

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TAHILDA NEM ÖLÇÜMÜ İÇİN RF NEM  
ALGILAYICISININ GELİŞTİRİLMESİ**

**Parviz TOMARAEI**

**TARIM MAKİNALARI ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2010**

**Her hakkı saklıdır**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TAHILDA NEM ÖLÇÜMÜ İÇİN RF NEM ALGILAYICISININ GELİŞTİRİLMESİ

PARVİZ TOMARAEI

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Tarım Makinaları Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kâmil SAÇILIK

Tahılın nem içeriği, depolama, işleme ve taşıma gibi çeşitli tarımsal faaliyetlerde tahılların fiziksel özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Tahılların dielektriksel özellikleri, hızlı nem algılama sistemlerinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tahılların nem içeriğini ölçebilen dielektrik tabanlı nem ölçme sistemleri geliştirilmiştir. Bu amacı gerçekleştirmek için, tahılların içerisine konulduğu silindirik ve paralel plakalı koaksiyal mimariye sahip örnek kutuları tasarlanmıştır. Bu örnek kutuları, radyo frekans (RF) bölgesinde çalışabilen bir kapasitör olarak düşünülmüştür. Seçilen tahılların dielektrik özellikleri, silindirik ve paralel plakalı RF ölçme sistemleri kullanılarak 1-100 MHz aralığında empedans analizörüyle belirlenmiştir. Nem içeriği ve çalışma frekansına bağlı olarak dielektrik katsayısı, kayıp faktörü belirlenmiştir.  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  fonksiyonu, seçilmiş kalibrasyon modeline eklenerek, RF nem ölçme düzeni standart fırın yönteminden elde edilen nem verileri ile kalibrasyonu yapılmıştır. Seçilen modellerin ölçme yeterliliği belirtme katsayısı, mutlak bağıl hata ve standart hata katsayılarından yararlanılarak belirlenmiştir. Silindirik ve paralel plakalı RF nem ölçme düzenleriyle nem ölçümünde sistemin standart hatası sırasıyla % 0.32 ve 0.39 y.b nem olmuştur. Silindirik ve paralel plakalı RF tabanlı nem ölçme düzenlerinin, nem içeriğini tatmin edici düzeyde ölçtüğü yapılan istatistiksel analizler sonucunda belirlenmiştir.

**Temmuz 2010, 53 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Nem içeriği, paralel plakalı koaksiyal, silindirik koaksiyal, dielektrik katsayısı, kayıp faktörü, radyo frekans

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **DEVELOPMENT OF RF MOISTURE SENSOR FOR MEASURING MOISTURE CONTENT IN GRAIN**

Parviz TOMARAEI

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Agricultural Machinery

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kâmil SAÇILIK

The moisture content of grain is an essential factor affecting the physical properties related to storage, processing and quality control. Dielectric properties of grain have been mainly used to measure the moisture content of grain because of their practicality for rapid moisture sensing method. In this thesis, a dielectric-based moisture measurement system for on-line measurement of various grains was developed using dielectric properties at radio frequency range. To fulfill this purpose, a parallel-plate and a coaxial sample holder that grains were placed in them were designed. These sample holders were used as a capacitor in the radio frequency (RF) moisture measuring system. The dielectric properties of wheat were measured using a cylinder and a parallel-plate coaxial sample holder with the impedance analyzer. The dielectric properties of samples were determined using a cylinder and a parallel-plate coaxial RF moisture measuring systems in the ranges of 1 to 100 MHz. Effects of the moisture content and frequency on the dielectric properties were studied. The sensor was calibrated with dielectric data obtained from impedance analyzer. Selected calibration models were used to correlate the standard oven method for moisture content with the function  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$ . The accuracies of the models were measured using the coefficient of determination, mean relative percent deviation and standard error of prediction. Standard error of prediction of the cylinder and a parallel-plate coaxial RF moisture measuring systems was 0.32 and 0.39 % w.b moisture, respectively. Therefore, the cylinder and parallel-plate coaxial RF moisture measuring systems offers promise as a method for moisture content measurements on wheat based on statistical analysis.

**July 2010, 53 pages**

**Key Words:** Moisture content, cylinder coaxial, parallel-plate coaxial, dielectric constant, loss factor, RF

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Tarımsal ürünlerin dielektrik veya bağıl elektriksel geçirgenlik özellikleri, materyallerin elektromanyetik alandaki davranışlarını incelemektedir. Radyo frekans (RF) ve mikrodalga frekans bölgelerindeki dielektrik özellikler, yüksek frekanslı bir alana maruz bırakılan tarımsal ürünlerin davranışlarını belirlemektedir. Tahılların ve diğer tarımsal ürünlerin dielektrik özellikleri, hem temel hem de uygulamalı bilim alanlardaki mühendislik uygulamalarında büyük öneme sahiptir. Dielektrik özelliklerin en önemli uygulaması tahılların ve diğer tarımsal ürünlerin nem düzeyinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra tarımsal ürünlerin içsel kalite özelliklerinin belirlenmesinde, RF ve mikrodalga ısıtma uygulamalarında, tahıl kurutma, tohum çimlenmesi ve yüksek frekanslı alanda depo zararlılarıyla mücadele gibi tarımsal faaliyetlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

“Tahılda Nem Ölçümü İçin RF Nem Algılayıcısının Geliştirilmesi” adlı konuda bana çalışma olanağı sağlayan ve çalışmamın her aşamasında katkı ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Kâmil SAÇILIK’a ve Tarım Makinaları Bölümü öğretim üye ve yardımcılarına teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmanın bu konuda çalışanlara yardımcı olması en büyük dileğimdir.

Parviz TOMARAEI

Ankara, Temmuz 2010

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
SİMGELER DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3. MATERAL ve YÖNTEM .....	13
3.1 Materyal.....	13
3.1.1 Araştırmada kullanılan buğday .....	13
3.1.2 Denemede kullanılan ölçme cihazları .....	13
3.2 Yöntem .....	16
3.2.1 Koaksiyal ölçüm kutularının tasarımı.....	16
3.2.2 RF nem ölçme sistemi.....	20
3.2.3 Buğdayların denemelere hazırlanması.....	25
3.2.4 Denemelerin düzenlenmesi .....	26
3.2.5 Verilerin analizi .....	27
4BULGULAR ve TARTIŞMA .....	31
4.1 Koaksiyal Ölçüm Kutularının Elektriksel Özellikleri.....	31
4.2 RF Nem Ölçme Sistemiyle Yapılan Ölçümler .....	32
4.3 Geliştirilen Nem Ölçme Sistemleriyle Yapılan Ölçümlerin Modellenmesi.....	36
4.4 Seçilen Modellerin Modelleme Yeterliliğinin Belirlenmesi.....	44
5. SONUÇLAR .....	47
KAYNAKLAR .....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	53

## SİMGELER DİZİNİ

$C_0$	Silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun kapasitansı (pF)
$C$	Ürün ile doluyken ölçülen kapasitans (pF)
$f$	Frekans (Hz)
$G_0$	Ölçüm kutusunun boşken kondüktansı (Siemens)
$G$	Ürün ile doluyken ölçülen kondüktans (Siemens)
$M$	Mutlak bağıl hata (%)
$n$	Örnek sayısı
$N_m$	Modelle elde edilen nem içeriği (% y.b)
$N_i$	Materyalin ilk nemi (% y.b)
$N_f$	Materyalin son nemi (% y.b)
$N_g$	Etüvle ve modelle elde edilen nem arasındaki fark (%y.b)
$N_o$	Modelle ve etüvle elde edilen nem içeriği arasındaki farkların ortalaması (%y.b)
$p$	Modeldeki bağımsız değişken sayısı
$r^2$	Belirtme katsayısı
RF	Radyo frekans
SEC	Kalibrasyonun standart hatası
SEP	Modelin performans hatası
$Q$	Eklenecek su miktarı (kg)
$W_i$	Materyalin kütlesi (kg)
$\varepsilon^*$	Kompleks bağıl elektriksel geçirgenlik
$\varepsilon'$	Dielektrik katsayısı
$\varepsilon''$	Kayıp faktörü
$\varepsilon_0$	Boşluğun iletkenliği (8.854 pF/m)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Elektriksel değerlerin ölçülmesinde kullanılan E4991A empedans analizörü.....	14
Şekil 3.2 Araştırmada kullanılan hava akışlı etüv.....	14
Şekil 3.3 Elektrikli nem ölçer .....	15
Şekil 3.4 Elektronik terazi.....	15
Şekil 3.5 Silindirik koaksiyal ölçüm kutusu (ölçüler mm dir).....	17
Şekil 3.6 Silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun perspektifi .....	17
Şekil 3.7 Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusu (ölçüler mm'dir).....	18
Şekil 3.8 Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunun perspektifi .....	19
Şekil 3.9 RF nem ölçme düzeneği .....	21
Şekil 3.10 RF tabanlı nem ölçme sistemi akış diyagramı .....	22
Şekil 3.11 Programın ekran görüntüsü.....	23
Şekil 3.12 Buğdayla dolu koaksiyal ölçüm kutusunun verilerine ilişkin ekran görüntüsü.....	24
Şekil 3.13 Boş koaksiyal ölçüm kutusunun verilerine ilişkin ekran görüntüsü .....	24
Şekil 3.14 Analiz sayfası yardımıyla nem içeriğinin belirlenmesi .....	25
Şekil 4.1 Silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun elektriksel özellikleri.....	31
Şekil 4.2 Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunun elektriksel özellikleri.....	32
Şekil 4.3 Silindirik RF nem ölçme sisteminde farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre dielektrik katsayısının değişimi.....	32
Şekil 4.4 Paralel plakalı RF nem ölçme sisteminde farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre dielektrik katsayısının değişimi.....	33
Şekil 4.5 Silindirik RF nem sisteminde farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre kayıp faktörünün değişimi.....	33
Şekil 4.6 Paralel plakalı RF nem ölçme sisteminde farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre kayıp faktörünün değişimi.....	34
Şekil 4.7 Silindirik RF nem sisteminde çeşitli frekanslardaki buğdayın nem içeriğine göre dielektrik katsayısının değişimi .....	34
Şekil 4.8 Paralel plakalı RF nem sisteminde çeşitli frekanslardaki buğdayın nem içeriğine göre dielektrik katsayısının değişimi .....	35

Şekil 4.9 Silindirik RF nem sisteminde çeşitli frekanslardaki buğdayın nem içeriğine göre kayıp faktörünün değişimi .....	35
Şekil 4.10 Paralel plakalı RF nem sisteminde çeşitli frekanslardaki buğdayın nem içeriğine göre kayıp faktörünün değişimi .....	36
Şekil 4.11 Silindirik RF nem ölçme düzeninde deneysel ve 14. model ile tahmin edilen nem içeriği değerleri .....	39
Şekil 4.12 Silindirik RF nem ölçme düzeninde deneysel nem içeriği ve 13, 20, 10 ve 17. modeller ile tahmin edilen nem içeriği değerleri .....	39
Şekil 4.13 Silindirik RF nem ölçme düzeninde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki .....	40
Şekil 4.14 Silindirik RF nem ölçme düzeninde 13, 20, 10 ve 17. modellerde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki.....	41
Şekil 4.15 Paralel plakalı RF nem ölçme düzeninde deneysel ve 1. model ile tahmin edilen nem içeriği değerleri .....	41
Şekil 4.16 Paralel plakalı RF nem ölçme düzeninde deneysel nem içeriği ve 2, 3, 7 ve 8. modeller ile tahmin edilen nem içeriği değerleri .....	42
Şekil 4.17 Paralel plakalı RF nem ölçme düzeninde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki .....	43
Şekil 4.18. Paralel plakalı RF nem ölçme düzeninde 2, 3, 7 ve 8. modellerde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki.....	43
Şekil 4.19 Silindirik RF nem ölçme sisteminin ekran görüntüsü.....	44
Şekil 4.20 Paralel plakalı RF nem ölçme sisteminin ekran görüntüsü.....	45
Şekil 4.21 Silindirik RF ölçme düzeninde deneysel ve ölçülen nem içeriği değerleri .....	46
Şekil 4.22 Paralel plakalı RF ölçme düzeninde deneysel ve ölçülen nem içeriği değerleri .....	46



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Araştırmada kullanılan buğdayın bazı fizikomekanik özellikleri.....	13
Çizelge 3.2 Silindirik koaksiyal ölçüm kutusu için önerilen kalibrasyon modelleri .....	29
Çizelge 3.3 Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusu için önerilen kalibrasyon modelleri .....	30
Çizelge 4.1 Silindirik nem ölçer için geliştirilen kalibrasyon fonksiyonlarının katsayıları ve karşılaştırma kriterleri .....	37
Çizelge 4.2 Paralel plakalı nem ölçer için geliştirilen kalibrasyon fonksiyonlarının katsayıları ve karşılaştırma kriterleri .....	38

## 1. GİRİŞ

Tarımsal ürünlerin korunmasında uygulanan yöntemlerin amacı, mikrobiyolojik ve enzimsel değişimleri önlemek veya sınırlamaktır. Bütün canlılar gibi mikroorganizmalar da metabolizmaları için neme ihtiyaç duymaktadırlar. O halde ortam nem açısından mikroorganizmalar için elverişsiz bir duruma getirilirse, diğer tüm faktörler yeterli olsa bile bu canlılar aktif olamazlar ve böylece ürünlerin mikrobiyolojik açıdan bozulmaları önlenir (Ertekin 2001). Nem, depolama, ürün işleme, taşıma ve iletim gibi çeşitli tarımsal faaliyetlerde tarımsal ürünlerin fizikomekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Yüksek neme sahip ürünler depolama sırasında çeşitli mikroorganizmaların oluşumuna neden olurken hacim ağırlığındaki azalma nedeniyle daha fazla yer işgal eder ve akıcılıklarının azalmasıyla elevatörlerle iletimlerinde olumsuzluklar görülebilmektedir. Düşük neme sahip tahıllar ise özellikle iletimlerinde kırılmalara yol açmaktadır. Özellikle tahıllarda nemin az ya da çok oluşu üründe kalite ve parasal kayıpları beraberinde getirmektedir. Tahıllar ağırlığı ile satıldığından dolayı, 20000 ton mısırdaki nem ölçümünde yapılacak %1 düzeyinde hatanın, 20000 \$ maliyet getireceği belirtilmiştir (Lawrence vd. 1998).

Tarım ürünlerinin nem içeriğinin algılanmasında farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında standart fırın yöntemi, elektrikli nem ölçerler, nükleer yöntem, infrared ve mikrodalga yöntemleri sayılabilir. Standart fırın yöntemi basit ve hassas olup diğer yöntemlerin kalibrasyonunda kullanılması üstünlükleri arasındadır. Ancak fazla zaman alması, zahmetli olması, son ürünün tekrar kullanılamaması ve ürün neminin izlenmesine olanak vermemesi dezavantajları arasında sayılabilir. Nükleer yöntem kısa sürede hassas sonuçlar vermesine karşın pahalı olması ve radyasyon tehlikesi göstermesi dezavantajları arasında sayılabilir. İnfrared tabanlı algılayıcılar, sadece ürünün yüzey nemini ölçebilirken mikrodalga tabanlı algılayıcılar yüzey neminden başka ürünün hacim içeriği ile ilgili bilgileri de verebilmektedir (Trabelsi vd. 2001). Elektrikli nem ölçerler ise, ağırlığı ya da hacmi bilinen tahılın nem içeriğini, materyalin nem içeriği ile dielektrik katsayısı arasındaki ilişkilerden belirleyebilmektedir. Bu tip nem ölçerler, daha çok laboratuvar kullanımları için daha uygun olmasına karşın standart fırın yöntemine göre daha az güvenilir olması, ölçülecek

materyalde tahribat yaratması ve fiyatlarının yüksek olması sakıncaları arasında sayılabilmektedir. Ayrıca, hem standart fırın yöntemi hem de elektrikli nem ölçerle yapılan nem tayinlerinde, sadece 5-10 g gibi küçük bir örnekle, tüm ana kütle temsil edilmektedir. Bu durum, sürekli nem ölçümünü olanaksız kılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, daha hızlı, güvenilir sonuçlar verebilen, nem içeriğini çabuk ölçebilen ve ürüne zarar vermeyen nem ölçme sistemlerine gereksinim vardır.

Tahılların dielektrik özellikleri, nem içeriğine, hacim ağırlığına, sıcaklığa ve uygulanan frekansa bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Nem içeriği, bünyesinde bulunan suyun toplam kütesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Tahılın bağıl elektriksel geçirgenliği ya da dielektrik özellikleri, içerisinde bulunan suyun miktarıyla orantılıdır. Örneğin, suyun dielektrik katsayısı 80 iken, kuru tahılın dielektrik katsayısı 3 civarındadır. Bundan dolayı, tahıl içerisindeki su miktarının dielektrik özelliklerinden yararlanarak belirlenmesi oldukça uygun bir yöntemdir. Son yıllarda elektromanyetik spektrumun radyo frekans (RF) bölgesinde tahılların davranışları sıkça incelenmiş ve hızlı nem ölçme sistemlerinde kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, tahılların nemini ölçebilen RF nem ölçme sistemi geliştirmektir. Bu amacı gerçekleştirmek için aşağıdaki iş paketlerine yer verilmiştir:

- (1) Paralel plakalı ve silindirik koaksiyal ölçüm kutularının yapılması,
- (2) Radyo frekans (RF) bölgesinde ölçüm kutularının elektriksel özelliklerinin belirlenmesi,
- (3) RF nem ölçme düzeninin otomasyonunun sağlanması,
- (4) Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü yardımıyla çeşitli matematiksel modellerin geliştirilmesi,
- (5) Geliştirilen RF nem ölçme düzenlerinin nem ölçme yeteneğinin araştırılmasıdır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tarımsal ürünlerin dielektrik özellikleri, materyallerin elektromanyetik alandaki davranışlarını incelemektedir. Radyo frekans ve mikrodalga frekans bölgelerindeki dielektrik özellikler, yüksek frekanslı bir alana maruz bırakılan tarımsal ürünlerin elektriksel değişimlerini inceler (Nelson ve Bartley 2000). Tahılların ve diğer tarımsal ürünlerin dielektrik özellikleri, hem temel hem de uygulamalı bilim alanlardaki mühendislik uygulamalarında büyük öneme sahiptir (Bartley vd. 2002). Nem algılama prensibi, tahılın dielektrik özellikleri ile tahılda bulunan su miktarı arasındaki ilişkiye dayandırılmaktadır. Çoğu tarımsal ürünün nemli özelliği ve bu materyallerdeki kuru maddenin ve su miktarının dielektrik özellikleri, bu ürünlerin neminin algılanmasında RF ve mikrodalga tekniklerinin uygulanabilirliğini artırmıştır (Nelson ve Bartley 2000). Tahılın dielektrik özellikleri, içerisinde bulunan suyun miktarıyla orantılıdır. Öyle ki suyun dielektrik katsayısı 80 iken, kuru tahılın dielektrik katsayısı 3 civarındadır. Bundan dolayı, tahıl içerisindeki su miktarını dielektrik özelliklerle belirlemek oldukça iyi bir yöntemdir (Lawrence vd. 1998a). Tahılın dielektrik özellikleri ayrıca RF ve mikrodalga ısıtma uygulamalarında, tahıl kurutma, tohum çimlenmesi ve yüksek frekanslı alanda depo zararlılarıyla mücadele gibi tarımsal faaliyetlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Nelson 1992).

