ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf TÜLÜN

TOPRAK SU İÇERİĞİNİN VE YARAYIŞLI SU DÜZEYLERİNİN TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) İLE ÖLÇÜLMESİ VE ALETİN ÇEŞİTLİ TOPRAK BÜNYE SINIFLARINDA KALİBRASYONU

TOPRAK ANABİLİM DALI

ADANA, 2005

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOPRAK SU İÇERİĞİNİN VE YARAYIŞLI SU DÜZEYLERİNİN TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) İLE ÖLÇÜLMESİ VE ALETİN ÇEŞİTLİ TOPRAK BÜNYE SINIFLARINDA KALİBRASYONU

Yusuf TÜLÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TOPRAK ANABİLİM DALI

Bu tez 22/12/2005 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oy çokluğu İle Kabul Edilmiştir.

İmza	İmza	İmza
Prof. Dr. Alhan L. SARIYEV	Yrd. Doç. Dr. İsmail ÇELİK	Yrd. Doç. Dr. Veysel POLAT
DANIŞMAN	ÜYE	ÜYE

Bu tez Enstitümüz Toprak Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

Bu Çalışma Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.
Proje No: **ZF2003YL57**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOPRAK SU İÇERİĞİNİN VE YARAYIŞLI SU DÜZEYLERİNİN TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) İLE ÖLÇÜLMESİ VE ALETİN ÇEŞİTLİ TOPRAK BÜNYE SINIFLARINDA KALİBRASYONU

Yusuf TÜLÜN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TOPRAK ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Alhan L. SARIYEV

Yıl:2005, Sayfa: 78

Jüri: Prof. Dr. Alhan L. SARIYEV
Yrd. Doç. Dr. İsmail ÇELİK
Yrd. Doç. Dr. Veysel POLAT

Bu çalışmada, toprak hidrolojisi, tarımsal ve mühendislik çalışmalarında saptanması temel bir ihtiyaç olan toprak su içeriğinin belirlenmesinde son zamanlarda yaygın bir şekilde kullanılan TDR (Time Domain Reflectometry) aletinin, farklı toprak tekstürlerinde kalibrasyon çalışması yürütülmüştür. Bu amaçla Çukurova bölgesinde yaygın olan toprak tekstür sınıflarına (C, CL, SiC, SCL, L, SL, S) ait alanlardan alınan örnekler, alındıkları yerlerdeki hacim ağırlıklarına uygun şekilde kasalara yerleştirilmiştir. Söz konusu kasalardan çeşitli zaman dilimlerinde (farklı toprak su içeriklerinde), TDR aleti ve paralelinde alınan gravimetrik örneklerle kalibrasyon çalışması yürütülmüştür.

Kalibrasyon sonuçlarının grafiksel değerlendirilmesi sonucu, gerçek toprak su içerikleri ile TDR aletinin ölçümleri uyumlu seyir izlemiştir. Ancak, toprak su içeriğinin doygunluk düzeylerine yaklaşması durumunda, alet uyumlu sonuçlar vermemiştir, ayrıca toprakta % kil ve organik madde içeriğindeki artış TDR'nin ölçümlerindeki hatayı artırmıştır.

Anahtar kelimeler: TDR (Time Domain Reflectometry), toprak tekstürü, kalibrasyon, toprak su içeriği, yarayışlı su

ABSTRACT
MSc THESIS

THE MEASUREMENT OF SOIL WATER CONTENT AND AVAILABLE WATER LEVELS BY TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) AND THE CALIBRATION OF THE TOOL IN VARIOUS SOIL TEXTURE CLASSES

Yusuf TÜLÜN

DEPARTMENT OF SOIL SCIENCE
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
UNIVERSITY OF ÇUKUROVA

Supervisor: Prof. Dr. Alhan L. SARIYEV

Year: 2005, Pages: 78

Jury: Prof. Dr. Alhan L. SARIYEV

Asist. Prof. Dr. İsmail ÇELİK

Asist. Prof. Dr. Veysel POLAT

In this study, the calibration of TDR (Time Domain Reflectometry) tool that is used recently commonly on the determination of soil water content that its determination is a basic need in the studies of soil hydrology, agricultural and engineering areas was conducted in different soil textures. For this reason, the samples that are in the category of prevalent textures (C, CL, SiC, SCL, L, SL, and S) in Çukurova region were taken and placed into the pots in respect to their bulk density. The calibration study with the gravimetric samples taken by TDR tool with the subsequent ones in various time periods from the pots in question was carried out.

As a result of the graphical evaluation of the calibration results, the real water contents and TDR tool measurements were consistent with each other. Yet, in the case of the approach of the soil water content to the saturation levels, the tool did not result in the correspondence results. Moreover, the increase of clay % and organic matter content increased the error in the measurements of the tool TDR.

Keywords: TDR (Time Domain Reflectometry), Soil Texture, calibration, soil water content, available water

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her zaman yakın ilgilerini gördüğüm, çalışmalarım süresince değerli katkılarını ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Alhan L. SARIYEV, Yrd. Doç. Dr. İsmail ÇELİK ve Prof. Dr. M. Rıfat DERİCİ' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince denemelerin kurulmasında, sonuçlandırılması aşamalarında yardımlarını gördüğüm çalışma arkadaşlarım Dr. Metin MÜJDECİ, Ar. Gör. Ahmet DEMİRBAŞ, Ar. Gör. Çağdaş AKPINAR, Zir. Müh. Kenan PİLATİN ve ayrıca teknik konularda yardımlarını esirgemeyen Barış DERİCİ' ye çok teşekkür ederim.

Beni her zaman maddi ve manevi olarak destekleyen babama, anneme ve kardeşlerime çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER SAYFA

ÖZ I
ABSTRACT II
TEŞEKKÜR III
İÇİNDEKİLER IV
ÇİZELGELER DİZİNİ VI
ŞEKİLLER DİZİNİ VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ XI
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
2.1. Toprak Suyu Çeşitleri ve Toprak Suyunun Ölçüm Yöntemleri 8
2.1.1. Toprak Suyu 8
2.1.2. Toprak Su İçeriği 9
2.1.3. Kütle Esasına Göre Ölçüm 9
2.1.4. Hacim Esasına Göre Su İçeriği 10
2.1.5. Eşdeğer Su Derinliği 10
2.1.6. Doygunluk derecesi 11
2.1.7. Toprak Su İçeriğine İlişkin Dönüşüm Formülleri 12
2.1.8. Toprak Su İçeriğinin Gravimetrik Yöntemle Doğrudan Ölçülmesi 14
2.1.9. Toprak Su İçeriğinin Dolaylı Olarak Ölçülmesinde Kullanılan Yöntemler 15
2.2. Toprakta Su Akımının Kuramsal Temelleri 21
2.2.1. Transpirasyon Hızı 24
3. MATERYAL VE METOD 28
3.1. Araştırmada Kullanılan TDR Aleti 28
3.2. Çalışmada Kullanılan Deneme Toprağının Özellikleri 29
3.2.1. TDR Aletinin Kalibrasyonunda Uygulanan Yöntem 30
3.3. Araştırmada Kullanılan Toprakların Fiziksel Özelliklerinin Saptanması 30
3.3.1. Hacim Ağırlığı 30
3.3.2. Hidrolik İletkenlik 30

3.3.3. Tekstür (Bünye) Tayini 31
3.3.4. Toprak Su Karakteristikleri 32
3.3.5. Gözeneklilik 33
3.4. Kimyasal Özellikler 33
3.4.1. Kireç ($CaCO_3$) 33
3.4.2. Tuz Yüzdesi 33
3.4.3. Toprak Reaksiyonu (pH) 33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 35
4.1. Araştırmada kullanılan topraklarda TDR ölçümleri ile gerçek su içerikleri arasındaki eğim grafikleri 46
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 73
KAYNAKLAR 74

ÇİZELGELER DİZİNİ SAYFA

Çizelge 3.1. Denemede kullanılan toprakların hacim ağırlığı, tekstür ve hidrolik iletkenlik değerleri…… 32

Çizelge 3.2. Denemede kullanılan toprakların basınç nem değerleri…… 32

Çizelge 3.3. Denemede kullanılan toprakların gözeneklilik değerleri…… 33

Çizelge 3.4. Denemede kullanılan toprakların % kireç, pH ve % tuz değerleri... 34

Çizelge 4.1. Kumlu killi tın (SCL) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri……..... 40

Çizelge 4.1. Kumlu killi tın (SCL) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri…….……..... 40

Çizelge 4.2. Siltli kil (SiC) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri……...… 41

Çizelge 4.3. Kum (S) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri……..…….……..…… 42

Çizelge 4.4. Kumlu tın (SL) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri…….…..… 43

Çizelge 4.5. Killi tın (CL) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri……..…..… 44

Çizelge 4.6. Kil (C) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri……..……..... 45

Çizelge 4.7. Tın tekstürlü (L) toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri…….. 46

Çizelge 4.8. Çalışmada kullanılan toprak tekstür sınıflarına ait elde edilen Kalibrasyon ilişkisi ve R^2 değerleri……..…. 51

Çizelge 4.9. TDR kalibrasyonuna kil içeriğinin etkisi üzerine yürütülen denemeye ait TDR ve gerçek hacimsel % su içeriği verileri……..……..…..…… 56

Çizelge 4.10. TDR kalibrasyonuna kil içeriğinin etkisi üzerine yürütülen denemeye ait TDR ve gerçek hacimsel % su içeriği verileri……..... 57

Çizelge 4.11. TDR kalibrasyonuna organik maddenin etkisi üzerine yürütülen denemeye ait TDR ve gerçek hacimsel % su içeriği verileri……..…….……... 60

Çizelge 4.12. Kumlu killitın tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme……..…….…….…… 63

Çizelge 4.13. Siltli kil tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme……..……..…….…….. 64

Çizelge 4.14. Kum tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme……..…… 65

Çizelge 4.15. Kumlu tın tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme…….…… 66

Çizelge 4.16. Killi tın tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme……... 67

Çizelge 4.17. Kil tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme……... 68

Çizelge 4.18. Tın tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme……... 69

Çizelge 4.19. Farklı katmanlara göre yarayışlı su düzeylerini belirleyen programın bir görünüşü…….……... 71

ŞEKİLLER DİZİNİ SAYFA

Şekil 2.1. Toprak su içeriği dağılım eğrisi ile Z_1 ve Z_2 derinlikleri arasında depolanmış su miktarının bulunması……..……..……... 12

Şekil 2.2. Bozulmuş ve bozulmamış toprak örneği alınmasında kullanılan değişik toprak burgusu ve toprak örneği kaplar……..... 14

Şekil 2.3. Toprakta su ölçmesinde kullanılan alçı direnç bloğu ve içinde metal iletkenlerin yerleşimi……..... 15

