

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ENDÜSTRİDE YAYGIN OLARAK KULLANILAN DOĞAL AHŞAPLARIN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATSIZ YÖNTEMLER
KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİNE YÖNELİK AMPİRİK
MATEMATİKSEL MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

Sinan Saeed Jasim ALSAADI

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

ŞUBAT 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ENDÜSTRİDE YAYGIN OLARAK KULLANILAN DOĞAL AHŞAPLARIN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATSIZ YÖNTEMLER
KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİNE YÖNELİK AMPİRİK
MATEMATİKSEL MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

Sinan Saeed Jasim ALSAADI

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

ŞUBAT 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİDE YAYGIN OLARAK KULLANILAN DOĞAL AHŞAPLARIN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATSIZ YÖNTEMLER
KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİNE YÖNELİK AMPİRİK
MATEMATİKSEL MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Sinan Saeed Jasim ALSAADI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 07/02/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Doç. Dr. Habib DOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi. Yalçın ALBAYRAK

ÖZET

ENDÜSTRİDE YAYGIN OLARAK KULLANILAN DOĞAL AHŞAPLARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATSIZ YÖNTEMLER KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİNE YÖNELİK AMPİRİK MATEMATİKSEL MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Sinan Saeed Jasim ALSAADI

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Şubat 2024; 69 sayfa

Son yıllarda endüstriyel alanda birçok uygulama doğal kaynaklara ilgi duymaya başlamıştır. Doğal ahşap gibi ham maddeler, mikrodalga ısıtma ve kurutma sistemlerinde, sürdürülebilir elektroniklerde ve mercek uygulamalarında birçok uygulamada yer almaktadır. Bu nedenle malzeme bilimi mühendisliğinin doğal ahşabın fiziksel özelliklerine yönelik bu tür araştırmalara kritik bir ihtiyacı vardır.

Bu çalışma için yaygın olarak kullanılan toplam dokuz doğal ahşap hazırlanmıştır. Seçilen doğal ahşap üç yumuşak ağaç (Sedir, Ardıç ve Çam) ve altı sert ağaç (Ceviz, Çınar, Titrek kavak, Kestane, Meşe ve Okaliptüs) olarak sınıflandırılabilir. Her numune düğümsüz olarak özenle seçilmiştir. Hazırlanan ahşap malzemelerin mekanik kesime bağlı olarak 0,4 mm ile 0,6 mm arasında kalınlık değişimi sağlanmıştır. Ayrıca ölçüm düzeneğinde kullanılacak dalga kılavuzu adaptörleri için her ahşap malzeme benzer boyutlarda üç numuneden oluşturulmuştur. Ancak endüstri için en önemli amaç, hem nem içeriği hem de yoğunluk koşullarındaki değişimler altında elektriksel özelliklerin tepki davranışdır.

Bu çalışmada, seçilen dokuz ağaç örneğinin incelenen elektriksel özellikleri [2,17–6,0 GHz] frekans aralığında belirlenmiştir. Ölçümler, VNA ve üç dalga kılavuzu adaptörü (WR340, WR229 ve WR159) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her numunenin ölçümünün 500 ham veri noktası içerdiği toplam 49.500 yumuşak ağaç ve 99.000 sert ağaç S parametresi toplanmıştır. Toplanan s-parametreleri, ahşap numunelerin MATLAB ile dielektrik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Farklı nem ve yoğunluk koşulları altında elde edilen dielektrik özellikleri belirten, her ölçümün ortalama veri sonuçlarından ampirik bir matematiksel model oluşturmak için kullanıldı. Oluşturulan ampirik matematiksel modeller, yumuşak ağaç dielektrik veri sonuçları kullanılarak oluşturulmuş toplam 36 ampirik matematiksel modele ve sert ağaç dielektrik veri sonuçlarını kullanan 72 ampirik matematiksel modele sahiptir. Sunulan doğal ahşap örneklerinin ampirik matematiksel modelleri, hem geçirgenlik hem de tanjant kaybının dielektrik veri sonuçları için üretildi. Geçirgenlik veri sonuçlarından elde edilen ampirik modelde, R2'nin 0,9'un üzerinde olduğu hesaplanırken, kayıp Tanjant sonuçlarında ise R2'nin 0,7'nin üzerinde olduğu sonucuna varılmıştır. Buna göre elde edilen modellerin tahmin kabiliyetlerinin yüksek olduğu tespiti yapılabilir. Elde edilen modellerin performansını incelemek için ampirik matematiksel değerlendirmeler de yapıldı. Değerlendirme için farklı kalınlıklarda ve farklı yoğunluk koşullarında yeni bir ahşap

numune seti hazırlandı. Bu ampirik model performans incelemesinin farklı koşullar altında değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Doğal ahşap malzemelerin dielektrik geçirgenliğinin tahmin edilmesinde ampirik model performans değerlendirme sonuçlarının %85'lik doğruluk oranına sahip olduğu değerlendirildi. Oluşturulan ampirik modellerin tahmin sonucuna, bu ampirik modellerin oluşturulmasında kullanılan önceden hazırlanmış ahşap numune setlerinden bu kadar farklı koşullar altında bile güvenilebilir.

Bu çalışmanın amacı, seçilen doğal ahşapların farklı nem içeriği ve yoğunluk seviyelerindeki elektriksel özelliklerinin değişimlerini mikrodalga tahribatsız muayene teknikleri ile detaylı bir şekilde analiz etmek ve analiz sonuçlarına göre oluşturulan ampirik modeller yardımı ile elektriksel özelliklerin matematiksel olarak belirlenmesine olanak sağlamaktır.

ANAHTAR KELİMELEER: ağaç endüstrisi, dielektrik sabiti, kayıp tanjantı, Ampirik modelleri

JÜRİ:

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Doç. Dr. Habib DOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi. Yalçın ALBAYRAK

ABSTRACT

THE EMPIRIC MATHEMATICAL MODELS TO PREDICT ELECTRICAL PROPERTIES OF WIDELY USED NATURAL WOODS IN THE INDUSTRY BY USING NON-DISTRACTIVE METHODS

Sinan Saeed Jasim ALSAADI

PhD Thesis in Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

February 2024; 69 pages

In recent years, many applications in the industrial field have taken an interest in natural resources. Raw materials such as natural wood have been involved in many applications in microwave heating/drying systems, sustainable electronics, and lens applications. Therefore, material science engineering has a critical need for such research on the physical properties of natural wood.

A total of nine commonly used natural woods have been prepared for this study. The selected natural wood can be classified into three softwoods (Cedar, Juniper, and Pine) and six hardwoods (Walnut, Sycamore, Aspen, Chestnut, Oak, and Eucalyptus). Each specimen has been carefully selected, without knots. The prepared wood materials were provided with a thickness variation between 0.4 mm and 0.6 mm, depending on the mechanical cut. Also, each wood material consisted of three samples with similar dimensions for the waveguide adapters that will be used in the measurement setup. However, the most important goal for industry is the response behavior of electrical properties under the variation of both moisture content and density conditions.

In this study, the investigated electrical properties of the selected nine wood specimens were determined in the [2.17–6.0 GHz] frequency range. The measurements were illustrated in a suitable setup using VNA and three wave guide adapters (WR340, WR229, and WR159). A total of 49,500 softwood and 99,000 hardwood S-parameters have been collected, in which each specimen's measurement contains 500 raw data points. The collected s-parameters have been used in the wood specimen's dielectric properties calculations with MATLAB. The dielectric properties data results under different moisture and density conditions were used in generating an empirical mathematical model from the average data results of each measurement. The generated empirical mathematical models have a total of 36 empirical mathematical models constructed using softwood dielectric data results and 72 empirical mathematical models using hardwood dielectric data results. The presented natural wood specimens' empirical mathematical models were generated for both dielectric data results of permittivity and tangent loss. The empirical model from permittivity data results was generated with R2 over 0.9, which is considered to have a great prediction capability, while models from tangent loss results had R2 over 0.7, which is also considered a good prediction capability. Empirical mathematical evaluations were also performed to examine the performance of the generated models. For evaluation, a new set of wood specimens has been prepared with different thicknesses and different density conditions. This will allow the empirical

model performance examination to be evaluated under such conditions. The evaluation results of empirical models performance in predicting the dielectric permittivity of natural wood materials were considered to be very good, with an accuracy of 85%. This prediction result of the generated empirical models can be relied on even under such different conditions from the previously prepared wood specimen sets that were used in generating these empirical models.

The aim of this study is to have a detailed analysis of the selected natural woods and their electrical property variations with different moisture content and density levels, while the generated empirical models will provide the possibility of determining electrical properties without requiring any additional or destructive microwave measurement methods.

KEYWORDS: wood industry, dielectric constant, Loss tangent, Empiric Model

COMMITTEE:

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. S. Cumhuri BAŞARAN

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Assoc. Prof. Dr. Habib DOĞAN

Asst. Prof. Dr. Yalçın ALBAYRAK

ÖNSÖZ

Bu projedeki danışmanım, Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Ana Bilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Selçuk HELHEL'e, bu projeyi başarılı bir şekilde tamamlamama yardımcı olmak üzere bana sürekli olarak ihtiyaç duyduğum rehberliği sağladığı için derinden teşekkür ederim. Bölümdeki son derece yoğun programına rağmen derin içgörülerini, engin bilgi ve deneyimini benimle paylaşmaya her zaman hazırdı.

Dr. Atalay KOCAKUSAK'a özellikle bu araştırmayla ilgili yardımları ve düşüncelerini paylaştığı için şükranlarımı sunarım. Yardımları ve rehberlikleri için enstitüme ve mühendislik bölümünün tüm çalışanlarına teşekkür ederim. Benim için güvenilir bir ilham kaynağı oldular, kendilerine içtenlikle teşekkür ediyorum.

Son olarak, yurtdışındaki araştırma ve eğitim yolculuğum sırasında geleceğimi inşa etmeme ve hedeflerimi motivasyon ve zihinsel destekle gerçekleştirmeme yardımcı oldukları için anne ve babama, babama ve anneme özel bir teşekkür borçluyum. Ayrıca tüm aile üyelerime, sıkı çalışma ve hedeflerine ulaşma konusunda destekleri ve ilhamları için teşekkür etmek istiyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI	5
3. MATERYAL VE METOT	8
3.1. Elektromanyetik Dalgalar	8
3.2. Dielektrik Özellikler.....	9
3.3. Ham Verilerden Elektriksel İletkenlik Hesaplaması.....	10
3.4. Matematiksel Modellerin Tanımlanması	11
3.5. Ölçüm Kampanyası.....	13
3.6. Ahşap Numunelerinin Hazırlanması	14
3.7. Nem İçeriği ve Yoğunluk Hesabı.....	15
4. BULGULAR.....	18
4.1. Yumuşak Ağaç Numune Ölçüm Sonuçları	18
4.1.1. Bağıl Geçirgenlik Sonuçları.....	18
4.1.2. Ampirik Model Üretimi	23
4.1.3. Yumuşak Ağaç Örneklerinin Ampirik Modellerinin Değerlendirilmesi	29
4.2. Sert ağaç Numune Ölçüm Sonuçları	33
4.2.1. Bağıl geçirgenlik Sonuçları.....	33
4.2.2. Ampirik model üretimi.....	42
4.2.3. Sert Ağaç Örneklerinin Ampirik Modellerinin Değerlendirilmesi	56
5. TARTIŞMA.....	63
6. SONUÇLAR.....	65
7. KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Endüstride Yaygın Olarak Kullanılan Doğal Ahşapların Elektriksel Özelliklerinin Tahribatsız Yöntemler Kullanılarak Tahmin Edilmesine Yönelik Ampirik Matematiksel Modellerin Geliştirilmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

07 /02/2024

Sinan Saeed Jasim ALSAADI

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_0	: Boş uzaydaki ışığın hızı
ϵ'	: Dielektrik gerçek kısım, malzemenin elektrik enerjisini depolama yeteneğini ifade eder.
ϵ''	: Dielektrik kayıp faktörü, maddenin elektrik enerjisini dağıtma yeteneğini gösterir.
ϵ_r	: Göreli geçirgenlik veya dielektrik sabiti
F	: Frekans
F_c	: Kesim frekansı
GHz	: Giga (10^9) hertz
Hz	: Hertz (1/ saniye)
MHz	: Mega (10^6) hertz
λ_c	: Kesme frekansına karşılık gelen dalga boyu
λ_0	: Boş uzay dalga boyu
λ_g	: Kılavuzlu dalga boyu
MC	: Nem içeriği
$m_{\text{fırın}}$	: Mikrodalga fırında kuruma noktası
μ	: Geçirgenlik
mm	: Milimetre
$\tan\delta$	: Dielektrik kayıp
ρ	: Yoğunluk [g/cm ³]
σ	: İletkenlik

Kısaltmalar

BW	: Bağlı su
FSB	: Fiberin doygun noktası
FW	: Serbest su
RF	: Radyo frekansı
RH	:Bağıl nem
S-parametreli	: Saçılma parametreleri
S21	: İleri iletim (port 1'den port 2'ye)
S11	: Eşleşen bir yük tarafından sonlandırılan ağ çıkışı ile giriş yansıma katsayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Elektromanyetik dalgalar	8
Şekil 3.2. Ölçüm kampanyası	13
Şekil 3.3. Birinci grup yumuşak ağaç örnekleri	14
Şekil 3.4. İkinci grup sert ağaç örnekleri	15
Şekil 3.5. Doğal ahşap numunesinin nemli bölgeleri	17
Şekil 4.1. Seçilen yumuşak ağaç örneklerinin bağıl geçirgenliği	22
Şekil 4.2. Seçilmiş yumuşak ağaç örneklerinin bağıl geçirgenlik modelleri	25
Şekil 4.3. Seçilen yumuşak ağaç örneklerinin kayıp tanjant modelleri	29
Şekil 4.4. Yumuşak ağaç örnekleri deneysel modellerin değerlendirilmesi	32
Şekil 4.5. Ceviz çınar kavak sert ağaç numunesinin bağıl geçirgenliği	37
Şekil 4.6. Kestane meşe okaliptüs sert ağaç örneğinin bağıl geçirgenliği	41
Şekil 4.7. Seçilmiş ağacı örneklerinin göreceli geçirgenlik modelleri	48
Şekil 4.8. Seçilmiş sert ağaç örneklerinin kayıp tanjant modelleri	55
Şekil 4.9. Sert ağaç örnekleri deneysel modellerin değerlendirilmesi	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yumuşak ağaç numunelerinin fiziksel boyutları	14
Çizelge 3.2. Sert ağaç örneklerinin fiziksel boyutları	15



1. GİRİŞ

Mikrodalga enerjisi, tahıl ve granola pişirme, kaplama kurutma, atıştırmalık yiyecek işleme, dökümhane maça kurutma, farmasötik işleme, seramik filtre kurutma, seramik sinterleme, kauçuk vulkanizasyon, kimyasal buhar biriktirme, karışım kurutma ve kimyasal atık arıtma gibi ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. Ağaç ürünleri sanayinde ise kullanımı sınırlıdır. Son yıllarda ahşap malzemelerde tedavi ve teşhis amaçlı birçok mikrodalga enerjisi uygulamasına yer verilmiştir. Elektriksel geçirgenliğin güvenilir tahmini tüm bu uygulamalar için temel koldur. Elektromanyetik enerjinin emilimini anlamak için bu fiziksel parametre çok önemlidir. Bununla birlikte, çeşitli frekans aralıklarında farklı ağaç türlerinin karmaşık geçirgenliğine olan talep ve bu konudaki doğru bilgi, elektromanyetik (EM) enerjinin ve ahşap malzemelerin dahil olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, ham ahşap malzemenin kullanım amacı ne olursa olsun fiziksel veya kimyasal özelliklerinin değiştirilmesiyle yeni özellikler kazanması endüstri ve üretim uygulamalarında veya uzaktan algılama iletişiminde, söz konusu hammaddenin elektriksel özelliklerinin değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Uygulamadan önce net bir şekilde bilinmelidir, çünkü elektromanyetik alanlar ile hammadde arasındaki etkileşim analizlerinde her şeyin doğrudan bir bağlantısı vardır. Ancak bu tür bilgiler, bu çalışmanın odunun kimyasal maddesinin türünü ve tabii ki çözünmüş madde miktarını daha iyi anlamasına olanak sağlar. Bu nedenle, daha önce de belirtildiği gibi, herhangi bir ahşap malzemenin elektriksel özelliklerinin bilinmesi, yalnızca endüstriyel uygulamalar veya ısıtma kurutma için değil, aynı zamanda uzaktan algılama, yani tahribatsız sensör çalışmaları için de kritik öneme sahiptir (Romanov 2022). Böyle bir bilgi kendi zorluklarını da beraberinde getirir; örneğin ahşabın farklı nem koşullarındaki dielektrik özelliklerinin belirlenmesi faydalı olacaktır. Bu nedenle, (Bini, ve diğerleri 1997b) tarafından ısıtma yoluyla ahşap ve EM gücü arasındaki etkileşimin niceliksel olarak belirlenmesi çalışmasında böyle bir zorluk söz konusudur. Yazarların böyle bir çalışmada karşılaştığı sorun, mikrodalga fırının uygulanabilirliğidir (Olmi, ve diğerleri 2000). Derinlemesine bakıldığında, ahşap bir malzeme olarak anizotropik dielektriktir ve fiziksel gerçeklik üç eksenli bir kristal yapı olarak büyük ölçüde basitleştirilebilir; bu üç farklı eksenle bağlanan ahşap damarı anlamına gelir (Torgovnikov 1993). Bu nedenle ahşabın kapsamlı dielektrik karakterizasyonu, üçüncü dereceden diyagonal tensörün karmaşık üç bileşenini elde etmelidir. Daha spesifik olmak gerekirse, çoğunlukla ölçüm tahribatlı olmayan bir yöntem gerektirdiğinden (örneğin, bir malzemenin kesilmemesi veya hasar görmemesi gerektiği) uygulanması zor bir görevdir, ancak ahşabın damar yapısı nedeniyle başarısız bir şekilde tanımlanmış bir görev olarak kabul edilebilir. Yön noktadan noktaya değiştirilebilir; bu nedenle geçirgenlik tensörü oldukça rastlantısal bir miktardadır. Neyse ki çeşitli uygulamalarda (örneğin nem içeriğinin belirlenmesi veya ısıtma amaçları için) geçirgenlik tensörünün gerçekleştirilmesine gerek yoktur; ancak elektromanyetik etkileşimi tahmin etmek için karmaşık bir ortalama geçirgenlik tahmini gereklidir (Bini, ve diğerleri 1997b).

Her durumda, herhangi bir malzeme ile elektromanyetik dalga etkileşiminin temellerini daha iyi anlamak için, yansıma "Γ" soğurma "A" ve iletim "τ" katsayıları gibi niceliklerin bilgisine sahip olmak gerekir. Bu tür bilgiler, Bölüm 3'teki materyal ve metod bölümünde daha ayrıntılı olarak açıklanacağı gibi, saçılma parametreleri (S_{11} , S_{21} , vb.) ilişkin vektör ağ analizörleri (VNA) kullanılarak elde edilebilir. Toplanan S-parametresi verileri herhangi bir karmaşık elektriksel parametreye aktarılabilir. Ancak esas olarak ısıtma ve kurutma işlemlerini içeren ve çok fazla enerji tüketen ahşap işleme teknolojilerine örnek olarak MDF ahşap teknolojisi sayılabilir. Dolayısıyla doğal veya doğal olmayan yöntemlerle üretilmiş olan bu ahşap malzemelerin içerisinde ne kadar su (nem içeriği) olduğunun bilinmesi bu tür uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Her durumda, yüksek frekanslı RF ısıtma teknolojisi kullanılarak üretim sürecinde %50'ye varan enerji tasarrufu sağlanabilir (Wang, ve diğerleri 2022, Pereira, ve diğerleri 2004). Böyle bir enerji verimliliği mümkün olduğu kadar mükemmel empedans uyumu elde edilerek gerçekleştirilir. Empedans için, bir tarafı jeneratörün iç empedansı ile eşleşen iki tarafın bulunduğunu, diğer tarafta ise “ $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ ” işlemi altındaki malzemenin empedansının olduğunu bilmek gerekmektedir; burada ϵ , malzemenin dielektrik geçirgenliğidir ve μ malzemenin manyetik geçirgenliğidir (Helhel 2019). Ancak her durumda, su emme özelliğine sahip malzemeler de dahil olmak üzere, elektriksel özellikler ile malzemenin yapısında depolanan su miktarı arasında doğrudan bir bağlantı vardır. Bu da doğal ahşap yapıya atıfta bulunur (Kocakusak, Colak ve Helhel 2016, Genç, ve diğerleri 2021, Metlek, ve diğerleri 2021, Dogan, Basyigit ve Genc 2020, Van Emmerik ve H. 2013). Bu nedenle, doğal ahşap malzemenin incelenen dielektrik ölçümleri, suyun moleküler tanımını ve boşluklardaki çözünen molekülleri araştırmak için daldırılmış ahşap numunesi çeşitli sulu çözeltilerle incelenirken gerçekleştirilmiştir (Sudo, ve diğerleri 2022) Ancak herhangi bir kimyasal işleme gerek kalmadan, sadece doğal ahşap malzemenin içindeki (dielektrik özelliklerine yol açan) selülozik ağların sulu veya susuz olarak manipüle edildiği bu kadar ilginç araştırmalarla, doğal ahşap bazlı meta malzeme anlamına gelen DAM yapısı ise sensör teknolojilerinde öncü bir gelişme olacak çünkü doğal ahşap malzemenin içindeki nem içeriğini kontrol ederken, etkileyici mikrodalga emme performansı elde ederken doğal dielektrik özellikler sınırlamasının üstesinden gelmeye yol açacaktır (Quan, ve diğerleri 2021). Ancak uzaktan algılama bu araştırmanın odağı olmadığından sınırlı sayıda referans sunulmuştur. Bununla birlikte belirli bir miktarda su içeriğine sahip belirli bir ahşap malzemenin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi (ahşap yoğunluğunu ifade eder) veya tam tersine, elektriksel özellikleri bilinen belirli bir ahşap malzemenin su içeriği miktarının belirlenmesi olasılığı vardır. Bu araştırmayla ilgili olmayan ancak son yıllarda şaşırtıcı olan bir başka ilginç keşif ise ahşap malzemenin sürdürülebilir elektronik endüstrisinde önemli bir rol oynamasıdır. Bununla birlikte, malzeme sınıflandırmasından bilindiği gibi, ahşap malzeme biyolojik olarak parçalanabilir veya geri dönüştürülebilir bir malzeme olarak kabul edilir, ancak selülozik yapılarının (su içeriğine atıfta bulunularak) manipüle edilmesi, ahşap malzemenin elektronik imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Bu arada, benzersiz özelliklerin ve selülozik hiyerarşilerin farkına varılması, ahşap malzemeye PCB

alt katmanı olarak güçlü bir aday konumu kazandırdı. Ahşap malzemenin bağlı geçirgenliği $\varepsilon_r \approx 2.0$ ve nispeten küçük kayıp tanjant " $\tan\delta$ " değerine sahip olduğu anlaşıldığından, artan veri iletimi kalitesiyle yüksek hızlı sinyalleşme elde etmek için büyük bir fırsat verecektir. (Fang, ve diğerleri 2021, Romanov 2022, Dobson, DeLaSierra ve Christensen 1991, Kokkonen, ve diğerleri 2022). Ayrıca ahşap malzemenin sağladığı avantajları kontrol altında tutarken, elektronik sektörü için de birçok fırsatla esnek üretim sağlama konusunda büyük bir potansiyel sunacaktır (Fu, Chen ve Sorieul 2020, Wang, ve diğerleri 2022, Hongli, ve diğerleri 2016). Ahşap esaslı malzemelerin dikkat çeken en önemli avantajı, selülozik yapılarının endüstrideki polimerik malzemelerle karşılaştırıldığında düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Dolayısıyla bu avantajın sağladığı fırsat ile birlikte özellikle havacılık endüstrisinde elektronik PCB'ler ve çevre birimlerinin birlikteliği sayesinde yük taşıma sorunu kolaylıkla çözülebilir (Gerke, Shapiro ve Peters 2003, Cai, ve diğerleri 2018). Ahşap yapının yoğunluğu $[0,5-0,85 \text{ g/cm}^3]$ arasında değişirken, tanınmış bir polimerin yoğunluğu $[0,92-1,45 \text{ g/cm}^3]$ arasında değişmektedir, kıyaslandığında ağırlığının yarısı kadar olduğu kabul edilmektedir (Kokkonen, ve diğerleri 2022).

Araştırma boyunca, birinci ve ikinci bölümde kaynak taramasında sırasında açıklandığı gibi, bu tür standartlarda bir çalışma için literatürde büyük bir boşluk bulunmaktadır. Bu nedenle sunulan çalışma Türkiye'de sanayi sektöründe en sık kullanılan dokuz doğal ahşap malzeme üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ancak seçilen doğal ahşap örneği iki kategoriye ayrılabilir: yumuşak ağaç ve sert ağaç. Birincisi, yumuşak ağaç grubu üç doğal ağaç örneğinden (Sedir, Ardıç ve Çam) oluşurken, ikinci grup altı doğal ağaç örneğinden (Ceviz, Çınar, Titrek kavak, Kestane, Meşe ve Okaliptüs) oluşur. Elde edilen örnekler düğümsüz olarak özenle seçilmiştir; Numunenin kalınlığı 4 ile 6 mm arasında değişmekte olup, numunenin boyutları dalga kılavuzu adaptör boyutlarına göre uygun bir montaj için boşluk bırakılmadan kesilmiştir. VNA (vektör ağ analizörü) kullanılarak $[2.17-6.0 \text{ GHz}]$ frekans aralığında ölçümler elde edilmiştir. Ancak bu araştırmanın asıl amacı doğal ahşap malzemelerin farklı nem koşulları ve yoğunluk seviyelerine tepkisini belirlemektir. Bu arada ahşap malzemelerden karmaşık dielektrik sonuçlarının bu koşullar altında elde edilmesi, sunulan ampirik modellerde bu ilişkinin ifade edilebilmesini sağlayacaktır. Ölçüm kampanyası, oda sıcaklığı 24°C olan ve nem oranı %45 ila %55 arasında değişen özel bir odada gerçekleştirildi. Bu koşullar, sıcaklık ve nem sensörlü saat kullanılarak belirlendi. Ahşap numunesi, her bir numunenin mümkün olan maksimum nem içeriğine ulaştığından emin olmak için üç günden fazla bir süre su kaplarında bekletildi. Ancak her ölçüm kampanyasından önce her ahşap numunesinin ağırlığı hassas bir tartı cihazıyla ölçülüyordu. Üç dalga kılavuzu adaptörü hazırlanmıştır: Sırasıyla $[2.17-3.3 \text{ GHz}]$, $[3.3-4.9 \text{ GHz}]$ ve $[4.9-6 \text{ GHz}]$ frekans aralığına sahip [WR340, WR229 ve WR159]. Her numunenin S parametresi ham verileri, bir vektör ağ analizörü (Libre VNA 6GHz) kullanılarak elde edilmiştir ve her ölçüm, 500 ham veri toplama noktası içerir. Ölçüm kurulumu ve ahşap numuneleri materyal ve metot bölümünde daha ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Bununla birlikte, MATLAB aracını kullanarak her bir nem içeriği ve

yoğunluk koşuluna göre bağıl geçirgenlik ve tanjant sonuçları belirlemek için S_{11} ve S_{21} ham verileri kullanılacaktır. Bulgular bölümünde bölüm hem bağıl geçirgenlik hem de kayıp Tanjant sonuçları için her bir ahşap malzemenin oluşturulmuş ampirik modeliyle her ölçümün elde edilen sonuçlarını gösterecektir.



2. KAYNAK TARAMASI

Ahşabın dielektrik ve malzeme karakterizasyonunu belirlemek için sunulan çeşitli çalışmalar vardır. Araştırmacılar, bu konuyla ilgili mikrodalga enerjisinin birçok farklı uygulamasıyla ilgilendiler. 2008 yılında, Ahmed Koubaa, Patrick Perre', 2 Ron 2.47GHz ve Julie Lessard tarafından titretilen kavak, beyaz huş ağacı, sarı huş ağacı ve şeker akça ağacının diri odununun karmaşık dielektrik özellikleri üzerine bir çalışma sunulmuştur. Boşluk perturbasyon tekniği kullanılarak dört Kanada doğu ağaç türünün dielektrik özellikleri, 0,4 ila 2,47 GHz aralığındaki frekanslarda nem içeriği ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Seçilen türlerin bağımlılıkları belirlenerek bunların ahşap endüstrisindeki etkileriyle ilgili tutarsızlıklar tartışılmıştır (tahribatsız muayene, ısıtma ve kurutma). %40 ila %136 nem içeriğiyle 20°C ila 58°C arasındaki sıcaklık değişimi dikkate alındığında (Koubaa, ve diğerleri 2008).

2000 yılında, ahşabın dielektrik özelliklerini 2 ila 3 GHz arasında tartışmak için R. Olmi, M. Bini, A. Ignesti ve C. Riminesi tarafından farklı bir çalışma sunuldu. Bu çalışmada beş ağaç türü kullanılmıştır: Sylvester Çamı, Kavak, Kestane, Meşe ve Ceviz. Dielektrik karakterizasyonun sonuçları, 2,45 GHz ISM frekansı da dahil olmak üzere 2 ila 3 GHz frekans aralığında elde edilmiştir. Ahşaba yönelik çeşitli mikrodalga enerjisi uygulamaları, ilgili ağaç türlerinin geçirgenliğinin güvenilir bir tahminini gerektirir. Bu makale beş ağaç türünün dielektrik özelliklerini açıklamaktadır: Sylvester çamı, kavak, kestane, meşe ve ceviz. Geçirgenlik, yeni bir açık uçlu koaksiyel hat probu kullanılarak çeşitli nem seviyelerinde şartlandırılan ahşap numuneleri üzerinde ölçülmüştür. Bununla birlikte, ahşap numuneleri %0'dan (fırında kurutulmuş odun) yaklaşık %30'a (kuru odun) kadar farklı nem seviyelerinde şartlandırılmıştır (Olmi, ve diğerleri 2000).

2003 yılında Sugiyama, M. ve M. Norimoto tarafından kimyasal olarak işlenmiş ahşabın dielektrik özelliklerinin tartışıldığı farklı bir çalışma sunuldu. Ahşap üzerindeki kimyasal işlemler çeşitli özellikleri iyileştirebilir. Bazı işlemler ahşabın kompozit ve hücresel yapılarını bozar. Sonuç olarak ortaya çıkan malzeme ahşabın tüm özelliklerinden yoksundur. Ahşabın bu tür radikal kimyasal işlemleri bu çalışmada tartışılmamaktadır. Bu işlemler ahşabın üstün mekanik özelliklerini korurken, ahşabın kullanımındaki bazı kusurları azaltabilir ve ahşap özelliklerini iyileştirebilir (Sugiyama ve Norimoto 2003).