Bir cisme gönderilen elektromanyetik sinyal üç kısma ayrılır: enerjinin bir kısmı yansır, bir kısmı yüzey boyunca iletilir, diğer kısmı ise cisim tarafından emilir. Bu üç bölüme ayrılan enerji oranları, dielektrik özellik olarak adlandırılır (Venkatesh ve Raghavan 2004). Elektriksel geçirgenlik, cisim içerisindeki dalga enerjisinin artışı ya da azalışında elektromanyetik dalgaların yansımalarına etki eden dielektrik özellikleri tanımlayan temel bir elektriksel özelliktir. Bir cismin kompleks bağıl elektriksel geçirgenliği aşağıdaki gibi kompleks biçimde ifade edilmektedir (Ikediala vd. 2000):

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \dots\dots\dots (2.1)$$

Kompleks ifadenin gerçek kısmı  $\epsilon'$ , dielektrik katsayısı olarak ifade edilmekte olup

cismin bir elektrik alanına maruz kaldığındaki depolanan enerjiyi ifade etmektedir. Kompleks ifadenin sanal kısmı  $\varepsilon''$  ise kayıp faktörü olup, enerjiyi yayma yeteneği veya elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşme oranı olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki eşitlikteki ifadede  $j=\sqrt{-1}$  dir (Wang vd. 2003). Kayıp tanjant ise aşağıdaki formülle ifade edilmektedir:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Tarımsal ürünler elektromanyetik alana maruz kaldıkları çalışma frekansında, elektrik enerjisi ısı enerjisine dönüşür (Feng vd. 2002):

$$P = 5.563 \times 10^{-11} f \times E^2 \times \varepsilon''$$

Burada P, mikrodalga ve RF enerjinin ısı enerjisine dönüşümüyle absorbe edilen güç ( $W/m^3$ ); f, frekans (Hz); E, elektrik alan şiddeti (V/m)'dir. RF ve mikrodalga kurutma uygulamalarında ürün tarafından absorbe edilen güç, kayıp faktörü  $\varepsilon''$  ile orantılı olup, kayıp faktörünün yükselmesi, ürün içerisindeki RF veya mikrodalga enerjisinin penetrasyon derinliğinin azalmasına yol açmaktadır. Bundan dolayı, penetrasyon derinliği, ürünün kalınlığıyla kıyaslandığında daha büyük olursa absorbe edilen RF veya mikrodalga enerjisi yetersiz kalabilir. Bundan dolayı penetrasyon derinliğinin belirlenmesi üniform bir kurutma için önem kazanmaktadır. Penetrasyon derinliği  $d_p$  aşağıdaki formülle belirlenmektedir (Liu vd. 2009):

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' [\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1]}}$$

Burada c, ışın boşluktaki hızı ( $3 \times 10^8$  m/s) ve  $d_p$  ise penetrasyon derinliği (m)'dir.

Dielektrik katsayısı ve kayıp faktörü; frekans, nem, hacim ağırlığı ve sıcaklıktan büyük oranda etkilenmektedir. Nem içeriğinin belirlenmesi için dielektrik özelliklerin kullanılmasında dielektrik özellikleri etkileyen diğer faktörlerin de etkisi iyi incelenmelidir. Örneğin statik nem ölçümlerinde hacim ağırlığı dikkate alınabilmesine karşın sürekli akışlı sistemlerde hacim ağırlığının etkisi hala bir sorun olmaktadır (Lawrence vd. 1998).

Tahılların dielektrik özelliklerini etkileyen faktörler çeşitli bilim insanları tarafından incelenmiştir (Nelson 1965, Corcoran vd. 1970, Jorgenson vd. 1970, Stetson ve Nelson 1970, Nelson ve Stetson 1976, Sokhansanj ve Nelson 1988, Kraszewski ve Nelson 1991, Lawrence Nelson 1993, Berbert ve Stenning 1996, Lawrence vd. 1998, Lawrence vd. 2001, Berbert vd. 2002, Kim vd. 2002, Kim vd. 2003, Boldor vd. 2004, Saçılık ve Çolak 2005). Buğday, arpa ve mısır dünyada hem insan hem de hayvan beslenmesi açısından en önemli tahıllar arasında yer almaktadır. Bu tahılların RF bölgesindeki dielektrik özellikleri, tahribatsız nem ölçümünde ve online nem algılama sistemlerinde kalibrasyon fonksiyonlarının geliştirilmesinde yararlı olacaktır.

Berbert ve Stenning (1996a), % 10-22 yaş baz (y.b) nem aralığındaki buğdayın özel olarak imal edilen silindirik koaksiyal ölçüm kutusu içerisindeki kapasitanslarını 0.5-5 MHz frekans aralığında ürünle dolu ve boş iken HP 4285 LCR meter ile ölçmüşlerdir. Elde edilen 0.5-5 MHz frekans aralığındaki dielektrik ( $\epsilon'$ ) ve kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) katsayıları ile ürün nemi ve hacim ağırlığı arasında matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Bu modeller yardımıyla tahmin edilen ürünün nem içeriğini standart fırın yöntemiyle elde edilen nem değerleriyle karşılaştırmışlar ve kalibrasyonun standart hatasını % 0.3 olarak belirlemişlerdir. Bu hata payının ticari nem ölçerle kıyaslandığında normal olduğunu ve dinamik ölçümlerde hacim ağırlığındaki dalgalanmalardan dolayı hacim ağırlığından bağımsız fonksiyonların geliştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir.

Berbert ve Stenning (1996b), % 11.5-21.5 y.b daki buğdayın akış halindeyken nem içeriklerini online olarak ölçebilen bir sistem geliştirmişlerdir. Ürünün 0.5 MHz deki kondüktans ve kapasitanslarını HP 4285 LCR meter ile ölçmüşlerdir. Akış halindeyken buğdayın hacim ağırlığının nem değerleri üzerine etkisini azaltmak için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen  $[(\epsilon'-1/ \epsilon'')]$  fonksiyonu kalibrasyon modellerine dahil etmişler ve 6 adet kalibrasyon modelinin performansını incelemişlerdir. Farklı çeşit buğdayda *SEC* değerini 0.4-0.5 y.b nem olarak bulmuştur. Burada önerilen sistemin düşük kütleli akışlar için uygun olduğunu yüksek kütleli akışlardaki çalışmaların devam ettiğini araştırmada ifade etmişlerdir.

Berbert vd. (2001), % 11-22 y.b nem ve 326-455 kg/m<sup>3</sup> hacim ağırlığı aralığındaki üç farklı çeşit kahve çekirdeklerinin dielektrik özelliklerini, HP 4285 LCR meter ile 75 kHz-5 MHz frekans aralığında ölçmüşlerdir. Silindirik kondansatör içerisine yerleştirilen kahve parçacıklarının içerisine, aynı boyuta sahip ve havanın elektriksel geçirgenliğine oldukça yakın olan boncuklar yerleştirilerek hacim ağırlığı değiştirilmiştir. Artan frekansa bağlı olarak dielektrik katsayısı ( $\epsilon'$ ), kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) ve kayıp tanjant ( $\delta$ ) değerleri azalırken elektriksel iletkenliğinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Ürün neminin kahvenin dielektrik özellikleri üzerine önemli bir etkisi olduğunu ifade etmişler ve nem artışıyla birlikte ürünün dielektrik katsayısı ve kayıp faktörünün de arttığını gözlemlemişlerdir.

Boldor vd. (2004), çeşitli hacim ağırlığı, sıcaklık ve nem içeriğine sahip olan kabuklu ve kabuksuz yer fıstıklarının dielektrik özelliklerini 300-3000 MHz frekans aralığında incelemişlerdir. Denemeleri; 23, 30, 40 ve 50°C sıcaklık, 332.6, 338.6, 628 ve 654.6 kg/m<sup>3</sup> hacim ağırlığı ve % 18, 23, 33 ve 39 nem seviyelerinde gerçekleştirmişlerdir. Mikrodalga frekans kaynağı olarak HP 8753C network analizörünü kullanmışlardır. Network analizör, HP85070B dielektrik yazılımı ile kontrol edilmiştir. Çoklu regresyon tekniği kullanılarak sıcaklık, hacim ağırlığı ve ürün neminin dielektrik ( $\epsilon'$ ) ve kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) katsayıları üzerine etkilerini logaritmik modellerle açıklamışlardır. Ürün neminin artışıyla birlikte dielektrik katsayısı ve kayıp faktörünün de arttığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen matematiksel modellerin sıcaklığa, neme ve hacim ağırlığına bağlı olarak yer fıstığının dielektrik özelliklerini iyi bir şekilde tahmin ettiğini ifade etmişlerdir.

Kim vd. (2003), çeşitli nem içeriğine sahip arpa, buğday, pirincin RF empedans yöntemi kullanılarak nem içeriğini online olarak ölçebilecek bir nem ölçer geliştirmişlerdir. Tahılların dielektrik özellikleri özel olarak imal edilen paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusu içerisindeki değerlerini 1-10 MHz aralığında HP 4195 A empedans analizörü ile ölçmüşlerdir. Akış halindeyken nem ölçerin çalışma ilkesi verilmiş ve dielektrik katsayısı ve kayıp faktörünü verecek eşitlikler geliştirmişlerdir. Nem içeriğini doğrudan ölçebilecek kalibrasyon modelinin standart hatasının % 10-24

nem içeriğindeki nem için sadece 0.40 nem olduğunu belirtmişlerdir. Mevcut sistemin literatürlerde belirtilen kalibrasyon hatalarından çok az büyük olmasına karşın güvenle kullanılabilceğini ifade etmişlerdir.

Lawrence ve Nelson (1993a), % 11-22 y.b nem ve 650-850 kg/m<sup>3</sup> hacim ağırlığı aralığındaki buğdayın dielektrik özelliklerini, HP 4192A empedans analizörü ile 1-10MHz radyo frekans aralığında ölçmüşlerdir. Ürünün içerisine konulduğu 1143 cm<sup>3</sup> hacmindeki paralel plakalı kondansatör, HP 16095A arabirimi ile empedans analizörüne bağlanmıştır. Değişik hacim ağırlıkları elde etmek için paralel plakalı kondansatör içerisine yerleştirilen ürün üzerine basınç uygulanarak her nem seviyesinde altı değişik hacim ağırlığı elde edilmiştir. Hacim ağırlığının buğdayın dielektrik özellikleri üzerine olan etkisini en aza indirmek amacıyla  $[(\epsilon'-1/\epsilon'')]$  fonksiyonunu kullanarak 1 ve 10 MHz arasındaki nem değerlerini belirlemek için bir matematiksel model önermişlerdir. Bu modelle tahmin edilen ürünün nem içeriğini standart fırın yöntemiyle karşılaştırmışlar ve  $r^2$  0.973, kalibrasyonun standart hatasını 0.62 ve kalibrasyonun performansını ise % 0.49 nem bulmuşlardır. Dielektrik kayıp faktörünün 100 MHz'den sonra nemle daha doğrusal olduğundan ölçümlerin bu frekanstan sonra yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu sonucun online ölçme sistemlerinde nem ölçümü için yeterli olduğu ancak bunun başarısının akıştaki dalgalanmaları en aza indirecek sistemlere bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Lawrence ve Nelson (1993b), bir önceki çalışmasında belirtmiş olduğu frekans aralığını artırarak buğdayın dielektrik özelliklerini, HP 4192A empedans analizörü ile 1-1000 MHz aralığında ölçmüşlerdir. Hacim ağırlığının buğdayın dielektrik özellikleri üzerine olan etkisini en aza indirmek amacıyla  $[(\epsilon'-1/\epsilon'')]$  fonksiyonunu kullanmışlar ve 10, 50 ve 100 MHz'deki noktalarda kondüktans ve kapasitans değerlerine bağlı olarak nem değerlerini belirlemek için bir matematiksel model önermişlerdir. Bu modelle tahmin edilen ürünün nem içeriğini standart fırın yöntemiyle karşılaştırmışlar ve  $r^2$  0.991, kalibrasyonun standart hatasını 0.36 ve kalibrasyonun performansını ise 0.40 nem bulmuşlardır. Mutlak bağıl hata ise % 0.16 olarak bulmuşlar ve bu sistemin online nem ölçme sistemlerinde iyi çalıştığını ancak sistemin hatasının biraz daha aşağıya



indirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Lawrence vd. (1998a), hacim ağırlığına bağlı olmaksızın buğdayın nemini hızlı biçimde ölçebilecek bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. % 9-20 y.b nem ve 620-790 kg/m<sup>3</sup> hacim ağırlığı aralığındaki buğdayın dielektrik özelliklerini, HP 4191A RF empedans analizör ile 1-110 MHz frekans aralığında ölçmüşlerdir. Ürünün içerisine konulduğu 1143 cm<sup>3</sup> hacmindeki paralel plakalı kondansatör, APC-7 arabirim ile bilgisayar kontrollü ile empedans analizörüne bağlanmıştır. Denemelerden önce empedans analizörün kalibrasyonu yapılmış ve buğday, ölçüm kutusunun içerisine boşaltılmıştır. Değişik hacim ağırlıkları elde etmek için paralel plakalı kondansatör içerisine yerleştirilen ürün üzerine basınç uygulanarak her nem seviyesinde altı değişik hacim ağırlığı elde edilmiştir. Ölçüm esnasında buğdayda nem kaybı olup olmadığını belirlemek için ölçülen buğday örneklerinin nem tayini yapılmış ve nem kaybının sadece % 0.2 olduğu belirlenmiştir. Hacim ağırlığının buğdayın dielektrik özellikleri üzerine olan etkisini en aza indirmek amacıyla 2.3, 24 ve 83 MHz'deki  $[(\epsilon' - 1/\epsilon'')]$  fonksiyonunu kullanarak nemi belirleyen bir matematiksel model önermişlerdir. Bu modelle tahmin edilen nem değerlerini ASAE tarafından önerilen standart fırın yöntemiyle karşılaştırmışlar ve kalibrasyonun standart hatasını % 0.39 olarak bulmuşlardır. Geliştirilen bu modelin tüm nem aralıklarında güvenli sonuçlar verdiğini ancak sürekli akış esnasında sistemin performansının belirlenmesi için araştırmalar yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Lawrence vd. (1998b), hacim ağırlığına bağlı olmaksızın buğdayın nemini algılayan bir ölçme düzeni geliştirmişlerdir. % 9-21 y.b nem ve 660-830 kg/m<sup>3</sup> hacim ağırlığı aralığındaki buğdayın dielektrik özelliklerini, HP 8753C network analizörü ile 1-3500 MHz aralığında ölçmüşlerdir. Denemelerden önce empedans analizörün kalibrasyonu yapılmış ve buğday, ölçüm kutusunun içerisine boşaltılmıştır. Nem içeriği, 40, 240 ve 340 MHz'deki üç frekansta kompleks iletim oranı  $S_{21}$  parametresi kalibrasyon modeline dahil ederek belirlemişlerdir. Kalibrasyonun standart hatasını 0.38 nem ve  $r^2$  si ise 0.991 olarak bulmuşlardır. Modelle tahmin edilen nem içeriklerinin standart fırın yöntemiyle ölçülen nem içerikleriyle uyumlu olduğunu grafiklerle açıklamışlardır. Modelin

modelleme yeterliliği için denemeler yapılmış ve modelin performans hatasının 0.36 nem ve mutlak bağıl hatasının ise -0.06 nem olduğunu ifade etmişlerdir.

Lawrence vd. (1998), % 9-21 y.b nem aralığındaki buğdayın dielektrik özelliklerini, HP8753 network analizör cihazı ile 1-350 MHz frekans aralığında ölçmüşlerdir. Ürünün içerisine konulduğu kondansatörün çapı 7.2 cm olup dielektrik ölçümleri için özel olarak imal edilmiştir. Cihaz kondansatöre, APC-7 adaptör ile bağlanmıştır. Değişik hacim ağırlıkları elde etmek için kutu içerisine yerleştirilen ürün üzerine basınç uygulanmış ve böylece her bir nem seviyesinde beş değişik hacim ağırlığı elde edilmiştir. Ürün neminin buğdayın dielektrik özellikleri üzerine önemli bir etkisi olduğunu ifade etmişler ve nem artışıyla birlikte ürünün dielektrik katsayısı ve kayıp faktörünün de arttığını gözlemlemişlerdir.

Lawrence vd. (2001), buğday, mısır, pirinç ve soyanın statik durumdaki nem değerleri için paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusu kullanmışlar ve kompleks yansıma oranına göre çalışabilen bir nem algılayıcısı geliştirmişlerdir. Algılayıcının kompleks yansıma oranı, 1-500 MHz aralığında HP 4291 A empedans analizör kullanılarak belirlenmiştir. Verilen değerlendirilmesi için çok değişkenli regresyon analizi tekniği kullanılmış ve nem modeline dahil edilecek frekansların 1, 41 ve 141 MHz olduğuna karar vermişlerdir. Bu modelle tahmin edilen ürünün nem içeriğini standart fırın yöntemiyle karşılaştırmışlar ve mısır, buğday, soya ve pirincin kalibrasyondaki standart hatasını sırasıyla % 0.37, 0.25, 0.18 ve 0.29 nem olarak bulmuşlardır. Geliştirilen nem algılayıcısının aynı koşullarda ticari nem ölçere göre aynı mutlak hataya sahip olmasına karşın daha en düşük standart hata vermesinden dolayı sistemin güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Mclendon vd. (1993), % 11-19 y.b nem aralığındaki buğdayın statik ve akış esnasındaki nem içeriğini, mikrodalga frekansları aralığında hacim ağırlığına bağlı olmaksızın ölçmüşlerdir. Nem ölçümleri için bir elektronik devre tasarlamışlardır. Mikrodalga frekans kaynağı olarak ta HP8510B network analizörü kullanmışlardır. Statik ölçümler için ürün, ölçüleri 17×12×13 cm olan kutu içerisindeki iki verici arasına gelecek şekilde

yerleştirilmiştir. Değişik hacim ağırlıkları elde etmek için ya buğdayın boyutlarına eşit olan boncuklarla buğdaylar karıştırılmış ya da kutu içerisindeki ürün üzerine basınç uygulanmıştır. Dinamik testler için ürünün fleksiglastan yapılan deponun altına yerleştirilen orifisten buğdayın düzgün akışı sağlanmıştır. 10 cm çapındaki borudan geçen ürünün oluşturduğu sinyal, geliştirilen elektronik devre algılamıştır. Elde edilen kalibrasyon eşitliklerinden yararlanılarak buğdayın nem ölçümleri statik koşulda % 0.7, dinamik koşulda ise % 1.2 hata ile tahmin edilmiştir.