Şekil 2.4. Solda alçı, sağda metal plaka arasına sıkıştırılmış gözenekli plastik direnç blokları……..... 16

Şekil 2.5. Alçı direnç blokları kalibrasyon eğrisine ilişkin bir örnek……..... 16

Şekil 2.6. Toprak su içeriğinin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan nötronmetre ……..... 18

Şekil 2.7. Nötronmetrenin ana unsurları…… 19

Şekil 2.8. TDR aletiyle ölçüm yapılması. Bir birine paralel iki metal iletken, bir başlığa tutturulmuş olarak toprağa çakılarak ölçüm yapılır…….. 20

Şekil 3.1. Araştırmada kullanılan TDR aleti……..……. 28

Şekil 4.1. Kumlu killi tın (SCL) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi……..…..... 36

Şekil 4.2. Siltli kil (SiC) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi……..….. 36

Şekil 4.3. Kum (S) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi……..……... 37

Şekil 4.4. Kumlu tın (SL) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi……..… 37

Şekil 4.5. Killi tın (CL) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi……..... 38

Şekil 4.6. Kil (C) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi……..……... 38

Şekil 4.7. Tın (L) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi……..…. 39

Şekil 4.8. Kumlu killi tın tekstürlü (SCL) toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki ……..…. 47

Şekil 4.9. Siltli kil (SiC) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri Hacimsel su içeriği değerleri……..... 47

Şekil 4.10. Kum (S) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki……..……..... 48

Şekil 4.11. Kumlu tın (SL) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki……. ……...…… 48
Şekil 4.12. Killi tın (CL) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki…...……..... 49
Şekil 4.13. Kil (C) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki…..…….……..….. 49
Şekil 4.14. Tın (L) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki……..…….……..... 50
Şekil 4.15. Tüm tektür sınıflarına ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki.……..……..... 50
Şekil 4.16. Kumlu killi tın (SCL) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri……..……..... 52
Şekil 4.17. Siltli kil (SiC) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri..……..... 52
Şekil 4.18. Kum (S) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerler…….....…… 53
Şekil 4.19. Kumlu tın (SL) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri……...……..... 53
Şekil 4.20. Killi tın (CL) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri……..……...…….... 54
Şekil 4.21. Kil (C) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri……..….…….……...… 54
Şekil 4.22. Tın (L) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri..……..…...…….……...… 55
Şekil 4.23. Tüm Tekstür sınıflarına ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerler……..…..… 55
Şekil 4.24. % 22 Kil içeren kaolinit ve tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve % Hacimsel su arasındaki ilişki……..……..... 57
Şekil 4.25. % 30 Kil içeren kaolinit ve tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve % Hacimsel su arasındaki ilişki..…… 58
Şekil 4.26. % 40 Kil içeren kaolinit ve tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve % Hacimsel su arasındaki ilişki……...…… 58

Şekil 4.27. % 50 Kil içeren kaolinit ve tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve % Hacimsel su arasındaki ilişki……..……..... 59
Şekil 4.28. % 3 Organik madde içeren kompost ve killi tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve Hacimsel su arasındaki ilişki……...….. 60
Şekil 4.29. % 5 Organik madde içeren kompost ve killi tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve Hacimsel su arasındaki ilişki…..……..….. 61
Şekil 4.30. % 7 Organik madde içeren kompost ve killi tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve Hacimsel su arasındaki ilişki…..……..….. 61
Şekil 4.31. Kumlu killi tın tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki…..... 63
Şekil 4.32. Siltli kil tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki……..... 64
Şekil 4.33. Kum tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki……..……..… 65
Şekil 4.34. Kumlu tın tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki…….……..…..… 66
Şekil 4.35. Killi tın tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki…..……..… 67
Şekil 4.36. Kil tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki…….……..… 68
Şekil 4.37. Tın tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki…….……..…… 69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\bar{\theta}$:Ortalama su içeriği

% :Yüzde

θ :Hacimsel su içeriği

$\sqrt{}$:Karekök

ε :Toprak dielektrik sabitesi

ρ :Toprak hacim ağırlığı

α: Alfa

θs :Doygunluk su düzeyi

γ_w :Suyun birim kütlesi

< :Daha küçük

> :Daha büyük

Be: Berilyum

c :Işığın boşluktaki yayılma hızı

C :Nötron sayımları

C :Nötron sayımları

cm :Santimetre

cm^3 :Santimetre küp

Cs :Nötron metre standart okuması

dw: Toprak su içeriğinin eşdeğer derinliği

g :Gram

h :Saat

kg :Kilogram

l :Litre

L :Prob uzunluğu

m :Metre

M :Yaş toprak kütlesi

m^3 :Metre küp

MHz :Megahertz

Ms :Kuru toprak kütlesi

Mw: Suyun kütlesi

N :Gözeneklilik oranı

^oC :Santigrat derece

pH :Asitlik-alkalilik faktörü

s :Saniye

S :Toprak profili içinde depolanmış su miktarı

SN :Solma noktası

T :Ton

t :Zaman

TDR :Time Domain Reflectometer

TK :Tarla kapasitesi

V: Toprak örneğinin toplam hacmi

Vg :Topraktaki toplam gözenek hacmi

V_v :Toprak toplam gözenek hacmi

Vw :Toprak suyunun hacmi

Vw: Toprak suyu hacmi

w :Ağırlık esasına göre (gravimetrik su içeriği)

Z: Toprak derinlik

γ :Gamma

θ_s :Satrasyon Yüzdesi

1. GİRİŞ

Toprak su içeriği, bitki gelişimini, bitki besin elementlerinin bitkiler tarafından alımını, yarayışlılığını ve toprak profili boyunca dağılımını, toprak havalanmasını, toprak sıcaklığını, infiltrasyonu ve yüzey akışı doğrudan etkiler. Toprağın plastiklik, kıvam, şişme-büzülme gibi mekaniksel özellikleri de nem içeriğinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, toprağın su içeriğinin belirlenmesi, toprak, hidrolojisi ve mühendislik çalışmalarında temel bir ihtiyaçtır. Tarla koşullarında bitkiye yarayışlı su miktarının saptanması, laboratuar koşullarında ise toprağın fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi için toprağın nem içeriğinin tayin edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla, bugüne kadar çok sayıda ve değişik metotlar kullanılmış ve halen yeni yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde büyük gayretler sarf edilmektedir.

Suyun, tüm canlılar gibi bitkiler içinde ne kadar önemli olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Gerçekten, bitkiler topraktan besin maddelerini ancak suyun olduğu bir ortamda alabilirler ve yine bu besin maddelerini ancak su ile asimilasyon organlarına taşıyabilirler, orada da ancak suyun var olması koşulu ile fotosentez yaparak organik madde üretip gelişebilirler. Meydana getirdikleri organik maddeleri su ile bitkisel organlara taşıyabilirler ve yine su ile bunları başka maddelere dönüştürebilirler. Hücrelerin bu fonksiyonu yerine getirebilmeleri için, sahip olmaları gereken turgorun gerçekleşmesi bakımından da mutlak olarak suya gereksinim vardır. Böylece bitkisel ürünler için bol miktarda su harcanır (Çepel, 1993). Örneğin bir ton tahıl ürünü için 400 ton suya gereksinim olduğu, bir Amerikan vatandaşının günlük yiyeceklerinin yetişip olgun hale gelmesi için 400 litre su harcadığı ifade edilmektedir (Sutton and Harmon, 1973).

Toprak su içeriğinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler, suyun kütlesinin belirlenmesi prensibine dayanan direkt yöntemler ve toprak su içeriğine bağımlı herhangi bir toprak özelliğinin ölçülmesi prensibine dayanan indirekt yöntemler olmak üzere iki grupta toplanmaktadır.

Direkt yöntemler gravimetrik yöntemler olup, bu yöntemlerde topraktaki su bir toprak örneğinden buharlaştırılmakta, yıkama veya kimyasal reaksiyon yoluyla uzaklaştırılmakta ve uzaklaştırılan miktar tayin edilmektedir (Demiralay, 1977;

Gardner, 1986). Direkt yöntemlerin en büyük dezavantajı, aynı noktadan birden fazla örnek almanın mümkün olmaması nedeniyle deneme parsellerinde ve toprak profillerinde yol açtığı tahribattır. Çok sayıda örnek alınması durumunda, toprakta makro gözeneklerin oluşmasına yol açmakta, bu durum ise toprak nem rejiminin değişmesine neden olabilmektedir (Kutilek ve Nielsen, 1994). Diğer bir dezavantajı ise, değişik zamanlarda alınan toprak örneklerinin nem içeriklerindeki farklılıkların hem toprak suyundaki varyasyonu hem de toprağın heterojen yapısından kaynaklanan varyasyonu yansıtacak olmasıdır. Ayrıca bu yöntemle elde edilen sonuç gerçek zaman diliminde değerlendirilemeyerek, ölçümün uzun sürede ortaya çıkarılması da bir eksiklik olarak bilinmektedir. Ayrıca belirli fiziksel zararları da vardır. Gravimetrik yöntemin en önemli özelliği ise indirekt yöntemlerin kalibrasyonu için başvurulan standart bir yöntem olmasıdır.

İndirekt yöntemlerde, toprağın belli fiziksel ve fizikokimyasal özelliklerinin su miktarına bağlı olarak değişimleri esas alınmaktadır. Bu yöntemlerin birçoğunda nem tayini ya toprağa yerleştirilmiş kalıcı sensörler veya toprakta açılan özel yuvalar içerisine okuma anında yerleştirilen sensörler vasıtasıyla kolaylıkla yapılabilmektedir. İndirekt yöntemlerin en önemli özelliği, ekipmanın bir kez tesis edilmesinden sonra toprak yapısında herhangi bir bozulmaya sebebiyet vermeksizin, az bir zaman harcayarak aynı yerde gerçek zaman diliminde ve kolay erişilebilir bir biçimde, sık ve sürekli ölçümlere olanak sağlamalarıdır. Ayrıca, toprağın su içeriği sensörün okunmasıyla birlikte belirlenmiş olmaktadır. İndirekt yöntemler arasında, elektriksel iletkenlik yöntemi, termal iletkenlik yöntemi, nötron yöntemi, gamma-ışınları zayıflama yöntemi ve son zamanlarda yaygın bir şekilde kullanılmakta olan TDR (Time Domain Reflectometry) önemli bir yer tutmaktadır.