Olivier Vidémé Bossou, Juan R. Mosig ve Jean-François Zurcher tarafından tropik ahşabın dielektrik ölçümleri üzerine yapılan bir çalışmada (2010), bu çalışmanın amacı tropikal ağaç türlerinin dielektrik özelliklerini mikrodalga frekanslarında değerlendirmektir. Düzlemsel anten altlıkları olarak kullanılabilir. Testler 8,2-12,4 GHz frekans aralığında kuru ağaç üzerinde gerçekleştirildi. Karmaşık faktörler dielektrik geçirgenlik " ϵ " ve manyetik geçirgenlik " μ " ile kayıp tanjantı $\tan\delta$, ahşabın mikrodalga baskılı anten alt katmanı olarak uygunluğunu belirleyecektir (Bossou, Mosig ve Zurcher 2010).

2006 yılında, Daian, G., Taube, A., Birnboim, A., Daian, M. ve Shramkov, Y tarafından sunulan çalışma "Ahşabın Dielektrik Özelliklerinin Modellenmesi" başlığını taşıyordu. Bu çalışmada yazarlar anizotropik bir ahşap yapının mikrodalga frekanslarında karmaşık dielektrik geçirgenliğinin hesaplanması. 3 boyutlu ahşap yapı, boyutları ve malzeme bileşimi değişebilen lifler, ışınlar, damarlar ve çatlaklardan oluşur. Çeşitli yönlerde ve çeşitli nem içeriklerinde, son ölçümlerin sonuçlarını tekrarlamak için teorik olarak başarılı bir sonuca ulaşmışlardır (Daian, ve diğerleri 2006).

Razafindratsima, S., Sbarta, Z. M. ve Demontoux, F. (2017) tarafından ahşap bilimi ve teknolojisi için geniş bir nem içeriği aralığında ahşap malzemenin geçirgenlik ölçümü üzerine yapılan bir çalışmada, ahşap yapıların geçirgenlik testi tartışılmıştır. Fiziksel özelliklerinin kabul edilebilir sınırlar içinde olmasını sağlamak gerekir. Ladin, çam ve kayın ağacı örneklerinin bağlı geçirgenlik değerleri, geniş bir nem içeriği aralığında (%120'ye kadar) 1,26 GHz'de zayıf pertürbasyon yöntemi kullanılarak ölçülmüştür (Razafindratsima, Sbarta ve Demontoux 2017).

Kol, H. Ş. ve Yalçın, İ. tarafından dielektrik parametreler kullanılarak ahşabın mukavemetinin tahmin edilmesi konulu başka bir çalışmada (2015), bir ortamın dielektrik özelliklerine dayanan bir mikrodalga tahribatsız yönteminin büyük ilgi gördüğünü tartışmışlardır. Ahşabın gücünü tahmin etmek. Numuneler köknar ve meşe ağacından yapılmıştır. Dielektrik ölçümü, Von Hippel'in iletim hattı yöntemi kullanılarak (9.8 GHz) frekansında gerçekleştirildi. Ahşap malzemedeki su miktarı geçirgenlik değerini etkileyen temel faktördür (Kol ve Yalçın 2015).

Kabir, M.F., Daud, W.M., Khalid, K.B. ve Sidek, H.A. tarafından ahşap ve lif bilimi için kauçuk ağacının dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlılığı üzerine 2001 yılındaki farklı bir makalede, sıcaklığın ahşap ve lif bilimi üzerindeki dielektrik özellikleri üzerindeki etkilerini tartıştılar. Kauçuk ağacı üç anizotropik yönde (uzunlamasına, radyal ve tanjant) ve çeşitli ölçüm frekanslarında incelenmiştir. Frekans 1'den 10 GHz'e arttıkça dielektrik sabiti azalmış ve daha sonra frekans daha da arttıkça sabit kalmıştır. Daha yüksek sıcaklıklarda, dielektrik kayıp faktörlerinin minimum tepe değeri her üç tane yönünde de daha yüksek frekanslara doğru kaymıştır (Kabir, ve diğerleri 2001).

1996 yılında bir grup araştırmacı, Duchow, K.J. ve Gerhardt, R.A. tarafından Malzeme Bilimi ve Mühendisliği için seramik öncülleri ile infiltre edilmiş ahşap ve ahşabın dielektrik karakterizasyonu üzerine bir makale yayınladı. Araştırmacılar, dielektrik ölçümlerin ahşapta %50 ila %80 hacim gözenekliliğine sahip anizotropik bir mikro yapıyı tanımlayabildiğini göstermektedir. Tahıl yapısı ahşap liflerinden ve uzunlamasına ve radyal gözeneklere sahip bir desen halinde düzenlenmiş boş alandan oluşur. Bu araştırma 200 Hz ila 10 MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiş olup ayrıca ahşap yapının boyuna, radyal ve tanjant yönlerine paralel olarak yürütülmüştür. İncelenen üç yön yanıtlarda önemli farklılıklar gösterdi. Hücre duvarlarına silika enjekte etmek için

bir dizi ahşap numunesine seramik öncüsü batırıldı. Bu numuneler daha sonra ölçüldü ve orijinal ahşap numuneleriyle karşılaştırıldı (Duchow ve Gerhardt 1996).

1998 yılında, Forrer, J.B. ve Funck, J.W. tarafından ahşap yüzeylerdeki kusurların dielektrik özellikleri üzerine yapılan bir araştırma, ahşabın dielektrik özelliklerine ilişkin ölçümlerin yanı sıra ahşapla ilgili konuların uygulama için gerekli olduğunu tartıştı. Tipik ahşap özellikleri için karmaşık dielektriklerin büyüklükleri ve kayıp tanjantı araştırma yoluyla belirlendi. Ayrıca çeşitli uyarı frekanslarına ve ahşap nem seviyelerine karşı hassasiyetleri araştırıldı (Forrer ve Funck 1998).

1975 yılında, James, W. L. tarafından Tarım, Orman Hizmetleri ve Orman Ürünleri Laboratuvarı Bölümü için ahşap ve suntaların dielektrik özellikleri: sıcaklık, frekans, nem içeriği ve tane oryantasyonuna göre değişim üzerine bir araştırma çalışması yürütüldü. Wood'un dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı, 20 Hz ile 50 MHz aralığındaki frekanslarda, fırında kurumadan toplam doygunluğa kadar değişen nem seviyelerinde ve -20° ile +90°C aralığındaki sıcaklıklarda test edildi. Fiziksel olarak mümkün varsayımlara dayalı olarak bir hipotez oluşturuldu (James 1975).

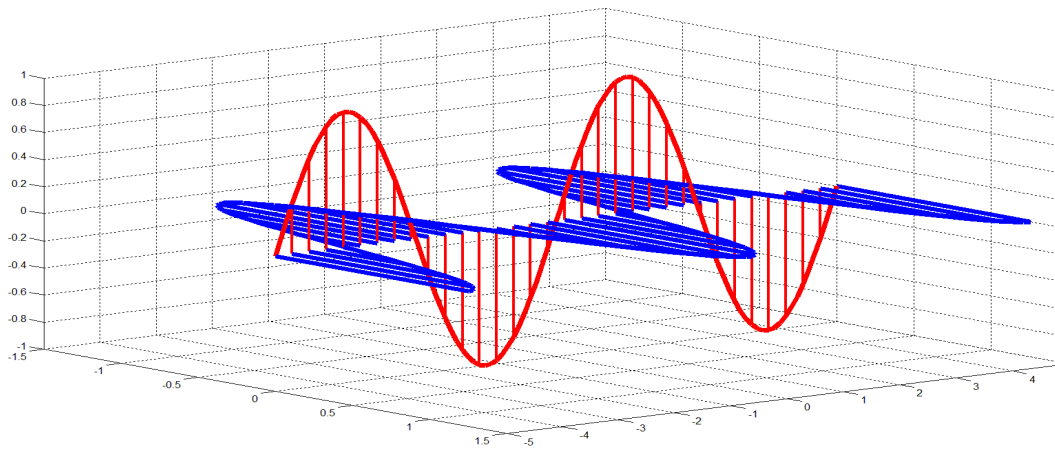
1984 yılında, kuru ahşabın yüksek frekanslı dielektrik sabiti üzerine Hossain, M.D. ve Rahim, M.R. tarafından yapılan bir çalışmada, ahşabın toplu dielektrik sabitinin mikrodalga frekansında belirlenmesi için Looyenga denkleminin kullanımı tartışıldı. Bir parça odunun, fırında kuru koşullar altında masif ahşap malzeme ve havanın bir karışımı olduğu düşünülebilir. Bu koşullar altında ahşap malzemenin yoğunluğu tüm örneklerde tutarlıdır (Hossain ve Rahim 1984).

3. MATERYAL VE METOT

Bu araştırmada, endüstride ve ahşap malzeme bilimi teknolojisinde yaygın olarak kullanılan dokuz doğal ahşap numunesi için dielektrik parametreleri, bağıl geçirgenlik ve kayıp tanjant sonuçlarını belirlendi. Araştırmada seçilen örneklerin tamamı Antalya'nın yerel sanayi bölgesinden temin edilmiştir. Bu çalışmada da birincil faktörlerden biri olarak mevcut olan doğal ahşap örneklerinin farklı nem içeriği ve yoğunluk seviyelerinin belirlenmesiydi. Bu nedenle doğal ahşap malzemelerin elektriksel özelliklerinde, malzemenin içindeki su molekülleri nedeniyle oluşan etkinin belirlenmesi önemlidir. Seçilen çalışma frekansı aralığı olan [2,17–6,0 GHz] için, S parametreleri bir VNA cihazı (Vector Network Analizörü) kullanılarak toplanmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, her tür ahşap numunesinin uygun montaj boyutuna sahip olduğu üç tip dalga kılavuzu adaptörü hazırlanmıştır. Doğal ahşap malzemenin fiziksel parametreleri ve nem içeriği ilişkisi, malzemenin bu koşullar altındaki davranışını ifade etmek için her bir ahşap numunesi için ampirik modeller hazırlama ve herhangi bir malzemeyi tahrip edici yöntemle ihtiyaç duymadan ahşap numunesinin dielektrik parametrelerini hesaplama olanağı sunabilmektedir. Bu bölümde ham verilerin elektromanyetik, dielektrik özellikleri ve elektriksel iletkenlik hesaplamalarının tanıtımı ve kısa açıklamasıyla başlayan malzeme ve yöntemler yer almaktadır. Ayrıca ölçüm, nem içeriği ve yoğunluk hesaplaması da dahil olmak üzere ahşap malzeme numunesi hazırlamaya genel bir bakışla oluşturuldu.

3.1. Elektromanyetik Dalgalar

Duran bir elektrik yükünün çevresinde bir elektrik alanı vardır. Bu alan etrafındaki herhangi bir elektrik yüküne itme veya çekme kuvveti uygular. Sabit bir elektrik yükü hareket ettiğinde manyetik bir alan yaratılır. Bu alan, çevredeki manyetik metal veya mıknatıs parçasına manyetik bir itici veya çekici kuvvet uygular. Bu duruma elektromanyetik alan neden olur (Cheng 1993).



Şekil 3.1. Elektromanyetik dalgalar

Elektromanyetik dalgaların yayılımı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Elektrik ve manyetik dalgalar uzayda ışık hızıyla yayılırken, yalıtkan bir ortamda ortam parametrelerine bağlı olarak farklı hızlarda yayılırlar ve elektromanyetik güç taşırlar. Radyasyon yönünde ilerleyen bir dalga için elektrik ve manyetik alanlar birbirine diktir ve bu bileşenlerin vektör çarpımı ile elde edilen Poynting vektörü (güç akış vektörü), üçüncü uzay koordinat bileşenine dik yönde ilerlemektedir. Poynting vektörü, bir elektromanyetik alana eşlik eden güç yoğunluğu vektörü olarak tanımlanır. Bu denklem Denklem 3.1 ile verilmektedir.

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.1)$$

Bu denklemde $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ sırasıyla elektrik alan kuvvetini ve ona eşlik eden dik yönündeki manyetik alan kuvvetini temsil etmektedir. Elektrik ve manyetik alan yoğunluklarının oluşturduğu düzlem Poynting vektörüne diktir. Elektromanyetik dalgalar frekans ve dalga boyu cinsinden ifade edilir. Dalgaların hızı ortama göre değişirken frekans değeri ortama göre değişmez. Elektromanyetik dalgalar için frekans ve dalga boyu arasındaki bu ilişki Denklem 3.2 ile ifade edilir. Burada faz hızı V_p (m/s), f dalganın frekansını (Hz), λ ise dalga boyunu (m) göstermektedir.

$$V_p = c / \sqrt{\epsilon_r} = \lambda / T = \lambda \cdot f \quad (3.2)$$

3.2. Dielektrik Özellikler

Dielektrik özellikler, elektrik alanı ile malzemeler arasındaki ısıtma, kurutma, sterilizasyon ve pastörizasyon gibi etkileşimlerin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Karmaşık dielektrik geçirgenlik iki bölümden oluşur: sırasıyla dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü. Dielektrik kayıp faktörü, mikrodalga sistemlerinin ısıtma ve kurutma performansını doğrudan etkileyen ana bileşendir. Nispi karmaşık dielektrik geçirgenlik ϵ^* Denklem 3.3 ile ifade edilir.

$$\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (3.3)$$

Burada ϵ' dielektrik sabiti ve ϵ'' dielektrik kayıp faktörüdür. ϵ' maddenin elektrik enerjisini depolama yeteneğini ifade ederken ϵ'' , maddenin elektrik enerjisini ısı olarak dağıtma yeteneğini belirtir.

Dielektrik malzemeler, dielektrik kayıp tanjantı olarak bilinen bir büyüklükle karakterize edilir. Kayıp tanjant Denklem 3.4 ile ifade edilir. Dielektrik malzemenin elektriksel iletkenliği Denklem 3.5 ile ifade edilir.

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (3.4)$$

$$\sigma = 2 * \pi * f * \epsilon_0 * \epsilon' \quad (3.5)$$

Burada “tan δ ” kayıp tanjantı, “f” frekans ve “ ϵ_0 ” aralığın dielektrik sabitidir. Manyetik olmayan malzemelerin çoğunun manyetik geçirgenliği boş uzayınkine benzer. Denklem 3.6 boşluğun dielektrik sabitini ifade ederken Denklem 3.7 boşluğun manyetik geçirgenliğini ifade eder.

$$\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} \text{ (F/m)} \quad (3.6)$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (3.7)$$

λ_g , d, $\Delta\phi$ ve ΔA numuneleri sırasıyla malzemedeki çalışma dalga boyu, numunenin kalınlığı, S_{21} verilerinde ölçülen faz ve S_{21} verilerinde ölçülen genliktir. Denklem 3.8. gerçek kısım için (ϵ') ve Denklem 3.8. dielektrik sabitinin sanal kısmı (ϵ'') için (Helhel 2019).

$$\epsilon' \simeq (1 + \Delta\phi\lambda_g/360d)^2 \quad (3.8)$$

$$\epsilon'' \simeq \Delta A\lambda_g\sqrt{\epsilon'}/8.686\pi d \quad (3.9)$$

3.3. Ham Verilerden Elektriksel İletkenlik Hesaplaması

Laboratuvarda vektör ağ analizörü ve üç dalga kılavuzu kullanılarak yapılan ölçümlerde S_{11} ve S_{21} saçılma parametreleri elde edildi. Elde edilen saçılma parametreleri kullanılarak toplam dokuz farklı ağaç numunesinin dielektrik kompleks geçirgenliğinin gerçek ve sanal kısımları ile kayıp tanjant değerleri hesaplandı. Dielektrik kompleksin geçirgenliğinin gerçek ve sanal kısımları ve kayıp tanjant değeri, saçılma parametreleri kullanılarak Nicholson-Ross Weir yöntemi kullanılarak hesaplandı. S_{11} parametresi ile yansıma katsayısı Γ ve iletim katsayısı T arasındaki ilişki Denklem 3.10 ile ifade edilmektedir. S_{21} parametresi ile yansıma katsayısı Γ ve iletim katsayısı T arasındaki ilişki Denklem 3.11 ile verilmektedir (Balanis 2012).

$$S_{11} = \Gamma * (1 - T^2)/(1 - T^2 * \Gamma^2) \quad (3.10)$$

$$S_{21} = T * (1 - \Gamma^2)/(1 - T^2 * \Gamma^2) \quad (3.11)$$

Ağ analizörü tarafından ölçülen S_{11} ve S_{21} parametreleri kullanılarak yansıma katsayısı ve iletim katsayısının hesaplanması için ilk olarak X değeri elde edilir. Bu parametre Denklem 3.12 ile hesaplanır. Yansıma katsayısı Γ Denklem 3.13'den ve iletim katsayısı T Denklem 3.14'den elde edilir.

$$X = (S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)/(2 * S_{11}) \quad (3.12)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (3.13)$$

$$T = S_{11} + S_{21} - \Gamma/1 - (S_{11} + S_{21}) * \Gamma \quad (3.14)$$

Daha sonra sırasıyla manyetik geçirgenlik μ ve elektriksel geçirgenlik ϵ hesaplanır. Λ değeri Denklem 3.15 ile hesaplanır. Denklem 3.15'teki L numune kalınlığını belirtir.

$$1/\Lambda^2 = -(1/(2 * \pi * L) * \ln(1/T))^2 \quad (3.15)$$

Manyetik geçirgenlik μ_r Denklem 3.16 kullanılarak elde edilir ve Λ değeri Denklem 3.15'ten hesaplanır. Burada λ_g örneğin dalga kılavuzundaki dalga boyunu belirtir, λ_0 boşluktaki dalga boyunu temsil eder, λ_c kesme frekansındaki dalga boyunu temsil eder. Denklem 3.15 ve 3.16'dan elde edilen veriler kullanılarak dielektrik kompleksin geçirgenliği Denklem 3.17 kullanılarak hesaplanır.

$$\mu_r = (1 + \Gamma) / \left(\Lambda * (1 - \Gamma) * \sqrt{(1/\lambda_0) - (1/\lambda_c)} \right) \quad (3.16)$$

$$\epsilon_r = (\lambda_0^2 / \mu_r) * ((1/\lambda_c) + (1/\Lambda^2)) \quad (3.17)$$

3.4. Matematiksel Modellerin Tanımlanması

Matematiksel modeller, dünyanın işleyişine ilişkin inançları nasıl işlediğini tanımlayan, matematiksel dile çevirmek için kullanılan araçlar olarak tanımlanabilir. Bu modellerin pek çok avantajı vardır:

- Matematiğin kesin dili, fikirlerin ve varsayımların formüle edilmesine ve belirlenmesine yardımcı olacaktır.
- Matematik kısa ve öz bir dil olduğundan, manipülasyonlar için kuralların sağlanmasında yardımcı olacaktır.
- Kanıtlanmış problemlerin ve önceki matematikçilerin verilerinin zengin geçmişi onların altında ve kullanıma hazırdır.
- Sayısal hesaplamalar bilgisayar kullanılarak kolaylıkla yapılabilir.

Genel sonuç, matematiğin potansiyeli ile kanıtlanabildiği için doğrudan denklem formuna bağlı olacaktır. Bu nedenle denklemlerin yapısında küçük bir değişiklik meydana geldiğinde, matematiksel yöntemlerde çok büyük değişiklikler yapılması gerekecektir. Ancak bilgisayarlar bu açıdan bu tür değişikliklere karşı daha dayanıklı olabildikleri için model denklemlerini yönetmede daha güvenilirdirler.

Matematiksel modeller iki kategoriye ayrılabilir. Birinci sınıf kategoriler; tahmin edebildikleri sonuç türlerine göre tanımlanabilir. İki türe ayrılır; birincisi deterministik modeller (rastgele değişimleri göz ardı ederek belirli bir başlangıç noktasının aynı sonuçlarını tahmin eden modeller), ikincisi stokastik modeller (istatistiksel nitelikte olan ve sonuçların olası dağılımını tahmin edebilen). İkinci sınıf kategori modeli büyük miktarda teorik veri kullanmış olsa da iki türe de ayrılabilir; mekanik modeller (değişiklikler meydana geldiğinde mekanizmayı dikkate alan modellere atıfta bulunarak) ve ampirik modeller (değişiklikler meydana geldiğinde mekanizmayı dikkate almayan

modellere atıfta bulunur). Ancak her iki kategori türü arasındaki karşılaştırma şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Deterministik ve ampirik (Örneğin, yem tüketiminin regresyon ilişkisi sığır büyümesinin belirleyicisidir).
- Deterministik ve mekanik (Örneğin, gezegen hareketi ile Newton mekaniğini temel alan diferansiyel denklemler).
- Stokastik ve ampirik (Örneğin, sahadaki çeşitlilik getirilerinin varyans analizini alarak öngörülmesi).
- Stokastik ve mekanik (Örneğin, temel olarak mendel kalıtımına dayanan küçük popülasyonların genetiği ile olasılıksal denklemler kullanılarak hesaplanması).

Bu çalışmada oluşturulan matematiksel modeller deterministik ampirik modeller kategorisinde yer almıştır. Ampirik modelin sonucunu tahmin etmede R^2 belirleme katsayısının regresyon ilişkisini kullanmaktır. Belirleme katsayısı, bağımlı değişkendeki, bağımsız değişkenden tahmin edilebilen değişimin oranı olarak tanımlanabilir. Başka bir tanımda R^2 , iki veri seti (gözlenen sonuç ve gözlemlenen tahmin edilen değerler) arasındaki doğrusal korelasyonun ölçümünü ifade eden bağımlı değişkenin veya korelasyon katsayısının kareköküdür. R^2 formülü ($R^2=1-SSR/SST$), burada SSR kare regresyonun toplamıdır ve model tarafından ifade edilen varyasyon olarak da adlandırılabilir. SST ise sunulan verilerdeki toplam değişimi ifade eder ve aynı zamanda toplamın karelerinin toplamı olarak da bilinebilir. En iyi durumda, oluşturulan model sonuçları gösterildiğinde, tahmin edilen değer gözlemlenen değerle eşleşir, bu da $SSR = 0$ ve $R^2 = 1$ anlamına gelir. Bu, modelin çalışmasının R^2 sonucuna göre değerlendirilebileceği anlamına gelir. $1 > R^2 > 0$ temel çizgisine gelince, belirleme katsayısı 1'e yakın olan bir model, iyi tahmin sonuçları alma yeteneğini ifade eder; tam tersi değerler ise, daha kötü tahmin sonuçlarına sahip, kötü bir model olarak kabul edilecektir. Bu nedenle, analiz edilen veriler için en iyi uyum özelliğini kullanarak ampirik modeller oluşturmak için MATLAB kullanıldığında, R^2 ile gösterilen sonuçların gözlemlenmesine ihtiyaç vardır. Artıkların normu adı verilen, sonuçların tahmin edilmesinde modelin kalitesini gösterebilecek başka bir parametre daha vardır. Artıkların normu, SST'nin kareköküdür (artıkların karelerinin toplamı veya regresyon). Artıkların normu sıfır ile 1 arasında değişir. Artıkların normu sıfıra yakın olduğunda buna en iyi uyum sağlayan model kapasitesi, sıfırın ise mükemmel model uyumuna atıfta bulunulduğuna dikkat etmektedir. Bu çalışmada dielektrik geçirgenlik ve kayıp tanjant sonuçları sırasıyla doğrusal regresyon ve polinom regresyon ile en iyi model uyumunu göstermiştir (Sudo, ve diğerleri 2022). Sudo ve Diğerleri (2022)'nin daha önce bahsedilen çalışmasına göre ve doğal ağaç örneklerinin su meolküllerine karşı tepkileri analiz edilerek, hem dielektrik geçirgenlik hem de kayıp tanjant için uygun modellerin kabul edilebilir olduğu bulunmuştur. Doğrusal regresyon (SLR), tek bir açıklayıcı değişken kullanan, iki boyutlu örnek noktalara odaklanan ve bir bağımsız ve bağımlı değişkene sahip istatistiksel bir modeldir. Bağımlı değişkenin değerlerini bağımsız değişkene göre

tahmin eder. ($y = \alpha + \beta x$) Bu, eğimi β ve y kesme noktası (α) olan bir doğruyu tanımlar. Genel olarak böyle bir bağlantı, bağımsız ve bağımlı değişkenlerin çoğunlukla görülmeyen değer popülasyonu için mükemmel bir şekilde geçerli olmayabilir; yukarıdaki denklemden gözlemlenmeyen bu sapmalara hata olarak atıfta bulunabilir.

Çoğu durumda doğrusal bir bağlantı sağlanamayabilir. Örneğin, bir kimyasal sentezin verimini meydana geldiği sıcaklığa göre modellersek, verimin sıcaklıktaki her birim artışla orantılı olarak arttığını keşfedebiliriz. Bu senaryoda bu türden kübik veya ikinci dereceden bir model düşünülebilir. Numuneler kübik regresyon (3. dereceden polinom) kullanılarak niceliksel olarak analiz edilir ($y = a + bx + cx^2 + dx^3$). Bu analiz bir arka plan düzeltme adımı içerebilir. Düzeniniz boş bir grup içeriyorsa boş tekrarların ortalaması ham veri ölçümlerinden çıkarılır (düzeltilmiş değerler daha sonra sıdırmak için kullanılır). Standart veri noktaları (konsantrasyona karşı ölçüm), noktalara yerleştirilmiş bir kübik regresyon eğrisi ile yarı logaritmik eksenlerde gösterilir. Veriler belirtilen herhangi bir seyreltmeyle eşleştirildiğinde numune konsantrasyonları hesaplandı.

3.5.Ölçüm Kampanyası

Ölçümler, Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Endüstriyel ve Tıbbi Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yer alan anten ölçüm laboratuvarında yapıldı. Ölçüm için bir Libre vektör ağ analizörü (6 GHz) ve üç tür dalga kılavuzu: WR340 (2,17–3,3 GHz), WR229 (3,3–4,9 GHz) ve WR159 (4,9–7,1 GHz) frekans aralığında çalışan dalga kılavuzları. Laboratuvar [2,17–6 GHz] kullanıldı. Şekil 3.2.a ölçüm kurulumunu gösterirken, Şekil 3.2.b laboratuvardaki ağ analizörünü göstermektedir.



a) Ölçüm kurulumu



b) Adaptörler ve örnekler

Şekil 3.2. Ölçüm kampanyası

Numunelerin saçılma parametreleri, dalga kılavuzlarının koaksiyel kablo ile ağ analizörüne bağlanmasıyla ölçülmüştür. Bir dalga kılavuzu ve bir numunedan oluşan ölçüm düzeni Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Toplam dokuz ağaç örneğinin saçılma parametrelerini elde etmek için ölçümler tekrarlandı: Ardıç, Çam, Ceviz, Çınar, Titrek

Kavak, Kestane, Meşe, Okaliptüs ve Sedir. MATLAB programında dielektrik kompleksin geçirgenliği ve kayıp tanjant değerlerinin hesaplanması için saçılma katsayıları program aracılığıyla elde edilmiştir.

3.6. Ahşap Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışma için toplam dokuz doğal ahşap örneği toplandı. Bu örneklerin her biri ahşap endüstrisi alanında kullanılmaktadır. Araştırma için toplanan ağaç örnekleri Ardıç, Çam, Ceviz, Çınar, Titrek Kavak, Kestane, Meşe, Okaliptüs ve Sedir'dir. Bu ahşap örneklerin tamamı Türkiye'nin Akdeniz bölgesinden temin edilmiştir. Bu numuneler ahşap sınıflandırmasına göre yumuşak ağaç grubu ve sert ağaç grubu olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Bu grupların her biri, ölçümlerde kullanılan dalga kılavuzunun boyutlarına (2,17 GHz–6 GHz) uyacak şekilde farklı fiziksel boyutlara sahip üç örneğe sınıflandırılmıştır. Yumuşak ağaç grubu sedir ağacı, ardıç ağacı ve çam ağacından oluşur. Bu ahşap örneklerinin doğal görünümü ve dokusu Şekil 3.3'te görülebilirken, fiziksel boyutları Çizelge 3.1'de (Kalınlık, Genişlik ve Uzunluk) belirtilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi bu örneklerin suya batırılmadan önceki ve sonraki durumları.



Şekil 3.3. Birinci grup yumuşak ağaç örnekleri

Çizelge 3.1. Yumuşak ağaç numunelerinin fiziksel boyutları

Kod	İsim	WR340		WR229		WR159	
		Kalınlık (mm)	Genişlik x Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik x Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik x Uzunluk (mm)
SW1	Cedar	4.5	95x137	4.5	70x100	4	62x82
SW2	Juniper	5.5	95x137	4.75	70x100	4.5	62x82
SW3	Pine	4.75	95x137	4.5	70x100	5.5	62x82

Sert ağaç grubu altı ahşap örneğinden oluşur: ceviz ağacı, çınar ağacı, kavak ağacı, kestane ağacı, meşe ağacı ve okaliptüs ağacı. Bu ahşap örneklerinin doğal görünümü ve

dokusu Şekil 3.4'te görülebilen, fiziksel boyutları Çizelge 3.2'de (Kalınlık, Genişlik ve Uzunluk) belirtilmiştir. Şekil 3.4'de bu numunelerin suya batırılmadan önceki ve sonraki durumları görülmektedir.



