science and Technology*, 12 (8): 1147–1152 (2001).
5. Scheller, M., Dürschmidt, S. F., Stecher, M., and Koch, M., "Terahertz quasi-time-domain spectroscopy imaging", *Applied Optics*, 50 (13): 1884 (2011).
6. Morikawa, O., Fujita, M., and Hangyo, M., "Application of photomixing of multimode LD light on THz spectroscopy", *Twenty Seventh Int. Conference on Infrared And Millimeter Waves*, 249–250 (2002).
7. Scheller, M. and Koch, M., "Multi-mode continuous wave terahertz systems-quasi time domain spectroscopy", *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 12–3 (2010).
8. Hangyo, M., "Development and versatile applications of terahertz time-domain spectroscopy", *39th Int. Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 1–4 (2014).
9. Hangyo, M., Nagashima, T., and Nashima, S., "Spectroscopy by pulsed terahertz radiation", *Measurement Science and Technology*, 13 (11): 1727–1738 (2002).
10. Morikawa, O., Fujita, M., Takano, K., and Hangyo, M., "Sub-terahertz spectroscopic system using a continuous-wave broad-area laser diode and a spatial filter", *Journal of Applied Physics*, 110 (6): 063107 (2011).
11. Tani, M., Morikawa, O., Matsuura, S., and Hangyo, M., "Generation of terahertz radiation by photomixing with dual- and multiple-mode lasers", *Semiconductor Science and Technology*, 20 (7): S151–S163 (2005).

12. Morikawa, O., Tonouchi, M., and Hangyo, M., "A novel cross-correlation spectroscopy in sub-THz region using incoherent light source", *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1259–1260 (1999).
13. Tani, M., Matsuura, S., Sakai, K., and Hangyo, M., "Multiple-frequency generation of sub-terahertz radiation by multimode LD excitation of photoconductive antenna", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 7 (9): 282–284 (1997).
14. Hyodo, M., Tani, M., Matsuura, S., Onodera, N., and Sakai, K., "Generation of millimetre-wave radiation using a dual-longitudinal-mode microchip laser", *Electronics Letters*, 32 (17): 1589 (1996).
15. Morikawa, O., Tonouchi, M., Tani, M., Sakai, K., and Hangyo, M., "Sub-THz emission properties of photoconductive antennas excited with multimode laser diode", *Japanese Journal of Applied Physics*, 38 (Part 1): 1388–1389 (1999).
16. Morikawa, O., Tonouchi, M., and Hangyo, M., "Sub-THz spectroscopic system using a multimode laser diode and photoconductive antenna", *Applied Physics Letters*, 75 (24): 3772 (1999).
17. Morikawa, O., Tonouchi, M., and Hangyo, M., "A cross-correlation spectroscopy in subterahertz region using an incoherent light source", *Applied Physics Letters*, 76 (12): 1519 (2000).
18. Nagashima, T., Sumikura, H., Morikawa, O., and Hangyo, M., "Improvement of spectral shape of sub-terahertz wave excited by multimode laser diode", *27th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves*, 167–168 (2002).
19. Scheller, M., Stecher, M., Gerhard, M., and Koch, M., "Versatile spectrally shapeable multi-mode terahertz system", *Applied Physics B*, 106 (1): 81–84 (2012).
20. Morikawa, O., Fujita, M., and Hangyo, M., "Contactless characterization of a Si wafer with terahertz time-domain spectroscopy using a continuous-wave multimode laser diode", *Japanese Journal of Applied Physics*, 52 (11R): 112401–5 (2013).
21. Morikawa, O., Fujita, M., and Hangyo, M., "Improvement of signal-to-noise ratio of a subterahertz spectrometer using a continuous-wave multimode laser diode by single-mode fiber optics", *Applied Physics Letters*, 85 (6): 881–883 (2004).
22. Shibuya, K., Tani, M., and Hangyo, M., "Compact and inexpensive continuous-wave sub-THz imaging system using a fiber-coupled multimode laser diode", *14th Int. Conference on Terahertz Electronics*, 428–428 (2006).