Toprakta suyun niceliğini bilmek özellikle toprağın su bütçesi çalışmalarında toprak-su mühendisliğinde v.b. diğer alanlarda gereklidir. Örneğin, yağmur ve sulama ile toprağa giren veya buharlaşma, bitki terlemesi, drenaj ve yüzey akışları ile topraktan uzaklaşan suyun miktarının saptanmasında, toprağın bazı mühendislik özelliklerinin incelenmesinde toprak su içeriğinin belirlenmesi zorunludur (Yeşilsoy, 2002).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Toprak suyu hem zaman hem yer içinde noktadan noktaya önemli değişim sergileyen son derece dinamik bir varlıktır. Bu durum aktif bitki köklerinin varlığında ve özellikle toprak yüzeyine yakın yerde gerçektir (Or ve Wraith, 2000). Toprak su içeriğinin sürekli izlenmesi ziraat, ekolojik ve çevresel araştırmaların değerli bir parçası olabilir. Sulama projeleri kapsamında ve diğer bilimsel araştırmalarda gerçek zaman diliminde toprak su içeriğinin ölçülmesi ve izlenmesi için TDR (Time Domain Reflectrometry) aleti yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Toprakların birçoğu için TDR tarafından ölçülen toprak dielektrik sabitesi (ε), ve hacimsel su içeriği (θ) arasındaki ilişki Topp ve ark. (1980) tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\varepsilon = 3{,}03 + 9{,}3\theta + 146\theta^2 + 76{,}7\theta^3 \qquad (2.1)$$

Bu denklem bazı topraklar için elde edilen deneysel veriler ile iyi bir şekilde uyum göstermiştir (Topp ve ark., 1980). Ancak organik topraklar, ince tekstürlü topraklar ve killer için θ üzerine ε'un bağlılığı eşitlikte verilenden farklıdır (Wang ve Schmugge, 1980; Dobson ve ark., 1985; Herkelrath ve ark., 1991; Dasberg ve Hopmans, 1992; Dirksen ve Dasberg, 1993). Bu durum toprak ya da spesifik kil yüzeyinin bir atışı ile hapsedilmiş suyun oranındaki bir artış ile açıklanabilir. Zayıf bir şekilde bağlı suyun dielektrik sabitesi için varsayılan 3,2 değeri serbest suyunkinden çok daha azdır (25 ^{o}C'de 78,3) (Ponizovsky ve ark., 1999).

Jacobsen ve Schjonning (1992), Danimarka'da 5 bölgeden pulluk katmanı ve yüzey altı toprağından alınan toplam 189 toprak örneğinde su içeriğini, gravimetrik olarak ve kolay anlaşılabilir dielektrik sabitesini TDR vasıtasıyla saptamışlardır. Toprak tekstürleri kaba kumlu topraktan kumlu killi tına kadar ve su içerikleri de hava kurudan doygun su düzeyi civarına kadar dağılım göstermiştir. Örnekler, $1{,}35*10^3$ ya da $1{,}55*10^3$ kg.m^{-3} civarında hacim ağırlıklarında paketlendiler. Araştırıcılar Hacimsel su içeriği ve dielelektrik sabiti arasında üçüncü dereceden bir

polinominal ilişkiyi kalibrasyon için uygun bulmuşlardır. Araştırmada bağıntı önceki sonuçlardan farklıydı. Sapmalar kısmen tekstürdeki farklılıklar tarafından açıklanabilirdi. Söz konusu araştırmada kalibrasyon eşitliğinde hacim ağırlığı yoğunluğu kil içeriği ve organik madde içeriği için lineer terimlerin dahil edilmesi korelasyonda bir gelişme sağlamış; ölçülen dielektrik sabitesinde ve gravimetrik olarak belirlenen su içeriğindeki belirsizliklere kıyasla daha küçük olsa da bu gelişme istatiksel açıdan önemli bulunmuştur. Kalibrasyon eşitliğinde kil ve organik madde içeriğinin ve yoğunluğun dahil edilmesinden sonra bile, 10 toprak tipi arasında istatiksel açıdan önemli farklılıklar bulunmuş ve bu durum toprak unsurları arasındaki oldukça karmaşık interaksiyonların toprağın elektriksel özelliklerini etkilediğini ortaya koymaktadır.

Robinson ve ark.(1995), TDR ile dielektrik sabitesinin saptanmasında bazı demir ve titanyum oksit minerallerinin etkisini gözlemlemişlerdir. Araştırıcılar en büyük etkiyi gösteren Magnetit'in, %15 magnetit varlığında standart bir kalibrasyon kullanımıyla su içeriğinin % 60 kadar fazladan hesaplanmasına neden olduğunu göstermişlerdir. Çalışmada Hematit, Rutile ve İlmenit'inde aynı zamanda TDR tekniği kullanılarak yapılan dielektrik sabitesi ölçümünü etkilediğini gözlemişlerdir.

Schaap ve ark. (1996) 5 farklı orman ekim alanından aldıkları 25 tane orman toprağı örnekleri üzerinde TDR kalibrasyonunu yürütmüşlerdir. Araştırmada refreksiyon indeksinde hacimsel su içeriğini tespit etmek için lineer regresyon kullanılmıştır. Araştırmacılar bağlı suyun varlığından dolayı refraktif karışım modeli ile teorik değerlerden kalibrasyon doğrusu parametrelerini tahmin etmenin mümkün olmadığını bildirmişlerdir. Bununla birlikte suyun görünen dielektrik sabitesi dikkate alındığında, denge parametresini tahmin etmenin mümkün olduğunu bildirmişlerdir. Hata analizi, organik maddenin ayrışması, kalıntı su ve sıcaklık etkilerinin kalibrasyon parametreleri üzerinde, önemsiz etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada organik maddenin büzülmesi önemli ölçüde hem hacimsel su içeriğini hem de TDR yansıtma zamanlarını önemli ölçüde etkilemiş ve düzeltilmediği takdirde her iki etkinin güçlü bir şekilde büzülen bir H horizonunda yaklaşık 0.02 $cm^3.cm^{-3}$'lük sistematik hatalar verdiğini bildirmişlerdir.

Rodriguez ve ark. (1999), tarafından kullanılan TDR, yapay toprakların (granit taneli poroz ortam) çok farklı su içeriği katmanlarının varlığında, toprak suyunu ölçmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada üzerinde çalışılan yapay toprak için saptanan görünür dielektrik sabitesi, beklenenden ve doğal topraklar için literatürde rastlanan elde edilebilir ilişkilerden oldukça farklı olduğunu bildirmişlerdir.

Ponizovsky ve ark. (1999), TDR kalibrasyonuna toprak bileşiminin etkisini görmek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada farklı tekstürlü toprakların TDR kalibrasyon verilerini değerlendirmek için yayınlanmış modellerin yeteneklerini belirlemiş ve toprak gözenek hacmi içerisinde suyun pozisyonu üzerindeki dielektrik sabitesinin yaklaşık sürekli bağımlılığı için bir parça yöntemi sabitesi dağılımı modelini kullanmışlardır. Kumlu kaolin karışımı, dernova podzolik toprağı (dağ eteği), gri orman toprağı ve yıkanmış çernozem'de TDR'yi kalibre etmişlerdir. İnce tekstürlü topraklarda, %13'den başlayarak %27'ye kadar olan hacimsel su içeriklerinde, kalibrasyon eğrilerinin eğimlerinde göze çarpan değişimleri gözlemlemişlerdir. Çalışmada iyi bir kalibrasyon için uygun parametrelere sahip olmayan önerilen modeller, kaba tekstürlü karışımlar ve topraklardaki verilere iyi bir uyum göstermiştir. Fakat ince tekstürlü karışımlarda ve topraklardaki verilerle uygunluk göstermemiştir. Araştırıcılar parça yoluyla sabite dağılım modeli, 3 tane ayarlanabilir parametre ile birlikte tüm verilere iyi bir uyum gösterdiğini ve bu modelin parametreleri örneklerdeki kil içeriği ile ilişkili olduğunu belirtmektedir

Vaz ve ark. (2001) tarafından, toprak sıkışması üzerine toprak su içeriğinin ve hacim ağırlığının etkilerini daha iyi anlayabilmek için derinlik ile birlikte penetrasyon direncini ve su içeriğinin dağılımını eşzamanlı olarak saptayabilmek amacıyla birleştirilmiş bir penetrometre- bobin TDR probu geliştirilmiştir.

Miyamoto ve ark. (2001) tarafından, çoklu (multiple) uzun problu TDR tekniği kullanılarak, minimum ve konvansiyonel her iki toprak işleme şartları altında, kök bölgelerindeki su içeriği dağılımlarını değerlendirmek için bir çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla üç farklı hacim ağırlıklı bir Andisol'de, arazi ölçümleri ile TDR kalibrasyonu yürütülmüştür. Hem tek bir, hem de üç farklı ayrı kalibrasyon fonksiyonu farklı hacim ağırlıklı olarak ölçülen veriler için test edilmiştir. TDR ve gravimetrik örnekleme ile ölçülen su içerikleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Tek

kalibrasyon fonksiyonu nem dağılımında 0,50 $m^3.m^{-3}$den daha fazla aşırı bir hesaplamaya eğilimli olmasına rağmen TDR ve gravimetrik değerler arasındaki farklılığın standart sapması (S.D) ± 0.035 $m^3.m^{-3}$ olarak bildirilmiştir. Bu değerin kullanılan diğer üç ayrı kalibrasyon fonksiyonları için saptanan standart sapmadan sadece ± 0,002 $m^3.m^{-3}$ fazla olduğu bildirilmiştir. Minimum ve konvansiyonel her iki toprak işleme şartları altında Çoklu uzun problu TDR ölçümleri, zamanla aralıklı olarak yürütülmüştür. TDR tekniğinin su dağılımlarını kolaylıkla saptadığı ve farklı toprak işleme sistemlerinden meydana gelen toprak nem rejimini karakterize ettiği bildirilmiştir.

Kosmas ve ark. (2001) tarafından Akdeniz ekosistemlerinde toprak tarafından su buharı adsorbsiyonu üzerine yürütülen bir çalışmada kullanılan lizimetrelerde, TDR probları kullanılmıştır. Yunanistan'da semi arid iklim şartlarında ve Xerochrept olarak sınıflandırılan 4 toprak üzerinde yürütülen çalışmada, gece vakti su buharı adsorbsiyonunun bu bölgeler için çok önemli olduğunu ve toprak tarafından adsorbe edilen su buharı miktarının semi-arid iklim şartları altında, kurak peryod boyunca su kaybının % 70'e kadarını karşılayabileceğini bildirmişlerdir.