Şekil 3.4. İkinci grup sert ağaç örnekleri

Çizelge 3.2. Sert ağaç örneklerinin fiziksel boyutları

Kod	İsim	WR340		WR229		WR159	
		Kalınlık (mm)	Genişlik x Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik x Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik x Uzunluk (mm)
HW1	Walnut	5.5	95x137	5.5	70x100	6	62x82
HW2	Sycamore	4.5	95x137	4.5	70x100	4.5	62x82
HW3	Aspen	5	95x137	5	70x100	5	62x82
HW4	Chestnut	5	95x137	4.5	70x100	4.5	62x82
HW5	Oak	5.5	95x137	5.5	70x100	5.5	62x82
HW6	Eucalyptus	4.5	95x137	4.5	70x100	4.5	62x82

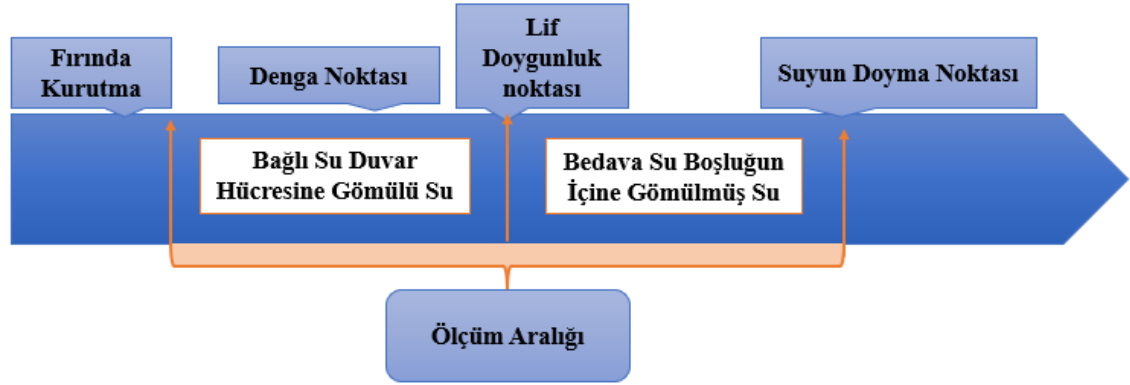
3.7. Nem İçeriği ve Yoğunluk Hesabı

Bu araştırma nem içeriği ve yoğunluk hesaplamaları ile yapıldığından kısa bir açıklamaya ihtiyaç duyulmuştur. İlk olarak, doğal bir malzeme olarak ahşap numunelerinin içindeki nem içeriğinin dikkate alınması gereken belirli bir değişkenliği vardır. Ayrıca her ahşap numunesinin kendine özgü bir su emme kapasitesi vardır. Ancak ahşap örneklerin doğal bir malzeme kaynağı olması nedeniyle tüm bu nedenler normaldi. Ahşap numunesinin içindeki nem içeriği, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi birden fazla aşamaya sahiptir: serbest su (SS), bağlı su (BS), lif doyma noktası (LDN), denge noktası ve fırında kuruma noktası. Bu çalışmanın odak noktası, doğal bir malzeme olarak ahşabın elektriksel özelliklerinin hem nem içeriği hem de yoğunluk düzeyindeki değişikliklerle belirlenmesidir. Ölçümler, tamamen doymuş su (hem bağlı su hem de serbest su olarak kabul edilir) olarak adlandırılan lif doyma noktasının üzerindeki iki nemli bölge ve ahşap

numunesi nem içeriğinin denge noktasına ulaşana kadar LDN'nin altındaki (bağlı su noktası olarak kabul edilir) ikinci bir nemli bölge ilgilendi. Nem içeriği ölçüm işlemi, ahşap numunelerinin suyla dolu bir kap içerisinde, her bir ahşap numunesi tamamen doymuş su noktasına ulaşmaya kadar dört günden fazla bir süre boyunca suya batırılmış pozisyonda tutulmasıyla başlamıştır. Ahşap numunesinin doymuş ağırlığı sense ölçekleme cihazı kullanılarak ölçüldüğünden ve herhangi bir ekstra ağırlık gözlemlenmediğinden, bu ahşap numunesinin ölçüm kampanyası için gerekli nem içeriğine (tamamen doymuş su) ulaştığı düşünülmektedir. Her ölçüm işleminden önce, numunenin ağırlığı ve daha sonra kullanılmak üzere Denklem 3.18'de, oluşturulan ölçümde numunenin tam nem içeriği seviyesini hesaplamak üzere kaydedildi. Ahşap numunesi belirli bir oda sıcaklığında ve %0,5'ten daha düşük bir nem seviyesinde (doğal kurutma işlemi) havayla kurumaya bırakıldı. Ancak, her bir ahşap numunesi artık ağırlık farkı kalmayınca kadar numune, nem içeriğinin %12 ile %14 arasında olduğu kabul edilen ve bu araştırma ölçüm son noktası olarak kabul edilen denge noktasına ulaştığı için ölçüm işlemi durduruldu. Havada kurutma işlemi bittikten sonra her ahşap numunesi daha sonra Denklem 3.18'de ($m_{fırın}$) olarak kullanılacak olan fırın kurutma ağırlığına ulaşana kadar fırında kurutma işlemine tabi tutuldu. Ahşap numunelerin nem içeriğini belirlemek için gerekli tüm veriler Denklem 3.18 kullanılarak kaydedildi. Her ahşap numunesinin nem içeriği elde edildi. Bahsedilen havayla kurutma işleminin gerçek hayatta başka bir kurutma işlemi uygulanmadan yapılan kurutma işlemini ifade ettiğini unutmayın. Doğal numunelerin nem içeriği %12-%14 ile %14 arasındadır (Reeb ve Brown 2016). Denklem 3.18 kullanılarak ahşap numunesinin içindeki nem miktara hesaplandı; burada lif doymuş noktasının altında bağlı su (BS) ve lif doymuş noktasının üstünde serbest su (SS) bulunur. Numunelerin hücre duvarları, duvarlara bağlı su molekülleri ile doyurulduğunda ve hücre lümenleri boş olduğunda, lif doymuş nokta nem içeriği oluşur (Eckelman 2019).

$$MC = \frac{(m_{ölçülen} - m_{fırın})}{m_{fırın}} \times 100 \quad (3.18)$$

Ancak daha önce de belirtildiği gibi önceden ıslatılmış ahşap numuneler FSP'ye ulaşmadan kurumaya bırakıldığında ahşapta büzülme başlamadı Bununla birlikte, LDN'nin altındaki nemli bölge, bağlı nem (BN) ve sıcaklık (T) tarafından belirlenen çevre koşulları dikkate alınarak dengeye ulaşılınca kadar numunenin bir miktar BS ile SS'yi zaten buharlaştırdığı zamandır. LDN'nin üstündeki ve altındaki hem BS hem de SS nemli bölgelerinin, sıcaklığa bağlı olduğu düşünülen farklı elektriksel ve dielektrik özelliklere sahip olduğuna dikkat edin. Ayrıca bu araştırma, BS ve SS nemli bölgeleri arasındaki farkları veya sıcaklık bağımlılıklarını dikkate almamaktadır. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, bu çalışmada oda sıcaklığı ve bağlı neme ilişkin değişiklikler dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.5. Doğal ahşap numunesinin nemli bölgeleri

Öte yandan, gösterilen hesaplamalar, daha önce bahsedilen, Denklem 3.19'da m (ağırlık) olarak adlandırılan numunenin su ağırlığının (kütlesinin) dikkate alınması işlemiyle ilgiliydi. Bir başka ifadeyle ahşabın yoğunluğu sabit olmayıp, ahşap numunesinin nem içeriğiyle doğrudan ilişkilidir. Ancak yoğunluk Denklem 3.19'da olduğu gibi birim hacim başına kütle olarak ölçülen madde konsantrasyonudur. Ahşabın yoğunluğu nem içeriğine bağlı olduğundan ağaç türleri arasında farklılık gösterir, bu da ahşabın su emme kapasitesine göre değişir (Eckelman 2019).

$$\rho = \frac{m \text{ (ağırlık)}}{V} \quad (g/cm^3) \quad (3.19)$$

ρ malzemenin yoğunluğunu ve ahşap numunesinin ağırlığı (m) ifade ederken, V ahşap numunesinin hacmini ifade eder. Bu nedenle yoğunluklar metreküp başına gram veya metreküp başına kilogram olarak ifade edilebilir. Bir mühendisin bakış açısından malzeme kütlesi yerine malzeme ağırlığı kullanımının kullanıldığını unutmayın. Bu gibi durumlarda yoğunluk hesaplamasına ağırlık yoğunluğu denir ve bu durum fizikçilerin bakış açısından kütle yoğunluğuna atıfta bulunarak ayrılır. Ancak bu tartışma okuyucunun takdirine bırakılmıştır.

4. BULGULAR

Aşağıdaki sonuçlar bize ahşap numunelerinin nem içeriğine göre dielektrik değer farklılıklarını tam olarak göstermektedir, ancak aynı zamanda hesapladığımız gibi %12 – %20 arasında dielektrik değerlerinin tanınmaz hale gelinceye kadar birbirine karıştığı sonucuna varıyoruz. Bu sonuçlar dielektrik parametrelerini içerir ve kayıp Tanjant değerleri bu ahşap numuneleri için önemlidir, çünkü birçok mikrodalga uygulamasında ve malzeme karakterizasyonu için bir malzeme üzerinde ihtiyaç duyulan en önemli faktörler dielektrik ve tanjant bilgisidir (Kokkonen, ve diğerleri 2022).

4.1. Yumuşak Ağaç Numune Ölçüm Sonuçları

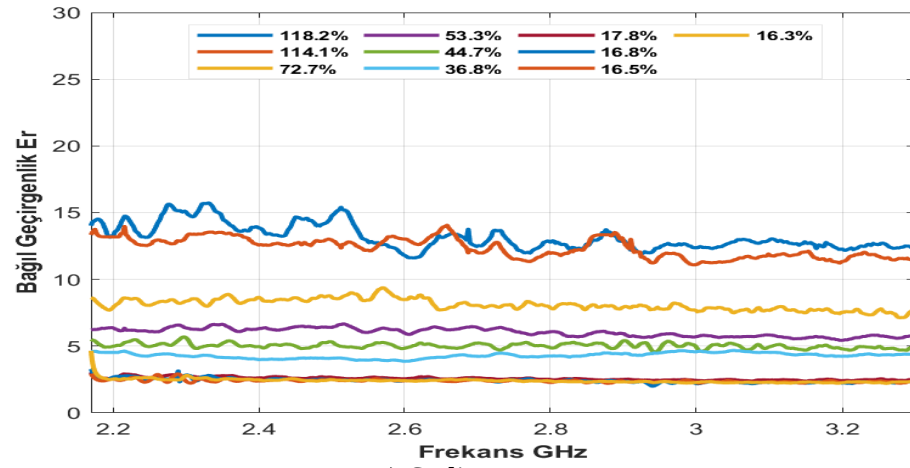
4.1.1. Bağlı Geçirgenlik Sonuçları

Bu araştırmada incelenen üç tür seçilmiş yumuşak ağaç vardır: sedir, ardıç ve çam. Aşağıdaki bölümde, daha önce Bölüm 3'te belirtildiği gibi nem seviyesi değişiklikleri ve yoğunluğa göre s-parametrelerinin ölçülmesi için uygun bir kurulumda hesaplamalar yapılmaya çalışıldı. Bu yumuşak ağaç numunelerinin ham veri havuzu 49.500 ham veri noktasından meydana gelmektedir her ahşap numunesi 16.500 noktadan oluşturuldu. Dördüncü bölüm, hem nem içeriğine hem de yoğunluğa göre bağlı geçirgenlik ve kayıp tanjant gibi hesaplanan sonuçlara odaklanmıştır. Daha önce bahsedilen bu sonuçlarla ilgili olmasına rağmen, hem bağlı geçirgenlik hem de kayıp tanjant sonuçları için ampirik bir model oluşturulmuştur. Bu ampirik modellerin üretkenliği, herhangi bir (hasar verici) tahribatlı ölçüm yönteminin kullanılmasına gerek kalmadan bağlı geçirgenlik ve kayıp tanjant değerlerinin ölçülmesinde yararlı olacaktır. Ahşap malzemenin higroskopik bir malzeme olarak kabul edildiğini unutmayın; çünkü çevredeki havanın bağlı nemi (BN) değiştiğinden, ahşap malzeme su nemi kazanır veya kaybeder, ayrıca genişler veya büzülür. Ancak su nem içeriğinde herhangi bir kazanç veya kayıp olmadığında ahşap malzemenin denge nem içeriğine (EMU) ulaştığı söylenebilir. Bu nedenle, doğal ahşap malzemelerle çalışırken, kullanılmadan önce EMU'nin yüzde iki puanı içinde kuruması gerekir (Wengert ve Meyer 1992). Yazarlara göre, kabul edilebilir ahşap nem içeriği iç mekan için %6 ila %8, dış mekan için %9 ila %14 arasında değişmelidir. Bu arada taze kesilmiş ahşabın nem içeriği %40 ila %20 arasında olacaktır. (Wengert ve Meyer 1992). Ahşap numunelerin nem içeriği hesabı, ahşabın içindeki suyun ağırlığının, ahşap malzemenin susuz ağırlığına bölünmesine eşit olduğundan, ahşap malzeme %200'lük bir nem içeriğine ulaşabilmektedir. Ağaç numunesi liflerinin içindeki su ağırlığı, ağaç lifi malzemesine göre çok daha fazla olduğu için bunu %100'ün çok üzerine çıkarmak mümkündür. Normal koşullar altında ahşap malzemelerin nem içeriği bu aralıkta olduğundan, pratikte %15 ila %30 arasındaki nem içeriği birçok uygulama için yaygındır (Swedish Wood 2022). Şekil 4.1'de görüldüğü gibi nem içeriği hesaplaması, %20 nem içeriği seviyesinin üzerindeki diğer dielektrik geçirgenlik sonuçlarını ayırt etmemizi sağlar. Nem içeriği artmasına rağmen bağlı geçirgenlik ortalaması da artar. Bu çalışmanın sonuçları uyarlanabilir endüstriyel ısıtma uygulamaları için faydalı olabilir.

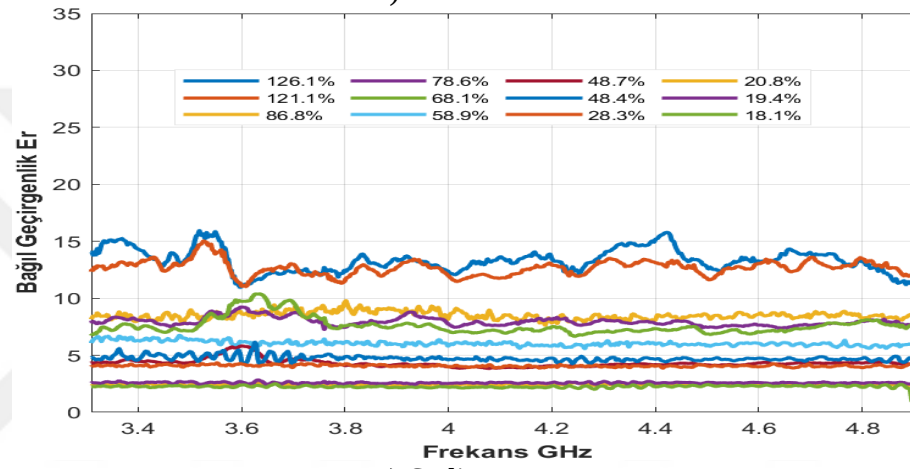
Şekil 4.1.a1, a2 ve a3'te görüldüğü gibi sedir ağacı örneğinin bağıl dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artmaktadır. Şekil 4.1.a1'deki (2,17–3,3 GHz) frekans bandında nem içeriği %16,3 ile %118,2 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,4 ile 13,2 arasında değişmektedir. Şekil 4.1.a2'deki (3,3–4,9 GHz) frekans bandında nem içeriği %18,1 ile %126,1 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,25 ile 13,3 arasında değişmektedir. Şekil 4.1.a3'teki (4,9–6,0 GHz) frekans bandında nem içeriği %18,4 ile %138,3 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,24 ile 19,3 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. ahşap örneği. Ancak Şekil. 4.1.a1, a2 ve a3'te nem içeriği sırasıyla %17,8, %20,8 ve %20,7'ye varan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucunun ortalaması olarak değerlendirilebilir.

Şekil 4.1.b1, b2 ve b3'te görüldüğü gibi ardıç odunu numunelerinin bağıl dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artar. Şekil 4.1.b1'deki (2,17–3,3 GHz) frekans bandında nem içeriği %18,2 ile %77,8 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,8 ile 9,5 arasında değişmektedir. Şekil 4.1.b2'deki (3,3–4,9 GHz) frekans bandında nem içeriği %16,6 ile %99,6 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,2 ile 10,1 arasında değişmektedir. Şekil 4.1.b3'teki (4,9–6,0 GHz) frekans bandında nem içeriği %15,4 ile %85,5 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,2 ile 7,3 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. ahşap örneği. Ancak Şekil 4.1.b1, b2 ve b3 nem içerikleri sırasıyla %20, %18 ve %18 olan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucunun ortalaması olarak değerlendirilebilir.

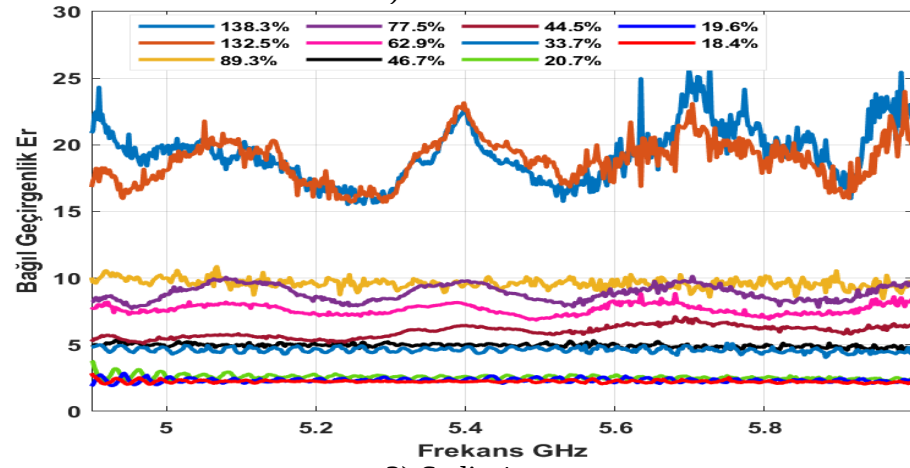
Şekil 4.1.c1, c2 ve c3'te görüldüğü gibi çam odunu numunesinin bağıl dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artar. Şekil 4.1.c1'deki (2,17–3,3 GHz) frekans bandında nem içeriği %18,6 ile %190,6 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,1–26,7 arasında değişmektedir. Şekil 4.1.c2'deki (3,3–4,9 GHz) frekans bandında nem içeriği %16,19 ila %107,4 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,07 ila 15,5 arasında değişmektedir. Şekil 4.1.c3'teki (4,9–6,0 GHz) frekans bandında nem içeriği %17,4 ile %136,7 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2,11 ile 1,13 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. ahşap örneği. Ancak Şekil 4.1.c1, c2 ve c3 nem içerikleri sırasıyla %22,7, %18,9 ve %21,3 olan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucunun ortalaması olarak değerlendirilebilir.



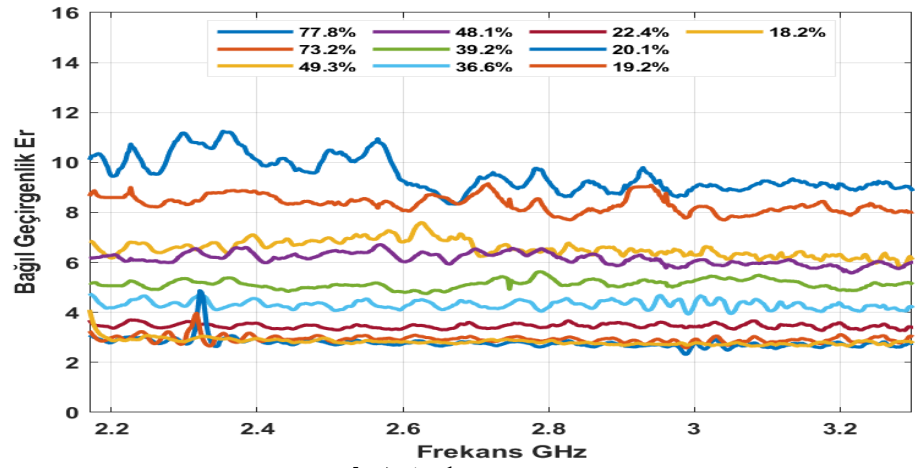
a1) Sedir 4.5mm



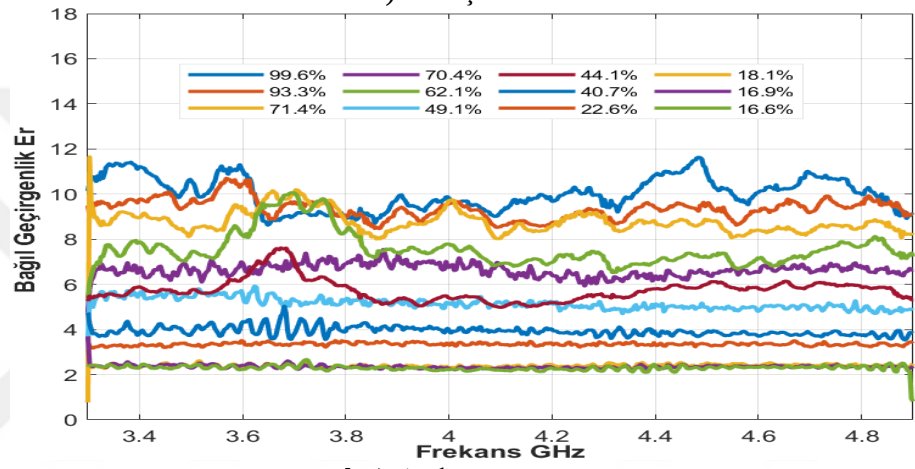
a2) Sedir 4.5mm



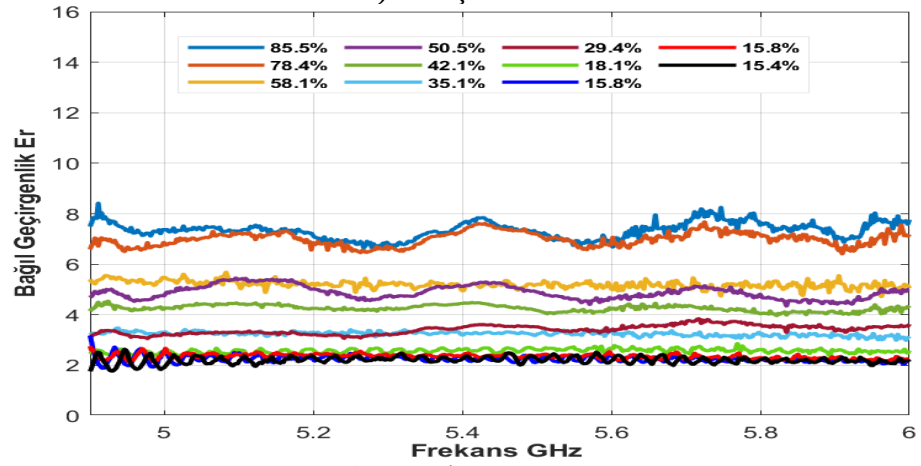
a3) Sedir 4mm



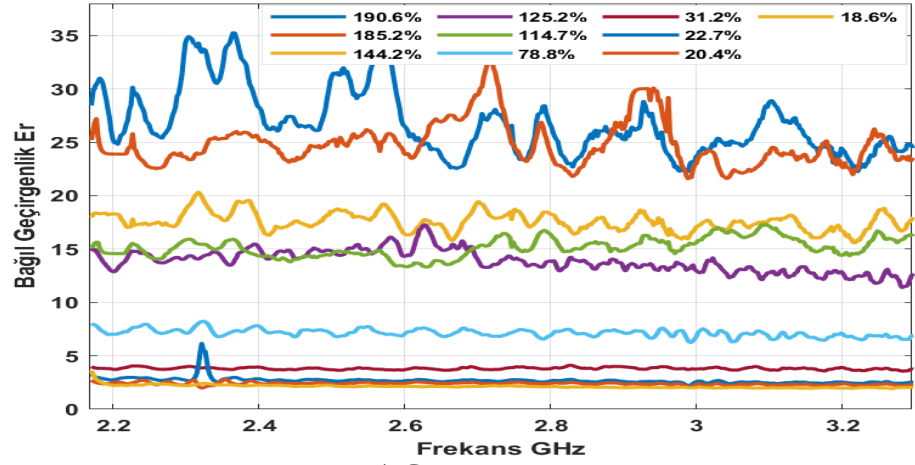
b1) Ardıç 5.5mm



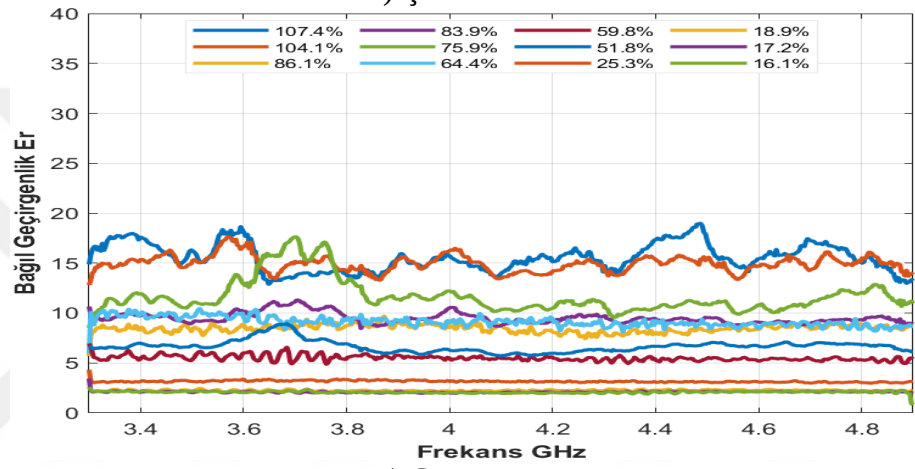
b2) Ardıç 4.75mm



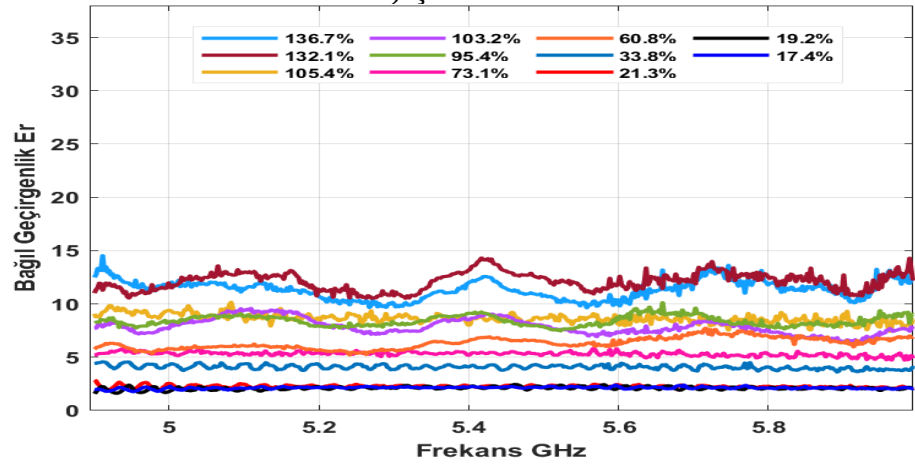
b3) Ardıç 4.5mm



c1) Çam 4.75mm



c2) Çam 4.5mm



c3) Çam 5.5mm

Şekil 4.1. Seçilen yumuşak ağaç örneklerinin bağıl geçirgenliği

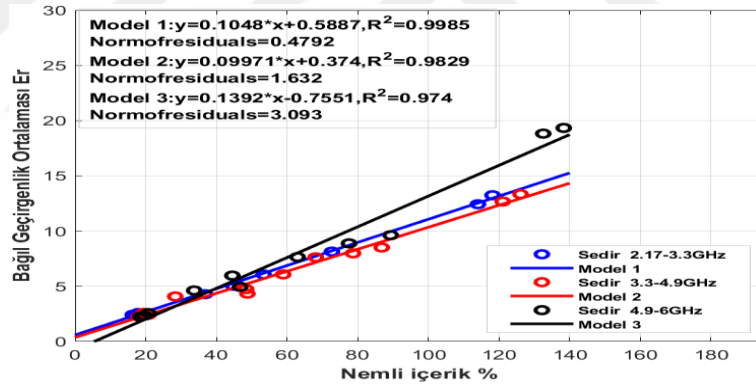
4.1.2. Ampirik Model Üretimi

Üç yumuşak ağaç türü (sedir, ardıç ve çam) için ampirik bir modelin üç (lineer) doğrusal formu oluşturulmuştur. Bu örneklerin her biri, incelenen her frekans bandına (2,17–3,3 GHz, 3,3–4,9 GHz ve 4,9–6 GHz) göre hem nem içeriği hem de yoğunluk değişimleri açısından üç modele sahiptir. Ham veri havuzunda toplam 49.500 adet bulunur; her ahşap numunesi 16.500 ham veriden oluşur ve Şekil 4.2'deki her işaretleyici 500 ham veri ölçümünden oluşur.

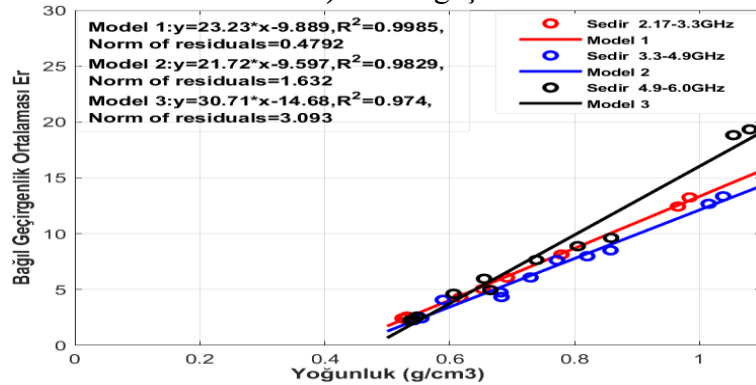
Şekil 4.2.a1'deki sedir yumuşak ağaç örneği, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre oluşturulan üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.2.a2'de yoğunluk seviyelerine göre elde edilen ortalama geçirgenlik sonuçlarına göre oluşturulan üç ampirik model gösterilmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.2.a1'de gösterilen grafik, nem içeriği değişimine göre 4,9–6 GHz'de (siyah renkle işaretlenmiş model) maksimum dielektrik ortalamasının 19'a ulaştığını göstermektedir. Bu arada hem (2,17–3,3 GHz) hem de (2,17–3,3 GHz) (3,3–4,9 GHz) (sırasıyla mavi ve kırmızı renklerle işaretlenmiş modeller) ampirik frekans aralıkları birbirine yakındır ve bir olarak kabul edilebilir. Aşağıda Şekil 4.2.a2'de yoğunluk değişimine göre gösterilen grafik, (4,9–6,0 GHz'de) (siyah renkle işaretlenmiş model) maksimum dielektrik ortalamasının 19'a ulaştığını göstermektedir. Bu arada hem (2,17–3,3 GHz) hem de (3,3–4,9 GHz) (sırasıyla kırmızı ve mavi renklerle işaretlenen modeller) ampirik frekans aralıkları birbirine yakındır ve bir olarak kabul edilebilir. Sedir ağacı örneği için sunulan ampirik modeller, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalama sonuçlarının daha yüksek frekans bantlarında bulunduğunu göstermektedir.

Şekil 4.2.b1'deki ardıç yumuşak ağaç numunesi, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre oluşturulan üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.2.b2'de yoğunluk seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre oluşturulan üç ampirik model gösterilmektedir. Nem içeriği değişimine göre Şekil 4.2.b1'de gösterilen grafik, 3,3–4,9 GHz'de (mavi renkle işaretlenmiş model) maksimum dielektrik ortalamasının 10'a kadar ulaştığını göstermektedir. Bu arada (2,17–3,3 GHz) (model) kırmızı renkle işaretlenmiş frekans aralığı, dielektrik ortalaması 9,6'ya kadar ulaşır. Ancak (4,9–6,0 GHz) (siyah renkle işaretlenmiş modeller) frekans aralığı dielektrik ortalaması 7,3'e kadar çıkmaktadır. Şekil 4.2.b2'de yoğunluk değişimine göre gösterilen grafik, 3,3–4,9 GHz'de (kırmızı renkle işaretlenmiş model) maksimum dielektrik ortalamasının 10'a kadar ulaştığını göstermektedir. Bu arada (2,17–3,3 GHz) (model işaretli) mavi renk ile) frekans aralığında dielektrik ortalama 9,6'ya kadar ulaşmaktadır. Ancak (4,9–6,0 GHz) (siyah renkle işaretlenmiş modeller) frekans aralığı dielektrik ortalaması 7,3'e kadar çıkmaktadır. Ardıç ağacı örnekleri için sunulan ampirik modeller, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalama sonuçlarının daha düşük frekans bantlarında bulunduğunu göstermektedir.

