

**T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MİKRODALGA TEKNİĞİ İLE TAHRİBATSIZ NEM ÖLÇME

MEHMET ŞEKER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

BURSA 2006

**T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MİKRODALGA TEKNİĞİ İLE TAHRİBATSIZ NEM ÖLÇME

MEHMET ŞEKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 06.11.2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr. ALİ OKTAY Prof. Dr. Burak POLAT Prof. Dr. Naim DEREBAŞI
(Danışman)**

ÖZET

Mikrodalga ile nem ölçümü metodu tahribatsız ve düşük maliyetli olması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih edilebilir bir metottur. Suyun, elektromanyetik dalgalar için güçlü bir zayıflatıcı olması prensibini kullanır. Hazırlanan tez çalışması teorik bilgilerle birlikte pratik çalışma sonuçlarını da içermektedir. İlk kısımlarda mikrodalga teknolojisinin teorik dayanakları ve kullanım alanları incelenmiştir. Sonraki kısımlarda ise pratik çalışma konusu olan tahribatsız nem ölçümü tekniği incelenmiştir. Tahribatsız nem ölçümü deney düzeneği hazırlanmış ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Pratik çalışmanın temel prensipleri yanında deney sonuçlarının nasıl kullanılması gerektiği yönünde de öneriler bulunmaktadır.

Anahtar sözcükler: Nemlilik Oranı, Tahribatsız Ölçme, Mikrodalga Ölçme Tekniği

ABSTRACT

Non destructive moisture measuring methods with microwave can be used in industrial applications with their low costs. Water is a good attenuator. Non destructive microwave methods uses this principle. Practical and theorotical conclusions take place in this study. In the first chapters theoretical principles and appleciable area has investigated. In the following chapters practical observations for non destructive moisture sensing methods has been studied. The experiment for non destructive moisture sensing has comtituted and it can be used for industrial applications. The study includes some recomendations for how the experimental results can be used and also about the elementary principles of the experimental work.

Keywords: Moisture content, Non-Destructive Moisture Sensing, Microwave Sensing

İÇİNDEKİLER

1-GİRİŞ	1
2- KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3- MATERYAL VE YÖNTEM	4
3.1. Elektromanyetik Teori	4
3.2 Mikrodalgaların Ortamla Etkileşimi	7
3.3 Mikrodalga Antenler	15
3.4 Mikrodalga Teknolojisi	17
4. MİKRODALGA ZAYIFLAMA METODU İLE NEMLİLİK ÖLÇÜMÜ	21
4.1 Mikrodalga ile Nemlilik Ölçümü Prensipleri	22
4.2 Mikrodalga Metodu ile Tahribatsız Nem Ölçümü	28
4.3 Deneysel Sonuçlar	33
4.3.1 Sonuçların Malzemenin Mikrodalgayı Zayıflatma Miktarına Göre Değerlendirilmesi	35
4.3.2 Malzemenin Mikrodalgayı Zayıflatma Miktarının Karesi Alınarak İşlem Yapılması	37
4.3.3 Malzemenin İçerdiği Gerçek Su Miktarı ile Malzemenin Sebep Olduğu Gerilim Düşümünün İlişkilendirilmesi	38
4.3.4 Malzemenin Sebep Olduğu Kaybın Kütle Başına Değeri	40
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA	42
KAYNAKLAR	45
EKLER	46
Ek-1 Suyun Dielektrik Özellikleri	46
Ek-2 En Küçük Kareler Yöntemi	47
Ek-3 Örnekler-Yeşil Çay ve ILLY Kahve	55
Ek-4 Mikrodalga Uygulamaları	57
TEŞEKKÜR	63
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGELER DİZİNİ

ϵ_r	Dielektrik geçirgenlik
ϵ_0	Serbest uzayın dielektrik geçirgenliği (F/m)
ϵ_r'	Dielektrik sabiti
ϵ_r''	Dielektrik kayıp faktörü
μ_r	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği (H/m)
σ	İletkenlik (S/m)
σ_e	Efektif iletkenlik (S/m)
ω	Açısal frekans (rad/s)
\vec{E}	Elektrik alan şiddeti (V/m)
\vec{H}	Manyetik alan şiddeti (A/m)
\vec{J}_s	Yüzeysel akım yoğunluğu (A/m ²)
P	Mikrodalga kayıp güç yoğunluğu (W/m ³)
$\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$	Kartezyen koordinatlar sisteminin birim vektörleri
t	Zaman (s)
ζ	Nemlilik miktarı
l	Kenarın boyu (m)
Γ	Yansıma katsayısı
β	Dalga kılavuzunun faz sabiti (rad/m)
k_0	Serbest uzayın yayılım sabiti (rad/m)
η_0	Serbest uzayın öz empedansı (ohm)
λ_0	Dalgaboyu (m)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1	Kayıplı bir ortamda düzlemsel dalga propagasyonu	8
Şekil 3.2	Düzlemsel dalganın malzeme içine nüfuz etmesi ve malzemenin içerisinden geçmesi	10
Şekil 3.3	Malzemenin Mikrodalga ile Etkileşimi	12
Şekil 3.4	8-10 GHz'de Sıcaklığa Karşı Dielektrik Sabiti (ϵ_r')	14
Şekil 3.5	8-10 GHz'de Sıcaklığa Karşı Kayıp Faktörü	14
Şekil 3.6	Piramit horn tipi anten	16
Şekil 3.7	Horn antenin ışın diyagramı	16
Şekil 3.8	Elektromanyetik frekans bantları	17
Şekil 4.1	Deney düzeneği	29
Şekil 4.2	Gunn Diyodunun Karakteristiği	30
Şekil 4.3 (a)	% Nemlilik-Malzemenin sebep olduğu kayıp grafiği	35
Şekil 4.3 (b)	% Nemlilik-Malzemenin sebep olduğu kayıp grafiği hata histogramı	36
Şekil 4.4 (a)	% Nemlilik-Malzemenin sebep olduğu kaybın karesi	37
Şekil 4.4 (b)	% Nemlilik-Malzemenin sebep olduğu kaybın karesi hata histogramı	38
Şekil 4.5 (a)	Malzemenin içerdiği su miktarı-Malzemenin sebep olduğu kaybın karesi	39
Şekil 4.5 (b)	Malzemenin içerdiği su miktarı-Malzemenin sebep olduğu kaybın karesi hata histogramı	40
Şekil 4.6 (a)	% Nemlilik-Kütle başına kayıp grafiği	41
Şekil 4.6 (b)	% Nemlilik-Kütle başına kayıp hata histogramı	41
Şekil 5.1	Nemlilik miktarı-mikrodalga genliği ve fazı grafikleri	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Frekans Bantları	18
Çizelge 3.2. Frekans Bantlarının Kullanım Alanına göre Tanımı	19
Çizelge 4.1 a) Kalibrasyon Ölçüm Değerleri	33
Çizelge 4.1 b) Test Ölçüm Değerleri	34

1.GİRİŞ

Nemlilik terimi çalışmada malzemeler içindeki su miktarı olarak anılmaktadır. Çalışmanın konusu malzemelerin karakteristik özelliklerinden olan nem miktarının elektromanyetik alanlar kullanılarak ölçülmesi tekniğidir. Mikrodalga tekniği malzeme içindeki nem miktarının, malzemenin dielektrik özelliklerini değiştirmesi prensibini kullanır. Bu tekniğin kullanımı ekonomik olarak da önemlidir. Su, malzemeler içinde doğal olarak bulunduğundan, nem miktarının ölçülerek kontrol edilmesi endüstriyel, ekonomik ve teknik prosesler yönünden kritik bir öneme sahiptir. Nem miktarının ölçülmesinin pratik önemi bu tekniğin gelişmesini olumlu yönde etkilemesindedir. Bu çalışmada nem ölçümü konusunda mikrodalga tekniğinin kullanımını ayrıntılarıyla incelenecek ve gelişmeleri tartışılacaktır.

Tipik tahribatsız nem ölçümü teknikleri, malzemelerin elektriksel özelliklerini, incelenen örneğin barındırdığı nem miktarı ile ilişkilendirmesi prensibini kullanır. Malzeme içindeki nemin elektriksel özellikler ile ölçülmesi 20. yüzyıl başlarında tarımsal ürünlerin nemliliklerinin, ürüne batırılan iki elektrot arasındaki dc direncin yüksek bir periyotta ölçülmesiyle başlar. Bu direncin malzemenin nemliliğiyle değişmesi incelenmiştir. Daha sonra ıslak malzemeler elektromanyetik alan oluşturan iki horn tipi anten arasına konarak mikrodalga yayılma sabitiyle (propagation constant) malzemenin içindeki nem miktarı arasındaki ilişki kolaylıkla tespit edilmiştir. Ölçüm tekniğinin basitliği ve pratik uygulamanın kolaylığı bu tekniğin dikkatleri üzerine çekmesini sağlamıştır. Mikrodalga radyasyon (1 GHz – 100 GHz), kendine has özellikleri ile nem ölçümü konusunda kimyasal metotlara, radyo frekansının (birkaç MHz) kullanıldığı metotlar ya da kızılötesi metotlara göre üstünlük sağlar. Mikrodalga metodun aşağıdaki avantajları ilk deneylerin yapılması ile açıklığa kavuşmuştur. Mikrodalga tekniği ile yapılan ölçümlerin avantajları şu şekilde sıralanabilir.

- a) Düşük frekansların aksine, dc iletkenlik malzemenin karakteristik özelliklerini etkilemez.
- b) Nüfuz derinliği kızılötesi tekniklere göre çok daha fazladır. Bu sayede bir bant üzerinde ya da kapalı bir alan içinde hareket eden malzemenin çok daha büyük bir hacmindeki nem miktarı ölçülebilir.

- c) Test edilen malzeme ile ölçüm düzeneğinin fiziksel teması olmaması eşzamanlı ve sürekli ölçüm yapılabilmesini sağlar.
- d) Kızılötesi tekniklerde rastlanan ortamın izole edilmesi gerekliliği yoktur. Ölçüm, ortamda bulunan toz yada buhardan etkilenmeyecek şekilde tasarlanabilir.
- e) Diğer metotlara göre çok daha güvenli ve hızlıdır.
- f) Su, mikroalgaları özel olarak etkilediği için düşük miktarlardaki nem miktarı bile belirlenebilir.
- g) Ölçüm tamamen tahribatsız olarak yapılır. Kimyasal metotlardaki gibi malzeme zarar görmez.

Mikroalga ile ölçüm tekniğinin tüm bu avantajlarının yanında zaman, maliyet ve iş gücü konusunda tasarruf sağlarken, ürünün kalitesini artırır.

Dünya üzerinde, kumdan kağıda, tahıldan toprağa kadar hatta canlı balıklar da dahil olmak üzere birçok malzeme üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu liste gösteriyor ki mikroalga ile nem ölçülmesi konusu sadece akademik bir çalışma değil aynı zamanda ekonomik değeri olan ve sahasında uygulama alanı bulunan, modern fabrikalarda ve laboratuarlarda kullanıma ve gelişime açık bir teknolojidir.

Yapılan bu çalışmada horn tipi anten kullanılarak iletilen mikroalgaların tespiti ile nem ölçümü tekniği incelenmiştir. Mikroalga üretici olarak gunn osilatoru kullanılmıştır. Kurulan sistemde nemliliği ölçülecek malzeme hornlar arasına konur. Verici hornndan çıkan elektromanyetik dalgalar malzemenin içinden geçerek alıcı horna ulaşır ve malzemenin mikroalga gücünde sebep olduğu kayıp incelenir. Malzemenin içerdiği su miktarına göre bu kayıp miktarı değişmektedir. Mikroalga ile tahribatsız nem ölçümünün temel prensibi bu şekilde açıklanabilir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mikrodalga ile tahribatsız nem ölçümü tekniğinde iletilen mikrodalga ile ölçüm yapıldığında malzemenin sadece yüzeyinin değil tüm içeriğinin nemliliği hakkında bilgi sahibi olunur. Aynı etkiyi sağlayan diğer metotlara göre daha hızlı ve ucuz olması bu tekniğe olan ilgiyi artırmıştır ve endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılır hale gelmiştir. Uygulama alanları çeşitlilik göstermektedir. Nakayama (1994) tahıllar üzerine çalışmalar yapmıştır. Bunun yanında Anthony (1990) pamuk üzerine çalışmıştır. Kraszewski ve Nelson'un ise birçok ürün ve alanda çalışmaları mevcuttur. Ju Yang ve ark. (2003) entegreler içerisindeki su miktarının mikrodalga ile tespitine yönelik bir makale yayınlamışlardır. Dashner ve Knochel (2001) ile Sachs (2001) sistemin otomasyon çözümleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Günümüzde ise kahveden tütüne, peynirden madenlere kadar birçok endüstriyel uygulamada mikrodalga tekniği ile nem ölçüm metotları kullanılmaktadır. Mikrodalga nem ölçümü ile ilgili olarak fikirlerin paylaşılması için ilk toplantılar 1980'li yıllarda yapılmıştır. Profesyonel seminerler 1980'lerin sonlarında yapılmaya başlandı ve her yıl yapılacak toplantıların ilki Almanya'da gerçekleştirildi. Sonraları daha çok ülkeden katılımı uluslararası nitelikte toplantılar da yapılmaya başlandı. Bunların ilki 1993'de Atlanta'da gerçekleştirilen "IEEE-International Microwave Symposium Workshop on Electroamgnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances" oldu. Bu toplantıyı 1996 San Francisco, 1999 Atina ve daha yakın zamandaki Almanya toplantıları izledi.

Mikrodalga tekniği ile nem ölçümü konusunda son ürünler 1960'lı yılların ortalarında piyasaya çıkmıştır. Bu ürünleri üreten firmalar arasında İsveç'te SCANPRO AB, İngiltere'de AEI ve RANK, Polonya'da UNIPAN/WILMER, ABD'de KAY-RAY ve Almanya'da COMPUR AG göze çarpmaktadır. Bahsedilen şirketlerin yanında ABD'de KETT şirketinin keresteler için JAMES INSTRUMENTS şirketinin toprak için, MESA şirketinin tahıllar için, Çin'den DIPPER şirketinin un için, Almanya'dan MAHLO şirketinin plastik, kâğıt ve tekstil ürünleri için ürettiği mikrodalga nem ölçüm cihazları bulunmaktadır. Ayrıca Avustralya'dan MOISTSCAN, İngiltere'den HYDRONIX, ABD'den CORVIB, SCALETRON ve DATA SUPPORT COMPANY şirketlerinin mikrodalga ile nem ölçümü konusunda geliştirilmiş birçok cihazları bulunmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Elektromanyetik Teori

Bir ortamla elektromanyetik alanlar arasındaki ilişki aşağıda verilen Maxwell denklemleri yardımıyla ortaya konur ;

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \vec{J}_0 + \vec{J}_c \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_0 \quad (3.4)$$

Burada $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}$, ve \vec{B} sırasıyla elektrik ve manyetik alan şiddetleri, elektrik ve manyetik akı yoğunluklarıdır. \vec{J}_0 ve ρ_0 kaynak tarafından sağlanan elektrik akımı ve güç yoğunluklarıdır. Ortamlar ile elektromanyetik alanlar arasındaki ilişki;

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad \vec{B} = \mu\vec{H} \quad \vec{J}_c = \sigma\vec{E} \quad (3.5)$$

İfadeleri ile belirlenir. σ ortamın iletkenliği, ϵ ortamın dielektrik geçirgenliği, μ ise ortamın manyetik geçirgenliğidir.

Bir ortamın dielektrik geçirgenlik katsayısı sanal bir büyüklüktür ve ;

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ϵ_0 serbest uzayın dielektrik geçirgenliği, ϵ_r' ortamın dielektrik sabiti ve ϵ_r'' ise ortamın dielektrik kayıp faktörüdür.

Bir dielektrik ortamda mikrodalga enerjisinin kullanımı dielektrik faktörüne ve iletkenliğe bağlıdır. Daha büyük boyutlarda incelenirse, malzeme içerisinde mevcut olan serbest yüklerin elektrik alandan etkilenmeleriyle yapacakları osilasyonları neticesinde ve polar moleküllerin elektrik alanla birlikte yapacakları dönme hareketinden dolayı oluşan dielektrik relaksasyon ile olmak üzere iki farklı mekanizma malzemenin ısınmasına katkıda bulunacaktır. Bu mekanizmalardan ilki, ortamın iletkenlik sabiti ile ikincisi de ortamın dielektrik kayıp faktörü ile temsil edilir.

Bu bilgiler çerçevesinde matematiksel kombinasyona geri dönelim. Mikrodalga enerjisi kullanımının sonundaki güç ifadesi, Maxwell denklemlerinden türetilir. Bilindiği gibi mikrodalga kullanımı elektromanyetik enerjinin dalgalar yardımıyla madde üzerine gönderilmesi prensibine dayanır. Belirli bir kapalı yüzey üzerinde harcanan güç, poynting vektörünün integrali ile hesaplanabilir.

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.7)$$

Poynting vektörünün bir s yüzeyinden integrali,

$$\int_s (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} \quad (3.8)$$

Maxwell akım kanunundan hareketle,

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon_0\epsilon^* \vec{E} \quad (3.9)$$

(3.3) eşitliğinde $\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$ ve $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ konursa

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + (\omega\epsilon_0\epsilon'' + j\omega\epsilon_0\epsilon') \cdot \vec{E} \quad (3.10)$$

$$= \omega\epsilon_0\epsilon''_{eff} \cdot \vec{E} + j\omega\epsilon_0\epsilon' \vec{E} \quad (3.11)$$

Burada ;

$$\epsilon''_{eff} = \epsilon'' + \sigma / \omega \epsilon_0 \quad (3.12)$$

(3.12)'deki ϵ'' iletkenlik sebebiyle oluşan tüm kayıpları içermektedir. Maxwell'in üçüncü denklemini kullanılırsa ve ortalama güç tanımından;

$$\vec{P}_{ort} = \frac{1}{2} \int_s R_e (\vec{E} \times \vec{H}^*) . dS \quad (3.13)$$

buradan ;

$$\vec{P}_{ort} = \frac{1}{2} \int_v \omega \epsilon_0 \epsilon''_{eff} (\vec{E}^* \times \vec{E}) . dV \quad (3.14)$$

integral formun sol tarafındaki elektrik alanı çoğu zaman sabit değildir ve mikrodalga uygulayıcısı içindeki boşlukta değişir. Özel durumlarda elektrik alanı sabit alınabilir ve bu durumda;

$$\vec{E} . \vec{E}^* = E^2 \quad (3.15)$$

kullanılarak;

$$P_{ort} = \omega \epsilon_0 \epsilon''_{eff} E^2_{rms} . V \quad (3.16)$$

olarak bulunur. Burada, elektrik alan boyutu (E) V/m, frekans (f) Hz ve hacim (V) m alınmıştır. Eğer malzemede manyetik kayıplar söz konusu ise bu durumda geçirgenlik komplekstir ve $(-\omega \mu_0 \mu''_{eff} H.H^*)$ teriminin ilave edilmesi gerekir.