Nelson ve Lawrence (1994a), % 7-20 y.b nem aralığındaki soyanın dielektrik özelliklerini, radyo frekans empedans ve elektriksel iletkenlik yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Elektriksel iletkenlik yöntemiyle soyanın nemini ölçmek için RS232 arabirimiyle bilgisayara bağlanan bir CTR-160 A nem ölçer kullanılmıştır. Empedans yöntemiyle nem ölçümünde ise soyanın içerisine konulduğu paralel plakalı kondansatör, HP 16096A arabirimi ile HP 4192A LF analizörüne bağlanmıştır. Empedans ölçümleri, 1-5 MHz radyo frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. 1 ve 5 MHz'deki sığa değişimleri ile nem arasında, bir logaritmik model önermişlerdir. Bu modelle tahmin edilen ürünün nem içeriğini standart fırın yöntemiyle karşılaştırmışlar ve kalibrasyonun standart hatasını elektriksel iletkenlik yönteminde % 0.68, empedans yönteminde ise % 0.56 olduğunu ifade etmişlerdir. Bu sonuçlara göre, uygun bir biçimde kalibrasyon yapıldığında her iki yönteminde en düşük standart hata ile güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Nelson ve Lawrence (1994b), % 9-22 y.b nem aralığındaki hurmanın dielektrik özelliklerini, HP4192A empedans analizörü ile 1-5 MHz radyo frekans aralığında ölçmüşlerdir. Empedans ölçümleri için 5 cm çapında kondansatör kullanılmıştır. Hurmanın içerisine konulduğu paralel plakalı kondansatör, HP 16096A arabirimi ile HP 4192A LF analizörüne bağlanmıştır. Empedans ölçümleri beş nem seviyesinde yapılmış ve sığa değişimleri ile nem arasında, bir logaritmik model önermişlerdir. Bu modelle tahmin edilen ürünün nem içeriğini standart fırın yöntemiyle karşılaştırmışlar ve kalibrasyonun standart hatasını % 1'den daha düşük bulmuşlardır. Ancak bu yöntemin, hurmaların sürekli olarak nemini belirlenmesinde yeterli olmadığını bunun için

çalışmalar yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Saçılık ve Çolak (2008), buğday, arpa ve mısırın 14, 20 ve 26 MHz'deki dielektrik özelliklerinden yararlanılarak nem içeriğini akış halindeyken sürekli ölçebilen dielektrik tabanlı bir nem ölçme sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen nem algılayıcısının verileri, empedans analizörüyle kıyaslamışlardır. Akış halindeki buğday, arpa ve mısırın nem ölçme sistemiyle ölçümlerinin standart hatası sırasıyla % 0.28, 0.45 ve 0.30 y.b nem bulmuşlardır. Geliştirilen nem ölçerin, akış halindeki tahılların nem içeriğini yapılan istatistiksel analizler sonucunda yeterince ölçtüğünü belirtmişlerdir.

Trabelsi vd. (1999), buğday ve mısırın nem ve hacim ağırlığını, geniş bir mikrodalga frekans aralığında elektriksel geçirgenlik yöntemini kullanarak ölçmüşlerdir. Ürünlerin konulduğu kutu, boşluksuz bir ortama konulmuş ve koaksiyal kablo ile network analizörüne bağlanmıştır. Her ürün, içerisinde alıcı ve verici bulunan kutu içerisine yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Dielektrik katsayısı ( $\epsilon'$ ) ve kayıp faktörünün ( $\epsilon''$ ) ürün nemi ve hacim ağırlığına bağlı olduğunu belirtmişler ve ürünlerin dielektrik özellikleri ile nem ve hacim ağırlığı arasında matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Buğdayda elektriksel geçirgenlik yöntemiyle bulunan nemi 10.6-19.2 %, hacim ağırlığını ise 720-880 kg/m<sup>3</sup>, mısırdaki ise nemi % 9.0-19.2, hacim ağırlığını ise 695-830 kg/m<sup>3</sup> aralığında olduğunu belirtmişlerdir. Geliştirilen kalibrasyon eşitliklerinin standart hatalarını ise buğdayda nem için % 0.27 ve hacim ağırlığı için 7.8 kg/m<sup>3</sup>, mısırdaki ise nem için % 0.46 ve hacim ağırlığı için ise 12.9 kg/m<sup>3</sup> olarak bulmuşlardır. Hacim ağırlığının buğday ve mısırın dielektrik özellikleri üzerine olan etkisini en aza indirmek amacıyla [ $(\epsilon'-1/\epsilon'')$ ] eşitliğinin yansıya yeni bir hacim ağırlığından bağımsız bir eşitliği daha modele dahil etmişlerdir. Bu modelle elde edilen nem değerlerinin standart hatasını buğday için yaklaşık % 0.5, mısır için ise % 1'den daha az olarak hesap etmişlerdir. Geliştirilen bu yeni yöntemin ölçme sistemlerinden bağımsız olarak nem ölçümünde güvenle kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Trabelsi vd. (2001), yulaf, soya ve buğdayın nem içeriğini 9.46 GHz mikrodalga frekansında ve 24°C sıcaklıkta belirlemek için çok amaçlı bir kalibrasyon yöntemi

üzerinde çalışmışlardır. Dielektrik özellikleri ölçülecek ürünün içerisine konulduğu 25×25×10.9 cm ölçülerindeki kutu, boşluksuz bir ortama konulmuş ve koaksiyal kablo ile HP 8510B vektör network analizörüne bağlanmıştır. Her ürün, içerisinde alıcı ve verici bulunan kutu içerisine yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Ürünün şekline, boyutuna, yapısına ve hacim ağırlığındaki değişimlere bağlı olmaksızın sadece verilen frekansta ve sıcaklıktaki neme bağlı olan bir geçirgenlik fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu modeli kullanarak elde edilen ürünün nem içeriğini, ASAE tarafından önerilen fırın yöntemiyle karşılaştırmışlar ve kalibrasyonun standart hatasını % 0.46 olarak bulmuşlardır.

Trabelsi ve Nelson (2004), çeşitli nem ve hacim ağırlığına sahip olan kabuklu ve kabuksuz yer fıstığının oda sıcaklığındaki dielektrik özellikleri, 2-18 GHz mikrodalga frekans aralığında incelemişlerdir. Ürünlerin içerisine konulduğu 25×25×15.4 cm ölçülerindeki kutu; boşluksuz bir ortama konulmuş ve APC-7 arabirimi ile bilgisayar kontrollü HP 8510C vektör network analizörüne bağlanmıştır. Ölçümlerden önce network analizörün kalibrasyonu yapılmıştır. Hem kabuklu hem de kabuksuz hacim ağırlığı ve ürün nemindeki artışla birlikte dielektrik katsayısı ve kayıp faktörünün de arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm deneme sonuçlarını tablolar halinde araştırmada ayrıca vermişlerdir.

Zoerb vd. (1993), hasat esnasında tahılın nemini sürekli olarak izleyebilen bir dielektrik ölçme sistemli tabanlı nem ölçer geliştirmişlerdir. Denemelerini hem paralel plakalı hem de silindirik kondansatörde gerçekleştirmişlerdir. Tahılın nemini bulmak için frekans ile tahılla dolu kondansatörün sığasını ilişkilendirmişlerdir. Modelle elde edilen nem içeriğini standart yöntemle elde edilen fırın yöntemiyle karşılaştırmışlar ve ölçümün standart hatasını bezelye için % 0.7 ve arpa için % 1.18 olarak belirlemişlerdir. Ayrıca hacim ağırlığındaki ani değişimlerin bu ölçüm yönteminde pek sorun çıkarmadığını ancak buğday, arpa ve yulafın standart hatalarının biraz daha büyük olduğunu ifade etmişlerdir.

### 3. MATERAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Materyal

##### 3.1.1 Araştırmada kullanılan buğday

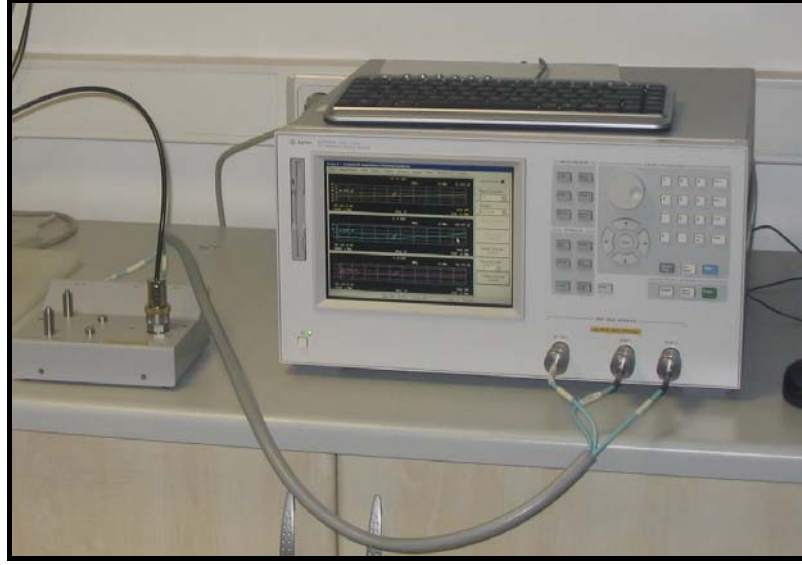
Tahılda nem ölçümünde kullanılacak RF nem algılayıcısının geliştirilmesi için yapılan denemelerde, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Araştırma ve Uygulama Çiftliği'nde yetiştirilen bezostaya çeşidi tohumluk buğday kullanılmıştır. 2009 yılında yetiştirilen buğdaylardan alınan elenmiş örneklerin bazı fizikomekanik özelliklerinin ortalamaları ve standart hataları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Araştırmada kullanılan buğdayın bazı fizikomekanik özellikleri

	Hacim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	1000 dane ağırlığı (g)
Buğday	830.49±2.97	39.12±0.28

##### 3.1.2 Denemede kullanılan ölçme cihazları

Buğday neminin RF nem algılayıcısıyla belirlenmesinde çeşitli ölçü cihazları kullanılmıştır. Silindirik ve paralel koaksiyal ölçüm kutularının empedansı ile buğdayların dielektrik özellikleri Agilent 4991A empedans analizörü ile belirlenmiştir (Şekil 3.1). Empedans analizörü ile belirlenen elektriksel değerler, RF tabanlı nem ölçme sisteminin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Analizör, 1-2800 MHz ölçüm aralığına sahip olup, 16453A dielektrik test düzeneği, E4991A-010 bağlantı kiti, 16192A paralel test düzeneği ve diğer parçaları içermektedir. Deney düzeneğinde E4991A empedans analizörü ile ölçülen veriler, IEEE-488 (GPIB-625) haberleşme portu üzerinden bir bilgisayara gönderilmektedir. Geliştirilen bir yardımcı program ile empedans analizöründen alınan veriler bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 3.1 Elektriksel değerlerin ölçülmesinde kullanılan E4991A empedans analizörü

Tahılların gravimetrik olarak ilk neminin belirlenmesinde 20-150°C ölçme aralığına sahip sıcaklık ve zaman ayarlı standart sıcak hava akışlı etüv kullanılmıştır (Şekil 3.2). Standart fırın yöntemiyle elde edilen nem değerleri, RF tabanlı nem ölçme sisteminin kalibrasyonunda kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Araştırmada kullanılan hava akışlı etüv

Buğdayların nem içeriğinin belirlenmesinde ve RF tabanlı ölçme sisteminde ölçülen

nem değerlerinin kıyaslanmasında  $\pm 0.1$  hassasiyetli DELMHORST elektrikli nem ölçer kullanılmıştır (şekil 3.3). Nem ölçer, çeşitli tahılların nem ierini tahribatsız olarak ölçebilmektedir.



şekil 3.3 Elektrikli nem ölçer

Buğdayların tartımında, METTLER marka elektronik terazi kullanılmıştır (şekil 3.3). Dahili kalibrasyonu ve dijital göstergeye sahip elektronik terazinin ölçme aralığı 3000 gram olup hassasiyeti  $\pm 0.01$  gramdır.



şekil 3.4 Elektronik terazi

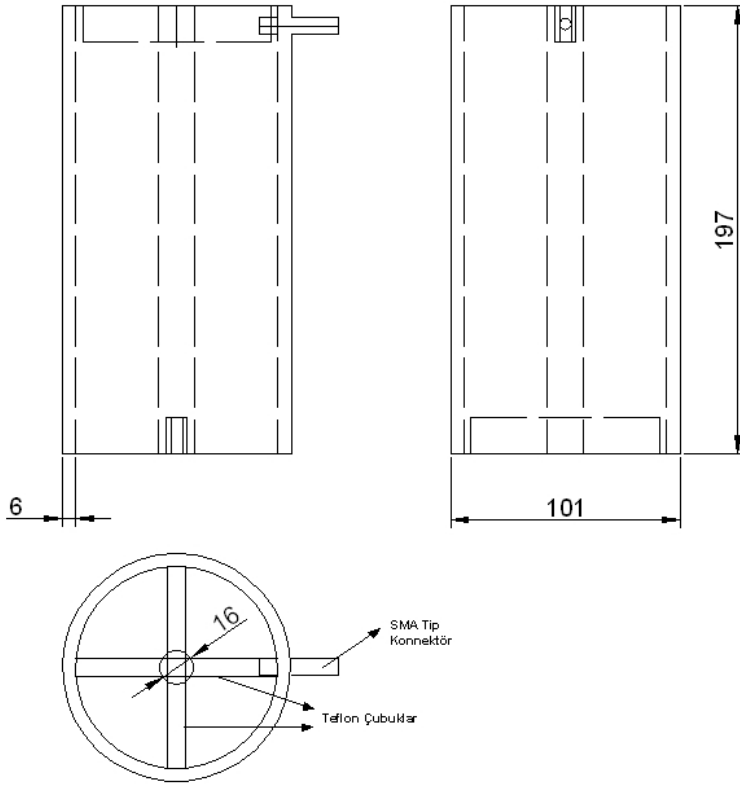


## 3.2 Yöntem

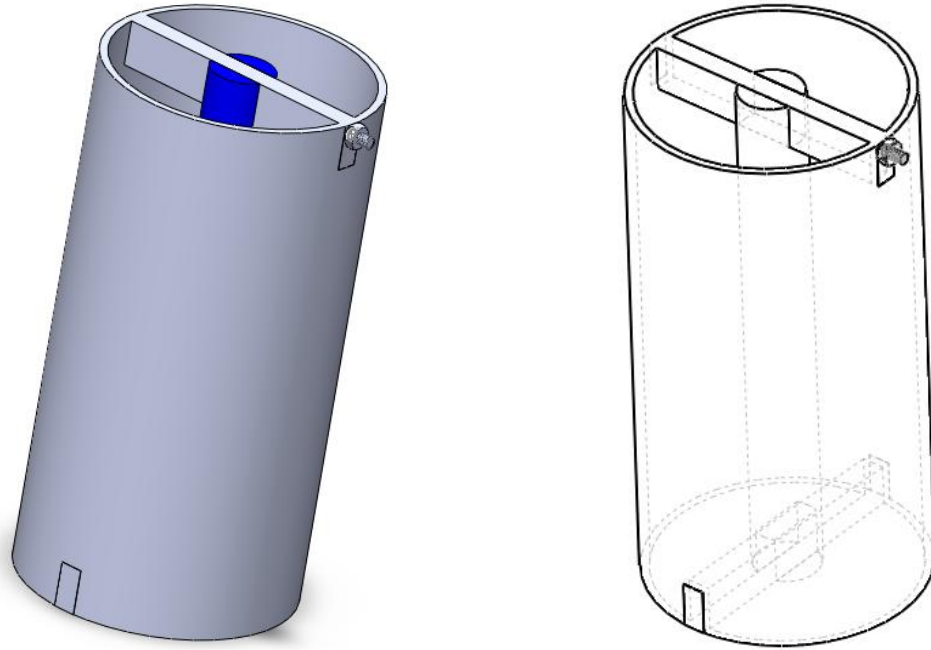
### 3.2.1 Koaksiyal ölçüm kutularının tasarımı

Bağıl elektriksel özellik, o materyale özgü olup ölçme teknikleri birbirinden farklılık göstermektedir. Tahılların yapısı ve fizikomekanik özellikleri sebze ve meyvelerden farklıdır. RF ve mikrodalga bölgelerinde tahılların elektriksel iletkenlik ölçümleri çeşitli tekniklerle belirlenebilmektedir. Tahılların içerisine konulduğu ölçüm kutusundaki elektriksel ölçümler, paralel plakalı veya silindirik koaksiyal tekniği, rezonans kavite ve iletim hattı boyundaki değişimlerin ölçülmesi gibi çeşitli yöntemlerle belirlenebilmektedir. Frekansa bağlı olarak tahılların dielektrik özellikleri, empedans, spektrum veya network analizörüne bağlanabilen deneme düzenleri ile başarıyla ölçülebilmektedir.

Tahıllarda nem ölçümünde kullanılacak RF nem algılayıcısının geliştirilmesinde RF frekans bölgesinde çalışabilen paralel plakalı ve silindirik koaksiyal ölçüm kutuları kullanılmıştır. Bu ölçüm kutuları bir kapasitör olarak düşünülmüştür. Tahılların bağıl elektriksel iletkenlik değerleri, nem içeriği ile sürekli değiştiğinden ürünün içeriside konulduğu ölçüm kutusundaki kapasitans değişimleri, tahılın dielektrik katsayısının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Denemelerde kullanılan silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun üç görünüşü ve perspektifleri sırasıyla Şekil 3.5 ve 3.6'da verilmiştir. Kapasitans ölçümlerinde kullanılan ve buğdayların içerisine konulduğu silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun çapı 101 mm yüksekliği ise 197 mm'dir. Koaksiyal kapasitörün dış elektrodunun çapı 89 mm, paslanmaz çelikten yapılan iç elektrodunun çapı ise 16 mm dir. 89×17×8.5 mm ölçülerinde dikdörtgen prizması şeklindeki iki teflon çubuk silindirik kapasitörün alt ve üst kısmına yerleştirilmiştir. Silindirik kapasitör, 50 Ω luk kablo ve SMA tip konnektör yardımıyla 16453A test başlığına bağlanmıştır. Silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun toplam hacmi ise 1512 cm<sup>3</sup>'tür.