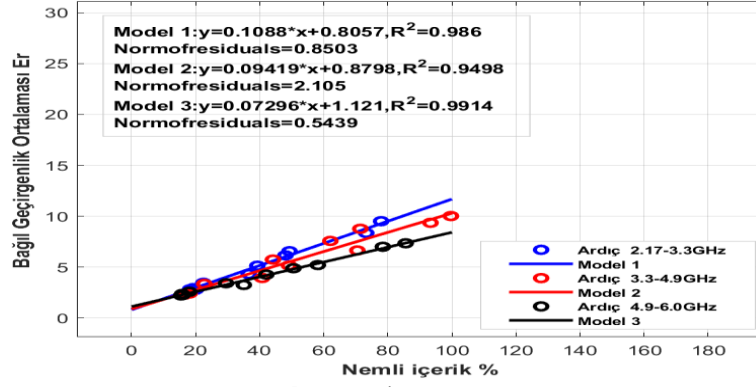
Şekil 4.2.c1'deki çam yumuşak ağaç örneği, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre oluşturulan üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.2.c1'de yoğunluk seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre oluşturulan üç ampirik model gösterilmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.2.c1'de gösterilen grafik, nem içeriği değişimine göre 2.17-3.3 GHz'de (kırmızı renkle işaretlenmiş model) maksimum dielektrik ortalamanın 26'ya kadar ulaştığını göstermektedir. Bu arada 3.3-4.9 GHz'de (model) mavi renkle işaretlenmiş frekans aralığı, dielektrik ortalama 16'ya ulaşır. 2.17-3.3 GHz ve 3.3-4.9 GHz'deki her iki ampirik model de birbirine yakındır ve tek bir model olarak düşünülebilir. Ancak (4.9-6.0 GHz) (siyah renkle işaretlenmiş modeller) frekans aralığı dielektrik ortalama 13'e ulaşır. Aşağıdaki Şekil 4.2.c2'de gösterilen grafik, yoğunluk değişimine göre 2.17-3.3 GHz'de (mavi ile işaretlenmiş model) maksimum dielektrik ortalama 26'ya ulaşır. Bu arada (3.3-4.9 GHz) (kırmızı renkle işaretlenmiş model)'de dielektrik ortalama 16'ya ulaşır. Her iki ampirik model de 2.17-3.3 GHz ve 3.3-4.9 GHz birbirinden farklıdır. Bununla birlikte (4.9-6.0 GHz) (siyah renkle işaretlenmiş modeller) frekans aralığı dielektrik ortalama 0.45 (g/cm³) ve 0.9 (g/cm³) yukarıda belirtilen modellerle iki nokta kesişme noktasıyla 13'e kadar çıkmaktadır. Çam ağacı örnekleri için sunulan ampirik modeller, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalama sonuçlarının daha düşük frekans bantlarında bulunduğunu göstermektedir.



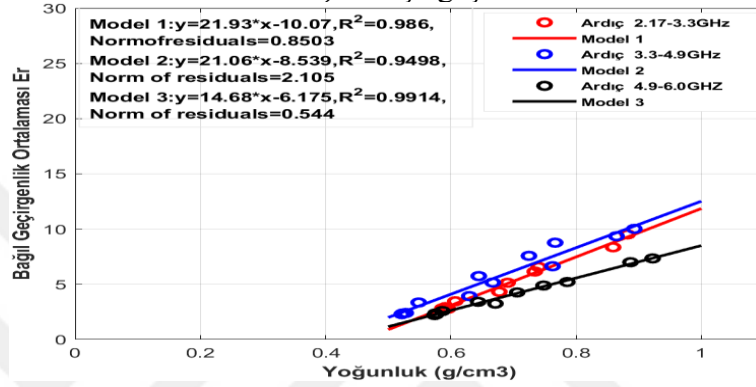
a1) Sedir ağaç



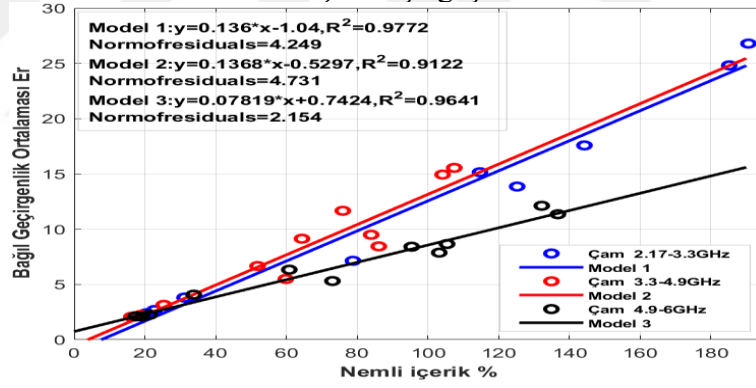
a2) Sedir ağaç



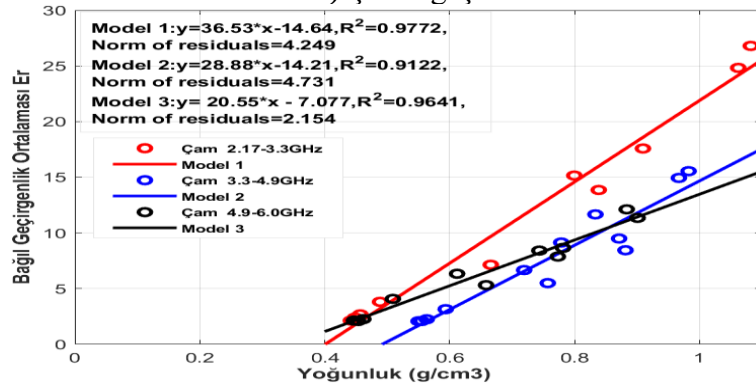
b1) Ardıç ağaç



b2) Ardıç ağaç



c1) Çam ağaç



c2) Çam ağaç

Şekil 4.2. Seçilmiş yumuşak ağaç örneklerinin bağıl geçirgenlik modelleri

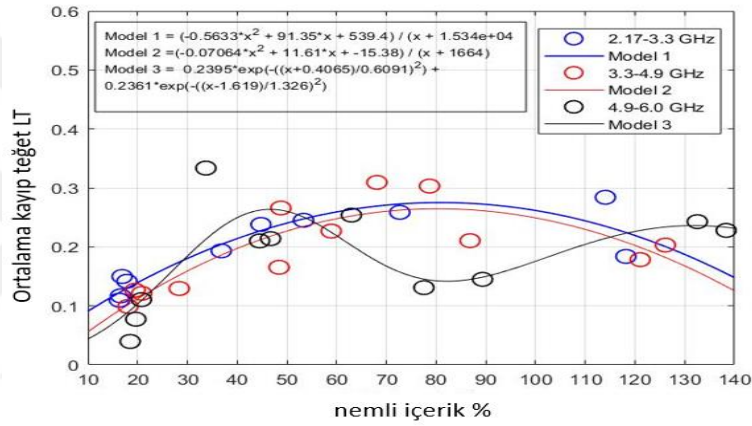
Kayıp Tanjant ampirik modelleri rasyonel biçimde oluşturulmuştur; diğerleri kübik formdadır. Üç yumuşak ağaç örneği (Sedir, Ardıç ve Çam) için Şekil 4.3'da oluşturulan ampirik modeller. Bu örneklerin her biri, hem nem içeriği hem de yoğunluk değişimleri açısından incelenen her frekans bandına (2.17-3.3 GHz (mavi), 3.3-4.9 GHz (kırmızı) ve 4.9-6.0 GHz (siyah)) göre üç modele sahiptir. Ham veri havuzunda toplam 49,500 adet bulunur; her ahşap numunesi 16,500 ham veriden oluşur ve Şekil 4.3'daki her işaretleyici 500 ham veri ölçümünden oluşur.

Sedir yumuşak ağaç örneği Şekil 4.3.a1'deki grafik, hem (2.17-3.3 GHz) hem de (3.3-4.9 GHz) frekans aralıklarındaki (sırasıyla mavi ve kırmızı ile işaretlenmiş modeller) nem düzeyine ilişkin ampirik modelleri göstermektedir. yay şeklinde bir model olup, düşük frekanslarda sedir ağacının kayıp Tanjant ortalamasının daha yüksek olması nedeniyle biraz farklı olarak değerlendirilebilir. Bu arada, 4.9-6.0 GHz frekans aralığında (siyah renkle işaretlenmiş), model farklı bir rota, harmonik bir şekil izlemiştir. Şekil 4.3.a2'deki çizim, hem (2.17-3.3 GHz) hem de (3.3-4.9 GHz) frekans aralıklarındaki (sırasıyla mavi ve kırmızı ile işaretlenmiş modeller) yoğunluk düzeyine göre aynı yay şekli modeline sahip ampirik modelleri göstermektedir. sıkıştırılmış ($0.4-1.2 \text{ g/cm}^3$) yoğunluk değişimine sahip olup, daha düşük frekanslarda sedir ağacının kayıp Tanjant ortalamasının daha yüksek olması nedeniyle hafif bir farkla değerlendirilebilir. Bu arada, 4.9-6.0 GHz frekans aralığında (siyah renkle işaretlenmiştir), model farklı bir rota izlemiştir; $0.45-1 \text{ g/cm}^3$ 'teki yukarıdaki modellerle iki nokta kesişimli bir yay şekli almıştır.

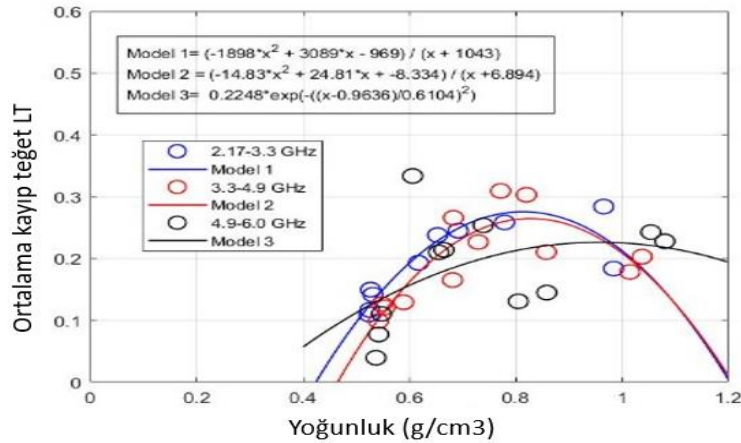
Ardıç yumuşak ağaç örneği Şekil 4.3.b1'deki grafik, hem (3.3-4.9 GHz) hem de (4.9-6.0 GHz) frekans aralıklarındaki (sırasıyla kırmızı ve siyahla işaretlenmiş modeller) nem düzeyine ilişkin ampirik modelleri göstermektedir. Model şekli ve (%16-%45) nem içeriğinde tek olarak kabul edilebilirse modeller birbirinden çok farklı olmaya başlar. %45'ten sonra 4.9-6.0 GHz'deki (siyah) model azalmaya başlar çünkü yüksek frekanslardaki Ardıç ağacının minimum kayıp Tanjant ortalaması vardır. Bu arada, (2.17-3.3 GHz) frekans aralığında (mavi renkle işaretlenmiştir), model, %20-%95 nem koşullarında daha önce bahsedilen modellerle iki noktalı kesişme noktası olan bir yay gibi farklı bir şekil almıştır. seviye. Şekil 4.3.b2'deki grafik, hem (3.3-4.9 GHz) hem de (4.9-6.0 GHz) frekans aralıklarındaki (sırasıyla kırmızı ve siyah renklerle işaretlenmiş modeller) yoğunluk düzeyine göre ampirik modelleri göstermektedir. Başlangıç noktasında, her iki modelde de ($0.45-0.55 \text{ g/cm}^3$) yoğunluk seviyesi farklarından dolayı faz kayması vardır, daha sonra her iki model de ortaya çıkmaya başlar ve (0.65 g/cm^3) yoğunluk seviyesinde bir tane sayılabilir. Bu arada, (2.17-3.3 GHz) frekans aralığında (mavi renkle işaretlenmiştir), model daha önce bahsedilen modellere göre daha yüksek zirveye sahip bir yay gibi farklı bir şekil almıştır çünkü daha düşük frekanslarda belirtildiği gibi Juniper ahşap maksimum kayıp Tanjant ortalamasına sahiptir.

Çam yumuşak ağaç örneği Şekil 4.3.c1'deki grafik, hem (3.3-4.9 GHz) hem de (4.9-6.0 GHz) frekans aralıklarındaki (sırasıyla kırmızı ve siyahla işaretlenmiş modeller) nem

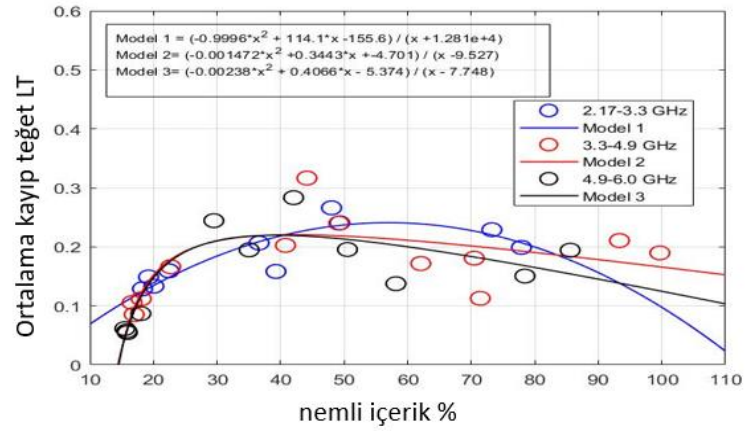
içeriği düzeyine ilişkin ampirik modelleri göstermektedir. yay şekli modeli ve bir tane olarak kabul edilebilir. Bu arada, (2.17-3.3 GHz) frekans aralığında (mavi ile işaretlenmiş), %70 nem içeriğinin 0.28 kayıp Tanjant ortalaması civarında düz bir çizgi olarak şekillenmeye başlamasından sonra model farklı bir rota izlemiştir. Düşük frekanslardaki çam ağacı maksimum kayıp Tanjant ortalamasına sahiptir. Şekil 4.3.c2'deki çizim, hem (3.3-4.9 GHz) hem de (4.9-6.0 GHz) frekans aralıklarındaki (sırasıyla kırmızı ve siyahla işaretlenmiş modeller) yoğunluk düzeyine göre ampirik modelleri gösterir ve aynı yay şekli modeline sahiptir. (0.45-0.55 g/cm³) aralığındaki başlangıç yoğunluk seviyesinden dolayı faz kayması ile. Bu arada, (2.17-3.3 GHz) frekans aralığında (mavi renkle işaretlenmiştir), model farklı bir şekle bürünmüştür; 0.45 g/cm³'ün üzerine çıkan düz bir çizgi, ardından maksimum yoğunluk seviyesine doğru düz bir çizgi, yaklaşık 0.28 kayıp Tanjant ortalaması.



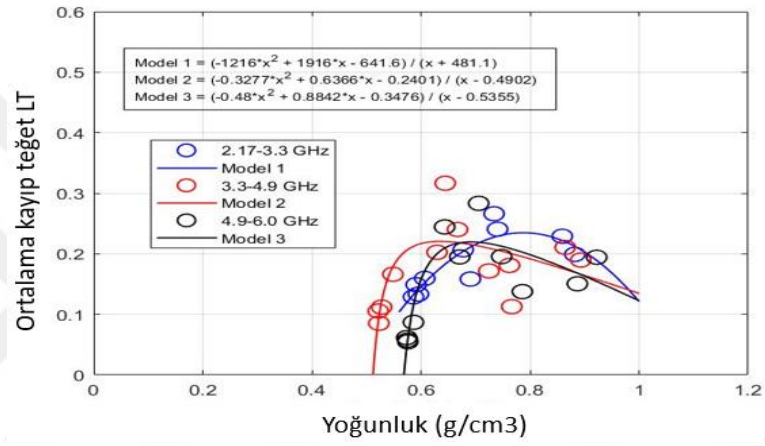
a1) Sedir ağaç



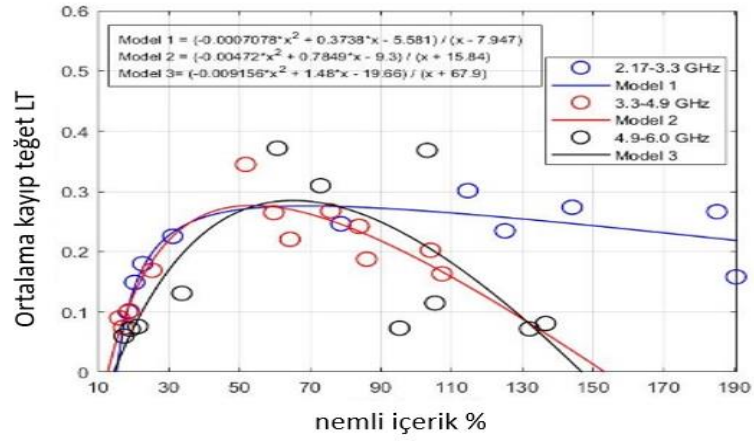
a2) Sedir ağaç



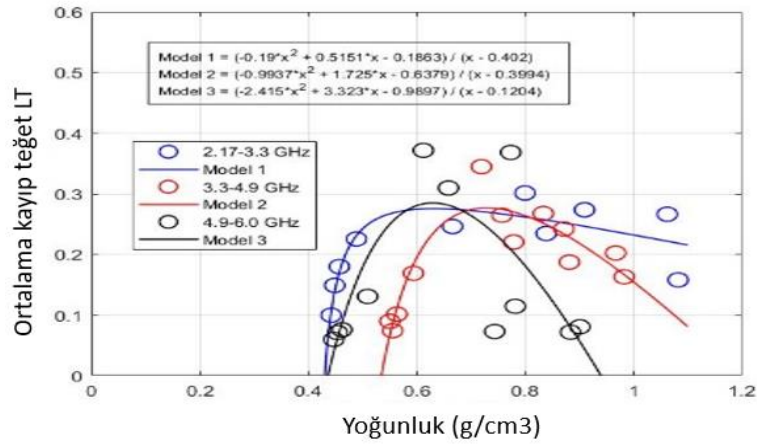
b1) Ardıç ağaç



b2) Ardıç ağaç



c1) Çam ağaç



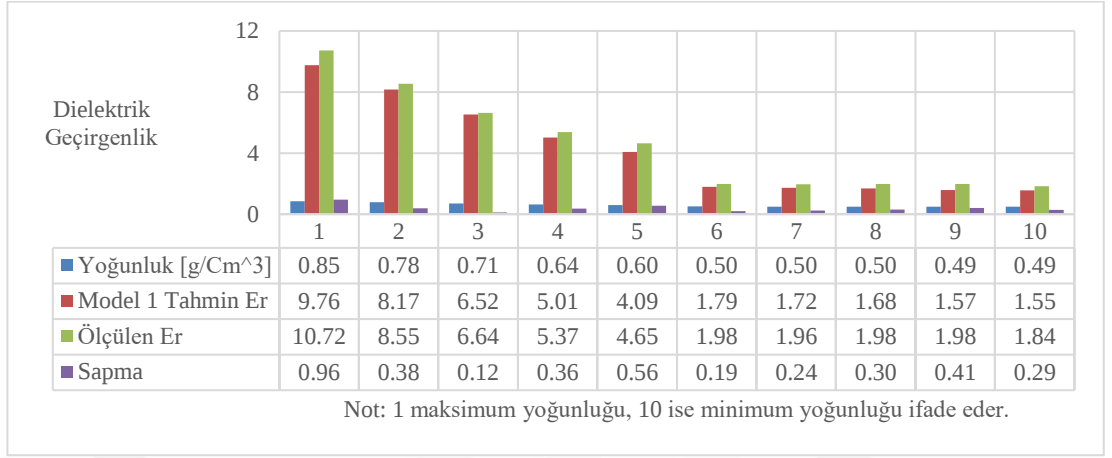
c2) Çam ağaç

Şekil 4.3. Seçilen yumuşak ağaç örneklerinin kayıp tanjant modelleri

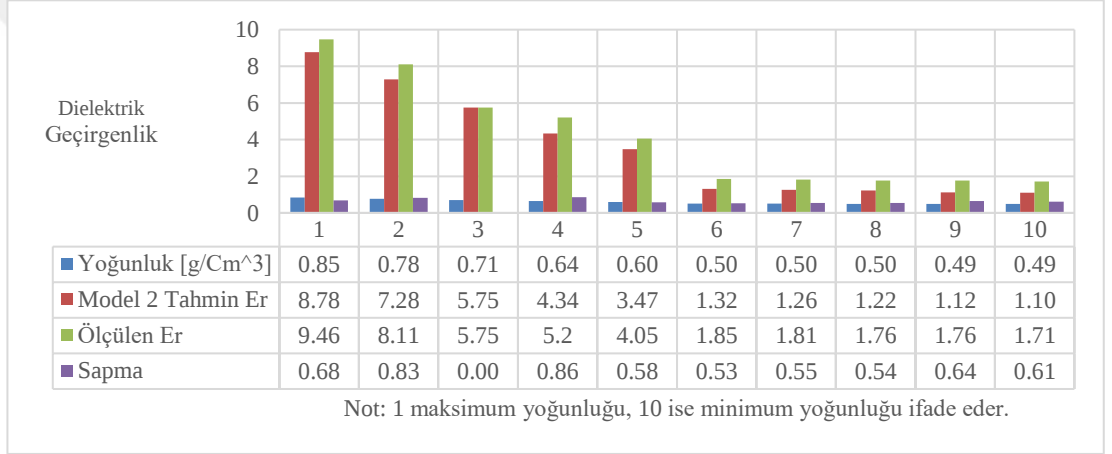
4.1.3. Yumuşak Ağaç Örneklerinin Ampirik Modellerinin Değerlendirilmesi

Bu bölüm, farklı yoğunluklara göre yumuşak ağaç numunelerinin dielektrik özelliklerini tahmin etmede ampirik modelin performansına ilişkin bir açıklama sunmaktadır. Ancak yapılacak bu test için farklı kesim açılarında ve bazı farklı kalınlık boyutlarında yeni yumuşak ağaç numuneleri hazırlanmıştır. Bu nedenle temin edilen numuneler yoğunluk hesabı ve s-parametre ölçümlerinden önce 72 saat süreyle aynı suya batırma işlemine tabi tutuldu. Daha fazla model performans değerlendirmesi için farklı yoğunluk seviyelerinin elde edilebilme olasılığı göz önünde bulundurularak model değerlendirmesi için toplam 10 farklı yoğunluk seviyesi dikkate alınmıştır. Bu arada, önceden oluşturulan deneyden s-parametreleri toplandıktan sonra, ilk dielektrik özellikler MATLAB kodu kullanılarak hesaplandı ve ikinci adım, yoğunluk koşullarına göre önceden hazırlanmış ampirik model kullanılarak dielektrik özelliklerin elde edilmesi idi. Oluşturulan model kullanılırken hesaplanan dielektrik özellikler ile tahmin edilen dielektrik özellikler arasındaki değerlendirme Şekil 4.4'da gösterilmektedir. Her iki deneyimden kaynaklanan bir ölçüm hatası birikimi olduğunu unutmayın; bu nedenle, daha önce dikkate alınmış olan tahmin edilen sonuçların bazılarında önemli küçük farklılıklar vardır. Hesaplanan ve tahmin edilen sonuçlar arasındaki sapma, mantıksal bir sonuç olan Şekil 4.4'da görüldüğü gibi kaydedilmiştir. İlk yumuşak ağaç örnek setlerinden oluşturulan ampirik modellerin biraz daha düşük bir minimum hata oranına sahip olduğuna dikkat edin; bu oran şu şekilde hesaplanmıştır ve kısaca bahsedilecektir: sedir ağacı model 1'in $\pm \%2$ hatası vardır, model 2'nin $\pm \%7$ hatası vardır, ve model 3'ün $\pm \%3$ hatası vardır; ardıç ağacı model 1 $\pm \%2$, model 2 $\pm \%6$, model 3 $\pm \%2$ hataya sahiptir; ve son olarak çam ağacı model 1'in $\pm \%3$, model 2'nin $\pm \%9$ ve model 3'ün $\pm \%4$ hata payı bulunmaktadır. Model 1, 2 ve 3'ün sırasıyla [2.17–3.3 GHz, 3.3–4.9 GHz ve 4.9–6.0 GHz] anlamına geldiğini unutmayın. Ayrıca her iki ölçüm kampanyasında da sistem hatası olarak kabul edilebilecek bazı kümülatif hatalar var. Ancak endüstriyel uygulamalarda, ahşap malzemelerin etrafındaki bağıl nem göz önünde bulundurulduğunda, pratik kullanım için makul miktardaki nem ve yoğunluk

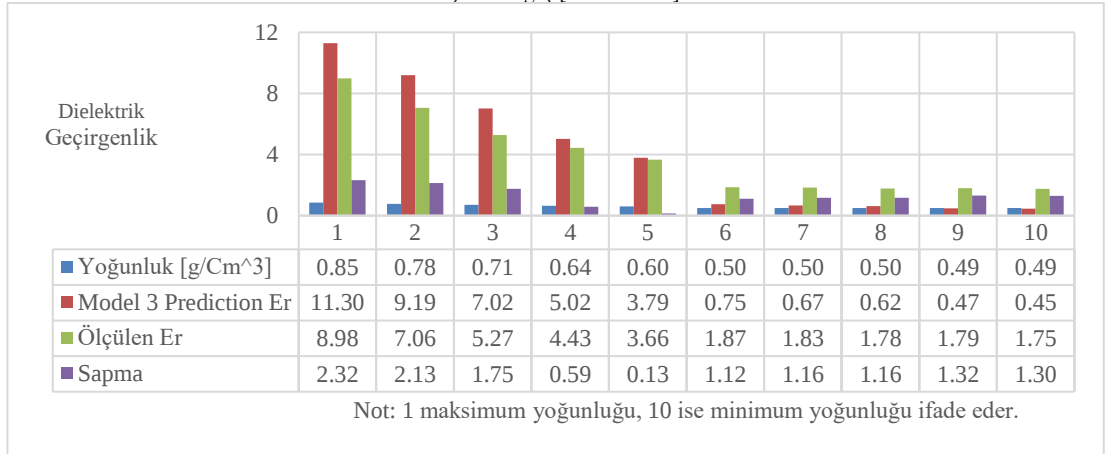
seviyelerinin, nem ve yoğunluk seviyesinin denge noktası civarında olması dikkate alınmıştır.



