



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ELEKTROMANYETİK DALGALAR
KULLANILARAK MALZEMENİN NEM
İÇERİĞİNİN ÖLÇÜLMESİ

Raid MUHAMMEDALİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

NİSAN-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Raid MUHAMMEDALİ tarafından hazırlanan “Elektromanyetik Dalgalar Kullanılarak Malzemenin Nem İçeriğinin Ölçülmesi” adlı tez çalışması 12/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Levent SEYFİ

Danışman

Prof. Dr. Ercan YALDIZ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre ACAR

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Raid MUHAMMEDALİ

Tarih: 20.04.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROMANYETİK DALGALAR KULLANILARAK MALZEMENİN NEM İÇERİĞİNİN ÖLÇÜLMESİ

Raid MUHAMMEDALİ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ercan YALDIZ

2023, 63 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Ercan YALDIZ
Prof. Dr. Levent SEYFİ
Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre ACAR**

Günümüzde nem bilgisine gıda, sağlık ve endüstri gibi birçok sektörde ihtiyaç duyulmaktadır. Hem insan sağlığı hem de eşyanın korunması açısından nem kontrolü yapılması gerekmektedir. Pek çok uygulama alanında (hava, ahşap, toprak, tahıl) nem ölçümüne ihtiyaç vardır. Nem ölçümünde kullanılan yöntemlerin çalışma prensipleri anlatılmıştır. Nemlilik ile dielektrik sabiti arasında bir ilişki vardır. Dielektrik ölçümü ile nemi belirleme konusunda mikrodalga ölçüm yöntemleri sınıflandırılmıştır. Açık uçlu koaksiyel prob, serbest uzay, iletim hattı, yansıma, rezonans ve zaman domeninde yansıma gibi mikrodalga yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca farklı malzeme nemini ölçme yöntemleri araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında serbest uzay yöntemi kullanılarak VNA ile 2.4 GHz'de 0.9-4 GHz frekans aralığında suntanın kuru ve farklı nemliliklerde durumları için ölçümler yapılmıştır. Matlab ortamında NRW algoritması yardımıyla S-parametre değerlerinden malzemenin dielektrik sabiti değişimi hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dielektrik Sabiti, Malzeme Nemi, Mikrodalga Yöntemleri, NRW Yöntemi, S-Parametreleri, Serbest Uzay Yöntemi.

ABSTRACT

MS THESIS

**MEASURING THE MOISTURE CONTENT OF THE MATERIAL USING
ELECTROMAGNETIC WAVES**

Raid MUHAMMEDALI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical-Electronic Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ercan YALDIZ

2023, 63 Pages

Jury

Prof. Dr. Ercan YALDIZ

Prof. Dr. Levent SEYFİ

Asst. Prof. Dr. Yunus Emre ACAR

Today, moisture information is needed in many sectors such as food, health, and industry. Moisture control is necessary in terms of both human health and the protection of goods. Moisture measurement is needed in many application areas (air, wood, soil, grain). The working principles of the methods used in moisture measurement are explained. There is a relationship between moisture and the dielectric constant. Microwave measurement methods using determining moisture by dielectric measurement are classified. Microwave methods such as open-ended coaxial probe, free space, transmission line, reflection, resonance, and reflection in the time domain have been studied. Also, different material moisture measurement methods have been investigated. In this thesis, measurements have been made for the dry and different humidity conditions of the chipboard using the free space method at 2.4 GHz frequency and in the frequency range of 0.9 to 4 GHz using VNA. The dielectric constant change of the material has been calculated with the help of NRW algorithm in Matlab environment.

Keywords: Dielectric Constant, Free Space Method, Material Moisture, Microwave Methods, NRW Method, S-Parameters.

ÖNSÖZ

Deney gerçekleştirme aşamasında yardımlarını benden eksik etmeyen ve bu tezin hazırlanmasının her aşamasında çalışmalarımı büyük bir titizlikle yönlendiren danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Ercan YALDIZ'a ve bana maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Raid MUHAMMEDALİ
KONYA-2023



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
1. GİRİŞ	1
1.1. Dielektrik Parametreleri.....	1
1.2. Dielektrik Ölçümü ile Nemi Belirleme.....	2
1.3. Mikrodalga Yöntemleri.....	3
1.3.1. Açık uçlu koaksiyel prob yöntemi	3
1.3.2. Serbest uzay yöntemi	5
1.3.3. İletim hattı yöntemi.....	5
1.3.4. Yansıma yöntemi	6
1.3.5. Rezonans yöntemi.....	7
1.3.6. Zaman domeninde yansıma ölçme (TDR) yöntemi.....	8
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
3.1. Kullanılan Materyaller	16
3.2. Serbest Uzay Yöntemi	19
3.3. NRW ile Elektrik ve Manyetik Geçirgenlik Parametrelerini Hesaplama.....	21
4. DENEY DÜZENİĞİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI	23
4.1. Deney Düzenliği.....	23
4.2. Ölçüm Sonuçları	27
4.2.1. 2.4 GHz frekansında polietilen ve suntanın dielektrik özellikleri	27
4.2.2. 0.9 - 4 GHz frekans aralığında polietilen ve suntanın dielektrik özellikleri .	34
4.2.3. Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerlerine nem oranının etkisi	40
4.2.4. Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü üzerine frekansın etkisi	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	42
5.1 Sonuçlar	42
5.2 Öneriler	42
KAYNAKLAR	44
EKLER	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

D	Maksimum anten boyutu (m)
d_{min}	Anten ile numune arasındaki minimum mesafe (m)
d	Malzeme kalınlığı (m)
T	İletim katsayısı
S_{11}	Giriş kapısı gerilim yansıma katsayısı
S_{21}	İleri yönde gerilim kazancı
ε	Karmaşık elektriksel geçirgenlik
ε'	Elektriksel geçirgenlik (gerçek kısmı)
ε''	Elektriksel geçirgenlik (sanal kısmı)
$\tan\delta$	Kayıp tanjantı
ε_r	Bağıl elektriksel geçirgenlik (dielektrik sabiti)
Γ	Yansıma katsayısı
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
λ_0	Uzay boşluğunda dalga boyu (m)
λ_c	Kesim dalga boyu (m)
λ_{4GHz}	4 GHz frekansında dalga boyu (m)

Kısaltmalar

LRL	Line-Reflection-Line (Hat-yansıma-hat kalibrasyonu)
MAF	Moving Average Filter (Hareketli Ortalama Filtresi)
TDR	Time Domain Reflectometry (Zaman Domeninde Yansıma ölçümü)
TEM	Test Edilen Malzeme
TM	Transverse Magnetic (Enine Manyetik)
VNA	Vector Network Analyzer (Vektör Ağ Analizörü)

1. GİRİŞ

Nem, havadaki veya maddedeki su buharı miktarıdır. Malzemelerin nem bilgisine başta gıda sektöründe olmak üzere, seralarda, medikal sektörde, fabrika otomasyonlarında, silolarda ve pek çok depolama uygulamalarında ihtiyaç duyuluyor. Nem, malzemenin dayanıklılığının sürdürülmesini ve depolanma süresini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Nem oranına göre ürünlerin fiyatı düşmektedir. Bu sebeplerle malzemenin nem miktarının uygun değerlerde olması önem arz etmektedir. Malzemenin nem içeriği, dielektrik özelliklerini güçlü bir şekilde etkilemektedir. Çünkü suyun dielektrik sabiti malzemenin kuru halinden çok daha yüksektir (Akman ve ark., 2002).

Nem içeriği ve sıcaklığın malzemenin elektrik geçirgenlik değerine etkisi konusunda çalışmalar yapılmıştır (Trabelsi ve ark., 2005; Solyom ve ark., 2020). Nem içeriği ne kadar yüksek olursa, dielektrik sabiti ve kayıp faktörü de o kadar yüksek olmaktadır. Damıtılmış suyun dielektrik sabiti 20°C sıcaklıkta yaklaşık 80'dir (Pandey ve ark., 2012).

Malzemenin nem içeriğinin ölçülmesinde kullanılan yöntemler, özellikle mikrodalga yöntemleri literatürde büyük ilgi görülmektedir. Bu yöntemler arasında açık uçlu koaksiyel prob, serbest uzay, iletim hattı, yansıma, rezonans ve zaman domeni yansıma yöntemleri sayılabilir. Bu tez çalışmasında malzemelerin nem içeriğinin, dielektrik ölçümüne dayalı olarak nasıl belirlendiği deneysel çalışma ile incelenmiştir.

1.1. Dielektrik Parametreleri

Dielektrik (yalıtkan), serbest elektronlar bulundurmeyen ve elektriği iletmeyen bir malzemedir. Harici elektrik alan uygulandığında dielektrikte polarizasyon meydana gelir. Dielektrik, elektronik, optik ve birçok alandaki çeşitli olguları açıklamak için önemlidir. Mükemmel dielektrik, sıfır elektrik iletkenliğine sahip bir malzemedir.

Bir malzemenin dielektrik özellikleri, bağıl elektrik geçirgenlik (dielektrik sabiti) değeri ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.1)$$

veya

$$\varepsilon_r = \varepsilon'(1 - j \tan\delta) \quad (1.2)$$

yazılır. Burada

$$\tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (1.3)$$

Burada ε' dielektrik sabitinin reel kısmıdır ve malzemenin enerji depolama yeteneğini gösterir. ε'' ise dielektrik kayıp faktörüdür (sanal kısım) ve malzeme içinde yayılan ısı enerjisi oranıdır. $\tan\delta$ ise dielektrik kayıp tanjantı olarak tanımlanır (Şahin, 2002; Rohde & Schwarz, 2012).

1.2. Dielektrik Ölçümü ile Nemi Belirleme

Dielektrik sabiti, toprak karışımı gibi iletken olmayan bir malzemenin elektromanyetik dalgaları iletme kapasitesinin bir ölçüsüdür (Sebesta ve ark., 2013).

Dielektrik sabitinin reel kısmı, ahşabın enerji depolama yeteneğidir. Kayıp faktörü ise malzeme içinde yayılan ısı enerjisi oranıdır. Örneğin ağaç malzeme karmaşık ve simetrik olmayan moleküllerden oluşmaktadır. Yüksek frekans ortamında ahşap malzemenin davranışı dipoller ve iyonlarla belirlenmektedir (Göker ve ark., 2004).

Suyun dielektrik özellikleri frekans ve sıcaklıkla beraber büyük ölçüde değişmektedir (Arslan, 2015).

Herhangi bir maddenin dielektrik sabiti o maddenin moleküllerinin elektriksel ortamda polarize olmalarına bağlıdır ve bu bağlı dielektrik katsayısının kantitatif olarak ölçülmesi ile tanımlanabilmektedir. Bir maddenin dielektrik sabiti, iki elektrik yük arasındaki elektrostatik kuvveti azaltan orandır. Yani, dielektrik sabitinin değeri yükseldiği zaman iki yük arasındaki kuvvet azalır. Her madde bir dielektrik sabitine sahiptir. Çizelge 1.1'de gösterildiği gibi bu değer farklı malzemeler için değişmektedir (Öztaş, 1997).

Suyun dielektrik sabiti, katı malzemelerin ve havanınkinden çok daha büyüktür. Bu nedenle örneğin suyun toplam toprak karışımına katkısı ile su miktarındaki nispeten küçük değişikliklerin toprak dielektrik sabiti üzerinde büyük etkileri vardır. Bu ilişkiyi kullanarak, toprak dielektrik sabitini hacimsel su içeriğiyle ilişkilendiren bir kalibrasyon modeli ile su içeriği belirlenebilir. Dielektrik ölçümü ile nem belirlenmesi, hızlı ve doğru sonuçlar sağlamaktadır (Sebesta ve ark., 2013).

Çizelge 1.1. Toprak ortamındaki unsurların tipik dielektrik sabitleri

Malzeme	Dielektrik Sabiti
Su	79~81
Toprak Parçacığı	2~6
Hava	1

1.3. Mikrodalga Yöntemleri

Mikrodalga tekniği, malzemenin nem içeriğinin ölçülmesinde kullanılmaktadır. Malzemelerin dielektrik sabiti ölçülerek nem durumları öğrenilmektedir (Chen ve Okamura, 2000).

Mikrodalga ile nem ölçme özellikleri şunlardır (Ayder ve ark.,1997):

- Mikrodalga malzemenin içinden geçer ve malzemenin iç kısmında bulunan nemi ölçebilir.
- Tahribatsız ve temassız ölçümler gerçekleştirebilir.
- Düşük güçlü mikrodalga, insanlar ve tüm malzemeler için güvenlidir.
- Mikrodalga'nın yayılma hızı çok yüksektir, bu nedenle ölçüm daha kısa sürede yapılabilir.

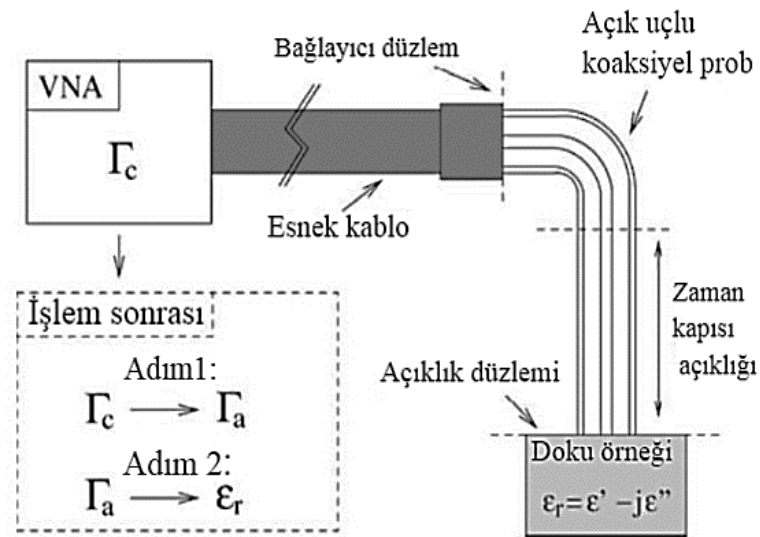
1.3.1. Açık uçlu koaksiyel prob yöntemi

Tahribatsız muayene yöntemi olarak açık uçlu koaksiyel prob yöntemi yıllardır kullanılmaktadır. Bu yöntemde, prob bir numuneye bastırılır veya sıvılara daldırılır ve yansımaya katsayısı ölçülür ve dielektrik sabitini belirlemek için kullanılır (Rohde & Schwarz, 2012).

Ayrıca, bazı ölçümlerde ölçüm için bir materyalin numunesini kesmek mümkün olmayabilir. Bu özellikle biyolojik numunelerin bulunduğu canlı dokuda (*in vivo*) ölçümler yapılması durumunda önemlidir çünkü malzeme özellikleri değişebilir. Bu nedenle, bu yöntemle numune, malzeme özelliklerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadan prob ile yakın temas halinde yerleştirilebilir (Rohde & Schwarz, 2012).

Yansımaya katsayısı, bir vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak ölçülür. Bir prob sistemli VNA, yansımaya katsayısı ölçümleri öncesi prob açıklık düzlemine referans olacak şekilde kalibre edilir. Bu, iki yöntem kullanılarak yapılabilir. İlk yöntem, probun açık ucunda doğrudan kalibrasyon için referans sıvıları kullanır. Çok doğrudan ve basittir. Bununla birlikte, ölçümdeki belirsizlikler, referans sıvılarının karakterizasyonundaki belirsizliklerden ve kalibrasyon standardı olarak referans sıvılarının seçiminden kaynaklanmaktadır. Yöntemde tüm ölçümler, probun ucuna standartlar (kısa, açık ve bir referans sıvı) yerleştirilerek gerçekleştirilir. Referans verilen sıvı bir kalibrasyon standardı olarak kullanılır ve “bilinen” dielektrik özelliklere sahip bir sıvı olmalıdır. Su, tuzlu su ve metanol genellikle referans sıvılar olarak seçilir. Standart tek portlu tam kalibrasyon daha sonra uygulanır. Test edilen malzeme (TEM) üzerinde ölçülen s-parametreleri, bir program kullanılarak dielektrik parametrelerini elde etmek için sonradan işlenebilir (Rohde & Schwarz, 2012).

Şekil 1.1’de ikinci yöntemi kullanarak bir ölçüm yapma prosedürü gösterilmektedir. Konektör düzleminde kalibre etmek için standart kalibrasyonun bir kombinasyonunu ve konektör kalibrasyon düzlemini prob açıklığına çevirmek için probun simüle edilmiş bir modelini kullanır. Dielektrik sabiti daha sonra sonda açıklığındaki yansımaya katsayısından hesaplanır. Ölçüm doğruluğu, probun açıklığının fiziksel özelliklerinin kesinliği ile yakından ilgilidir (Rohde & Schwarz, 2012).



Şekil 1.1. Açık uçlu koaksiyel prob kullanılarak doku örneğinin dielektrik sabitinin ölçülmesi (Rohde & Schwarz, 2012).

Açık uçlu koaksiyel prob yönteminin avantajları:

- Numunenin işlenmesini gerektirmez, kolay numune hazırlamak mümkündür.
- Kalibrasyondan sonra çok sayıda numunenin dielektrik özellikleri, kısa sürede rutin olarak ölçülebilir.

Açık uçlu koaksiyel prob yönteminin dezavantajları:

- Yalnızca yansıma ölçümü mevcuttur.
- Numune üzerinde ölçüm için hava boşluklarından etkilenir.