23. Shibuya, K., Tani, M., and Hangyo, M., "Enhancement of THz photomixing efficiency by using a pulse-modulated multimode laser diode", *15th Int. Conference on Terahertz Electronics*, 732–733 (2007).
24. Morikawa, O., Fujita, M., and Hangyo, M., "Terahertz spectroscopy using photomixing of multimode and singlemode laser diodes", *34th Int. Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 1–2 (2009).
25. Jilani, M. T., Zaka, M., Khan, A. M., Khan, M. T., and Ali, S. M., "A brief review of measuring techniques for characterization of dielectric materials", *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, 1 (1): 1–5 (2012).
26. Al-Mously, S. I. Y., "A modified complex permittivity measurement technique at microwave frequency", *International Journal on New Computer Architectures and Their Applications*, 2 (2): 389–401 (2012).
27. Petersson, L. E. R. and Smith, G. S., "An estimate of the error caused by the plane-wave approximation in free-space dielectric measurement systems", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 50 (6): 878–887 (2002).
28. Wee, F. H., Soh, P. J., Suhaizal, A. H. ., Nornikman, H., and Ezanuddin, A. A. ., "Free space measurement technique on dielectric properties of agricultural residues at microwave frequencies", *IEEE International Microwave And Optoelectronics Conference*, 183–187 (2009).
29. Dvurechenskaya, N. and Zielinski, R. J., "Advantages and disadvantages of the free-space arch method used for investigation of shielding materials at low gigahertz frequencies", *10th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 790–795 (2011).
30. Trabelsi, S. and Nelson, S. O., "Free-space measurement of dielectric properties of cereal grain and oilseed at microwave frequencies", *Measurement Science and Technology*, 14 (5): 589–600 (2003).
31. Tereshchenko, O. V., Buesink, F. J. K., and Leferink, F. B. J., "An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials", *XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*, 1–4 (2011).
32. Mungall, A. G. and Hart, J., "Measurement of the complex dielectric constant of liquids at centimeter and millimeter wavelengths", *Canadian Journal of Physics*, 35 (9): 995–1003 (1957).
33. Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V., and Varadan, V. K., "Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies", *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, 39 (2): 387–394 (1990).

34. Garcia-Ruiz, I., Aviles-Castro, C. D., Jardón-Aguilar, H., and Guerra-Vargas, J., "On the measurement of the complex permittivity of layers embedded in a multilayered dielectric material with the use of a free-space method", *Microwave and Optical Technology Letters*, 33 (6): 422–426 (2002).
35. Kim, P. C. and Lee, D. G., "Composite sandwich constructions for absorbing the electromagnetic waves", *Composite Structures*, 87 (2): 161–167 (2009).
36. Browne, K. E. and Burkholder, R. J., "Nonlinear optimization of radar images from a through-wall sensing system via the lagrange multiplier method", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9 (5): 803–807 (2012).
37. Lee, D., Choi, I., and Lee, D. G., "Development of a damage tolerant structure for nano-composite radar absorbing structures", *Composite Structures*, 119 (2015): 107–114 (2015).
38. Tosaka, T., Fujii, K., Fukunaga, K., and Kasamatsu, A., "Development of complex relative permittivity measurement system based on free-space in 220-330-GHz range", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 5 (1): 1–8 (2014).
39. Puthukodan, S., Dadrassia, E., Vinod, V. K. T., Lamela Rivera, H., Ducournau, G., and Lampin, J.-F., "Optical properties of carbon nanotube thin films in subterahertz frequency regime", *Microwave and Optical Technology Letters*, 56 (8): 1895–1898 (2014).
40. Elhawil, A., Vounckx, R., Zhang, L., Koers, G., and Stiens, J., "Comparison between two optimisation algorithms to compute the complex permittivity of dielectric multilayer structures using a free-space quasi-optical method in W-band", *IET Science, Measurement & Technology*, 3 (1): 13–21 (2009).
41. Gagnon, N., Shaker, J., Berini, P., Roy, L., and Petosa, A., "Correction and extraction techniques for dielectric constant determination using a Ka-band free-space measurement system", *32nd European Microwave Conference*, 1–4 (2002).
42. Alitalo, P., Culhaoglu, A. E., Osipov, A. V., Thurner, S., Kemptner, E., and Tretyakov, S. A., "Experimental characterization of a broadband transmission-line cloak in free space", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60 (10): 4963–4968 (2012).
43. Hu, W., Cahill, R., Encinar, J., Dickie, R., Gamble, H., Fusco, V., and Grant, N., "Design and measurement of reconfigurable mm wave reflectarray cells with nematic liquid crystal", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56 (10): 1–6 (2008).
44. Sasaki, K., Segawa, H., Mizuno, M., Wake, K., Watanabe, S., and Hashimoto, O., "Development of the complex permittivity measurement system for high-loss biological samples using the free space method in quasi-millimeter and