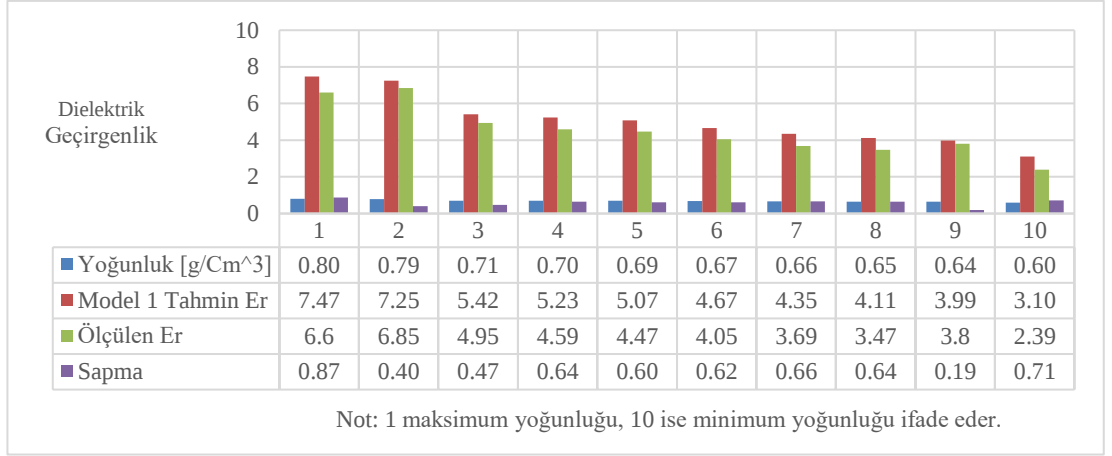
1a) Sedir ağaç [2.17-3.3 GHz]



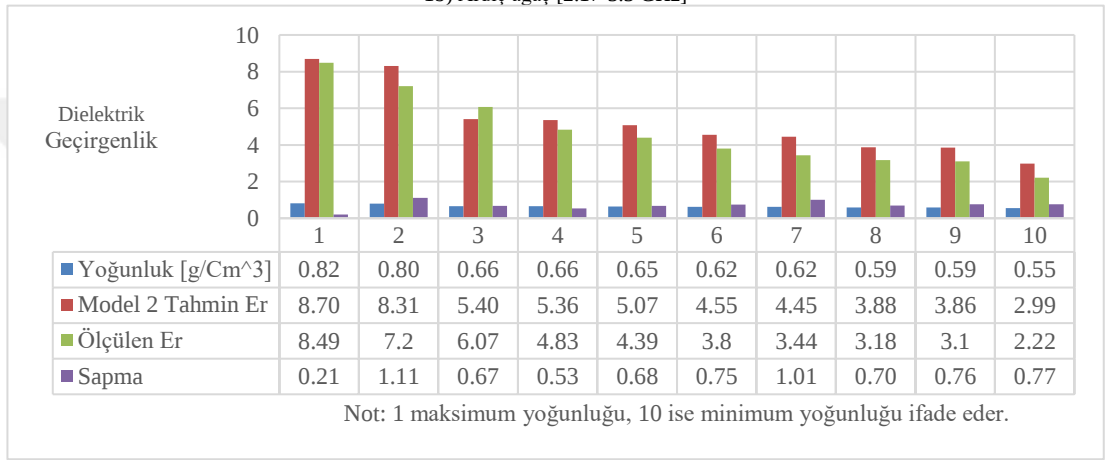
2a) Sedir ağaç [3.3-4.9 GHz]



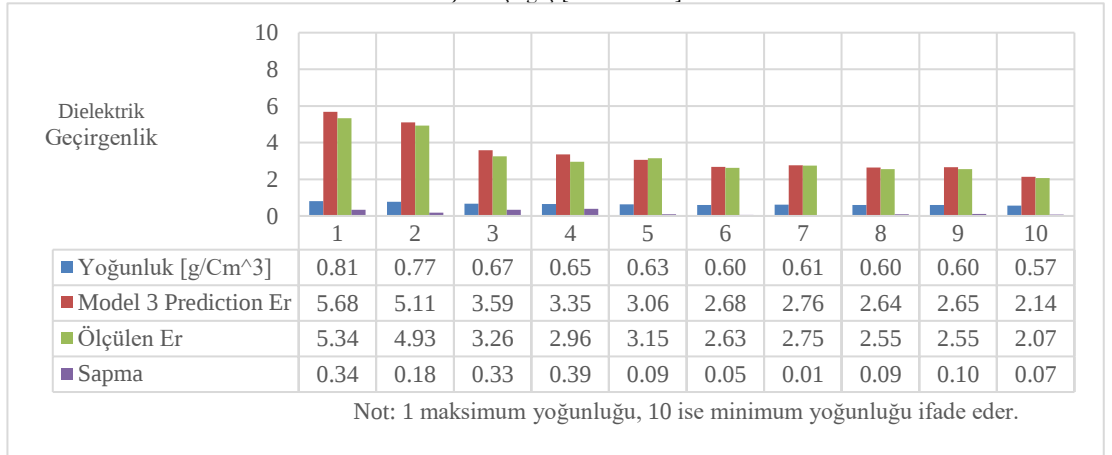
3a) Sedir ağaç [4.9-7.1 GHz]



1b) Ardıç ağaç [2.17-3.3 GHz]



2b) Ardıç ağaç [3.3-4.9 GHz]



3b) Ardıç ağaç [4.9-7.1 GHz]



Şekil 4.4. Yumuşak ağaç örnekleri deneysel modellerin değerlendirilmesi

4.2. Sert ağaç Numune Ölçüm Sonuçları

4.2.1. Bağlı geçirgenlik Sonuçları

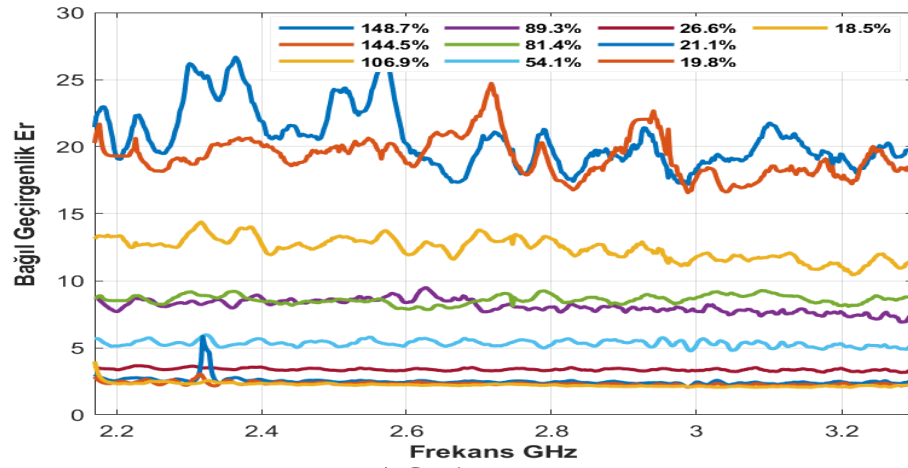
Sert ağaç örnekleri nelerdir? Bu araştırmada incelenen altı tür seçilmiş sert ağaç vardır: ceviz, çınar, titrek kavak, kestane, meşe ve okaliptüs. Aşağıdaki bu bölümde, daha önce Bölüm 3'te belirtildiği gibi, nem seviyesi değişiklikleri ve yoğunluğa göre s-parametrelerinin ölçülmesi için uygun bir kurulumda hesaplamalar yapılmaya çalışıldı. Bu sert ağaç numunelerindeki ham veri havuzu 99.000 ham veri noktasından oluşur; her ahşap örneği 16.500 noktadan oluşur. Bu arada dördüncü bölüm, hem nem içeriğine hem de yoğunluğa göre bağlı geçirgenlik ve kayıp tanjant gibi hesaplanan sonuçlara odaklandı. Daha önce bahsedilen bu sonuçlarla ilgili olmasına rağmen, hem bağlı geçirgenlik hem de kayıp tanjant sonuçları için ampirik modeller oluşturulmuştur. Bu ampirik modellerin üretkenliği, herhangi bir hasar verici (tahribatlı) ölçüm yönteminin kullanılmasına gerek kalmadan bağlı geçirgenlik ve kayıp tanjant değerlerinin ölçülmesinde yararlı olacaktır. Ahşap malzemenin higroskopik bir malzeme olarak kabul edildiğini unutmayın; çünkü çevredeki havanın bağlı nemi (BN) değiştiğinden, ahşap malzeme su nemi kazanır veya kaybeder, ayrıca genişler veya büzülür. Ancak su nem içeriğinde herhangi bir kazanç veya kayıp olmadığında ahşap malzemenin denge nem içeriğine (DNİ) ulaştığı söylenebilir. Bu nedenle, doğal ahşap malzemelerle çalışırken, kullanılmadan önce EMU'nin yüzde iki puanı içinde kuruması gerekir (Wengert ve Meyer 1992). yazarlara göre kabul edilebilir ahşap nem içeriği seviyesi iç mekan için %6 ila %8, dış mekan için %9 ila %14 arasında olmalıdır (Wengert ve Meyer 1992). Bu arada, taze kesilmiş ahşabın nem içeriği %40 ila %200 arasında olacaktır. Ahşap malzeme %200 nem içeriği seviyesine ulaşabilir çünkü ahşap malzemenin nem içeriği hesaplaması, ahşabın içindeki suyun ağırlığının susuz ahşap malzemenin ağırlığına bölünmesine eşittir. ahşap lifli malzemeninkinden çok daha büyük olduğundan, bunu %100'den çok daha fazla arttırmak mümkündür. Normal koşullar altında ahşap malzemelerin nem içeriği bu aralıkta olduğundan, pratikte %15 ila %30 arasındaki nem içeriği birçok uygulama için yaygındır (Swedish Wood 2022). Şekil 4.5 ve 4.6'da görüldüğü gibi nem içeriği hesaplaması, %20 nem içeriği seviyesinin üzerindeki dielektrik geçirgenlik sonuçlarını ayırt etmemizi sağlar. Nem içeriği artmasına rağmen bağlı geçirgenlik ortalaması da artar. Bu çalışmanın sonuçları uyarlanabilir endüstriyel ısıtma uygulamaları için faydalı olabilir.

Şekil 4.5.a1, a2 ve a3'te görüldüğü gibi ceviz ağacı örneklerinin bağlı dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artar. Şekil 4.5.a1'deki (2.17-3.3 GHz) frekans bandında nem içeriği %18.5 ile %148.7 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.2-20.5 arasında değişmektedir. Şekil 4.5.a2'deki (3.3-4.9 GHz) frekans bandında nem içeriği %17 ile %142.2 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 1.9 ile 13.8 arasında değişmektedir. Şekil 4.5.a3'teki (4.9-6.0 GHz) frekans bandında nem içeriği %15.9 ile %13.9 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.16 ile 11.9 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru

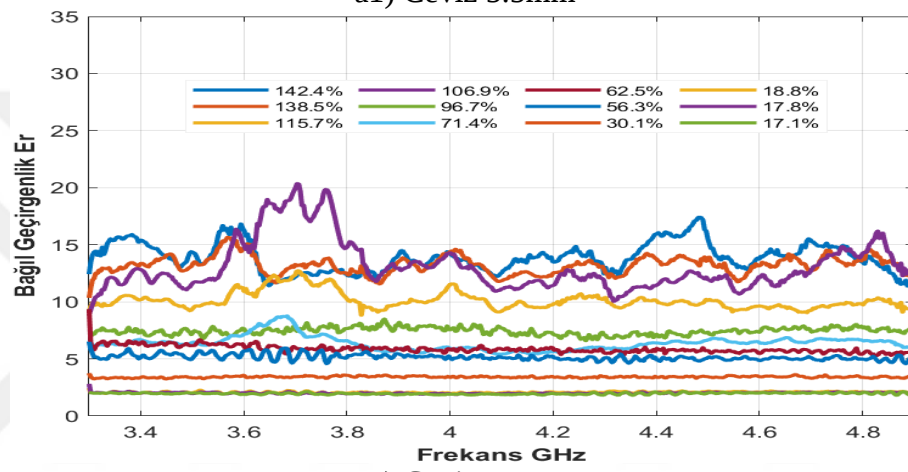
noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. Ancak Şekil 4.5.a1, a2 ve a3'te nem içerikleri sırasıyla %21, %18.8 ve %18.7 olan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucunun ortalaması olarak değerlendirilebilir.

Şekil 4.5.b1, b2 ve b3'te görüldüğü gibi Çınar ağacı numunesinin bağıl dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artar. Şekil 4.5.b1'deki (2.17-3.3 GHz) frekans bandında nem içeriği %17 ile %131 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.6-25.3 arasında değişmektedir. Şekil 4.5.b2'deki (3.3-4.9 GHz) frekans bandında nem içeriği %16.5 ile %11.3 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.8 ile 18.8 arasında değişmektedir. Şekil 4.5.b3'teki (4.9-6.0 GHz) frekans bandında nem içeriği %18.9 ile %13.2 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.17 ile 23.8 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. ahşap örneği. Ancak Şekil 4.5.b1, b2 ve b3 nem içerikleri sırasıyla %20, %20.7 ve %17.7 olan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucun ortalaması olarak değerlendirilebilir.

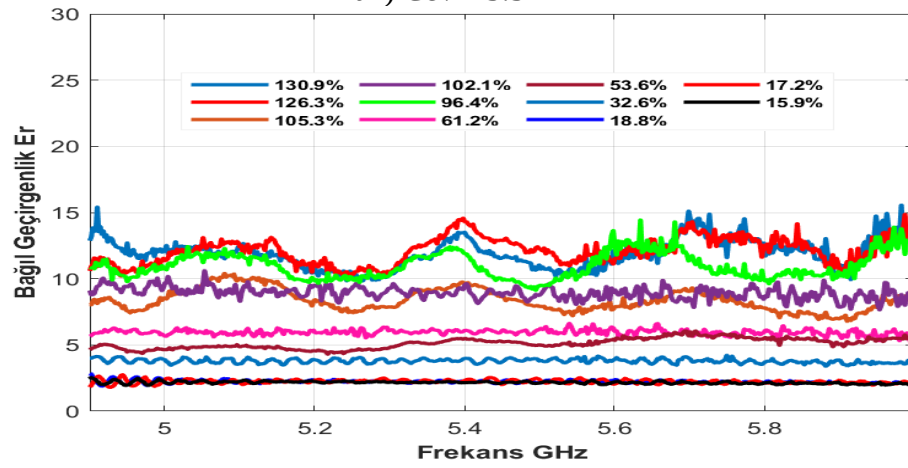
Şekil 4.5.c1, c2 ve c3'te görüldüğü gibi Kavak ağacı numunesinin bağıl dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artar. Şekil 4.5.c1'deki (2.17-3.3 GHz) frekans bandında nem içeriği %16.3 ile %18.4 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.05 ile 19.05 arasında değişmektedir. Şekil 4.5.c2'deki (3.3-4.9 GHz) frekans bandında nem içeriği %13.5 ile %179.4 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 1.7 ile 16,9 arasında değişmektedir. Şekil 4.5.c3'teki (4.9-6.0 GHz) frekans bandında nem içeriği %14.7 ile %149.4 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 1.6 ile 10.2 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. ahşap örneği. Ancak Şekil 4.5.c1, c2 ve c3 nem içerikleri sırasıyla %21.7, %21.7 ve %15.6 olan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucun ortalaması olarak değerlendirilebilir.



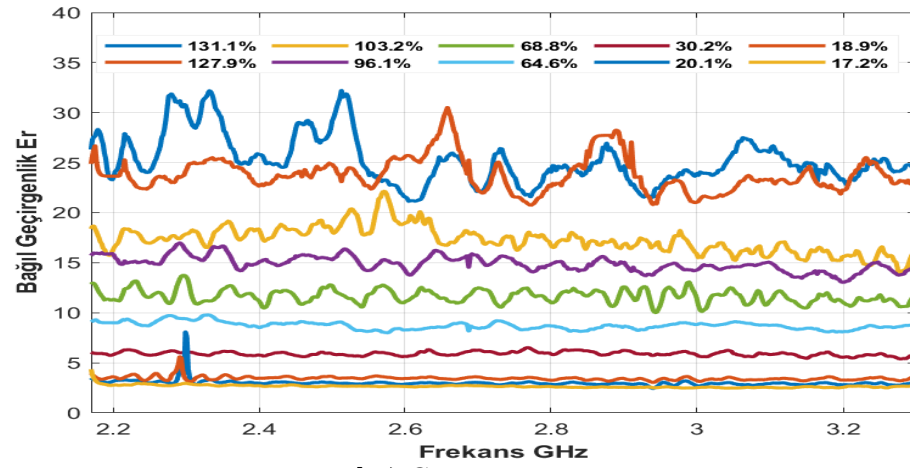
a1) Ceviz 5.5mm



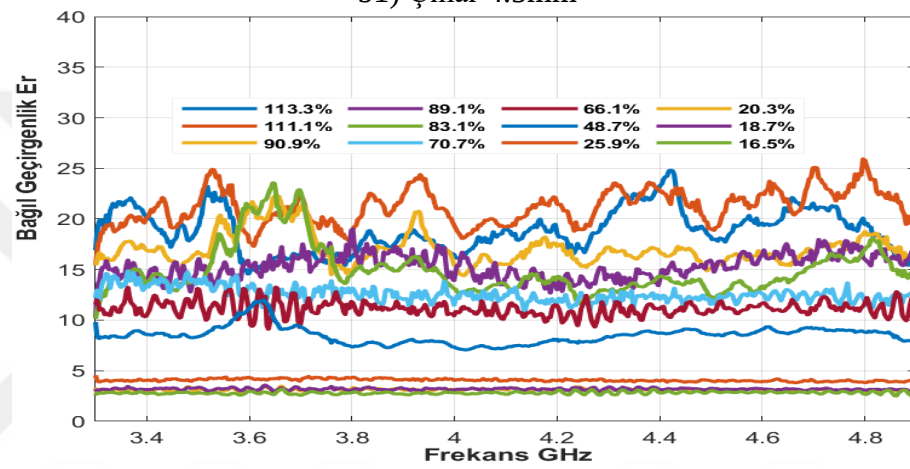
a2) Ceviz 5.5mm



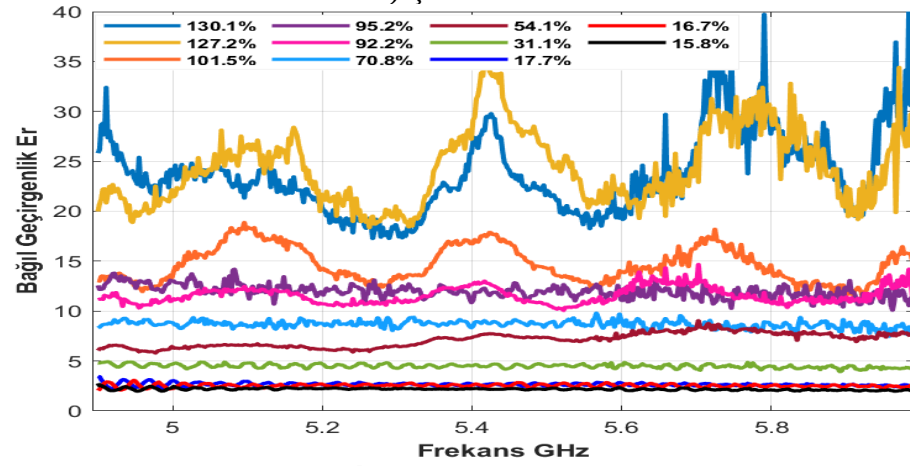
a3) Ceviz 6.0mm



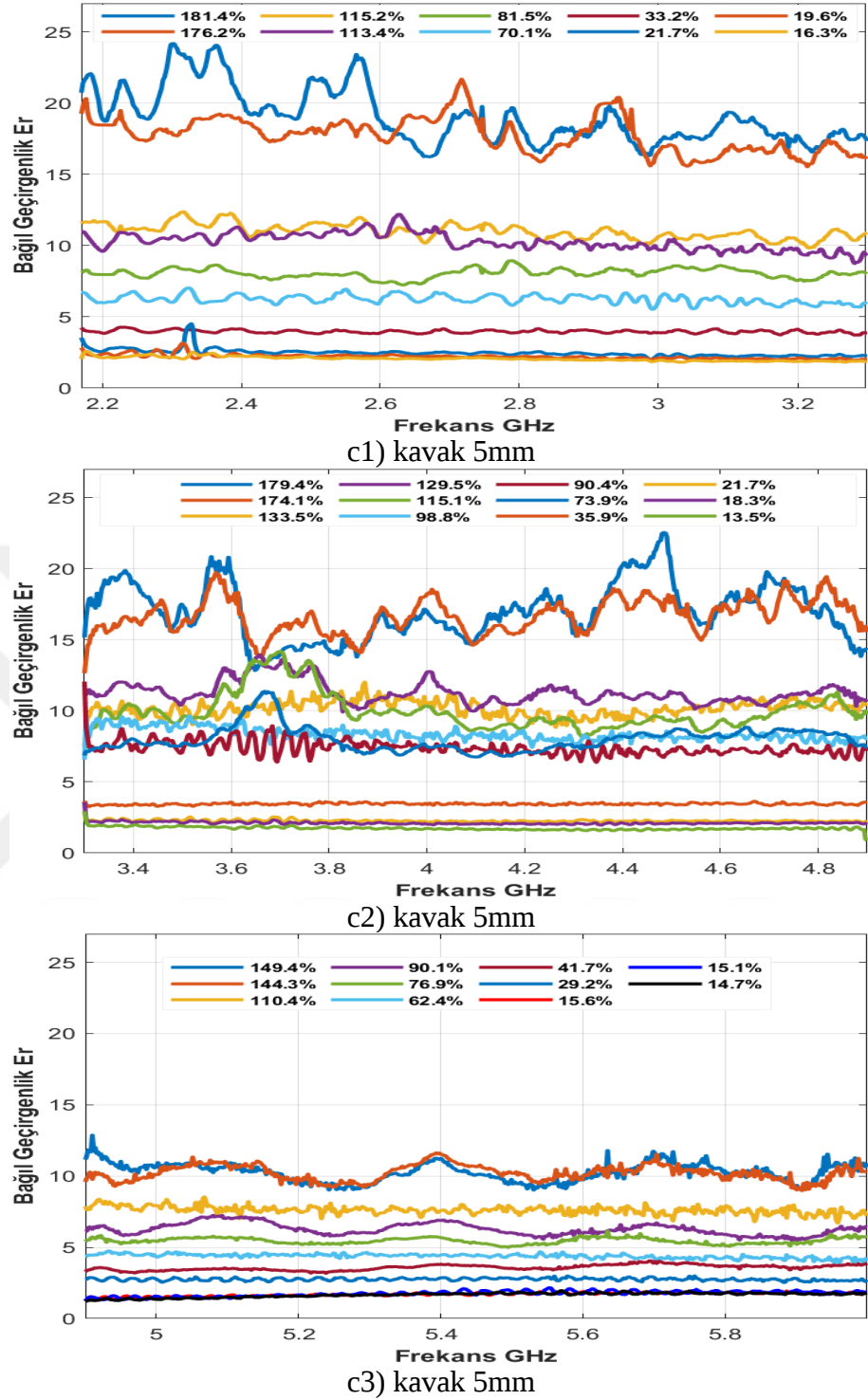
b1) Çınar 4.5mm



b2) Çınar 4.5mm



b3) Çınar 4.5mm



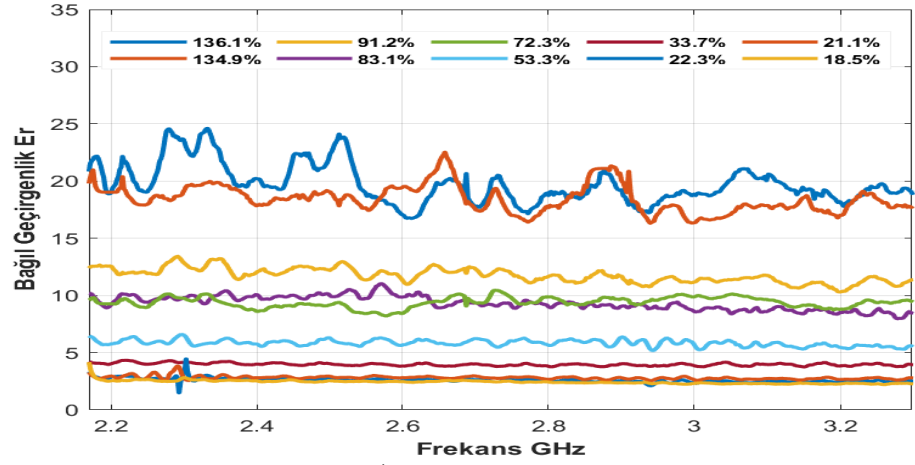
Şekil 4.5. Ceviz çınar kavak sert ağaç numunesinin bağıl geçirgenliği

Şekil 4.6.a1, a2 ve a3'te görüldüğü gibi kestane odunu numunesinin bağıl dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artar. Şekil 4.6.a1'deki (2.17-3.3 GHz) frekans bandında nem içeriği %18.5 ile %136.1 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.4 ile 19.8 arasında değişmektedir. Şekil 4.6.a2'deki (3.3-4.9 GHz) frekans bandında nem içeriği %18.9 ile %156.7 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.19 ile 21 arasında değişmektedir. Şekil 4.6.a3'teki (4.9-6.0 GHz) frekans bandında nem içeriği

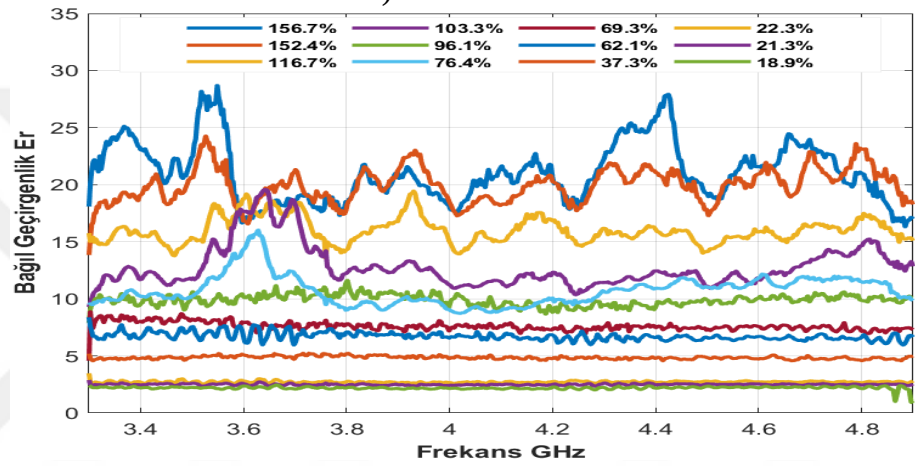
%18.4 ile %162.5 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.2 ile 17.6 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. ahşap örneği. Ancak Şekil 4.6.a1, a2 ve a3 nem içerikleri sırasıyla %22.3, %22.3 ve %23.6 olan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucun ortalaması olarak değerlendirilebilir.

Şekil 4.6.b1, b2 ve b3'te görüldüğü gibi meşe odunu numunelerinin bağıl dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artar. Şekil 4.6.b1'deki (2.17-3.3 GHz) frekans bandında nem içeriği %13 ile %93 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 3.2 ile 16.2 arasında değişmektedir. Şekil 4.10.b2'deki (3.3-4.9 GHz) frekans bandında nem içeriği %12,1 ile %78 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 3,8 ile 20,4 arasında değişmektedir. Şekil 4.6.b3'teki (4.9-6.0 GHz) frekans bandında nem içeriği %14.8 ile %87.5 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 3 ile 17 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. ahşap örneği. Ancak Şekil 4.6.b1, b2 ve b3 nem içerikleri sırasıyla %16.5, %18.3 ve %19.3 olan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucun ortalaması olarak değerlendirilebilir.

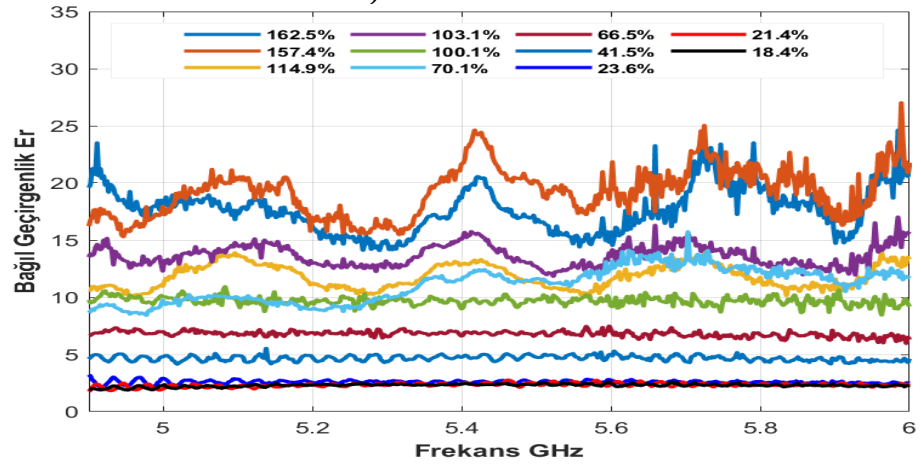
Şekil 4.6.c1, c2 ve c3'te görüldüğü gibi Okaliptüs odunu örneğinin bağıl dielektrik sabiti artan nem içeriğiyle birlikte artar. Şekil 4.6.c1'deki (2.17-3.3 GHz) frekans bandında nem içeriği %16.2 ile %116,8 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.7 ile 20.1 arasında değişmektedir. Şekil 4.6.c2'deki (3.3-4.9 GHz) frekans bandında nem içeriği %11 ile %92,8 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 3,2-20,6 arasında değişmektedir. Şekil 4.6.c3'teki (4.9-6.0 GHz) frekans bandında nem içeriği %21.5 ile %121.4 arasında değişirken, dielektrik geçirgenlik ortalaması 2.5 ile 13.5 arasında değişmektedir. Daha yüksek nem içeriği için, dielektrik sabiti çalışma frekans bandına daha duyarlıdır, oysa tüm frekans bantlarında dielektrik ortalama değişimi kuru noktada aynıdır ancak üst nem içeriği seviyesinde, tarafından emilen su miktarına bağlı olarak değişir. ahşap örneği. Ancak Şekil 4.6.c1, c2 ve c3 nem içerikleri sırasıyla %19.6, %15.3 ve %21.8 olan ahşap numunesinin dielektrik değerleri birbirine karışarak ayırt edilemez hale gelmiş olup, bir dielektrik sonucun ortalaması olarak değerlendirilebilir.