3.2 Mikrodalgaların Ortamla Etkileşimi

Mikrodalga mühendisliğinde birçok problemde Maxwell denklemleri kullanılmaktadır. Buna göre Maxwell denklemlerinden, 'z' yönündeki elektromanyetik alanın dalga denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \epsilon_0 \epsilon^* \mu_0 \mu^* \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = \epsilon_0 \epsilon^* \mu_0 \mu^* \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

Burada göze alınan çözüm bir düzlemsel dalgadır. Elektrik alanı için;

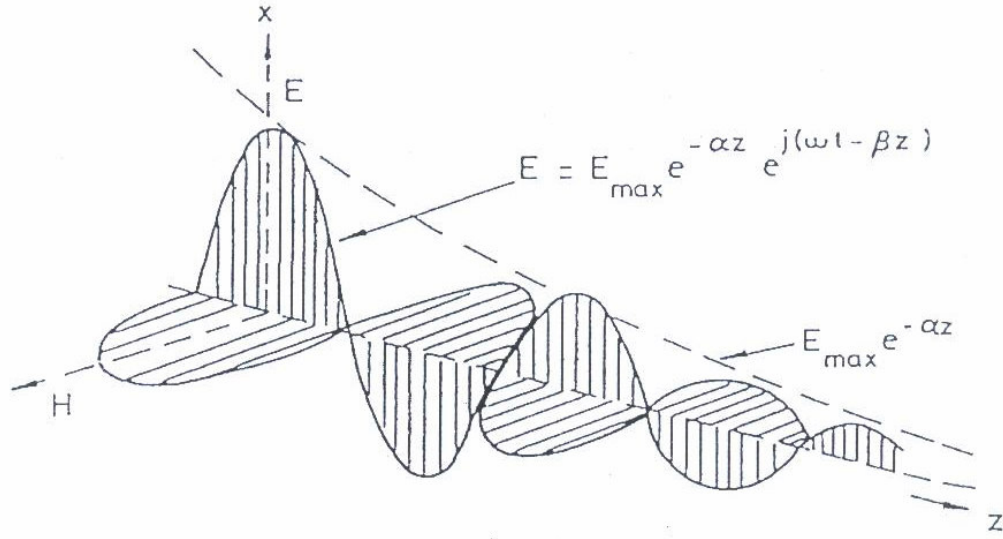
$$E = E_{\max} \cdot e^{j\omega t - \gamma z} \quad (3.19)$$

Bu kompleks yayılım faktörü γ ile z yönünde yayılan periyodik alanı gösterir.

$$\gamma = j\omega(\epsilon_0 \epsilon^* \mu_0 \mu^*)^{1/2} = \alpha + j\beta \quad (3.20)$$

Burada α zayıflama faktörü ve β faz faktörüdür. Şekil 3.1 'de böyle bir yayılımdaki temel özellikler görülmektedir.

Dalga ortam tarafından zayıflatıldığından E^2 'nin fonksiyonu olan güç büyük miktarda azalır. Zayıflayan güç için bir ifade türetmek için (3.18) eşitliğinin gerçek ve sanal kısımları eşitlenerek $\mu^* = \mu'$ için α ve β çözülebilir.



Şekil 3.1 Kayıplı bir ortamda düzlemsel dalga propagasyonu

Yayılan güç aşağıdaki formdadır;

$$P \sim e^{-2\alpha z} \quad (3.21)$$

Penetrasyon derinliği, gücün malzeme yüzeyindeki değerinden e^{-1} ine düştüğü mesafe olarak tanımlanır.

$$D_p = 1 / 2 \alpha \quad (3.22)$$

(3.21) ve (3.22) ifadelerinden penetrasyon derinliği için genel ifade;

$$D_p = \frac{1}{2\omega} \left(\frac{2}{\mu' \mu_0 \epsilon' \epsilon_0} \right)^{1/2} \left[\left(1 + \left(\frac{\epsilon''_{eff}}{\epsilon'} \right)^2 \right)^{1/2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (3.23)$$

$\mu' = 1$ için ve serbest uzayın dalga boyu cinsinden de türetilir. Düşük kayıplı dielektriklerde $\epsilon''_{eff} / \epsilon' < 1$ olduğundan penetrasyon derinliği yaklaşık olarak,

$$D_p = \frac{\lambda_0' (\epsilon')^{1/2}}{2\pi 2\epsilon''_{eff}} \quad (3.24)$$

(3.24) eşitliğinden görüldüğü gibi dalga boyu büyüdükçe penetrasyon derinliği artmaktadır. Genel olarak, 100 MHz'in altındaki frekanslarda penetrasyon derinliği metreler boyutundadır. Mikrodalga ısıtma bölgesine yakın frekanslarda penetrasyon derinliği küçülmektedir.

Düzlemsel bir dalga şekil 3.2-a daki gibi bir dielektrik ortamla karşılaştığında dalganın bir kısmı malzemenin yüzeyinden yansırken bir kısmı da malzemenin içerisine nüfuz etmektedir. Yansıma katsayısı;

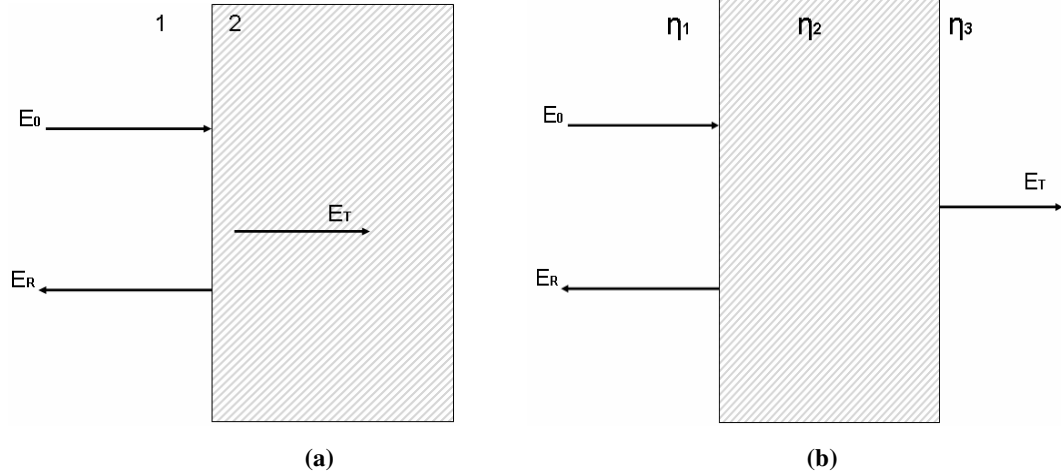
$$\Gamma = \frac{E_R}{E_0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (3.25)$$

şeklinde olmaktadır. Formülde E_0 giren dalga elektrik alan vektörü ve E_R yansıyan dalga elektrik alan vektörüdür. η_1 ve η_2 ise sırasıyla birinci ve ikinci ortamın dalga empedansını göstermektedir. η_1 ve η_2 değerleri şu şekilde ifade edilir;

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_1}{\epsilon_0 \epsilon_1}} \text{ ve } \eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_2}{\epsilon_0 \epsilon_2}} \quad (3.26)$$

Birinci ortamdan ikinci ortama iletilme katsayısı şu şekilde ifade edilir.

$$\tau = 1 + \Gamma = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \quad (3.27)$$



Şekil 3.2 Dalganın; (a) malzeme içine nüfuz etmesi, (b) malzemenin içerisinden geçmesi

İletilen güç ise;

$$P_T = P_0(1 - |\Gamma|^2) \quad (3.28)$$

P_T malzeme içine nüfuz eden gücü, P_0 ise malzemeye uygulanan mikrodalga gücünü göstermektedir. Eğer birinci dielektrik ortam boşluk (yada hava) ve ikinci ortamın yansıma katsayısı da $\mu = \mu_0$ ise ortamın yansıma katsayısı

$$\Gamma = \frac{1 - \epsilon}{1 + \epsilon} \quad (3.29)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki eşitlikten açıkça görülmektedir ki yansıma ve iletim katsayılarının modülleri ve faz açıları malzemenin elektromanyetik geçirgenliğine, iletim katsayısına, dielektrik sabitine ve kayıp faktörüne bağlıdır. Böylece test edilen malzemenin dielektrik özelliklerine dair bilgi, yansıyan yada iletilen dalganın modülünün ve fazının ölçülmesiyle hesaplanabilir.

“ d ” kalınlığında bir malzeme için iletim ve yansıma katsayıları, farklı ortamlardaki dalga ve yük empedanslarının (Z_L) göz önünde bulundurulması ile hesaplanabilir. Şekil 3.2-b deki gibi iki farklı ortamdan oluşan bir sistemde yansıma katsayısı;

$$\Gamma_1 = \frac{Z_{L1} - \eta_1}{Z_{L1} + \eta_2} \quad (3.30)$$

şeklinde ifade edilir. Formülde “ η ” gerçek (“intrinsic”) empedansı ifade etmektedir. Ortamın $\sqrt{\mu/\varepsilon}$ değeri şu şekildedir:

$$Z_{L1} = \eta_2 \left(\frac{\eta_3 \cos k_2 d + j\eta_2 \sin k_2 d}{\eta_2 \cos k_2 d + j\eta_3 \sin k_2 d} \right) \frac{Z_{L1} - \eta_1}{Z_{L1} + \eta_2} \quad (3.31)$$

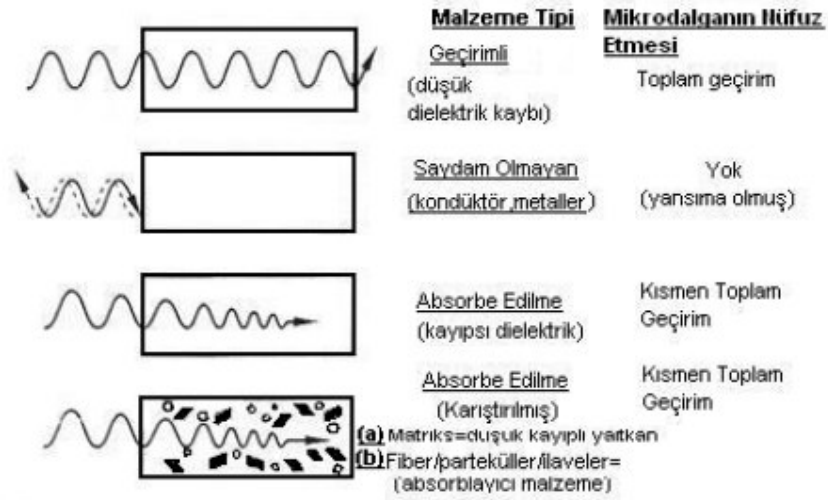
Bu değer yanında $k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}$ ve λ_2 dalganın dielektrik içindeki dalga boyudur. Üçüncü bölgeye iletilen dalga ile birinci ortamdaki dalga arasındaki oran da şu şekildedir:

$$\tau_3 = \frac{E_3}{E_0} = \frac{2\eta_3}{\eta_2 + \eta_3} \Gamma_1 e^{-jk_2 d} \quad (3.32)$$

Son eşitliklerden görüldüğü gibi “ d ” kalınlığındaki bir malzeme için maddenin geçirgenliğinin bulunabilmesi için yansıma ya da geçirme sabitlerinin ölçülmesi yeterli olabilmektedir. Pratik uygulamalarda dikkat edilmesi gereken ve ölçümlerde hatalara yol açan bir diğer husus da malzemelerin yüzeylerinin tam anlamıyla düz olmayışıdır. Mikrodalga uygulayıcısının malzemeye olan uzaklığına göre de hata değerleri değişebilmektedir. Ölçümler hata içerse bile yukarıdaki eşitliklerden doğru sonuçlara ulaşılabilir.

Metaller saydam olmadıkları için mikrodalgalar yüzeyden yansıma yaparlar. Bu nedenle metalleri mikrodalga ile ısıtamayız. Genelde metaller yüksek iletkenliğe sahiptir ve iyi yansıtıcılardır. Dielektrik özelliğe sahip olan seramik malzemelerden mikrodalgalar geçirimli olarak geçer. Bu nedenle seramikler yalıtıcıdır ve mikrodalga fırında malzemenin ısıtılmasını desteklemek için kullanılırlar. Belli bir kritik sıcaklığın üzerine çıktığı zaman bu malzemeler mikrodalgadan daha fazla etkilenecek şekilde absorbe ederler. İletkenlik ve fiber oluşumunu sağlayan manyetik fazların eklenmesiyle oluşan geçirimli seramikler ile mikrodalgaların absorpsiyonu daha da hızlı olur. Mikrodalga enerjisi absorbe eden bu malzemeler kolaylıkla ısıtılırlar. (Şekil 3.3)

Mikrodalga enerji kaybının iki önemli mekanizması; iyonik iletim ve polar rotasyondur. Buna göre dielektrik sabiti ve dielektik kaybının oranı malzemenin harcama (tükenme) faktörünü verir. Dielektrik sabiti, malzemenin mikrodalga enerjisinin iç kısımdan geçmesi sırasında absorbe etme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Kayıp faktörü ise giren mikrodalga enerjinin malzeme içerisinde ısı olarak tüketilmesiyle kayıp olma miktarını vermektedir. Bu nedenle yüksek kayıp faktörlü bir malzeme mikrodalga enerjisiyle kolaylıkla ısıtılabilir.



Şekil 3.3 Malzemenin Mikrodalga ile Etkileşimi(KUTBAY ve KUŞKONMAZ-2000)

Mikrodalga radyasyonunun yansınması, geçirimi ve absorbe edilmesiyle malzemenin elektriksel ve manyetik özellikleri saptanır. Seramiklerin çoğu mikrodalga enerjisiyi geçirirli veya zayıf absorbe eder. Fakat; iletkenlik ve fiber oluşumunu sağlayan manyetik fazların eklenmesiyle kritik sıcaklıkta ısıtıldığı zaman seramikler mikrodalga enerjiye geçirirli olarak katkıda bulunurlar. Karışık geçirgenlik ϵ^* ; mikrodalga enerji ile etkileşen alanın miktarı ile saptanır.

$$\epsilon^* = \epsilon_0(\epsilon_r' - j \epsilon_r''_{\text{eff}}) \quad (3.33)$$

$j = (-1)^{1/2}$, ϵ_0 ; boş alan geçirgenliği ($\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m), ϵ_r' ; izafi “i” elektriklik sabiti, ϵ''_{eff} ; etkili izafi dielektrik kayıp faktörü'dür. Mikrodalgalar bir yalıtkan maddeyi delip geçerken içeride oluşan elektrik alanları, boşta kalan elektron veya iyonların hareketine ya da ikiz kutup gibi dönen şarj komplekslerinin oluşumuna sebep olur. Sürtünme kuvveti ve yukarıda söylediğimiz hareketlerden dolayı oluşan güçler elektrik alanlarında kayba ve değişimlere neden olur. Bu tür kayıpların sonucunda hacimsel ısınma meydana gelir. Kolaylık olması için bütün kayıplar tek bir parametrede toplanmıştır. Genellikle bu tür kayıpları tanımlamak için $\tan\delta$ kullanılır.

Kayıp faktörü $\tan\delta$; etkili izafi dielektrik kayıp faktörünün izafi dielektrik sabitine oranıdır.

$$\tan\delta = \epsilon''_{\text{eff}} / \epsilon_r' \quad (3.34)$$

Hacim birim başına absorbe etme gücü P (N/m^3) ile ifade edilen dielektrik ısıtma ve iletkenlik arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$P = \sigma |E|^2 = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' \tan\delta |E|^2 \quad (3.35)$$

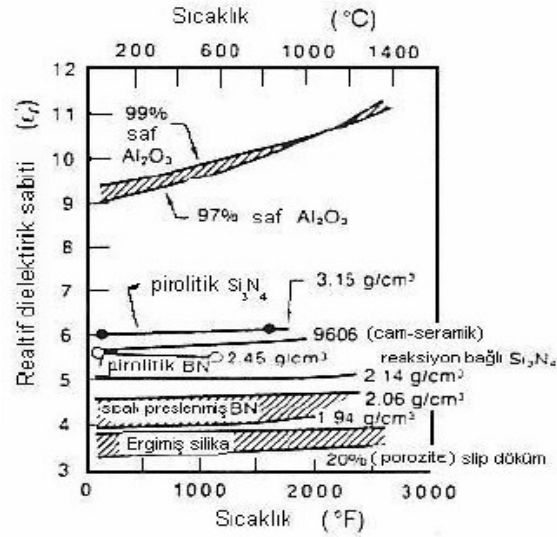
E ; elektrik alanı, σ ; elektriksel iletkenlik, f ; mikrodalganın frekansı'dır.

“ D ” terimi mikrodalga gücünün malzeme içerisinde $1/e$ ‘sine düştüğü derinliğini göstermektedir. Bu terim malzemenin absorbe etme gücünün nasıl çoğaltılacağını ve mikrodalganın nasıl nüfuz edebileceğini saptamaya yarayan bir parametredir.

$$D = \frac{3\lambda_0}{8,686\pi \tan\delta (\epsilon_r' / \epsilon_0)^{1/2}} \quad (3.36)$$

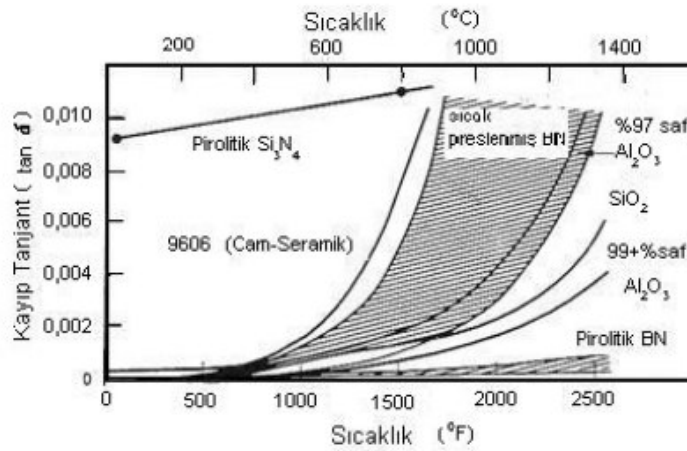
P ve D verilen malzemenin hacimsel ısıtma davranışını etkiler. ϵ_r' ; izafi dielektrik sabiti değeri elektrik alanında malzemenin kutuplaşmasının ölçülmesidir. $\tan\delta$; kayıp faktörü değeri malzemeye bağlı olarak mikrodalga enerjinin kaybı veya absorpsiyonun ölçülmesidir. Isıtma sırasında ϵ_r' ve $\tan\delta$ değerleri sıcaklıkla değişir ve bunların değişim bilgisi işlem kontrolü için önemlidir. Kısacası; seramik malzemenin mikrodalga ile

ısıtılması, frekans ve sıcaklığa bağlı olan kayıp faktörü ($\tan\delta$) ve izafi dielektrik sabiti (ϵ_r) ilişkisiyle etkilidir.



Şekil 3.4 8-10 GHz'de Sıcaklığa Karşı Dielektrik Sabiti (ϵ_r') (KUTBAY ve KUŞKONMAZ-2000)

Şekil 3.4'de gösterildiği gibi oda sıcaklığından 1400 °C'ye kadar yavaşça ısıtılan cam-seramik ve sıcak preslenmiş BN, fused SiO₂, reaksiyon bağlı Si₃N₄ malzemelerin ϵ_r' değeri artar. Ayrıca grafikten Al₂O₃'ün ϵ_r' değerinin daha büyük oranda arttığı gözlenir. Sıcaklıkla ϵ_r' değerinin yükselmesi hacimsel genleşmeye neden olan kutuplaşabilme yeteneğidir. Bu durum Al₂O₃'de daha iyi gözlenmektedir. Kompozisyon ve yoğunlukta ϵ_r' değerinin artışı gösteren eğimde büyük etkiye sahiptir.



Şekil 3.5 8-10 GHz'de Sıcaklığa Karşı Kayıp Faktörü (KUTBAY ve KUŞKONMAZ-2000)

Şekil 3.5’de 8-10 GHz frekans aralığında farklı malzemeler için sıcaklık ile kayıp faktörü arasındaki ilişkiyi veren grafik verilmiştir.. Başlangıçta oda sıcaklığından belirli kritik sıcaklığa kadar kayıp faktörü yavaşça yükselirken, kritik sıcaklıktan sonra kayıp faktöründe hızlı bir yükselme gözlenir. Kayıp faktörünün sıcaklıkla değişimine etki eden en önemli faktör malzemenin kompozisyonu ve empüritelere fazlalığı yada azlığıdır. Polikristal seramiklerde kayıp faktörünün hızlı yükselmesi, elektriksel iletkenlikte (σ) yükselmeye neden olan amorf veya ara granüller fazların yapıda mevcut olmasıyla etkili bir şekilde mikrodalganın etkileşimidir. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi %97 saf Al_2O_3 malzemesinin sıcaklıkla kayıp faktörü %99 saf Al_2O_3 malzemenin kayıp faktöründen daha fazladır.