- millimeter wave bands", *Physics in Medicine and Biology*, 58 (5): 1625–1633 (2013).
45. Segawa, H., Sasaki, K., Mizuno, M., Wake, K., Watanabe, S., and Hashimoto, O., "Complex permittivities of biological samples with the free space method from 18 to 110 GHz", *4th Int. Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*, 1–2 (2011).
 46. Elhawil, A., Koers, G., Zhang, L., Stiens, J., and Vounckx, R., "Reliable method for material characterisation using quasi-optical free-space measurement in W-band", *IET Science, Measurement & Technology*, 3 (1): 39–50 (2009).
 47. Maffei, B., Legg, S., Robinson, M., Ozturk, F., Ng, M. W., Schemmel, P., and Pisano, G., "Implementation of a quasi-optical free-space S-parameters measurement system", *35th ESA Antenna Workshop on Antenna and Free Space RF Measurements*, 1–6 (2013).
 48. Bourreau, D., Peden, A., and Le Maguer, S., "Complex permittivity measurement of solid and nonsolid materials at millimeter wavelengths", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55 (6): 2022–2028 (2006).
 49. Choi, I., Kim, J. G., Lee, D. G., and Seo, I. S., "Aramid/epoxy composites sandwich structures for low-observable radomes", *Composites Science and Technology*, 71 (14): 1632–1638 (2011).
 50. Seo, I. S., Chin, W. S., and Lee, D. G., "Characterization of electromagnetic properties of polymeric composite materials with free space method", *Composite Structures*, 66 (1): 533–542 (2004).
 51. Kim, P., Lee, D., Seo, I., and Kim, G., "Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surfaces", *Composites Science and Technology*, 68 (9): 2163–2170 (2008).
 52. Afsar, M. N., Moonshiram, A., and Wang, Y. W. Y., "Comparison of millimeter wave dielectric measurement using various techniques", *IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symposium*, 4627–630 (2003).
 53. Gatesman, A. J., Danylov, A., Goyette, T. M., Dickinson, J. C., Giles, R. H., Goodhue, W., Waldman, J., Nixon, W. E., and Hoen, W., "Terahertz behavior of optical components and common materials", *Terahertz for Military and Security Applications IV*, 1–12 (2006).
 54. Kazemipour, A., Hudlicka, M., Yee, S.-K., Salhi, M., Kleine-Ostmann, T., and Schrader, T., "Wideband frequency-domain material characterization up to 500 GHz", *39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 1–2 (2014).