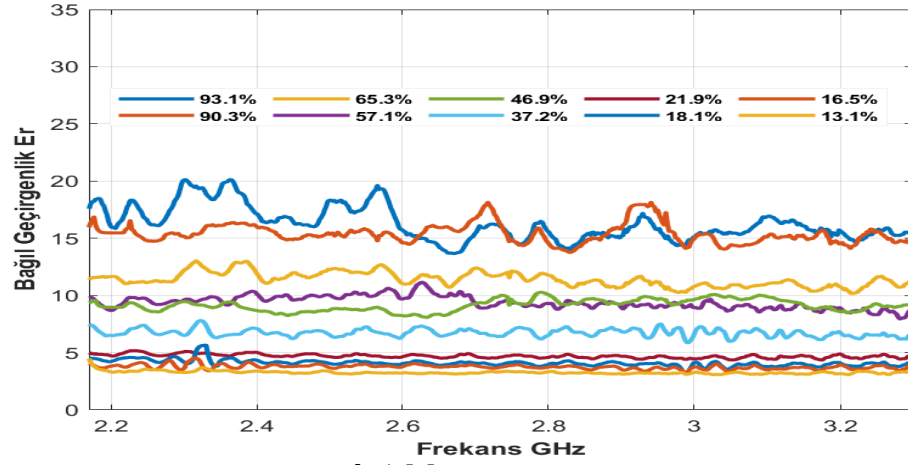
a1) Kestane 5mm



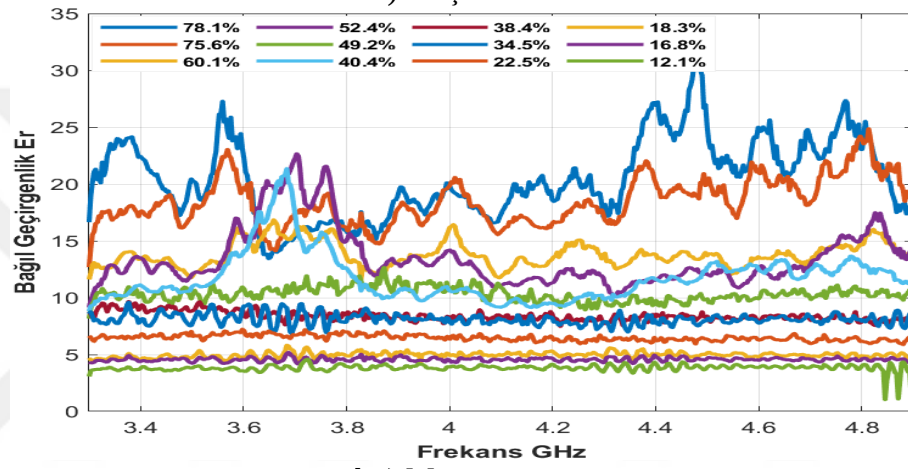
a2) Kestane 4.5mm



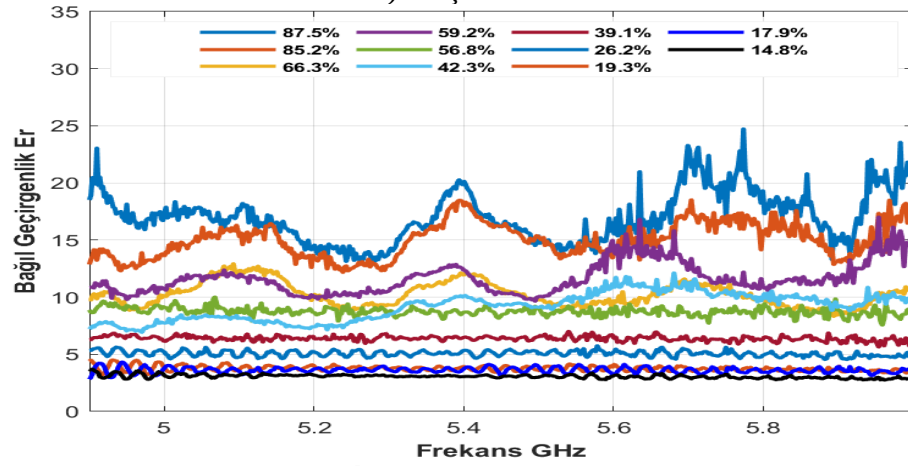
a3) Kestane 4.5mm



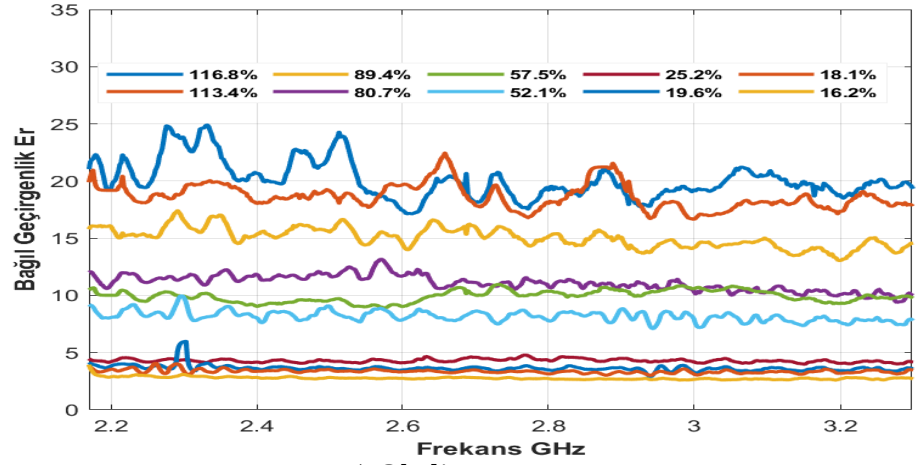
b1) Meşe 5.5mm



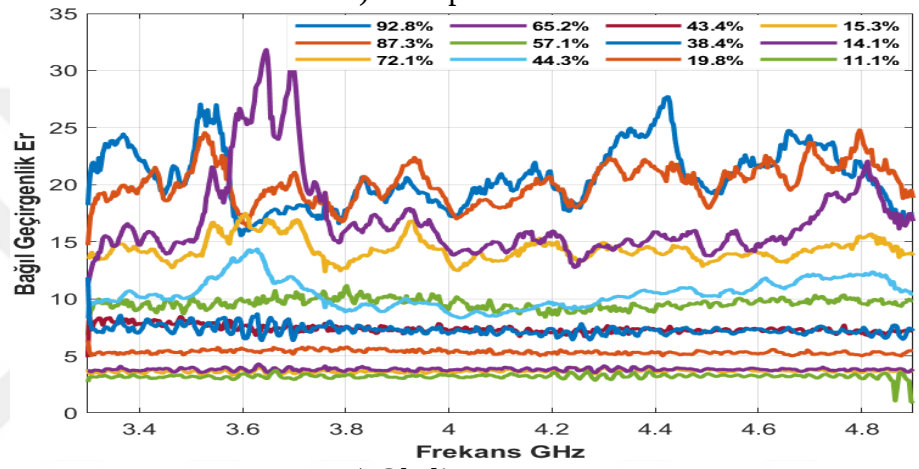
b2) Meşe 5.5mm



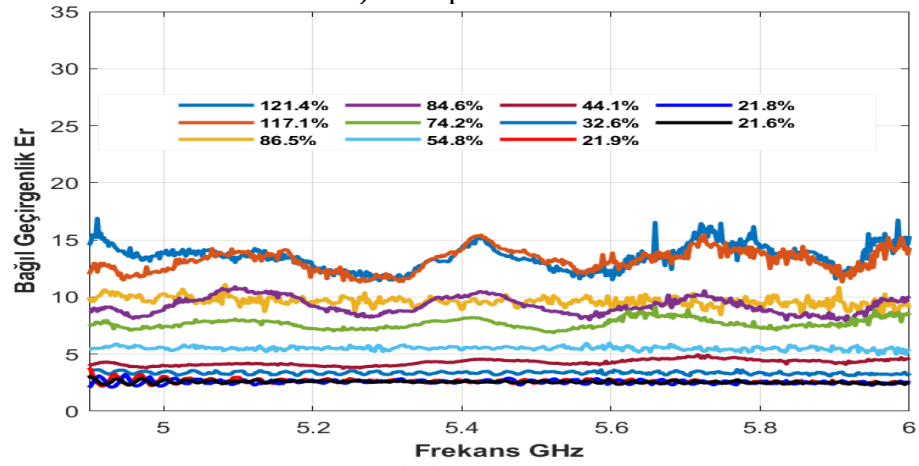
b3) Meşe 5.5mm



c1) Okaliptüs 4.5mm



c2) Okaliptüs 4.5mm



c3) Okaliptüs 4.5mm

Şekil 4.6. Kestane meşe okaliptüs sert ağaç örneğinin bağıl geçirgenliği

4.2.2. Ampirik model üretimi

Altı sert ağaç numunesi (Ceviz, Çınar, Aspen, Kestane, Meşe ve Okaliptüs) için üç doğrusal ampirik model formu oluşturulmuştur. Bu örneklerin her birinin, hem nem içeriği hem de yoğunluk varyasyonlarına göre incelenen her frekans bandına (2.17-3.3 GHz, 3.3-4.9 GHz ve 4.9-6 GHz) göre üç modeli vardır. Ham veri havuzu toplam 99,000'e sahiptir, her ahşap örneği 16,500 ham veriden oluşur ve Şekil 4.7'deki her işaretleyici 500 ham veri ölçümünden oluşur.

Şekil 4.7.a1'deki ceviz ağacı örneği, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.A2, yoğunluk seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 4.7.A1'de gösterilen grafik, nem içeriği varyasyonuna göre, 2.17-3.3 GHz'de (mavi renkle işaretlenmiş model), maksimum dielektrik ortalamanın 21'e kadar ulaştığını göstermektedir. Bu arada, her ikisi de (3,3-4.9 GHz) ve (2.17-3.3 GHz) (sırasıyla kırmızı ve siyah renklerle işaretlenmiş modeller) Ampirik frekans aralıkları birbirleriyle bir model olarak işlev gördü. Grafik, yoğunluk varyasyonuna göre aşağıdaki Şekil 4.7.a2'de gösterilmiştir: 2.17-3.3 GHz'de (kırmızı renkle işaretlenmiş model), maksimum dielektrik ortalama 21'e kadar ulaşır. Bu arada hem (3.3-4.9 GHz) hem de (4.9-6.0 GHz) (sırasıyla mavi ve siyah renklerle işaretlenmiş modeller) Ampirik frekans aralıkları da birbirleriyle bir model olarak işlev gördü. Ceviz ahşap örnekleri için sunulan ampirik modeller, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalama sonuçlarının daha düşük frekans bantlarında bulunduğunu göstermektedir.

Şekil 4.7.b1'deki çınar ağacı örneği, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.b2, yoğunluk seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.b1'de gösterilen grafik, hem (2.17-3.3 GHz) hem de (3.3-4.9 GHz) (mavi ve kırmızı renkle işaretlenmiş modeller) frekans aralıklarında, ampirik modellerle ortaya çıkan nem içeriği varyasyonuna göre, birbirlerinin işlevi ile ortaya çıktığını göstermektedir. Maksimum dielektrik ortalama sahip bir model 25'e ulaştığından, (4.9-6 GHz) (siyah renkle işaretlenmiş modeller) frekans aralıklarında, üretilen ampirik model daha önce bahsedilen modellere o kadar yakındı ki, dielektrik ortalamasının ulaştığı Yoğunluk varyasyonuna göre Şekil 4.7.b2'de gösterilen grafik: Burada bu grafikte, ampirik modeller arasındaki ayrım netleşir. Belirli bir alanla, üç modelin maksimum dielektrik ortalaması (25.2-24.8) arasında değişirken, ampirik modeller düzenlemesi aşağıdaki gibidir: (2.17-3.3 GHz. Sycamore ağacı örnekleri için sunulan ampirik modeller, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalaması sonuçlarının daha düşük frekans bantlarında bulunur (ancak Şekil 4.7, b1, b2 ve b3'te görüldüğü gibi, tüm ampirik modeller yakın menzile ve yakın dielektrik sonuçlara sahiptir).

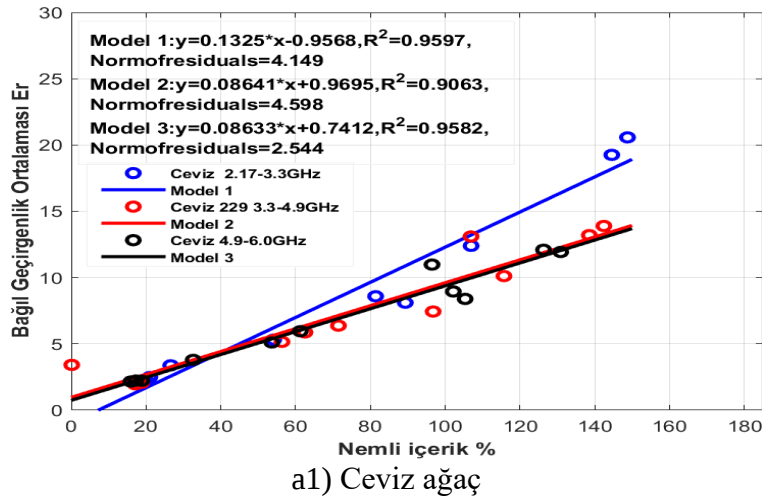
Şekil 4.7.c1'deki kavak ağacı örneği, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.c2, yoğunluk seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.c1'de nem içeriği varyasyonuna göre gösterilen grafik, 2.17-3.3 GHz'de (mavi renkle işaretlenmiş model), maksimum dielektrik ortalamanın 20'ye kadar ulaştığını göstermektedir. Bu arada 3.3-4.9 GHz'de (kırmızı ile işaretlenmiş model renk), frekans aralığı dielektrik ortalaması 16'ya kadar ulaşır. Bununla birlikte, 4.9-6 GHz'de (siyah renkle işaretlenmiş modeller), frekans aralığı dielektrik ortalaması 10'a kadar uzanır. Varyasyon, 2.17-3.3 GHz'de (kırmızı renkle işaretlenmiş model), maksimum dielektrik ortalamanın 20'ye kadar ulaştığını gösterir. Bu arada, 3.3-4.9 GHz'de (mavi renkle işaretlenmiş model), dielektrik ortalamanın 16'ya kadar ulaştığını gösterir. (4.9-6.0 GHz) (siyah renkle işaretlenmiş modeller) içinde, frekans aralığı dielektrik ortalaması 10'a kadar ulaşır. Aspen ahşap örnekleri için sunulan ampirik modeller, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalama sonuçlarının daha düşük frekans bantlarında bulunduğunu göstermektedir.

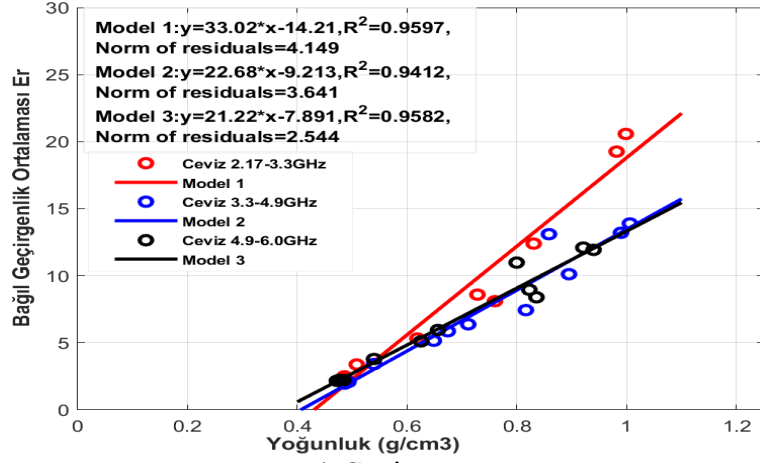
Şekil 4.7.d1'deki kestane ağacı örneği, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.d2, yoğunluk seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.d1'de gösterilen grafik (2.17-3.3 GHz), (3.3-4.9 GHz) ve (4.9-6.0 GHz) (mavi, kırmızı ve siyah renklerle işaretlenmiş modeller) frekansı Göze çarpan küçük bir ayırma mesafesi ve sırasıyla 21, 20'ye kadar dielektrik ortalama varyasyon ile birbirine yakın aralıklar. Bu arada, 4.9-6.0 GHz'de (siyah renkle işaretlenmiş model), bir frekans aralığı, dielektrik ortalamaya sahip daha önce bahsedilen modellerden belirli bir mesafede üretilen bir model 18'e kadar ulaşır. Şekil 4.7.d2'de gösterilen grafik. Aşağıda, yoğunluk varyasyonu ile ilgili olarak, (2.17-3.3 ghz) (kırmızı renkle işaretlenmiş model) frekans aralığında, üretilen modelin diğer modellerden maksimum dielektrik ortalaması 21'e kadar mesafeleri 21'e kadar uzaklıktadır. (3.3-4.9 GHz) ve (4.9-6.0 GHz) (sırasıyla mavi ve siyah renklerle işaretlenmiş modeller) ampirik modeller birbirleriyle $0.75 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ yoğunluk seviyesinde ortaya çıktı ve bir model olarak hareket etmeye başladı. Kestane ağacı örnekleri için sunulan ampirik modellerin gösterdiği gibi, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalama sonuçları daha düşük frekans bantlarında bulunur (ancak 3.3-4.9 GHz'de, nem içeriği farklılıkları olan üretilen model daha düşük frekans modeline daha yakinken, yoğunlukta, farklılıklar daha yüksek frekans modeline daha yakındı ve belirli bir noktada ortaya çıkmaya başladı).

Şekil 4.7.e1'deki meşe ağacı örneği, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.e2, yoğunluk seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 4.7.e1'de gösterilen grafik, (3.3-4.9 GHz) (kırmızı renkle işaretlenmiş model) frekans aralıklarında nem içeriği varyasyonuna

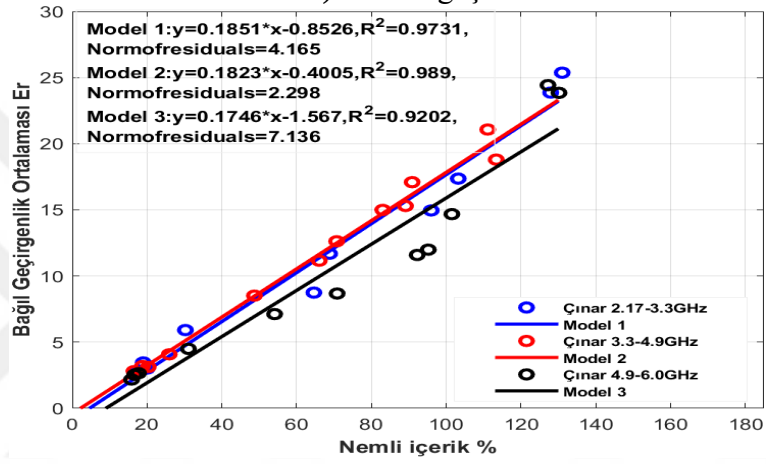
göre, maksimum dielektrik ortalaması 20'ye kadar olan diğer modellerden üretilen model mesafelerinin 20'ye kadar olduğunu göstermektedir. Bu arada, hem (2.17-3.3 GHz) hem de (4.9-6.0 GHz) (mavi ve siyah renklerle işaretlenmiş modeller) frekans aralıklarında, ampirik modeller, maksimum dielektrik ortalamaya sahip bir model olarak 16'ya kadar ortaya çıktı. Aşağıdaki Şekil 4.7.e2'de gösterilen grafik yoğunluk varyasyonuna göre, (2.17-3.3 GHz) (kırmızı renklerle işaretlenmiş model) frekans aralığında, maksimum dielektrik ortalaması olan diğer modellerden üretilen model mesafeleri, 16. Bu arada, hem (3.3-4.9 GHz) hem de (4.9-6.0 GHz) (sırasıyla mavi ve siyah renklerle işaretlenmiş modeller) ampirik modeller bir ayırma mesafesi ile başlatıldı, daha sonra birbirleriyle 1 (g/cm³) ile ortaya çıktı. yoğunluk seviyesi ve bir model olarak hareket etmeye başladı. Meşe ağacı örnekleri için sunulan ampirik modeller, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalama sonuçlarının daha düşük frekans bantlarında bulunduğunu göstermektedir.

Şekil 4.7.f1'deki okaliptüs ağacı örneği, nem içeriği seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.f2, yoğunluk seviyelerine göre elde edilen geçirgenlik ortalama sonuçlarına göre inşa edilen üç ampirik modeli göstermektedir. Şekil 4.7.f1'de gösterilen grafik, 3.3-4.9 GHz'de (kırmızı renklerle işaretlenmiş model) ayrılmış ampirik modellerin birbirinden ayrıldığı gibi nem içeriği varyasyonuna göre, maksimum dielektrik ortalaması 21'e kadar ulaşır. Bu arada, ikinci ampirik 2.17-3.3 GHz'de model (mavi renklerle işaretlenmiş model) frekans aralığı dielektrik ortalaması 20'ye kadar ulaşır. Bununla birlikte, (4.9-6 GHz) (siyah renklerle işaretlenmiş modeller) üçüncü sırada ampirik model dielektrik ortalama uzanır Şekil 4.7.f2'de gösterilen grafik, hem (2.17-3.3 GHz) hem de (3.3-4.9 GHz) yoğunluk varyasyonuna göre, frekans aralığı ampirik modellerinin her ikisi de oyunculuk yapmaya başlayana kadar birbirlerine kapana kadar dielektrik ortalaması 20,21'e kadar olan bir model olarak. Bu arada, 4.9-6.0 GHz'de (siyah renklerle işaretlenmiş modeller), en düşük dielektrik ortalama sahip ampirik model, daha önce bahsedilen modellerin altında olan 14 GHz'e kadar ulaşır. Okaliptüs ağacı örnekleri için sunulan ampirik modeller, maksimum dielektrik geçirgenlik ortalama sonuçlarının daha düşük frekans bantlarında bulunduğunu göstermektedir.

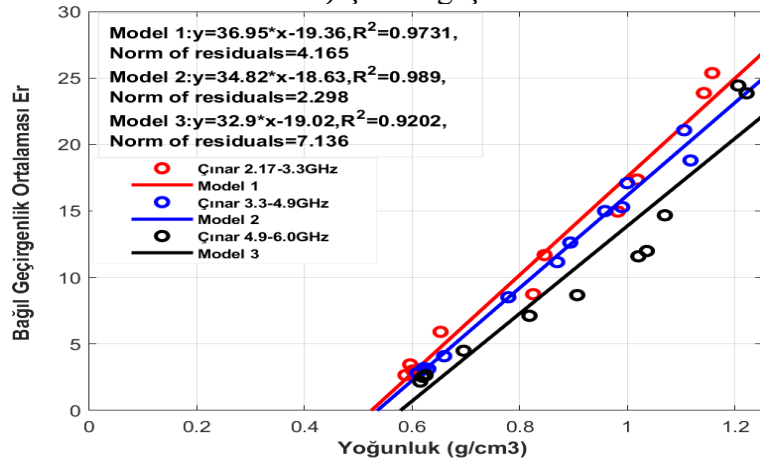




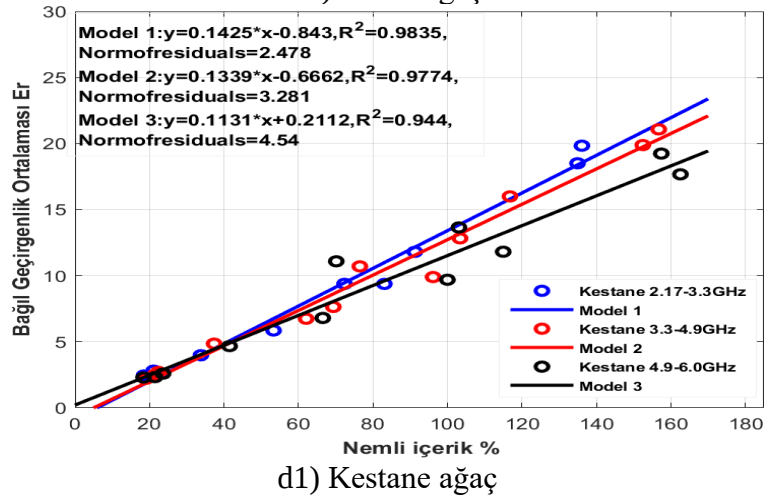
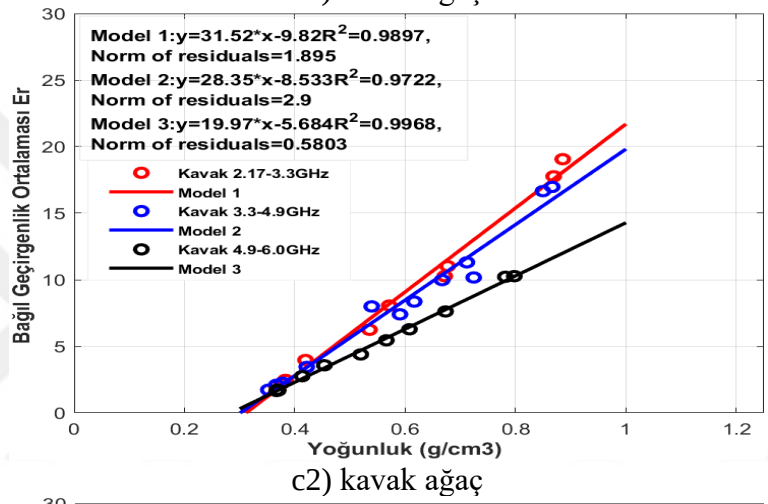
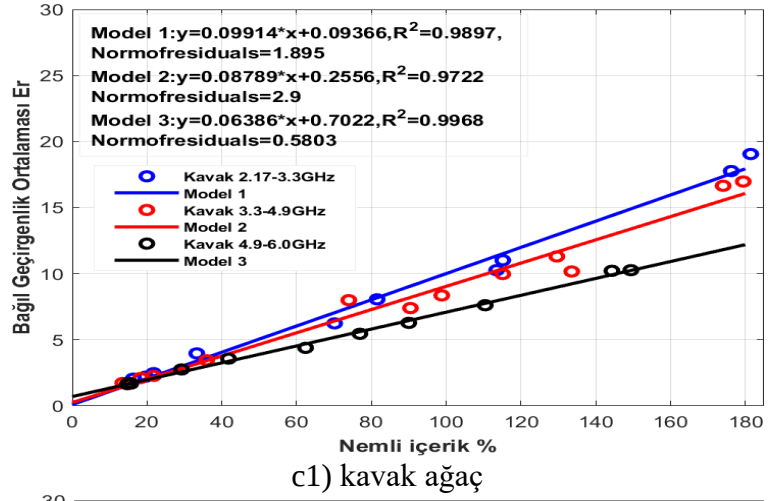
a2) Ceviz ağaç

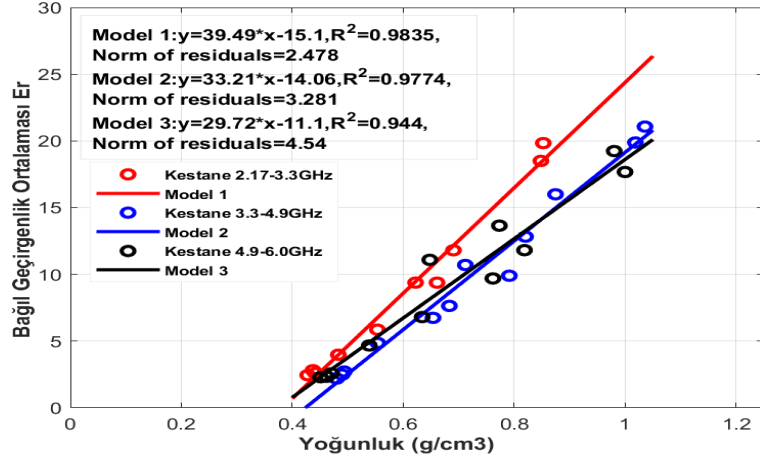


b1) Çınar ağaç

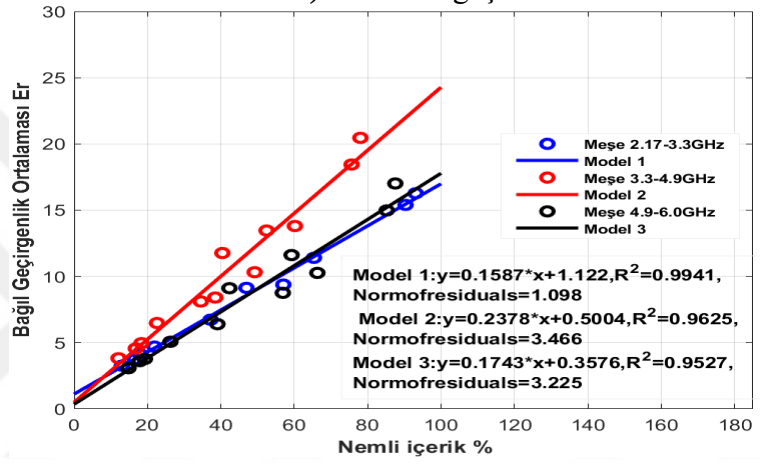


b2) Çınar ağaç

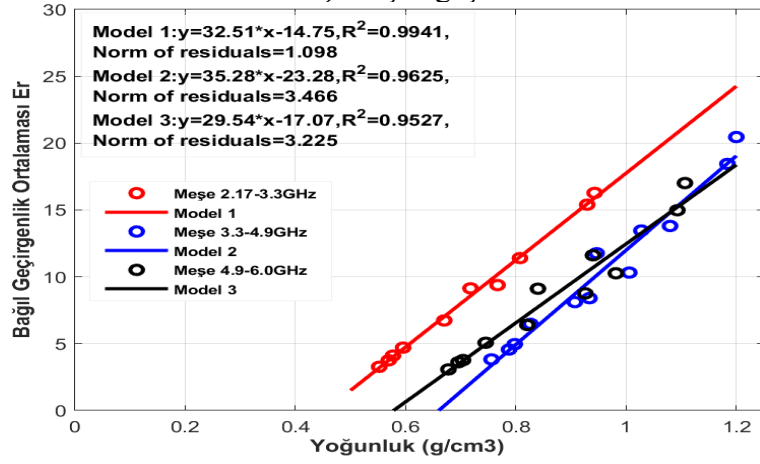




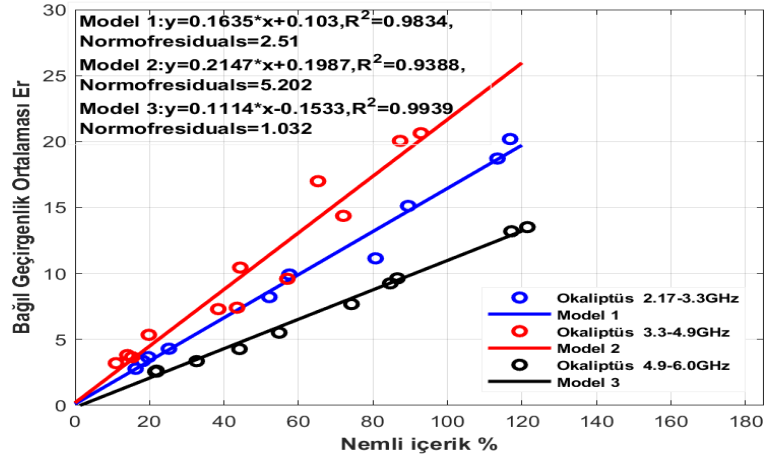
d2) Kestane ağaç



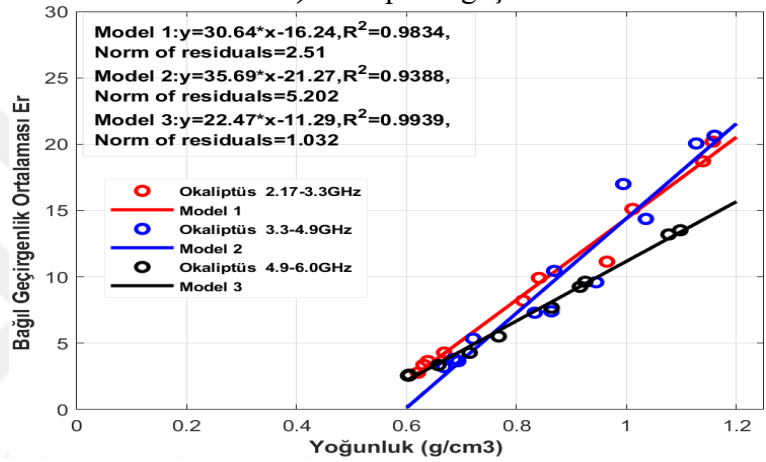
e1) Meşe ağaç



e2) Meşe ağaç



f1) Okalıptüs ağaç



f2) Okalıptüs ağaç

Şekil 4.7. Seçilmiş ağacı örneklerinin göreceli geçirgenlik modelleri

Şekil 4.8. her bir adaptör için bu ölçümlerde kullanılan üç frekans seviyesine sahip altı ampirik model gösterir (WR340 (mavi), WR229 (kırmızı) ve WR159 (siyah). Yapılan üç ampirik model, kübik formda sunuldu. Ahşap örneklerinin (ceviz, çınar, aspen, kestane, meşe ve okalıptüs) kayıp tanjant sonuçlarının nem içeriği farklılıklarına göre hesaplanması.

Tanjant kaybı ampirik modeller rasyonel formda oluşturulmuştur; Diğerleri kübik formdadır. Altı ağacı örneği (Ceviz, Sycamore, Aspen, Kestane, Meşe ve Okalıptüs) için Şekil 4.8'de inşa edilmiş ampirik modeller. Bu örneklerin her birinin, hem nem içeriği hem de yoğunluk varyasyonlarına göre incelenen her frekans bandına (2.17-3.3 GHz (mavi), 3.3-4.9 GHz (kırmızı) ve 4.9-6.0 GHz (siyah)) göre üç modeli vardır. Ham veri havuzu toplam 99,000'e sahiptir, her ahşap örneği 16.500 ham veriden oluşur ve Şekil 4.8'deki her bir işaret 500 ham veri ölçümünden oluşur.

Ceviz ağacı örneği Şekil 4.8.a1 grafik, nem açısından ampirik modelleri göstermektedir. Üretilen tüm ampirik modeller, kayıp Tanjant ortalama farkı ile aynı cevaba sahiptir. Bununla birlikte, üretilen ampirik modelin düzenlemesi, daha düşük ila daha yüksek frekans aralıklarından (2.17-3.3 GHz), (3.3-4.9 GHz) ve (4.9-6.0 GHz) frekans aralıkları

(mavi, kırmızı ve siyah ile işaretlenmiş modeller) sıralanır. sırasıyla renkler). Üretilen ampirik modelin ceviz numunesi sonuçlarına göre, maksimum kayıp Tanjant ortalaması daha düşük frekans aralıklarında. Aşağıdaki Şekil 4.8.a2'deki grafik, yoğunluk seviyesine göre ampirik modelleri daha önce olduğu gibi gösterirken, üretilen tüm ampirik modeller kayıp Tanjant ortalama farkı ile aynı yanıtı vardır. Üretilen ampirik modeller, nem içeriği farklılıkları ile verilen yanıtta farklı bir ark şekli üretmiştir, çünkü yanıt alanı ($0.45-1.1 \text{ g/cm}^3$) yoğunluk seviyesi ile sınırlıdır.