3.3 Mikrodalga Antenler

Elektromanyetik dalgaları bir sistemden ortama aktaran elemanlara verici anten ve ortamdaki bir sisteme aktaran elemanlara alıcı anten denir. Bahsedilen sistemlere anten sistemleri veya 1 Ghz frekansının üstünde çalışanlara mikrodalga sistemleri adı verilir. Çalışmamız sırasında kullandığımız horn tipi antenlerde bir mikrodalga anten sistemini oluşturur. Bir anten hem alıcı hem de verici anten olarak çalışabilir. Verici antenin ışınlandığı alanın genişliği her doğrultuda aynı değildir, bazı doğrultularda çok büyük, bazı doğrultularda ise çok küçük hatta sıfır olabilir.

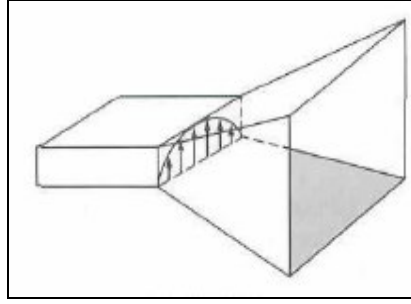
Bir transmisyon borusunun ucu genişletilmek yoluyla horn tipi bir anten oluşturulabilir. Burada hornu besleyen transmisyon borusu genellikle TE_{10} modunda uyarılır. Dikdörtgen kesitli transmisyon borusunun her iki kenarının da genişletilmesiyle elde edilen horna piramidal horn denmektedir. Bu hornların açık bırakılan ağzından ışınma olduğundan horn antenler denebilir.

Basit ortamda, elektrik ve magnetik alanların birbirine dik olarak, bir silindir veya bir küre yüzeyine teğet düzlem içinde bulunan ve bu yüzeye dik doğrultuda, dışarı doğru ilerleyen dalgalara düzlemsel dalgalar denir.

Bir antenin ışınma diyagramı alan şiddetinin bir ölçüsüdür. Bir anten alıcı ve verici olarak çalıştığı zaman ışınma diyagramları aynıdır. Antenlerden ışınan alanın genişliği her yönde farklıdır; bazı yönlerde maksimum, bazı yönlerde minimum hatta sıfır olabilir. Anten ışınma diyagramı üç boyutludur fakat pratikte iki boyutlu olarak çizilir.

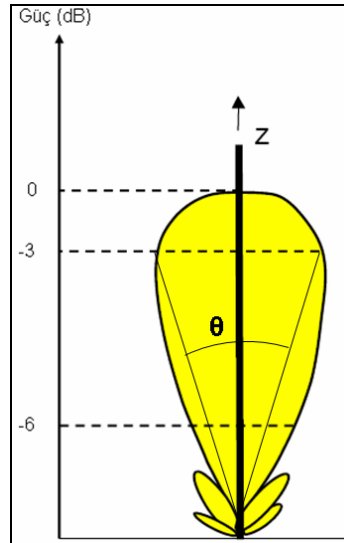
Uzak alan ışıma diyagramı için minimum uzaklık aşağıdaki eşitlikte ifade edilmiştir. Burada “D” hornun genişliğidir.

$$R_{\min} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.37)$$



Şekil 3.6 Piramit horn tipi anten

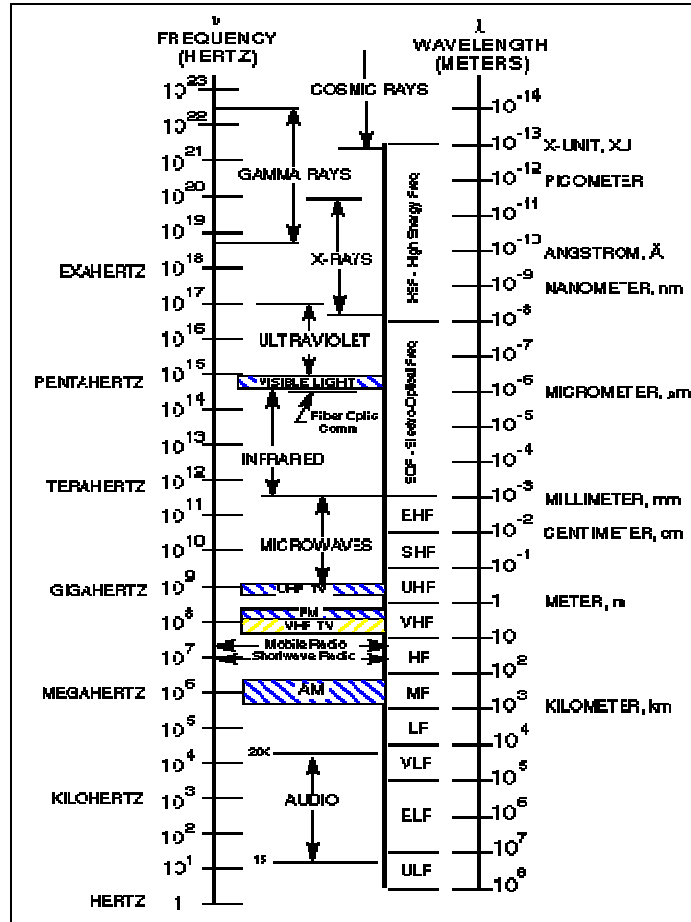
Piramit horn tipi bir anten Şekil-3.6’da görülmektedir. Bu tip bir antenin ışıma diyagramı birçok kulaktan oluşabilir. Bunlar ana kulaklar, yan kulaklar ve arka kulaktır. Başlıca güç ise ana kulakta toplanmıştır. Kazanç, ana kulağın maksimumdaki güç şiddeti her yönde eşit radyasyon yapan bir antenle karşılaştırılarak bulunabilir. Horn tipi bir anten için ışıma diyagramı Şekil-3.7’de görülmektedir. Şekilde de ifade edildiği gibi -3 dB’de tepe genişliği açısı ana kulağın, gücün maksimumunun yarıya düştüğü iki nokta arasındaki açıdır.



Şekil 3.7 Horn antenin ışıma diyagramı

3.4 Mikrodalga Teknolojisi

Mikrodalgalar terimi, 1 cm ile 1 m arasında uzunluğa sahip EMD'ları tanımlamak için kullanılır. Bu dalga boylarına karşılık gelen frekans bölgesi 300 MHz ile 30 GHz arasındaki bölgedir. 1mm - 10 mm dalga boyuna sahip EMD'lar Milimetrik Dalgalar olarak adlandırılır. Infrared ışına spektrumu ise 1 μ m - 1 mm bölgesinde dalga uzunluğuna sahip EMD'ları ihtiva eder. Infrared bölgenin ötesinde görünür optik spektrum, ultraviole spektrum ve son olarak x- ışınları bulunur. Elektromanyetik spektrumdaki frekans bantlarını gösteren birkaç farklı sınıflandırma mevcuttur. Bu sınıflandırmalar Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2 de özetlenmiştir. Radar bandı sınıflandırması II. Dünya Savaşı esnasında kullanılmaya başlanmış ve her ne kadar yeni askeri bandı sınıflandırması tavsiye edilse de, II. Dünya Savaşında yapılan bu tanımlama günümüzde de kullanılmaktadır. Şekil 3.7'de elektromanyetik frekans bantları görülmektedir.



Şekil 3.7 Elektromanyetik frekans bantları

1 GHz'e kadar olan UHF bandında, toplu parametrelı devre elemanları kullanarak pek çok haberleşme devresi oluşturulmaktadır. 1–100 GHz bölgesinde, toplu devre elemanları yerine transmisyon hattı ve dalga kılavuzu elemanları kullanılır. Bu nedenle, Mikrodalga Mühendisliği teriminden, genellikle 30 cm - 3 mm dalga boylarına karşılık gelen 1 GHz - 100 GHz frekans bölgesindeki bilgi elde etme ve işleme sistemlerinin tasarımı ve mühendisliğini anlayacağız. Daha kısa dalga boylarında, kullanılan tekniklerin pek çoğu klasik optik tekniklerden türetildiği için, optik mühendisliği terimi kullanılır. Mikrodalga Mühendisliğinin karakteristik özelliği kısa dalga boylarıdır. Bu dalga boylarında kullanılan devre elemanları ve düzenler hemen hemen aynı mertebededir.

Çizelge 3.1.Frekans Bantları

Frekans	Mikrodalga Band Tanımı (ESKİ)	Mikrodalga Band Tanımı (YENİ)
100-250 MHz	VHF	A
250-500 MHz	VHF	B
500-1000 MHz	VHF	C
1-2 GHz	L	D
2-3 GHz	S	E
3-4 GHz	S	F
4-6 GHz	C	G
6-8 GHz	C	H
8-10 GHz	X	I
10-12,4 GHz	X	J
13.4-18 GHz	Ku	J
18-20 GHz	K	J
20-26,5 GHz	K	K
26,5-40 GHz	Ka	K
40-60 GHz	40-300 GHz Milimetrik Dalgalar	L
60-100 GHz		M
>300 GHz	Milimetre Altı Dalgalar	

Bir devredeki bir noktadan başka bir noktaya elektriksel etkilerin ulaşması için gerekli propagasyon (yayıma) zamanı, sistemdeki osilasyon yapan akımların ve yüklerin periyodu ile mukayese edilebilir seviyededir. Sonuç olarak, Kirchoff Kanunları

ve Voltaj-Akım kavramlarına dayanan konvansiyonel alçak frekans devre analizi, oluşan Bir devredeki bir noktadan başka bir noktaya elektriksel etkilerin ulaşması için gerekli propagasyon (yayıma) zamanı, sistemdeki osilasyon yapan akımların ve yüklerin periyodu ile mukayese edilebilir seviyededir. Sonuç olarak, Kirchoff Kanunları ve Voltaj-Akım kavramlarına dayanan konvansiyonel alçak frekans devre analizi, oluşan elektriksel olayın uygun şekilde tamamlanabilmesi için artık yeterli değildir. Devreyle ilgili elektrik ve manyetik alanların tanımı vasıtasıyla analiz yapmak gerekir. Esasen, Mikrodalga Mühendisliği uygulamalı Elektromanyetik Alan Mühendisliği'dir denilebilir. Bu nedenle, başarılı bir mikrodalga mühendisinin iyi bir Elektromanyetik Alan bilgisine sahip olması gerekir

Çizelge 3.2. Frekans Bantlarının Kullanım Alanına göre Tanımı

Frekans	Tanımlama	Kullanıldığı Yer
3–30 KHz	Very Low Frequency (VLF)	Navigasyon, Sonar (ses dalgaları ile deniz altı nesnelere belirleme yöntemi)
30–300 KHz	Low Frequency (LF)	Radio ile yön bulma, Radio ile seyir, Navigasyonel yardım
300–3000 KHz	Medium Frequency (MF)	AM yayını, Deniz radyosu, Sahil güvenlik haberleşmesi, Yön bulma
3–30 MHz	High Frequency (HF)	Telefon, Telgraf ve faks, Kısa dalga uluslararası radyo yayını, Amatör radyo, Halk bandı, Gemiden-sahile, Gemiden-havaya haberleşme, Radio ile seyir
30–300 MHz	Very High Frequency (VHF)	TV, FM yayını, hava trafik kontrolü, Polis, Taksi mobil haberleşme
300–3000 MHz	Ultrahigh Frequency (UHF)	TV, Uydu haberleşme, Radio dalgalarıyla görüntüleme merkezine meteorolojik data iletme, Gözetleme Radarı, Navigasyonel yardım
3–30 GHz	Superhigh Frequency (SHF)	Uçak Radarı, Mikrodalga linkleri, Kara-mobil haberleşme, Uydu haberleşmesi
30–300 GHz	Extreme High Frequency (EHF)	Radar, Deneysel amaçlar

Modern teknolojik gelişmelerle, 10 GHz'e kadar hatta daha yüksek frekanslarda, toplu parametre karakteristiklerini kaybetmeyecek kadar küçük baskılı devre indüktörleri oluşturmak mümkündür. Ayrıca, 1 m veya daha uzun dalga boylu

mikrodalgaları odaklamak için parabolik reflektörler ve lensler gibi optik elemanlar kullanılır. Bunun sonucu olarak, bir mikrodalga sisteminin tasarımında optik düzenlere ilaveten, mikrodalga mühendisliğinde minyatür indüktör ve kapasitörler gibi alçak frekans toplu parametrelili devre elemanları da sık sık kullanılmaktadır.

4. MİKRODALGA ZAYIFLAMA METODU İLE NEMLİLİK ÖLÇÜMÜ

Malzemelerin nemlilikleri DC gerilim ya da düşük frekanslarda çalışan rezistif yada kapasitif sensorlarla ölçülmekteydi. Son zamanlarda mikrodalgalar ve kızılötesi dalgalar da ölçümlerde alternatif olmaya başlamıştır. Mikrodalga teknolojisinin tercih edildiği ölçümler malzemenin içi kısmındaki nemliliğin de ölçümüne ihtiyaç duyulan ölçümlerdir. İki tip mikrodalga ölçüm tekniği bulunmaktadır. Bunlar transmisyon ve rezonans metotlarıdır. Transmisyon tipi ölçüm tekniği, nemliliği ölçülecek malzemenin elektromanyetik dalgaya dik olacak şekilde yeterince alanı bulunan ölçümler için daha kullanışlıdır.

Düşük frekanslarda suyun bağıl geçirgenliğinin reel kısmı 80 civarındadır. Mikrodalga aralığında bu reel kısmın değeri düşer ve 10 GHz'de 60'dır ama sanal kısmı mikrodalga frekanslarında artar ve 20 GHz de maksimum değerine ulaşır. Sıradan malzemelerde elektromanyetik geçirgenlik suyunkinden düşüktür. Böylece eğer malzeme nemlenirse malzemenin geçirgenliği artmış olur. Malzemenin içinde barındırdığı suyun karakteristik özellikleri gereği malzemenin içinden geçen elektromanyetik dalga, malzeme içindeki su tarafından absorbe edilir ve elektromanyetik dalganın genliği suyun oranı nispetinde düşer. Absorbe edilen elektromanyetik dalga miktarı 10 GHz'in altındaki frekanslarda su içindeki çözülmüş tuz miktarı ile değişir ama 10 GHz üzerindeki frekanslarda tuzun bu etkisi ihmal edilebilir. Bu karakteristik nedeniyle 10 GHz frekansı ölçüm tekniğinde en çok tercih edilen frekanstır.

Transmisyon tekniğinde geçirgenliğin reel ve sanal kısımları, elektromanyetik dalganın faz ve genlik değerleri olarak ölçülebilir. Bu değerlerdeki değişimi malzeme içindeki su miktarı ile orantılıdır. Bununla birlikte bu değerler dalganın yayılım uzaklığı ile de değişir. Yani malzemenin kalınlığı değerlerin değişiminde rol oynar. Bu etkinin aşağıdaki yollarla engellenebilir.

- 1) Test koşullarında malzemenin kalınlığının sabit tutulması.
- 2) Malzeme için genlik ve faz değerlerinin birlikte kullanılması.
- 3) Genlikle birlikte malzemenin kütesinin de işlemlere dahil edilmesi.

İlk yöntem şekli değiştiğinde yoğunluğu değişmeyen malzemeler için kullanılıştır. İkinci metot doğru sonuç elde etmek için uygundur fakat faz açısının ölçümü genlik değerinin ölçümüne göre daha zordur çünkü faz ölçümü için kullanılan sistem daha karmaşıktır. Bunun yanında aı ile ilgili karar verilmesi zordur çünkü aı 360 derecede bir kendini tekrar etmektedir. Bu sebeple eş zamanlı ölçüm gerektiren uygulamalarda ikinci yöntem kullanılışlı değildir. Üçüncü yöntem ikincisi kadar doğru değerler vermeyebilir ama yeşil çay gibi yumuşak bir malzemenin nemliliğinin ölçülmesinde bu üç metodun en kolayıdır.

4.1 Mikrodalga ile Nemlilik Ölçümü Prensipleri

Bir malzemenin nemliliği, nem taban alınarak malzemenin içindeki su kütesinin (m_w) malzemenin toplam kütesine (m_m)oranı şeklinde ifade edilebilir.

$$\xi = \frac{m_w}{m_m} = \frac{m_w}{m_w + m_d} \quad (4.1)$$

Yada kuru malzeme baz alınarak, malzemenin içerdiği nem miktarının, malzemenin kuru kütesine oranı şeklinde ifade edilebilir.

$$\eta = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m_m - m_d}{m_d} \quad (4.2)$$

Çoğunlukla “” ve “η” yüdesel oran olarak ifade edilir. Pratikte ilk ifade daha çok kullanılır, ayrıca nem miktarı ifadesine malzemenin hacmi de aşağıdaki şekilde eklenebilir.

$$\xi = \frac{m_w / V}{m_w / V + m_d / V} = \frac{k}{k + g} = \frac{k}{\rho} \quad (4.3)$$

Bu ifade de k, malzeme içindeki suyun yoğunluğunu, g malzemenin yoğunluğunu, ρ ise nemli malzemenin yoğunluğunu göstermektedir. Yukarıda belirtilen eşitliklerden, ilgili terimler arasındaki aşağıdaki ilişkiler kurulabilir.

$$\eta = \frac{\xi}{\xi-1}, \quad \xi = \frac{\eta}{\eta-1}, \quad k = \frac{m_w}{v} = \rho\xi, \quad g = \frac{m_d}{v} = \rho(1-\xi) = \frac{\rho}{1+\eta} \quad (4.4)$$

Maddelerin, malzeme içindeki su yoğunluğu (k) ile ilişkilendirilebilecek birçok parametresi olmasına rağmen, (4.3) için, açıkça görülebileceği gibi maddenin yoğunluğunun da (ρ) “ ζ ” üzerinde nem miktarı kadar etkisi vardır. Malzemenin yoğunluğu mikrodalga tekniği ile nem ölçümü konusunda kritik bir öneme sahiptir çünkü malzemenin yoğunluğu da elektromanyetik dalgayı etkiler. Elektriksel metotlar ile k elde edildiğinde malzemenin nemliliğinin bulunması için ρ 'nin de bilinmesi gerekmektedir. Bu bilgi, kalibrasyon ölçümleri sırasında yada farklı yoğunluk ölçümleri ile elde edilebilir. Örnek olarak malzemenin yoğunluğu geleneksel metotlarla yada γ -ışınları ile ölçülebilir. Üçüncü bir metot da malzemenin kendi yoğunluğunu herhangi bir şekilde içermeyecek bir fonksiyon seçmektir. Bu şekilde yoğunluktan tamamen bağımsız, en azından etkisini minimize edecek bir fonksiyon belirlenmelidir. Sadece elektriksel ölçümler ile malzemenin nemliliğinin tayin edilmesi pratik kullanım açısından fayda sağlayacaktır. Birçok durumda malzemenin kuru yoğunluğu elektromanyetik dalgaları lineer olarak etkilerken nemli malzemeler ile elektromanyetik dalgalar arasında lineer olmayan bir ilişki söz konusu olabilmektedir. Böyle durumlarda kalibrasyon ölçümleri malzemenin kuru durumu için yapılırken farklı endüstriyel sahalarda kullanılmak üzere malzemenin nemli durumları da göz önünde bulundurulmalıdır. Nem ölçümü için kullanılan standart metotlar (4.1) ve (4.2)'de görülen, laboratuvar koşullarında bilimsel dokümantasyon doğrultusunda gerçekleştirilen direkt metotlardır. Çoğunlukla malzemenin nemli kütlesi ile kuru kütlelerinin manuel olarak ölçülerek karşılaştırılması metodu ya da kimyasal bir metot olan titrasyon yöntemi(Karl Fisher metodu) kullanılmaktadır. Kurutma metodu zaman ve gerekli ısının sağlanması için optimum koşulları gerektirir. Standart metotlar hassasiyet açısından güvenilirdir fakat hızlı bir ölçüm sağlayamazlar. Bazı ölçümlerde malzemenin kurutulması için birkaç gün gibi uzun bir zaman gerekebilir. Nem ölçümünün seri bir

şekilde yapılması gereken durumlarda endirekt metotlar, direkt metotlara göre daha çok tercih edilmektedir ve elektromanyetizmanın malzemenin özelliklerini algılama için kullanılması metodu bunlardan biridir.