55. Dadrasnia, E., Puthukodan, S., Thalakkatukulathil, V. V. K., Lamela, H., Ducournau, G., Lampin, J.-F., Garet, F., and Coutaz, J.-L., "Sub-THz characterisation of monolayer graphene", *Journal of Spectroscopy*, 20141–6 (2014).
56. Narayan, R. M. and Vu, K. T., "Free-space microwave measurement of low moisture content in powdered foods", *Journal of Food Processing and Preservation*, 24 (1): 39–56 (2000).
57. Kim, K. B., Park, S. G., Kim, J. Y., Kim, J. H., Lee, C. J., Kim, M. S., and Choi, M. Y., "Measurement of moisture content in powdered food using microwave free-space transmission technique", *Key Engineering Materials*, 321 (2006): 1196–1200 (2006).
58. Kraszewski, A., Trabelsi, S., and Nelson, S., "Comparison of density-independent expressions for moisture content determination in wheat at microwave frequencies", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71 (3): 227–237 (1998).
59. Trabelsi, S. and Nelson, S. O., "Free-space measurement of dielectric properties of moist granular materials at microwave frequencies", *20th IEEE Instrumentation Technology Conference*, 589–600 (2003).
60. Mohan, R. R., Paul, B., Mridula, S., and Mohanan, P., "Measurement of soil moisture content at microwave frequencies", *Procedia Computer Science*, 46 (2015): 1238–1245 (2015).
61. Buyukozturk, O., Yu, T. Y., and Ortega, J. A., "A methodology for determining complex permittivity of construction materials based on transmission-only coherent, wide-bandwidth free-space measurements", *Cement and Concrete Composites*, 28 (4): 349–359 (2006).
62. Haddadi, K., Wang, M. M., Benzaim, O., Glay, D., and Lasri, T., "Contactless microwave technique based on a spread-loss model for dielectric materials characterization", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 19 (1): 33–35 (2009).
63. Haddadi, K. and Lasri, T., "Geometrical optics-based model for dielectric constant and loss tangent free-space measurement", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63 (7): 1818–1823 (2014).
64. Křesálek, V. and Navrátil, M., "Estimation of complex permittivity using evolutionary algorithm from measured data of reflectance and transmittance in free space", *Microwave and Optical Technology Letters*, 57 (7): 1542–1546 (2015).
65. Moallem, M. and Sarabandi, K., "A single-layer metamaterial-based polarizer and bandpass frequency selective surface with an adjacent transmission zero", *IEEE Int. Symposium on Antennas and Propagation*, 2649–2652 (2011).

66. Hasar, U. C. and Barroso, J. J., "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 (2012).
67. Aziz, M., Ermeey, A. K., and Jusoff, K., "Nondestructive and noncontact dielectric measurement methods for transformer oil using free-space microwave measurement system in 19 – 25 GHz frequency range", *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2 (4): 1184–1189 (2010).
68. Jose, K. A., Varadan, V. K., and Varadan, V. V., "Wideband and noncontact characterization of the complex permittivity of liquids", *Microwave and Optical Technology Letters*, 30 (2): 75–79 (2001).
69. Rolfes, I. and Schiek, B., "Calibration methods for microwave free space measurements", *Advances in Radio Science*, 219–25 (2005).
70. Bartley, P. G. and Begley, S. B., "A new free-space calibration technique for materials measurement", *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 47–51 (2012).
71. Will, B. and Rolfes, I., "A new approach on broadband calibration methods for free space applications", *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1–3 (2012).
72. Jebbor, N., Bri, S., Sánchez, A. M., and Chaibi, M., "A fast calibration-independent method for complex permittivity determination at microwave frequencies", *Measurement*, 46 (7): 2206–2209 (2013).
73. Nicolson, A. M. and Ross, G. F., "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 19 (4): 377–382 (1970).
74. Weir, W. B., "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies", *Proceedings of the IEEE*, 62 (1): 33–36 (1974).
75. Elhawil, A., Vounckx, R., Zhang, L., Koers, G., and Stiens, J., "Comparison between two optimisation algorithms to compute the complex permittivity of dielectric multilayer structures using a free-space quasi-optical method in W-band", *IET Science, Measurement & Technology*, 3 (1): 13–21 (2009).
76. Zhang, J., Koledintseva, M. Y., Pommerenke, D. P., Drewniak, J. L., Rozanov, K. N., Antonini, G., and Orlandi, A., "Extraction of dispersive material parameters using vector network analyzers and genetic algorithms", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 462–467 (2006).