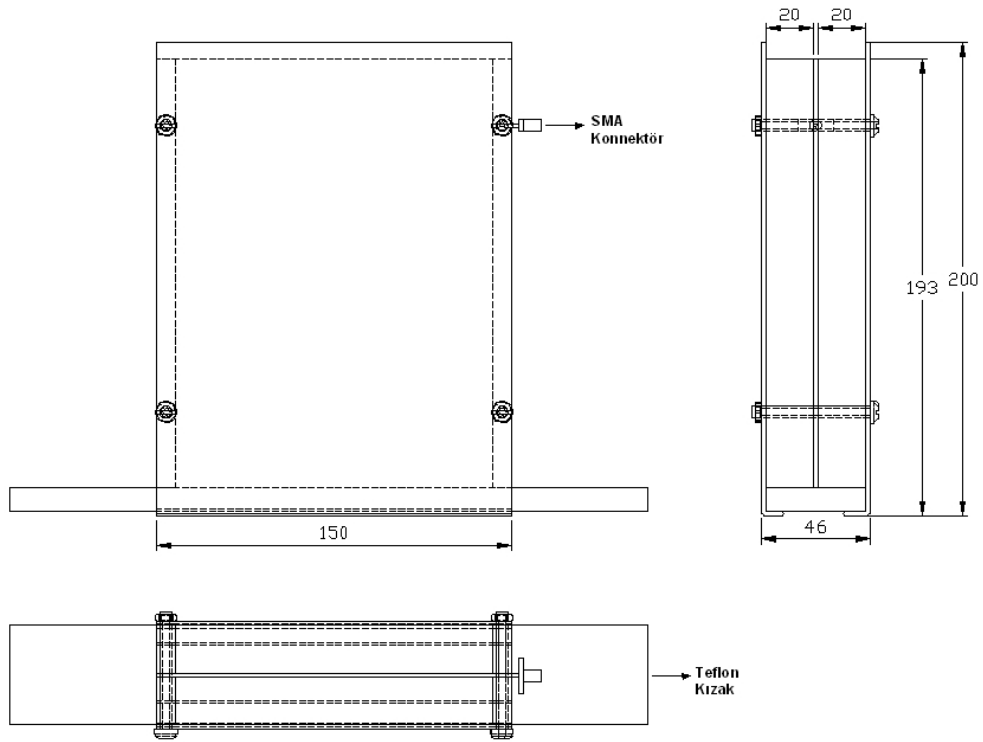


Şekil 3.5 Silindirik koaksiyal ölçüm kutusu (ölçüler mm dir)

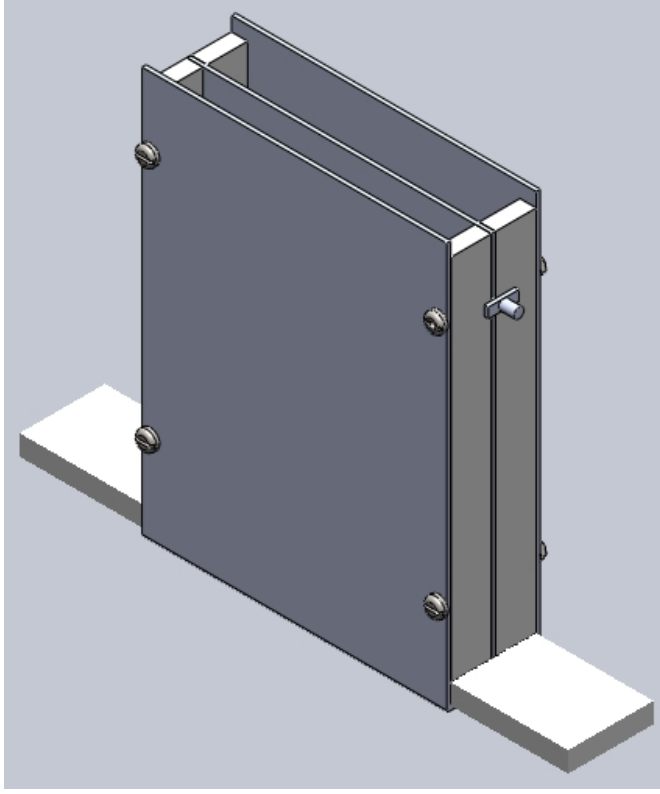


Şekil 3.6 Silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun perspektifi

Denemelerde kullanılan paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunun üç görünüşü ve perspektif görünümü sırasıyla Şekil 3.7 ve 3.8’de verilmiştir. Kapasitans ölçümlerinde kullanılan ve buğdayların içerisine konulduğu paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunun yüksekliği 200 mm, genişliği 150 mm ve derinliği ise 46 mm dir. Dış elektrot 2 mm kalınlığında alüminyum malzemeden Lawrence ve Nelson (1993) tarafından önerildiği gibi tasarlanmıştır. Paralel plakalı kapasitörün altındaki sürgülü kızak teflon malzemeden yapılmış olup ölçüm sonrası buğdayların boşaltılmasında kullanılmıştır. Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusu, 50  $\Omega$  luk kablo ve SMA tip konnektör yardımıyla 16453A test başlığına bağlanmıştır. Paralel kapasitörün toplam hacmi ise 936 cm<sup>3</sup>’tür.



Şekil 3.7 Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusu (ölçüler mm’dir)



Şekil 3.8 Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunun perspektifi

Tahılların dielektrik katsayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \dots\dots\dots (3.1)$$

Burada:

$\epsilon'$  : Dielektrik katsayısı,

$C$  : Ürün ile doluyken ölçülen kapasitans (pF),

$C_0$  : Ölçüm kutusunun boşken kapasitansı (pF) dır.

Tahılların kayıp faktörü ise aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmiştir (Saçılık ve Çolak 2005):

$$\epsilon'' = \frac{G - G_0}{2\pi f C_0} \dots\dots\dots (3.2)$$

Burada:

$\varepsilon''$  : Kayıp faktörü,

$G$  : Ürün ile doluyken ölçülen kondüktans (Siemens),

$G_0$  : Silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun boşken kondüktansı ( Siemens),

$f$  : Frekans (Hz)'dir.

### 3.2.2 RF nem ölçme sistemi

Silindirik ve paralel koaksiyal ölçüm kutularının empedansı ve tahılların dielektrik özellikleri Agilent E4991A empedans analizörü ile belirlenmiştir. Buradan elde edilecek elektriksel geçirgenlik verileri, buğdayın RF tabanlı nem ölçme sisteminin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Yedi farklı nem içeriğine getirilen deneme materyallerinin dielektrik katsayısı ve kayıp faktörü değerleri, Şekil 3.9'da verilen deneme düzeni ile belirlenmiştir.

Ölçüm düzeneği, empedans analizörü, 16453A test başlığı, tahılların içerisine konulduğu silindirik veya paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusu ve bilgisayardan oluşmaktadır. Denemelere başlamadan önce analizör üretici firmanın önerdiği şekilde kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon için open, short ve 50 ohm ile empedans analizörünün kalibrasyonu yapılmıştır. Silindirik ve paralel koaksiyal ölçüm kutularının frekansa bağlı değişimleri incelenmiştir. Bu çalışma için en uygun frekans aralığının 1-100 MHz olduğuna karar verilmiştir. Silindirik ve paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutuları, empedans analizörüne 7 mm lik erkek/dişi BNC konnektör ile bağlanmıştır. Koaksiyal kablounun oluşturduğu kapasitans değerleri belirlenmiş ve hesaplamalarda bu değer çıkarılmıştır. Denemelerde ölçüm kutusu ürün ile dolu ve boş durumunda gözlemlenen kapasitans (C) ve kondüktans (G) değerleri empedans analizörüyle ölçülmüştür. Ürün sabit bir hızda ölçüm kutusuna boşaltılmış ve üst kısımdaki fazla ürün sıyrılmıştır. Daha sonra ölçümlere geçilmiştir. Analizör her 100 kHz'de 15 ölçümün ortalamasını alacak şekilde ayarlanmıştır.

Oluşturulan sistem, kompleks yansıma oranının ( $|\Gamma|$ ) ölçülmesi ve buradan kompleks

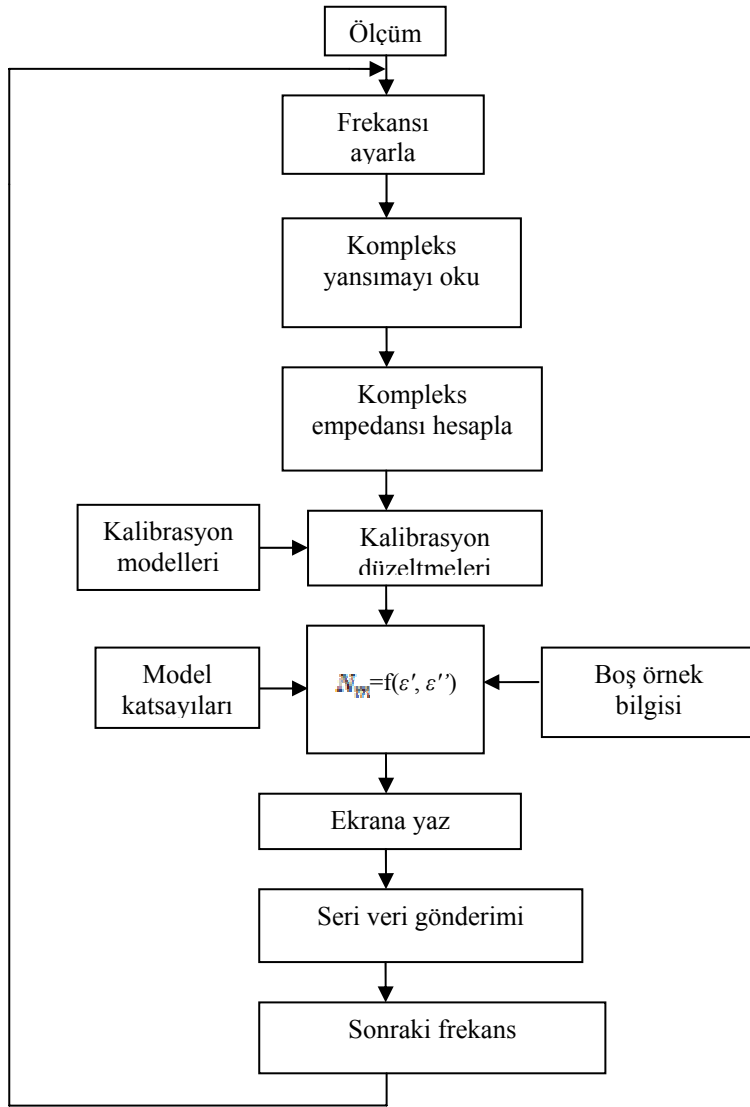
empedansın ( $|Z|$ ) hesaplanması tekniğine dayalı çalışmaktadır. Kompleks empedans ve bundan türetilen kompleks admittans ( $|Y_x|$ ) değerleriyle kompleks dielektrik katsayısı ( $\epsilon$ ) hesaplanmakta ve böylece tahılın nem ile olan ilişkisi incelenebilmektedir. RF nem ölçme sistemin akış diyagramı Şekil 3.10'da verilmiştir. Ölçüm kontrol bilgisayarı RF test sinyalinin frekanslarını ve fazlarını ayarlayarak kompleks yansım oranı ve kompleks empedansı hesaplar. Sisteme yüklenen kalibrasyon model katsayılarını alarak nem içeriği hesaplar ve ekrana yazar. Daha sonra ayarlanan frekansta diğer nem değerlerini hesaplamaktadır.



Şekil 3.9 RF nem ölçme düzeneği

Empedans analizörünün ölçüm kumandası ve aldığı ölçümlerin bilgisayar ortamına transferinin otomatik olarak yapılması amacıyla Şekil 3.11'de ekran görüntüsü verilen program kullanılmıştır.

Empedans analizörü, IEEE-488 (GPIB-625) haberleşme portu üzerinden bir bilgisayarla birlikte çalışabilmektedir. Bu sebeple kullanmakta olduğumuz bilgisayara GPIB-625 haberleşme kartı takılmış ve ilgili DLL dosyaları ve sürücüler yüklenmiştir. Geliştirilen bu program empedans analizörünün ölçüm için ayarlanmasını, ölçümün gerçekleştirilmesini ve analiz için yapılan ölçümlerin Excel dosyası haline getirilmesini otomatik olarak yapmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.10 RF tabanlı nem ölçme sistemi akış diyagramı

Program içinde ölçülecek değişkenlerin seçilebileceği işaret kutuları ve yapılan operasyonların sonuçlarının listelendiği bir bölüm bulunmaktadır. Bu bölümde ölçüm esnasında empedans analizörde de olduğu gibi üç adet skalar ve iki adet kompleks değer seçilebilmektedir. Seçilen kompleks değerler, mutlak vektör şiddeti ve faz açısı bilgisini ifade etmektedir. Ekranda görüldüğü gibi ölçülecek frekans aralığı ve ölçüm noktalarının sayısı tanımlanabilmekte ve her noktadaki ölçümlerde yapılacak ortalama sayısı belirlenebilmektedir.

TOVAG 104 O 263 Version 2

Take sample! Save Excel Name of file DTA.XLS Command4 Parameters 3 Text4

Send CONFIG  
 CALC1:FORM G  
 CALC2:FORM B  
 CALC3:FORM CS  
 CALC4:FORM Z  
 CALC5:FORM RC  
 Start samples

To Excel  DOLU  BOŞ

|Z|  |Y|  |Rho|  Cp  Rp  Complex Z  
 Qz  Qy  Qlambda  Cs  Rs  
 R  G  Rho-x  Lp  D  
 X  B  Rho-y  Ls  Q

Frq Start 1 Number of points 200  
 Frq Stop 201 Point average

Frq.	G	B	CS	Z  vector	Rhol_vector	Z  theta	Rhol_theta
1	0.00076634222	0.000795371593	0.000000000128	1251.478424520000	0.992377838688	-84.496527794974	-4.554810083152
2	0.000122491727	0.001545048218	0.000000000124	645.204499587720	0.987897183599	-85.467060513239	-8.835254813034
3	0.000165452099	0.002281540604	0.000000000122	437.152384952320	0.983799647877	-85.852301809878	-13.016869659108
4	0.000208093537	0.003011509344	0.000000000120	331.269485478880	0.979856978474	-86.047178340485	-17.127804586371
5	0.000251248431	0.003736172253	0.000000000119	267.050461322490	0.976013672782	-86.152791553265	-21.165919296608
6	0.000294531136	0.004457208375	0.000000000119	223.867446773100	0.972328998134	-86.219406535761	-25.132324090269
7	0.000338437157	0.005174690304	0.000000000118	192.836293839870	0.968775500751	-86.258047901742	-29.02001864926
8	0.000383373479	0.005888837611	0.000000000118	169.454086017630	0.965333614916	-86.275202258432	-32.823775249573
9	0.000429436051	0.006603455712	0.000000000117	151.116649453170	0.962014666348	-86.279179258976	-36.557821663412
10	0.000476290304	0.007316788422	0.000000000117	136.383333422260	0.958859627906	-86.275554980283	-40.207524274519
11	0.000520980106	0.008029980976	0.000000000117	124.272019807860	0.956122254132	-86.287888604161	-43.773989778043
12	0.000568983801	0.008742721155	0.000000000116	114.139399724630	0.953349251830	-86.276392684949	-47.252336687334
13	0.000617679657	0.009456162338	0.000000000116	105.526258351600	0.950767036212	-86.262730001639	-50.644865388794
14	0.000666721483	0.010169272430	0.000000000116	98.124787134481	0.948400154932	-86.248922008844	-53.944261673550
15	0.000715101129	0.010885268824	0.000000000116	91.669677531795	0.946324614325	-86.241389417041	-57.163153284123
16	0.000766795629	0.011603414525	0.000000000116	85.939368219808	0.944246254182	-86.219233954598	-60.296835184097
17	0.000819861923	0.012323636236	0.000000000116	80.965904787881	0.942309396375	-86.193858015147	-63.343608815416
18	0.000872012237	0.013042709905	0.000000000116	76.500394644984	0.940657199387	-86.174999253986	-66.289564635006
19	0.000924537386	0.013767127311	0.000000000116	72.473556023909	0.939205131318	-86.158045784802	-69.161294962246
20	0.000978587908	0.014492688659	0.000000000116	68.843547282636	0.937861500574	-86.137088287131	-71.942273270186

Şekil 3.11 Programın ekran görüntüsü

Ölçüm kutusunun boş ve dolu iken seçilen duruma göre “Take sample” komutunun ardından toplanan değişkenler bir bilgi penceresinde gösterilmektedir. Değişkenin bulunduğu kolonun başında bu değerın literatürdeki ismi görülmektedir. Bilgi penceresinde görülen değişkenler dosya ismi verilerek Şekil 3.12’deki gibi Excel formatında saklanabilmekte ve sonrasında Excel programı ile analiz edilebilmektedir. Excel programının makro kısmı kullanılarak “Dolu”, “Boş” ve “Analiz” adlı üç çalışma sayfası oluşturulmuştur (Şekil 3.13). Empedans analizöründen gelen veriler, “Dolu” sayfasındaki “Calc Dielectric” makro tuşu yardımıyla her frekanstaki dielektrik katsayısı ( $\epsilon'$ ) ve kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 3.14’de ise “Nem” makrosu kullanılarak ölçüm kutusundaki buğdayın nem içeriği saptanmıştır.



Şekil 3.12, Microsoft Excel ekran görüntüsünü göstermektedir. Bu görüntü, buğdayla dolu koaksiyal ölçüm kutusunun verilerine ilişkin bir veri tablosunu göstermektedir. Tablo başlıklarında 'A' ile 'P' arasındaki sütunlar ve '1' ile '44' arasındaki satırlar görülmektedir. Veriler, genellikle bilimsel gösterimdeki sayısal değerler ve bazı özel karakterler (örneğin 'Rho vector', 'Zi theta') içerir. Üst menü çubuğunda 'Formüller', 'Veri' ve 'Gözetim' gibi seçenekler yer almaktadır. Ayrıca, 'Calc Dielectric' formülü aktif olarak kullanılmaktadır.

Şekil 3.12 Buğdayla dolu koaksiyal ölçüm kutusunun verilerine ilişkin ekran görüntüsü

Şekil 3.13, Microsoft Excel ekran görüntüsünü göstermektedir. Bu görüntü, boş koaksiyal ölçüm kutusunun verilerine ilişkin bir veri tablosunu göstermektedir. Tablo başlıklarında 'A' ile 'Q' arasındaki sütunlar ve '1' ile '44' arasındaki satırlar görülmektedir. Veriler, genellikle bilimsel gösterimdeki sayısal değerler ve bazı özel karakterler (örneğin 'Rho vector', 'Zi theta') içerir. Üst menü çubuğunda 'Formüller', 'Veri' ve 'Gözetim' gibi seçenekler yer almaktadır. Ayrıca, 'Calc Dielectric' formülü aktif olarak kullanılmaktadır.

Şekil 3.13 Boş koaksiyal ölçüm kutusunun verilerine ilişkin ekran görüntüsü

model	FREKANS1	FREKANS2	Nem	% yaş baz
MODEL-1	5	1	13.97	% yaş baz
MODEL-2	5	1	13.98	% yaş baz
MODEL-3	5	1	13.97	% yaş baz
MODEL-4	10	1	13.74	% yaş baz
MODEL-5	10	1	13.60	% yaş baz

Şekil 3.14 Analiz sayfası yardımıyla nem içeriğinin belirlenmesi

### 3.2.3 Buğdayların denemelere hazırlanması

Deneme materyali buğday örnekleri denemelere kadar oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Elektriksel iletkenlik değerlerinin ölçümünden önce buğdayın ilk nem içerikleri belirlenmiş ve daha sonra farklı nem seviyelerine getirilmiştir. Bunun için tahılların nem içeriği standart fırın yöntemiyle belirlenmiştir. Buğday için yaklaşık 10 gramlık üç örnek 130°C de 19 saat sabit ağırlığa gelinceye değin fırında bekletilmiştir (ASAE 2002). Elde edilen nem içerikleri yaş baza (y.b) göre ifade edilmiştir. Standart fırın yönteminde elde edilen nem değerleri ayrıca elektrikli nem ölçerle de kontrol edilmiştir. İlk nem içerikleri belirlenen tahılları daha yüksek nem içeriklerine getirmek için materyallere su eklenmiştir. Bu işlem için denemelerde kullanılacak tahıl miktarına göre materyale eklenecek su miktarı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$Q = \frac{W_i(N_f - N_i)}{(100 - N_f)} \dots\dots\dots (3.3)$$

Burada;

$Q$  : Eklenecek su miktarı (g),

$W_i$  : Materyalin kütlesi (g),  
 $N_i$  : Materyalin ilk nemi (% y.b),  
 $N_f$  : Materyalin son nemi (% y.b) dir.