Kırda ve Sarıyev (2002), toprak su içeriğinin ölçülmesinde kullanılan TDR metodu ile ilgili geniş ve derlemeli bilgi vermişlerdir. Anılan kaynakta da belirtildiği gibi, ölçümün temeli toprak su içeriğine bağlı olarak, toprak dielektrik sabitesinin (**ε**) değişmesi ile izah edilmiştir. Elektromagnetik bir dalganın, toprak içine gömülmüş iki paralel metal iletkenler boyunca 50 MHz veya daha yüksek frekanslardaki yayılma bağıntısıyla belirlendiği üzere ortamın dielektrik sabitesine (ε) bağlı olarak değişir.

$$\varepsilon = (ct / 2L)^2 \qquad (2.2)$$

Denklemde c ışığın boşluktaki hızıdır (3.10^8 $m.s^{-1}$). Bu amaçla geliştirilmiş olan TDR aleti, ölçüm için kullanılan metal iletkenlerin uzunluğu L' ye bağlı olarak, bağıntısıyla, ortamın dielektrik sabitesini (ε) ölçer. Topp ve ark. (1980) tarafından

gösterildiği üzere ε ile toprak su içeriği θ arasında, ampirikte olsa sıkı bir ilişki vardır. Kumlu topraklar için kullanılabilecek θ ile ε arasındaki kalibrasyon denklemi,

$$\theta = -5{,}3.10^{-2} + 2{,}91.10^{-2}\varepsilon - 5{,}5.10^{-4}\,\varepsilon^{2} + 4{,}3.10^{-6}\,\varepsilon^{3} \qquad (2.3)$$

Topp ve ark. (1980) tarafından geliştirilmiştir. Orta ve ağır bünyeli veya organik maddece zengin topraklar için uygun kalibrasyon denklemi yeniden geliştirilmelidir (Kırda ve Sarıyev, 2002).

Heimovaara (1993) tarafından TDR aygıtının kalibrasyonunu yeniden irdelenmiştir ve 1,5< $\sqrt{\varepsilon}$ < 7,5 sınırları içinde kullanılabilecek, daha basit formdaki

$$\theta = 0.103\sqrt{\varepsilon} \qquad (2.4)$$

kalibrasyon denklemini önerilmiştir. Söz konusu denklem, basit pratik problemler için oldukça yaygın uygulama alanı bulmuştur. Ancak yüksek doğrulukta, özel uygulamalar söz konusu olduğunda, her toprak için TDR özel olarak kalibre edilmelidir sonucuna varmışlardır (Santini ve D' Urso, 2000).

Jackson (2003) tarafından, TDR aleti, toprak profili içerisinde su hareketinin bileşik hareketliliğine neden olmaya yeterli olup olmadığını ya da ilişkili olup olmadığını belirlemede kullanılmıştır. Basit bir metot olarak TDR teknolojisini kullanma yöntemi ile toprak profilinden toprak suyu akışını tahmin etmenin mümkün olduğu gösterilmektedir. TDR ve TDR' ye dayalı akış hesaplamalarını kullanarak yapılan ölçümlerle kıyaslanmaktadır. Araştırıcı bu kıyaslanmadan elde edilen sonuçların, hesaplanan hacimsel su içeriği tahminlerinin iyi bir şekilde gerçek TDR ölçümlerine dayalı olanlarla kıyaslama yapıldığını belirtmektedir. Araştırmada akış miktarları değişse de, hesaplanan hacimsel su içeriği metodu ve TDR esasına dayanan 120 cm'lik derinlikteki akışın, hesaplanan örnekler ile iyi korelasyon verdiği saptanmıştır. Her iki metottan elde edilen akışın miktarları TDR hesaplama metodu esasına dayalı akış miktarlarına kıyasla ölçülen hacimsel su içeriği metodu ile daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Mojid ve Cho (2004) tarafından, TDR ile dielektrik sabiti ve toprak su içeriği ölçümü üzerine yoğun bitki köklerinin etkilerini gözlemlemek amacıyla kumlu ve tınlı topraklar ile kök karışımlarında laboratuar denemeleri yürütülmüştür. TDR, aynı nem içeriklerine sahip kumlu ve tınlı kök karışımlı topraklarda tınlı toprakta kumlu topraktakine göre daha yüksek dielektrik sabitesi değerleri vermiştir. Ayrıca TDR ölçümleri üzerine köklerin etkilerinin, düşük toprak su içeriklerinde yüksek toprak su içeriklerine göre daha önemli olduğu bildirilmiştir.

Eitzinger ve ark. (2004), TDR'ı bir lizimetre çalışmasında, yaygın bir şekilde kullanılan CERES, WOFOST ve SWAP ürün modellerinin karşılaştırılmasında kullanmışlardır. Araştırmada Çernozem, kumlu çernozem ve bir fluvisol'ü içeren farklı toprak şartları altında, toprak su içeriğinin günlük ölçümlerini, TDR problarını kullanarak almışlardır.

Görünürdeki toprak elektriksel iletkenliğinin, sırasıyla çözünebilir tuzlar, kil içeriği ve mineralojisi, toprak su içeriği, hacim ağırlığı, organik madde ve toprak ısısını içeren fiziko-kimyasal özelliklerin bir kombinasyonu tarafından etkilendiği Corwin (2005) tarafından bildirilmiştir.

Ön çalışmalardan da irdelendiği gibi, doğrudan ve dolaylı yöntemlerle toprak su içeriği çeşitleri saptanmaktadır. Bu bakımdan toprakların su içeriği ile ilgili sınıflandırılması ve birbirleri ile ilişkilendirilmesi ve temel yaklaşımları ayrıca önem taşımaktadır.

2.1. Toprak Suyu Çeşitleri ve Toprak Suyunun Ölçüm Yöntemleri

2.1.1. Toprak Suyu

Toprak suyu, doğal olarak hiç bir zaman saf değildir. Değişik mineral tuzlar ve organik maddeler su içinde erimiş olarak bulunurlar. Çoğu kez toprak suyu içinde erimiş olarak bulunan organik veya inorganik tuz ve diğer bileşikler ihmal edilirlerse de tuzluluk sorunu olan bölgelerde önem arz ederler. Toprak suyu içinde erimiş olarak bulunan söz konusu kimyasalların önemli olmasına karşın, toprağın sıvı fazı toprak suyu olarak tanımlanır. Toprak su içeriği, toprakta su hareketi tarımsal

üretimde üzerinde önemle durulan konular arasındadır. Değişik tarımsal ürünlerin ekilmesi veya ekilen ürünlerin çimlenip iyi bir çıkış sağladıktan sonra gelişebilmesi için, örneğin buğday gibi, toprak suyunun belirli bir düzeyde bulunması gerekir. Bitkiler tarafından alınma, derinlere sızma veya toprak yüzeyinden serbest buharlaşma yoluyla toprakta eksilen su, ya doğal yağışlar veya sulama yoluyla yeniden yükseltilip eski düzeyine çıkarılabilir. Tarımsal üretimde, özellikle bitki gelişme dönemi içinde toprak su içeriğinin optimum düzeyde tutulabilmesi toprak su idaresi konusu içinde incelenmektedir (Kırda ve Sarıyev, 2002).

2.1.2. Toprak Su İçeriği

Toprak su içeriği, kullanma amacına bağlı olarak farklı yöntemlerle ölçülüp, farklı birimlerle ifade edilebilir. Örneğin toprağın birim kütlesinin veya birim hacminin içerdiği su farklı birimlerle ifade edilebilir. Toprak su içeriğinin ölçülmesinde toprak kütlesi esas alınarak ölçüm yapıldığı gibi, toprak toplam hacmi veya gözenek hacmi de ölçü olarak alınabilir. Özellikle sulama uygulamalarında, sulamadan evvel ve sonra toprak su içeriğinin derinlik olarak ifade edilmesi de yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Anılan konu aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak tartışılmıştır (Kırda ve Sarıyev, 2002).

2.1.3. Kütle Esasına Göre Ölçüm

Ağırlık esasına (kütle esasına göre) suyun ölçülmesi çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada ölçülüp bilinmesi gerekli olan, toprak örneğinin ıslak (M, g) ve kuru ağırlığının – kütlesinin (Ms, g)- bilinmesidir. Kütle esasına göre toprak su içeriği,

$$w = (M - Ms)/Ms = Mw/Ms \ (g.g^{-1}) \qquad (2.5)$$

bağıntısıyla ölçülüp belirlenir. Bu ifadeye göre gram kütle toprağın içerdiği su miktarı, gram kütle olarak bulunmaktadır (Kırda ve Sarıyev, 2002).

2.1.4. Hacim Esasına Göre Su İçeriği

Sulama uygulamalarında toprak su içeriğinin hacim esasına göre ölçülmesi, verilecek sulama suyunun miktarının hesaplanmasında kolaylık sağlamaktadır. Burada birim hacim toprak içinde bulunan su miktarı olarak ifade edilir. Bu amaçla aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır:

$$\theta = Vw / V \ (cm^3 . cm^{-3}) \tag{2.6}$$

Bağıntı içinde, Vw toprak su içeriğinin bulunması amacıyla ölçüm yapılan toprak örneği içinde bulunan toprak suyu hacmi (cm^3), V ise toprak örneğinin toplam hacmidir (cm^3). Aşağıdaki bölümlerde daha ayrıntılı olarak anlatılacağı üzere, toprak örneği hacmi, örnek alınmasında kullanılan kabın hacmidir. Toprak suyu hacmi (Vw), suyun birim kütlesinin $\gamma \approx 1.0\ g.cm^{-3}$ olduğu kabulü ile,

$$Vw = Mw / \gamma \equiv Mw \tag{2.7}$$

bağıntısı ile belirlendiği üzere, sayısal olarak kütlesi ile özdeştir. Diğer bir deyişle, örneğin 100 g su kütlesi 100 cm^3 tür (Kırda ve Sarıyev, 2002).

2.1.5. Eşdeğer Su Derinliği

Hacim esasına göre ifade edilmiş toprak su içeriği (θ, $cm^3 \cdot cm^{-3}$), toprak derinliği (Z, cm) ile çarpıldığı zaman, anılan toprak derinliği içinde depolanmış bulunan su miktarı uzunluk birimi (S, cm) ile belirlenmiş olur. Toprak su içeriğinin uzunluk biriminde ifade edilmesi sulama uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılmaktadır ve basitçe toprağın belirli bir derinliği içindeki su miktarının derinlik olarak ifade edilmesinden farklı bir şey değildir. Bu nedenle su içeriğinin anılan ifade ile gösterimi veya hesaplanması eşdeğer derinlik (d_w) olarak ta bilinmektedir. Toprak su içeriğinin eşdeğer derinliği,

$$d_w = \overline{\theta} \cdot Z \tag{2.8}$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada Z (cm), ortalama su içeriği $\overline{\theta}$ olan toprak katman derinliğidir. Toprak su içeriğinin toprak profili içindeki dağılımı, Şekil 2.1 de görüldüğü gibi, genelde farklılık gösterir. Bu durumda eşdeğer su derinliğinin hesaplanması için ortalama su içeriğinin hesaplanması yerine, toprak profilinde depolanmış su miktarından (S, cm) bahsetmek daha doğru olacaktır. Toprak profilinin Z_1 ve Z_2 derinlikleri arasında depolanmış su miktarı,

$$S = \int_{Z_1}^{Z_2} \theta dZ \tag{2.9}$$

integrali ile hesaplanabilir. Söz konusu integral, su dağılım eğrisinin altındaki alanın hesaplanmasından başka bir şey değildir (Şekil 2.1). Hesaplamada ilk defa su dağılım eğrisi çizilir ve hangi derinlikler arasında depolanmış su bulunmak isteniyorsa, su dağılım eğrisi altında o derinlikler arasındaki alan bulunur. Esasen, hesaplama sırasında su dağılım eğrisinin çizilmesine gerek olmadan, toprak profili ΔZ kalınlığında katmanlara ayrılır ve söz konusu katmanların ortalama su içeriğinden ($\overline{\theta}$),

$$S = \sum \overline{\theta} \cdot \Delta Z \tag{2.10}$$

denklemi kullanılarak depolanmış su miktarı bulunabilir (Kırda ve Sarıyev, 2002).