77. Liang, C., Li, L., and Zhai, H., "Low-cost free-space measurement of dielectric constant at Ka band", *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 151 (3): 271–276 (2004).
78. Jurado, A., Escot, D., Poyatos, D., and Montiel, I., "Application of artificial neural networks to complex dielectric constant estimation from free-space measurements", *Methods and Models in Artificial and Natural Computation*, 517–526 (2009).
79. Ozturk, T., Elhawil, A., Düğenci, M., Ünal, İ., and Uluer, İ., "Extracting the dielectric constant of materials using ABC-based ANNs and NRW algorithms", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 30 (13): 1785–1799 (2016).
80. Ozturk, T., Uluer, İ., and Ünal, İ., "Reduction of S-parameter errors using singular spectrum analysis", *Review of Scientific Instruments*, 87 (7): 074705–5 (2016).
81. Ozturk, T., Uluer, İ., and Ünal, İ., "Materials classification by partial least squares using S-parameters", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27 (10): 1–6 (2016).
82. Afsar, M. N., Birch, J. R., Clarke, R. N., and Chantry, G. W., "The measurement of the properties of materials", *Proceedings of the IEEE*, 74 (1): 183–199 (1986).
83. Baker-Jarvis, J., Jones, C., Riddle, B., Janezic, M., Geyer, R. G., Grosvenor, J. H., and Weil, C. M., "Dielectric and magnetic measurements: A survey of nondestructive, quasi-nondestructive, and process-control techniques", *Research in Nondestructive Evaluation*, 7 (2):–(3): 117–136 (1995).
84. Krupka, J., "Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies", *Measurement Science and Technology*, 17 (6): R55–R70 (2006).
85. Verma, S. S., "World of terahertz-rays", *Physics Education*, 259–262 (2007).
86. Siegel, P. H., "Terahertz technology", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50 (3): 910–928 (2002).
87. Nagatsuma, T., "Terahertz technologies: present and future", *IEICE Electronics Express*, 8 (14): 1127–1142 (2011).
88. Shen, Y. C., Upadhyaya, P. C., Linfield, E. H., Beere, H. E., and Davies, A. G., "Terahertz generation from coherent optical phonons in a biased GaAs photoconductive emitter", *Physical Review B*, 69 (23): 235325–4 (2004).

89. Jones, I., Rainsford, T. J., Fischer, B., and Abbott, D., "Towards T-ray spectroscopy of retinal isomers: A review of methods and modelling", *Vibrational Spectroscopy*, 41 (2): 144–154 (2006).
90. Waliwander, T. and Crowley, M., "Instrumentation for millimeter wave tests and measurements", *Farran Technology, Cork*, 1-17 (2009).
91. Clark, T. R., McKenna, T. P., and Nanzer, J. A., "Photonic millimeter wave system for high capacity wireless communications", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 33 (1): 1–4 (2015).
92. Kharkovsky, S. and Zoughi, R., "Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation - overview and recent advances", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 10 (2): 26–38 (2007).
93. Kukutsu, N. and Kado, Y., "Overview of millimeter and terahertz wave application research", *NTT Technical Review*, 7 (3): 1–6 (2009).
94. Hasar, U. C. and Simsek, O., "An accurate complex permittivity method for thin dielectric materials", *Progress in Electromagnetics Research*, 91 (1): 123–138 (2009).
95. Skocik, P. and Neumann, P., "Measurement of complex permittivity in free space", *Procedia Engineering*, 100 (4): 100–104 (2015).
96. R, R. M., Mridula, S., and Mohanan, P., "Study and analysis of dielectric behavior of fertilized soil at microwave frequency", *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2 (2): 73–79 (2015).
97. Nelson, S. O., "Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials", *Journal of Food Engineering*, 21 (3): 365–384 (1994).
98. Zivkovic, I. and Murk, A., "Free-space transmission method for the characterization of dielectric and magnetic materials at microwave frequencies", *Microwave Materials Characterization*, 73–90 (2012).
99. Rammah, A. A., Zakaria, Z., Ruslan, E., and Isa, A. A. M., "Comparative study of materials characterization using microwave resonators", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9 (1): 76–85 (2015).
100. Rocha, L. S., Junqueira, C. C., Gambin, E., Nata Vicente, A., Culhaoglu, A. E., and Kemptner, E., "A free space measurement approach for dielectric material characterization", *SBMO/IEEE Int. Microwave & Optoelectronics Conference*, 1–5 (2013).
101. Zhang, X.-C. and Xu, J., "Introduction to THz Wave Photonics", *Springer US*, Boston, MA, 48-59 (2010).