Sycamore ağacı örneği Şekil 4.8.b1'deki grafik, üretilen tüm ampirik modellerde nem seviyesine göre ampirik modelleri göstermektedir. Bununla birlikte, daha düşük nem içeriği seviyelerinde, görüldüğü gibi, üretilen ampirik modelin düzenlemesi daha düşük ila daha yüksek frekans aralıklarından ($2.17-3.3 \text{ GHz}$), ($3.3-4.9 \text{ GHz}$) ve ($4.9-6.0 \text{ GHz}$) frekans aralıkları sıralanır. (sırasıyla mavi, kırmızı ve siyah renklerle işaretlenmiş modeller). Bununla birlikte, % 30 nem içeriğinde, ampirik modeller ($0.2-0.25$) kayıp Tanjant ortalama seviyesi üzerinde bir çizgi şekillendirmeye başlar. Daha yüksek nem içeriğinde (% 80 nem içeriğinden sonra) görüldüğü gibi, daha yüksek frekans daha yüksek kayıp Tanjant ortalama seviyesine sahiptir ve diğer iki model üzerinde yükselir. Aşağıdaki Şekil 4.8.b2'deki grafik, yoğunluk seviyesine göre ampirik modelleri daha önce olduğu gibi gösterirken, üretilen tüm ampirik modeller, kayıp Tanjant ortalama farkı ile aynı tepkiye sahiptir. Bununla birlikte, $0.7 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ yoğunluk seviyesinde, ampirik modeller ortalama ($0.2-0.25$) kayıp Tanjant ortalama seviyesinden bir hat şekillendirmeye başlar. Üretilen ampirik modellerin kayıp Tanjant seviyesini $0.9 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ yoğunluk seviyesinde değiştirmeye başlar. Sycamore örneği, hem nem içeriği hem de yoğunluk seviyesine sahip düzgün bir tepki şekline sahiptir, maksimum kayıp Tanjant daha düşük frekanslarda, ancak hem nem içeriğinin hem de yoğunluğun ortasında bir dönüm noktası, daha yüksek frekans modelinin maksimum kayıp Tanjant ortalaması olmaya başladığında .

Kavak ağacı Örneği Şekil 4.8.c1'deki grafik, ampirik modelleri $2.17-3.3 \text{ GHz}$ 'de (mavi renkle işaretlenmiş modeller) nem içerik seviyesine göre göstermektedir. Üretilen ampirik model, 0.16 kayıp Tanjant ortalama seviyesinin üzerinde bir çizgi oluşturur. $3.3-4.9 \text{ GHz}$ frekans aralıklarında (kırmızı renkle işaretlenmiş modeller), üretilen model neredeyse 0.18 kayıp Tanjant ortalama seviyesine sahip bir çizgi oluşturur (% 100 nem içeriğinde, model bir zirveye sahip olmaya başlar). Bu arada, $4.9-6.0 \text{ GHz}$ frekans aralığında (siyah renkle işaretlenmiştir), üretilen ampirik model, 0.1 başlangıç kayıp Tanjant ortalama seviyesine sahip nem içerik aralığı üzerinde ark şeklinde bir yanıt oluşturmuştur. Aşağıdaki Şekil 4.8.c2'deki grafik, nem değiştirme seviyesiyle aynı yanıtı sahip olan yoğunluk seviyesine göre ampirik modelleri göstermektedir. ($2.17-3.3 \text{ GHz}$) (mavi renkle işaretlenmiş modeller), üretilen ampirik model 0.1 ila 0.18 kayıp Tanjant ortalama seviyesi başlayan bir çizgi oluşturur ve maksimum ulaştığında 0.16 kayıp Tanjant ortalama seviyesine iner. $3.3-4.9 \text{ GHz}$ frekans aralıklarında (kırmızı renkle işaretlenmiş modeller), üretilen model neredeyse 0.6 g/cm^3 yoğunluğunda 0.2 kayıp

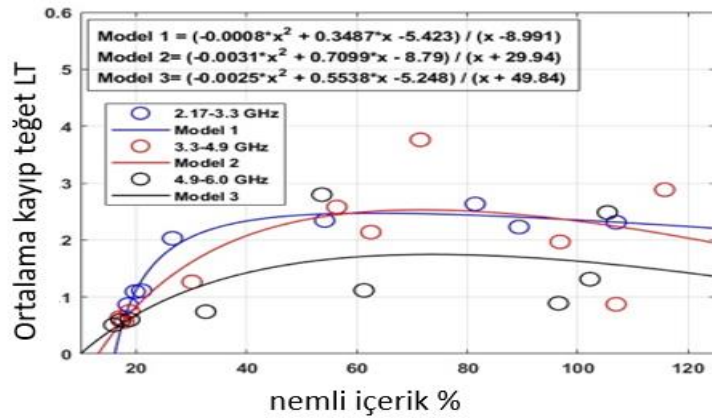
Tanjant ortalama seviyesine sahip bir ark oluşturur (model bir ark şekline sahip olmaya başlar). Bu arada, 4.9-6.0 GHz frekans aralığında (siyah renkle işaretlenmiştir), üretilen ampirik model, 0.3 maksimum kayıp Tanjant ortalama seviyesine sahip yoğunluk aralığında ark şeklindeki bir tepki oluşturmuştur. Oluşturulan modellerin yanıtlarına göre, görüldüğü gibi, aspen örnekleri daha yüksek frekans aralıklarında maksimum kayıp Tanjant sonuçlarına sahiptir.

Kestane ağacı örneği Şekil 4.8.d1'deki grafik, nem içerik seviyesine göre ampirik modelleri göstermektedir. Üretilen ampirik modeller, nem içeriği seviyeleri üzerinde harmonik yanıtın eşit bir dağılımını göstermiştir. 3.3-4.9 GHz frekans aralıklarında (kırmızı renkle işaretlenmiş modeller), üretilen model 0.3'ün üzerinde maksimum kayıp Tanjant ortalama seviyesine ulaşmıştır. 2.17-3.3 GHz'de (mavi ile işaretlenmiş modeller), üretilen ampirik model, kayıp Tanjant ortalama sonuçlarına göre ikinci oldu. Bu arada, 4.9-6.0 GHz frekans aralığında (siyah renkle işaretlenmiştir), üretilen ampirik model en düşük kayıp Tanjant ortalama sonuçlarına sahiptir. Aşağıdaki Şekil 4.8.d2'deki grafik, nem içerik değiştirme seviyesiyle aynı yanıtı sahip olan yoğunluk seviyesine göre ampirik modelleri göstermektedir. Üretilen ampirik modelin yanıtlarına göre, aşağıdaki grafikte gösterildiği gibi, kestane örneği hem nem içeriği hem de yoğunluk seviyeleri üzerinde düzgün bir harmonik dağılım tepkisine sahiptir ve daha düşük frekans aralıklarında maksimum kayıp Tanjant ortalama sonuçları vardır.

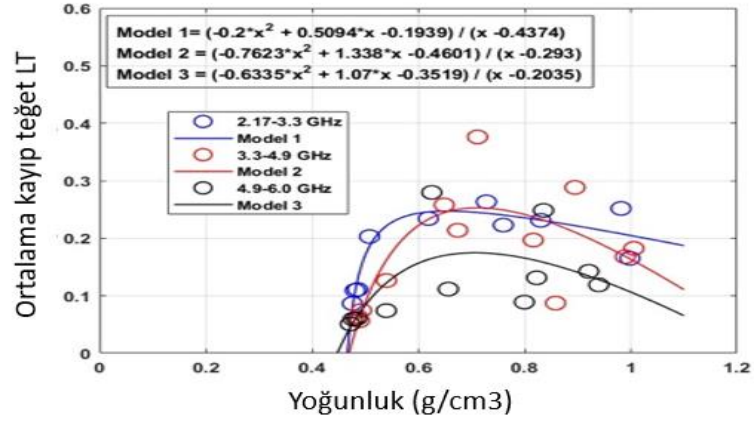
Şekil 4.8.e1'deki meşe ağacı numunesi grafiği, nem içerik seviyesine göre ampirik modelleri göstermektedir. Üretilen ampirik modeller, nem içeriği seviyeleri üzerinde harmonik bir yanıt göstermiştir. (2.17-3.3 GHz) (mavi renkle işaretlenmiş modeller), üretilen model, 0.25-0.15 kayıp Tanjant ortalama seviyesi olan küçük bir genlik varyasyonuna sahip harmonik bir şekle sahiptir. 3.3-4.9 GHz frekans aralıklarında (kırmızı renkle işaretlenmiş modeller), üretilen ampirik model, 0.3-0.09 kayıp Tanjant ortalama seviyesi arasındaki önceki modelden daha büyük bir genlik varyasyonuna sahip harmonik bir şekle sahiptir. Bu arada, 4.9-6.0 GHz frekans aralığında (siyah bir renkle işaretlenmiştir), üretilen ampirik model, daha önce bahsedilen modellerle karşılaştırıldığında ters harmonik tepki göstermiştir ve 0.3 ve 0.1 kayıp Tanjant ortalama seviyeleri arasında bir varyasyon ile. Aşağıdaki Şekil 4.18.E2'deki grafik, nem içerik değiştirme seviyesiyle aynı yanıtı sahip olan yoğunluk seviyesine göre ampirik modelleri göstermektedir. Bununla birlikte, üretilen ampirik modeller arasında aşağıdaki gibi ifade edilebilen bir faz kayması vardır: (2.17-3.3 GHz) (mavi renkle işaretlenmiş modeller), üretilen ampirik model 0.5 ve 1 (g/cm^3) arasında bir yoğunluk varyasyonuna sahiptir, (3.3-4.9 GHz) frekans aralıklarında (kırmızı renkle işaretlenmiş modeller), üretilen model 0.65 ve 1.2 (g/cm^3) arasında bir yoğunluk varyasyonuna sahiptir ve (4.9-6.0 GHz) frekans aralıklarında (işaretlenmiştir siyah renkle), üretilen ampirik model 0.65 ila 1.1 (g/cm^3) arasında yoğunluk varyasyonuna sahiptir. Üretilen ampirik modelin yanıtlarına göre, aşağıdaki grafikte gösterildiği gibi, meşe örneği hem nem içeriği hem de yoğunluk seviyeleri üzerinde harmonik dağılım tepkisine sahiptir, ancak belirli bir frekans aralığına

göre farklılıklar vardır. Bu arada, daha düşük frekans aralıklarında maksimum kayıp Tanjant ortalama sonuçları elde edilebilir.

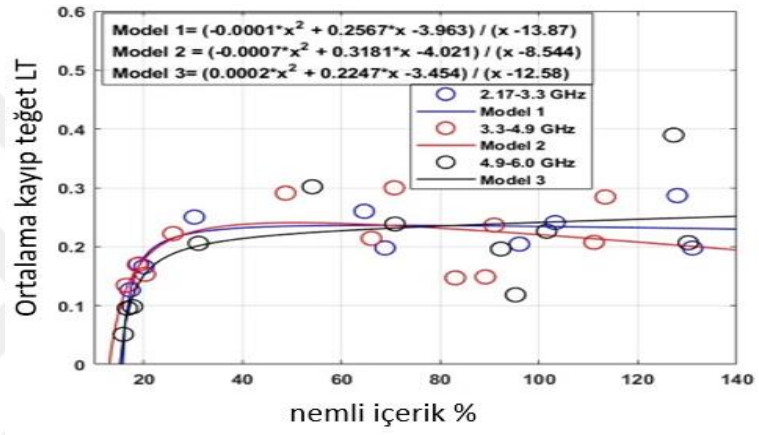
Şekil 4.8.f1'deki okalıptüs ağacı örneği grafiği, nem içerik seviyesine göre ampirik modelleri göstermektedir. Üretilen her ampirik model, nem içerik seviyelerine farklı bir yanıt göstermiştir. (2.17-3.3 GHz) (mavi renkle işaretlenmiş modeller), üretilen model 0.2 kayıp Tanjant ortalama seviyesinden bir çizgi tepkisine sahiptir. (3.3-4.9 GHz) frekans aralıklarında (kırmızı renkle işaretlenmiş modeller), üretilen ampirik model, 0.35 maksimum kayıp Tanjant ortalama sonuçları ile nem içerik seviyesi değişimi (%60-80) arasında küçük bir zirveye sahip bir ark şekline sahiptir (arc şekli nedeni). Bu arada, 4.9-6.0 GHz frekans aralığında (siyah renkle işaretlenmiştir), üretilen ampirik model, kayıp Tanjant ortalama varyasyonunun %20 nem içeriğinde 0.1 ve daha yüksek nem içeriği seviyesinde 0.25 arasında olduğu harmonik bir tepki göstermiştir. Aşağıdaki Şekil 4.8.f2'deki grafik, nem içerik değiştirme seviyesiyle aynı yanıtı sahip olan yoğunluk seviyesine göre ampirik modelleri göstermektedir. Bununla birlikte, yoğunluk seviyesi sınırı varyasyonu nedeniyle küçük bir fark meydana gelir. (2.17-3.3 GHz) (mavi renkle işaretlenmiş modeller) olarak, üretilen model (0.19-0.25) kayıp Tanjant ortalama seviyesi arasındaki varyasyon ile küçük bir genlik harmonik yanıtı vardır. 3.3-4.9 GHz frekans aralıklarında (kırmızı renkle işaretlenmiş modeller), üretilen ampirik model, 1 yoğunluk seviyesinde 0.35 maksimum kayıp Tanjant ortalama sonuçları (arc şekli nedeni) ile ark şekli tepkisine sahiptir. Bu arada, [4.9–6.0 GHz] frekans aralığında (siyah renkle işaretlenmiştir), oluşturulan ampirik model, kayıp Tanjant ortalama değişiminin [0.1-0.25] arasında olduğu ilk düşük frekans modeliyle karşılaştırıldığında ters bir harmonik yanıt göstermiştir. [1.1–0.6 g/cm³] arasındaki yoğunluk seviyesinde. Oluşturulan ampirik modelin yanıtlarına göre, aşağıdaki grafikte gösterildiği gibi, Okalıptüs örnekleri her frekans aralığı için farklı yanıtlara sahipken, daha düşük frekans aralıklarında maksimum kayıp Tanjant ortalama sonuçları elde edilebilmektedir.



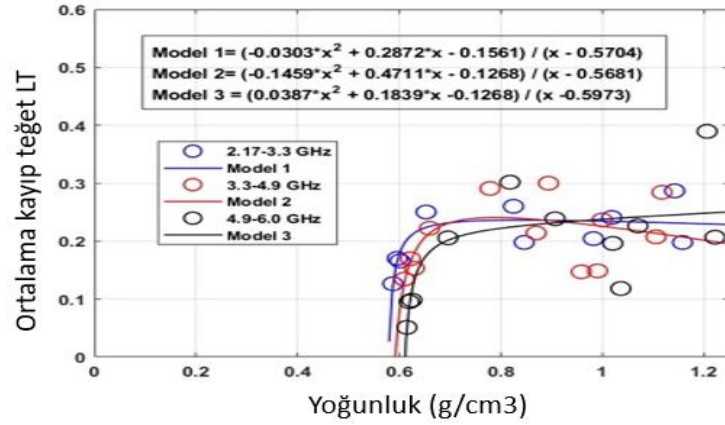
a1) Ceviz ağaç



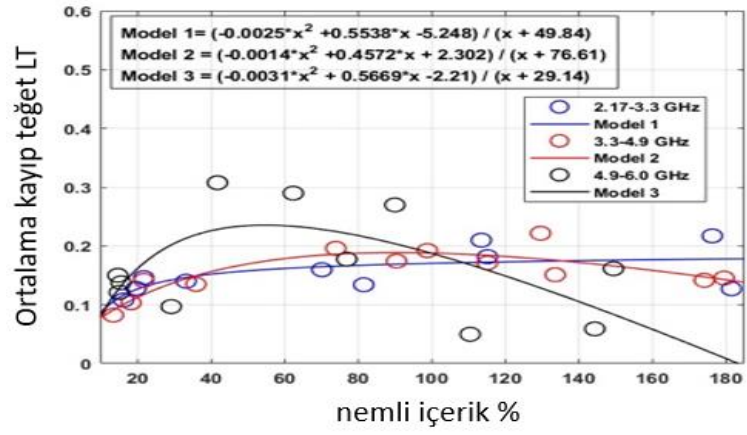
a2) Ceviz ağaç



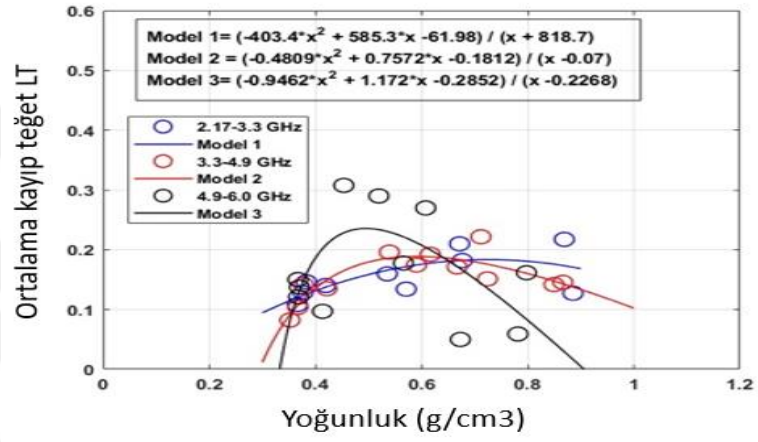
b1) Çınar ağaç



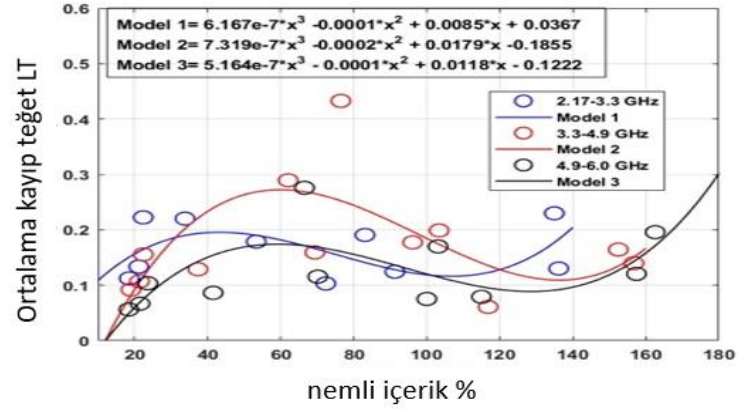
b2) Çınar ağaç



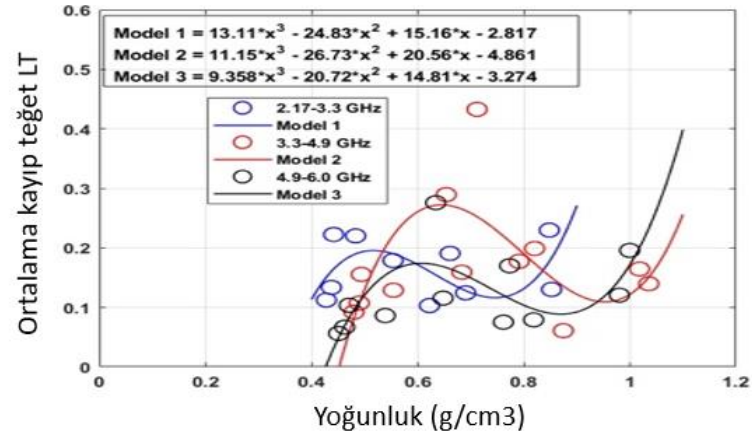
c1) kavak ağaç



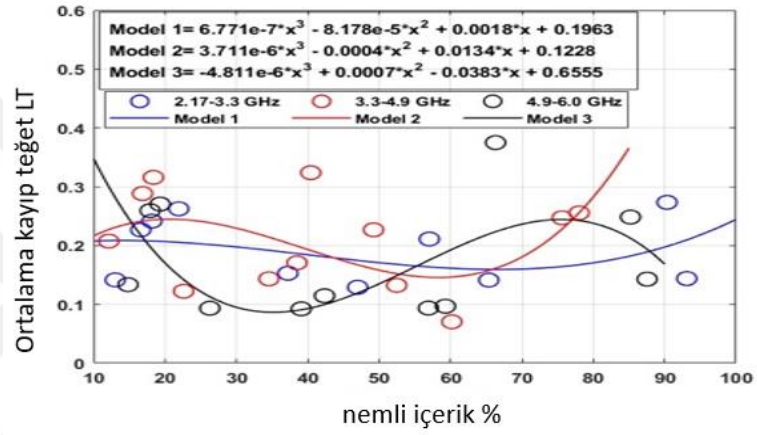
c2) kavak ağaç



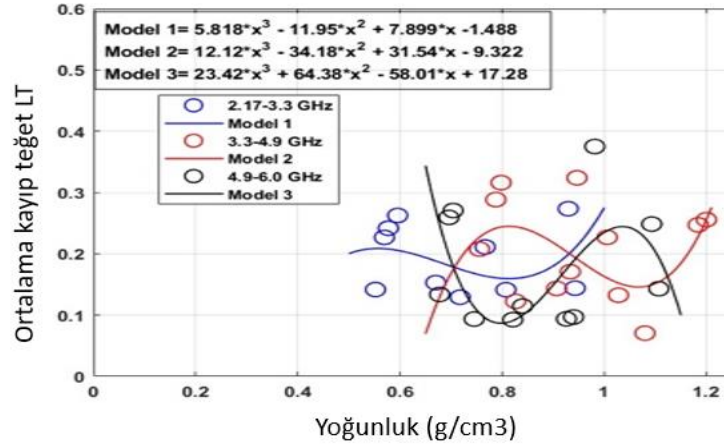
d1) Kestane ağaç



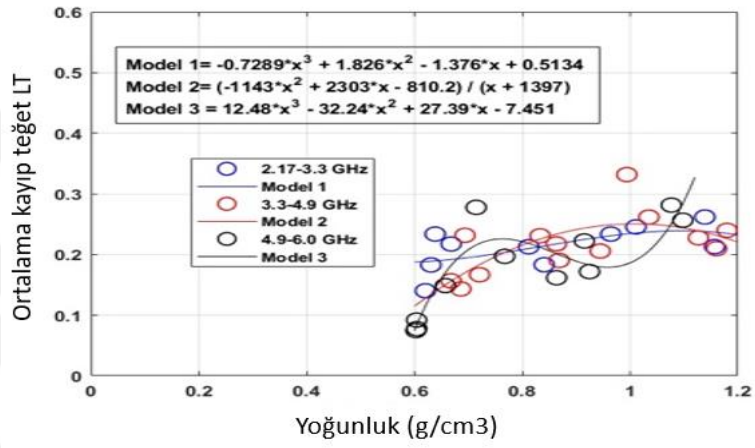
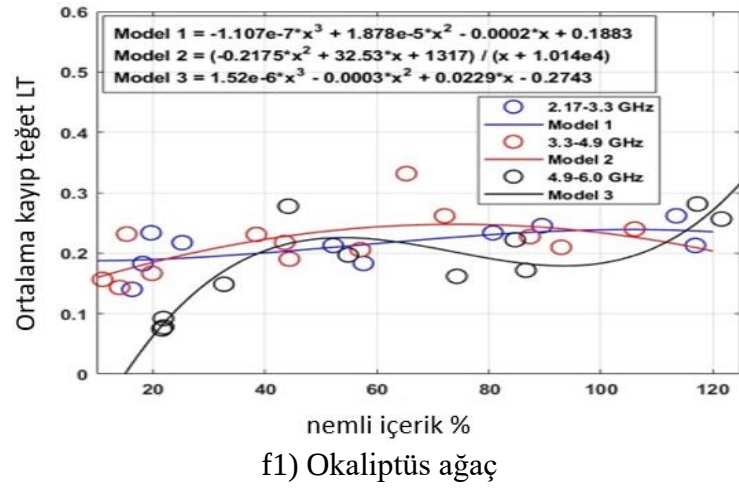
d2) Kestane ağaç



e1) Meşe ağaç



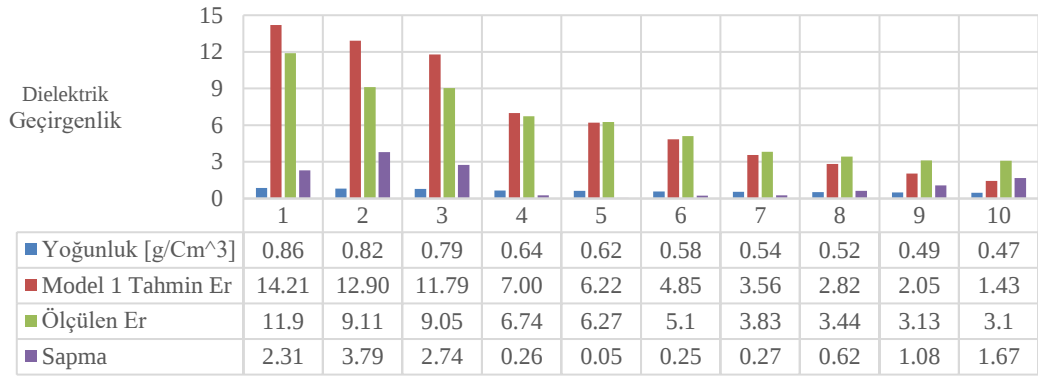
e2) Meşe ağaç



Şekil 4.8. Seçilmiş sert ağaç örneklerinin kayıp tanjant modelleri

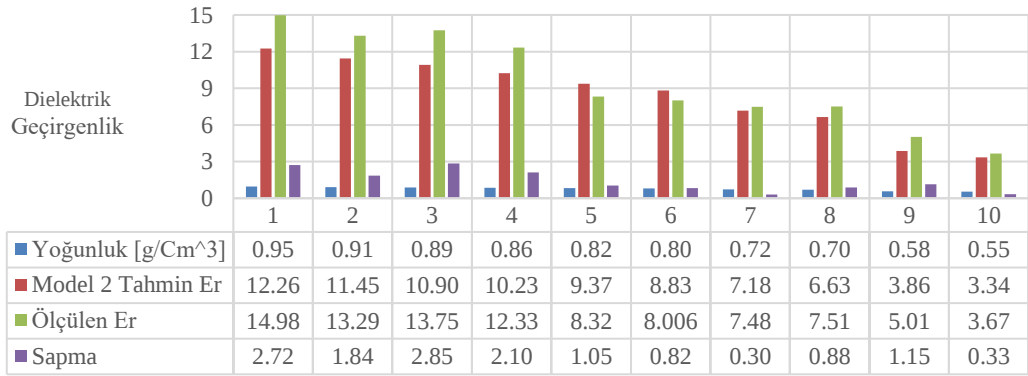
4.2.3. Sert Ağaç Örneklerinin Ampirik Modellerinin Değerlendirilmesi

Bu bölüm, farklı yoğunluklara göre sert ağaç numunelerinin dielektrik özelliklerini tahmin etmede ampirik modelin performansına ilişkin bir açıklama sunmaktadır. Ancak yapılacak bu test için farklı kesim açılarında ve farklı kalınlık ölçülerinde yeni sert ağaç numuneleri hazırlanmıştır. Bu nedenle temin edilen numuneler yoğunluk hesabı ve s-parametre ölçümlerinden önce 72 saat süreyle aynı suya batırma işlemine tabi tutuldu. Daha fazla model performans değerlendirmesi için farklı yoğunluk seviyelerinin elde edilebilme olasılığı göz önünde bulundurularak model değerlendirmesi için toplam 10 farklı yoğunluk seviyesi dikkate alınmıştır. Bu arada, önceden oluşturulan deneyden s-parametreleri toplandıktan sonra, ilk dielektrik özellikler MATLAB kodu kullanılarak hesaplandı ve ikinci adım, yoğunluk koşullarına göre önceden hazırlanmış ampirik model kullanılarak dielektrik özelliklerin elde edilmesi idi. Oluşturulan model kullanılırken hesaplanan dielektrik özellikler ile tahmin edilen dielektrik özellikler arasındaki değerlendirme Şekil 4.9'de gösterilmektedir. Her iki deneyimden kaynaklanan bir ölçüm hatası birikimi olduğunu unutmayın; bu nedenle, daha önce dikkate alınmış olan tahmin edilen sonuçların bazılarında önemli küçük farklılıklar vardır. Hesaplanan ve tahmin edilen sonuçlar arasındaki sapma, mantıksal bir sonuç olan Şekil 4.9'de görüldüğü gibi kaydedilmiştir. İlk sert ağaç örnek setlerinden oluşturulan ampirik modellerin biraz daha düşük bir minimum hata oranına sahip olduğuna dikkat edin; bu oran şu şekilde hesaplanmıştır ve kısaca bahsedilecektir: ceviz ağacı model 1'in $\pm \%5$ hatası vardır, model 2'nin $\pm \%6$ hatası vardır, ve model 3'ün $\pm \%5$ hatası vardır; çınar ağacı model 1'in $\pm \%3$, model 2'nin $\pm \%2$, model 3'ün $\pm \%8$ hataya sahip olduğu; kavak ağacı model 1'in $\pm \%2$ hatası, model 2'nin $\pm \%3$ hatası ve model 3'ün $\pm \%2$ hatası vardır; kestane ağacı model 1 $\pm \%2$, model 2 $\pm \%3$, model 3 $\pm \%2$ hataya sahiptir; meşe ağacı model 1'in $\pm \%2$ hatası, model 2'nin $\pm \%4$ hatası ve model 3'ün $\pm \%5$ hatası vardır; ve son olarak okaliptüs ağacı model 1'de $\pm \%2$, model 2'de $\pm \%7$ ve model 3'te $\pm \%2$ hata bulunmaktadır. Model 1, 2 ve 3'ün [sırasıyla 2.17–3.3 GHz, 3.3–4.9 GHz ve 4.9–6.0 GHz] anlamına geldiğini unutmayın. Ayrıca her iki ölçüm kampanyasında da sistem hatası olarak kabul edilebilecek bazı kümülatif hatalar var. Ancak endüstriyel uygulamalarda, ahşap malzemelerin etrafındaki bağıl nem göz önünde bulundurulduğunda, pratik kullanım için makul miktardaki nem ve yoğunluk seviyelerinin, nem ve yoğunluk seviyesinin denge noktası civarında olması dikkate alınmıştır.