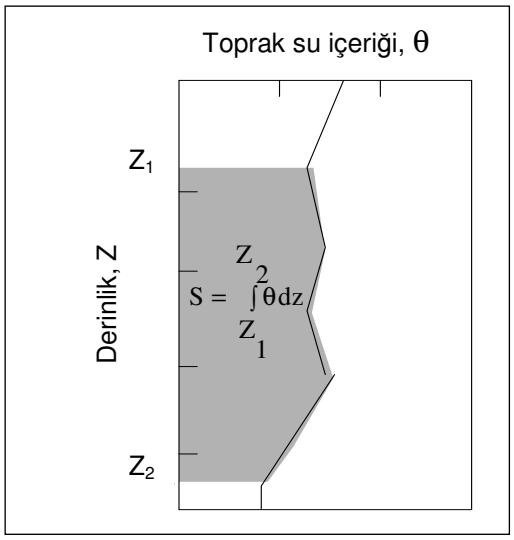
2.1.6. Doygunluk derecesi

Toprakların suya doygunluk derecesi de yaygın olarak kullanılmaktadır. Anılan ölçüm, toprak su içeriğinin, toprak gözenek hacmi cinsinden ifade edilmesinden ibarettir:

$$\theta_s = \frac{Vw}{Vv} = \frac{Vw}{Vg + Vw} \tag{2.11}$$

Doygunluk derecesi θ_s <1 olduğu zaman topraktaki boşluklar göreceli olarak su ile doludur. Bu durumda toprak, sıvı, katı ve boşluk fazlarından oluşan üç fazlı bir sistemdir. Doygunluk derecesi θ_s = 1 olduğu zaman bütün boşluklar su ile doludur. Bu durumda toprak, su ve katı olmak üzere iki fazdan oluşmaktadır ve toprak içinde hava fazı yoktur. Drenaj sorunu olan tarım arazilerinde benzer durum olması nedeniyle bitki kökleri havasızlıktan boğulmaktadır. Eğer θ_s = 0 ise, toprakta hiç su bulunmamaktadır. Toprak, boşluk ve katı fazlarından oluşan iki fazlı sistem oluşturur.

Toprak su içeriğine bağlı olarak, ıslak iken şişen, kuru iken büzülen killi topraklarda (özellikle 2:1 montmorillonit tipi kil içeren), doygunluk derecesi (θ_s) iyi bir ölçüm sayılmaz. (Kırda ve Sarıyev, 2002).



Şekil 2.1. Toprak su içeriği dağılım eğrisi ile Z_1 ve Z_2 derinlikleri arasında depolanmış su miktarının bulunması (Kırda ve Sarıyev, 2002).

2.1.7. Toprak Su İçeriğine İlişkin Dönüşüm Formülleri

Gerek kütle veya ağırlık ve gerekse hacim esasına göre ölçülmüş toprak su içeriği,

$$\theta = (w \cdot \rho)/\gamma_w, \quad w = \theta \cdot \gamma_w / \rho \tag{2.12}$$

bağıntıları kullanılarak bir birine dönüştürülebilir. Anılan bağıntılarda γ_w, suyun birim kütlesi olup değerinin 4 °C de 1 g.cm^{-3} olması nedeniyle, anılan bağıntılarda yazılmadığı da gözlenmiştir. Ancak doğru birim analizi için yazılması gerektiği unutulmamalıdır.

Hacimsel su içeriği ile doygunluk derecesi arasındaki ilişki,

$$\theta_s = \theta / n \tag{2.13}$$

bağıntısıyla tanımlanırken, toprakta bulunan hava dolu gözenek hacmi V_g ise,

$$V_g = n(1 - \theta s) \tag{2.14}$$

denklemiyle hesaplanabilir.

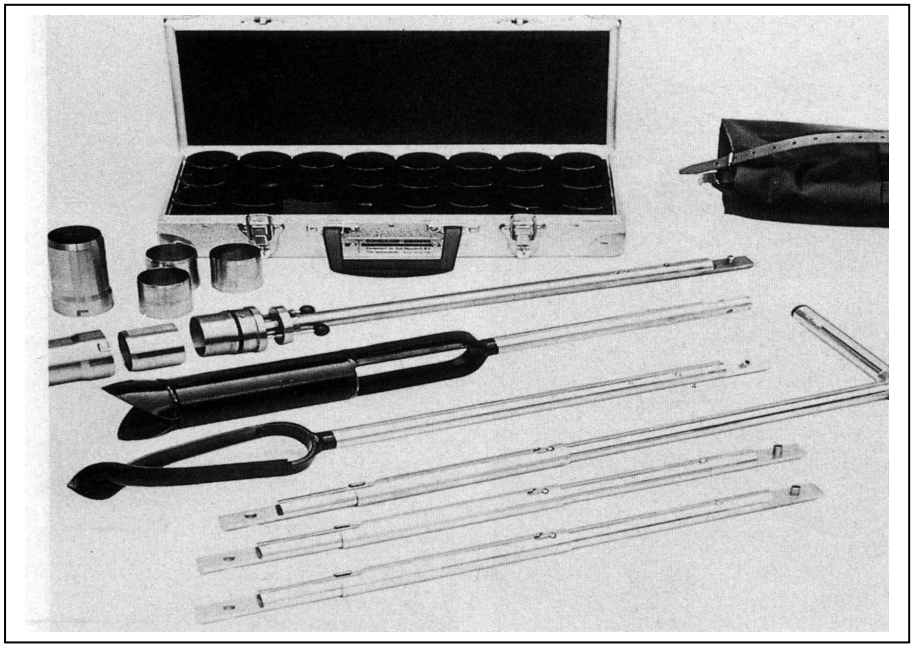
Toprak iskeleti içinde, kütle ve hacim ilişkilerinin verildiği bu bölümde, toprak fazları (katı, sıvı ve gaz) arasındaki fiziksel ilişkilerin tanımlanmasında en çok kullanılanlar; gözeneklilik n, birim hacim kütlesi ρ, hacimsel su içeriği θ ve suyun eşdeğer derinliği d_w dir.

Toprakların katı-sıvı-boşluk hacimleri veya kütlelerinin birbirlerine olan oranları, yer ve zamana göre değişir. Ancak yine de katı-sıvı-boşluk fazları arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde, genellikle kütle ve hacim esaslı ölçümler kullanılmaktadır.

Tarımsal sulama uygulamalarında, bitki kök bölgesi içindeki toprak su içeriğinin mevsimsel değişiminin bilinmesi ve takip edilmesi su kaynaklarının etkili olarak kullanılması bakımından önem arz eder. Benzer şekilde toprak dolgu baraj ve gölet inşaatlarında dolgu yapımı sırasında, dolgu malzemesinin belirli oranda ıslatılarak verilmesi daha iyi sıkıştırma sağlar. Ayni sorun, su içeriğinin ölçülmesi, yol dolgularında da gereklidir. Toprak su içeriğinin ölçülmesi amacıyla değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar başlıca doğrudan ve dolaylı yöntemler olarak gruplandırılırlar (Kırda ve Sarıyev, 2002).

2.1.8. Toprak Su İçeriğinin Gravimetrik Yöntemle Doğrudan Ölçülmesi

Toprak su içeriğinin doğrudan ölçülmesi, araziden gravimetrik (ağırlık esaslı) olarak toprak örneği alınmasını gerektirir. Toprak örneği bozulmuş veya bozulmamış olarak alınabilir. Bozulmuş örnek toprak burgusu ve kürek yardımıyla toprağın istenilen derinliğinden alınır ve hemen tartılarak örneğin ıslak kütlesi (M, g) bulunur. Bozulmamış örnekler ise özel örnekleme düzeneği ile hacmi belirli kaplar içinde alınırlar (Şekil 2.2). Bu örnekler de bekletilmeden hemen tartılır ve ıslak kütleleri bulunur. Islak kütleleri (ağırlıkları) ölçülmüş örnekler, toprak kurutma fırınlarında 105 °C de, ağırlıkları sabitleşinceye kadar kurutulurlar. Kurutma sonunda, söz konusu örneklerin erişilen ağırlıkları, toprağın kuru kütlesidir (M_s, g). Toprak örneği ağırlığındaki azalma, kuruma sırasında buharlaşarak kaybolmuş olan suyun kütlesidir (M_w, g). Eşitlik 2.5 kullanılarak ağırlık esasına göre veya bozulmamış örnek kullanılıyorsa, eşitlik 2.6 kullanılarak hacim esasına göre toprak örneğinin su içeriği kolayca bulunabilir. Burada ölçümler tartım (ağırlık) esasına göre yapıldığı için, kullanılan yönteme gravimetrik yöntem de denilmektedir (Kırda ve Sarıyev, 2002).