102. Tani, Herrmann, Kono, and Sakai, "Generation and detection of terahertz pulsed radiation with photoconductive antennas and their application to imaging", *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 1–4 (2002).
103. Dragoman, D. and Dragoman, M., "Terahertz fields and applications", *Progress in Quantum Electronics*, 28 (1): 1–66 (2004).
104. Reid, G. D. and Wynne, K., "Ultrafast Laser Technology and Spectroscopy", *John Wiley & Sons Ltd*, Chichester, UK, 1–28 (2000).
105. Sennaroğlu, A., "Katıhal Femtosaniye Lazerleri", *Tübitak Bilim Teknik Dergisi*, (Mayıs): 48–53 (2010).
106. Wynne, K. and Carey, J. J., "An integrated description of terahertz generation through optical rectification, charge transfer, and current surge", *Optics Communications*, 256 (4):–(6): 400–413 (2005).
107. Sang-Gyu Park, Melloch, M. R., and Weiner, A. M., "Analysis of terahertz waveforms measured by photoconductive and electrooptic sampling", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 35 (5): 810–819 (1999).
108. Zhang, J., Hong, Y., Braunstein, S. L., and Shore, K. A., "Terahertz pulse generation and detection with LT-GaAs photoconductive antenna", *IEE Proceedings - Optoelectronics*, 151 (2): 98–101 (2004).
109. Cai, Y., Brener, I., Lopata, J., Wynn, J., Pfeiffer, L., Stark, J. B., Wu, Q., Zhang, X. C., and Federici, J. F., "Coherent terahertz radiation detection: Direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection", *Applied Physics Letters*, 73 (4): 444–446 (1998).
110. Knoesel, E., Bonn, M., Shan, J., and Heinz, T. F., "Charge transport and carrier dynamics in liquids probed by THz time-domain spectroscopy", *Physical Review Letters*, 86 (2): 340–343 (2001).
111. Yano, R., Gotoh, H., Hirayama, Y., Miyashita, S., Kadoya, Y., and Hattori, T., "Terahertz wave detection performance of photoconductive antennas: Role of antenna structure and gate pulse intensity", *Journal of Applied Physics*, 97 (10): 103103–6 (2005).
112. Burrus, C. A. and Miller, B. I., "Small-area, double-heterostructure aluminum-gallium arsenide electroluminescent diode sources for optical-fiber transmission lines", *Optics Communications*, 4 (4): 307–309 (1971).
113. Kogelnik, H., "Stimulated emission in a periodic structure", *Applied Physics Letters*, 18 (4): 152–154 (1971).
114. Bartl, J., Fíra, R., and Jacko, V., "Tuning of the laser diode", *Measurement Science Review*, 2 (3): 9–15 (2002).

115. Hajiaghajani, K., "Design of an optimum driver circuit for cw laser diodes", Master Thesis, *The University of Arizona*, Tucson, 39–56 (1992).
116. Chen, L. F., Ong, C. K., Neo, C. P., Varadan, V. V., and Varadan, V. K., "Microwave Electronics", 1st Ed., *John Wiley & Sons Ltd*, Chichester, UK, 37-42 (2004).
117. Tantot, O., Chatard-Moulin, M., and Guillon, P., "Measurement of complex permittivity and permeability and thickness of multilayered medium by an open-ended waveguide method", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 46 (2): 519–522 (1997).
118. Akhtar, M. J., Spiliotis, N. G., and Omar, A. S., "An experimental setup for the microwave imaging of inhomogeneous dielectric bodies", *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, 225–228 (2004).
119. Vilovic, I., Burum, N., and Nadj, R., "Estimation of dielectric constant of composite materials in buildings using reflected fields and PSO algorithm", *Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, 1–5 (2010).
120. Friedsam, G. L. and Biebl, E. M., "A broadband free-space dielectric properties measurement system at millimeter wavelengths", *20th Biennial Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, 46 (2): 210–211 (1997).
121. Yin, H.-C., Chao, Z.-M., and Xu, Y.-P., "A new free-space method for measurement of electromagnetic parameters of biaxial materials at microwave frequencies", *Microwave and Optical Technology Letters*, 46 (1): 72–78 (2005).
122. Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V., and Varadan, V. K., "A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 38 (3): 789–793 (1989).
123. Zivkovic, I. and Murk, A., "Permittivity and permeability extraction of magnetically loaded absorbing materials", *6th ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications*, 1–3 (2011).
124. Grignon, R., Afsar, M. N., Yong Wang, and Butt, S., "Microwave broadband free-space complex dielectric permittivity measurements on low loss solids", *20th IEEE Instrumentation Technology Conference*, 865–870 (2003).
125. Ajami, A., Akkara-Aketalin, T., Shakhtour, H., and Heberling, D., "Experimental investigations of accuracy improvement and limitations of a free space measurement system including thin lenses", *7th European Conference on Antennas and Propagation*, 4064 – 4067 (2013).