Denemelerde her bir nem seviyesi için 1500 g buğday kullanılmıştır. Buğday örnekleri polietilen torba içerisine konulmuş ve belirlenen miktarda su eklenerek 15 gün süre ile +5°C de buzdolabında bekletilmiştir. Eklenen suyun ürün içerisinde düzgün olarak dağılması için torba içerisindeki tahıl her gün karıştırılmıştır.

### 3.2.4 Denemelerin düzenlenmesi

Denemelere başlamadan 6 saat önce deneme materyalleri buzdolabından çıkarılarak oda sıcaklığına gelmeleri sağlanmıştır. Nemlendirme işleminden sonra ürünün istenilen nem seviyesine gelip gelmediği, standart fırın yöntemiyle ve elektrikli nem ölçerle kontrol edilmiştir. Bu çalışmada, yedi farklı nem seviyesinde denemeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca denemelerden sonra tahıllarda nem kaybının olup olmadığını belirlemek için nem içerikleri standart fırın yöntemiyle ve elektrikli nem ölçerle kontrol edilmiştir.

Denemeler için başlangıç nem değerleri buğday için % 9.04 yaş baz (y.b) olarak saptanmıştır. Başlangıç nem içeriğinden itibaren yaklaşık % 1 oranında artırılarak daha yüksek nem içerikleri elde edilmiştir. Nemlendirme işleminden sonra ürünün istenilen nem seviyesine gelip gelmediği tekrar standart fırın yöntemiyle belirlenmiştir. Buğday için % 9.04, 10.27, 11.26, 12.41, 13.37, 14.52 ve 15.53 y.b nem seviyelerinde denemeler gerçekleştirilmiştir.

Denemelerde 1-100 MHz frekans aralığında buğdayların dielektrik özellikleri belirlenmiştir. Ölçülen dielektrik katsayısı ( $\epsilon'$ ) ve kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) değerleri bilgisayara aktarılmıştır. Elde edilen bu verilerden yararlanılarak seçilen tahılların f- $\epsilon'$  ve f- $\epsilon''$  grafikleri neme bağlı olarak elde edilmiştir. Çeşitli frekanslarda elde edilen  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  parametrelerinden yararlanılarak çeşitli kalibrasyon fonksiyonları geliştirilmiştir. En iyi

beş model bulunduktan sonra “Analiz” sayfasındaki “Nem” makrosuna modellerin katsayıları yüklenmiştir. Kalibrasyon modelleri istenildiği anda değiştirilerek sistemin etkinliği artırılmıştır.

### 3.2.5 Verilerin analizi

Tahılların hacim ağırlığının nem değerleri üzerine etkisini azaltmak için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen  $[(\varepsilon'-1/ \varepsilon'')]$  fonksiyonu kalibrasyon modellerine dahil edilmiştir. Silindir ve paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutuları için önerilen kalibrasyon modelleri sırasıyla Çizelge 3.2 ve 3.3’de verilmiştir. Çizelgelerde verilen kalibrasyon modellerinin katsayıları çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon tekniği kullanılarak belirlenmiştir. En iyi model, yapılan istatistiksel analizler sonucunda belirtme katsayısı ( $R^2$ ), mutlak bağıl hata ( $M$ ), kalibrasyonun standart hatası gibi ( $SEC$ ) ve hata farkları gibi kıyaslama kriterleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu istatistiksel kıyaslama kriterleri aşağıda verilmiştir (Lawrence ve Nelson 1993a):

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_f - N_m)^2}{n - p - 1}} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$H = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|N_f - N_m|}{N_f} \dots\dots\dots (3.6)$$

Bu eşitliklerde:

- $N_f$  : Tahılların etüvde ölçülen nem içeriği (% y.b),
- $N_m$  : Modelle elde edilen nem içeriği (% y.b),
- $n$  : Örnek sayısı,
- $p$  : Modeldeki bağımsız değişken sayısıdır.

Regresyon analizi sonucunda hangi kalibrasyon modelinin uygun olacağına karar vermek için ise varyans analizi yapılmıştır. Yapılan varyans analizinde  $P < 0.01$  koşulunda en iyi modelin seçilmesinde  $R^2$ , başlıca karşılaştırma kriteri olarak kullanılmıştır. Bunun yanı sıra,  $SEC$  ve  $M$  değerlerinin düşük olması tercih edilmiştir. Hata farkları, ölçülen ve modelle tahmin edilen nem değerleri arasındaki fark olup, sıfır etrafında yatay bir bant göstermesi o modelin iyiliğini göstermektedir.

Kıyaslama kriterlerine göre en iyi beş modelin katsayıları, Şekil 3.14 deki “Analiz” sayfasındaki “Nem” makrolarına eklenerek o anda ölçülen gerçek nem değeri saptanmıştır. Elde edilen nem değerleri yardımıyla, seçilen kalibrasyon modelinin modelleme performansı ise ( $SEP$ ) aşağıdaki formülle belirlenmiştir (Lawrence ve Nelson 1993a):

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_g - N_o)^2}{n-1}} \dots\dots\dots (3.7)$$

Bu eşitlikte:

- $SEP$  : Modelin performans hatası,
- $N_g$  : Etüvle ve modelle elde edilen nem arasındaki fark (% y.b),
- $N_o$  : Modelle ve etüvle elde edilen nem içeriği arasındaki farkların ortalaması (% y.b),
- $n$  : Örnek sayısıdır.

Çizelge 3.2 Silindirik koaksiyal ölçüm kutusu için önerilen kalibrasyon modelleri

Model no	Model açıklaması
1	$N_m = a + b \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_{15} + d (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})$
2	$N_m = a + b \varepsilon'_{20} + c \ln \varepsilon''_{20} + d (\varepsilon'_{20} - 1 / \varepsilon''_{20})$
3	$N_m = a + b \ln \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_5 + d [(\varepsilon'_5 - 1 / \varepsilon''_5) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]$
4	$N_m = a + b \ln \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]$
5	$N_m = a + b \ln \varepsilon'_{10} + c \ln \varepsilon''_5 + d [(\varepsilon'_5 - 1 / \varepsilon''_5) - (\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10})]$
6	$N_m = a + b \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon'_5 + d [(\varepsilon'_5 - 1 / \varepsilon''_5) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]$
7	$N_m = a + b \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]$
8	$N_m = a + b \ln \varepsilon'_{20} + c \ln \varepsilon''_5 + d [(\varepsilon'_5 - 1 / \varepsilon''_5) - (\varepsilon'_{20} - 1 / \varepsilon''_{20})]^{1/2}$
9	$N_m = a + b \ln \varepsilon'_{20} + c \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{20} - 1 / \varepsilon''_{20})]^{1/2}$
10	$N_m = a + b \ln \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]^{1/2}$
11	$N_m = a + b \varepsilon'_{20} + c \ln \varepsilon''_5 + d [(\varepsilon'_5 - 1 / \varepsilon''_5) - (\varepsilon'_{20} - 1 / \varepsilon''_{20})]^{1/2}$
12	$N_m = a + b \varepsilon'_{20} + c \ln \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{20} - 1 / \varepsilon''_{20})]^{1/2}$
13	$N_m = a + b \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]^{1/2}$
14	$N_m = a + b \varepsilon'_{15} + c \varepsilon'_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]^{1/2}$
15	$N_m = a + b \ln \varepsilon'_{20} + c \ln \varepsilon''_{15} + d [(\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15}) - (\varepsilon'_{20} - 1 / \varepsilon''_{20})]^{1/3}$
16	$N_m = a + b \ln \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]^{1/3}$
17	$N_m = a + b \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]^{1/3}$
18	$N_m = a + b \varepsilon'_{20} + c \varepsilon''_5 + d [(\varepsilon'_5 - 1 / \varepsilon''_5) - (\varepsilon'_{20} - 1 / \varepsilon''_{20})]^{1/3}$
19	$N_m = a + b \varepsilon'_{20} + c \varepsilon''_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{20} - 1 / \varepsilon''_{20})]^{1/3}$
20	$N_m = a + b \varepsilon'_{15} + c \varepsilon'_{10} + d [(\varepsilon'_{10} - 1 / \varepsilon''_{10}) - (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})]^{1/3}$

\* Modellerdeki harfler model katsayılarını, alt indis rakamları ise çalışılan frekansı göstermektedir

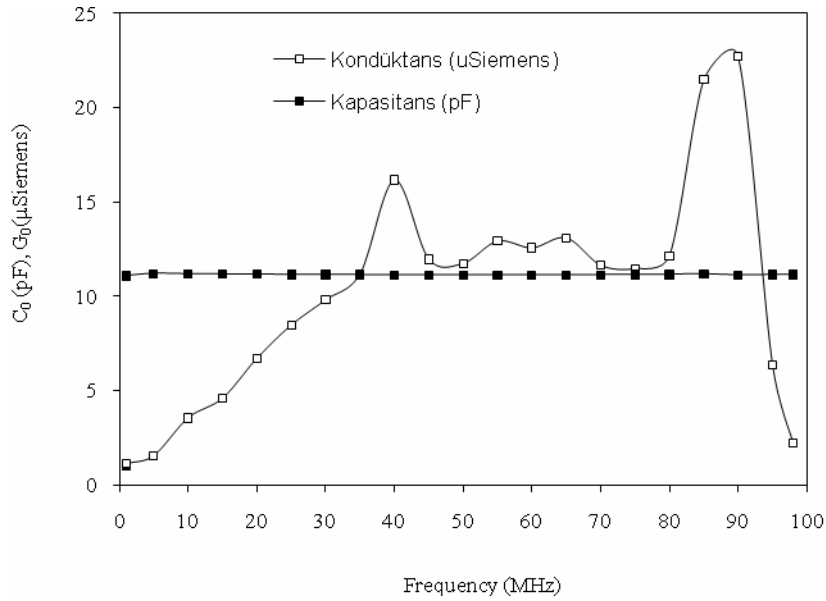
Çizelge 3.3 Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusu için önerilen kalibrasyon modelleri

<b>Model no</b>	<b>Model açıklaması</b>
1	$N_m = a + b \varepsilon'_1 + c \ln \varepsilon''_1 + d (\varepsilon'_1 - 1 / \varepsilon''_1)$
2	$N_m = a + b \varepsilon'_1 + c \ln \varepsilon''_1 + d (\varepsilon'_1 - 1 / \varepsilon''_1)^{1/2}$
3	$N_m = a + b \varepsilon'_1 + c \ln \varepsilon''_1 + d (\varepsilon'_1 - 1 / \varepsilon''_1)^{1/3}$
4	$N_m = a + b (\varepsilon'_5 - 1 / \varepsilon''_5)^2 + c (\varepsilon'_{15} - 1 / \varepsilon''_{15})^{-2}$
5	$N_m = a \varepsilon'_1 + e \varepsilon'_{20} + b$
6	$N_m = a + b \varepsilon'_{10} + c \ln \varepsilon''_1$
7	$N_m = a + b \varepsilon'_{15} + c \ln \varepsilon''_5$
8	$N_m = a + b \varepsilon'_{20} + c \ln \varepsilon''_{10}$

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Koaksiyal Ölçüm Kutularının Elektriksel Özellikleri

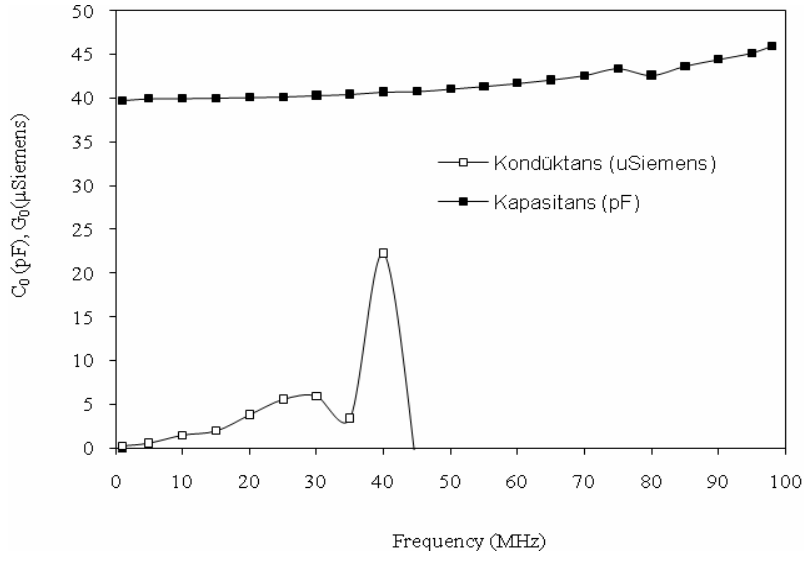
Buğdayın içerisine konulduğu silindirik ve paralel plakalı ölçüm kutularının boş iken elektriksel özellikleri sırasıyla Şekil 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun kapasitans değerleri 1-100 MHz aralığında 11.07 ile 11.14 pF arasında değişmiştir. Grafikte kondüktans değerleri 40 MHz’e kadar kararlı bir artış göstermiş ve bu frekanstan sonra ölçüm kutusunun kararlılığı bozulmuştur. Bundan dolayı silindirik ölçüm kutusu ile buğdayın nem ölçümlerinde 1-40 MHz frekans aralığı dikkate alınmıştır.



Şekil 4.1 Silindirik koaksiyal ölçüm kutusunun elektriksel özellikleri

Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunun kapasitans değerleri 1-100 MHz aralığında 39.75 ile 45.98 pF arasında değişmiştir. Kondüktans değerleri 30 MHz’e kadar kararlı bir artış göstermiş ve bu frekanstan sonra ölçüm kutusunun kararlılığı bozulmuştur. Bundan dolayı paralel plakalı ölçüm kutusu ile buğdayın nem ölçümlerinde 1-30 MHz frekans aralığı dikkate alınmıştır.

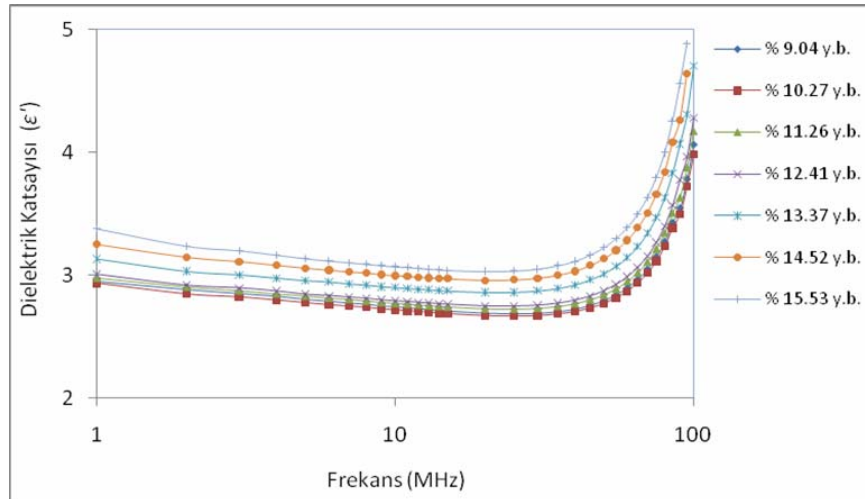




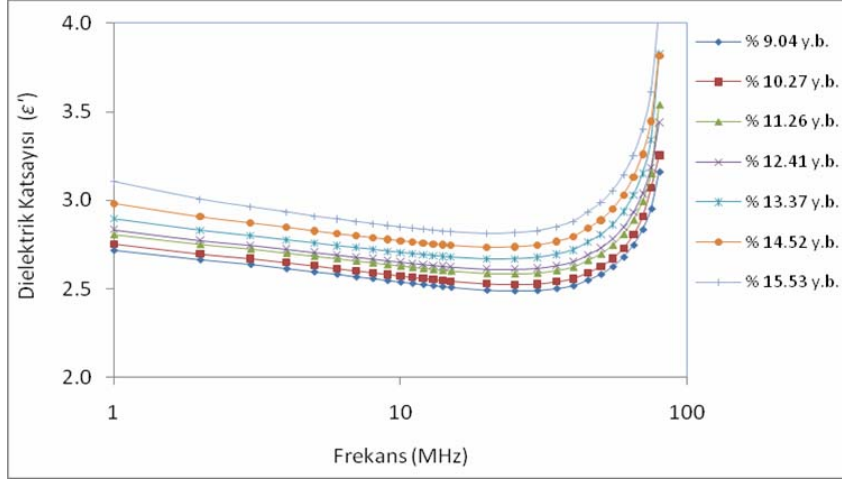
Şekil 4.2 Paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunun elektriksel özellikleri

## 4.2 RF Nem Ölçme Sistemiyle Yapılan Ölçümler

Silindirik ve paralel plakalı RF nem ölçme sistemiyle elde edilen sonuçlara göre farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre dielektrik katsayılarının değişimi sırasıyla Şekil 4.3 ve 4.4’de verilmiştir:



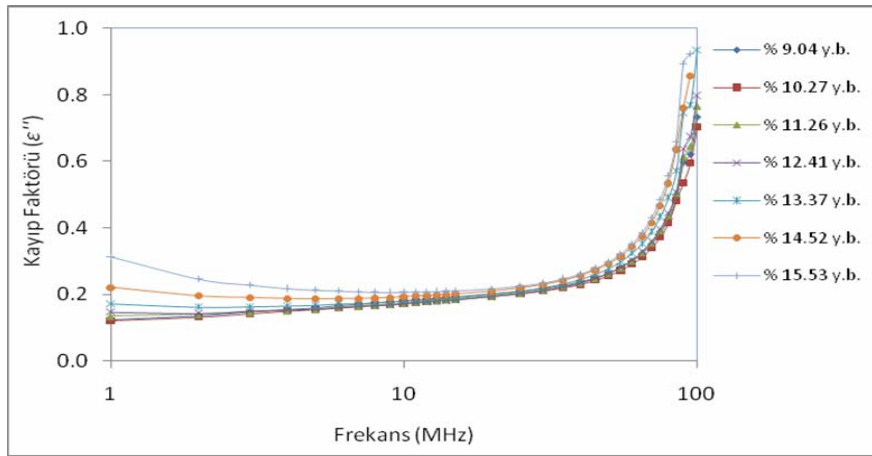
Şekil 4.3 Silindirik RF nem ölçme sisteminde farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre dielektrik katsayısının değişimi



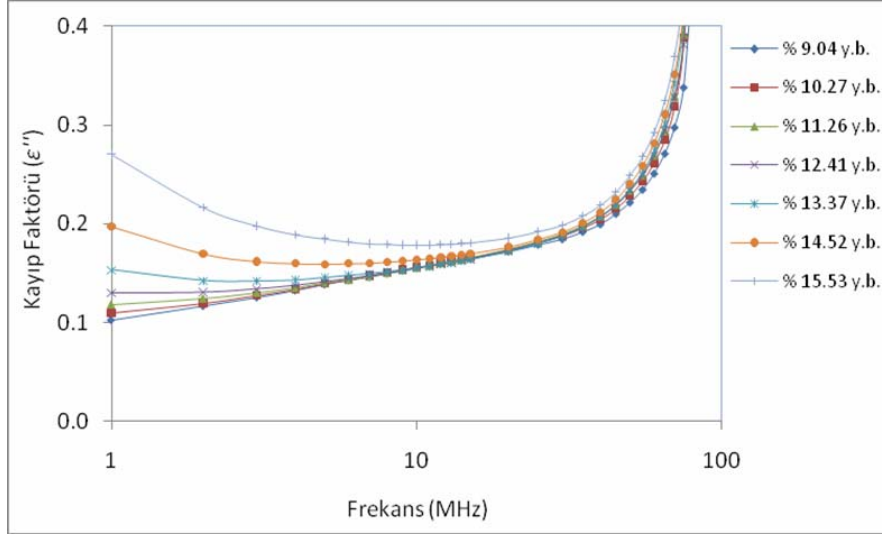
Şekil 4.4 Paralel plakalı RF nem ölçme sisteminde farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre dielektrik katsayısının değişimi

Şekillerden de görüldüğü gibi dielektrik katsayısı, 1-30 MHz aralığında frekansa göre azalma eğilimi gösterirken 30-100 MHz aralığında artma eğilimi göstermiştir. Dielektrik katsayısı düşük frekanslarda yüksek bir değişim göstermiştir. Benzer sonuçlar çeşitli araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir (Stetson Nelson 1970; Sokhansanj ve Nelson 1988; Berbert vd. 2002).