1.3.2. Serbest uzay yöntemi

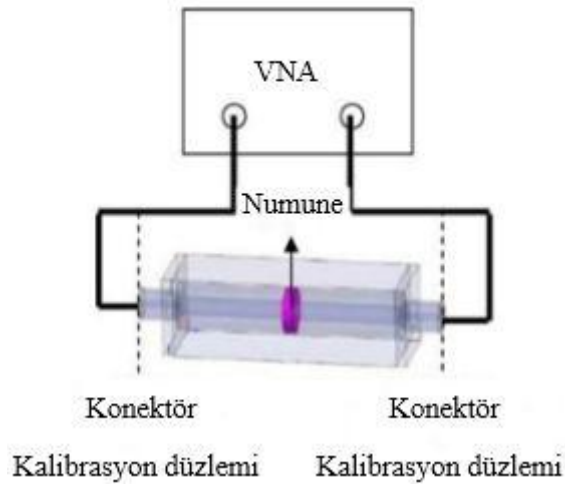
Tez çalışmasında serbest uzay yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem üçüncü bölümde detaylıca ele alınacaktır.

1.3.3. İletim hattı yöntemi

Nemi ölçülecek malzeme, dalga kılavuzu veya koaksiyel hattı iletim hattından yapılmış bir numune tutucu içerisine yerleştirilir. Hat boyunca yayılan dalga malzemedan etkilenir ve dalganın genliği malzemenin içerdiği nem ile zayıflatılır. Dalganın fazı da nem tarafından geciktirilir. Bu yöntemin özelliği ise basit bir yapıya sahip olmasıdır. Dalga, yalnızca hattın yakınındaki malzemedan yoğun olarak etkilenir. Bu nedenle, numunelerin hattın yakınına nasıl yerleştirileceğini düşünmek önemlidir (Okamura, 1999).

Bu yöntem, bir numuneyi dalga kılavuzu veya koaksiyel hattın bir bölümüne yerleştirmeyi ve iki portlu karmaşık saçılma parametrelerini bir vektör ağ analizörü (VNA) ile ölçmeyi içermektedir. Ölçüm yapılmadan önce kalibrasyon yapılmalıdır. Yöntem, yansıtılan (S_{11}) ve iletilen sinyalin (S_{21}) ölçülmesini içerir (Rohde & Schwarz, 2012).

Şekil 1.2’de iletim hattı yöntemi için kullanılan bir dalga kılavuzu görülmektedir.



Şekil 1.2. Bir dalga kılavuzu ile iletim hattı yöntemini kullanarak ölçüm (Rohde & Schwarz, 2012).

Önce VNA kalibre edilir ve hava boşlukları olduğundan ölçüm belirsizliğini azaltmak için TEM bir numune tutucuya sıkıca yerleştirilir. Numune yüzeyi ile konektör kalibrasyon düzlemi arasındaki mesafeye eşdeğer olan faz faktörü manuel olarak eklenebilmektedir. Faz faktörü, VNA'deki özelliklerle kolayca ölçüme dahil edilebilir. VNA, kalibrasyon düzlemini konektörden TEM yüzeyine kaydıracaktır (Rohde & Schwarz, 2012). Bu yöntemin avantajları:

- Dalga kılavuzları orta ila yüksek kayıplı örnekleri ölçmek için yaygın olarak kullanılır.
- Test edilen malzemenin dielektrik sabitini belirlemek için kullanılabilir.

Bu yöntemin dezavantajları ise:

- Ölçüm doğruluğu, hava boşluğu etkileriyle sınırlıdır.
- Örnek uzunluğu, malzemedeki yarı dalga boyunun katı olduğunda düşük doğruluk ile sınırlıdır.

1.3.4. Yansıma yöntemi

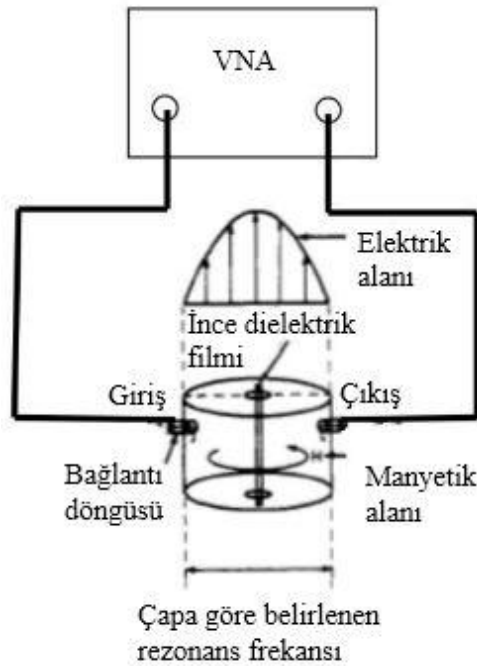
Bu yöntemin esası, malzemeyi hattın açık ucu yüzeyine yerleştirerek açık uçlu iletim hattının empedansının ölçülmesidir. Hat empedansını değiştiren nem miktarı ölçülebilmektedir. Kablonun ucunun yanında bulunan malzemeye ve malzeme ile uç arasındaki hava boşluğuna duyarlıdır. Bu nedenle, hat ile malzeme arasındaki temasın durumuna büyük özen gösterilmesi gerekmektedir. Bu yöntemin özelliği, malzemenin bir

tarafına açık uçlu hat tutularak nem içeriğini ölçebilmesidir. Ancak bu yöntemde ölçümler dış etkenlerden daha çok etkilenmektedir (Okamura, 1999).

1.3.5. Rezonans yöntemi

Rezonans ölçümleri, dielektrik sabitini belirlemede kullanılan en doğru yöntemlerdendir. Rezonans frekansından ve/veya bir rezonatörün kalite faktöründen malzemenin nem içeriği ölçülür. Bir malzemenin dielektrik sabiti, rezonans frekanslarından ve kalite faktöründen hesaplandıktan sonra bir kalibrasyon eğrisi ile nem içeriğine dönüştürülür. Şekil 1.5'te gösterilen yapı, açık uçlu bir koaksiyel hat rezonatörü kullanan tiptir. Bir çift mikroşerit rezonatörden oluşan bir sensör kullanılarak hassasiyet iyileştirilmiştir. Üretimde kaplamannın nem içeriği ölçümü için bu yöntem kullanılır (Okamura, 1999).

İki tür rezonans ölçümü vardır. Birincisi pertürbasyon yöntemidir. Tüm geçirgenlik ölçümleri, manyetik malzemeler ve orta ila yüksek kayıplı malzeme ölçümleri için uygundur. İkincisi ise düşük kayıp ölçüm yöntemi, daha büyük numuneler kullanılarak düşük kayıplı malzemeler üzerinde yapılan bir ölçümdür (Rohde & Schwarz, 2012).



Şekil 1.3. İnce filmin boşluk rezonatörü kullanılarak ölçülmesi (Rohde & Schwarz, 2012).

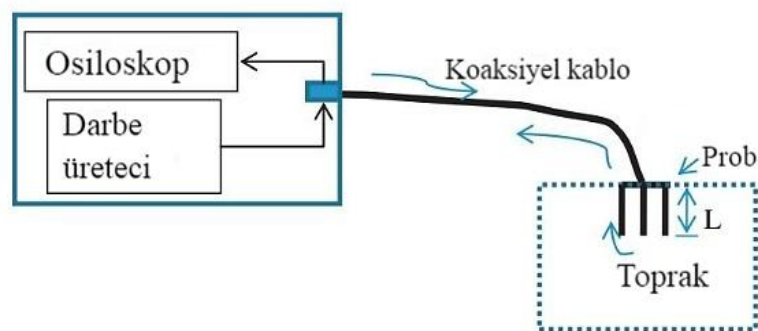
Şekil 1.3'te gösterildiği gibi pertürbasyon yöntemi ile bir Enine Manyetik (TM) boşluk geometrisi kullanılmaktadır. Bu tür ölçümler için VNA'yi kalibre etmeye gerek yoktur. Dielektrik özellikler, ilk olarak boşluğun rezonans frekansı ve kalite faktörü ölçülerek belirlenebilir. İkinci adımda boşluğu TEM ile doldurduktan sonra tekrar ölçülür. Frekans, hacim ve Q faktörü kullanılarak malzemenin geçirgenliği hesaplanabilir. Bu yöntemin avantajı, çok küçük TEM ölçme yeteneğidir.

Bu yöntemin dezavantajları ise:

- Yüksek frekans çözünürlüklü VNA'ye ihtiyacı var.
- Yalnızca dar frekans bandı ile sınırlıdır (Rohde & Schwarz, 2012).

1.3.6. Zaman domeninde yansıma ölçme (TDR) yöntemi

TDR cihazı toprak içine yerleştirilen paralel iletken sondaya (proba) bağlı bir kablo boyunca yüksek frekanslı enine elektromanyetik dalga yayar. Sondalarda paralel bir dalga kılavuzu boyunca gönderilen ve yansıyan elektromanyetik darbeler arasındaki zaman gecikmesini ölçerek toprağın dielektrik sabiti belirlenir. Kablo veya dalga kılavuzu uzunluğu bilindiğinden, yayılma hızı hesaplanabilir. Yayılma hızının artması dielektrik sabitinin azalması ve böylece düşük toprak nemi demektir. Şekil 1.4'te TDR ölçümünün prensip şeması verilmiştir (Susha-Lekshmi ve ark., 2014).

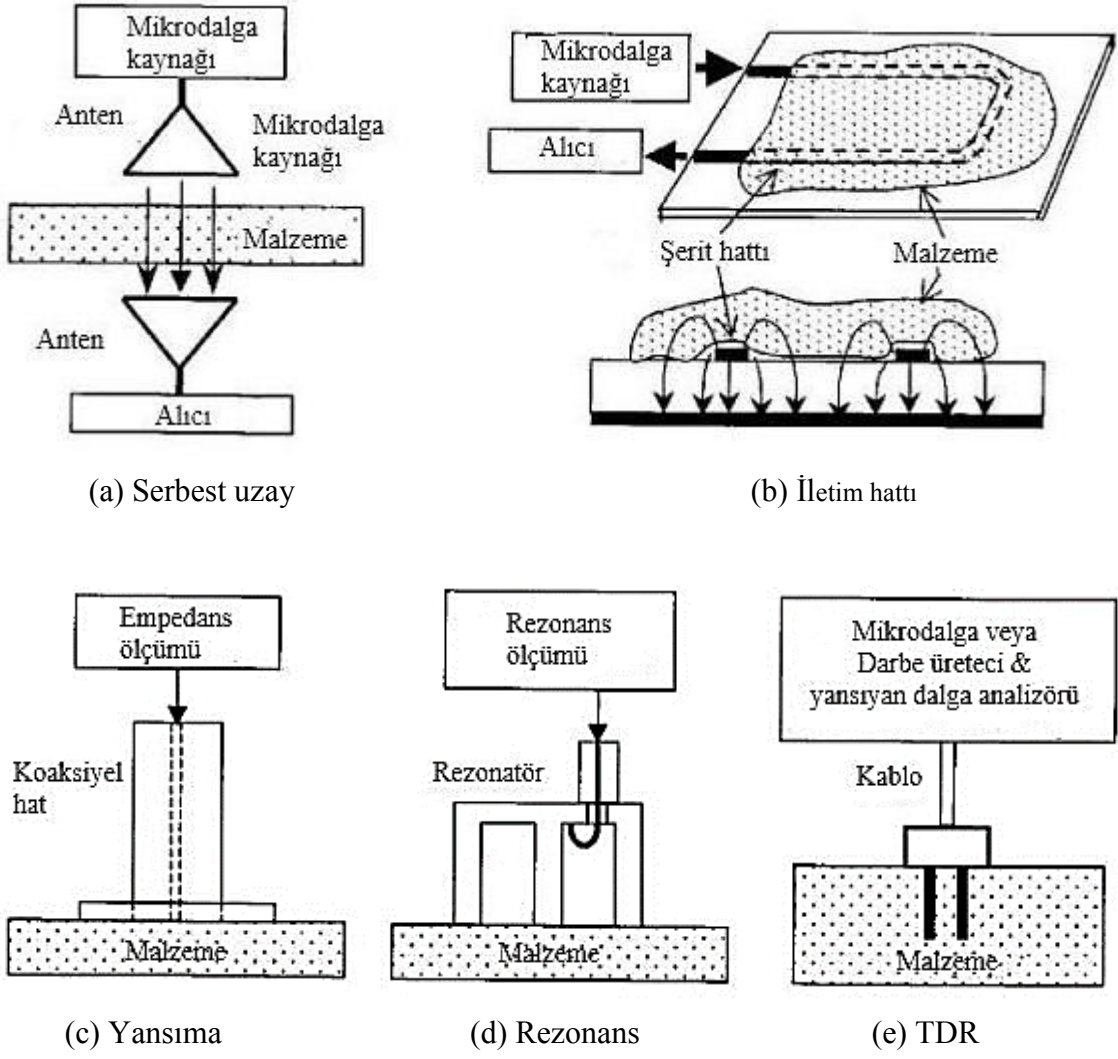


Şekil 1.4. TDR ölçümünün prensip şeması (Susha-Lekshmi ve ark., 2014).

Elektromanyetik dalgaların malzeme ile olan etkileşimi malzemenin dielektrik özellikleri ile belirlenir. İletim, yansıma, kırınım, saçılma ve kırılma gibi elektromanyetik olaylar malzemelerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak ifade edilebilir. Nemli bir malzemenin içerdiği az miktardaki su, bu malzemenin dielektrik özelliklerini dikkate değer oranda değiştirir. Nemliliğin yol açtığı dielektrik özelliklerdeki bu değişiklik

elektromanyetik olayları da etkiler. Dolayısıyla nem oranının belirlenmesinde, malzemenin dielektrik özelliklerinin nem ile değişimi kullanılabilceği gibi nemli malzemenin üzerine gelen elektromanyetik dalgayı yansıtma miktarının ve zayıflatma miktarının nem ile değişimi de kullanılabilir. Yansımaya dayalı nem oranının ölçülmesi, özellikle yansıma katsayısının nem oranına bağıllığının yüksek olduğu durumlarda faydalıdır. Suyun güçlü bir elektromanyetik dalga yutucu olması, zayıflamaya dayalı ölçümlerin verimliliğini artırır. Malzemelerin dielektrik özellikleri frekans, sıcaklık ve malzemenin yoğunluğu ile değiştiğinden yansıma ve iletim karakteristikleri de bu büyüklükler ile değişir. Bu sebeple nem oranı ölçülmesi de bu büyüklüklerin değişmesinden etkilenir. Seçilen ölçüm tekniğinde, bu büyüklüklere ait değişimleri içeren ayarlamaların yapılması ölçüm sonuçlarının bu büyüklüklere olan bağımlılığını ortadan kaldırır (Akman ve ark., 2002).

Şekil 1.5'te mikrodalga kullanan dielektrik ölçüm yöntemleri toplu olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Mikrodalga kullanarak nem ölçüm yöntemleri (Okamura, 1999).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Cheng ve ark. (2014) çalışmalarında emilen nemin düşük dielektrik sabitli malzemelerin elektriksel özellikleri ve güvenilirliği üzerine etkisini araştırmışlardır. Nemin elektriksel özellikleri ve güvenilirlik performansı dahil olmak üzere düşük dielektrik sabitli film özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu bulunmuştur. Gözenekli malzemenin yoğun malzemedan daha fazla nem emdiği ve bunun düşük dielektrik sabitli malzeme sınıfının elektrik performansını ve güvenilirliğini düşürdüğü rapor edilmiştir. Fiziksel olarak bu performansını ve güvenilirliğini eski haline getirmek için 400 °C gibi daha yüksek bir sıcaklıkta tavlama işlemi gereklidir. Kimyasal olarak emilen nemin 400 °C’de tavlama ile uzaklaştırılmasının zor olduğu görülmüştür.

Zouaoui ve ark. (2016) çalışmalarında nemin gözenekli zirkonya seramiğin dielektrik sabiti ve elektrik empedansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Gözenek hacmi fraksiyonları %33 ila %55 arasında olan numuneler, tek eksenli presleme ve fırınlama yoluyla ince bir tozdan hazırlanmıştır. 3’ten %100’e farklı bağıl nemlerde yapılan ölçümler sonucunda gözenekli seramiklerin su içeriği ile dielektrik sabitinde güçlü bir artış görülmüştür.

Mukhlisin ve ark. (2018) toprağın su içeriğinin ölçülmesinde elektromanyetik yöntemlerin yaygın olarak kullanılmasının önemine vurgu yapmışlardır. Bu çalışmada toprağın su içeriğinin geçirgenlik değerini kalibre etmek için bir normalizasyon yaklaşımı kullanarak yeni bir kalibrasyon yöntemi sunmuşlardır. Önerilen model, ikincil verilerde diğer modellerle karşılaştırıldığında daha iyi sonuç vermiştir.

Tripathi ve ark. (1996) çalışmalarında K-68 tipi buğday, hardal tohumu, tip 43 soya fasulyesi, keten tohumu, bakliyat ve pirinç olmak üzere on iki tane/tohum türü 200 Hz – 2 kHz frekans bölgesinde dielektrik sabitleri kapasitans tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Gözlemlenen veriler, değişen nem seviyesi ile önemli bir değişiklik göstermiştir.