126. Rytting, D., "Advances in microwave error correction techniques", *Hewlett-Packard RF and Microwave Measurement Symp. and Exhibition*, 6201–6302 (1987).
127. Thitipan Rutpralom, Kosin Chamnongthai, Pinit Kumhom, and Monai Krairiksh, "Nondestructive durian maturity determination by using microwave free space measurement", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1351–1354 (2006).
128. Bartley, P. G., McClendon, R. W., and Nelson, S. O., "Permittivity determination by using an artificial neural network", *IEEE 16th Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 127–30 (1999).
129. Daponte, P. and Grimaldi, D., "Artificial neural networks in measurements", *Measurement*, 23 (2): 93–115 (1998).
130. Ozturk, C. and Karaboga, D., "Hybrid artificial bee colony algorithm for neural network training", *IEEE Congress of Evolutionary Computation*, 84–88 (2011).
131. Karaboga, D. and Akay, B., "A survey: Algorithms simulating bee swarm intelligence", *Artificial Intelligence Review*, 31 (1):–(4): 61–85 (2009).
132. Babayiğit, B. and Özdemir, R., "Modifiye yapay arı koloni algoritması ile nümerik fonksiyon optimizasyonu", *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 618–622 (2012).
133. Boulesteix, A.-L. and Strimmer, K., "Partial least squares: a versatile tool for the analysis of high-dimensional genomic data", *Briefings in Bioinformatics*, 8 (1): 32–44 (2006).
134. Sawatsky, M. L., Clyde, M., and Meek, F., "Partial Least Squares regression in the social sciences", *The Quantitative Method for Psychology*, 11 (2): 52–62 (2015).
135. Proust, M., "JMP 10 modeling and multivariate methods", *SAS Institute Inc., Cary*, (2012).
136. Ozturk, A., Tartar, A., Ersoz Huseyinsinoglu, B., and Ertas, A. H., "A clinically feasible kinematic assessment method of upper extremity motor function impairment after stroke", *Measurement*, 80 (2016): 207–216 (2016).
137. Moore, J. C. and Grinsted, A., "Singular spectrum analysis and envelope detection: methods of enhancing the utility of ground-penetrating radar data", *Journal of Glaciology*, 52 (176): 159–163 (2006).
138. Engen, G. F. and Hoer, C. A., "Thru-reflect-line: An improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 27 (12): 987–993 (1979).

139. Kornerup, P. and Muller, J., "Choosing starting values for certain Newton–Raphson iterations ", *Theoretical Computer Science*, 351 (1): 101-110 (2006).
140. İnal, M., "Determination of dielectric properties of insulator materials by means of ANFIS: A comparative study", *Journal of Materials Processing Technology*, 195 (1): 34–43 (2008).



ÖZGEÇMİŞ

Turgut ÖZTÜRK 1986'da Şarkışla'da doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini Şarkışla'da tamamladı. 2003 yılında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektronik – Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 2007'de mezun olduktan sonra kısa bir süre özel sektörde çalıştı. 2008-2009 yıllarında yedek subay olarak askerlik görevini yaptı. 2010 yılından beri Karabük Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. 2013 yılında Karabük Üniversitesi'nde Yüksek Lisans'ını tamamladı. Halen, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı doktora eğitimini sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,
Oda No: 346 78050, Merkez/KARABÜK
Tel : 0 370 433 2021 - 4115
E-posta : turgutozturk@karabuk.edu.tr