Silindirik ve paralel plakalı RF nem ölçme sistemiyle elde edilen sonuçlara göre farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre kayıp faktörünün değişimi sırasıyla Şekil 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.

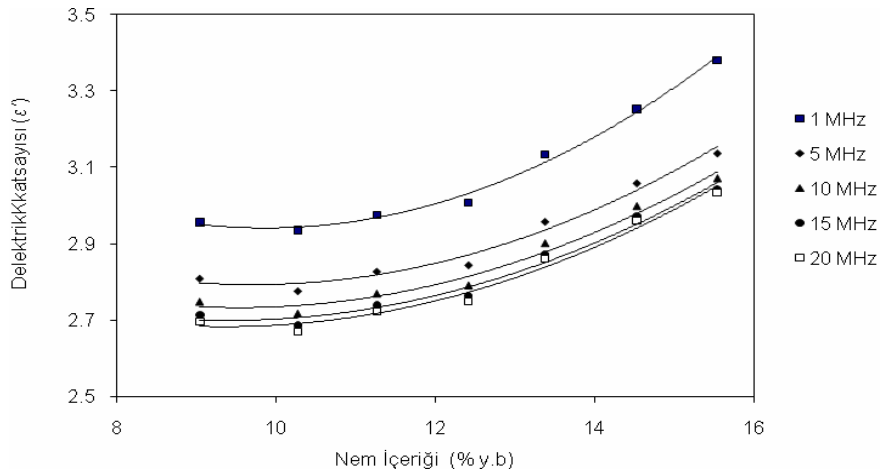


Şekil 4.5 Silindirik RF nem sisteminde farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre kayıp faktörünün değişimi

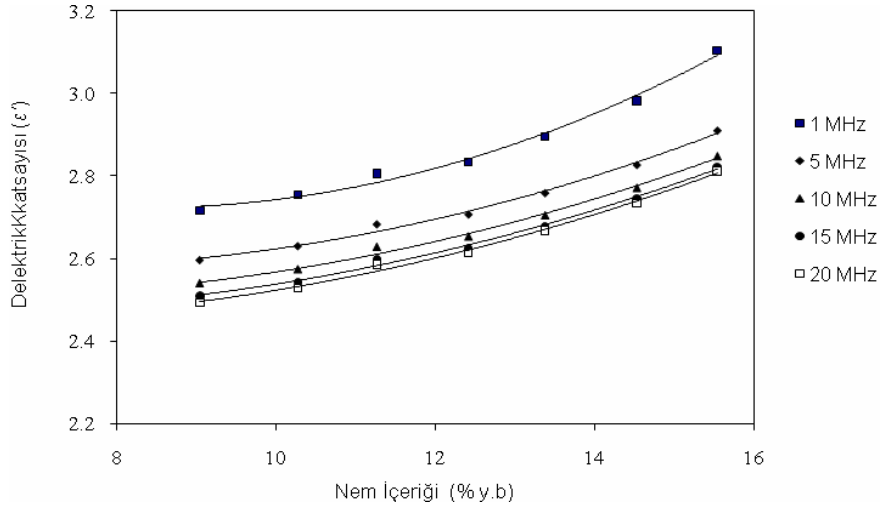


Şekil 4.6 Paralel plakalı RF nem ölçme sisteminde farklı nem içeriklerindeki buğdayın frekansa göre kayıp faktörünün değişimi

Silindirik ve paralel plakalı RF nem ölçme sistemiyle yapılan denemelerden elde edilen sonuçlara göre, 1, 5, 10, 15 ve 20 MHz frekanslarındaki dielektrik katsayısının nem içeriğine bağlı değişimi sırasıyla Şekil 4.7 ve 4.8'de verilmiştir. Şekillerde nem artışıyla birlikte dielektrik katsayısının da arttığı görülmektedir. Ancak düşük frekanslarda  $\epsilon'$  değişimi daha fazla olmuştur. Benzer sonuçlar çeşitli araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir (Nelson ve Stetson 1976; Noh ve Nelson 1989; Berbert vd. 2001; Kim vd. 2003).

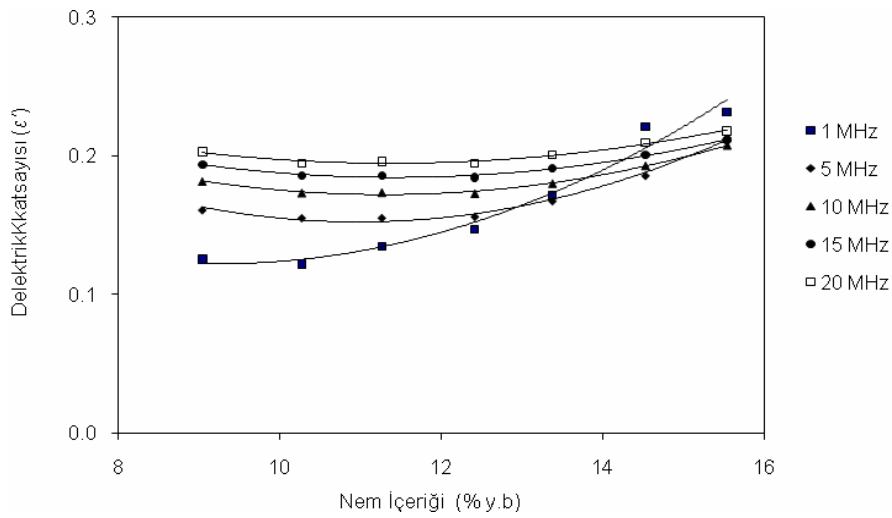


Şekil 4.7 Silindirik RF nem sisteminde çeşitli frekanslardaki buğdayın nem içeriğine göre dielektrik katsayısının değişimi

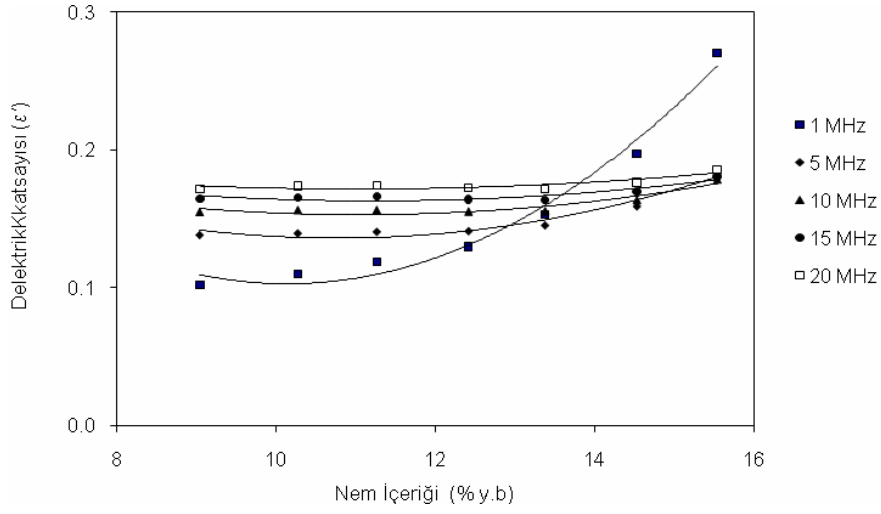


Şekil 4.8 Paralel plakalı RF nem sisteminde çeşitli frekanslardaki buğdayın nem içeriğine göre dielektrik katsayısının değişimi

Silindirik ve paralel plakalı RF nem ölçme sistemiyle yapılan denemelerden elde edilen sonuçlara göre, 1, 5, 10, 15 ve 20 MHz frekanslarındaki kayıp faktörü katsayısının neme bağlı değişimi sırasıyla Şekil 4.9 ve 4.10'da verilmiştir. Şekillerde nem artışıyla birlikte kayıp faktörünün de arttığı görülmektedir. Ancak düşük frekanslarda  $\epsilon''$  değişimi daha fazla olmuştur. Benzer sonuçlar çeşitli araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir (Stetson ve Nelson 1976; Berbert vd. 2002).



Şekil 4.9 Silindirik RF nem sisteminde çeşitli frekanslardaki buğdayın nem içeriğine göre kayıp faktörünün değişimi



Şekil 4.10 Paralel plakalı RF nem sisteminde çeşitli frekanslardaki buğdayın nem içeriğine göre kayıp faktörünün değişimi

### 4.3 Geliştirilen Nem Ölçme Sistemleriyle Yapılan Ölçümlerin Modellenmesi

Silindirik ve paralel nem ölçme sistemleriyle yapılan ölçüm değerlerinden yararlanılarak Çizelge 3.2 ve 3.3'te verilen kalibrasyon fonksiyonlarının katsayıları, doğrusal olmayan çok değişkenli regresyon analizi tekniği ile belirlenmiş ve istatistiksel kıyaslama kriterleri ile birlikte sırasıyla Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 incelendiğinde, önerilen silindirik RF nem ölçme düzeniyle yapılan ölçümler sonucunda 20 kalibrasyon modeli arasından en yüksek belirtme katsayısı ( $R^2$ ), 0.9999 ile 14. modelde görülmüştür. Ayrıca bu modelin mutlak bağıl hatası ( $M$ ) % 0.07 ve kalibrasyonun standart hatası ( $SEC$ ) ise 0.0176 y.b nem olarak bulunmuştur. Bu modeli sırasıyla 13, 20, 10 ve 17. modeller izlemiştir. Bu modellerin buğdayın nemin ölçümünde kullanılması durumunda deneysel verilere en yakın sonuçları verecektir. Lawrence vd. (1993a), paralel plakalı ölçüm kutusu kullanarak buğdayın nem içeriğinin tahmininde  $SEC$ 'yi 0.62 nem, Lawrence vd. (1993b) ise  $SEC$  değerini 0.36 nem olarak bulmuşlardır. Çizelge 4.2 incelendiğinde önerilen paralel plakalı RF nem ölçme düzeniyle yapılan ölçümler sonucunda 8 kalibrasyon modeli arasından en yüksek

belirtme katsayısı ( $R^2$ ), 0.9964 ile 1. modelde görülmüştür. Ayrıca bu modelin mutlak bağıl hatası ( $M$ ) % 0.97 ve kalibrasyonun standart hatası ( $SEC$ ) ise 0.1698 y.b nem olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.1 Silindirik nem ölçer için geliştirilen kalibrasyon fonksiyonlarının katsayıları ve karşılaştırma kriterleri

Model no	Model katsayıları		Belirtme katsayısı ( $R^2$ )	Mutlak bağıl hata ( $M$ ), %	Standart hata ( $SEC$ )
1	a=-570.92 b=138.45	c=-242.73 d=-21.95	0.9959	0.97	0.1800
2	a=-475.95 b=115.39	c=-204.951 d=-18.31	0.9954	1.00	0.1911
3	a=-107.93 b=51.26	c=-44.46 d=-6.4	0.9985	0.82	0.2168
4	a=-121.44 b=59.77	c=-47.33 d=-12.66	0.9993	0.38	0.1050
5	a=-96.09 b=47.188	c=-38.101 d=-7.51	0.9913	1.4	0.3751
6	a=-108.52 b=18.73	c=-44.81 d=-6.305	0.9970	0.83	0.2195
7	a=-120.90 b=21.61	c=-47.35 d=-12.107	0.9992	0.37	0.1069
8	a=-136.47 b=78.63	c=-48.73 d=-12.63	0.9950	1.04	0.2815
9	a=-134.92 b=71.37	c=-53.97 d=-16.86	0.9979	0.63	0.1800
10	a=-117.32 b=63.63	c=-45.34 d=-16.37	0.9999	0.14	0.0388
11	a=-137.55 b=28.70	c=-49.41 d=-12.38	0.9958	0.95	0.2600
12	a=-133.60 b=25.67	c=-53.45 d=-15.85	0.9978	0.66	0.1854
13	a=-116.97 b=22.94	c=-45.49 d=-15.63	0.9999	0.11	0.0295
14	<b>a=12.16 b=22.35</b>	<b>c=-261.63 d=-18.39</b>	<b>0.9990</b>	<b>0.07</b>	<b>0.0176</b>
15	a=-142.25 b=77.59	c=-57.47 d=-25.57	0.9924	1.12	0.3484
16	a=-112.18 b=64.77	c=-44.53 d=-21.02	0.9996	0.29	0.0773
17	a=-112.08 b=23.33	c=-44.73 d=-20.06	0.9997	0.24	0.0659
18	a=17.36 b=28.02	c=-306.55 d=-24.23	0.9943	1.01	0.3016
19	a=25.04 b=25.72	c=-307.85 d=-27.31	0.9974	0.73	0.2014
20	a=15.58 b=22.82	c=-257.15 d=-23.62	0.9999	0.11	0.0327

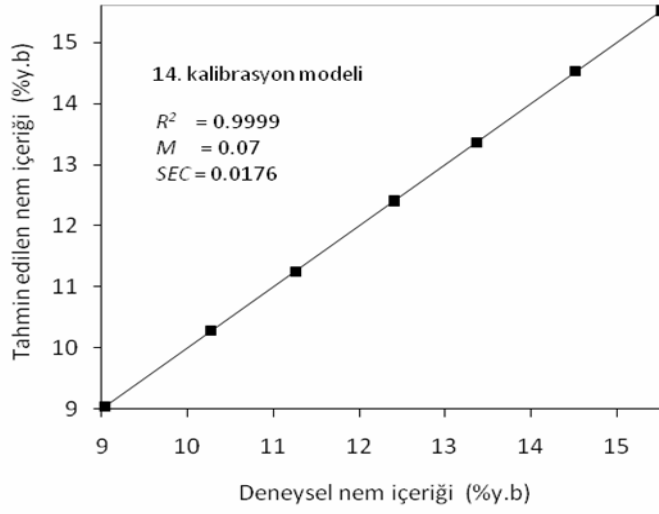
Bu modeli sırasıyla 2, 3, 7 ve 8. modeller izlemiştir. Bu modellerin buğdayın nemin ölçümünde kullanılması durumunda deneysel verilere en yakın sonuçları verecektir. Berbert ve Stenning (1996a), silindirik koaksiyal ölçüm kutusu kullanarak farklı çeşit buğdayın nem içeriğinin tahmininde  $SEC$ 'yi yaklaşık 0.3 olarak tahmin etmişlerdir. Mclendon vd. (1993), Lawrence vd. (1998a), Lawrence vd. (1998b), Trabelsi vd. (1999) ve Lawrence vd. (2001), buğday için  $SEC$ 'yi sırasıyla 0.7, 0.39, 0.38, 0.27, ve 0.25

olarak belirlemişlerdir.

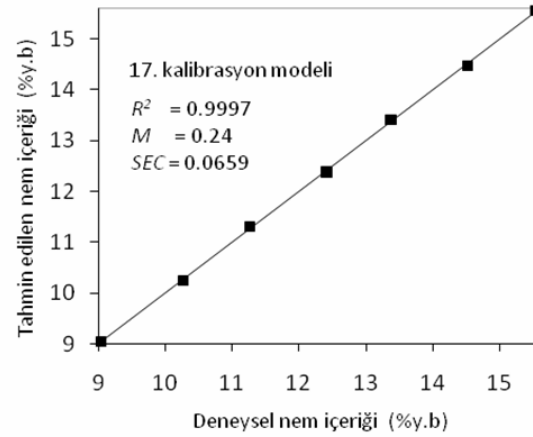
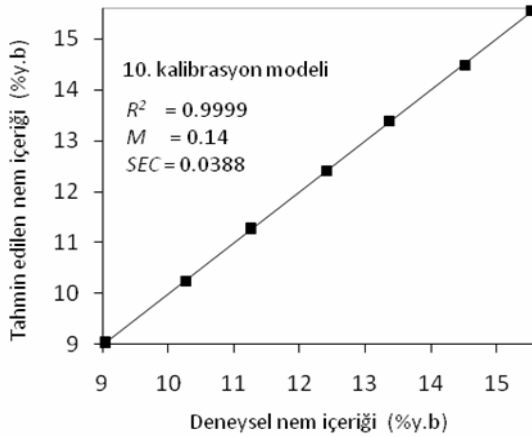
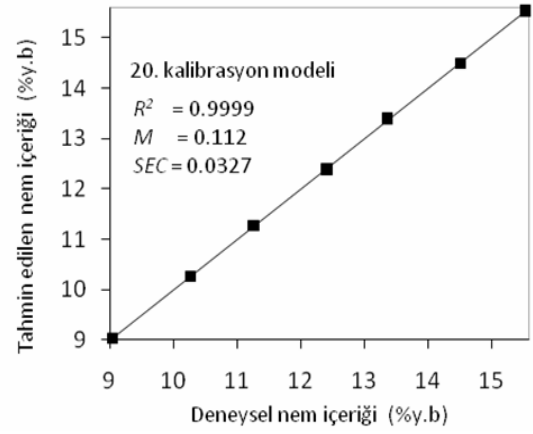
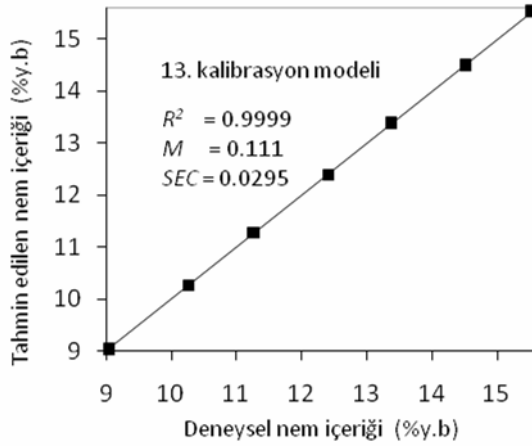
Şekil 4.11’de görüldüğü gibi silindirik RF nem ölçme düzeniyle yapılan ölçümlerde deneysel olarak elde edilen nem değerleri ile seçilen model ile tahmin edilen nem değerleri arasında yüksek bir uyum olduğu görülmektedir. 13, 20, 10 ve 17. modeller ile tahmin edilen nem içerikleri ise Şekil 4.12’de verilmiştir. Grafiklerde yer alan noktaların doğrunun üzerinde olması, elde edilen modelin kullanılabilirliğini göstermektedir. Tüm bu denemelerde elde edilen değerler eğrinin ya üzerinde ya da yakınında bulunmaktadır. Bu da önerilen beş modelde bulunan katsayıların kullanılması ile elde edilecek tahmini nem değerlerinin, büyük bir doğrulukla deneysel nem değerlerini temsil ettiğini göstermektedir.