Curtis (2001) çok çeşitli toprak dokuları için laboratuvarında ölçülen dielektrik özellik verileri ve ilgili elektromanyetik dalga yayılım parametrelerini rapor etmiştir. 100 MHz’de geçirgenlik ölçümlerinden toprak nemini tahmin etmek için bir polinom modeli sunulmuştur. Nelson ve ark. (2002) tahılda mikrodalga ile nem ölçümü prensipleri hakkında bilgi vermişlerdir. Mikrodalga frekanslarında bağıl karmaşık geçirgenliğin veya dielektrik özelliklerin ölçümü ve nem içeriğinin yoğunluktan bağımsız olarak algılanması

sunulmaktadır. Bu avantajlar ile tahıl taneleri için mikrodalga ölçüm sistemlerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Thakur ve ark. (2004) katmanlı malzemelerdeki nem içeriğinin tamamen temassız bir değerlendirme gerçekleştiren mikrodalga tabanlı bir ölçüm mekanizmasını açıklamışlardır. Düzlem elektromanyetik dalgaların yansımalarının ölçümünden katmanlı malzemelerin özelliklerini elde etmek için ters bir teknik kullanılmıştır. Teknik, doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemine dayanmaktadır. Yansıma ölçümünde önemli miktarda gürültü olsa bile, teorik ve deneysel verilere en uygun olan model elde edilmeye çalışılmıştır. Bao ve ark. (2005) hızlı ve tahribatsız su içeriği ölçümü için soya fasulyesinin dielektrik özelliklerine dayalı yeni bir yöntem geliştirmişler ve ilgili ölçüm ekipmanını yapmışlardır. Farklı uyarma frekansı altında kapasitans silindirindeki soya fasulyesinin ilgili dielektrik parametreleri ile nem içeriği arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu yeni yöntemde yer alan hatalar analiz edilmiştir.

Anjos ve ark. (2011) frekans alanı reflektometri (FDR) yöntemine dayalı bir prob kullanarak bentonitin nem ve dielektrik sabitinin belirlenmesini sunmuşlardır. Kullanılan probun temel prensibi, bu nicelikler arasında bilinen bir ilişki ile nemin belirlenmesini sağlamak için 100 MHz'de toprağın kırılma indisinin ölçülmesidir. Bu çalışma bentonitin nem ve dielektrik sabiti arasında doğru bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Then ve ark. (2014) 2.2 GHz'den 4.4 GHz'e kadar çalışacak bir mikrodalga sensör sistemi geliştirmiştir. %0'dan %26'ya kadar çeşitli gravimetrik nem içeriği değerleriyle toprak dielektrik sabitinin değişimini belirlemek için kullanmışlardır. Mikrodalga sensör sistemi başarıyla uygulanmıştır. Bu reflektometre tekniği yalnızca toprak işleme için geçerli değildir. Aynı zamanda tarım ürünleri üzerinde test yapmak için kullanılabilir. Bu reflektometre tekniği yalnızca toprak işleme için geçerli değildir. Aynı zamanda tarım ürünleri üzerinde test yapmak için kullanılabilir.

Wang ve ark. (2018) çalışmalarında radyo frekanslarında etin dielektrik özelliklerinin nem içeriğinden güçlü bir şekilde etkilendiğini bildirmektedir. 150 MHz'de çeyrek dalga boyunda bir iletim hattı ve elektrot bazlı bir prob kullanarak etin nem içeriği için hızlı bir tespit yöntemi önermişlerdir. Prob etrafındaki elektrik alan dağılımını simüle etmişlerdir. Tasarlanan cihazın performansını doğrulamak için ilgili kalibrasyonlar ve testler yapılmıştır. Cihaz ile 150 MHz'de ağ analizörü (VNA) ile elde edilen nem içeriği ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak cihazın kıyılmış etteki nem içeriği değişimini %72 ile %80 arasında ayırt edebildiği görülmüştür. Bu yöntemin et nem içeriğinin hızlı belirlenmesi için bir araç olarak önemli bir potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir.

Kafarski ve ark. (2018) toprak nemini ölçmek için sekiz çubuklu bir TDR probu kullanmışlardır. Kullanılan TDR probunun toprak nemi ölçümleri için uygun olduğunu vurgulamışlardır. Her probun ayrı bir kanala bağlanması gerekmektedir. Toprağın elektriksel geçirgenliğinin TDR zaman ölçümlerine etkisi araştırılmıştır.

Pakkathillam ve ark. (2021) küçük numunelerin karmaşık elektrik geçirgenliğini çıkarmak için anten odak düzlemi özelliklerini uyarlamak için üç dielektrik lens seçeneği ile kompakt bir hassas serbest uzay mikrodalga ölçüm düzeni sunmuşlardır. Serbest uzayda malzeme özelliği ölçümleri için kullanılan antenler ve lensler ölçümlerle doğrulanmıştır. Basılı E-alan sensörü tarafından ölçülen odak düzlemi özellikleri, simülasyonlarla çok iyi bir uyum sağlamıştır. Küçük boyutlu numunelerin karmaşık elektrik geçirgenliğinin ölçülmesini sağlayacaktır.

Aksoy (2003) üç katlı bir dielektrik arayüz kullanarak çeşitli malzemelerin dielektrik sabitlerini 9 GHz frekansında ölçmeye çalışmıştır. Bu metodun pratik açıdan en büyük dezavantajının incelenecek malzemenin en azından iki yüzünün düzlem biçiminde hazırlanmış olması gerekliliği olduğu bildirilmiştir.

Kumlutaş ve ark. (2004) özel bir düzenek hazırlayarak bir dizi sıcaklık ve nemin gözlenmesiyle nem ölçerlerin kalibrasyonunu yapmışlardır. İzole bir kabin içerisinde %15 ile %95 aralığında bağıl nem değerleri sağlanmıştır. Düzenekte, sistemin kararlı hale gelebilmesi için kurutma ve egzoz sistemi tasarlayıp tüm işlemler elektronik olarak kumanda edilerek sensörler yardımıyla bilgisayar üzerinden izlemişlerdir. Sistem kararlı hale geldikten sonra, önceden kabin içine yerleştirilmiş olan kalibrasyonu yapılacak nem ölçerlerin ölçüm sonuçlarıyla psikrometrenin ölçüm sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Öztaş (1997) zaman domeninde yansıma ölçümü (TDR) yöntemini incelemiştir. Bunun yanında Akpınar (2016) TDR aletinde farklı problemler kullanmıştır. Tansiyometre hariç, diğer toprak nem sensörlerinin aynı zamanda laboratuvar koşullarında da kalibrasyon çalışmasını yapmıştır. Arazi ve laboratuvar ortamlarında farklı tip TDR problemlerinden kareler ortalaması ve ortalama esaslı hata değerleri elde etmiştir. Tansiyometrenin arazi koşullarındaki kalibrasyonundan elde ettiği değerleri karşılaştırmıştır.

Okamura (2000) mikrodalga teknolojisi ile nem içeriği ölçümleri için sensörlerin çalışma prensiplerini açıklamıştır. Akman ve ark. (2002) ince ve düzlemsel forma sahip endüstriyel malzemelerin nemlilik oranının tayini için mikrodalga gücünde meydana gelen zayıflamaya dayalı bir sistem geliştirmişler ve test malzemesi olarak oluklu koli kartonu seçilerek ilgili incelemeleri yapmışlardır. Şeker (2006) mikrodalga ile

tahribatsız nem ölçümü tekniğini inceleyip deney düzeneği hazırlamıştır. Preslenmiş karton için endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceğini bildirmiştir.

Uytun ve ark. (2013) toprak nemi ölçüm teknikleri hakkında bilgilendirme yapmışlardır. SushaLekshmi ve ark. (2014) toprak nemi ölçüm tekniklerini değerlendirmişler. Hanlı (2020) analog anahtarlama tabanlı modülasyon teknikleri kullanılarak geliştirilen kapasitif buğday nem sensörü prototip tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarlanan nem sensörü prototipinin, buğday endüstrisinde tolere edilen $\pm 0,5$ değerinin altında ($\sim \pm 0,3$) kaldığı ve endüstride yüksek maliyetle ithal edilmekte olan nem sensörleriyle rekabet edebilecek performansta olduğunu bildirmiştir.

Tinna ve ark. (2020) tahılların neminin ölçümünde kullanılabilecek yöntemleri anlatmışlardır. Tomaraei (2010) tahılların nem içeriğini ölçebilen dielektrik tabanlı nem ölçme sistemleri geliştirmiştir. Bu amacı gerçekleştirmek için tahılların içerisine konulduğu silindirik ve paralel plakalı koaksiyel mimariye sahip numune kutuları tasarlanmıştır. Bu numune kutuları, radyo frekans (RF) bölgesinde çalışabilen bir kapasitör olarak düşünülmüştür. Seçilen tahılların dielektrik özellikleri, silindirik ve paralel plakalı RF ölçme sistemleri kullanılarak 1-100 MHz aralığında empedans analizörüyle belirlenmiştir. Literatürde önerilen ϵ' ve ϵ'' parametrelerini kullanan bir fonksiyon, seçilen kalibrasyon modeline eklenmiş, RF nem ölçme düzeni standart fırın yönteminden elde edilen nem verileri ile kalibrasyonu yapılmıştır. Silindirik ve paralel plakalı RF nem ölçme düzenleriyle nem ölçümünde sistemin standart hatası sırasıyla %0.32 ve 0.39 bağıl nem olmuştur. Silindirik ve paralel plakalı RF tabanlı nem ölçme düzenlerinin, nem içeriğini tatmin edici düzeyde ölçtüğü yapılan istatistiksel analizler sonucunda belirlenmiştir.

Göver (1996) dielektrik malzemelerin yüksek frekanslı elektromanyetik alan altındaki davranışları ve buna bağlı olarak bazı endüstriyel malzemelerin dielektrik sabiti ve kayıp faktörünü frekansa bağlı olarak ölçmüştür. Koaksiyel prob kullanılarak optik beyazlatıcının dielektrik sabiti ve kısa devre yöntemi kullanılarak silikonun dielektrik sabiti ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda silikon malzemelerin dielektrik sabitlerinin bire yakın olduğu ve kayıp faktörlerinin küçük olmasından dolayı mikrodalga ışımadan etkilenmediği görülmüştür. Optik beyazlatıcının ise polar bir malzeme olan tuz çözeltisinin tipik davranışlarına benzediği ve içinde çözücü sıvılar olduğunda mikrodalga ışımadan büyük ölçüde etkilendiği görülmüştür.

Liu'nun (2014) çalışmasında tüm ölçümler hataları en aza indirmek için yankısız ve geniş bir odada Radyo Frekans (RF) kullanılarak yapılmıştır. Toz, cam ve sıvı

malzemeye uygulanmıştır. Malzeme dielektrik ölçümünü doğru bir şekilde gerçekleştirmek için yeni bir teknik sunulmuştur. Geçirgenlik sonuçları yayınlanan değerlere yakın elde edilmiştir. Göker ve ark. (2004) kuru ve nemli odunun dielektrik özellikleri üzerine odunun lif yönü, nem oranı, yoğunluğu, alan frekansı ve sıcaklığın etkisi hakkında bilgiler verilmiştir. Doğan'ın (2020) çalışmasında kayısı ve erik yapraklarının dielektrik parametreleri 3.30-4.90 GHz arasında iletim hattı yöntemi kullanılarak ölçülmüştür.

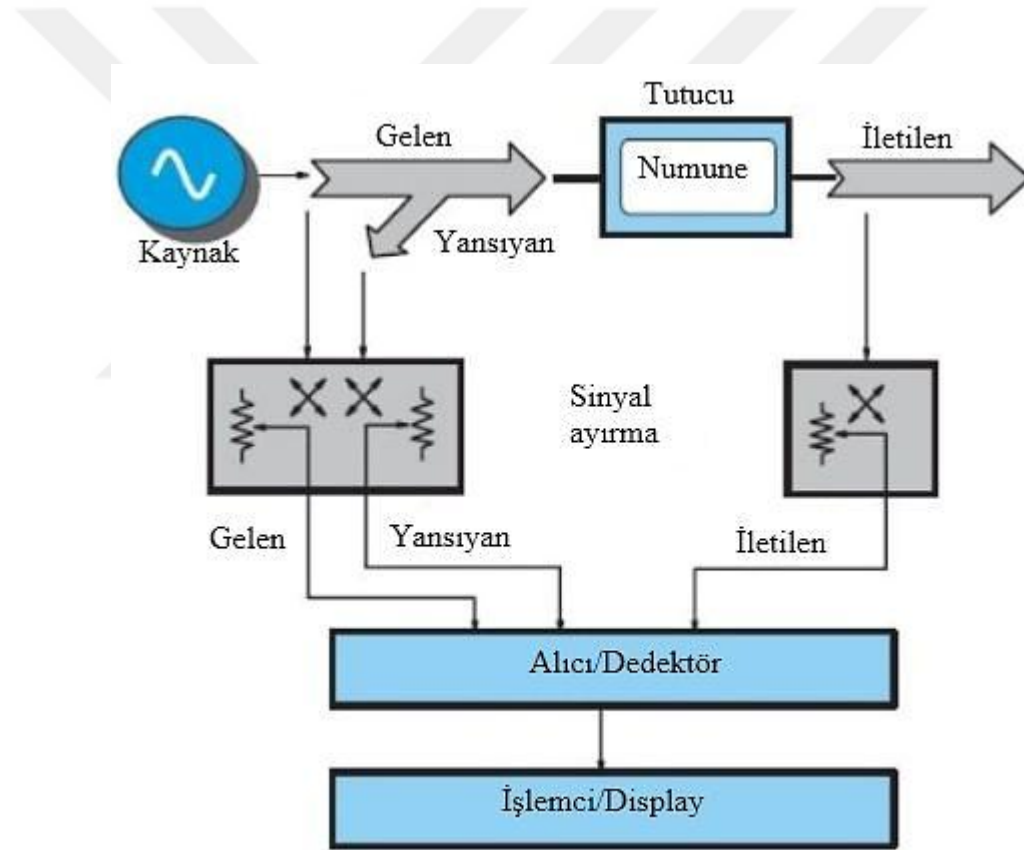
Şahin (2002) çalışmasında farklı odunların dielektrik özelliklerini dalga kılavuzu kullanarak belirlemiştir. Ölçümler 2.45 GHz ve 9.8 GHz frekanslarda yapılmıştır. Karaaslan (2009) çalışmasında Sonlu elemanlar metodu tabanlı HFSS programı kullanarak farklı şekillerde oluşturulan yapay ortamların (metamalzeme) mikrodalga bölgesine ait frekans aralığında dielektrik özellikleri negatif olarak elde etmiştir. Çınar (2015) çalışmasında Van bölgelerinden toplanan farklı basalt örneklerini incelemiştir. Bu çalışmada dielektrik sabiti ve iletkenlik gibi parametreler için empedans analizörü ile frekansa bağlı olarak ölçümler yapılmıştır. Ölçümler sonucunda bu parametrelerin frekansa göre nasıl bir değişim gösterdikleri incelenip yorumlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Materyaller

Vektör Ağ Analizörü:

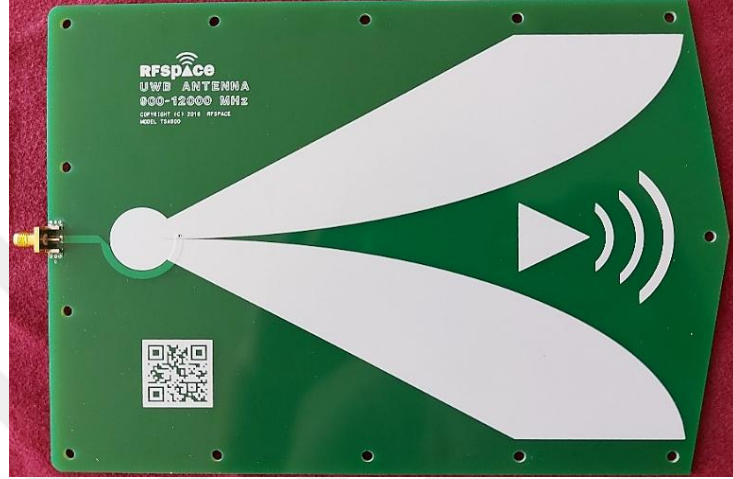
Vektör Ağ Analizörü (VNA), giriş sinyali üretmek için kullanılan bir kaynak, iletilen ve yansıtılan sinyalleri algılamak için bir alıcı, yansıtılan ve iletilen sinyalleri karşılaştırmak için bir işlemciden oluşmaktadır. VNA özelliğine göre belirli frekans aralıklarında gönderme ve alma işlemleri yapabilmekte ve S_{11} , S_{21} gibi saçılma parametrelerini hesaplayabilmektedir.



Şekil 3.1. Test edilen malzeme ölçümü için VNA'nın blok şeması (Joussemet, t.y.).

Vivaldi antenler

Vivaldi anten, tasarlanması ve üretimi oldukça kolay çok geniş bantlı antendir. Düzlemsel konfigürasyona sahiptir (Gibson, 1979). Kullanılan Vivaldi antenler RFSpace marka olup 0.9-12 GHz frekans bandına sahiptir. Şekil 3.2’de UWB Vivaldi anten görülmektedir.



Şekil 3.2. UWB Vivaldi anten

Numunelerin tartımında Şekil 3.3’te görülen RADWAG marka elektronik terazi kullanılmıştır. Dijital terazi maksimum 4 kg ağırlık ölçmektedir. Hassasiyeti ise ± 0.01 gramdır.