Elektromanyetik dalganın nemli bir malzeme ile etkileşimi, elektromanyetik dalganın dielektrik ortamdaki yayılım sabitinin kompleks kısmının bir ifadesi olarak alınır.

$$\gamma = \alpha + j\beta = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon - p} \quad (4.5)$$

Formülde $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ ifadesi ortamın geçirgenliğini ifade eder. ϵ' dielektrik sabiti, ϵ'' kayıp faktörünü gösterir. Ayrıca $p = (\lambda/\lambda_c)^2$, λ ve λ_c sırasıyla boşluğun ve malzemenin dalga kılavuzu kesim dalga boyunu göstermektedir. (4.5) yayılım sabitinin iki bileşeni için aşağıdaki şekilde çözülebilir.

Genlik sabiti için

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon' - p}{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon' - p}\right) - 1} \text{ [Np/m]} \quad (4.6)$$

Faz sabiti için

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon' - p}{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon' - p}\right) + 1} \text{ [rad/m]} \quad (4.7)$$

Boşlukta, yani $p = 0$ olduğu durumda, nemli malzeme ile elektromanyetik alan arasında aşağıdaki eşitlikler, $\epsilon'^2 \gg \epsilon''^2$ kabulü yapılarak kullanılabilir.

$$\alpha \approx \frac{\pi\epsilon''}{\lambda\sqrt{\epsilon'}} \quad \beta \approx \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'} \quad |\Gamma| = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 1} \quad (4.8)$$

ifadeleri kullanılabilir.

Bu ifadelerde “ Γ ” nemli yüzey üzerinden gerilim yansıma katsayısıdır. Daha pratik bir hesap ve ölçümlerle,

$$A = 20 \log |\tau| = 8,686 \alpha d \text{ [dB]} \quad (4.9)$$

Ve

$$\theta = (\beta - \beta_0) d = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{\epsilon'} - 1) + n360 \text{ [deg]} \quad (4.10)$$

Eşitlikleri elde edilir. “ A ” dB cinsinden dalga genliğini, “ θ ” derece cinsinden faz farkını; “ β_0 ” boşluğun faz sabitini, “ n ” elektromanyetik dalga boyunun malzemenin kalınlığının (d) çok altında olduğu durumlarda bulunması gereken bir sabiti ve $|\tau| = \exp(-\alpha d)$ ifadesi de malzemenin iletim katsayısını (transmission coefficient) gösterir. “ n ” sabitini bulabilmek için kalibrasyon ölçümleri aynı malzemenin farklı yoğunlukları için tekrarlanmalı yada ölçümler farklı frekanslar için yapılmalıdır. Yukarıdaki eşitliklerden de açıkça görüldüğü gibi malzeme içindeki nem miktarı, malzemenin elektromanyetik geçirgenliğini doğrudan etkilemektedir. Malzemenin elektromanyetik dalgaya cevabının sıcaklık, malzemenin yoğunluğu, şekli, parçaların yerleşimi, kimyasal özellikleri ile değiştiği de doğrudur. Asıl sorun ise burada başlamaktadır.

$$\alpha \approx \frac{\pi \epsilon''}{\lambda \sqrt{\epsilon'}} \quad \beta \approx \frac{\pi \sqrt{\epsilon'}}{\lambda} \quad |\Gamma| \approx \frac{\sqrt{\epsilon' - 1}}{\sqrt{\epsilon' + 1}} \quad (4.11)$$

Yukarıdaki eşitliklerden de görüldüğü gibi “ α ” ve “ β ” değerleri malzemenin elektromanyetik geçirgenliği ile doğrudan ilişkilidir. İncelemeye alınan malzemenin dielektrik sabiti, malzemenin nemliliği (ζ), yoğunluğu (ρ) ve sıcaklığı (T) ile değişir. Bu tanım şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \alpha &= \psi_1(\zeta, \rho, T) \\ \beta &= \psi_2(\zeta, \rho, T) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Eşitlik (4.3)'deki tanım ve (4.8) ve (4.9)'daki ifadeler sonucu yayılım sabitinin bileşenleri ölçülebilen terimler olan “ A ” ve “ φ ” cinsinden kolaylıkla ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} A &= \Phi_1(k, G, t) \\ \varphi &= \Phi_2(k, G, t) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Bu iki eşitlik su ve malzemenin yoğunluklarının ölçülebilir büyüklükler cinsinden ifade edilmesini sağlar.

$$\begin{aligned} k &= \Psi_1(A, \varphi, T) \\ g &= \Psi_2(A, \varphi, T) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Genel olarak düşünüldüğüne bu işlem son derece zor ve karmaşık bir probleme dönüşürken malzemelerin nemlilikleri söz konusu olduğunda bu işlem diğerlerine göre daha da kolaylaşır. Sonuç olarak nemlilik düzeyi sadece dalga değişkenlerini barındıran şu ifadeyle gösterilebilir.

$$\xi = \frac{\Psi_1(\alpha, \varphi, T)}{\Psi_1(A, \varphi, T) + \Psi_2(A, \varphi, T)} \quad (4.15)$$

“ A ”, “ φ ” ve sıcaklık “ T ” deneysel olarak bulunabilir. Ayrıca ıslak malzemenin yoğunluğu:

$$\rho = \Psi_1(A, \varphi, T) + \Psi_2(A, \varphi, T) \quad (4.16)$$

şeklinde aynı formülde hesaplanabilir. Böylece nemli malzemenin yoğunluğu ölçümü etkileyen bir büyüklük olmaktan çıkar fakat yine de farklı teknolojik süreçler için kullanılmak üzere bu yoğunluk ölçülebilir. Eşitlik (4.12) ile eşitlik (4.13) arasındaki bağlantının kurulması işlemine “ölçüm düzeneğinin kalibrasyonu” adı verilir. Elektromanyetik dalgalara ait iki değişkenin farklı iki frekansta ölçülmesi, bize toplam dört değişkeni yani nemlilik miktarı ξ , yoğunluk ρ , maddenin sıcaklığı T , ve malzemenin kalınlığını d , hesaplama şansını verir. Kalibrasyonun daha doğru ve etkin

yapılabilmesi için farklı metotlar kullanılabilir. Yapay sinir ağları bu konu için oldukça kullanışlı görülmektedir.

Malzemenin yoğunluğundan bağımsız bir nemlilik fonksiyonu pratik uygulamalar için önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu konudaki çalışmaların amacı malzemenin nemliliğinin ξ , yoğunluktan bağımsız olacak şekilde aşağıdaki gibi bir ifade ya da fonksiyon bulunmasıdır.

$$\xi = a_1 + b_1\chi \text{ ya da } \xi = a_2 + b_2\sqrt{\chi} + b_3\chi \quad (4.17)$$

A ve φ arasındaki ilişki başlı başına bir ifade oluşturmaktadır.

$$\chi = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1} \quad (4.18)$$

Görülmektedir ki (4.15) nolu ifade aşağıdaki kayıp faktörü ifadesinin bir parçasıdır.

$$\frac{A}{\Phi} = c \tan \delta \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\sqrt{\varepsilon' - 1}} \quad (4.19)$$

İfadede $\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ ve “c” bir sabiti ifade etmektedir.

Eşitlik (4.8) de yer alan ifadede yer alan değişkenler malzemenin kalınlığı ile değiştiği için (4.16) da yer alan malzemenin yoğunluğundan bağımsız ifadenin malzemenin kalınlığından da bağımsız hale getirilerek nemlilik ile ilişkilendirilmesi mümkündür.

Normalize edilmiş $\frac{\varepsilon'}{\rho}$ ve $\frac{\varepsilon''}{\rho}$ değişkenleri ile aşağıdaki, yoğunluktan bağımsız ifade elde edilebilir.

$$\frac{\varepsilon''}{\rho} = \alpha_f \left(\frac{\varepsilon'}{\rho} - b_0 \right) \quad (4.20)$$

İfadede yer alan α_f terimi yukarıdaki eğrinin eğimini göstermektedir ve sadece çalışma frekansına bağlı olarak değişir. b_0 tüm frekanslar için aynı olan ve normalize edilmiş yoğunluk için malzemenin sıfır nemlilikteki elektromanyetik geçirgenliğini ya da malzemenin çok düşük sıcaklıktaki elektromanyetik geçirgenliğini göstermektedir. Bu işlem malzemeye ait yoğunluk ve nemliliğin eşzamanlı ölçümüne olanak tanıdığı için malzemenin nemliliği (4.17) kullanılarak bulunabilir.

Yoğunluktan bağımsız nemlilik ölçümü eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

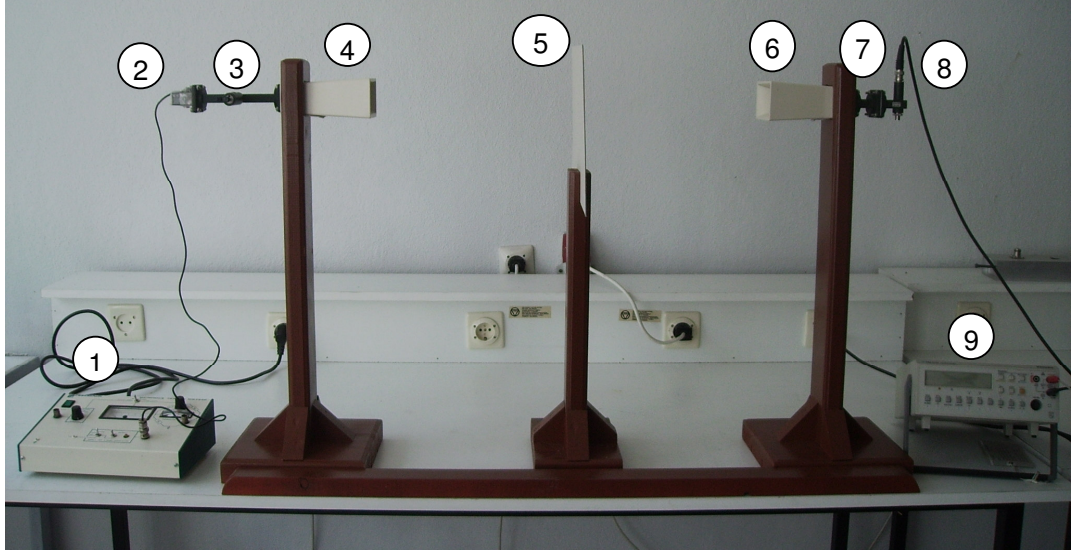
$$\chi = \sqrt{\frac{\tan \delta}{\rho}} = \sqrt{\frac{a_f b_0 \tan \delta}{a_f \varepsilon' - \varepsilon''}} \quad (4.21)$$

DeneySEL göstergelere bakıldığında yukarıdaki ifadede yer alan büyüklüklerin farklı uygulamalar için yakın değerler içerdiğini görülmektedir. Hatta ifadede yer alan “ $a_f b_0$ ” büyüklüğü sadece frekansa bağlı olarak değişmektedir.

4.2 Mikrodalga Metodu ile Tahribatsız Nem Ölçümü

Mikrodalga zayıflama metodu ile nem ölçümü iki şekilde gerçekleştirilebilir. Birincisi malzemenin yansıyan mikrodalga gücünün ölçülmesi ikincisi malzemenin içinden geçen mikrodalga gücünün ölçülmesidir. Birinci yöntemde suyun mikrodalgayı yansıtması ikinci yöntemde soğurması prensibi kullanılmaktadır. Yansıma metodunda ölçümlerin dış etkenlerden daha çok etkilenmektedir. Bu nedenle çalışmada bu metod benimsenmemiştir.

Mikrodalga metodu ile tahribatsız nem ölçümü tekniğinin uygulaması endüstride sıkça kullanılan karton kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğindeki tutucu bacaklar, bu bacaklardan yansıyacak mikrodalgaları engelleyebilmek için ağaç malzemenin yapılmıştır. Mikrodalganın ortamdan etkilenmesini engellemek ya da en aza indirmek için de uygulayıcı hornlar ve örnek malzeme yükseğe konumlandırılmıştır.



Şekil 4.1 Deney düzeneği

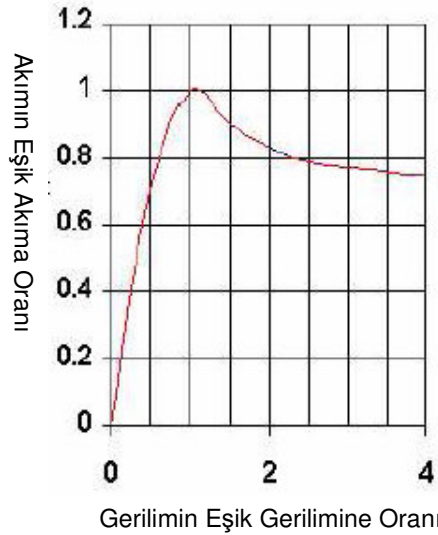
Deney düzeneğinde yukarıda numaralandırılmış elemanlar aşağıda belirtilmiştir.

- 1) Gunn Osilatörü Beslemesi
- 2) Gunn Osilatörü
- 3) Zayıflatıcı
- 4) X Bandı Horn (Verici tarafı)
- 5) Malzeme örneği
- 6) X Bandı Horn (Alıcı tarafı)
- 7) Dalga kılavuzu
- 8) Detektörlü sonlandırıcı
- 9) Multimetre

Deney düzeneği şekildeki gibi hazırlanmıştır. Mikrodalga üretici olarak “Gunn Osilatörü” kullanılmıştır. Gunn Osilatörü pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Lokal osilatör olarak, klistron yerine, radyo dalgaları üretilmek için, askeri alanlarda, radar sinyalleri gibi birçok uygulamada tercih edilmektedir. Gunn osilatörleri Galyum Arsenidin negatif rezistans özelliğini kullanan “TED (Transferred Electron Oscillator)” olarak tanımlanır. Yeterli gerilim uygulandığında N tipi GaAr’deki elektronlar yüksek

hızlı elektron bölgesinden düşük hızlı elektron bölgesine hareket eder. GaAr'ğin özelliği olarak bu DC güç mikrodalga güce dönüşür.

Aşağıdaki şekilde tipik bir Gunn diyotunun gerilim-akım karakteristiği görülmektedir. Diyoda uygulanan gerilim arttığında akım da artmaktadır. Fakat eşik geriliminden sonra negatif rezistans özelliği nedeniyle akım değeri düşmektedir. Kullandığımız sistem 10.1 GHz'lik mikrodalga sinyalleri üretmektedir.



Şekil 4.2 Gunn Diyodu Karakteristiği

Gunn osilatörüne bir de zayıflatıcı bağlanmıştır. Bu zayıflatıcı ile mikrodalga sinyalin gücü kontrol edilmiştir. Sistem, boшта iken (hornlar arası boş durumda) çıkışın belirli bir değere getirilmesinde zayıflatıcı kullanılmıştır. Çıkış gücünü düşürmek için osilatörün beslemesi de ayarlanabilirdi fakat beslemenin çıkış gücü ayarlanamadığı için zayıflatıcı kullanılmıştır.

Zayıflatıcının ardına ise verici horn bağlanmıştır. Verici hornun tam karşısına da alıcı horn yerleştirilmiştir. Hornlar arasına da malzeme yerleştirilmiştir. Her bir hornun malzemeye olan uzaklığı 30 cm olarak ayarlanmıştır. Horn-malzeme arası uzaklık ayarlanırken ilk kısımlarda anlatıldığı gibi pratik uygulamada açık alan ölçümü yapılacağı düşünülmüştür. Horn ağzının ölçüleri 4 cm x 2 cm olarak ölçülmüştür. Kullanılan frekans için dalga boyu 2,9 cm olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerle açık alan uzaklığının sağlanması için 30 cm değeri seçilmiştir.

Alıcı horn hazırlanan düzeneğe sabitlenmiştir fakat hornun çıkışına dedektörün bağlanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle horn çıkışına bir dalga klavuzu yerleştirilmiştir.

Dalga klavuzu çıkışına dedektörlü sonlandırıcı bağlanmış ve bu sonlandırıcı da multimetreye bağlanmıştır. Bu sistemde olması gereken mikrodalga gücünün ölçülmesidir fakat gerekli tehzizatın çalışmaması nedeniyle Multimetre yardımıyla dedektör üzerindeki gerilim miktarı ölçülmüştür.

Sistem boş durumda iken, sistemin ürettiği gerilim ve akım değerleri Gunn Diyodu Beslemesi ve Zayıflatıcı kullanılarak sabit bir değere ayarlanmıştır. Malzemelerin kuru kütlesi hassas ölçüm aleti ile tartıldıktan sonra hornlar arasına yerleştirilerek sistemin ürettiği gerilim ve akım değerleri önce malzemenin kuru olduğu durum için kaydedilmiştir. Daha sonra malzeme ıslatılarak kütlesi tekrar ölçülmüş ve malzemenin gerçek nemlilik değeri elde edilmiştir. Islanmış malzeme tekrar hornlar arasına konularak gerilim ve akım değerleri tekrar kaydedilmiştir. Bu işlem farklı malzemeler ve farklı nemlilik değerleri için tekrarlanmıştır. Bu işlem sonucunda her bir malzemenin kuru ve farklı nemlilik değerleri için sistemde baştakinden farklı olarak görülen gerilim değerleri kaydedilmiştir. Sistemin kalibrasyonu için gerçekleştirilen ölçümlerin ardından bir de test amaçlı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sonuçları, test değerleri ile karşılaştırılarak hata grafiklerine ulaşılmıştır.

Deney sonuçları Matlab programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Program deney sonuçlarını kullanarak en küçük kareler metodu ile grafikler oluşturmuştur. En küçük kareler metoduna yönelik bilgi eklerde bulunabilir. Grafikler, pratik uygulamalarda kullanım kolaylığı düşünülerek çoğunlukla birinci dereceden elde edilmiştir fakat bazı durumlarda ikinci dereceden grafik çizimleri de kullanılmıştır. Sistem boşta iken dedektör üzerindeki ölçülen gerilim değeri 147 mV ve akım değeri 52 μ A olarak ayarlanmıştır. Daha sonra malzemeler sisteme konularak sistemin oluşturduğu gerilim değerleri kaydedilmiştir.

Deney sonuçları değerlendirilirken detektör üzerinden ölçülen gerilim değerleri kullanılmıştır. İncelemelerde malzemenin sebep olduğu zayıflamanın kütle başına değeri, detektör üzerindeki gerilimin karesi ile işlem yapılması gibi farklı yöntemlerle deney sonuçları yorumlanmıştır. Tüm bu incelemeler hatanın en az olduğu yöntemin tespit edilmesine yöneliktir.

Ölçülen tüm değerler için sistemin ürettiği gerilim değeri ve gerçek nemlilik değeri biliniyordu. Test için yapılan ölçümlerde detektör üzerinde oluşan gerilim değerleri her bir yöntem için bulunan denklemde yerine konulmuştur. Çıkan sonuç sistemin bize verdiği nemlilik değeridir. Tüm test değerleri için bu işlem gerçekleştirilmiştir. Test değerleri ile elde edilen nemlilik değerleri, gerçek nemlilik değeri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu bize sistemin hatasını vermektedir. Hatanın mutlak değerini alan bir histogram hazırlanmıştır. Yani negatif hatalar da pozitif olarak değerlendirilmiştir. Son bölümde deney sonuçları verilmiş ve farklı yöntemlerle değerlendirilmiştir.