Çizelge 4.2 Paralel plakalı nem ölçer için geliştirilen kalibrasyon fonksiyonlarının katsayıları ve karşılaştırma kriterleri

Model no	Model katsayıları	Belirtme katsayısı ( $R^2$ )	Mutlak bağıl hata (M), %	Standart hata (SEC)
1	a=-105.84 b=33.87 c=-22.04 d=-1.62	0.9964	0.97	0.1698
2	a=-124.19 b=47.50 c=-43.78 d=-23.31	0.9959	1.03	0.1801
3	a=-98.77 b=61.82 c=-68.30 d=-84.27	0.9957	1.06	0.1843
4	a=43.26 b=-0.07 c=-2108.13	0.9870	1.99	0.3229
5	a=-20.32 e=44.56 b=-46.68	0.9933	1.30	0.2325
6	a=-98.06 c=-5.25 b=37.50	0.9887	1.69	0.3013
7	a=-74.10 c=-7.54 b=27.24	0.9943	1.20	0.2142
8	a=-70.97 c=-10.44 b=24.36	0.9934	1.35	0.2304



Şekil 4.11 Silindirik RF nem ölçme düzeninde deneysel ve 14. model ile tahmin edilen nem içeriği değerleri

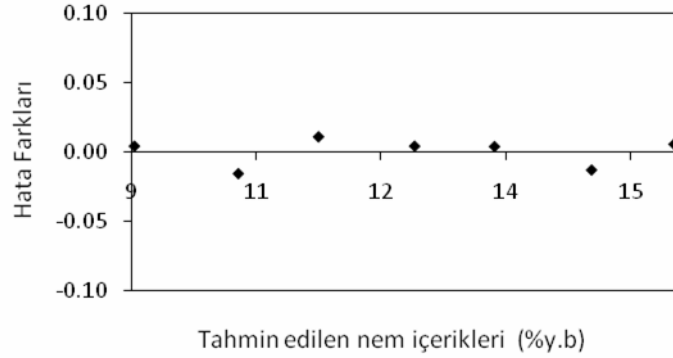


Şekil 4.12 Silindirik RF nem ölçme düzeninde deneysel nem içeriği ve 13, 20, 10 ve 17. modeller ile tahmin edilen nem içeriği değerleri

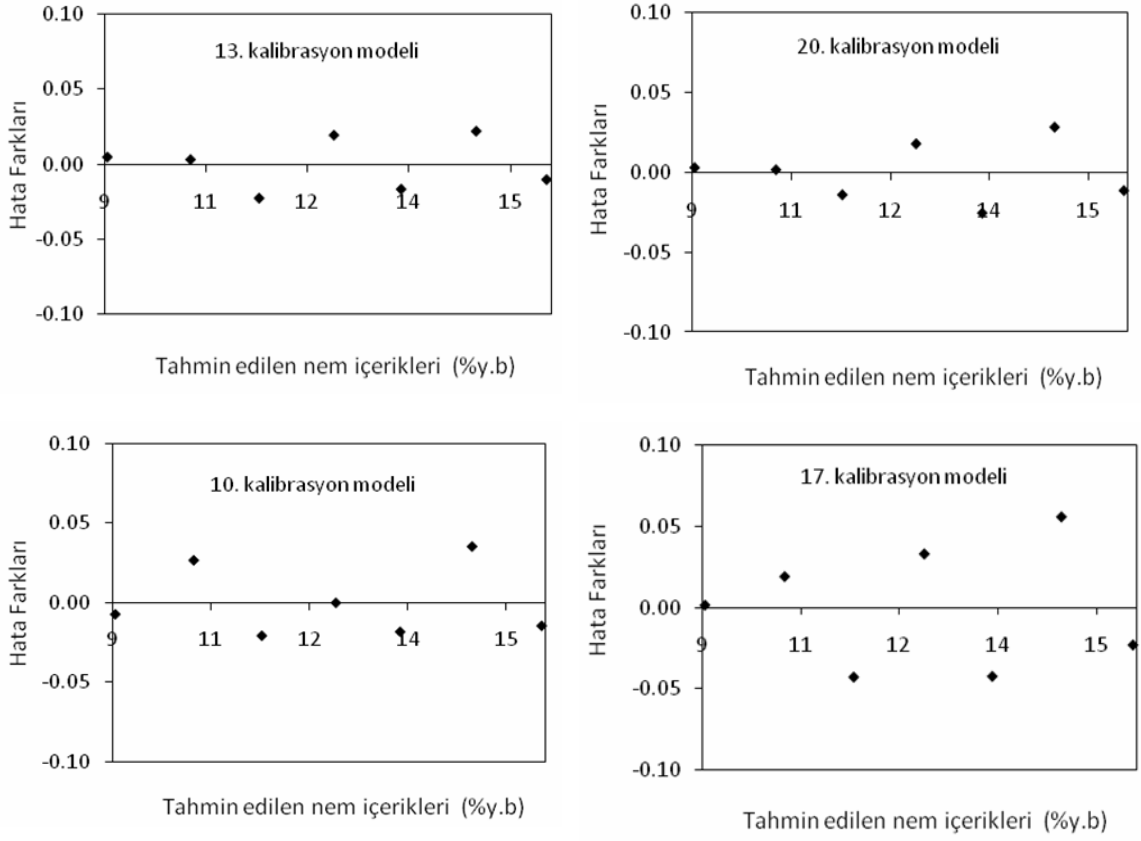


Şekil 4.13’de silindirik koaksiyal RF nem ölçme düzeniyle yapılan ölçümlerde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki verilmiştir. 13, 20, 10 ve 17. modellerin hata farkları ise Şekil 4.14’de verilmiştir. Ölçülen ve modelle tahmin edilen nem değerleri arasındaki farkın küçük olması ve sıfır etrafında yatay bir bantta hareket etmesi seçilen modelin iyiliğini göstermektedir.

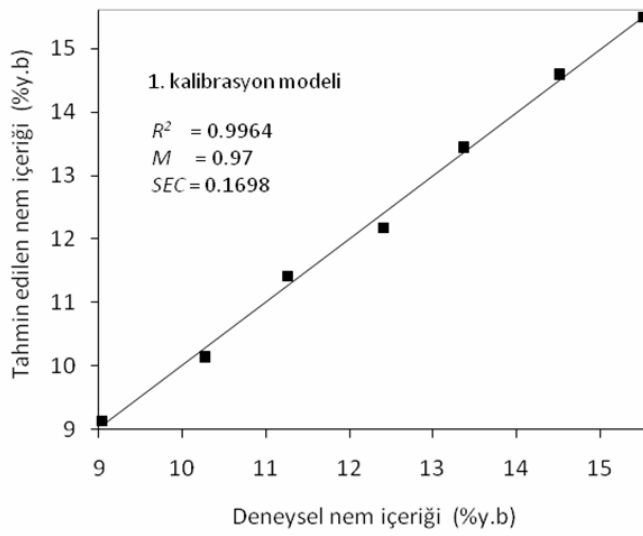
Şekil 4.15’de görüldüğü gibi paralel plakalı RF nem ölçme düzeniyle yapılan ölçümlerde deneysel olarak elde edilen nem değerleri ile seçilen model ile tahmin edilen nem değerleri arasında yüksek bir uyum olduğu görülmektedir. 2, 3, 7 ve 8. modeller ile tahmin edilen nem içerikleri ise Şekil 4.16’da verilmiştir. Grafiklerde yer alan noktaların doğrunun üzerinde olması, elde edilen modelin kullanılabilirliğini göstermektedir. Tüm bu denemelerde elde edilen değerler eğrinin ya üzerinde ya da yakınında bulunmaktadır. Bu da önerilen beş modelde bulunan katsayıların kullanılması ile elde edilecek tahmini nem değerlerinin, büyük bir doğrulukla deneysel nem değerlerini temsil ettiğini göstermektedir.



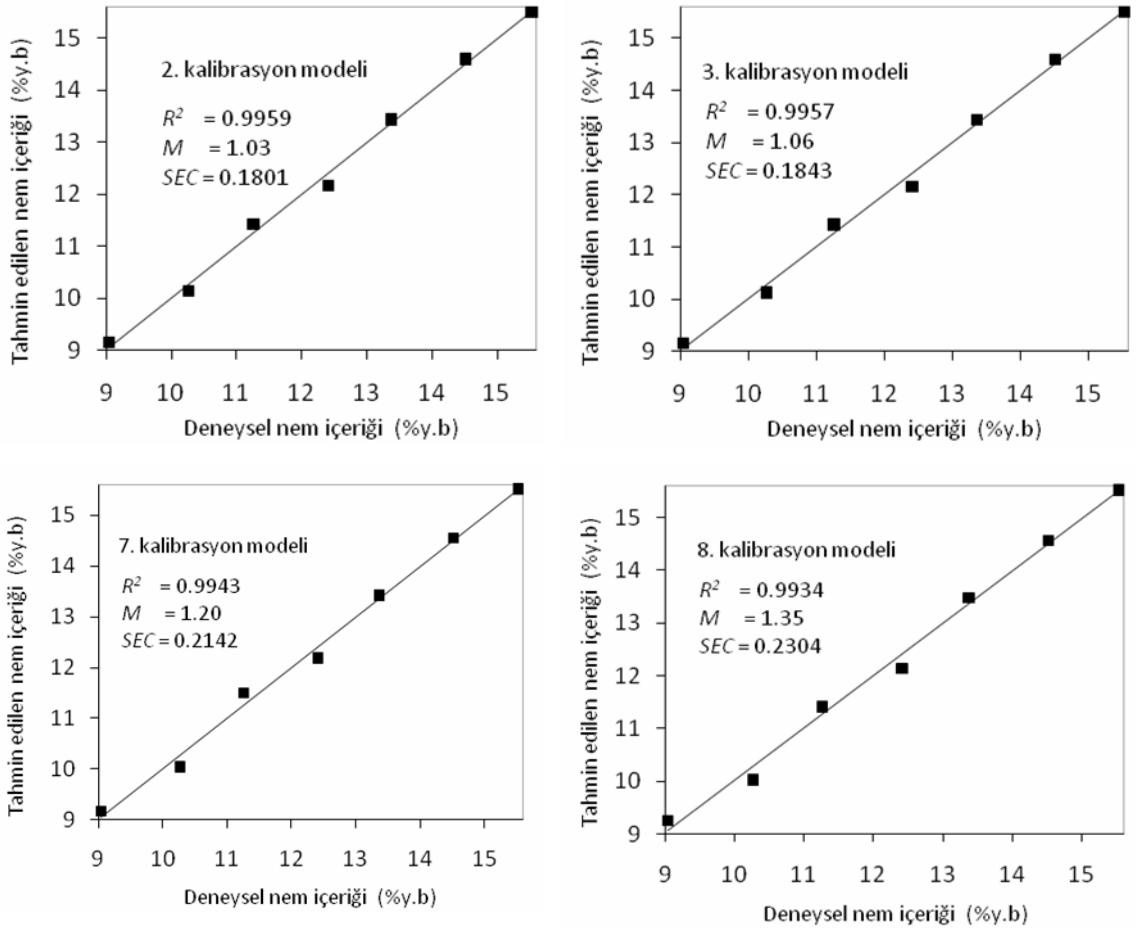
Şekil 4.13 Silindirik RF nem ölçme düzeninde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki



Şekil 4.14 Silindirik RF nem ölçme düzeninde 13, 20, 10 ve 17. modellerde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki

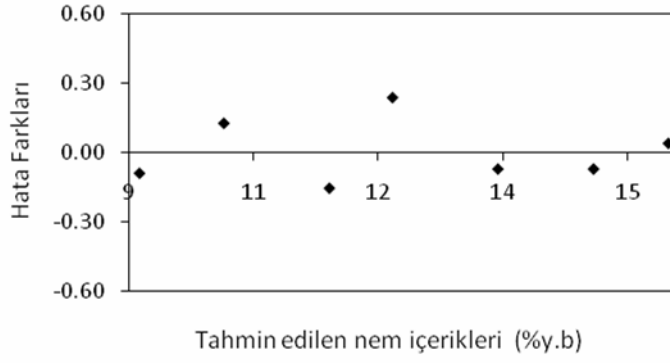


Şekil 4.15 Paralel plakalı RF nem ölçme düzeninde deneysel ve 1. model ile tahmin edilen nem içeriği değerleri

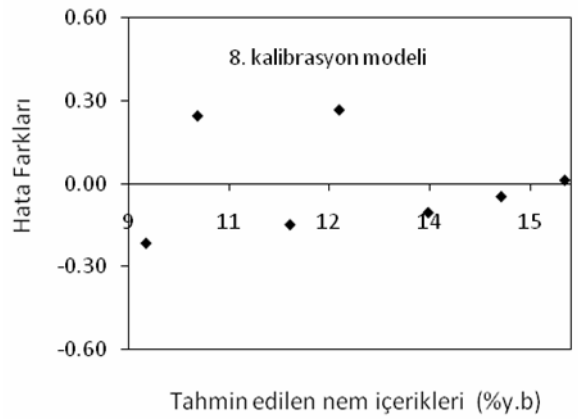
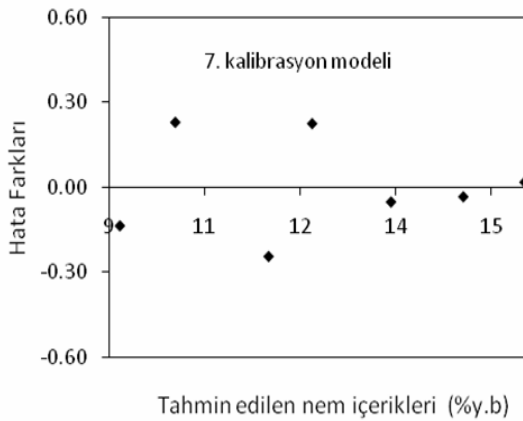
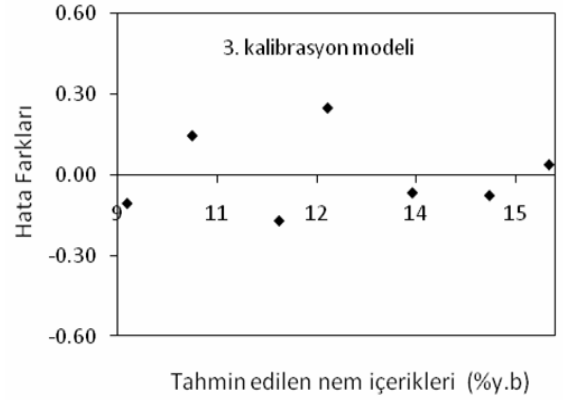
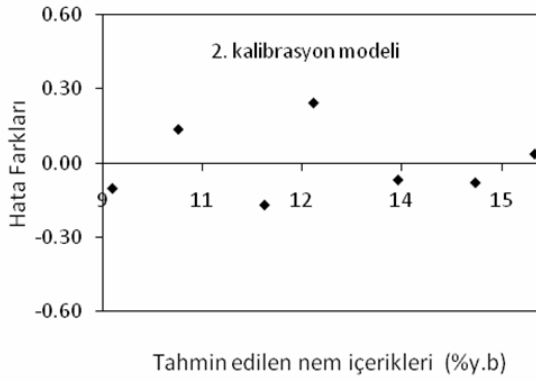


Şekil 4.16 Paralel plakalı RF nem ölçme düzeninde deneysel nem içeriği ve 2, 3, 7 ve 8. modeller ile tahmin edilen nem içeriği değerleri

Şekil 4.17’de paralel plakalı RF nem ölçme düzeniyle yapılan ölçümlerde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki verilmiştir. 2, 3, 7 ve 8. modellerin hata farkları ise Şekil 4.18’de verilmiştir. Ölçülen ve modelle tahmin edilen nem değerleri arasındaki farkın küçük olması ve sıfır etrafında yatay bir bantta hareket etmesi seçilen modelin iyiliğini göstermektedir.



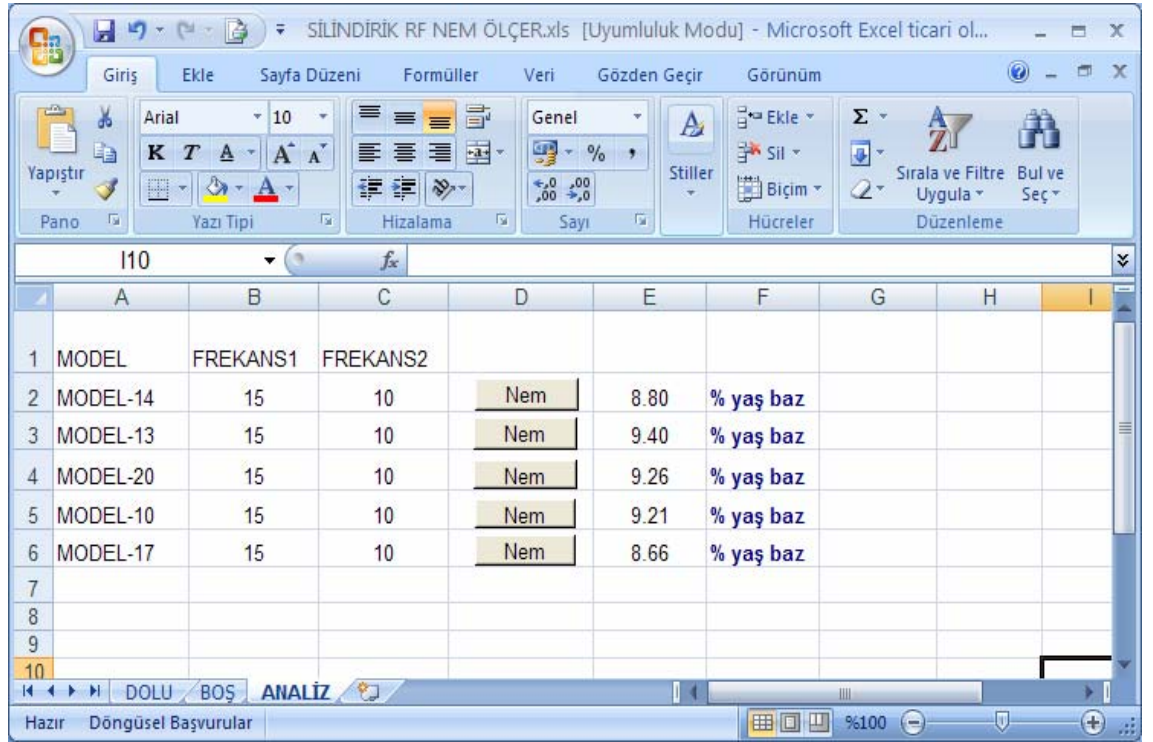
Şekil 4.17 Paralel plakalı RF nem ölçme düzeninde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki



Şekil 4.18 Paralel plakalı RF nem ölçme düzeninde 2, 3, 7 ve 8. modellerde tahmini nem içeriği ile hata farkları arasındaki ilişki

#### 4.4 Seçilen Modellerin Modelleme Yeterliliğinin Belirlenmesi

Geliştirilen silindirik ve paralel plakalı nem ölçme sistemlerinin ölçme yeteneğini belirlemek amacıyla her iki sistem için önerilen kalibrasyon modellerinin modelleme yeterliliği belirlenmiştir. Bu denemelerde buğday örnekleri % 8.80, 10.01, 11.07, 12.01 ve 13.45 y.b nem seviyelerinde incelenmiştir. Her iki nem ölçme düzeni için seçilen ilk beş model “Nem” makrosuna yazılmış ve ölçümler yapılmıştır. Şekil 4.19 ve 4.20’de sırasıyla silindirik ve paralel RF nem ölçme düzeninde belirlenen nem değerlerine ilişkin ekran görüntüleri verilmiştir.