Şekil 3.3. Elektronik terazi

Ahşap suntaı kurutmak için Şekil 3.4'te görölen iç boyutları 45×45×40 cm olan bir fırın kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Ahşap kurutmada kullanılan fırın

Deneylerde numune malzeme olarak Şekil 3.5'te görölen 1.8 cm kalınlıkta 4 adet ahşap sunta ile 3 cm kalınlığında bir adet Polietilen kullanılmıştır.

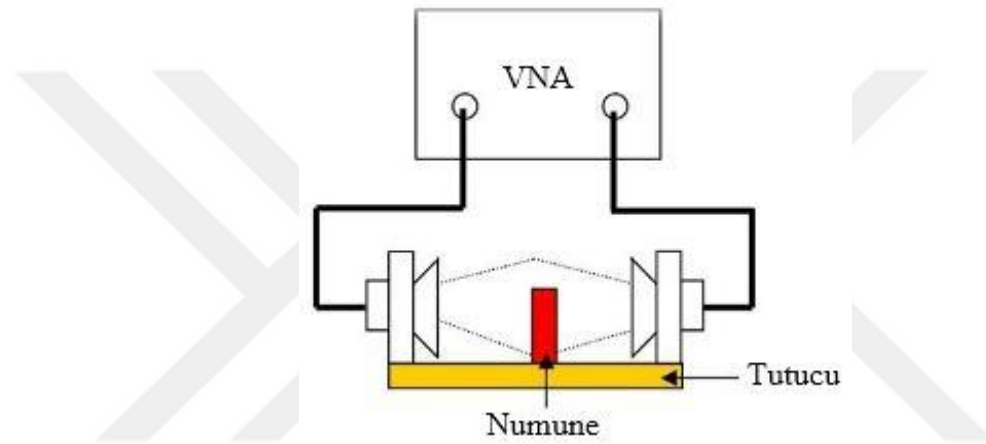


Şekil 3.5. Kullanılan ahşap sunta

3.2. Serbest Uzay Yöntemi

Mikrodalga kaynağı, çift horn anten, numune kutusu ve bir detektörden oluşmaktadır. Bir malzemenin nem içeriği, dalganın zayıflaması ve/veya faz kayması ile ölçülür. Bu yöntemin özelliği, bir numunenin iç kısmında bulunan tüm nem içeriğini ölçebilmesidir (Rohde & Schwarz, 2012).

Serbest uzay ölçümü ile numune (TEM) özellikleri yüksek sıcaklıklarda da ölçülebilir, bu yöntem genellikle geniş bant frekanslarda çalışmaktadır (Rohde & Schwarz, 2012).



Şekil 3.6. Serbest uzay yöntemi (Rohde & Schwarz, 2012).

Ölçüm, TEM'nin geniş ve yüzeyinin düz olmasını gerektirir. Genellikle birbirine bakacak şekilde yerleştirilmiş iki anten kullanarak bir VNA'ye bağlanır. Ölçüme başlamadan önce VNA kalibre edilmelidir. Hat-yansıma-hat (LRL) kalibrasyon yöntemi en yüksek kalibrasyon kalitesini verebilir. Kalibre edildikten sonra, boş numune tutucunun S-parametreleri, numune tutucu iki anten arasına yerleştirilerek ölçülür. Daha sonra test edilen malzeme antenler arasındaki numune tutucuya yerleştirilir ve S-parametrenin ölçümü tekrar gerçekleştirilir. VNA'nin gömme (de-embedding) fonksiyonunu kullanarak numune tutucunun etkisi iptal edilebilir ve test edilen malzemenin sadece S-parametresi belirlenebilir (Rohde & Schwarz, 2012).

Bu yöntemin avantajları:

- Yüksek frekanslı ölçüm için kullanılabilir.
- Tahribatsız ölçüme imkân tanır.
- Hem manyetik hem de elektriksel özellikler değerlendirilebilir.

Bu yöntemin dezavantajları ise:

- Büyük boyutlu test edilen malzemeye ihtiyaç vardır.
- Anten ve numune yüzeyi arasında yansımalar oluşur (Rohde & Schwarz, 2012).

Elektromanyetik dalgalar ile yapılan ölçümlerin avantajları şu şekilde sıralanabilir.

1. Nüfuz derinliği diğer yöntemlere göre çok daha fazladır. Bu sayede bir bant üzerinde ya da kapalı bir alan içinde hareket eden malzemenin çok daha büyük bir hacmindeki nem miktarı ölçülebilir.
2. Diğer yöntemlere göre çok daha güvenli ve hızlıdır.
3. Test edilen malzeme ile ölçüm düzeneğinin fiziksel teması olmaması eşzamanlı ve sürekli ölçüm yapılabilmesini sağlar.
4. Ölçüm, ortamda bulunan toz ya da buhardan etkilenmeyecek şekilde tasarlanabilir.
5. Kimyasal metotlardaki gibi malzeme zarar görmez.
6. Otomasyon sistemlerine dahil edilebilmesi nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır.
7. Yapılan dielektrik ölçümler tahribatsız ve temassızdır.
8. Bu ölçümler yüksek sıcaklıklı ortamlara uygundur.

Bu avantajlarının yanında sanayide zaman, maliyet ve iş gücü konusunda tasarruf sağlayacaktır. Bu sayede nem oranından kaynaklanan ekonomik kayıplar en aza indirilebilecektir.

Bu çalışmada vivaldi tipi anten kullanılarak iletilen mikrodalgalar ile nem ölçümü tekniği incelenmiştir. Kurulan sistemde nemliliği ölçülecek malzeme antenler arasına konulmuştur. Verici antenden çıkan elektromanyetik dalgalar malzemenin içinden geçerek alıcı antene ulaşır ve malzemenin mikrodalga gücünde sebep olduğu kayıp incelenir. Malzemenin içerdiği su miktarına göre bu kayıp miktarı değişmektedir. Mikrodalga ile tahribatsız nem ölçümünün temel prensibi bu şekilde açıklanabilir.

3.3. NRW ile Elektrik ve Manyetik Geçirgenlik Parametrelerini Hesaplama

Bu tez çalışmasında deneysel ölçümlerde serbest uzay tekniği ve sonuçlardan malzemenin elektriksel sabitlerinin bulunmasında Nicholson-Ross-Weir (NRW) yöntemi kullanılmıştır. Yansıma ve iletim katsayıları S-parametreleriyle ilişkilidir ve şu şekilde verilir (Liu, 2014; Kintner, 2017):

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \quad (3.1)$$

$$S_{21} = \frac{T(1-\Gamma^2)}{1-T^2 \Gamma^2} \quad (3.2)$$

S_{11} Giriş kapısı gerilim yansıma katsayısı

S_{21} İleri yönde gerilim iletim katsayısı

Γ Yansıma katsayısı

T İletim katsayısı

Yansıma katsayısı Γ , (3.1) ve (3.2) denklemlerden şu şekilde elde edilmiştir.

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3) bulabilmek için $|\Gamma| < 1$ gereklidir. Burada K değeri,

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (3.4)$$

İletim katsayısı ise şu şekilde hesaplanır:

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemlerden bağıl manyetik geçirgenlik ve bağıl elektriksel geçirgenlik (dielektrik sabiti) sırasıyla (3.6) ve (3.7)'de verildiği gibi elde edilebilir.

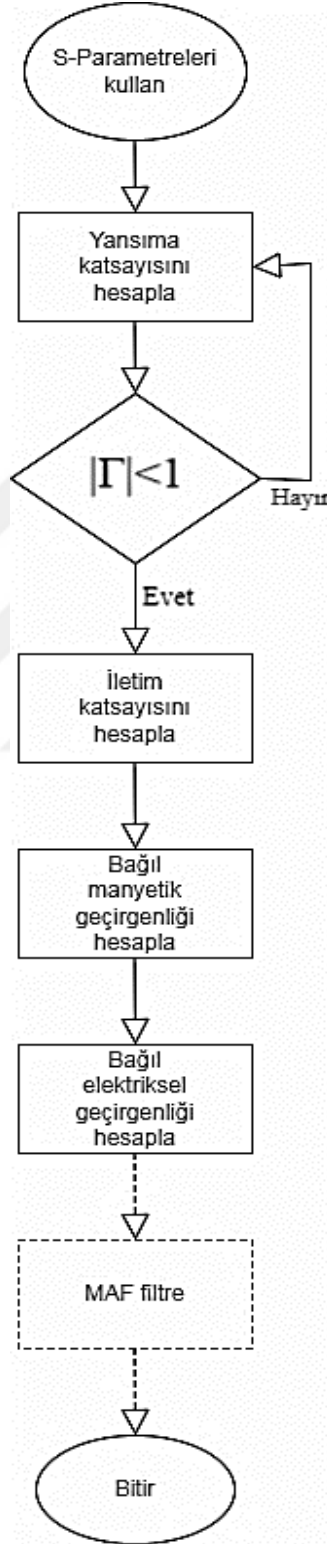
$$\mu_r = \frac{1+\Gamma}{\Lambda(1-\Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (3.6)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[\left(\frac{1}{\lambda_c^2} \right) - \left(\frac{1}{\Lambda^2} \right) \right]} \quad (3.7)$$

Boşluğun dalga boyu λ_0 , iletim hattının kesim dalga boyu λ_c (koaksiyel hatlar ve serbest uzay gibi TEM iletim hatları için $\lambda_c = \infty$) ve d ise malzeme kalınlığıdır.

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (3.8)$$

NRW algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. NRW algoritmasının akış diyagramı

4. DENEY DÜZENEGİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Ahşap sultanın nem içeriğinin dielektrik özelliğine etkisini incelemek için laboratuvar ortamında serbest uzay yöntemiyle dielektrik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde ahşabın dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün değerleri belirlenmiştir. Elde edilen değerlere göre malzemenin dielektrik sabitinin nem oranı ile ilişkili olduğu deneysel olarak gözlenmiştir.

4.1. Deney Düzenegi

Serbest uzay yönteminde iki anten, malzemeye bakacak şekilde karşılıklı olarak yerleştirilir. S parametreleri ölçülerek malzemelerin dielektrik özellikleri belirlenir. Dielektrik değerinden nem oranı tespit edilebilmektedir. Bu yöntem sayesinde numune ile temas olmadan ölçümler gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.1. Serbest uzay kullanılarak yapılan ölçme düzenegi

Deney düzeneginde ekipmanlar ve elemanlar Şekil 4.1'deki gibi numaralandırılmış ve aşağıda belirtilmiştir.

- 1) ZVL13 VNA
- 2) Vivaldi anten (Verici tarafı)
- 3) Vivaldi anten (Alıcı tarafı)

4) Numune sunta

5) Tutucu

Ahşap sunta numuneleri alınarak 105 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra tartılır. Böylece ilk kütle belirlenir. Daha sonra saf su ilave edilerek yeniden tartılır. Böylece nemli kütle ve % nemlilik belirlenir. Sunta levhaların birleştirilmeden önce ve birleştirildikten sonraki kuru ve nemli kütle ve % nemlilik değerleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de sunta numunenin birleştirilmiş hali görülmektedir.

Çizelge 4.1. Sunta levhaların birleştirilmeden önceki ölçüm değerleri

Örnek Numarası	İlk Kütle (gr)	Nemli Kütle (gr)	Nemlilik (%)
1	1536.55	1586.55	3.25
1	1536.55	1636.55	6.51
1	1536.55	1686.55	9.76
1	1536.55	1736.55	13.02
2	1546.77	1596.77	3.23
2	1546.77	1646.77	6.46
2	1546.77	1696.77	9.70
2	1546.77	1746.77	12.93
3	1616.95	1666.95	3.09
3	1616.95	1716.95	6.18
3	1616.95	1766.95	9.28
3	1616.95	1816.95	12.37
4	1579.9	1629.9	3.16
4	1579.9	1679.9	6.33
4	1579.9	1729.9	9.49
4	1579.9	1779.9	12.66

Çizelge 4.2. Sunta levhaları birleştirildikten sonra ölçüm değerleri

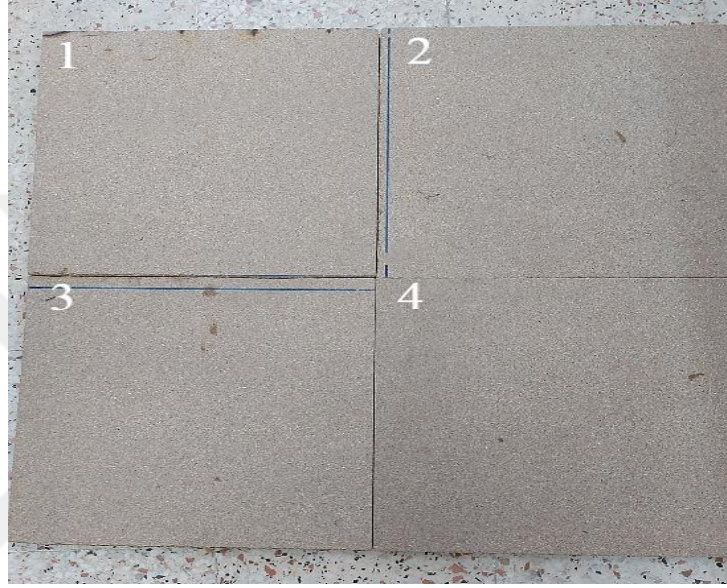
İlk Kütle (gr)	Nemli Kütle (gr)	Nemlilik (%)
6280.17	6480.17	3.18
6280.17	6680.17	6.37
6280.17	6880.17	9.55
6280.17	7080.17	12.74

Nemlilik hesabı (4.1) denklemi ile yapılmıştır (Şahin, 2002).

$$\%Nem \text{ (kuru baz)} = \frac{N.A - K.A}{K.A} \times 100 \quad (4.1)$$

N.A, Nemli ahşabın ağırlığı.

K.A, Kurutulmuş ahşabın ağırlığı.



Şekil 4.2. Sunta numunenin birleştirilmesi

Öncelikle incelenen malzeme ve antenler arasındaki mesafeyi belirlemek gerekmektedir. Kullanılan Vivaldi antenin boyutu $D = 16.5 \text{ cm}$ ve ölçüm frekansı $0.9 - 4 \text{ GHz}$ aralığındadır.

$0.9 - 18 \text{ GHz}$ arasındaki frekanslar ağaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Arslan, 2015).

$$d_{\min} \geq \frac{2D^2}{\lambda_{4\text{GHz}}} \quad (4.2)$$

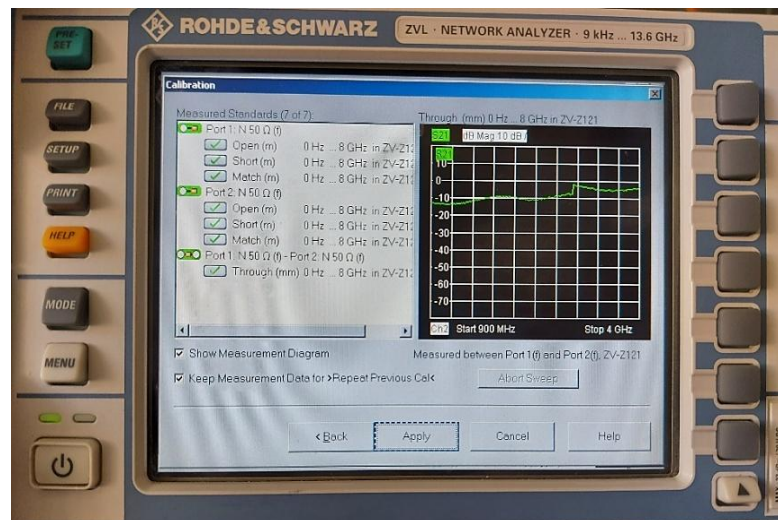
Bu denklem kullanılarak $d_{\min} = 0.73 \text{ m}$ elde edilmiştir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Yapılan deneyin performansını doğrulamak için yaygın olan Polietilen madde kullanılmıştır (Şekil 4.3). Polietilenin dielektrik sabiti ve kayıp faktörü serbest uzay yöntemi ile 2.4 GHz civarında ve 0.9 – 4 GHz frekans aralığında ölçülmüştür.



Şekil 4.3. Polietilen yerleştirilmiş deney düzeneği

Ölçümler öncesinde kablo ve konnektörler etkisiyle oluşan duran dalgaları, kenar kırınımının etkisini ve hataları en aza indirebilmek için TOSM tekniği (*through-open-short-match*) ile 0.9 - 4 GHz aralığında iki-port kalibrasyonu yapılmıştır (Şekil 4.4). Daha sonra farklı numuneler için S_{11} ve S_{21} ölçümleri yapılmıştır.