4.3 Deneysel Sonuçlar

Deney sonucunda elde edilen verilerden kalibrasyon ölçümlerine yönelik olanlar Çizelge 4.1 (a)'da, kalibrasyonun testine yönelik ölçümler ise Çizelge 4.1 (b)'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 a) Kalibrasyon Ölçüm Değerleri

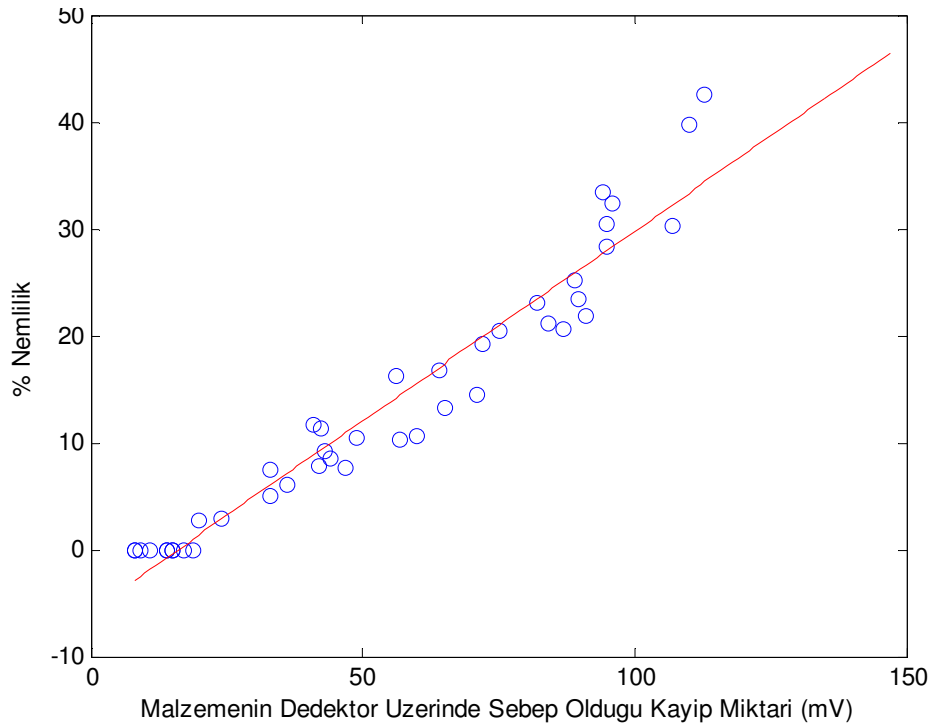
KALİBRASYON ÖLÇÜMLERİ				
Örnek No	İlk Kütle (gr)	Nemli Kütle (gr)	Nemlilik (%)	Dedektör Üzerindeki Gerilim (mV)
	0	0		147
1	68.1	68.1	0.00	133
1	68.1	71.47	4.95	114
1	68.1	74.86	8.46	103
1	68.1	75.08	10.25	90
1	68.1	77.9	14.39	76
2	79.28	79.28	0.00	130
2	79.28	87.5	10.37	98
2	79.28	94.6	16.80	83
2	79.28	96.05	21.15	63
2	79.28	99.3	25.25	58
3	68.2	68.2	0.00	132
3	68.2	74.4	7.62	100
3	68.2	84.1	21.85	56
3	68.2	87.57	28.40	52
4	79.14	79.14	0.00	128
4	79.14	84.9	6.01	111
4	79.14	87.5	10.56	87
4	79.14	95.5	20.67	60
5	76.2	76.2	0.00	133
5	76.2	106.5	39.76	37
6	76.2	76.2	0.00	138
6	76.2	81.9	7.48	114
6	76.2	88.6	16.27	91
6	76.2	99.4	30.45	52
7	67.6	67.6	0.00	139
7	67.6	75.5	11.69	106
7	67.6	84.2	24.08	65
7	67.6	90.2	34.43	54.9
8	67.6	67.6	0.00	139
8	67.6	69.4	4.66	127
8	67.6	74.8	9.17	104
8	67.9	80.9	19.15	75
8	67.6	96.4	44.60	34
9	79.1	79.1	0.00	136
9	79.1	81.4	4.91	123
9	79.1	88	11.25	104.5
9	79.1	95.3	20.48	72
9	79.1	103	30.21	40
10	78.6	78.6	0.00	132
10	78.6	84.8	7.89	105
10	78.6	89	14.23	82
10	78.6	104.1	34.44	51
10	78.6	97	24.41	57.4

Çizelge 4.1 b) Test Ölçüm Değerleri

TEST ÖLÇÜMLERİ				
Örnek Numarası	İlk Kütle (gr)	Nemli Kütle (gr)	Nemlilik (%)	Dedektör Üzerindeki Gerilim (mV)
1	76.6	76.6	0.00	134
1	76.6	80.6	5.22	114.5
1	76.6	86.6	14.05	87
1	76.6	96.8	26.37	53
1	76.6	106	38.38	44
2	78.5	78.5	0.00	133
2	78.5	84.7	7.90	107
2	78.5	90.2	14.90	75
2	78.5	94.6	20.51	63
2	78.5	100.7	28.28	45
3	77.3	77.3	0.00	134
3	77.3	84.8	8.41	100
3	77.3	88	14.84	75
3	77.3	90.5	17.08	67
3	77.3	99	28.07	48
4	77.8	77.8	0.00	132
4	77.8	84.8	6.43	107
4	77.8	88.2	14.37	84
4	77.8	95	24.11	57
4	77.8	108.8	39.85	33
5	76.2	76.2	0.00	133
5	76.2	81.7	7.22	104
5	76.2	88.6	16.27	87
5	76.2	98.4	29.13	52
5	76.2	105.8	38.85	43
6	76.6	76.6	0.00	134
6	76.6	81.4	6.27	112
6	76.6	86.4	14.79	88
6	76.6	94.8	24.45	64.4
6	76.6	104.7	34.07	47
7	77	77	0.00	132
7	77	84.2	8.05	103
7	77	91.1	18.31	77
7	77	101.8	34.21	42
8	78.4	78.4	0.00	133
8	78.4	85.4	8.93	102
8	78.4	90.9	15.94	69.7
8	78.4	94.9	21.05	52
8	78.4	96.7	24.34	54
9	78.5	78.5	0.00	132
9	78.5	85.3	8.66	100
9	78.5	93	18.47	65
9	78.5	94.8	20.76	55
9	78.5	99	26.11	48
10	76.9	76.9	0.00	133
10	76.9	84.3	9.62	101.4
10	76.9	87.5	14.78	91.6
10	76.9	91.8	19.38	73
10	76.9	96.2	25.10	58
10	76.9	101.3	31.73	51.3

4.3.1 Sonuçların Malzemenin Mikrodalgayı Zayıflatma Miktarına Göre Değerlendirilmesi

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde ilk olarak malzemenin sebep olduğu gerilim farkı kullanılmıştır. Şekil 4.3 (a)'da yer alan değerler Matlab programı yardımıyla grafiğe dökülmüştür. Kalibrasyon ölçümleri sonucunda değerlerin grafik üzerine dökümü ve bu değerler kullanılarak oluşturulan eğri aşağıda görülmektedir.

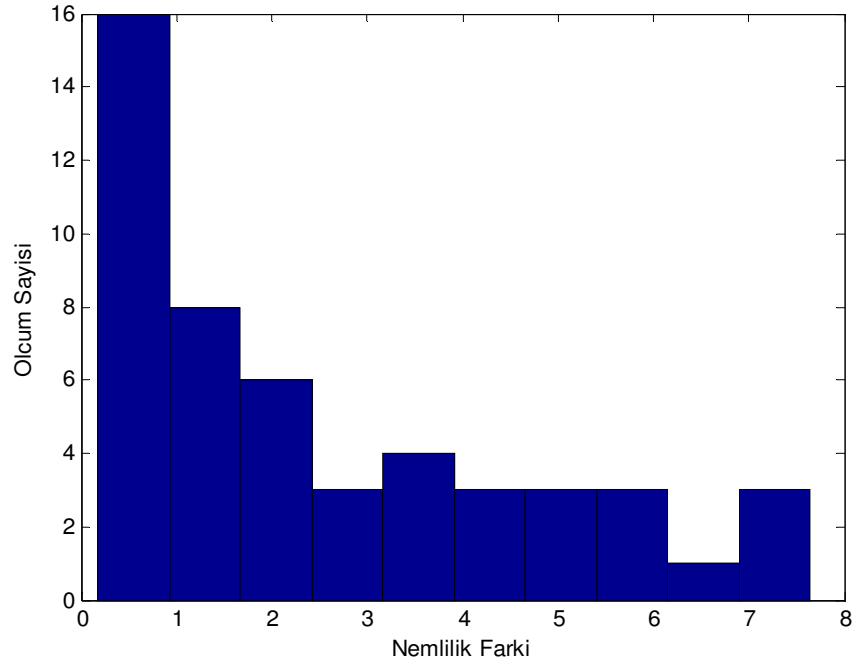


Şekil 4.3 (a) % Nemlilik-Malzemenin sebep olduğu kayıp grafiği

Grafikte yer alan eğrinin $y = A x + B$ denkleminde $A=0.3548$ ve $B= -5.6950$ olarak bulunmuştur. Bu eğri kalibrasyon ölçümleri ile çıkarılan egridir. Bu grafik kullanılarak test ölçümleri yorumlanmıştır.

Ölçülen tüm değerler için sistemin ürettiği gerilim değeri ve gerçek nemlilik değeri biliniyordu. Test için yapılan ölçümlerde detektör üzerinde oluşan gerilim değerleri yukarıdaki denklemde yerine konulmuştur. Çıkan sonuç sistemin bize verdiği nemlilik değeridir. Tüm test değerleri için bu işlem gerçekleştirilmiştir. Yukarıdaki denklem sonucunda elde edilen nemlilik değerleri, gerçek nemlilik değeri ile

karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu bize sistemin hatasını vermektedir. Hatanın mutlak değerini alan bir histogram hazırlanmıştır. Yani negatif hatalar da pozitif olarak değerlendirilmiştir. Bu histogram Grafik 4.3 (b)'de görülmektedir.

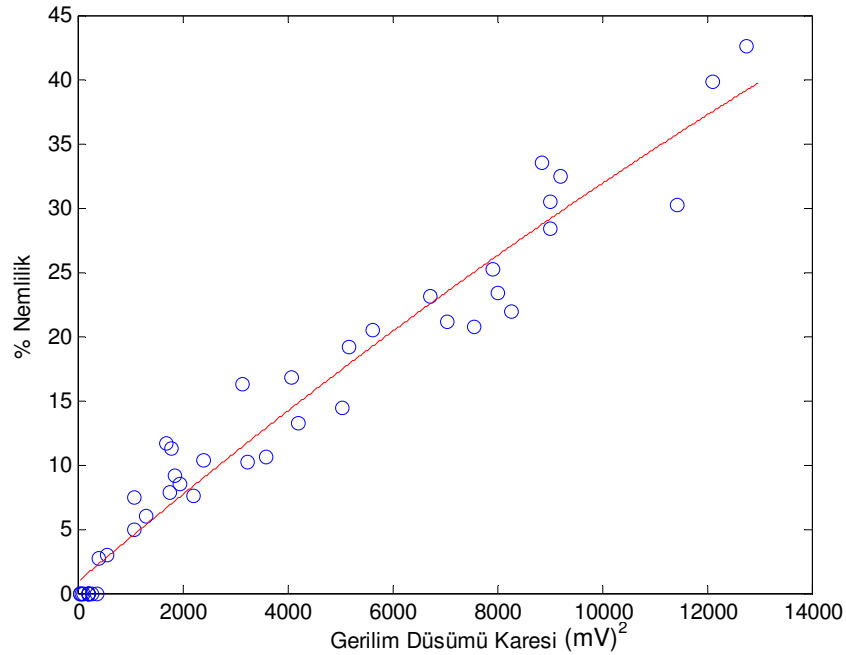


Şekil 4.3 (b) % Nemlilik-Malzemenin sebep olduğu kayıp grafiği hata histogramı

Histogramdan görüldüğü gibi ölçümlerin çoğu nemlilik olarak %1 hata ile gerçekleşmiştir. Kartonun üretimi sırasında nemlilik ölçümlerinde %5 hata kabul edilebilir bir hatadır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde %5'in üzerinde de hatalar olsa bile çok sayıda olmadığı görülmektedir. Daha iyi sonuçlar için deney sonuçları farklı biçimlerde de yorumlanmıştır.

4.3.2 Malzemenin Mikrodalgayı Zayıflatma Miktarının Karesi Alınarak İşlem Yapılması

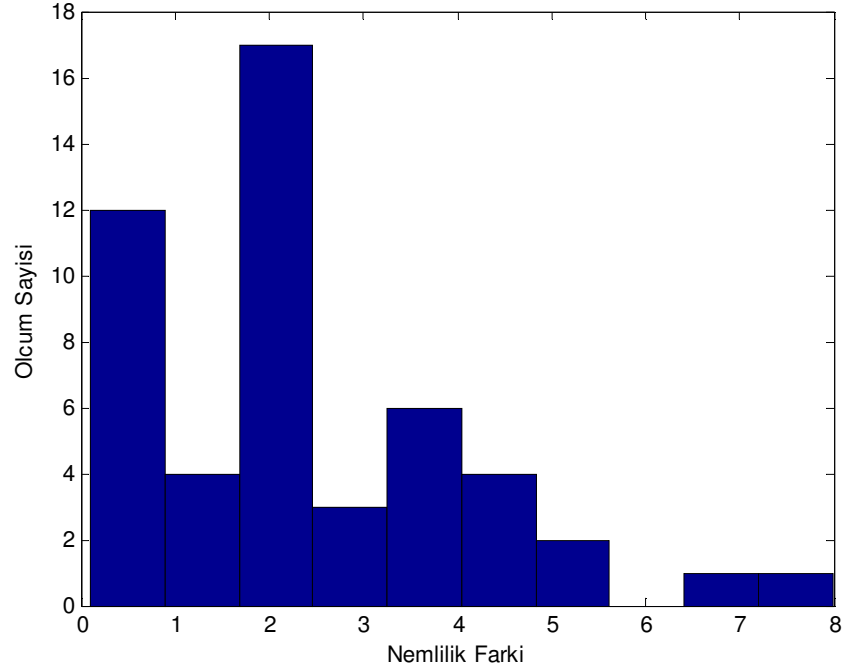
Mikrodalga ile tahribatsız nem ölçümü tekniğinde asıl prensip suyun mikrodalga gücü üzerindeki etkisidir. Dolayısıyla mikrodalga gücü ile işlem yapılması gerekmektedir. Mikrodalga gücünü ölçemediğimiz için detektör üzerindeki gerilimden faydalandığımızı önceki bölümlerde değinilmişti. Detektör üzerindeki gerilimin kaynağı mikrodalganın elektrik alanıdır. Mikrodalga gücünün ifadesinde de elektrik alanının karesi yer almaktadır. Bu nedenle deney sonuçları bir de detektör üzerindeki gerilimin karesi hesaplanarak gerçekleştirilmiştir. İlk kısımdaki yöntemle grafiksel işlemler bu kez de gerilim farkının karesi alınarak yapılmıştır. Aşağıda yer alan grafik ikinci dereceden oluşturulmuş grafiğe aittir.



Şekil 4.4 (a) % Nemlilik-Malzemenin sebep olduğu kaybın karesi

Grafikten görüldüğü gibi bu eğri $y = A x^2 + B x + C$ denklemini sağlamaktadır. x^2 'nin katsayısı çok küçük olsa bile etkisi vardır. Denklemdaki katsayılar $A = -3,6341e^{-8}$, $B = 0,0034642$ ve $C = 0,82216$ şeklinde bulunmuştur. Bir önceki yöntemde olduğu gibi

test değerleri bu fonksiyona uygulanmış ve çıkan sonuçlar nemlilik değerleri olarak kaydedilmiştir. Test ölçümlerindeki gerçek nemlilik değerleri ile bu sonuçlar arasındaki fark hata olarak değerlendirilmiş ve histogramı Grafik 4.4 (b)'de gösterilmiştir.



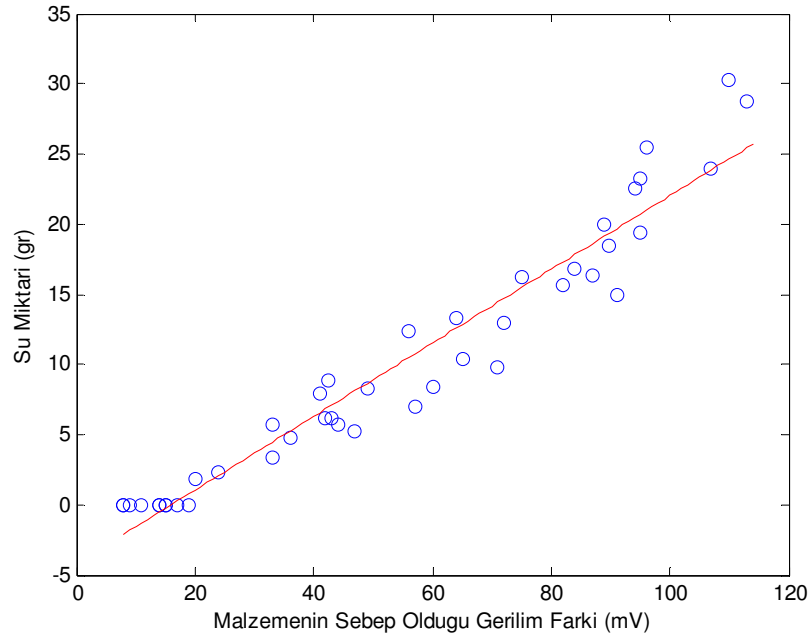
Şekil 4.4 (a) % Nemlilik-Malzemenin sebep olduğu kaybın karesi hata histogramı

Malzemenin sebep olduğu kaybın karesi alınarak işlem yapıldığında hata histogramı şekil 4.4 (b)'deki gibi olmaktadır. İlk histogramla kıyaslandığında %5 hatanın üzerinde daha az değer olduğu görülmektedir. Fakat bu yöntemde birinci dereceden lineer bir eğri değil ikinci dereceden bir eğri oluşturulmuştur. Sonuçların karesi alınarak değerlerin yorumlanması endüstriyel uygulamalar açısından daha doğru sonuç vermesine rağmen daha az pratiktir.

4.3.3 Malzemenin İçerdiği Gerçek Su Miktarı ile Malzemenin Sebep Olduğu Gerilim Düşümünün İlişkilendirilmesi

Nemlilik malzemenin kütlesiyle, içinde barındırdığı su kütlesinin oranıdır yani oransal bir ifadedir. Malzemede değişen ve mikrodalga enerjisini yoğun olarak absorbe eden ise su kütlesidir. Bu nedenlerle sonuçlar bir de mikrodalga enerjisini sönmleyen

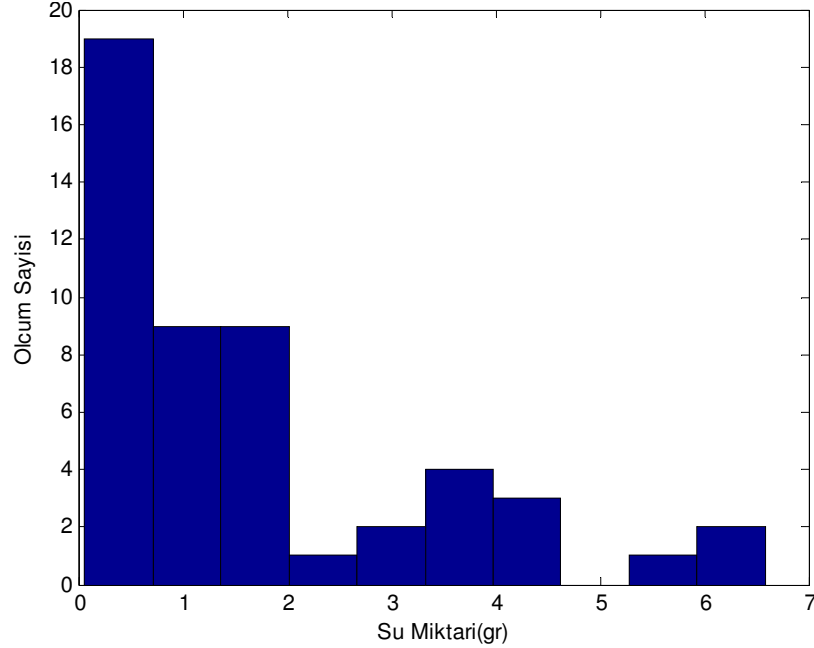
toplam su miktarı kullanılarak yorumlanmıştır. Malzemelerin ilk durumdaki nemliliği bilinmekteydi. Dolayısıyla malzeme örneğinin içinde barındırdığı kütleli su miktarı da bilinmektedir. Deneyde kullanılan malzemelerin kütleleri tamamen aynı değildir. Pratik uygulamalarda da tüm örneklerin aynı kütlede olması ihtimali düşüktür. Bu nedenle aynı nemlilik düzeyi aynı olan iki farklı örnek farklı miktarda su içerebilmektedir. Bu nedenle deney sonuçları bu kez de su kütleleri kullanılarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.5 (a) Malzemenin içerdığı su miktarı-Malzemenin sebepl olduğu kaybın karesi

Malzemenin içerdığı su miktarı ile detektör üzerinde gözlemlenen gerilim düşümü arasında Şekil 4.5 (a)'daki gibi bir ilişki gözlemlenmiştir. Fonksiyonun katsayıları $A=0.2622$ ve $B=-4.1941$ şeklinde olmuştur. Ölçümlerde kullanılan malzemenin kuru kütlesi 68 gr ile 80 gr arasında örnekler içermektedir. Test sonuçları, fonksiyona uyduğunda ortaya çıkan histogram Şekil 4.5 (b)'de görülmektedir.