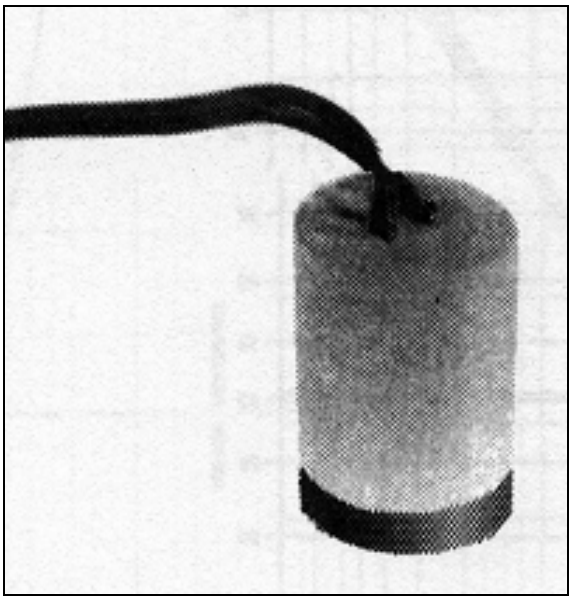


Şekil 2.2. Bozulmuş ve bozulmamış toprak örneği alınmasında kullanılan değişik toprak burgusu ve toprak örneği kapları

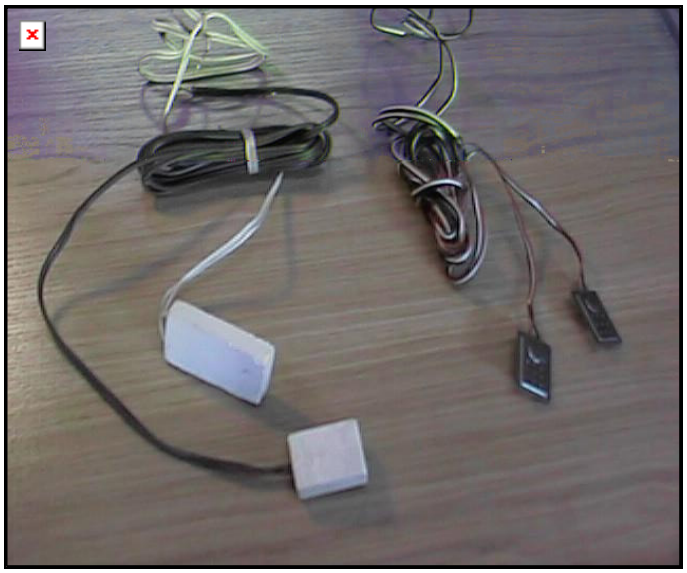
2.1.9. Toprak Su İçeriğinin Dolaylı Olarak Ölçülmesinde Kullanılan Yöntemler

Söz konusu gurup içindeki yöntemler ile toprak su içeri doğrudan doğruya ölçülemez. Burada yapılan, toprak içinde toprak su içeriğine bağlı olarak değişen başka bir parametrenin ölçülmesi ve bunun toprak su içeriğine karşı kalibre edilmesidir. Anılan yöntemler içinde direnç blokları (alçı blokları), kapasite blokları, tansiyometreler, nötronmetre ve TDR (Time Domain Reflectometry) sayılabilir.

Direnç blokları, alçı veya gözenekli plastik bloklar içine yerleştirilmiş metal ileticiler arasındaki elektrik drencinin ölçülmesiyle toprak su içeriğinin ölçülmesinde kullanılırlar (Şekil 2.3 ve 2.4). Suyun ölçülmesi istenen toprak katmanlarına yerleştirilen bloklar, ortamdaki su ile denge haline gelirler. Su içeriği ile blok dirençleri arasında yakın bir ilişki olup, su miktarı arttıkça direnç düşer (Şekil 2.4). Alçı direnç blokları, pH sı yüksek özellikle sodyumlu topraklarda kolayca eriyecekleri için, bu özellikteki topraklarda plastik blokların kullanılması tercih edilir.



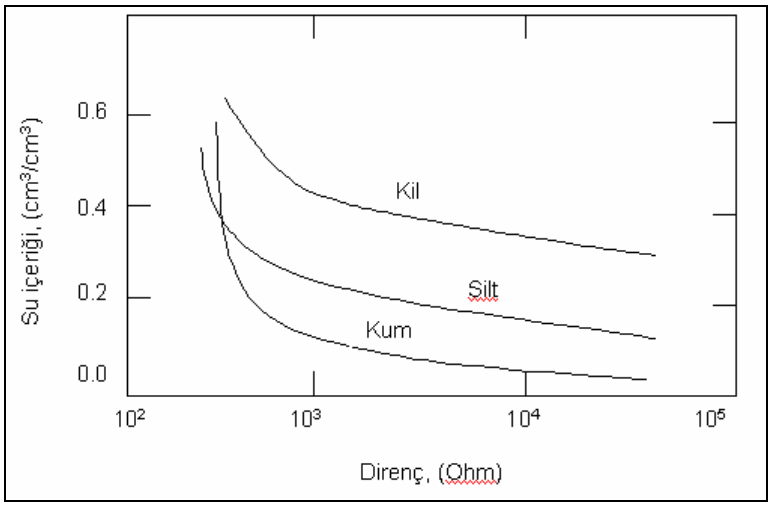
Şekil 2.3. Toprakta su ölçmesinde kullanılan alçı direnç bloğu ve içinde metal iletkenlerin yerleşimi



,

Şekil 2.4. Solda alçı, sağda metal plaka arasına sıkıştırılmış gözenekli plastik direnç blokları

Elektrik kapasite blokları da direnç bloklarından pek farklı değildir. Kapasite bloklarında, direnç yerine metal iletkenler arasındaki ortamın dielektrik sabitesi değişir. Dielektrik sabitesinin değişmesi ise göreceli olarak ortamdaki su içeriğinin değişmesinden kaynaklanır çünkü suyun dielektrik sabitesi bilinen diğer kimyasallar en yüksektir. Ölçüm için, toprak su içeriği ile blok dielektrik sabitesi arasında yapılmış kalibrasyon eğrisine gerek vardır.



Şekil 2.5. Alçı direnç blokları kalibrasyon eğrisine ilişkin bir örnek (Kırda ve Sarıyev, 2002)

Tansiyometreler de toprak su içeriğinin ölçülmesinde kullanılabilirler. Esasen, söz konusu bu aygıtlar toprak suyu enerjisini ölçülmesinde kullanılırlar. Eğer toprak suyu enerjisi ile toprak su içeriği arasında, toprak su karakteristik eğrisi diye tanımlanan ilişki biliniyorsa, tansiyometre okumalarından toprak su içeriği de belirlenebilir. Tansiyometreler toprak suyu enerji bağıntılarının tartışıldığı Bölüm 4 de daha ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

Toprak su içeriğinin dolaylı olarak ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan diğer bir metod ise nötron dağılma (neutron scattering) metodudur. Bu amaçla yapılıp ticari olarak satılmakta olan aygıtlara nötronmetre denir (Şekil 2.6). Aygıt başlıca üç parçadan oluşmaktadır: Nötron kaynağı, elektronik sayıcı sistem (scaler); kaynak ve sayıcıyı bağlıyan yüksek voltaj kablosu (Şekil 2.7). Nötron kaynağı için, 9Be ve 241Am in bir arada bulunmasıyla sağlanan ve 9Be(α,n)12C şeklinde gösterilebilecek nükleer tepkime kullanılır. Söz konusu tepkime sonunda kaynak etrafında her tarafa rasgele uçuşan hızlı nötronlar (4.5 Mev) oluşur. Toprak ile hızlı nötronların girişimi sonucu hızlı nötronlar enerjilerini kaybeder ve kaynak etrafında küre şeklinde ısısal (termal) nötron (0.025 eV) bulutu oluşur. Hızlı nötronları en etkili şekilde yavaşlatan hidrojen atomlarıdır. Diğer bir deyişle, ortamda ne kadar fazla termal nötron varsa, ortamda o kadar fazla 'hidrojen atomu vardır'. Diğer taraftan toprakta hidrojen atomlarının kaynağının su molekülleri olduğu düşünülürse, termal nötronların ölçülmesiyle dolaylı olarak topraktaki su içeriği de ölçülebilir. Bu amaçla yine bir kalibrasyon eğrisine gerek vardır.

Nötronmetre ile toprak su içeriğinin ölçülmesi için, hangi derinlikte ölçüm yapılmak isteniyorsa, nötron kaynağının o derinliğe indirilmesi gerekir. Arazide bir toprak burgusu ile açılmış olan deliğe, çoğunlukla alüminyumdan yapılmış borular çakılır. Yüksek voltaj kablosunun ucuna, termal nötron detektörü ile birlikte bağlanmış çelik koruma silindiri (probe) içindeki kaynak istenilen derinliğe, alüminyum borudan sarkıtılır. Kablonun dışarıda kalan bölümünü üzerinde toprak derinlikleri işaretlenmiştir. Toprak su içeriğinin ölçümü için basitçe nötron sayımı yapılır. Ancak hesaplamalarda, doğrudan nötron sayımı yerine nötron sayım oranları kullanılır. Bunun için su ölçümü yapılacak yer ve derinliklerde nötron sayımları (C)

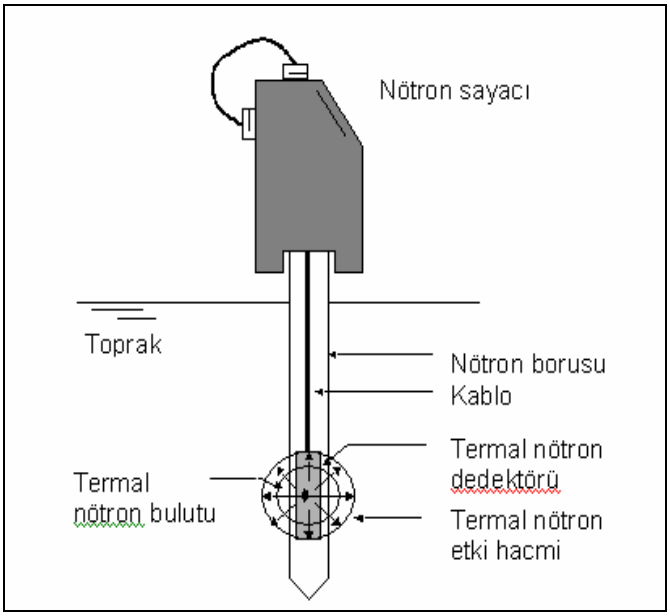
veya okumaları yapıldıktan sonra, standart okuması (Cs) denilen bir okuma yapılır. Standart okuması su içeriği sabit, birim kütlesi (densite veya yoğunluk) değişmeyen bir ortamdaki nötron sayımıdır. Bu amaçla içi su dolu varil kullanıldığı gibi, nötron kaynağının toprak içine sarkıtılmadan, kaynağın aletin içinde olduğu halde yapılan okuma da standart olarak kabul edilebilir. Hesaplamalarda $R = C/Cs$ bağıntısıyla hesaplanmış nötron sayım oranları kullanılır. Hesaplamalar çok basit olup,

$$\hat{\theta} = a + bR \tag{2.15}$$

denklemiyle tanımlanan doğrusal kalibrasyon bağıntısından R ye bağlı olarak su içeriğinin hesaplanmasıdır. Nötronmetrenin kalibrasyonu ve kullanılmasına ilişkin daha ayrıntılı bilgi için Greacen (1981) a bakılabilir.