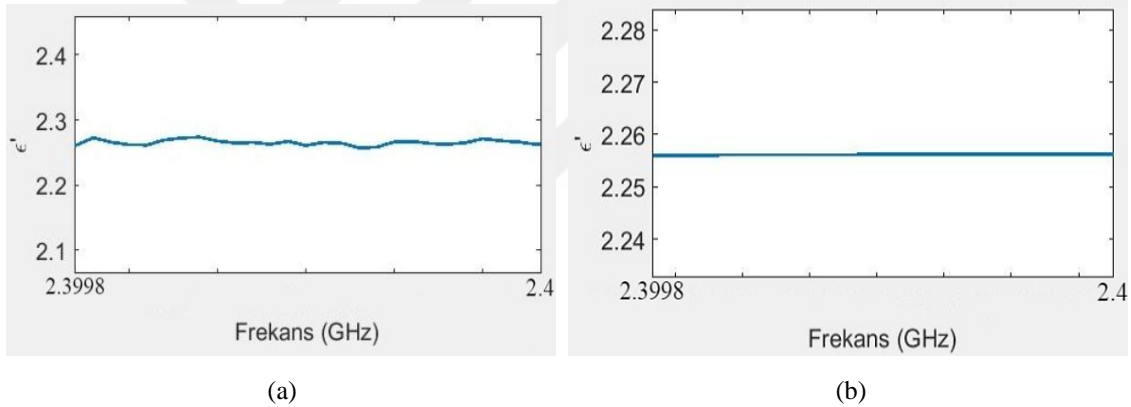
Şekil 4.4. İki port TOSM Kalibrasyonu

Matlab ortamında Kısım 3.3'te anlatılan ve Şekil 3.7'de akış diyagramı verilen NRW algoritması yardımıyla S parametrelerinden malzemenin dielektrik sabiti ve kayıp faktörlerinin değışimi hesaplanmıştır. NRW akış diyagramına en son aşamada MAF filtre uygulanarak eğrideki dalgalanmalar yumuşatılmıştır.

4.2. Ölçüm Sonuçları

Dielektrik malzemelerin (polietilen ve sunta) dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri ölçülmüştür. Bu durumu analiz edebilmek için dielektrik sabiti ve kayıp faktörü kompleks olarak hesaplanmaktadır.

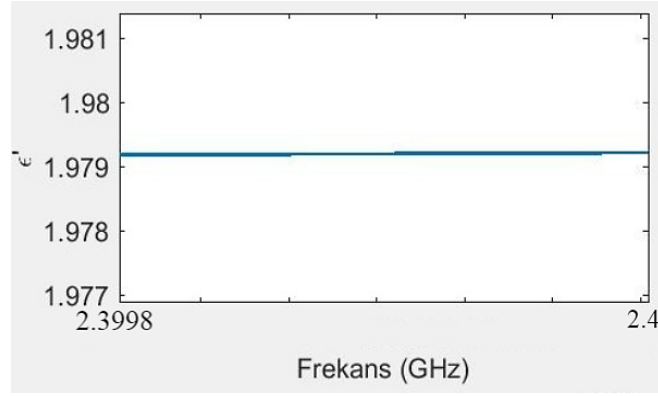
4.2.1. 2.4 GHz frekansında polietilen ve suntanın dielektrik özellikleri



Şekil 4.5. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda Polietilen dielektrik sabiti (a) MAF filtre uygulanmadan önce (b) MAF filtre uygulandıktan sonra

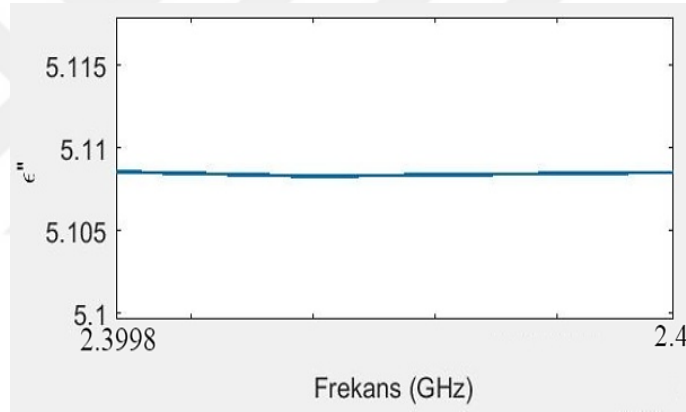
Polietilenin literatürde yayınlanan dielektrik sabiti 2.3'tür (İyibakanlar, 2003). Bu çalışmada 2.4 GHz civarındaki frekanslarda ölçülen polietilenin bu değerinden %5'ten daha düşük bir farkla elde edilmiştir (Şekil 4.5).

Daha sonra sunta tam kuru iken 2.4 GHz civarındaki frekanslarda dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün değerleri ölçülmüştür.



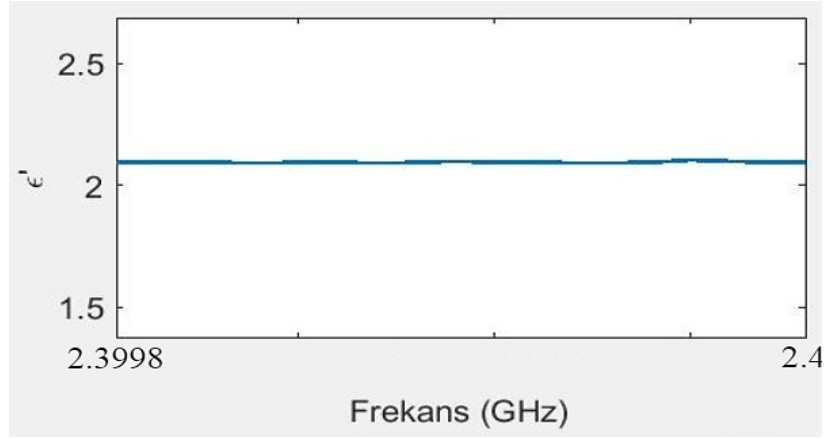
Şekil 4.6. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %0 nem oranında (kuru halinde) dielektrik sabiti

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi 2.4 GHz frekansında sunta tam kuru halinde dielektrik sabiti yaklaşık 1.979 bulunmuştur.

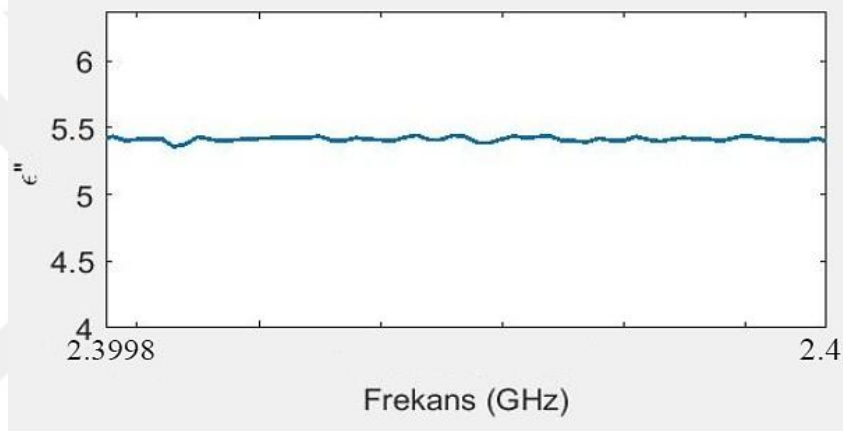


Şekil 4.7. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %0 nem oranında (kuru halinde) dielektrik kayıp faktörü

Şekil 4.7'de gösterildiği gibi 2.4 GHz frekansında sunta tam kuru halinde dielektrik kayıp faktörü yaklaşık 5.11 bulunmuştur. Daha sonra suntanın farklı nem oranlarında 2.4 GHz civarındaki frekanslarda dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün değerleri ölçülmüştür.



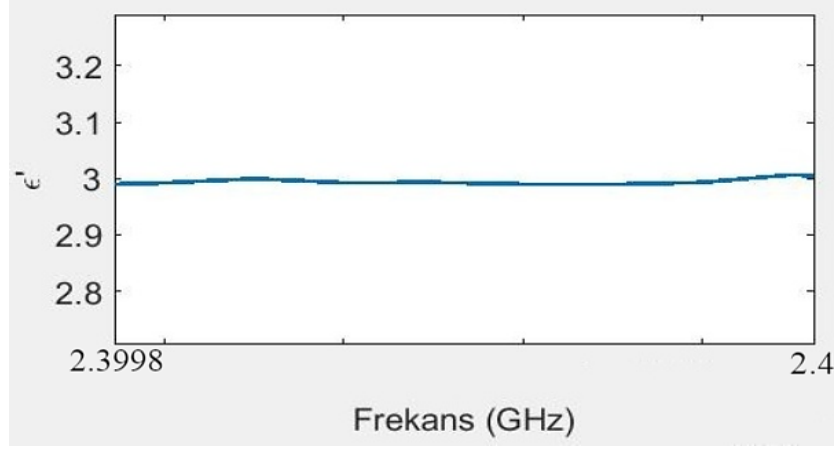
Şekil 4.8. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %3.18 nem oranında dielektrik sabiti



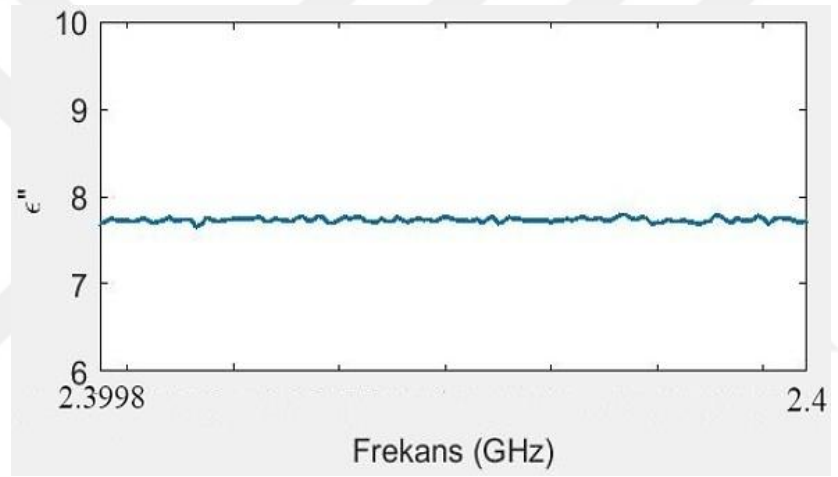
Şekil 4.9. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %3.18 nem oranında dielektrik kayıp faktörü

%3.18 nem oranında sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9'da verilen şekillerde dielektrik sabiti ve kayıp faktöründe önemli bir değişiklik olmamıştır.

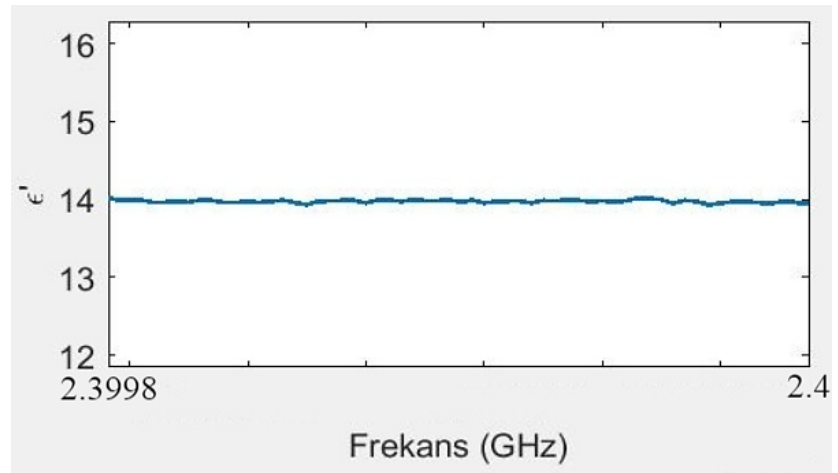
Şekil 4.10'dan 4.15'e kadar olan grafiklerde farklı nem değerleri için ölçülen dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü görülmektedir.



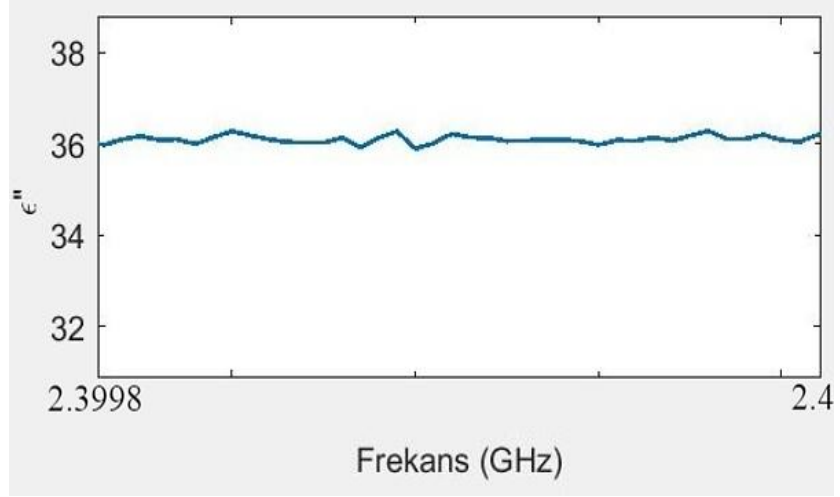
Şekil 4.10. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %6.37 nem oranında dielektrik sabiti



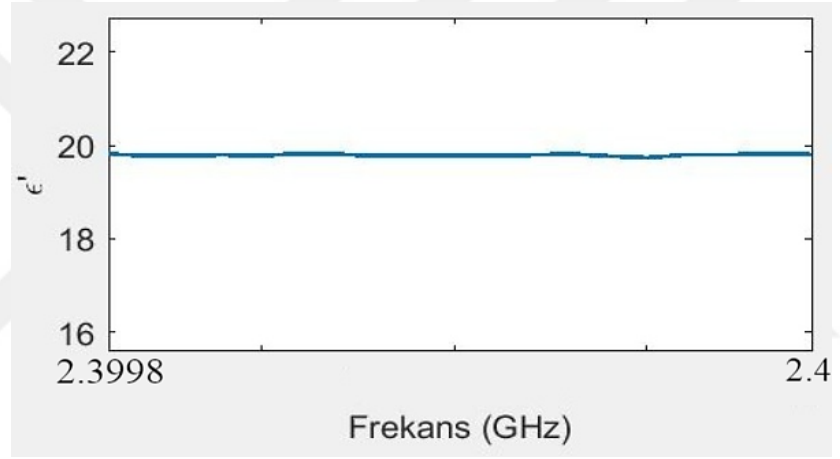
Şekil 4.11. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %6.37 nem oranında dielektrik kayıp faktörü



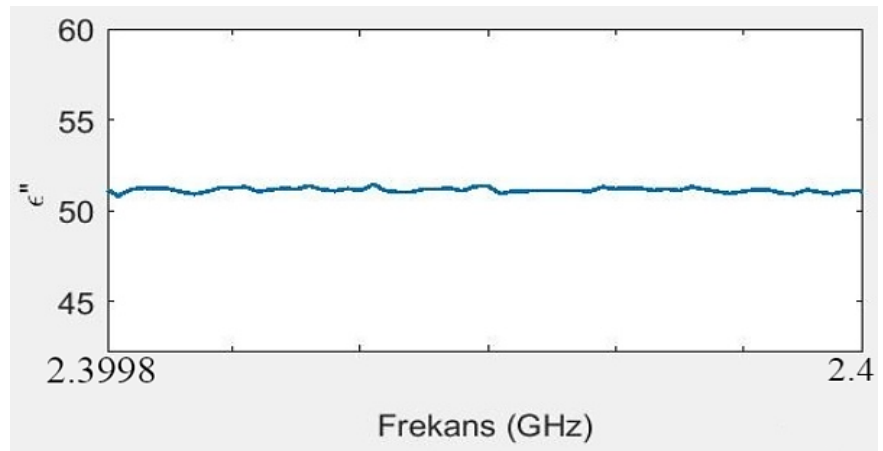
Şekil 4.12. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %9.55 nem oranında dielektrik sabiti



Şekil 4.13. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %9.55 nem oranında dielektrik kayıp faktörü

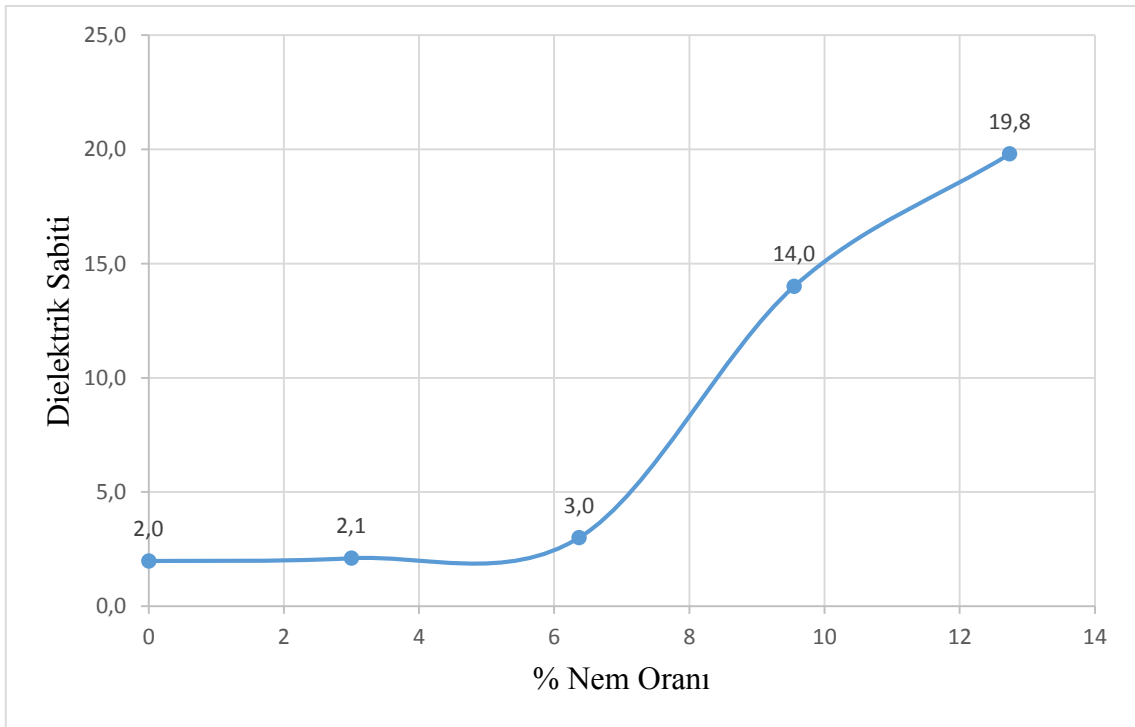


Şekil 4.14. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %12.74 nem oranında dielektrik sabiti