Bu yöntemde malzemenin içerdığı toplam su miktarı hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu değerden nemliliğe geçilebilmesi için malzemenin kütlesinin de bilinmesi gerekmektedir. Eğer kütlenin ölçülmesi mümkün ise sonuçlar kütle değerleri ile birleştirilerek nemlilik seviyesi hesaplanabilir. Nemliliğin hesaplanması için de sistem çıkışına bağlanacak bir mikro işlemcinin bu işlemi gerçekleştirmesi gerekmektedir.



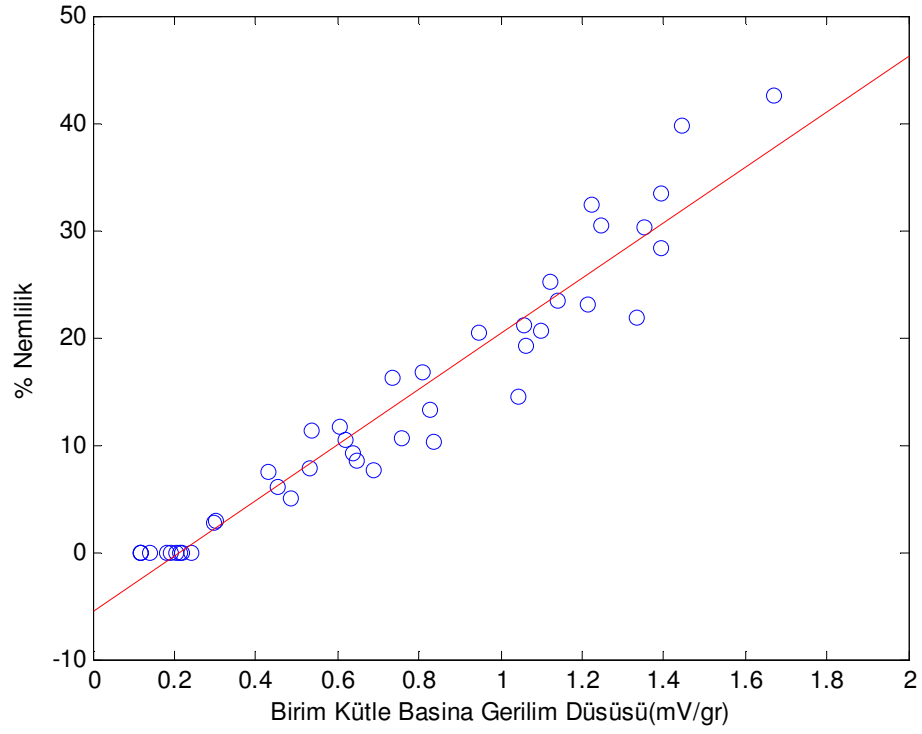
Şekil 4.5 (b) Malzemenin içerdiği su miktarı-Malzemenin sebep olduğu kaybın hata histogramı

4.3.4 Malzemenin Sebep Olduğu Kaybın Kütle Başına Değeri

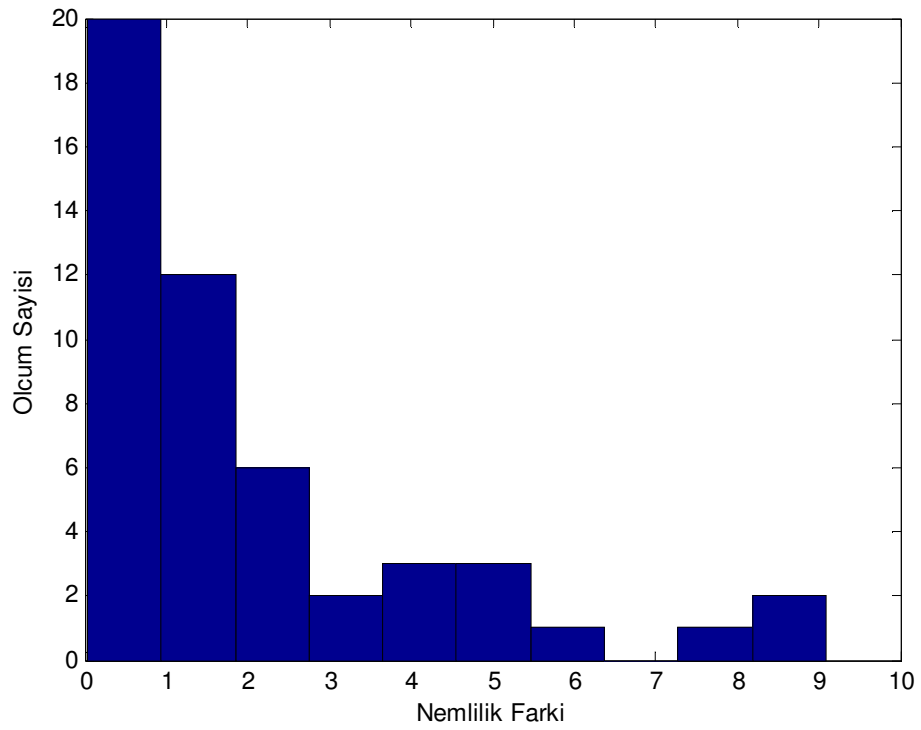
Kullandığımız malzeme örneklerinin tam olarak birbirlerinin aynı özellikleri göstermediğinden bahsetmiştik. Bu durum mikrodalga soğurulma büyüklükleri de etkilemektedir. Bu nedenle malzemenin sebep olduğu mikrodalga zayıflamasının kütle başına değeri bulunmaya çalışılmıştır. Bu işlem için malzemenin sebep olduğu kayıp, malzemenin kütlesine bölünmüştür. Bu sayede farklı kütleli malzemeler bile olsa kütle başına zayıflatma değerleri ile kütlelerin sonuçları etkileyici etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Şekil 4.6 (a) bu yöntemle ait sonuçları göstermektedir. Grafikte x eksenini malzemenin sebep olduğu zayıflama miktarının, malzemenin kütlesine oranını göstermektedir. Önceki metotlarda olduğu gibi değerler grafik üzerine aktarılmış ve sonuç olarak $y = A x + B$ eğrisi elde edilmiştir. Bu yöntem için $A=25.8461$ ve $B=-5.4610$ olarak bulunmuştur. Test sonuçları bir de bu değerler için yorumlanmıştır.

Şekil 4.6 (b)'de metotla ilgili hata histogramı görülmektedir. Histogram incelenirse kabul edilebilir hata oranı olan %5 değerinin üzerinde çok az ölçüm olduğu

görülür. Nemliliğin kütle başına hesaplanması diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç vermektedir denilebilir.



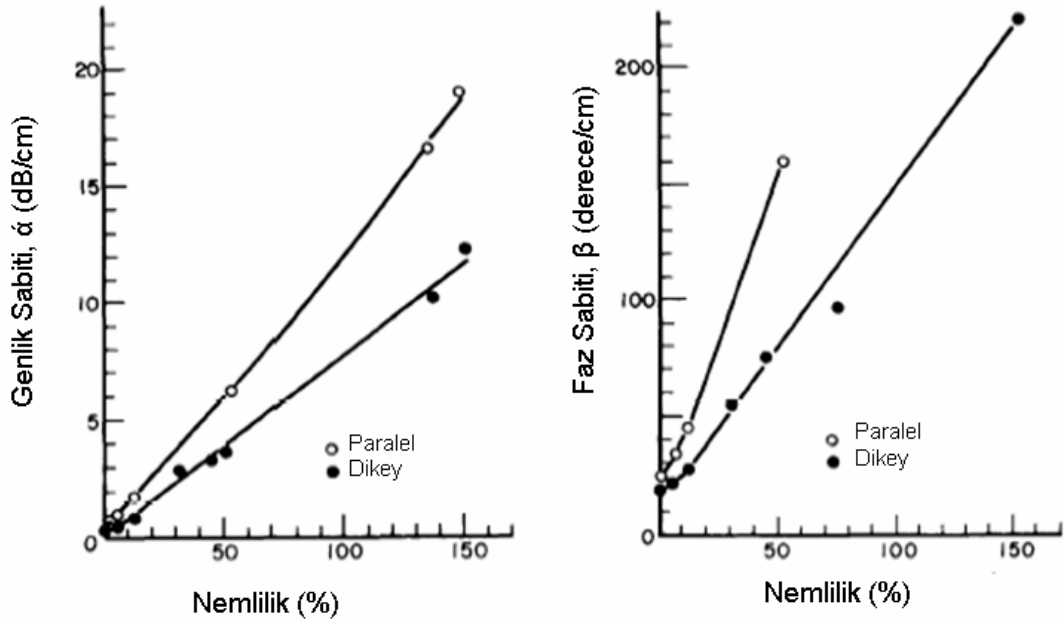
Şekil 4.6 (a) % Nemlilik-Kütle başına kayıp grafiği



Şekil 4.6 (b) % Nemlilik-Kütle başına kayıp hata histogramı

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Malzemelerin nemliliklerinin mikrodalga ile ölçümünde mikrodalgaların fazını ölçecek teçhizatın bulunmayışı sebebiyle sadece malzemenin sebep olduğu genlik zayıflatması üzerinde durduk. Yapılan çalışmaya benzer çalışmalardan William L. James'in çalışmasında ise hem genlik hem de faz ölçülebilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 5.1 Nemlilik miktarı-mikrodalga genliği ve fazı grafikleri (William L. James 1985)

Görüldüğü gibi nemlilik mikrodalganın genliğini etkilediği gibi fazını da değiştirmektedir. Yaptığımız çalışmanın daha iyi sonuç verebilmesi için mikrodalganın gücünü ve fazını ölçebilecek teçhizat kullanılmalıydı.

Malzemelerin nemliliklerinin ölçümü için birçok yöntem bulunmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda tercih edilen nemlilik ölçüm yönteminin ucuz, anlık değerler verebilen ve otomasyon sistemine dahil edilebilecek özelliklerde olması gerekmektedir. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında mikrodalga ile nemlilik ölçümünün birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Mikrodalga ile nemlilik ölçümü tekniği anlık değer vermesi ve otomasyon sistemlerine dahil edilebilmesi nedeniyle birçok uygulamada

kullanılmaktadır ve nemlilik ölçümüne ihtiyaç duyulan alanlarda kullanımının artacağı düşünülmektedir.

Yapılan çalışmada mikrodalga metodu ile tahribatsız nemlilik ölçümünün nasıl yapılabileceği konusunda fikir sahibi olunmuştur. Mikrodalga ile tahribatsız nem ölçümü tekniğinin kullandığımız malzeme olan preslenmiş karton için endüstriyel uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilmesi görülmüştür. Kağıt üretim sektöründe hammaddenin nemliliğinin kritik öneme sahip olduğu bilinmektedir. Ülkemizde ise bu sektörde henüz profesyonel anlamda bir uygulama ile karşılaşılmaamıştır.

Çalışma sırasında ölçümleri etkileyen bir dizi etkenle de karşıya kalınmıştır. Öncelikle mikrodalga tekniği ile tahribatsız nem ölçümü tekniğinde mikrodalgaın gücünün ölçülmesi kritik bir öneme sahiptir. Çalışma sırasında ise gücün ölçülmesi mümkün olmamış, bunun yerine sistemde detektörlü sonlandırıcı kullanılarak detektör üzerinde oluşan gerilim değerleri kullanılmıştır. Daha sağlıklı sonuçlar alınması için endüstriyel bir uygulamada mikrodalgaın gücünün ölçülmesi yerinde olacaktır.

Sistemin endüstriyel uygulamasında kalibrasyon ölçümlerinin nasıl yapılacağı da bir problem teşkil etmektedir. Kalibrasyon amacıyla gerçek nemlilik oranlarının bilindiği bir dizi örnek alınarak sistemin bu örneklerle vereceği tepkiler kaydedilmelidir. Bu işlem ise sisteme bir de otomasyon kısmının eklenmesi ile mümkün olabilir.

Hataları etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bu tip bir çalışmada öncelikle ölçüm yapılan teçhizatın son derece kararlı olması gerekmektedir. Küçük farklar bile sistemin hatasını etkilemektedir. Ayrıca ölçüm yapan kişilerin de işlerinde son derece dikkatli olması gerekmektedir. Yapılan çalışmada sonuçların gözlenmesi için son derece dikkatli davranılmıştır fakat kullanılan cihazların doğru sonuçlar alınması için gerekli yeterliliğe sahip olmadığı şüphesi bulunmaktadır. Kullanılan gunn osilatörü beslemesinin kontrol edilememesi nedeniyle zayıflatıcı kullanıldığından bahsetmiştik. Aynı şekilde ölçüm yapılan multimetre de doğru sonuçlar vermiyor olabilir.

Çalışma sırasında deney yapılmasının yanında sonuçların ne şekilde yorumlanacağına da önemli olduğu görülmüştür. Endüstriyel bir uygulamada nemliliği ölçülecek malzemenin özelliklerine göre sonuçların nasıl yorumlanacağına karar verilmelidir. Örneğin sistemde kullanılan malzeme örneklerinin kütleleri birbirinden farklı ise bu etkininin ortadan kaldırılması için önlem alınmalıdır. Böyle bir durumda

sistemin çıkışı birim kütle için yorumlanabilir. Sistem çıkışını etkileyebilecek diğer etkenler için de gerekli önlemler alınmalıdır.

Mikrodalga tekniği, γ -ışınları yada kızıl ötesi dalgalarla (IR) bir malzemenin özelliklerini tayin etmek son derece kullanışlı bir metottur çünkü malzemeye herhangi bir etkide bulunmaz yada zarar vermez. Bu yolla malzemenin içerdiği su miktarının bulunması yani nemliliğinin tayin edilmesi de mümkündür ve endüstriyel uygulamalar için son derece kullanışlıdır. Bu konuda IR dalgaları ve mikrodalga radyasyonla ölçüm teknikleri birbirine rakip konumundadır. Her iki metot da hasarsız ölçüm tekniğini kullansa da bazı temel farklılıkları mevcuttur: IR dalgaları, malzeme içindeki hem serbest hem de bağlı su tarafından absorbe edilir, buna karşın mikrodalgalar sadece serbest su molekülleri tarafından absorbe edilir ki bu pratik uygulamalar için daha elverişlidir.

IR dalgaları için bir diğer kısıtlama da diğer yönteme göre daha kısa olan malzemeye nüfuz edebilme yeteneğidir. IR dalgaları tipik olarak birkaç milimetre derinliğe inebilmekteyken bu mesafe örneğin X bandındaki mikrodalgalar için beş santimetre civarındadır. Düşük frekanslı elektriksel metotların önemli bir dezavantajı da organik maddeler tarafından emilememesidir.

Araştırmalar göstermiştir ki megahertz mertebelerinde zayıflama malzemenin içerdiği su miktarından çok kimyasal özelliklerine bağlı olan iyonik davranışı tarafından belirlenmektedir.

Bütün bu dezavantajları sebebiyle IR dalgaları bu tip ölçümler için kullanışsız kabul edilmekte, bunun yerine diğer tüm metotlara karşı üstünlükleri bulunan mikrodalga tekniği kullanılmaktadır.

6. KAYNAKLAR

AKMAN, A., GÜLER, S., SÜLE, O., OKTAY, A., 2002, Endüstriyel malzemelerin nemlilik oranının mikrodalga tekniği ile tayini. ELECO2002, 18-22 Aralık 2002, Bursa

GÖKSOY, O. E., KURT, E., 2001, Gıdaların ısıtılmasında mikrodalga kullanımı, İstanbul Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 27(1), s 301-307,

ADNAN GÖRÜR, CEYHUN KARPUZ, ve MUSTAFA ALKAN, 1998, Characteristics of periodically loaded CPW structures, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol.8, No.8, p.278-280.

JAMES, WILLIAM L.,1985, A Microwave Method for Measuring Moisture Content, Density, and Grain Angle of Wood. US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory FPL 0250

KRASZEWSKI, A.W, TRABELSI, S. and NELSON, S.O., 1996, Moisture content determination in grain by microwave parameters measurement., Symposium on Antenna Tech. and Applied Electromagnetics, August 6-9, Montréal, Canada.

KRASZEWSKI, A., 1980 Microwave aquametry – A review., Journal of Microwave Power, vol.15, no.4.

KRASZEWSKI, A. and LAWRENCE, K.C., 1999, Collection of Papers for the Third Workshop on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances.

KUPFER, K., KRASZEWSKI, A., and KNOEHEL, R., 2000, Sensors Update, v.7: RF and Microwave Sensing of Moist Materials.

MDT-Microwave Device Technology gunn diode MO87149-1manual, 2003

OKAMURA, S., MA, Z., 1998, Moisture content measurement by microwave and problems. Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 1998. ICMMT '98. 1998 International Conference on, p 189–192

T. T. MEEK, R. D. BLAKE, and J. J. PETROVIC, 1987, Microwave Sintering of Al₂O₃ and Al₂O₃-SiC Whisker Composites'', Ceram. Eng. Sci.Proc. 8[7-8] 861-71.

WARNAGIRIS, T., 2000, Liquid Sensing at Radio Frequencies, Microwave Journal. vol. 43-9,. pp. 140-150.

ZAZUZETA, S. Fedro, XIN, J., 1994 Soil moisture sensor. Bull. 292. Fl. Coop. Extension Serv. IFAS, University of Florida, Gainesville.

7. EKLER

Ek-1 Suyun Dielektrik Özellikleri

Suyun saf hali ile içinde eriyikler bulunduğu ve bağlı olduğu durumlardaki dielektrik özellikleri birbirinden çok farklıdır. Örneğin damıtık suyun iyi bir dielektrik olmasına karşın deniz suyu iyi bir iletken (1Mhz den yüksek frekanslar deniz suyuna nüfuz edemezler). Yine saf suyun, serbest su veya kılcal su hallerinde önemli dielektriksel farklılık gösterir.

Su molekülleri sürekli bir dipol momente sahip ve kütleleri hafiftir. Ayrıca molekülleri pozitif ve negatif yüklerin dağılımları simetrik olmadığından bir elektriksel alanın uygulanmasıyla bu yükler alan doğrultusunda dizilirler ve elektronik kutuplanma meydana gelir. Tablo 4.2’de görüldüğü gibi, pozitif sıcaklıktaki suyun dielektrik kayıpları 10GHz’e kadar frekansla artmaktadır. Buna karşılık verilen bir frekans için kayıplar sıcaklıkla azalmaktadır.