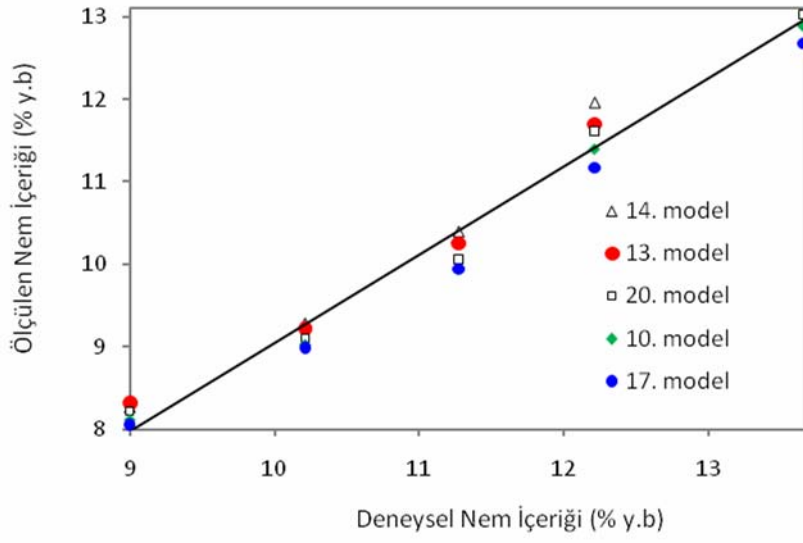
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	MODEL	FREKANS1	FREKANS2						
2	MODEL-14	15	10	Nem	8.80	% yaş baz			
3	MODEL-13	15	10	Nem	9.40	% yaş baz			
4	MODEL-20	15	10	Nem	9.26	% yaş baz			
5	MODEL-10	15	10	Nem	9.21	% yaş baz			
6	MODEL-17	15	10	Nem	8.66	% yaş baz			
7									
8									
9									
10									

Şekil 4.19 Silindirik RF nem ölçme sisteminin ekran görüntüsü

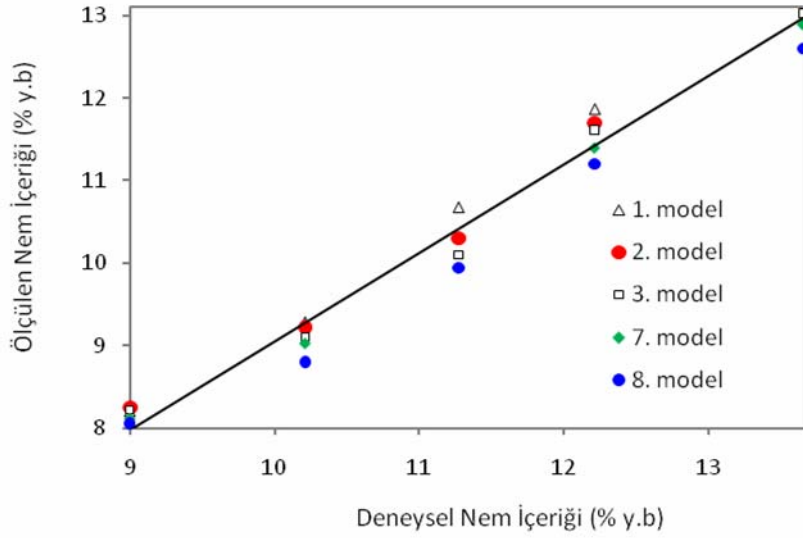
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	model	FREKANS1	FREKANS2					
2	MODEL-1	1	1	Nem	8.90	% yaş baz		
3	MODEL-2	1	1	Nem	9.45	% yaş baz		
4	MODEL-3	1	1	Nem	9.35	% yaş baz		
5	MODEL-7	15	5	Nem	9.27	% yaş baz		
6	MODEL-8	20	10	Nem	9.40	% yaş baz		
7								
8								
9								
10								

Şekil 4.20 Paralel plakalı RF nem ölçme sisteminin ekran görüntüsü

Silindirik koaksiyal RF nem ölçme sisteminde seçilen en iyi modelin modelleme performansı, yapılan istatistiksel analizler sonucunda  $M$  ve  $SEP$  değerleri sırasıyla % 1.85 ve 0.32 nem (y.b) olarak bulunmuştur. Paralel plakalı koaksiyal RF nem ölçme sisteminde ise seçilen en iyi modelin modelleme performansı, yapılan istatistiksel analizler sonucunda  $M$  ve  $SEP$  değerleri sırasıyla % 1.99 ve 0.39 nem (y.b) olarak bulunmuştur. Kim vd. (2003), çeşitli nem içeriğine sahip arpa, buğday, pirincin nem içeriğini online olarak ölçebilen bir nem ölçerin ölçüm hatasını yaklaşık olarak 0.40 nem olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 4.21 ve 4.22’de görüldüğü gibi deneysel olarak elde edilen nem değerleri ile geliştirilen RF nem ölçme sistemiyle ölçülen nem değerleri arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Grafiklerde yer alan noktaların doğrunun üzerinde ya da yakınında olması, geliştirilen sistemin kullanılabilirliğini göstermektedir. Tüm bu denemelerde elde edilen değerler eğrinin ya üzerinde ya da yakınında bulunmaktadır. Bu da seçilen en iyi beş model ile ölçülen nem değerlerinin, büyük bir doğrulukla deneysel nem değerlerini temsil ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.21 Silindirik RF ölçme düzeninde deneysel ve ölçülen nem içeriği değerleri



Şekil 4.22 Paralel plakalı RF ölçme düzeninde deneysel ve ölçülen nem içeriği değerleri

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada tahılların nem içeriğini doğru, güvenilir ve kısa sürede belirleyecek silindirik ve paralel plakalı RF nem ölçme düzenleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- (1) Tahılın içerisine konulduğu silindirik plakalı ölçüm kutusunun kapasitans değerleri 1-100 MHz aralığında 11.07 ile 11.14 pF, paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunun kapasitans değerleri ise aynı frekans aralığında 39.75 ile 45.98 pF arasında değişmiştir. Silindirik plakalı ölçüm kutusunda 40 MHz, paralel plakalı koaksiyal ölçüm kutusunda ise 30 MHz den sonra ölçüm kutusunun kararlılığı bozulmuştur. Bundan dolayı RF nem ölçme sisteminde nem ölçme aralığı 1-20 MHz aralığı dikkate alınmıştır.
- (2) Ölçme düzenlerinin dielektrik katsayısı, 1-30 MHz aralığında frekansa göre azalma eğilimi gösterirken 30-100 MHz aralığında artma eğilimi göstermiştir. Dielektrik katsayısı düşük frekanslarda yüksek bir değişim göstermiştir.
- (3) Nem artışıyla birlikte dielektrik ve kayıp faktörü katsayılarının da arttığı görülmüştür. Ancak düşük frekanslarda  $\epsilon'$  değişimi daha fazla olmuştur.
- (4) Silindirik RF nem ölçme düzeniyle yapılan ölçümler sonucunda 20 kalibrasyon modeli arasından en yüksek belirtme katsayısı 14. modelde görülmüştür. Bu modelin mutlak bağıl hatası % 0.07 ve kalibrasyonun standart hatası ise 0.0176 y.b nem olarak bulunmuştur. Bu modeli sırasıyla 13, 20, 10 ve 17. modeller izlemiştir.
- (5) Paralel plakalı RF nem ölçme düzeniyle yapılan ölçümler sonucunda 8 kalibrasyon modeli arasından en yüksek belirtme katsayısı 1. modelde görülmüştür. Bu modelin mutlak bağıl hatası % 0.97 ve kalibrasyonun standart hatası ise 0.1698 y.b nem olarak bulunmuştur. Bu modeli sırasıyla 2, 3, 7 ve 8. modeller izlemiştir.
- (6) Silindirik koaksiyal RF nem ölçme sisteminde seçilen en iyi modelin modelleme performansı için yapılan istatistiksel analizler sonucunda  $M$  ve  $SEP$  değerleri sırasıyla % 1.85 ve 0.32 nem (y.b) olarak bulunmuştur. Paralel plakalı koaksiyal RF nem ölçme sisteminde ise seçilen en iyi modelin modelleme performansına göre,  $M$



ve *SEP* değerleri sırasıyla % 1.99 ve 0.39 nem (y.b) olarak bulunmuştur.

- (7) Deneysel olarak elde edilen nem değerleri ile geliştirilen RF nem ölçme sistemiyle ölçülen nem değerleri arasında iyi bir uyum olduğu görölmüştür. Yapılan analizler sonucunda her iki RF nem ölçme sistemiyle ölçülen nem değerlerinin, büyük bir doğrulukla deneysel nem değerlerini temsil ettiği görölmüştür.
- (8) Daha yüksek frekanslarda çalışabilmesi için, silindirik ve paralel plakalı ölçüm kutularının boyutları değiştirilmelidir.
- (9) Önerilen RF nem ölçme sistemi, farklı tahılların nem içeriğinin belirlenmesinde kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- ASAE. 2002. Standards S352.2, 2002. Moisture measurement - unground grain and seeds. ASAE, St. Joseph, MI.
- Bartley, Jr.P.G., Nelson, S.O. and McClendon, R.W. 2002. Dimensional analysis of a permittivity measurement probe. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 51(6), 1312-1315.
- Berbert, P.A. and Stenning, B.C. 1996a. Analysis of the density-independent equations for determination of moisture content of wheat in the radiofrequency range. Journal of Agricultural Engineering Research, 65, 275-286.
- Berbert, P.A. and Stenning, B.C. 1996b. On-line moisture measurement of wheat. Journal of Agricultural Engineering Research. 65(4), 287-296.
- Berbert, P.A., Queiroz, D.M., Sousa, E.F., Molina, M.B., Melo, E.C. and Faroni, L.R.D. 2001. Dielectric properties of parchment coffee. Journal of Agricultural Engineering Research, 81(1), 65-80.
- Berbert, P.A., Queiroz, D.M. and Melo, E.C. 2002. Dielectric properties of common bean. Biosystems Engineering, 83(4), 449-462.
- Boldor, D., Sanders, T.H. and Simunovic, J. 2004. Dielectric Properties of in-shell and Shelled peanuts at Microwave Frequencies. Transactions of the ASAE, 47(4), 1159-1169.
- Corcoran, P.T., Nelson, S.O., Stetson, L.E. and Schlaphoff, C.W. 1970. Determining Dielectric Properties of Grain and Seed in the Audio- frequency Range. Transactions of the ASAE, 13(3), 348-351.
- Ertekin, C. 2001. Yaş İncirin Nem Desorpsiyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi, İnce Tabaka Halinde Güneş Enerjili Kurutucular İle Kurutulması, Desorpsiyon İzotermeleri ve Kuruma Davranışının Modellenmesi. Doktora tezi (basılmamış). Akdeniz Üniversitesi, 220 s., Antalya.
- Feng, H., Tang, J. and Cavalieri, R.P. 2002. Dielectric Properties of Dehydrated Apples As Affected by Moisture and Temperature. Transactions of the ASAE, 45(1), 129-135.

- Ikediala, J.N., Tang, J., Drake, S.R. and Neven, L.G. 2000. Dielectric Properties of Apple Cultivars and Codling Moth Larvae. *Transactions of the ASAE*, 43(5), 1175-1184.
- Jorgenson, J.L., Edison, A.R., Nelson, S.O. and Stetson, L.E. 1970. A Bridge Method for Dielectric Measurements of Grain and Seed in the 50-to 250-MHz Range. *Transactions of the ASAE*, 31(6), 1890-1895.
- Kim, K.B., Lee, J., Lee, S.S., Noh, S.H. and Kim, M.S. 2003. On-line Measurement of Grain Moisture Content Using RF Impedance. *Transactions of the ASAE*, 46(3), 861-867.
- Kim, K.B., Kim, J.H., Lee, S.S. and Noh, S.H. 2002. Measurement of Grain Moisture Content Using Microwave Attenuation at 10.5 GHz and Moisture Density. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(1), 72-77.
- Kraszewski, A.W. and Nelson, S.O. 1991. Density-independent Moisture Determination in Wheat by Microwave Measurements. *Transactions of the ASAE*, 34(4), 1776-1783.
- Lawrence, K.C., Funk, D.B. and Windham, W.R. 2001. Dielectric Moisture Sensor For Cereal Grains And Soybeans. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1691-1696.
- Lawrence, K.C. and Nelson, S.O. 1993a. Radio-frequency Density-independent Moisture Determination in Wheat. *Transactions of the ASAE*, 36(2), 477-483.
- Lawrence, K.C. and Nelson, S.O. 1993b. Density-independent Electrical Moisture Measurement in Bulk Wheat Samples. ASAE paper No. 93-3078. St. Joseph, Mich. ASAE.
- Lawrence, K.C., Nelson, S.O. and Bartley, Jr.P.G. 1998. Measuring Dielectric Properties of Hard Red Winter Wheat from 1 to 350 MHz with a Flow-through Coaxial Sample Holder. *Transactions of the ASAE*, 41(1), 143-150.
- Lawrence, K.C., Windham, W.R. and Nelson, S.O. 1998a. Wheat Moisture Determination by 1-to 110-MHz Swept-frequency Admittance Measurements. *Transactions of the ASAE*, 41(1), 135-142.

- Lawrence, K.C., Windham, W.R. and Nelson, S.O. 1998b. Sensing Wheat Moisture Content Independent of Density. Transactions of the ASAE, 41(3), 693-699.
- Liu, Y., Tang, J. and Mao, Z. 2009. Analysis of bread dielectric properties using mixture equations. Journal of Food Engineering, 93, 72-79.
- Mclendon, B.D., Branch, B.G., Thompson, S.A., Kraszewski, A. and Nelson, S.O. 1993. Density-independent Microwave Measurement of Moisture Content in Static and Flowing Grain. Transactions of the ASAE, 36(3), 827-835.
- Nelson, S.O. 1965. Dielectric Properties of Grain and Seed in the 1 to 50-mc Range. Transactions of the ASAE, 8(1), 38-48.
- Nelson, S.O. 1992. Correlating Dielectric Properties of Solids and Particulate Samples Through Mixture Relationships. Transactions of the ASAE, 35(2), 625-629.
- Nelson, S.O. and Bartley, Jr.P.G. 2000. Measuring Frequency-and Temperature-Dependent Dielectric Properties of Food Materials. Transactions of the ASAE, 43(6), 1733-1736.
- Nelson, S.O. and Lawrence, K.C. 1994a. RF Impedance and DC Conductance Determination of Moisture in Individual Soybeans. Transactions of the ASAE, 37(1), 179-182.
- Nelson, S.O. and Lawrence, K.C. 1994b. RF Impedance Sensing of Moisture Content in Individual Dates. Transactions of the ASAE, 37(3), 887-891.
- Nelson, S.O. and Stetson, L.E. 1976. Frequency and Moisture Dependence of the Dielectric Properties of Hard Red Winter Wheat. Journal of Agricultural Engineering Research, 21(2), 181-192.
- Noh, S.H. and Nelson, S.O. 1989. Dielectric Properties of Rice at Frequencies from 50 Hz to 12 GHz. Transactions of the ASAE, 32(3), 991-998.
- Saçılık, K. and Çolak, A. 2005. Dielectric Properties of Opium Poppy Seed. Journal of Agricultural Sciences. 11(1), 104-109, Ankara, Turkey.
- Saçılık, K. ve Çolak, A. 2008. Dielektriksel Yöntemle Bazı Tahılların Nem İçeriğini Sürekli Olarak Ölçebilen Bir Düzenek Geliştirilmesi. TÜBİTAK-TOVAG 104O263 nolu proje kesin sonuç raporu (basılmamış), 96s., Ankara.

- Sokhansanj, S. and Nelson, S.O. 1988. Dependence of Dielectric Properties of Whole-grain Wheat on Bulk Density. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 39(3), 173-179.
- Stetson, L.E. and Nelson, S.O. 1970. A Method for Determining Dielectric Properties of Grain and Seed in the 200- to 500-MHz Range. *Transactions of the ASAE*, 13(4), 491-495.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A.W. and Nelson, S.O. 1999. Determining Physical Properties of Grain by Microwave Permittivity Measurements. *Transactions of the ASAE*, 42(2), 531-536.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A.W. and Nelson, S.O. 2001. Universal Calibration Method for Microwave Moisture Sensing in Granular Materials. *Transactions of the ASAE*, 44(3), 731-736.
- Trabelsi, S. and Nelson, S.O. 2004. Microwave Dielectric Properties of Shelled and Unshelled Peanuts. *Transactions of the ASAE*, 47(4), 1115-111222.
- Venkatesh, M.S. and Raghavan, G.S.V. 2004. An Overview of Microwave Processing and dielectric properties of Agri-food Materials. *Biosystems Engineering*, 88(1), 1-18.
- Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Mitcham, E., Hansen, J.D., Hallman, G., Drake, S.R. and Wang, Y. 2003. Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as Related to Radio Frequency and Microwave Treatments. *Biosystems Engineering*, 85(2), 201-212.
- Zoerb, G.C., Moore, G.A. and Burrow, R.P. 1993. Continuous Measurement of Grain Moisture Content During Harvest. *Transactions of the ASAE*, 36(1), 5-9.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Parviz TOMARAEI  
Doğum Yeri : Marrand- Doğu Azerbaycan - İRAN  
Doğum Tarihi : 1966/08/23  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : Türkçe ve İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Seyyidzade Lisesi (1987)

Lisans : Urmia Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları (1991)

Yüksek Lisans:Ankara üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim  
Dalı(Şubat 2008- Ağustos 2010)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

1992 yılından buyana İran'ın Batı Azerbaycan ilinde Tarım ve Köy İşleri  
Müdürlüğünde Mekanizasyon uzmanı olarak çalışmaktadır.