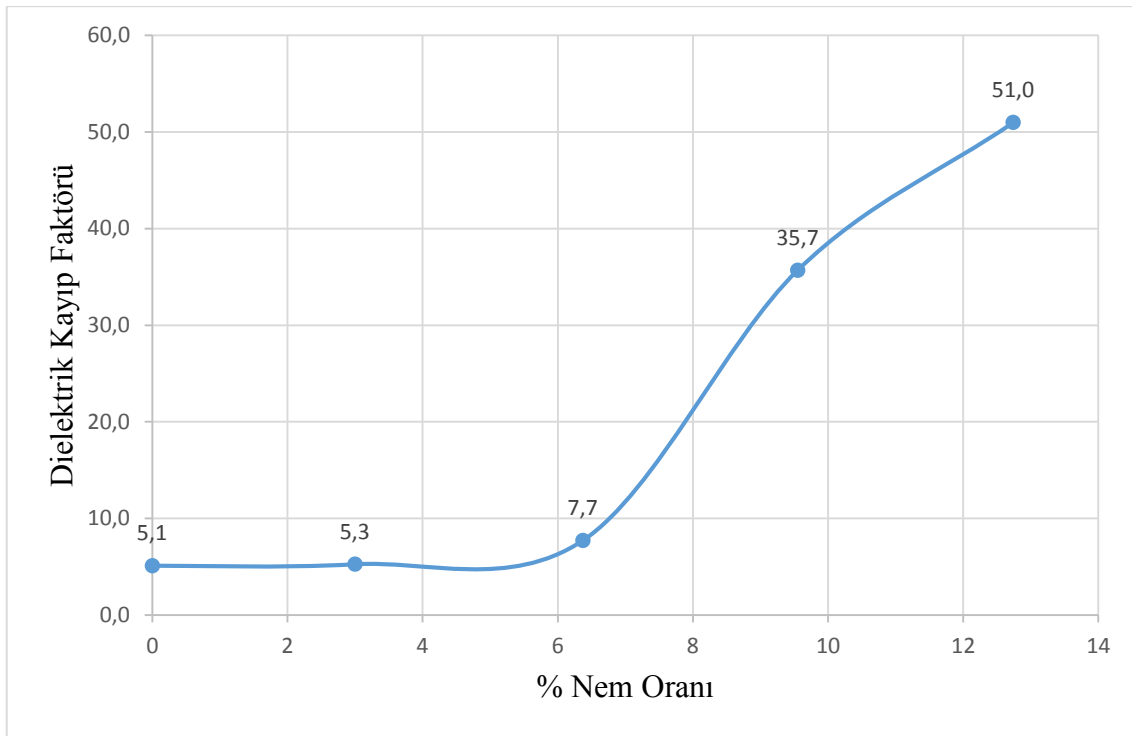


Şekil 4.15. 2.4 GHz civarındaki frekanslarda sunta %12.74 nem oranında dielektrik kayıp faktörü

Şekil 4.16 ve 4.17’de sırasıyla % nem oranına göre dielektrik sabitinin ve dielektrik kayıp faktörünün değişim grafiği verilmiştir. Bu grafiklere göre daha fazla saf su ilave edildikçe yani nem artmasıyla dielektrik sabitinin ve dielektrik kayıp faktörünün arttığı görülmüştür. Nem oranı % 6’dan daha fazla olduğundan dielektrik sabitinde ve kayıp faktöründe çok önemli artışlar olmuştur. Söz konusu grafiklerde % 6 nem oranı civarında kırılma olduğu görülmüştür. Bu değerden önceki ve sonraki grafik değişiminin yaklaşık doğrusal olduğu görülmüştür.



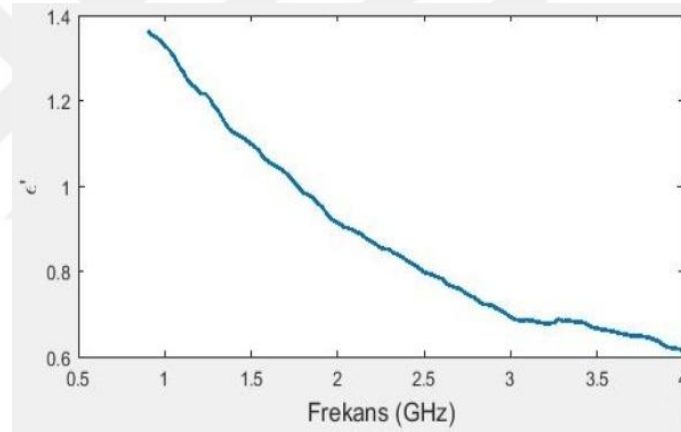
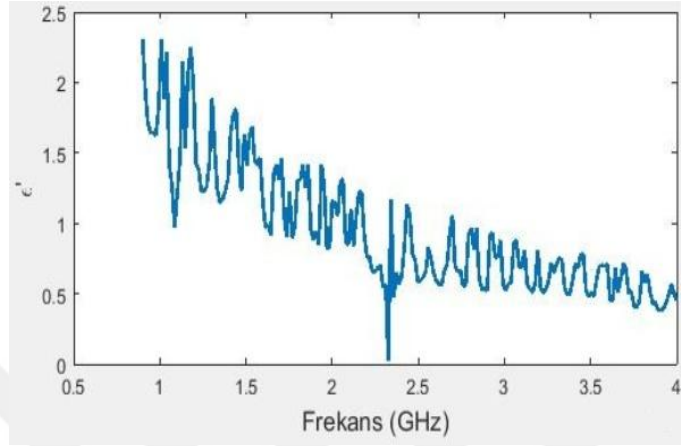
Şekil 4.16. 2.4 GHz frekansında ahşap suntaya ait nem oranlarında ϵ' dielektrik sabitinin değişimi



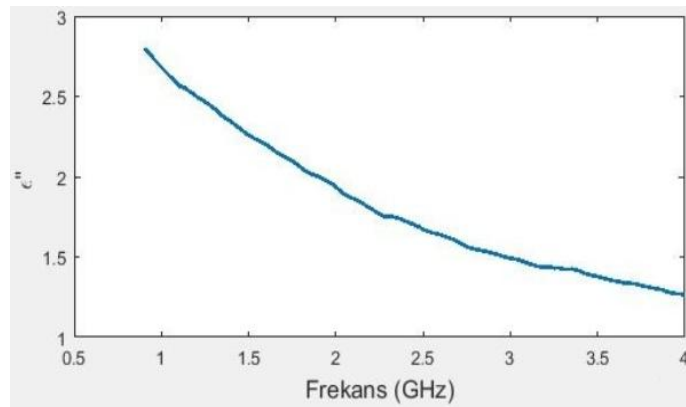
Şekil 4.17. 2.4 GHz frekansında ahşap suntaya ait nem oranlarında ϵ'' dielektrik kayıp faktörünün değişimi

4.2.2. 0.9 - 4 GHz frekans aralığında polietilen ve suntanın dielektrik özellikleri

Hiçbir numune yerleştirilmeden önce laboratuvardaki hava ortamının dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün değerleri ölçülmüş, sonuçlar Şekil 4.18 ve 4.19’da verilmiştir.



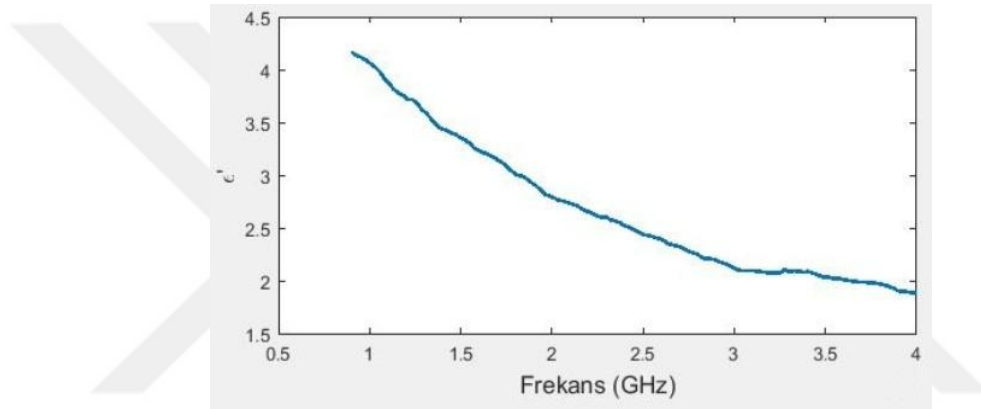
Şekil 4.18. 0.9 - 4 GHz aralığında numune yerleştirilmeden önce dielektrik sabiti.
(a) MAF filtre uygulanmadan önce, (b) MAF filtre uygulandıktan sonra.



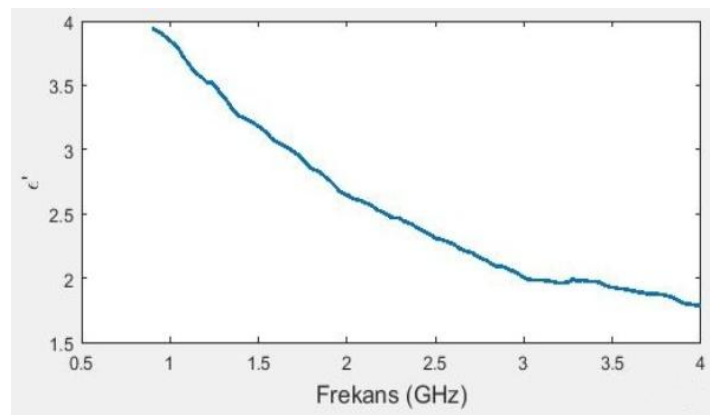
Şekil 4.19. 0.9 - 4 GHz aralığında numune yerleştirilmeden önce dielektrik kayıp faktörü

Numune yok iken boş ortamda elde edilen sonuçlara göre ölçümün yapıldığı frekans aralığında dielektrik sabitinin 1 değeri civarında değiştiği görülmektedir. Hava ortamında dielektrik sabiti 1'dir. Ölçüm ortamındaki havanın nem oranı ve çevredeki yansıtıcılar gibi unsurların sonucu etkilediği değerlendirilmektedir. Bu, ölçümlerde kaçınılmaz bir durumdur. Bu frekans aralığında dielektrik kayıp faktörü 1.8 civarında değişmektedir.

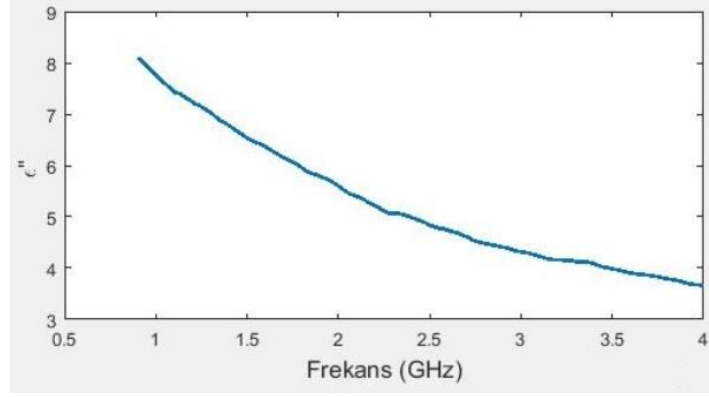
Şekil 4.20'de polietilenin ölçülen dielektrik sabiti görülmektedir. Şekil 4.21'den 4.28'e kadar olan grafiklerde farklı nem değerleri için dielektrik sabiti ve kayıp faktörü ölçümleri görülmektedir.



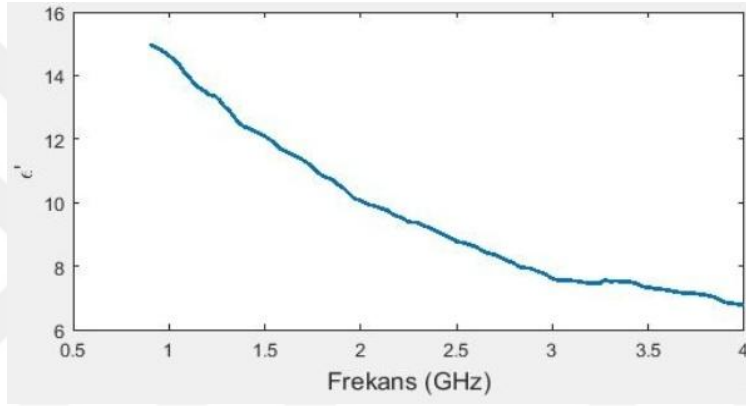
Şekil 4.20. 0.9 - 4 GHz aralığında Polietilen dielektrik sabiti



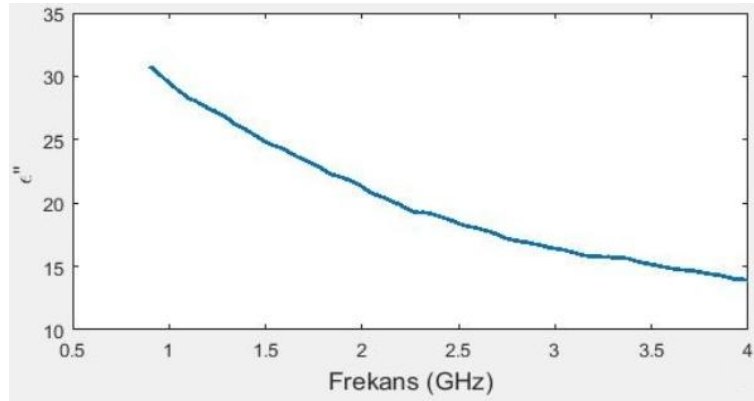
Şekil 4.21. 0.9 - 4 GHz aralığında sunta %0 nem oranında dielektrik sabiti



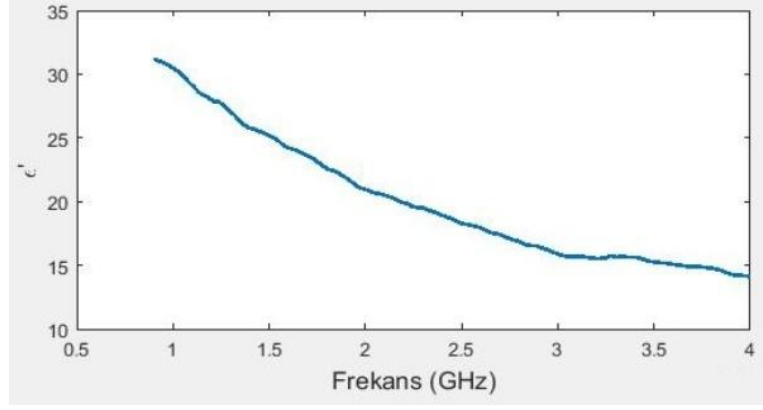
Şekil 4.22. 0.9 - 4 GHz aralığında sunta %0 nem oranında dielektrik kayıp faktörü



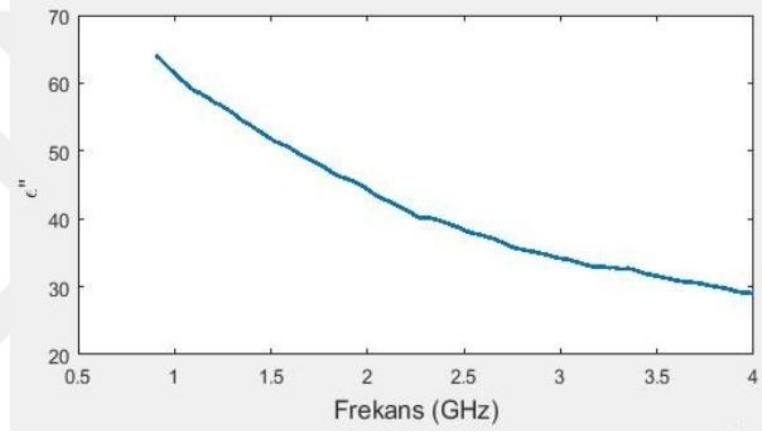
Şekil 4.23. 0.9 - 4 GHz aralığında sunta %6.37 nem oranında dielektrik sabiti



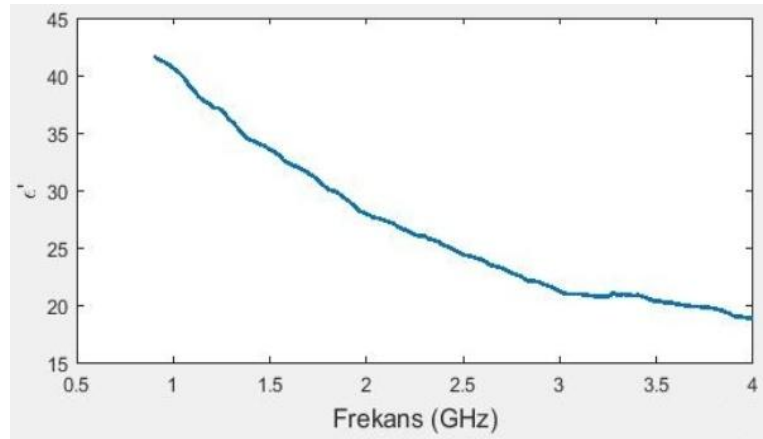
Şekil 4.24. 0.9 - 4 GHz aralığında sunta %6.37 nem oranında dielektrik kayıp faktörü