Suyun sıcaklığı -1C olduğu zaman, santimetrik dalgalarda kayıp faktörünün çok küçük olmasına karşın, sıcaklık +1C iken kayıplar önemli ölçüde artmaktadır. Bundan dolayı nemliliği ölçülecek malzemenin sıcaklığı da önem kazanmaktadır. Tasarlanacak bir ölçüm cihazında sıcaklığın etkisinin ihmal edilmesi şüphesiz büyük bir hata olurdu.

Belirli sıcaklıklar ve frekanslar için serbest suyun dielektrik sabitesinin değerleri tabloda verilmiştir.

Tablo-4.1. ϵ'_r ve ϵ''_r ‘nin belirli frekans ve sıcaklıklardaki değerleri

Sıcaklık	-12°C		5°C		40°C		80°C		100°C		120°C		140°C	
Frekans MHz	ϵ'_r	ϵ''_r	ϵ'_r	ϵ''_r	ϵ'_r	ϵ''_r	ϵ'_r	ϵ''_r	ϵ'_r	ϵ''_r	ϵ'_r	ϵ''_r	ϵ'_r	ϵ''_r
27			85.5	1.88	73	4	59	6.5	55	7.8				
450			85	4.6	69.2	1.18	58	0.8	54	0.7	49	0.7	45	0.6
900			83	7	67.8	1.34	57	0.7	52	0.5	47	0.4	48	0.3
2000	1.2	0.03	80.2	22	74.8	6.5	62	1.2	56	4.4	52	2	48	1.5
10000			50	40	65	21	57	10	47	8				

Su içeren bir maddenin dielektriksel özelliği, su miktarı ve suyun maddenin yapısına bağlılık durumuna göre değişir. Mikrodalga bandında dielektrik maddelerin dielektrik özellikleri %1 yaklaşıklıkla ölçülebilir. Bir dielektrik madde kuru olduğu zaman dielektrik kayıpları 0.1 ile 0.3 arasında değiştiği halde bu dielektrik madde su içerdiğinden kayıplar 1'den büyük olur. Tablodan da görüldüğü gibi saf suyun iletkenliği sıfıra yaklaştığı halde dielektrik kayıplar çok artmaktadır.

Ek-2 En Küçük Kareler Yöntemi

En Küçük Kareler Yöntemi, basit doğrusal, çoklu regresyon modellerinin çözümlenmesinde kullanıldığı gibi, çok denklemlilikli ekonometrik modellerin çözümünde de kullanılan tekniklerin temelidir.

Kurulan regresyon modellerinde gözlemler, anakütle gözlem değerlerinden herhangi şekilde alınmış gözlemler olduğunu düşünürsek, aldığımız gözlem değerlerinden başka aynı sayıda olan fakat farklı olasılıklarla çok daha fazla gözlem alınabilmektedir. Kurulan regresyon modeli ilgilenilen problemle ilgili örnek olarak alınmış gözlem değerleri kullanılarak hesaplanmaya çalışılır. Bu nedenle kurduğumuz modeldeki değerler tahmini değerler olacaktır. Tahmin edilmeye çalışılan sonuç değişkeni (Y) ve sebep değişkeni katsayıları (a ve b vs.) şapka olarak göstererek, tahmini regresyon denklemi yazılmaktadır. Şapka olarak gösterilen ve tahmin olarak adlandırılan katsayıların gerçek katsayılarla en yakın şekilde hesaplanması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en iyisi "En Küçük Kareler Yöntemi" olarak isimlendirilen yöntemdir.

Kurulan regresyon modeli, $Y = a + bX$ ise,

Regresyon tahmini modeli, $\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b}X$ olarak gösterilmektedir.

Tahmin modelindeki katsayıların hesaplanması ve katsayılarının problem kütle (ana kütle) iyi yansıtıyor mu, yani güvenliliğinin sınanması işlemleri sırasıyla gerçekleştirilecektir.

Regresyon analizi uygulamalarında, kurulan matematiksel modeldeki bağımsız değişken veya değişkenlerin bağımlı değişkeni ne oranda etkilediğine katsayılar dahilinde bakılır.

Regresyon analizi için kurulan modelde, bağımlı ve bağımsız değişkenin yanı sıra hata terimi olarak isimlendirilen değişken yer almaktadır. Hata teriminin modele alınma nedenlerinden bahsederek;

- Modele alınan Y ve X değişkenleri yapılan araştırmalarda yanlış ölçülmüş olabilir,
- Seçilen değişkenler Y ve X'ler hatalı sayıda alınmış örnekler olabilir,
- İster basit regresyon, ister çoklu regresyon modeline bakılıyor olsun, kurulacak modelde bağımlı değişkene (sonuç değişkeni), etki eden model dışında da bağımsız değişkenler (sebebe değişkenleri) olabilir.

Bu unsurlar genel olarak e_i hata terimi olarak alınır, minimum olması beklenir. Hata terimini minimum yapan yöntem en küçük kareler yöntemi olup, bu yöntem katsayı değerlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Basit doğrusal regresyonda kullanımı

$$\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b}X + e_i$$

$i=1, 2, \dots, n$ 'e kadar gözlem içerdiğini düşünelim. Yukarıdaki tahmini regresyon modelinde yer alan ve katsayıları ile hata teriminin hesaplanması, $i=1$ 'den n 'e kadar elimizde olan Y ve X gözlem değerleri kullanılarak aşağıda verilen birtakım matematiksel hesaplamalar ile gerçekleşmektedir.

Katsayıların anlamı ve hesaplanması

Katsayılardan (parametre olarak da ifade edilir) \hat{a} katsayısı; sabit değer olarak tanımlanır ve X değişkeninin değeri sıfır iken, \hat{Y} değişkeninin alacağı değeri gösterir. Doğru üzerinde gösterimde doğrunun başlangıç noktası olarak adlandırılır.

Katsayılardan (parametre olarak da ifade edilir) \hat{b} katsayısı; eğim olarak tanımlanır ve X değişkeninin bir birim arttığında, \hat{Y} değişkeninin artış oranını gösterir. Doğru üzerinde gösterimde doğrunun eğimi olarak adlandırılır. Hata terimi e_i ; minimum olması beklenen hata terimi'dir.

Hesaplamalarda kullanılan \hat{a} ve \hat{b} katsayılarının hesaplanması şu şekildedir:

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}) \cdot (X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{veya} \quad \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n x \cdot y}{\sum_{i=1}^n x^2}$$

$$\hat{a} = \bar{Y} - \hat{b} \cdot \bar{X}$$

Not 1: $(Y_i - \bar{Y}) = y$ olarak da ifade edilmektedirler.

Not 2: $(X_i - \bar{X}) = x$ olarak da ifade edilmektedirler.

Katsayıların hesaplanmasından sonra, \hat{Y} olarak gösterilen bir regresyon tahmini değerleri, regresyon denkleminde \hat{a} ve \hat{b} katsayıları yerine koyulmak suretiyle hata terimini gözardı ederek bulunan değerdir.

Hata terimi e_i , Y_i 'nin gerçek değeri ile \hat{Y} tahmini değeri arasındaki farktan oluşur. $e_i = Y_i - \hat{Y}$ Regresyon modeli kurulup, gerekli işlemler yapıldıktan sonra modelin uygunluğuna, parametrelerin anlamına bakmak gerekmektedir.

Basit Doğrusal Modelin Belirlilik Katsayısının Hesaplanması

Kurulan regresyon modelindeki gözlem değerlerinin modele uyumuna belirlilik katsayısı ile bakabiliriz.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 - \sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Bulunan belirlilik katsayısı, bağımsız değişken değerlerindeki değişimlerin ne kadarının (%) kurulan regresyon modeli ile açıklandığını gösterir. Değer 0 ile 1 arasında değişmektedir. 1'e yaklaştıkça modelin uygunluğu artmaktadır.

Basit Doğrusal Modelin Güven Aralığının Bulunması ve Hipotez Testinin Hesaplanması

En Küçük Kareler Yöntemi ile hesaplanan \hat{a} (sabit değer) ile \hat{b} (eğim) katsayısının hesaplanmasını ve ne ifade ettiğini yukarıda anlatmıştık. Kurulan regresyon modelindeki katsayıların anakütle değerlerine ne kadar yakın olduğu yani güvenilirliği, katsayıların standart hatalarına bakılarak ölçülmektedir. Standart hata, anakütleden örnek olarak alınan gözlem değerleri için kullanılan terimdir. Standart hata, ilgilenilen bağımsız değişkenin gözlem değerleri toplamlarının karesi alınarak, gözlem sayısı ile çarpılmış olan ilgilenilen bağımsız değişkenin ortalamadan farkları toplamına bölünmesi ile hesaplanan değerdir. Hesaplanışı güven aralığı içerisinde gösterilecektir. Anakütleyi temsil eden standart sapmadır. Standart hatalar, katsayıların değerlerinden küçük olmalıdır, s ile gösterilir.

Basit Doğrusal regresyon modelinde standart hataların hesaplanması:

$$s(\hat{a}) : \text{Var}(\hat{a}) = \frac{\sum X^2}{n \cdot \sum x^2} \quad s(\hat{a}) = \sqrt{\text{Var}(\hat{a})}$$

$$s(\hat{b}) : \text{Var}(\hat{b}) = \frac{s^2}{\sum x^2} \quad s(\hat{b}) = \sqrt{\text{Var}(\hat{b})}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum e^2}{n-2}} \text{ formülleriyle hesaplanmaktadır.}$$

Not: $\sum X^2$ = bağımsız değişken gözlem değerlerinin karelerinin toplamı.

Not: $\sum x^2$ = bağımsız değişken gözlem değerlerinin ortalamadan farklarının karelerinin toplamı

$$(\sum (X - \bar{X})^2 = \sum x^2).$$

Güvenirlikten emin olmak için aralık tahmini ve hipotez testleri uygulanmalıdır.

Çoklu regresyonda kullanımı:

Çoklu regresyon modelinde bağımsız değişkeni açıklayan birden fazla bağımlı değişken modelde yer almaktadır. Ekonomik modeller, genellikle birden fazla sebebin sonucu olarak gelişen olaylardır. Çoklu regresyon modelleri en küçük kareler yöntemi

kullanılarak çözümlenebilmektedir. Kurulan çoklu regresyon modeli genel olarak aşağıdaki gibi kurulmaktadır.

$$Y = a + b.X_2 + c.X_3 + \dots + z.X_k + e_i$$

İki bağımsız değişkeni içeren modelin en küçük kareler yöntemi ile çözümü,

$$Y = a + b.X_2 + c.X_3 + e_i$$

Kurulan çoklu regresyon modeli de basit doğrusal regresyonda olduğu gibi tahmini denklem kurularak hesaplanmaktadır.

\hat{Y} , e_i hata terimi olmadan aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\hat{Y} = \hat{a} - \hat{b}X_2 + \hat{c}X_3$$

$$e_i = Y - \hat{Y} \text{ olmaktadır.}$$

aşağıda yer alan denklemler yardımıyla katsayıların çözümlenmesi mümkündür.

Katsayıların anlamı ve hesaplanması

Basit doğrusal regresyon modelinde anlatıldığı gibi çoklu regresyon modelinde de fonksiyonlarda gözlem değerlerinin ortalamalarından farkları alınan değerler kullanılacaktır.

$$Y_{\text{ani}}, (X_1 - \bar{X}_1) = x_1, \dots, (X_2 - \bar{X}_2) = x_2, \dots, (X_3 - \bar{X}_3) = x_3, \dots, (Y - \bar{Y}) = y, \dots, \text{vs}$$

$$\hat{b} = \frac{(\sum y.x_2)(\sum x_3^2) - (\sum y.x_3)(\sum x_2.x_3)}{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2) - (\sum x_2.x_3)^2}$$

$$\hat{c} = \frac{(\sum y.x_3)(\sum x_2^2) - (\sum y.x_2)(\sum x_2.x_3)}{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2) - (\sum x_2.x_3)^2}$$

$$\hat{a} = \bar{Y} - \hat{b}\bar{X}_2 - \hat{c}\bar{X}_3$$

Regresyon modeli kurulup, gerekli işlemler yapıldıktan sonra modelin uygunluğuna, katsayıların anlamına bakmak gerekmektedir. Modelin uygunluğu, belirlilik katsayısı olarak isimlendirilen ve çoklu modellerde de R^2 olarak isimlendirilen istatistik terimi ile hesaplanabilir.

Çoklu Regresyon Modelinin Belirlilik Katsayısının Hesaplanması

Kurulan çoklu regresyon modelindeki gözlem değerlerinin modele uyumuna belirlilik katsayısı ile bakabiliriz.

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}_1 \cdot \sum y \cdot x_1 + \hat{\beta}_2 \cdot \sum y \cdot x_2 + \dots + \hat{\beta}_k \cdot \sum y \cdot x_k}{\sum y^2}$$

R^2 kullanımı çoklu modellerde uygun olmamaktadır. Çoklu modellerde, modele yeni bir değişken ilave edildiğinde R^2 değeri her zaman artmaktadır. Payın değeri artarken payda aynı kalmaktadır. Bu nedenle düzeltilmiş çoklu belirlilik katsayısı \bar{R}^2 kullanılıp, aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k}$$

\bar{R}^2 = Düzeltilmiş çoklu belirlilik katsayısı

R^2 = Çoklu belirlilik katsayısı

n = Örnek olarak seçilen gözlem sayısını

k = Modeldeki değişken katsayısı

Hesaplanan belirlilik katsayısı, bağımlı değişkendeki değişimlerin ne kadarının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını (%) olarak göstermektedir.

Çoklu Regresyon Modelinin Güven Aralığının Bulunması ve Hipotez Testi Hesaplanması

En Küçük Kareler Yöntemi ile hesaplanan bağımsız değişkenin katsayılarının güvenilirliğinin test edilmesi basit doğrusal regresyon modelindeki hesaplama yöntemine benzemektedir. Basit doğrusal regresyondaki adımlar çoklu modelde her katsayı için ayrı ayrı yapılmaktadır. Basit doğrusal regresyonda olduğu gibi çoklu modelde de katsayıların standart hataları güvenilirlikte ve hesaplamalarda kullanılacak olması nedeniyle hesaplanmaktadır.

Çoklu regresyon modelinde standart hataların hesaplanması:

Standart hata katsayıların değerlerinden küçük olmalıdır.

$$s(\hat{b}) : \quad \text{Var}(\hat{b}) = s^2 \frac{\sum x_3^2}{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2) - (\sum x_2 \cdot x_3)^2} \quad s(\hat{b}) = \sqrt{\text{Var}(\hat{b})}$$

$$s(\hat{c}) : \quad \text{Var}(\hat{c}) = s^2 \frac{\sum x_2^2}{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2) - (\sum x_2 \cdot x_3)^2} \quad s(\hat{c}) = \sqrt{\text{Var}(\hat{c})}$$

$$s(\hat{a}) : \quad \text{Var}(\hat{a}) = s^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}_2^2 \cdot \sum x_3^2 + \bar{X}_3^2 \cdot \sum x_2^2 - 2 \cdot \bar{X}_2 \cdot \bar{X}_3 \cdot \sum x_2 \cdot x_3}{\sum x_2^2 \cdot \sum x_3^2 - (\sum x_2 \cdot x_3)^2} \right]$$

$$s(\hat{a}) = \sqrt{\text{Var}(\hat{a})}$$

Not: Büyük xler, (X_2, X_3) bağımsız değişken gözlem değerleridir.

Not: Küçük xler, (x_2, x_3) bağımsız değişkenlerin ortalamalarından farklarının alınmış

şeklidir. $(X_2 - \bar{X}_2 = x_2, X_3 - \bar{X}_3 = x_3)$

$$s^2 = \frac{\sum e^2}{n - k}$$

n: örnek olarak seçilen gözlem sayısı

k: modeldeki değişken sayısı

Güvenirlikten emin olmak için aralık tahmini ve hipotez testleri uygulanmalıdır.

Hesaplamlarda kullandığımız \hat{a} , \hat{b} ve \hat{c} katsayıları anakütlenin a , b ve c katsayılarının birer tahminidir. Kullandığımız \hat{x} , \hat{b} ve \hat{c} katsayılarının ortalama ve beklenen değerleri a , b ve c katsayılarına eşit olsa da anakütle parametresine kesin eşitliği söylenemez. Tahmin değerlerinin güvenirliliğine standart hata ve varyansının küçüklüğüne bakarak anakütleyle yakınlığı görülür.

Güven Aralığının ve hipotez testinin hesaplanması:

Çoklu regresyon modelinde katsayıların güven aralıkları, basit regresyon modelinde olduğu gibi her bir parametre için ayrıca hesaplanmaktadır. Çoklu regresyon modelinde basit regresyonda olduğu gibi katsayıların anlamlılığı her bir katsayı için ayrıca hesaplanmak üzere H_0 hipotezi katsayıları 0'a eşitlenerek örnekleme büyüklüğüne göre ($n < 30$) \square t, $n \geq 30$ \square z testi) ile bakılmaktadır. Çoklu modeldeki katsayıların ayrı olarak test edilmesi modeldeki anlamsız katsayıların tespiti için önemlidir. Yine güven

aralığı hesaplaması da her bir katsayı için basit regresyonda olduğu gibi ayrı ayrı olarak hesaplanmaktadır. Çoklu regresyon modelinde en çok kullanılan test parametrelerin birlikte hipotez testi olan F testi'dir.

Kurulan hipotez $H_0 : b = c = \dots z = 0$ karşıt hipotezi $H_1 : b \neq c \neq \dots z \neq 0$ şeklindedir.

Regresyon modelinin anlamlılığı bütünüyle test edilmiş olur.

$$F_{hes} = \frac{\left(\hat{b} \cdot \sum y \cdot x_2 + \hat{c} \sum y \cdot x_3 \right)}{\frac{(k-1)}{\sum \hat{\sigma}_i^2}} \cdot \frac{1}{(n-k)}$$

n: örnek olarak seçilen gözlem sayısı

k: modeldeki değişken sayısı

F değeri hesaplandıktan sonra tablo değeri ile karşılaştırılmaktadır. F tablo değeri, $\alpha = 0,05$ veya $\alpha = 0,01$ gibi seviyelerde ve $f_1 = k - 1$, $f_2 = n - k$ tablodaki serbestlik derecelerinde F dağılımı tablosundan bulunan değerdir.

Sonuç olarak; $F_{hes} > F_{tab}$ ise H_0 hipotezi reddedilir. Katsayılar 0'dan farklı ve anlamlı ve çoklu regresyon modelinin uygun olduğu söylenmektedir.