Şekil 2.6. Toprak su içeriğinin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan nötronmetre



Şekil 2.7. Nötronmetrenin ana unsurları: elektronik sayıcı, kablo, nötron kaynağı ve dedektör

Toprak su içeriğinin ölçülmesinde kullanılan diğer dolaylı bir yöntem ise TDR yöntemidir. Anılan yöntem, su içeriğine bağlı olarak toprak dielektrik sabitesi 'ε' nin değişmesi temeline dayanır. Elektromagnetik bir dalganın, toprak içine gömülmüş iki paralel metal iletkenler boyunca 50 MHz veya daha yüksek frekanslardaki yayılma hızı,

$$v = c / \sqrt{\varepsilon} \tag{2.16}$$

bağıntısıyla belirlendiği üzere ortamın ε sine bağlı olarak değişir. Denklemde c ışığın boşluktaki hızıdır (3.108 $m.s^{-1}$). Bu amaçla geliştirilmiş olan TDR aleti, ölçüm için kullanılan metal iletkenlerin uzunluğu L ye bağlı olarak,

$$\varepsilon = (ct / 2L)^2 \tag{2.17}$$

bağıntısıyla, ortamın ε sini ölçer (Şekil 2.7). Topp ve ark. (1980) tarafından gösterildiği üzere, ε ile toprak su içeriği θ arasında, ampirik (deneysel) te olsa sıkı bir

ilişki vardır. Kumlu topraklar için kullanılabilecek θ ile ε arasındaki kalibrasyon denklemi,

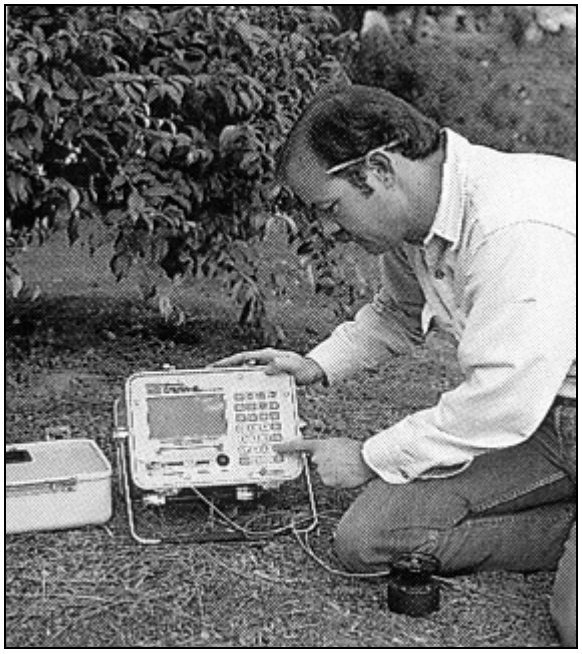
$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.91 \cdot 10^{-2}\varepsilon - 5.5 \cdot 10^{-4}\varepsilon^2 + 4.3 \cdot 10^{-6}\varepsilon^3 \quad (2.18)$$

Topp ve ark. (1980) tarafından geliştirilmiştir. Orta ve ağır bünyeli veya organik maddece zengin topraklar için uygun kalibrasyon denklemi yeniden geliştirilmelidir.

Heimovaara (1993), TDR aygıtının kalibrasyonunu yeniden irdeledi ve sınırları içinde kullanılabilecek, daha basit formdaki,

$$\theta = 0.103\sqrt{\varepsilon} \quad (2.19)$$

kalibrasyon denklemini önerdi. Söz konusu denklem, basit pratik problemler için, oldukça yaygın uygulama alanı buldu. Ancak yüksek doğrulukta, özel uygulamalar söz konusu olduğunda, her toprak için TDR özel olarak kalibre edilmelidir (Santini ve D'Urso, 2000).



Şekil 2.8. TDR aletiyle ölçüm yapılması. Bir birine paralel iki metal iletken, bir başlığa tutturulmuş olarak toprağa çakılarak ölçüm yapılır

2.2. Toprakta Su Akımının Kuramsal Temelleri

Suyun toprakta birçok işlevi bulunmaktadır. Her şeyden önce, bitki gelişmesi için gerekli olan çözünebilir besin elementlerinin açığa çıkmasını sağlayan mineral ve organik maddelerin ayrışması olayları için suyun varlığı esastır. Ayrıca su besin elementlerinin bitki köküne doğru hareketine olanak sağlayan bir ortam olarak hizmet etmektedir. Bunların ötesinde su, bitki hücrelerinin canlılıklarını koruyabilmeleri için gerekli bir unsurdur. Bitki gelişmesi, birçok etmenle ilişkili olmakla birlikte öncelikle topraktaki suyun varlığına bağlıdır. Bitkiler kökleri aracılığıyla bünyelerine aldıkları suyun bir kısmını kullanırken çok büyük bir kısmını da yaprak yüzeylerinden buharlaşma yoluyla dışarı vermektedir. Bitki tarafından üretilen her 1 kg kuru madde için bu yolla buharlaşan su miktarı 300–1000 litre civarında değişmektedir. Bitkiye uygun bir su desteğinin sağlanması için gelişme periyodu süresince toprağın optimal nem şartlarını içermesi gerekmektedir (Özkan, 1985). Bu nedenle bitkisel üretimde, verimi sınırlayan en önemli gelişim faktörlerinden biri olan topraktaki suyun, zamana ve derinliğe bağlı olarak durumunu izlemek gerekir.

Toprakta su akımı bloğu için geliştirilmiş modelin temeli Darcy yasasına ve süreklilik eşitliği ile kombine edilmesine dayanmaktadır (Aydın ve Polat, 1995; Poluektov, 1991; Sarıyev ve ark., 1995).

Toprakta su akısı ise Darcy yasasına göre aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V=-K(p)*(\Delta H/\Delta x) \qquad (2.20)$$

Burada;

K(p): toprağın hidrolik iletkenliği (cm sa^{-1}),

Δx, (x_2-x_1): iki toprak katmanı arasındaki mesafe (cm),

ΔH, $H(x_2)-H(x_1)$: katmanlar arası su yükü farkı (cm),

Diğer yükleri ihmal edersek, topraktaki su yükü, yerçekimi yükü ile matrik yükünün (p) toplamına eşit olur.

$$H=p-z \qquad (2.21)$$

Eşitlik (2.2.1) ve (2.2.2) birleştirilirse, aşağıdaki ilişki bulunur:

$$V=-k*[(\Delta p/\Delta x)-1] \quad (2.22)$$

Burada $\Delta z=\Delta x$ olarak alınmıştır.

Toprağın su içeriğinin ($\Theta=cm^3\ cm^{-3}$) zamana göre (t=saat) değişimi şu şekilde yazılabilir;

$$\partial\Theta/\partial t=(-\partial V/\partial x)+f \quad (2.23)$$

Yukarıdaki eşitlikte;

f: kök tarafından alınan suyun miktarını belirleyen fonksiyonel bir ifadedir.

Eşitlik(2.2.3)'te gösterilen (V) değişkeni eşitlik (2.2.4)'de yerine yazılırsa ve toprağın özgül (diferansiyel) su kapasitesi ifadesi de ($\mu(P)=d\Theta/dp$) kullanılırsa, şu ilişki elde edilir.

$$\mu(p)*(\partial p/\partial t)=[\partial/\partial x)*(k(p)*(\partial P/\partial x-1)-f] \quad (2.24)$$

Burada, toprak rutubet karakteristik eğrisinden (pF eğrisi) yararlanılarak eşitlik (2.25), yalnız p değişkenine bağlı, lineer olmayan diferansiyel bir denklem haline dönüştürülmüştür.

(2.25) denkleminin üst sınır koşulu aşağıdaki gibidir.

{E_s, koşul: Rs=0,-min(R_s, Kf), koşul: Rs>0

$$V=\Big|_{x=0}\text{-}K(p)[\partial p/\partial x-1]\Big|_{x=0}= \quad (2.25)$$

Burada;

E_s: toprak yüzeyinden buharlaşma ile kaybolan su,

R_s: yağış miktarı,

K_f: infiltrasyon hızıdır.

Yukarıdaki tanımlamaya göre, R_s=0 ise akı, buharlaşmaya (E_s) eşittir. $0<R_s\leq K_f$ ise yağışın şiddeti, infiltrasyon hızından (akı yoğunluğundan) küçük veya ona eşit olmaktadır. Toprak katmanlarında su içeriği tarla kapasitesine ulaştıktan sonra aşağı doğru hareket etmektedir. $R_s>K_f$ olması durumunda toprak yüzeyinde göllenme meydana gelir ve h_w ile gösterilen biriken su derinliği bütçe esasına dayanılarak hesaplanabilir (Nerpin ve Çudnovski,1975).

Diğer taraftan, alt sınır koşulu seçilen NR derinliğinde şu şekilde tanımlanabilir.

$$-K(p)\,\partial p/\partial x\Big|_{X=NR} = 0 \qquad (2.26)$$

Modelin başlangıç koşulu:

$$f(\Theta_i)=\Theta_i \qquad (2.27)$$

Modelde kullanılan toprak rutubet karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik için sırasıyla aşağıdaki ifadeler kullanılmıştır.

$$P_i=P_D*\exp(A*(\Theta_D-\Theta_i)) \qquad (2.28)$$

P_i: matrik potansiyel (cm H_2O),

P_D: doygunluk durumundaki toprak suyunun potansiyeli,

A: toprak bünyesine bağlı bir katsayı,

Θ_D: Toprağın doygunluktaki hacimsel su içeriği ($cm^3\,cm^{-3}$),

Θ_i: Toprağın başlangıç hacimsel su içeriği ($cm^3\,cm^{-3}$),

Doymamış hidrolik iletkenlik için aşağıdaki model önerilmiştir.

$$K=K_f(P_d/P)^m \qquad (2.29)$$

m: yarı ampirik katsayı,

K_f: doygunluktaki hidrolik iletkenlik.

Toprakta su akımının matematiksel modeli diğer bloklarla aynı zaman diliminde derinliğe bağlı olarak çözümlenmelidir. Bu yaklaşım temel yaklaşım

olmakla birlikte, kısa zaman ve derinliklerde başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak tüm vejetasyon döneminde ve homojen olmayan alanlarda, bazı hatalar vermektedir.

Toprak su akımında etkili faktör olan ve üst sınır koşulu için dikkate alınan toprak suyunun buharlaşma modeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$E_s = \rho_a D_s (q_s(0) - q_a) \quad (2.30)$$

Burada;

ρ_a: hava yoğunluğu ($1.2\ 10^{-3}$ gr cm^{-3}),

D_s: toprakla atmosfer arasında nem iletim katsayısı (cm sn^{-1}), bu değer moleküler diffüzyon katsayısı gibi de değerlendirilmektedir.

$q_s(0)$: toprak yüzeyinin mutlak nem içeriği (gr su/gr hava),

q_a: atmosferin mutlak nem içeriği (gr su/gr hava).