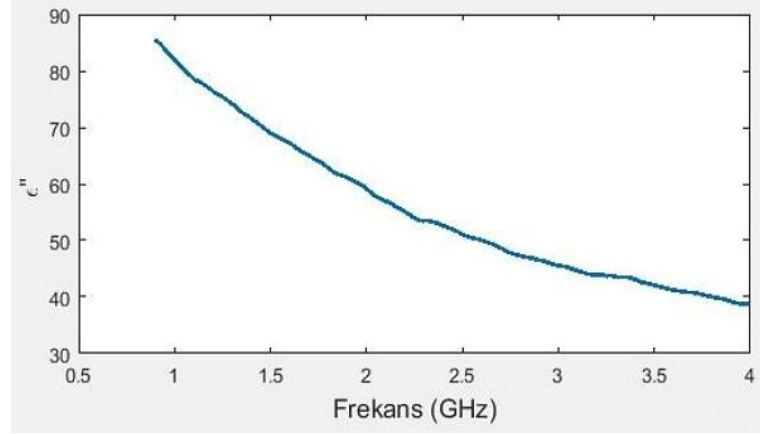
Şekil 4.25. 0.9 - 4 GHz aralığında sunta %9.55 nem oranında dielektrik sabiti



Şekil 4.26. 0.9 - 4 GHz aralığında sunta %9.55 nem oranında dielektrik kayıp faktörü

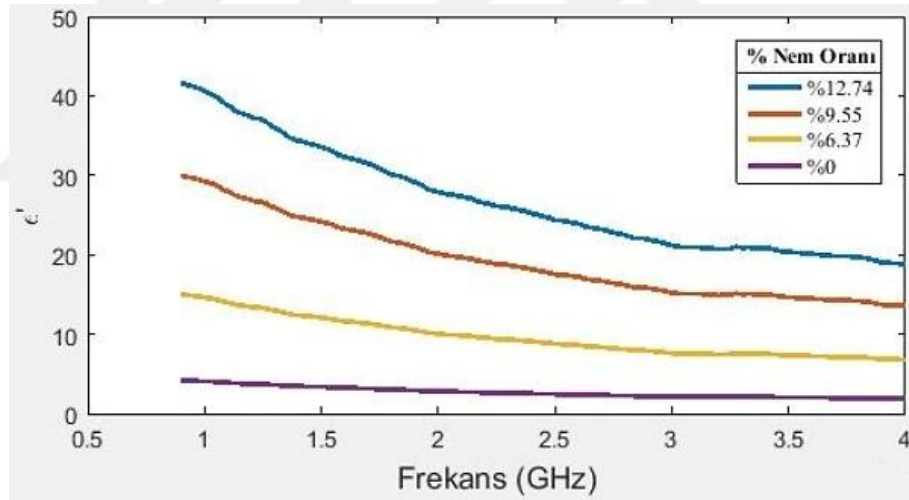


Şekil 4.27. 0.9 - 4 GHz aralığında sunta %12.74 nem oranında dielektrik sabiti

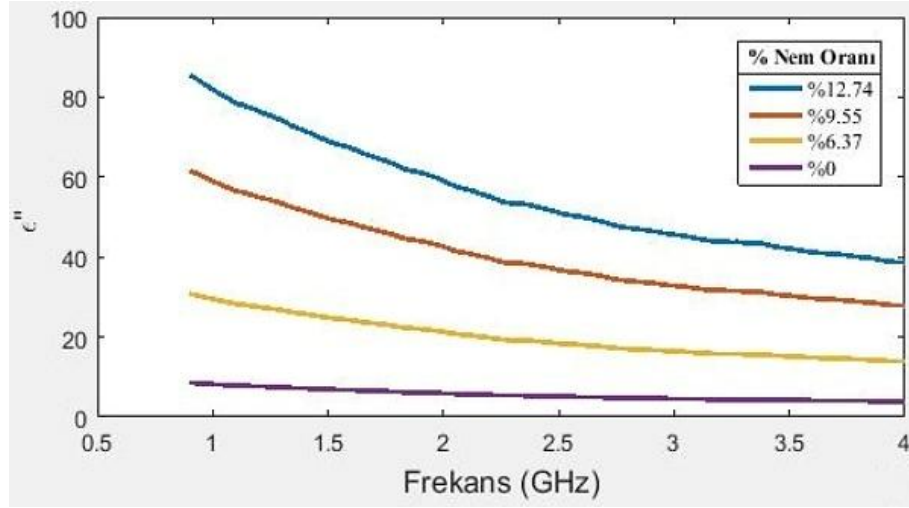


Şekil 4.28. 0.9 - 4 GHz aralığında sunta %12.74 nem oranında dielektrik kayıp faktörü

Farklı nem oranı (%0, %6.37, %9.55 ve %12.74) değerleri için frekansa göre dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü değerlerinin değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.29 ve 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.29. Suntanın ϵ' değerinin farklı nem oranlarında frekansa göre değişimi



Şekil 4.30. Sunta için ϵ'' değerinin farklı nem oranlarında frekansa göre değişimi

Şekil 4.31 ve 4.32'de %12.74 nem için S_{11} ve S_{21} ölçümlerinde elde edilen değerlerin olduğu ekran görüntüleri görülmektedir.

	A	B	C
	Version100	VarName2	VarName3
	NUMBER	NUMBER	NUMBER
1	% Version 1...		
2	%		
3	%freq[Hz]	db:Trc1_S11	ang:Trc1_S11
4	9.00000000...	-1.1122073...	2.691870490266124E+001
5	9.15500000...	-1.1988555...	1.592462369186156E+001
6	9.31000000...	-1.3143974...	1.816925334555371E+001
7	9.46500000...	-1.1995583...	4.454963499927414E+000
8	9.62000000...	-1.2661686...	-7.772456941366819E+000
9	9.77500000...	-1.4859219...	-1.194257397161013E+001
10	9.93000000...	-1.5848943...	-2.497769371159621E+001
11	1.00850000...	-1.5767102...	-4.330603765628196E+001
12	1.02400000...	-1.8769214...	-4.512496620943993E+001
13	1.03950000...	-2.0840886...	-6.151197474633055E+001
14	1.05500000...	-2.7721999...	-7.369793382628481E+001
15	1.07050000...	-3.2509549...	-9.139152214655034E+001
16	1.08600000...	-4.4014704...	-1.360456658699035E+002
17	1.10150000...	-2.6860273...	1.342466845196219E+002
18	1.11700000...	-2.3331558...	1.007370825150481E+002
19	1.13250000...	-1.8966225...	9.041472445522790E+001
20	1.14800000...	-1.6326478...	7.874107076396668E+001
21	1.16350000...	-1.6047883...	7.501670826689463E+001
22	1.17900000...	-1.4359665...	6.612431856848509E+001
23	1.19450000...	-1.2412433...	5.708720797791737E+001
24	1.21000000...	-1.0936256...	5.068535707124148E+001

Şekil 4.31. % 12.74 nemde S_{11} 'nin ölçülen genlik ve açı verilerine ilişkin ekran görüntüsü

	A	B	C
	Version100	VarName2	VarName3
	NUMBER	NUMBER	NUMBER
1	% Version 1...		
2	%		
3	%freq[Hz]	db:Trc1_S21	ang:Trc1_S21
4	9.00000000...	-2.7701749...	-3.673835649275428E+001
5	9.15500000...	-2.9549340...	-1.041563563485977E+002
6	9.31000000...	-3.2715742...	-1.257910462589224E+002
7	9.46500000...	-2.9004971...	-1.679595962402450E+002
8	9.62000000...	-3.2852988...	1.549542014384717E+002
9	9.77500000...	-3.0876238...	1.220337337081181E+002
10	9.93000000...	-2.8559297...	6.356128425952269E+001
11	1.00850000...	-2.9779411...	1.429586336250406E+001
12	1.02400000...	-3.1750133...	-2.548940979207693E+001
13	1.03950000...	-3.0389378...	-7.274227346850908E+001
14	1.05500000...	-3.6595399...	-1.161673694744587E+002
15	1.07050000...	-3.6736271...	-1.479712675633128E+002
16	1.08600000...	-3.4943162...	-1.583171965784746E+002
17	1.10150000...	-3.3026981...	1.460015416685786E+002
18	1.11700000...	-3.8988208...	9.720187598694176E+001
19	1.13250000...	-3.5071370...	8.569854847961369E+001
20	1.14800000...	-3.6213140...	4.695050584031024E+001
21	1.16350000...	-3.8495520...	1.413649110853152E+001
22	1.17900000...	-3.2904951...	6.949318755323891E+000
23	1.19450000...	-2.9954596...	-5.311912272627057E+001
24	1.21000000...	-3.0087220...	-1.113274422094975E+002

Şekil 4.32. % 12.74 nemde S_{21} 'nin ölçülen genlik ve açı verilerine ilişkin ekran görüntü

4.2.3. Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerlerine nem oranının etkisi

Bu tez çalışmasında sunta numunesinin dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri ile nem oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. 2.4 GHz frekansında nem oranındaki artışla dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 4.16 ve 4.17'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Bu grafiklerde %6 nem oranı civarında bir kırılma olduğu ve neme bağlı değişimin daha da arttığı görülmektedir.

0.9 - 4 GHz frekans aralığında yapılan ölçüm sonuçları, nem artışıyla birlikte suntanın dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerlerinin de arttığını göstermektedir. Nem oranı % 6'dan daha fazla değerlere çıktığında dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri de lineer olarak daha fazla artmaktadır. Başka çalışmalarda bu durumu destekleyen sonuçlar bulunduğu rapor edilmiştir. Nem oranı %5'ten %15-23'e kadar arttığında dielektrik sabiti büyük ölçüde artarken ve kayıp tanjantı aniden artmaktadır (Göker ve ark., 2004).

4.2.4. Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü üzerine frekansın etkisi

0.9 - 4 GHz frekans aralığında yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlara göre hem polietilen (Şekil 4.20) hem de farklı nem oranlarındaki sunta için (Şekil 4.21-Şekil 4.28 arası) elde edilen grafiklere göre, frekans arttıkça dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri düşmektedir. Başka çalışmalarda bu durumu destekleyen sonuçlar bulunduğu rapor edilmiştir. Frekansın artması ile iyonik iletkenliğin etkisi azalır ve ciddi gevşeme kayıpları olmaktadır (Göker ve ark., 2004).

Literatürde dielektrik sabiti üzerine frekansın etkisini destekleyen kaynaklar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Elde edilen sonuçları destekleyen literatürdeki kaynaklar

Malzeme	Frekans (GHz)	Kaynak
Ahşap	0.1-10	(Göker ve ark., 2004)
Kullanılmış ahşap türleri	2.45 ve 9.8	(Şahin, 2002)
Kayısı Yaprağı	3.3-4.9	(Doğan, 2020)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında malzemelerin dielektrik özelliğinin elektromanyetik alanlara etkisinin ölçümü yoluyla malzeme nemi ölçüm yöntemleri incelenmektedir. Ölçümlerde kullanılan serbest uzay tekniği yanı sıra kullanılan diğer yöntemlerden de bahsedilmiştir. Serbest uzay yöntemi kullanarak nasıl dielektrik sabiti ve kayıp faktörü hesaplanabileceği ortaya konmuştur. Ölçümler 2.4 GHz frekansında ve 0.9 - 4 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

S-parametrelerinden ϵ_r ve μ_r hesaplamada kullanılan NRW yöntemi hataya duyarlı olduğu kabulü ile iyi bir performans göstermektedir. Deneyin performansını doğrulamak için ticari olarak yaygın olan polietilen madde kullanılmıştır. 2.4 GHz frekansında ölçülen polietilenin dielektrik sabiti literatürde yayınlanan değerine yakın bir değere sahip olduğu gösterilerek sistemin performansı doğrulanmıştır.

Nem artışıyla beraber kritik bir değerden sonra dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerlerinde hızlı artışlar gözlemlenmiştir. Düşük frekanslarda ϵ' değeri daha yüksek iken, frekans artışıyla beraber bu değerde düşüş görülmüştür.

Literatürde yapılmış başka çalışmalarda farklı ağaç türü odunlarının dielektrik özelliklerinde değişiklikler görülmüştür. Ancak dielektrik değişimine sebep olan bir diğer etkenin de odun yoğunluğundaki farklılık nedeniyle olduğu belirtilmektedir (Göker ve ark., 2004).

5.2 Öneriler

Ürünlerin üretim verimini artırmak amacıyla elektromanyetik dalga ile nem ölçüm yöntemleri uygulanmaktadır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre elektromanyetik dalgalar kullanılarak ahşabın depolama alanlarında nem oranı uzaktan rahat bir şekilde ölçülebilecektir.

Serbest uzay yöntemi, malzemelerin tahribatsız ve temassız dielektrik ölçümü için uygundur. Yüksek sıcaklıktaki ortamlarda yapılacak dielektrik ölçümleri için uygun olacaktır.

Sonraki çalışmalarda farklı malzemelerin nem oranlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir. Ölçüm yapılmadan önce donanımın kararlı olması gerekmektedir. Ayrıca yankısız odalarda ölçülmesi önerilmektedir.

İleride yapılacak benzer çalışmalarda kullanılacak ahşap benzeri malzemenin homojen olarak nemlendirilmesi ve daha yüksek seviyede nem oranlarına ulaşılması durumunda ölçüm sonuçlarının nasıl değiştiği araştırılabilir. Ortam sıcaklığının elektriksel geçirgenliğe etkisi araştırılması gereken bir başka konudur.

Yapılan çalışma ve edinilen tecrübeler, ilk başta ülkemiz insanına ve daha sonra dünya toplumuna farklı alanlarda yararlı olacaktır. Ayrıca tüm boyutları ile ele alındığı için elektromanyetik alan ve nemlilik konusu ile ilgili araştırmacılar için bu çalışmanın bir kaynak olacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Akman, A., Güler, S., Süle, O., Oktay, A., 2002, Endüstriyel malzemelerin nemlilik oranının mikrodalga tekniği ile tayini. *ELECO2002*, 18-22 Aralık 2002, Bursa.
- Akpınar, Y., 2016, İç Anadolu Bölgesinde Toprak Neminin Belirlenmesinde Kullanılan Bazı Toprak Nem Sensörlerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aksoy, S., 2003, Çoklu Dielektrik Arayüzler Yardımı İle Dielektrik Geçirgenlik Ölçümü, *Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, 17-21 Eylül 2003, İstanbul.
- Anjons, I.F.D., Freire, R.S.C., 2011, Frequency Domain Reflectometry in the Determination of Dielectric Constant of Bentonite, *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*, 29 October - 1 November 2011, Natal, Brazil, 533-536.
- Anonymous, Training Course Series 30: Field Estimation of Soil Water Content, A Practical Guide to Methods, *Instrumentation and Sensor Technology*, IAEA, Vienna, 2-8, 2008.
- Arslan, F., 2015, Lamine ağaç malzemelerin farklı rutubet şartlarında ısı iletkenlik ve dielektrik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ayder E., Genceli O.F., 1997, *Ölçme Tekniği, ASHRAE Temel El Kitabı (Fundamentals)*, Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınlar, s. 27-29.
- Bao, Y., Zhu, Z., Wu, Y., He, Y., 2005, Study on Rapid Measurement of Soybeans Moisture Content Based on Dielectric Properties, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1.
- Chen, Z. & Okamura, S., 2000, Moisture measurement by dielectric ring resonator in microwave range, *ICMMT 2000. 2000 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 642-645.