Sonuç

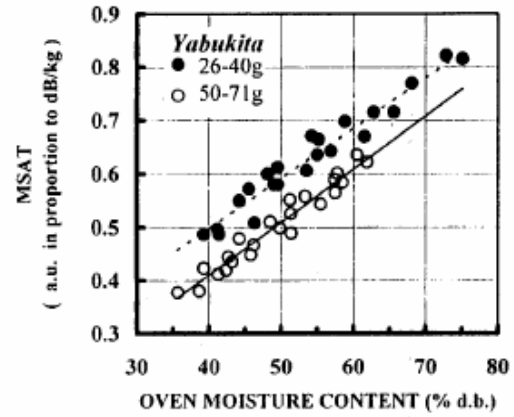
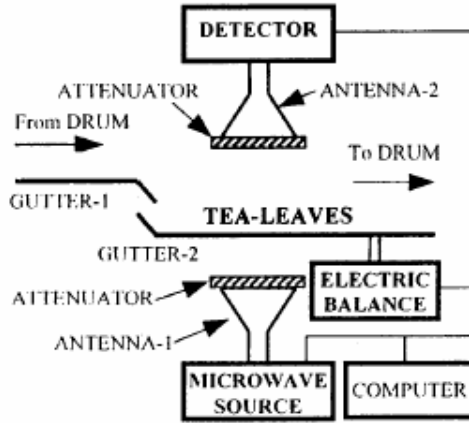
En Küçük Kareler yöntemi kullanılarak, basit doğrusal regresyon ve çoklu regresyon modellerinde regresyon denklemlerindeki katsayılar, anlamları ve test edilmeleri aşamaları anlatılmıştır. Regresyon analizinde modele alınan katsayılar, hipotez testi sonucu anlamlı veya anlamsızdır sonucunu içermektedir. Fakat alınan örnek sayıları problemden probleme farklılık gösterebilmektedir. Çok büyük bir kütlede oluşan problemde az sayıda örnek sayısı alınması hipotez testi sonucunu yanıltabilir. Belirli örnek sayısında katsayılar anlamsız çıkmışken örnek sayısı daha çok arttırıldığında test, katsayı anlamlıdır sonucunu verebilir. Bu nedenle problem olan kütlede seçilen örnekleme sayısına dikkat edilmelidir. Katsayıların değerleri regresyon analizinin uygunluğu hakkında sonuçlar vermektedir. Seçilen modeldeki herhangi bir bağımsız değişkenin (sebebe değişkeni) katsayısı yeterli örnekleme alındığı halde anlamsızdır sonucunu veriyorsa, modeldeki değişken modelden çıkarılmalıdır. Regresyon modelindeki bağımsız değişken katsayıları modelin durumu, anlamlılığı,

gücü hakkında bilgi verdiği halde bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin yönünü ve kuvvetini göstermemektedir. Bu nedenle korelasyon analizi ile bağımlı ve bağımsız değişken veya değişkenler arasındaki ilişkiyi korelasyon analizi ile ölçeriz.

Ek-3 Örnekler-Yeşil Çay ve ILLY Kahve

Yeşil çayın nemliliğinin ölçülmesinde şu yöntem kullanılmıştır.

$$MSAT \equiv \frac{\text{Attenuation}(A)}{\text{Weight}(W)} \quad (\text{dB kg}^{-1}) \quad (3-22)$$



Şekil 4.3'de kayıp faktörlerinin frekansa bağlı olarak değişimi verilmiştir. Belli bir frekans bandında bir veya iki kayıp mekanizmasının diğerleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Atomik ve elektronik polarizasyon sebebiyle gerçekleşen kayıp mekanizmaları elektromanyetik spektrumun görülen ve enfaruj bölgelerinde oluşur.

İyi Kahve Kuru Kahvedir

Kahve çekirdeğinin nem miktarı, kaliteli ürün elde edilmesinde anahtar bir role sahiptir. Aşağıda anlatılanlar IRC Larice şirketinin İngiltere'de faaliyet gösteren bir teknoloji firmasının desteği ile kahve çekirdeği ve tahıllar için mikrodalga teknolojisi

kullanılarak nem dedekte edebilecek bir sistemi ünlü İtalyan Kahve markası IllyCaffe Şirketine teklif etmesi ile ilgilidir.

Tanım

Yeşil kahve çekirdeğinin nem miktarının bilinmesi son derece önemlidir çünkü fazla nem kahvenin küflenmesine ve bu sebeple pek çok parti malın kalite normlarını karşılamadığı gerekçesiyle geri çevrilmesine neden olacaktır. Ayrıca kahvenin nem oranının yüzeysel olarak tespit edilmesi ise yeterli değildir. Kahvenin yüzeyindeki nem miktarı ile ortasındaki nem miktarı farklı olabilmektedir. Bu durum ise istenilen sonuçlara yol açabilir.

Kahve üreticisi firma mikrodalganın malzeme içine tamamen nüfuz edebilmesi özelliği nedeniyle bu teknolojiyi tercih etmiştir. Geleneksel nem ölçüm metotları kahvenin sadece yüzeyindeki nem miktarını ölçebilir. Oysa kahve içindeki nemin bütün olarak bilinmesi ve kontrol edilmesi gerekir. Malzemenin tümü içerisine nüfuz etmeyen geleneksel metotlar yerine mikrodalga teknolojisiyle tüm malzemenin nemliliği hakkında kesin bilgi elde edilebilmektedir.

IRC Larice firmasının Genel Müdürü, mikrodalga teknolojisinin kullanılmasının neden özellikle kendilerini tatmin ettiğini şöyle açıklıyor. “Genellikle firmalar şirketimize belli bir problemin çözümünde yardım almak için başvuruyorlar. Bu örnekte ise şirketin farkında olmadığı bir problemi biz tanımlama durumundaydık”.

İlk Görüşmeler

IRC Larice firması ile müşterileri olan IllyCaffe firması arasında herhangi bir teknoloji transferinin gerekli olup olmadığını anlayabilmek için bir toplantı düzenlendi. Kahve firması, IRC Larice firmasına kahvenin kalitesini etkileyen birtakım anahtar sözcükleri ilettiler. Bu bilgiler ışığında IRC firması kendi veri tabanlarındaki bilgileri değerlendirdi ve İngiltere’de Mikrodalga Sensorlar üzerine çalışan “Moisture Sensors Limited” şirketinin müşterinin ihtiyaçlarını karşılayabilecek önerileri olabileceğini düşündü.



Müşterinin Yeni Teknolojiye İlgisi

IllyCaffe şirketi mikrodalga teknolojisini kullanmaya değer buldu ve İngiltere’de teknoloji şirketi ile yeni bir toplantı düzenlendi. Yöneticilerin bu görüşmesinde altı ay sonra şirketlerin teknik elemanlarının katılacağı ve teknik özelliklerin görüşüleceği yeni bir toplantı yapılması kararlaştırıldı. Altı ay sonra yapılan görüşmeler sonrasında Mikrodalga Teknolojisinin IllyCaffe tesislerinde kullanılması için prototip hazırlanması çalışmalarına başlandı.

Çift Taraflı Kazanım

Nemölçerler insan gücüne ihtiyaç duymadığı gibi maddi bir yük de getirmemektedir. Prototipin etkin bir şekilde çalışması IllyCaffe şirketini ikna etti. Şirket şimdi, diğer firmaların da bu teknolojiyi kullanmalarını tavsiye etmektedir.

Mikrodalga teknolojisi firmaya çift taraflı bir fayda sağlamıştır. Cihaz firmanın kalite kontrol ünitelerinde kullanılmaktadır ve depolarında bekleyen ürünlerinin nemden dolayı bozulmasını ve kalitesinin düşmesini önlemiştir. Diğer taraftan üretim sürecinde malzemenin barındırdığı nem oranının etkin ve doğru bir şekilde ölçülmesini ve kalitesinin artmasını sağlamıştır.

Kahve sevenler için iyi bir haber.

Alıntı: London & South East IRC



Ek-4 Mikrodalga Uygulamaları

Mikrodalga enerjisi; 300MHz ile 300GHz aralığında frekansa sahip iyonize olmamış elektromanyetik radyasyondur. Metalik bir levha benzeri aynadan yansıyan mikrodalgalar, dielektrik ara yüzeyde kırılır ve parabolik yansıtıcı ile odaklanır. Mikrodalga enerji belli bir frekansta yüzdelik bir dönüşüm verimiyle elektrik enerjisinden elde edilir. Mikrodalgalar; görünür, ultraviyole gibi elektromanyetik enerji şekillerinden daha yüksek dalga boylarına ve daha düşük enerji miktarına sahiptirler.

Mikrodalga enerji; ısıtma, kurutma, liç işlemleri, kavurma, ergitme, oksitli minerallerin karbotermik redüksiyonu gibi işlemlerin uygulanmasında kullanılır. Seramik malzemelerde ise mikrodalga enerjisi; sentezleme, kurutma, kalsinasyon ve sinterleme gibi işlemler için kullanılır. Endüstriyel işlemler için mikrodalga ısıtma; işlem zamanını azaltması ve düşük enerji maliyetinden dolayı tercih edilmektedir.

Mikrodalga ısıtmada numunenin ısınması iç kısımda sağlandığı için geleneksel ısıtmadan farklıdır. Bu yüzden mikrodalga ile ısıtılan numunenin sıcaklık nüvesi daha yüksektir. Ayrıca sıcaklık üniform olarak dağıldığı için termal gerilmeler numunede azalmaktadır. Mikrodalga ısıtma ile elde edilen termal gradyentler, geleneksel ısıtma ile elde edilen termal gradyentlerin karşıtıdır.

II. Dünya Savaşı süresince ve savaş sonrasında bir süre, düşman uçak ve gemilerini belirleme ve yerlerini tayin etme kapasitesine sahip yüksek çözünürlüklü Radar (Radio Detection And Ranging) ihtiyacı nedeniyle, mikrodalga sistemlerinin gelişmesi için sağlanan büyük destekten dolayı, mikrodalga mühendisliği radar mühendisliği ile hemen hemen eş anlamlıydı. Bugün dahi; füze-izleme radarı (missile-tracking radar), atış-kontrol radarı (fire-control radar), meteoroloji radarı (weather-detecting radar), füze-kılavuz radarı (missile-guidance radar), hava trafik kontrol radarı (airport traffic-control radar), v.s. gibi pek çok değişik formdaki radarlar mikrodalga frekanslarının önemli bir kısmını kullanır. Bu kullanım, verici gücünün tamamını dar bir kalem ucuna benzer bir ışın demeti şeklinde ışınlayacak antenlere sahip olabilme ihtiyacından doğar. Bir antenin ışınımı dar bir demete yoğunlaştırma kabiliyeti kırım etkileriyle sınırlanır. Bu kabiliyet dalga boyu cinsinden ışınma açıklığının bağlı boyutuyla ilgilidir. Örnek olarak, parabolik reflektör tipi bir anten, $140^\circ/(D/\lambda)$ (burada D parabol çapı ve λ dalga boyudur.) kadar açısal demet genişliğine sahip (kalem ucu tipi) ışınan enerji demeti üretir. Böylece 90 cm'lik (yaklaşık 3 ft \approx 3x30.48 cm) bir parabol, 10^{10} Hz'lik frekansta yani 3 cm'lik dalga boyunda yaklaşık $4,7^\circ$ lik bir demet üretir. Bu tip bir demet radarın gözlediği bir hedef için önemli derecede doğru bir konum bilgisi verebilir. 100 MHz'lik bir frekansta benzer bir performans elde edebilmek için, 300 ft (yaklaşık 90 m) bir parabol gerekir ki, bu kadar büyük bir anteni uçakta taşımak mümkün değildir.

Daha sonraki yıllarda, mikrodalga frekansları genellikle mikrodalga linkleri adıyla, haberleşme linklerinde geniş kullanım alanı buldu. Mikrodalgaların yayılması,

görüŖ hattı boyunca etkin olduğundan bu linkler haberleŖme yolu boyunca aralıklarla yerleŖtirilmiŖ tekraralama istasyonları (repeater stations) Ŗeklinde reflektörlü veya lens-tipi antenli yüksek kuleler gerektirir. Çevre yolu polisi, kamu Ŗirketleri ve TV ağlarının çok sık kullanımlarından dolayı, bu tür linkler çok seyahat edenlerce sıkça görölr. Mikrodalgaların daha ilginç haberleŖme amaçlı kullanımı, mikrodalga röle istasyonu olarak uydu haberleŖmesindeki kullanımınıdır. Bunların ilki, Temmuz 1962 de gönderilen ve Amerika'dan Avrupa'ya ilk canlı TV yayını sağlayan Telstar'dır. O zamandan beri atmosferik ve hava Ŗartlarıyla, ilgili data toplama ve gözetleme ile birlikte haberleŖme amaçlı olarak pek çok uydu yerleŖtirildi. Direkt TV yayını için en çok kullanılan band C bandıdır. Kullanılan up-link frekansı 5.9–6.4 GHz bandı ve alma veya down-link frekans bandı 4.7–4.2 GHz bandıdır. Evde kullanım için genellikle 8-ft çapında parabolik reflektör anten kullanılır. Direkt TV yayını için ikinci bir frekans bandı daha tahsis edildi. Bu band için, up-link frekansı 14–14.5 GHz bölgesinde ve down-link frekansları ise 10.95–11.2 GHz ve 11.45–11.7 GHz bandları içindedir. Bu bandda 3-ft çapında bir alıcı parabolik anten uygundur. Ŗu anda bu frekans bandı Amerika'da fazlaca kullanılmazken, Avrupa ve Japonya'da yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yıllardır mikrodalga yer linkleri de kullanılmaktadır. Bell Ŗebekesinin parçası olarak 1948 yılında TD–2 sistemi servise konuldu. Bu sistem 4.7–4.2 GHz bandında çalıŖtı ve her biri 4.1 KHz band genişliğini kapsayan 480 ses devresine sahipti. 1974'de 10.7–11.7 GHz bandında çalıŖan TN–1 sistemi iŖletime sokuldu. Bu sistem 4.5 MHz band genişlikli bir video kanal veya 1800 ses devresi kapasitesine sahipti. Bu zamandan beri yer mikrodalga linklerinin kullanımı hızla büyüdü.

Ŗu anda haberleŖme sistemleri dijital transmisyona doğru hızla kaymaktadır. Yani analog iŖaretler transmisyondan önce dijital iŖarete dönüŖtürölmektedir. Mikrodalga dijital haberleŖme sistemlerinin geliŖimi de hızla ilerlemektedir.

Eski sistemlerde basit modölyasyon metotları kullanıldı ve bu durum, elde edilebilen frekans spektrumunun verimsiz kullanımı ile sonuçlandı. 64-kat quadrature genlik modölyasyonundaki (64-QAM) geliŖme bir tek 30 MHz RF kanalıyla 2016 ses kanalının iletiŖimini mümkün hale getirdi. Bu, ses için FM analog modölyasyon metodu ile rekabet etmektedir. Bundan sonraki adım geliŖtirilmekte olan 256-QAM sistemidir. Bir modölyasyonlu taŖıyıcının elde edilmesi ve iŖlenmesi için modölyasyon yan bantları taŖıyıcı frekansın sadece yüzde bir kaçı olabilir. Bu durumda görölyüyor ki, bir link

üzerinden pek çok TV programının verimli bir şekilde iletimi için taşıyıcı frekans mikrodalga bölgesinde olmalıdır. Mikrodalga sistemlerinde gelişme olmasaydı, haberleşme araçlarımız ciddi olarak aşırı yüklenir ve mevcut iletim sistemleri yetersiz hale gelirdi.

Bütün bunların dışında mikrodalgalar temel ve uygulamalı araştırma alanlarında ve mikrodalga fırınları gibi pratik düzenlerin pek çoğunda geniş kullanım alanına sahiptir. Şimdi bu özel uygulamaların bazılarını kısaca açıklayalım.

Şönt süseptans elemanları ile periyodik olarak yüklenmiş dalga kılavuzları ışık hızından daha düşük hızlara sahip yavaş dalgalar oluşturur ve bunlar lineer hızlandırıcılarda kullanılır. Bunlar atomik ve nükleer araştırmalarda kullanılmak üzere yüklü parçacıkların yüksek enerji demetlerini üretir. Yavaş yürüyen elektromanyetik dalgalar aynı hıza sahip yüklü parçacık demetleriyle çok verimli bir şekilde etkileşir ve bu suretle demete enerji verirler. Diğer durumda ortaya çıkan amplifikasyonla bir elektron demetindeki enerji elektromanyetik dalgaya verilir. Böyle düzen yürüyen dalga tüpü olarak adlandırılır.

Bu bandda ışıma yayan güneş ve birçok radyo yıldızından doğan elektromanyetik ışımayı dedekte etmek ve onlar üzerine çalışmak için radyo astronomide hassas mikrodalga alıcılar kullanılır. Bu tür alıcılar plazmalardan (elektron ve iyonların yaklaşık olarak nötr birikimleri, mesela gaz deşarjı) ışıyan gürültüyü dedekte etmek için de kullanılır. Elde edilen bilgi, plazma ışımasına neden olan çeşitli mekanizmaları belirlemek ve analiz etmek için bilim adamlarına imkân sağlar. Ayrıca, atmosferik sıcaklık profilleri ile toprak ve ekili alanlardaki rutubet şartlarının haritasını çıkarmak ve diğer uzaktan algılama uygulamaları için mikrodalga radyometreleri (ışınölçer) kullanılır.

Moleküler, atomik ve nükleer sistemler, uygulamalı elektromanyetik alandan kaynaklanan periyodik kuvvetlerin etkisi altında çeşitli rezonans olayı gösterirler. Bu rezonansların çoğu mikrodalga bölgesinde oluşur. Bundan dolayı malzemelerin temel özelliklerinin tespiti için mikrodalgalar çok güçlü bir deneysel sondaj sağlar. Malzemelerle ilgili bu araştırma dışında, feritlerin kullanıldığı karşılıksız bazı düzenler, bazı katı-hal mikrodalga amplifikatör ve osilatörleri, mesela maser'ler ve hatta koherent (yapışık) ışık kaynağı ve amplifikatörleri (lazer) gibi pek çok düzen de mikrodalga konusundaki gelişmelerin sonucu olarak ortaya çıktı.

Lazer'in (esasen monokromatik yani tek frekanslı koherent ışık dalgaları kaynağının) gelişimi optik dalga boylarında haberleşme sistemlerinin geliştirilebileceği ihtimalleri üzerine büyük bir ilgi uyandırdı. Bu frekans bandı bazen ultra mikrodalga bandı olarak da anılır. Bazı modifikasyonlarla, mevcut mikrodalga teknolojisinin birçoğundan optik sistemlerin gelişiminde istifade edilebilir. Bu nedenle, konvansiyonel mikrodalga teorisi ve düzenleri ile ilgili iyi bilgi, elektromanyetik spektrumun yeni sınırındaki çalışma için iyi bir temel sağlar.

Mikrodalga ev fırını 4.450 GHz de çalışır ve 500–1000 W'lık çıkış gücüne sahip bir magnetron tüp kullanılır. Tanecik kurutma, ağaç ve kâğıt ürünleri üretme ve malzeme işleme gibi ısıtma uygulamaları için, 915–2450 MHz'lik frekans bölgesi belirlenmiştir. Tıbbi hipertermiya veya tümörlerin lokal olarak ısıtılması için de mikrodalga ışıması kullanılmaktadır.

Bununla birlikte, insan vücudunun sürekli ve aşırı oranda mikrodalga etkisi altında kalması, bazı sakıncalar doğurur. Bu yüzden, mikrodalga üreten ve kullanan cihazlar daima sızdırmaz tipte yapılmalıdır. Ayrıca insan vücuduna mikrodalgaları uygulayacak personelin de eğitilmiş olması gerekir. İnsan vücuduna uygulanabilecek mikrodalga enerjisinin değeri 100–3000 MHz'de 0.01 W/cm^2 'yi aşmamalıdır. Bu değer, kısa bir uygulama zamanı için 0.1 W/cm^2 'ye çıkarılabilir. Vücuda uygulanacak 100 Watt'lık bir mikrodalga enerjisi vücut ısısını 5 dakikada 5° artırır. Bu ise, son derece tehlikelidir. Mikrodalgalara en hassas organlar ise, göz ve beyindir. Her iki organda ve özellikle gözde kan dolaşımı zayıf olduğundan, bu organlarda oluşan ısı artışı, kanla yayılamayacağından, kısa zamanda tehlikeli hale gelmektedir. Gözün dayanabileceği maksimum radyasyon 4.4 GHz'de 0.08 W/cm^2 'dir.

TEŞEKKÜR

Çalışmaya verdiği destekten dolayı danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali OKTAY'A teşekkür ederim. Çalışmanın oluşması sürecinde sağladığı katkılardan dolayı Dr. Ali AKMAN'A teőekkürü de bir borç bilirim.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet ŞEKER 1980 yılında Erzurum’da doğdu. İlk Eğitimini Emirbuhari İlkokulunda, Orta ve Lise eğitimini Bursa Anadolu Lisesinde tamamladıktan sonra 1998 yılında Uludağ Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek öğrenimine başladı. 2003 yılında Fen Bilimleri Enstitüsünün Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında lisansüstü eğitimine devam etti.