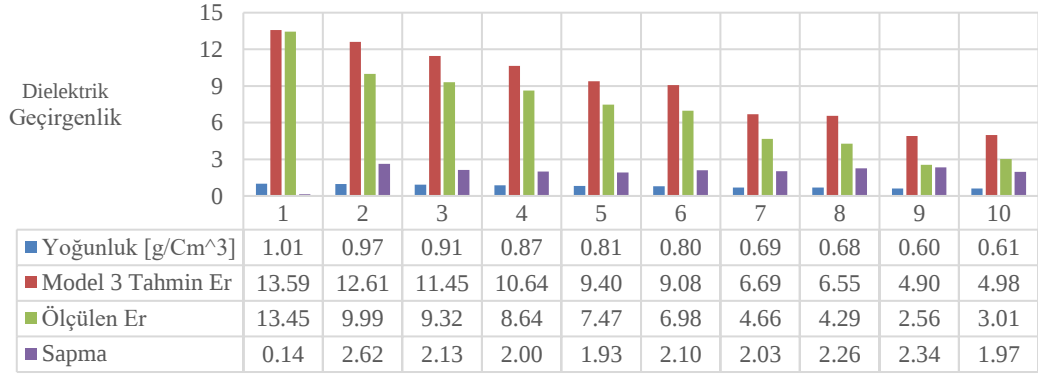
Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

1A) Ceviz Ağacı [2.17-3.3GHz]



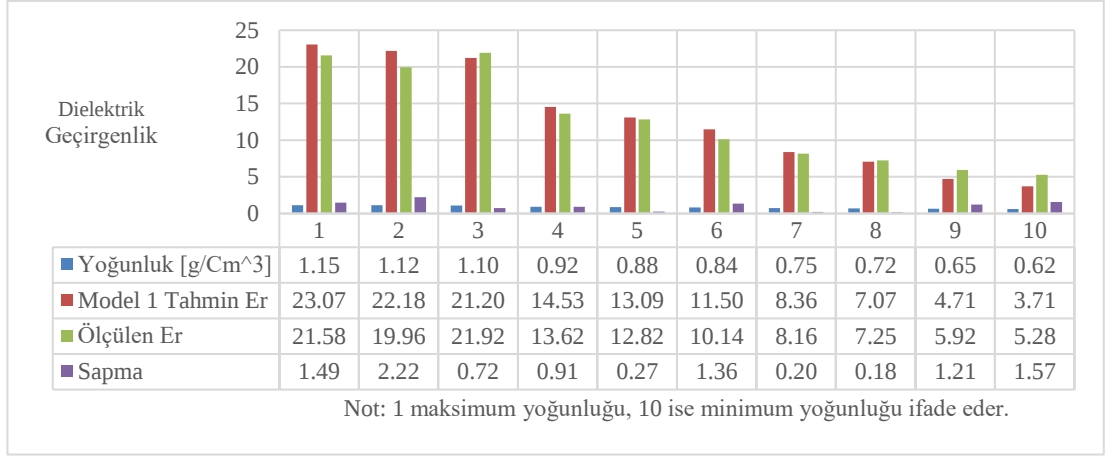
Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

2A) Ceviz Ağacı [3.3-4.9 GHz]

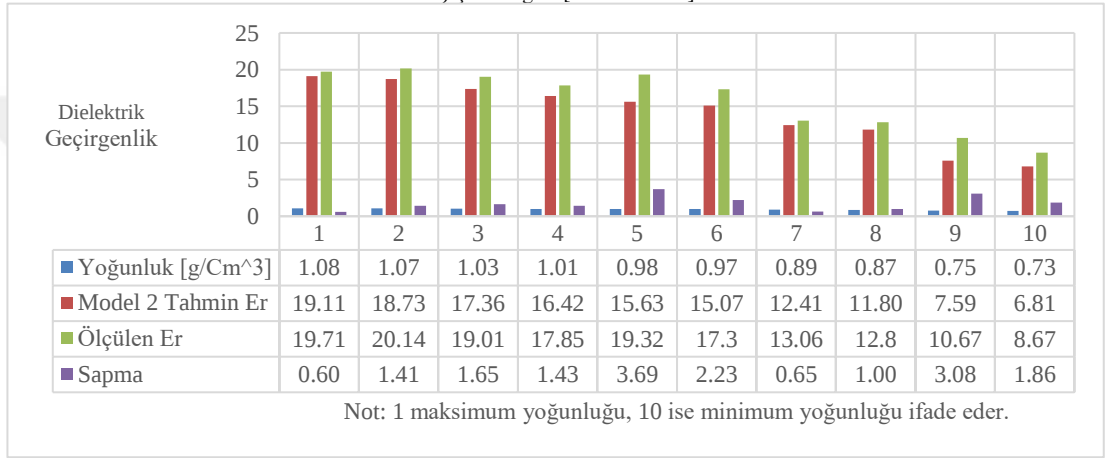


Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

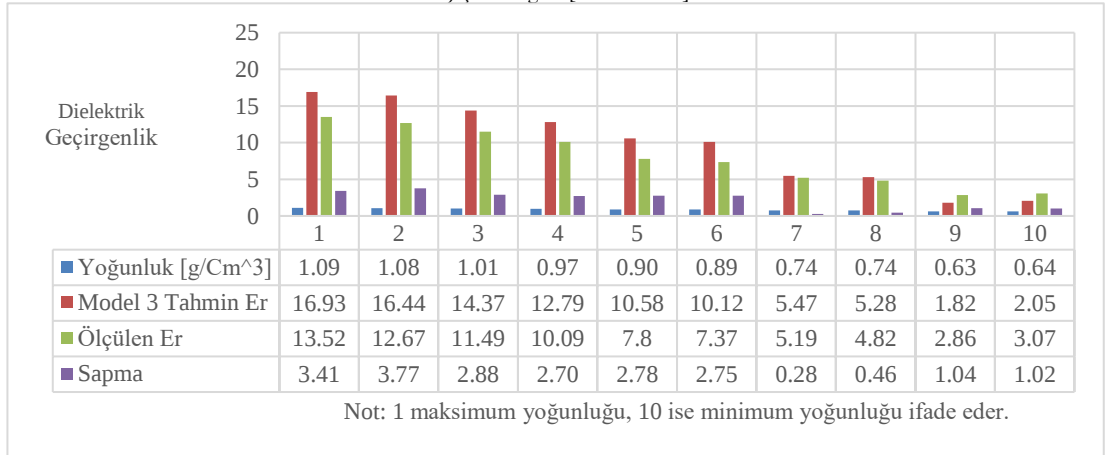
3A) Ceviz Ağacı [4.9-7.1 GHz]



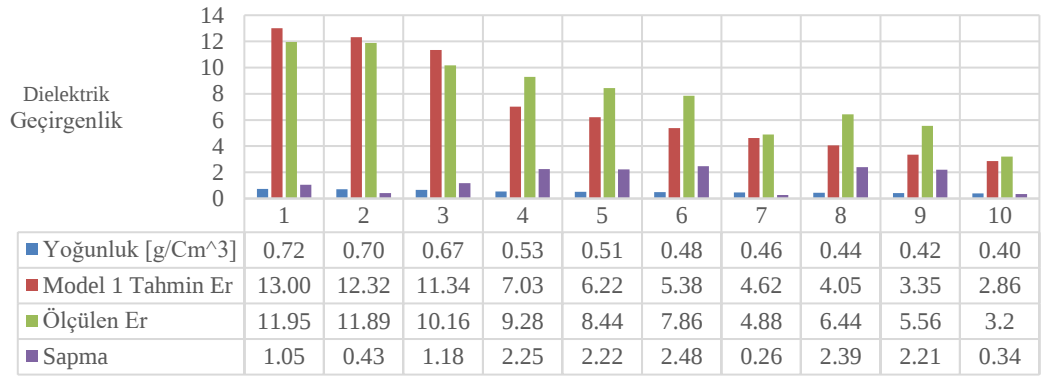
1B) Çınar Ağacı [2.17-3.3 GHz]



2B) Çınar Ağacı [3.3-4.9 GHz]



3B) Çınar Wood [4.9-7.1 GHz]



Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

1C) Kavak Ağacı [2.17-3.3 GHz]



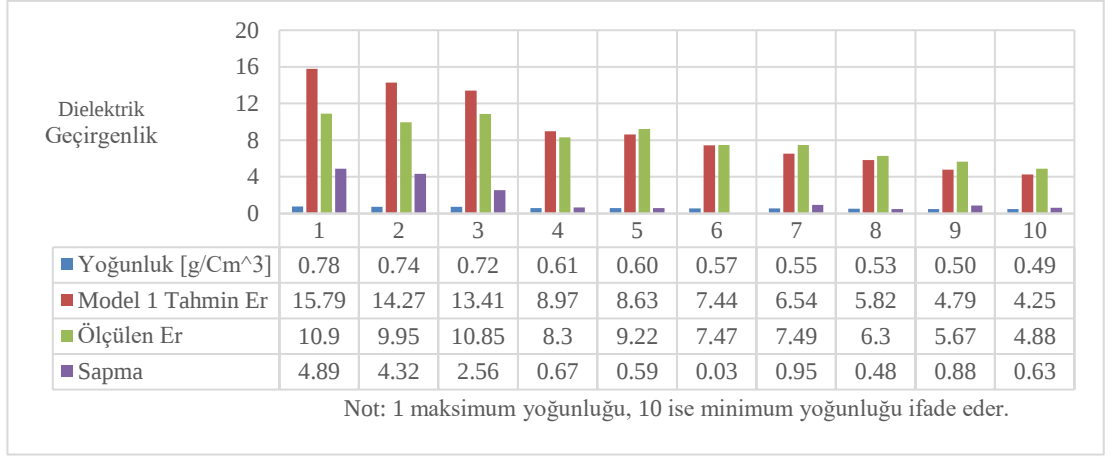
Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

3C) Kavak Ağacı [3.3-4.9 GHz]

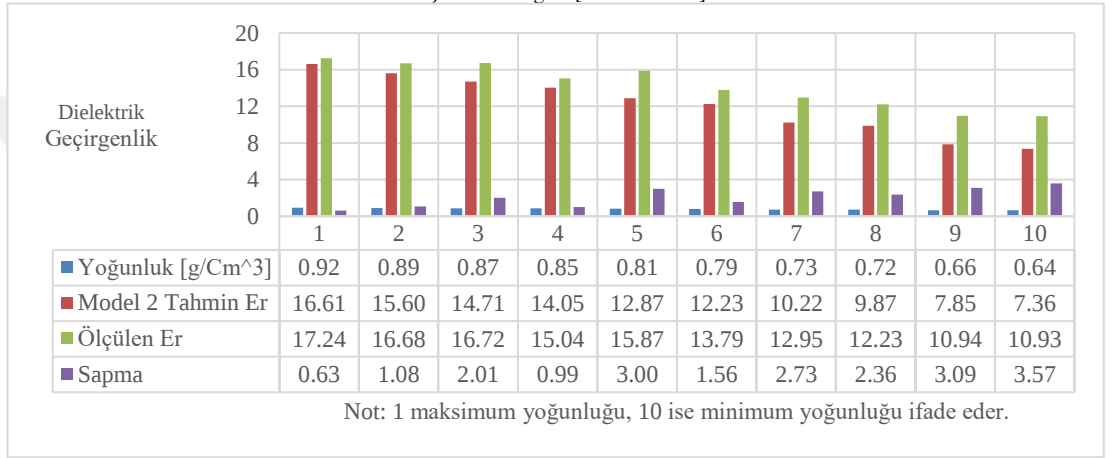


Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

3C) Kavak Ağacı [4.9-7.1 GHz]



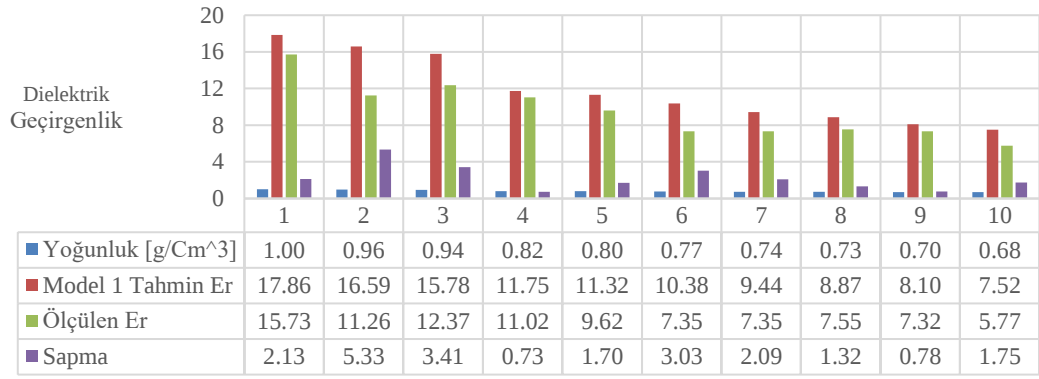
1D) Kestane Ağacı [2.17-3.3 GHz]



2D) Kestane Ağacı [3.3-4.9 GHz]

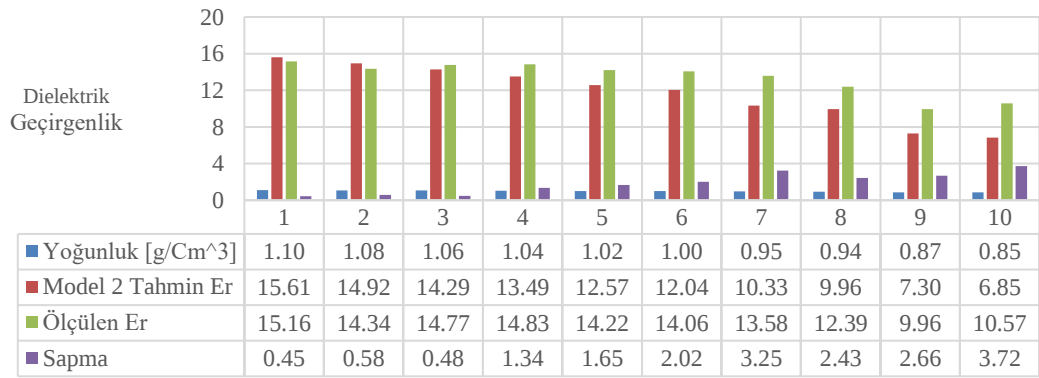


3D) Kestane Ağacı [4.9-7.1 GHz]



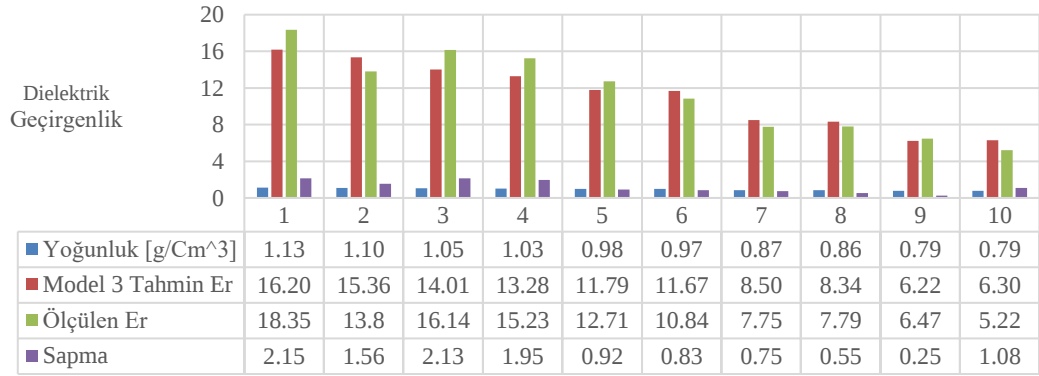
Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

1E) Meşe Ağacı [2.17-3.3 GHz]



Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

2E) Meşe Ağacı [3.3-4.9 GHz]



Not: 1 maksimum yoğunluğu, 10 ise minimum yoğunluğu ifade eder.

3E) Meşe Ağacı [4.9-7.1 GHz]



Şekil 4.9. Sert ağaç örnekleri deneysel modellerin değerlendirilmesi

5. TARTIŞMA

Bu araştırma, endüstri alanında yaygın olarak kullanılan bir doğal kaynak malzemesine odaklanmıştır. Bu çalışmada doğal ahşap malzeme seçimi yapılmış olup, doğal malzeme olarak da farklı nem içeriğinin ahşap malzemenin elektriksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Orman endüstrisi alanında yaygın olarak kullanılan ağaç örneklerinin elektriksel özelliklerinin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada seçilen doğal ahşap örnekleri, doğal ahşap familyasının iki farklı sınıfına ait olan toplam dokuz örnektir. Seçilen yumuşak ağaç örneği üç ağaç türünden (Sedir, Ardıç ve Çam) oluşurken, seçilen sert ağaç örneği altı ağaç türünden (Ceviz, Çınar, Titrek kavak, Kestane, Meşe ve Okaliptüs) oluşur. Seçilen ahşap numunesi, Akdeniz bölgesindeki endüstri uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ahşap malzemeye göre özenle seçilmiştir. Ancak numuneler, ölçüm kampanyamızda kullanılacak dalga kılavuzu adaptörlerine uygun, mükemmel boyutlu kesim ve [4-6 mm] kalınlıkta, ölçüm kampanyamıza uygun olacak şekilde özenle hazırlandı. İncelenen frekans aralığı, üç dalga kılavuzu adaptörü WR340, WR229 ve WR159 (sırasıyla 2.17 ve 3.3 GHz, 3.3 ve 4.9 GHz ve 4.9 ve 6.0 GHz) kullanılarak 2.17 ila 6.0 GHz arasındadır. Ancak bağıl nemin doğal malzeme olarak ahşap numuneleri üzerinde büyük bir etkisi olması ve numuneleri çevreleyen bağıl nem miktarına göre nem içeriğinin değişmesine neden olması nedeniyle bu çalışmada havanın bağıl nemi dikkate alınmıştır. Bu nedenle, ahşap numunelerinin çeşitli nem ve yoğunluk seviyelerindeki davranışlarını analiz etmek için nem içeriği ve yoğunluk hesaplamaları dikkatlice hesaplanmıştır. Ahşap numunesinin emdiği su miktarı dikkatlice gözlemlendi ve bu da ahşap numunesinin farklı su emme kapasitesinin daha iyi anlaşılmasına yol açtı. Ancak araştırma, ahşap numunelerinin nem içeriğinin %200'e kadar çıkabildiğini gösteriyor ki bu da ahşap liflerinin içindeki su miktarıyla doğrudan alakalıdır. S parametresi için elde edilen ham veriler, bir vektör ağ analizörü (VNA) ile tahribatsız bir ölçüm yöntemi kullanılarak elde edilen toplam 148.500 ham veriden oluşmaktadır. Yumuşak ağaç örneklerinin ham veri topladığı yerde toplam 49.500, sert ağaç örneklerinin ise toplam 99.000 ham veri koleksiyonu vardır ve her ölçüm kampanyası 500 ham veriden oluşur. Ayrıca, toplanan S parametresi ham verileri, bu çalışmanın yönteminde, seçilen doğal ahşap örneklerinin farklı nem içeriği ve yoğunluk seviyelerine göre göreceli geçirgenlik ve kayıp tanjant sonuçlarını belirlemek için kullanılmıştır. Farklı nem içeriği ve yoğunluk seviyelerine göre hem bağıl geçirgenlik hem de kayıp tanjant ilişkisine ilişkin elde edilen bu sonuçlar, bu çalışmayı bakış açısına getirirken, malzeme içindeki nem içeriği arttığında hem bağıl geçirgenlik hem de kayıp tanjant sonuçlarının arttığı görülmektedir. Ancak ahşap malzeme ile nem içeriği arasındaki daha önce bahsedilen bu ilişkiyi ifade etmek için ampirik modeller oluşturulmuştur. Yumuşak ağaç numunelerinin ampirik modeller oluşturduğu, hem nem içeriği hem de yoğunluk bakımından hem bağıl geçirgenlik hem de kayıp tanjantı için toplam 36 model mevcutken, sert ağaç numuneleri toplam 72 model ile ampirik modeller oluşturdu. Her iki ağaç numunesi sınıfına ait oluşturulan ampirik modeller, elde edilen dielektrik özellikler sonuçları ile nem içeriği farklılıkları (R^2 eşit 0,9) arasındaki bu

ilişkiyi ifade etmek için uygun sonuçlara sahiptir. Bu arada, numunenin ampirik modellerini farklı nem içeriği seviyesinde, belirli bir frekans aralığında, farklı durumlarda gözlemlerken, her bir ahşap numunesinin yaşadığı davranış farklılıkları, bize ahşabın doğası hakkında çok daha net bir resim verir. Ayrıca oluşturulan bu ampirik modellerin doğruluğu, belirli bir ahşabın elektriksel özelliklerinin, fiziksel boyutlar ve kütle ile ilgili bilgilerle birlikte tahmin edilmesine olanak sağlayacaktır. Kısaca önerilen modeller herhangi bir ek S-parametre ölçümü (VNA kullanımı) gerektirmez.



6. SONUÇLAR

Oluşturulan ampirik modeller ile bu çalışmanın amacına başarılı bir şekilde yaklaşılmıştır. Doğal ahşabın farklı nem içeriği seviyelerine verdiği tepkiler hakkında en önemli bilgiyi sağlar. Bu çalışmada seçilen doğal ahşap örnekleri üzerinden sunulan sonuçlar, endüstri uygulamalarında yaygın olarak kullanılan doğal ahşap örneklerinin farklı örneklerinin incelenmesinin ne kadar fayda sağlayacağını ortaya koymaktadır. Son yıllarda birçok endüstri doğal kaynakları hammadde olarak kullanmaya yöneliyor. Dolayısıyla bu durum endüstride yaygın olarak kullanılan diğer doğal ahşap malzemelerin araştırılmasına yönelik fırsatlar yaratmaktadır. Ayrıca ahşap malzemenin yapısındaki budak ve kusurların etkisinin daha fazla araştırılarak araştırılması, ahşabın doğal maddelerinin farklı davranışlarının daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Ahşabın üretim malzemesi olarak kullanılmasıyla sürdürülebilir elektronik, elektronik endüstrisinde daha faydalı bir fırsata yol açacaktır. Son yıllarda doğal ahşap malzemelerden yapılmış merceklelerin kullanıldığı mikrodalga uygulamaları üzerine bazı araştırmalar yapılmaktadır. Bu tür uygulamalarda bu çalışmada sunulan sonuçlarla büyük bir fırsat bulunmaktadır. Bu çalışma, farklı nem ve yoğunluk yanıtlarına sahip dokuz farklı ahşap numunesi ile gerçekleştirildiğinden ve sunulan dielektrik sonuçlarından yararlanıldığından, endüstriyel mikrodalga uygulamalarında büyük farklılıklar olacaktır. Son dakika haber: bilim insanları Linköping Üniversitesi'nde dünyanın ilk ahşap transistörünü geliştirdi. 5 Mayıs 2023, bu tür bilim çığır açıcı haberlerle, talebin ne kadar kritik ve önemli bir şekilde doğal gibi hammaddelere odaklandığını ortaya koyuyor. Ayrıca ahşap numuneleri kullanan endüstriler, farklı amaçlarla kimyasal maddelerle işlem görmektedir. Bu kimyasalların bozulmadan korunması veya böcek kovucu (haşere kontrolü) amacıyla kullanılması gibi durumlar. Bu da araştırmacıların, bu tür kimyasal maddelerin üretilen ahşap malzemenin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmasına ve belirlemesine kapı açıyor.

7. KAYNAKLAR

- Balanis, C. A. 2012. *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons.
- Bini, M, D Andreuccetti, A Ignesti, R Olmi, S Priori, ve R Vanni. 1997b. «A portable microwave system for woodworm disinfestation of artistic painted boards.» *Microwave Power and Electromagnet Energy* 32: 180-187.
- Bossou, O. V., J. R. Mosig, ve J. F. Zurcher. 2010. «Dielectric measurements of tropical wood.» *Measurement* 43 (3): 400-405.
- Cai, Yu, Gao Zhenyu, Imon Chakraborty, Simon Briceno, ve Dimitri Mavris. 2018. «System-Level Assessment of Active Flow Control for Commercial Aircraft High-Lift Devices.» *Journal of Aircraft* 55 (3): 1200-1216.
- Cheng, D. K. 1993. *Fundamentals of engineering electromagnetics*.
- Daian, G, A. Taube, A. Birnboim, M. Daian, ve Y. Sharmkov. 2006. «Modeling the dielectric properties of wood.» *Wood science and technology* 40 (3): 237-246.
- Dobson, M.C., R. DeLaSierra, ve N. Christensen. 1991. «Spatial and temporal variation of the microwave dielectric properties of loblolly pine trunks.» *Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '91*. Espoo. 1107-1110.
- Dogan, Habib, Ibrahim Bahadır Basyigit, ve Abdullah Genc. 2020. «Determination and modelling of dielectric properties of the cherry leaves of varying moisture content over 3.30-7.05 GHz frequency range.» *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 54 (3): 254-270.
- Duchow, K. J., ve R. A. Gerhardt. 1996. «Dielectric characterization of wood and wood infiltrated with ceramic precursors.» *Materials Science and Engineering:C* 4 (2): 125-131.
- Eckelman, C. A. 2019. *Forestry & Natural Resources*. Forestry & Natural Resources, purdu university, west lafayette in 47907: Department of Forestry and Natural Resources.
- Fang, Zhiqiang, Huilong Zhang, Shuoyang Qiu, Yudi Kuang, Jie Zhou, Yu Lan, Chuan Sun, Guanhui Li, Shaoqin Gong, and Zhenqiang Ma. 2021. "Versatile Wood Cellulose for Biodegradable Electronics." *Advanced Materials Technologies* (Wiley) 6: 1-18.
- Forrer, J. B., ve J. W. Funck. 1998. «Dielectric properties of defects on wood surfaces.» *Holz als Roh-und Werkstoff* 56 (1): 25-29.

- Fu, Qiliang, Yi Chen, ve Mathias Sorieul. 2020. «Wood-Based Flexible Electronics.» *ACS NANO* 14 (3): 3528-3538.
- Genç, Abdullah, Ibrahim Bahadır Basyigit, Habib Dogan, ve Bektas Colak. 2021. «Measuring and modelling the complex-permittivity of hemp plant (*Cannabis Sativa*) at X band for microwave remote sensing.» *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 35 (14): 1909-1921.
- Gerke, RD, AA Shapiro, ve DM Peters. 2003. «Use of plastic commercial off-the-shelf (COTS) microcircuits for space applications.» *International Electronic Packaging Technical Conference*. California Institute of Technology National Aeronautics & Space Administration (NASA) NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). 801-808.
- Helhel, Selcuk. 2019. *Microwave Techniques (in Turkish)*. 1. Istanbul: Nobel.
- Hongli, Zhu, Wei Luo, Peter N Chiesielski, Zhiqiang Fang, J.Y. Zhu, Gunnar Henrikson, Michael Himmel, ve Hu Liangbing. 2016. «Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications.» *Chemical Reviews* 116 (16): 9305-9374.
- Hossain, M.D., ve M.R. Rahim. 1984. «). High frequency dielectric constant of dry wood. *Journal of materials science letters*.» *Journal of material science letter* 3 (6): 521-522.
- James, W. L. 1975. *Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency, moisture content, and grain orientation*. Cilt 245. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Kabir, M. F., W. M. Daud, Khalid K. B., ve H. A. Sidek. 2001. «Temperature dependence of the dielectric properties of rubber wood.» *Wood and Fiber science* 233-238.
- Kocakusak, A., B., Colak, ve S. Helhel. 2016. «Frequency dependent complex dielectric permittivity of rubber and magnolia leaves and leaf water content relation.» *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 50 (4): 294-307.
- Kokkonen, M., M. Nelo, H. Liimatainen, J. Ukkola, N. Tervo, S., ... Myllymäki, ve H. (). Jantunen. 2022. «Wood-based composite materials for ultralight lens antennas in 6G systems.» *Materials Advances* 3 (3): 1687-1694.
- Kol, Hamiyet Şahin, ve İlker Yalçın. 2015. «Predicting Wood Strength using Dielectric Parameters.» *Bioresources* 10 (4): 6496-6511.
- Koubaa, A, P Perré, R. M. Hutcheon, ve J Lessard. 2008. «Complex dielectric properties of the sapwood of aspen, white birch, yellow birch, and sugar maple.» *Drying Technology* 26 (5): 568-578.

- Metlek, Sedat, Kiyas Kayaalp, Ibrahim Bahadır Basyigit, Abdullah Genc, ve Habib Dogan. 2021. «The dielectric properties prediction of the vegetation depending on the moisture content using the deep neural network model.» *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Design* 31 (1).
- Olmi, R, M Bini, A Ignesti, ve C Riminesi. 2000. «Dielectric properties of wood from 2 to 3 GHz.» *Microwave Power and Electromagnetic Energy* 35 (3): 135-143.
- Pereira, Celeste M.C., Calixte Blanchard, Luisa M.H. Carvalho, ve Carlos A.V. Costa. 2004. «High frequency heating of medium density fiberboard (MDF): theory and experiment.» *Chemical Science Engineering* 59: 735-745.
- Quan, Peng, Chun Long, Jun Zhou, , Xia He, Yuan Liu, David DeVallance, , Xianjun Li, ve Xinfeng Xie. 2021. «Natural wood-based metamaterials for highly efficient microwave absorption.» *Holzforschung* 76 (4): 368-379.
- Razafindratsima, S., Z. M. Sbartai, ve F Demontoux. 2017. «Permittivity measurement of wood material over a wide range of moisture content.» *Wood science and technology* 51 (6): 1421-1431.
- Reeb, James.E., ve Terrence D. Brown. 2016. «Air- and Shed-Drying Lumber.» *Oregon State University*. August. Erişildi: February 08, 2023. <https://catalog.extension.oregonstate.edu/em8612/html#:~:text=Air%2Ddrying%20means%20stacking%20lumber,months%20to%20almost%20a%20year.>
- Romanov, A.N. 2022. «Some Behavior Features of Dielectric Properties of Water in Birch Wood at a Frequency of 1.41 GHz.» *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 60.
- Sudo, Seiichi, Youki Suzuki, Magumi Asano, ve Shin Yagihara. 2022. «Investigation of the molecular description of small molecules in void spaces of wood using dielectric measurements.» *Wood Science and Technology* 56: 1887-1902.
- Sugiyama, M., ve M Norimoto. 2003. «Dielectric properties of chemically treated wood.» *Journal of materials science* 38 (22): 4551-4556.
2022. *Swedish Wood*. Swedish Wood. Erişildi: December 15, 2022. <https://www.swedishwood.com/wood-facts/about-wood/wood-and-moisture/>.
- Torgovnikov, G I. 1993. «Dielectric properties of wood-based materials.» *Dielectric properties of wood and wood-based materials* 135-159.
- Van Emmerik, ve T. H. 2013. «Diurnal differences in vegetation dielectric constant as a measure of water stress.»

- Wang, Di, Hao Xianjun, Jianxiong Lv, and Xinyi Chen. 2022. “The Effects of Moisture and Temperature on the Microwave Absorption Power of Poplar Wood.” *Forests* 13: 1-12.
- Wang, Tiansheng , Sanhu Liu, Yuanyuan Hu, Zhiwu Xu, Shunyou Hu, Guoqiang Li, Jie Xu, ve diğeri. 2022. «Liquid Metal/Wood Anisotropic Conductors for Flexible and Recyclable Electronics.» *Advanced Materials* 9: 1-12.
- Wengert, Eugene M, ve Dan A Meyer. 1992. *Processing Trees To Lumber For The Hobbyist And Small Business*. Department of Forestry, the University of Wisconsin-Madison’s, Wisconsin-Madison: Department of Forest Ecology. School of Natural Resources , 4.



ÖZGEÇMİŞ

SINAN SAEED JASIM ALSAADI

Eğitim geçmişi

Doktora 2018-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2014-2016	Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Elektronik Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta
Lisans 2009-2013	AL-Mansour Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Bağdat, Irak