- Cheng, Y., Leon, K., Huang, J., Chang, W., Chang, Y., Leu J., 2014, Effect of moisture on electrical properties and reliability of low dielectric constant materials, *Microelectronic Engineering*, Vol. 114, 12-16.
- Chimeddorj, M., 2007, Farklı Bentonitlerin Nem Alıcı (desikant) Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Curtis, J.O., 2001, Moisture Effects on the Dielectric Properties of Soils, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, 125-128.
- Çınar, M., 2015, Bazı bazalt malzemelerin manyetik alandaki elektriksel özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Doğan, H., 2020, Nem ve Frekansa Bağlı Olarak Kayısı ve Erik Yapraklarının Dielektrik Özelliklerinin Dalga Kılavuzu İletim Hattı Yöntemiyle Belirlenmesi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 10, Sayı 1, 195-204.
- Gibson, P.J., 1979, The Vivaldi aerial, *Proceedings of the 9th European Microwave Conference*, 101–105.
- Göker, Y., Şahin, H., AY. N., 2004, Odunun dielektrik özelliklerini etkileyen faktörler. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi Seri B*, 54(1), 20 - 36.
- Göver, K., 1996, Bazı Endüstriyel Malzemelerin Mikrodalga Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Hanlı, S., 2020, Analog Anahtarlama Tabanlı Kapasitif Buğday Nem Sensörü, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- İyibakanlar, G., 2003, Polimerlerin dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansla değişimlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Joussemet, M., Novel Devices and Material Characterization at mm-wave and Terahertz, Application Note, 5991-2907EN, Agilent Technologies, ABD.
- Kafarski, M., Wilczek, A., Szyplowska, A., Lewandowski, A., Szerement, J., Skierucha, W., 2018, Novel TDR Probe for Monitoring Moisture Distribution in Soil Profile – Electromagnetic Simulations, *12th International Conference on Electromagnetic*

- Wave Interaction with Water and Moist Substances*, 04-07June 2018, Lublin, Polska, 121–123.
- Karaaslan, M., 2009, Negatif kırılma indisli meta-malzemelerin elde edilmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kintner, C. E., 2017, Free-Space Measurements of Dielectrics and Three-Dimensional Periodic Metamaterials, *Graduate Theses and Dissertations*.
- Kumlutaş, D., Toygar, M.E., Ayvaz, S., 2004, Nem Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonu İçin Yeni Bir Düzenğin Tasarlanması, *Fen ve Mühendislik Dergisi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Cilt 6, Sayı 2, 17-24.
- Liu, Y., 2014, A Novel, Free-Space Broadband Dielectric Measurement Technique, PhD thesis, Waterford Institute of Technology, Ireland.
- Mukhlisin, M., Saputra, A., 2018, A New Proposed Model Of Dielectric Analysis For Measurement Of Soil Moisture Water Content, *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 13, NO. 6, 1514-1522.
- Nel, S., *Moisture Measurement Using Microwave Technology*, Dalrymple Bay Coal Terminal, Australia.
- Nelson, S.O., Trabelsi, S., Kraszewski, A.W., 2002, Principles of Microwave Moisture Measurement in Grain, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Anchorage, AK, USA
- Okamura, S., 1999, Microwave Technology for Moisture Measurement, Shizuoka University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Hamamatsu, 4328561, Japan.
- Öztaş, T., 1997, Toprağın Nem Tayininde Kullanılan Yeni Bir Yöntem TDR (Time Domain Reflectometry), *Ziraat Fakültesi Dergisi*, Atatürk Üniversitesi, Cilt 28, Sayı 2, 331-339.
- Pakkathillam, J.K., Sivaprakasam, B.T., Poojali, J., Krishnamurthy, C.V., Arunachalam, K., 2020, Tailoring Antenna Focal Plane Characteristics for a Compact Free-Space Microwave Complex Dielectric Permittivity Measurement Setup, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 70, 1-12.

- Pandey, T., Bhuiya, T.K., Singh, R., Singh, B., Harsh, R., 2012, A review on microwave based moisture measurement system for granular materials, *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, Vol. 3, NO. 2, 37-41.
- Rahle, U., 2006, Desiccant Kurutma ile Nem Kontrolü, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Sayı 95, 37-42.
- Rohde & Schwarz, 2012, *Measurement of dielectric material properties*, Application Note, RAC0607- 0019_1_4E, Singapore.
- Sebesta, S., Oh, j., Lee, S.L., Sanchez, M., Taylor, R., 2013, Initial review of rapid moisture measurement for roadway base and subgrade, *TEXAS A&M Transportation Institute College Station*, Texas.
- Solyom, K., Lopez, P.R., Esquivel, P., V'asquez-Caicedo, A.L., 2020, Effect of temperature and moisture contents on dielectric properties at 2.45 GHz of fruit and vegetable processing by-products, *RSC Adv.* , 2020, 10 , 16783–16790.
- Susha Lekshmi, S.U., Singh, D. N., ShojaeiBaghini, M., 2014, Critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54, 92–105.
- Şahin, H., 2002, Mikrodalga Frekanslarda Doğal ve Emprenye Edilmiş Odun Türlerinin Dielektrik Özellikleri, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şeker, M., 2006, Mikodalga Tekniği İle Tahribatsız Nem Ölçme, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Thakur, K.P., Holmes, W.S., 2004, Noncontact Measurement of Moisture in Layered Dielectrics From Microwave Reflection Spectroscopy Using an Inverse Technique, *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, Vol. 52, NO. 1.
- Then, Y.L., You, K.Y., Dimon, M.N., 2014, Soil Moisture Dielectric Measurement Using Microwave Sensor System, *International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings*, Kaohsiung, Taiwan.
- Tinna, A., Parmar, N., Bagla, S., Goyal, D., & Senthil, V., 2021, Design and development of capacitance-based moisture measurement for grains. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 43, Part 1, 263-267.

- Tomaraei, P., 2010, Tahılda Nem Ölçümü İçin RF Nem Algılayıcısının Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Trabelsi, S. ve Nelson, S.O., 2005, Effect of Nonequibrated Moisture on Microwave Dielectric Properties of Wheat, Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2005), Ottawa, Canada, 17-19 May 2005, 369-371.
- Tripathi, R.K., Gupta, M., Shukla, J.P., 1996, Capacitance Technique For Measuring Moisture Content Using Dielectric Data-An Immersion Method, *Conference Record of the 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids (ICDL '96)*, Roma, Italy.
- Uytun, A., Pekey, B., Kalemci, M., 2013. Toprak Nemi Ölçümleri, *VIII. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi*, 26-28, Kocaeli, pp 1-9.
- Wang, J., Fan, L., Zhou, Q., Li, J., Zhao, P., Wang, Z., Zhang, H., Yan, S., Huang, L., 2018, Rapid Determination of Meat Moisture Content Using Radio Frequency Dielectric Measurement, *IEEE Access*, Vol. 6, p.51384-51391.
- Yıldırım, O., 2012, *Sulama Sistemlerinin Tasarımı*, Ders Kitabı, Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Ankara.
- Zouaoui, M.J., Ali, B.N., Glandut, N., Smith, D.S., 2016, Effect of humidity on the dielectric constant and electrical impedance of mesoporous zirconia ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.36, 1, 163-169.

EKLER

EK-1 Nicholson-Ross-Weir (NRW) algoritmasının Matlab Kodları

Bu algoritma, iletim ve yansıma ölçüm verilerinden ϵ ve μ değerlerini hesaplamak için bu yöntemi kullanmaktadır.

Bu tez çalışmasında NRW Algoritması için hazırlanan bir kod MATLAB programının içine yüklenip kullanılmıştır. Bu şekilde sonuçlar elde edilmiştir.

```
%https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4106&context=etd
load ps11.dat;load ps21.dat; %ps11 ve ps21 dosyaların verileri yüklenir
Freq=ps11(:,1);
S11=ps11(:,2)+1i*ps11(:,3);
S21=ps21(:,2)+1i*ps21(:,3);
S11_in= S11;
S21_in= S21;
[S11_out,S21_out]=tdgator_my(S11_in,S21_in,Freq); % tdgator.m, S11 ve S21'de
zaman geçidini yürütür
```

```
d=0.03; % Polietilen kalınlığı (m)
%function [ eps, mu ] = nrw_extract( d, freq, S11, S21 )
% nrw_extract Bir numune için geçirgenliği hesaplar
% nrw_extract, çıkarma için NRW (Nicholson-Ross-Weir) yöntemini uygular
% Belirli bir maddenin karmaşık elektrik geçirgenliği (epsilon) ve karmaşık manyetik
geçirgenliği (mu)
% Malzeme örneği. Bu yöntem, iletim saçılma parametresini kullanır
% Serbest uzay yöntemi kullanılarak VNA ile alınan ölçümler
% Mikrodalga ölçüm sistemi
% Syntax: [ eps, mu ] = nrw_extract( d, freq, S11, S21 )
% Sonuçlar:
% eps - karmaşık değerli elektrik geçirgenlik vektörü (epsilon)
% mu - karmaşık değerli manyetik geçirgenlik vektörü (mu)
```

```

% Girişler:
% d - numune kalınlığı (metre cinsinden)
% freq - frekans noktalarının gerçek değerli vektörü
% S11 - yansıma ölçümlerinin karmaşık değerli vektörü
% S21 - iletim ölçümlerinin karmaşık değerli vektörü
% Giriş vektörleri f, S11 ve S21 eşit uzunlukta olmalıdır
% S11 ve S21 karmaşık (gerçek-sanal) formatta olmalıdır
% genlik değil/ faz formatı
% Çıktı vektörleri eps ve mu, frekansa eşit uzunlukta olacaktır
% Clifford Kintner, kintner@uark.edu tarafından 2016 yılında
% Arkansas Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
% Bu yöntemin yakınında meydana gelen rezonanslara duyarlı olduğunu unutmayın
% Sung Kim ve James Baker-Jarvis'in makalesinde açıklandığı gibi lambda/2
% Bu kod aşağıdakiler izlenerek dalga kılavuzu tabanlı ölçümlere uyarlanabilir
% Weir'in bir dalga kılavuzu içindeki dalga boyuyla ilgili orijinal makalesinde
% kaynaklar:
% "Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain
% Techniques" Nicholson, A. M. and Ross, G. F., IEEE Transactions on
% Instrumentation and Measurement, Vol. IM-19, No. 4, November 1970.
% "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability
% at Microwave Frequencies" Weir, W. B., Proceedings of the IEEE, Vol. 62,
% No. 1, January 1974.
% "An Approximate Approach to Determining the Permittivity and Permeability
% near lambda/2 Resonances in Transmission/Reflection Measurements" Sung
% Kim and James Baker-Jarvis, Progress in Electromagnetics Research B, Vol.
% 58, 2014.
S11=S11_out;
S21=S21_out;
for m=1:size(S11)
% S11 ve S21 (chi) arasındaki ilişkiyi hesaplayın
X(m)=(S11(m)^2-S21(m)^2+1)/(2*S11(m));
% Yansıma katsayısını (gama) hesaplayın ve imkansız değerleri reddedin
Gamma(m)=X(m)+sqrt(X(m)^2-1);
if abs(Gamma(m))<1

```

```

Gamma(m)=X(m)+sqrt(X(m)^2-1);
else
Gamma(m)=X(m)-sqrt(X(m)^2-1);
end
% İletim ve yayılma katsayılarını hesaplayın
T(m)=(S11(m)+S21(m)-Gamma(m))/(1-(S11(m)+S21(m))*Gamma(m));
gam_0(m)=complex(0,2*pi*Freq(m)/(3e8));
gam(m)=(log(1/T(m)))/d;
% Extract epsilon and mu
eps(m)=(gam(m)/gam_0(m))*((1-Gamma(m))/(1+Gamma(m)));
mu(m)=(gam(m)/gam_0(m))*((1+Gamma(m))/(1-Gamma(m)));
end
%eps'
workspace; % Çalışma alanı panelinin görüldüğünden emin olun
format longg;
format compact;
fontSize = 20;
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure('DefaultAxesFontSize',20));
set(axes1,'FontSize',20);
subplot(2,2,1)
plot(Freq,real(mu(1:end-0)),'LineWidth',2)
hold on
xlabel('Frequency (GHz)', 'FontSize', fontSize)
ylabel('\mu"', 'FontSize', fontSize)
subplot(2,2,2)
plot(Freq,imag(mu(1:end-0)),'LineWidth',2)
hold on
xlabel('Frequency (GHz)', 'FontSize', fontSize)
ylabel('\mu" ', 'FontSize', fontSize)
subplot(2,2,3)
plot(Freq,real(eps(1:end-0)),'LineWidth',2)
hold on
xlabel('Frequency (GHz)', 'FontSize', fontSize)

```

```

ylabel('\epsilon"', 'FontSize', fontSize)
subplot(2,2,4)
plot(Freq,imag(eps(1:end-0)),'LineWidth',2)
hold on
xlabel('Frequency (GHz)', 'FontSize', fontSize)
ylabel('\epsilon" ', 'FontSize', fontSize)

re_mu=mean(real(mu(1:201)));
im_mu=mean(imag(mu(1:201)));
mur=re_mu+1i*im_mu
mur_abs=abs(mur)

re_eps=mean(real(eps(1:201)));
im_eps=mean(imag(eps(1:201)));
epsilon_r=re_eps+1i*im_eps
epsilon_r_abs=abs(epsilon_r)
eps_real_non_filtered=abs(real(eps(1:end-0)));
eps_imag_non_filtered=abs(imag(eps(1:end-0)));
% Filtrenin oluşturulması
filter_size=80; % Filtre boytu 1*80
h=ones(1,filter_size)/filter_size;
eps_real_filtered=filter(h,1,eps_real_non_filtered);
eps_imag_filtered=filter(h,1,eps_imag_non_filtered);
Freq_filtered=linspace(9e8,4e9,length(Freq)-filter_size);
figure
subplot(2,2,1)
plot(Freq,eps_real_non_filtered,'LineWidth',2)
hold on
xlabel('Frekans (GHz)', 'FontSize', fontSize)
ylabel('\epsilon"', 'FontSize', fontSize)
subplot(2,2,2)
plot(Freq_filtered,eps_real_filtered(filter_size+1:end),'LineWidth',2)
hold on
xlabel('Frekans (GHz)', 'FontSize', fontSize)

```

```

ylabel('\epsilon"', 'FontSize', fontSize)
subplot(2,2,3)
plot(Freq,eps_imag_non_filtered,'LineWidth',2)
hold on
xlabel('Frekans (GHz)', 'FontSize', fontSize)
ylabel('\epsilon" ', 'FontSize', fontSize)
subplot(2,2,4)
plot(Freq_filtered,eps_imag_filtered(filter_size+1:end),'LineWidth',2)
hold on
xlabel('Frekans (GHz)', 'FontSize', fontSize)
ylabel('\epsilon" ', 'FontSize', fontSize)

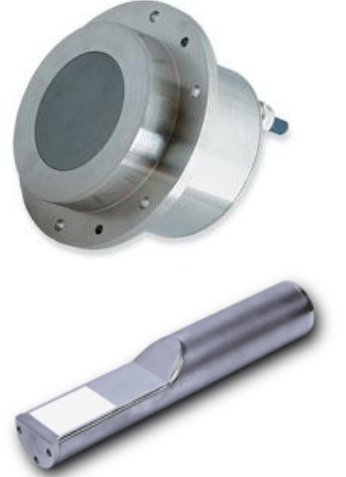
% Yeni bir m dosyası
% https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4106&context=etd
function [ S11_out, S21_out ] = tdgator_my( S11_in, S21_in, FreqAxis )
%tdgator v6 -- Clifford Kintner
% tdgator artık yalnızca bir Kaiser penceresi kullanıyor
% VNA genellikle kullanılan işlev
% Bu, Kaiser-Bessel penceresi olduğu için seçilir
% DPSS (Slepian) penceresinin en basit uygulaması
% Fourier-dönüştürülmüş sinyali
N = size(FreqAxis,1);
gate_width = input(strcat('Gate width (',num2str(N),' samples total):',32));
if (mod(N-gate_width,2)==1) gate_width = gate_width + 1; end
beta = input(strcat('Kaiser window beta (default is 2.5):',32));
if (isempty(beta)); beta=2.5; end
gate_shape = [zeros(1,(N-gate_width)/2) kaiser(gate_width,beta)' ...
zeros(1,(N-gate_width)/2)];
% Büyükse kapıyı kesmek
if gate_width > N
left_gate = (gate_width - N)/2;
right_gate = gate_width - left_gate - 1;
truncated_gate = gate_shape(left_gate:right_gate);

```

```
gate_shape = truncated_gate;
end
% Dönüşüm ve kapı
S11_in_td = ifftshift(fft(S11_in));
S21_in_td = ifftshift(fft(S21_in));
S11_td_gated = gate_shape.*S11_in_td;
S21_td_gated = gate_shape.*S21_in_td;
S11_gated = fft(fftshift(S11_td_gated));
S21_gated = fft(fftshift(S21_td_gated));
figure
subplot(5,1,1); plot(20*log10(abs(S11_in_td)))
subplot(5,1,2); plot(20*log10(abs(S21_in_td)))
subplot(5,1,3); plot(gate_shape)
subplot(5,1,4); plot(20*log10(abs(S11_gated)))
subplot(5,1,5); plot(20*log10(abs(S21_gated)))
%disp('Duraklatılıyor...')
%Duraklat
S11_out=S11_gated;
S21_out=S21_gated;
end
```

EK-2 Nem Ölçme Örnekleri

Hydronix firması mikrodalga yöntemi ile malzemelerin nemi ölçmek için dünyanın en büyük sensör üreticilerindendir. Yapılan nem sensörleri özellikle inşaat ve gıda sektörlerinde kullanılmaktadır. Bu yöntemin tercih sebebi ise diğer yöntemlerde problemler mevcut diye söylenmiştir. Hydro-Mix HT sensör, yüksek sıcaklıklarda 120°C seviyesine kadar kullanılabilir. Hydro-Probe XT sensör, organik malzemeler için kullanılıp her saniyede 25 ölçüm yapmaktadır.



Özbekoğlu firması farklı nem ölçerler sunulmaktadır. Dökümhaneler, cam, hayvan yemi ve inşaat sektörlerinde kullanılmaktadır. Sunulan HPR (High Frequency Polar Reflective) nem ölçer, sadece numunenin dielektrik sabitine bağlı değildir. Numune ve su moleküllerinde yaşanan ışınımın yansımalarını hesaplayarak ölçüm yapılmaktadır.



Qunlong marka WB-26R nolu model çevrimiçi mikrodalga nem cihazı ilaç, gıda, ahşap, kömür, ve diğer hammaddeler için hızlı, güvenli, doğru ve temassız ölçüm kullanılır. Malzemenin nem oranı mikroişlemci yazılımı ile 2.4 GHz'de dielektrik özellikler belirlenmektedir.