Mutlak nem içeriği Magnus yasasına göre saptanmakta ve sıcaklığın (T) fonksiyonu olduğundan aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$q(T)=3.79*10^{-3}\exp(17.1*T/(235+T)) \quad (2.31)$$

Toprak su bloğunda, sığ topraklarda olası yüzey akışları ve taban suyu mevcut olan arazilerde modelin sınır koşulları yeniden tanımlanmalıdır. (Poluektov, 1991)

2.2.1. Transpirasyon Hızı

Bitkilerden buharlaşma (evaporasyon) yoluyla suyun yitmesine transpirasyon denir. Bitkilerin daha çok yapraklarından olan transpirasyon, bitkilerin çimlenip toprak yüzünde belirdikten tamamen sararıncaya kadar devam etmektedir. Fotosentezde olduğu gibi transpirasyonda, yağmurlu günlerde yapılmadığı için hesaplamada dikkate alınmamıştır. Transpirasyon hızının hesaplanmasıyla elde edilecek verim hesaplanabilmektedir.

Burada, buğdayın transpirasyon hızının belirlenmesi için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır (Poluektov, 1991, Bondarenko ve ark., 1982).

$$E = \rho a \int_{o}^{h_L} s_x \; D_q(q_{_L}(T_{_L}) - q_a(T_a))dh \tag{2.31}$$

E: transpirasyon hızı (mm),

D_q: nem iletim katsayısı,

q_L; yaprak ortamındaki nispi nem,

q_a: havanın nispi nemi,

T_L; yaprak sıcaklığı,

T_a: hava sıcaklığı

ρa: havanın yoğunluğu ($1.2*10^{-3}$ gr.cm^{-3})

L: yaprak alanı indeksi.

Yukarıdaki (2.2.1.1.) temel modelinde $S_{(x)}$ değeri yüksekliğe göre spesifik yaprak yoğunluğudur. Bu değerin toprak yüzeyinden (x=0), bitki boyuna kadar (h_L) integrali, yaprak alan indeksini vermektedir.

$$L = \int_{o}^{h_L} S_{(x)} dx \tag{2.32}$$

S_x: h_L yüksekliğinde dikkate alınan yaprak alan indeksi

h_L: yüksekliğinde yaprak alan indeksi (L);

Son durumu yeniden dikkate alırsak eşitlik (2.2.1.1.) aşağıdaki biçime dönüşmektedir.

$$E = D_q * (q_L(T_L) - q_a(T_a)) * L * pa \tag{2.33}$$

Yaprak sıcaklığı (T_L)'nin hesaplanması için aşağıdaki yaklaşım benimsenmiştir.

Bilindiği üzere, toprak yüzeyi, bitki ve atmosfer arasında kısa zaman diliminde konveksiyon akımı ile önce toprak-bitki daha sonra bitki ile atmosfer veya tersi yolla dengeye ulaşması gerekmektedir. Bunun için aşağıdaki ısı bütçesini yazarsak;

$$\rho_a.CpD_T(T_s - T_L) = \rho a.Cp(T_L - T_a) \tag{2.34}$$

Eşitlik (2.2.4)'den T_L'yi çekersek aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$T_L = \frac{D_q * T_s + D_T * T_a}{D_q + D_T} \tag{2.35}$$

T_s: toprak sıcaklığı

D_T: ısı iletim katsayısı.

Yaprak ortamındaki nispi nemin (q_L) hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$q_L(T_L) = 3{,}79 * 10^{-3} * \exp\left(\frac{17.1 * T_L}{235 + T_L}\right) \tag{2.36}$$

Havanın nispi neminin (q_a) hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$q_a(T_a) = 3.79 * 10^{-3} * \exp(\frac{17.1 * T_a}{235 + T_a}) \tag{2.37}$$

Nem iletim katsayısının (D_q) hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır (Poluektov, 1991).

$$D_q = \frac{D_T}{1 + R_{st} * D_T} \tag{2.38}$$

R_{st}: bitki stoma direnci ($s.cm^{-1}$).

Isı iletim katsayısının (D_T) hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$D_T = \frac{1}{C_u} * \sqrt{\frac{u}{L_0}} \tag{2.39}$$

u: rüzgar hızı ($m.s^{-1}$),

C_u: sabite,

L_0; karakteristik yaprak boyutu.

Yukarıdaki temel ilişkileri kapsayan meteoroloji, toprak ve bitkisel verilerin kullanılması ile başlangıçta örneğin TDR aleti ile ölçülmüş toprak su içeriğinin zaman ve mekan anlamında dinamiği hakkında hesaplamalar yapılmaktadır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Araştırmada Kullanılan TDR Aleti

Toprak su içeriklerinin ölçülmesinde Field Scout 300 TDR (Time Domain Reflectometry) aleti kullanılmıştır (Şekil 3.1). Aletin ölçüm parametresi hacimsel su içeriği cinsindendir. Aletin bilgisayara ve GPS'e bağlanma özelliği bulunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde TDR, araziden alınan verilerin bilgisayar ortamına aktarımına olanak sağlamaktadır. GPS özelliği ise TDR'a ölçüm yapılan noktaların koordinatlarının belirlenmesi özelliğini kazandırmaktadır. Ayrıca alet Kil, Killi tın, Tın tekstür sınıfları olmak üzere, bitki için yararlı su içeriği hesaplaması yapabilmektedir. Herhangi bir özel toprak için alet bilgisayara bağlanarak yarayışlı su hesaplamaları için alete tarla kapasitesi ve solma noktası değerleri girilebilmektedir. Aletin toprak suyu ölçümü için kullanılan 12 ve 20 cm olmak üzere iki farklı boyda probu bulunmaktadır. Aletin bu özelliği tarlada ve saksı ortamında kullanımını mümkün kılmaktadır.



Şekil 3.1. Araştırmada kullanılan Field Scout 300 TDR aleti

3.2. Çalışmada Kullanılan Deneme Toprağının Özellikleri

Yürütülen çalışmada, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi deneme alanlarında yer alan Arıklı (C), Menzilat (CL), Konaktaş (SiC ve SCL) serileri ve Karataş ilçesinde sahil civarında bulunan yaygın kaba bünyeli Baharlı (S ve SL) serisinden örnekler alınmış ve arazide gerçek zaman dilimlerinde ölçümler yapılmıştır. Tın tekstürlü (L) toprak ise Konaktaş ve Baharlı serisine ait toprakların bir karışımı ile oluşturulmuştur. Bu toprak örnekleri ile laboratuar çalışmaları yürütülmüştür. Aşağıda araştırmada kullanılan toprakların alındıkları serilerin temel özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

Baharlı serisi

Kıyı kumulları üzerinde gelişen bu topraklar, kaba tekstürlü ve AC horizonludur. Zayıf gelişmiş yüzey horizonlarına sahiptir. A ve C horizonları teksel olan Baharlı serisi topraklarının yüzey horizonlarında çok zayıf yarı köşeli blok strüktür gelişebilmiştir. Tüm profilleri kireçli olan bu toprakların renkleri, yüzeyde koyu grimsi kahve, yüzey altında ise sarımsı kahvedir (Schlichting,1989).

Arıklı Serisi

Eski nehir teraslarının aluviyal depositleri üzerinde gelişen bu seri toprakları, oldukça yüksek kil içeriğine sahiptir. Kil içeriğine bağlı olarak kurak mevsimlerde en az 1 cm genişliğinde, derinliği 1 m'ye ulaşan çatlaklar oluşmaktadır. AC horizonlu olan bu topraklar yüksek oranda kireç içermektedir. Profillerinde azda olsa kireç hareketi görülmektedir. Yüzey horizonlarında köşeli blok strüktür gelişmesine karşın yüzey altı horizonları masiftir. Renkleri yüzeyde grimsi kahve, yüzey altında ise Zeytuni kahvedir. Aynı fizyoğrafik ünitede yeralan Arpacı ve Mürsel serilerinden renk ve kil içeriğinin farklı olması ve derin çatlaklar oluşturmasıyla ayrılırlar (Schlichting,1989).

Menzilat Serisi

Bu seriye giren topraklar, Seyhan nehri yan derelerinin getirdiği çok genç aluviyal depozitlerden oluşmuş Entisol'lerdir. Hemen hemen düz ve düze yakın topografyalarda yer alırlar. Solumları, muhtelif derinliklerdeki çakıl depozitleri

tarafından kesilir. Bununla birlikte solumun kalınlığı orta derin ve derindir. Renkleri, kahve-soluk kahve arasında değişir. Bütün profilde kireç miktarı çok yüksektir. Bünyeleri kumlu tınlı ve tınlıdır (Schlichting,1989).

Konaktaş Serisi

Bu seriye giren topraklar, konglomera üzerinde oluşmuş Entisol'lerdir. Genellikle eğimli fazla eğimli teras yamaçlarında yer alırlar. Aşırı erozyon zararı, orijinal toprak profilinin aşınıp, taşınmasına sebep olmuştur. Ana materyal tamamen yüzeyde veya yüzeye yakın bulunmaktadır. Çok az toprak materyali ihtiva ederler Satıh ve profilleri fazla çakıllıdır. Bünyeleri killi tınlı, tınlıdır. Kahve ve soluk kahve renklidirler. Kireççe daima zengin bulunurlar (Schlichting,1989).

3.2.1. TDR Aletinin Kalibrasyonunda Uygulanan Yöntem

Araziden getirilen topraklar kurutulduktan sonra 4mm lik elekten geçirilerek, arazideki doğal bozulmamış durumdaki hacim ağırlıklarına uygun şekilde 49,5x33,5x23,0 cm ebatlarında plastik kasalara yerleştirilmiştir. Daha sonra kasa içerisindeki topraklar, su dolu küvetlere bırakılarak alttan doyurulmaya bırakılmıştır. Örnekler tamamen suyla doyurulduktan sonra, küvetler içerisinden çıkarılarak, doygunluktan itibaren üçer tekerrürle, TDR aleti ile ve paralelinde gravimetrik ölçümler alınarak kalibrasyon çalışması yürütülmüştür. Ölçümler doygunluktan itibaren düşen nem düzeylerinde farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir.

3.3. Araştırmada Kullanılan Toprakların Fiziksel Özelliklerinin Saptanması

3.3.1. Hacim Ağırlığı

Hacmi 100 cm^3 olan çelik silindirlerle alınan bozulmamış toprak örnekleri etüvde 105˚C'de 24 saat kurutulup, fırın kuru toprağın ağırlığı toplam silindir hacmine bölünerek bulunmuştur (Blake ve Hartge, 1986).

3.3.2. Hidrolik İletkenlik

Örneklerin hidrolik iletkenlikleri düşen yük metoduna göre saptanmıştır. 100 cm^3 çelik silindirde alınan bozulmamış toprak örneği saf suyla doyurulduktan sonra çelik silindirin alt ve üst kısımlarına contalı kapaklar yerleştirilmiştir. Contalı

kapakların ortasına su hortumları takılacak şekilde borular yerleştirilmiştir. 100 cm^3 büret saf su ile doldurularak ve büretin alt ucuna geçirilen hortumun havası alınarak çelik silindirin alt kapağına takılmış ve büret suyun geçmesi için açılmıştır. Üst kapağa bir hortum takılarak boş bir kaba yerleştirilmiş ve bir süre sonra üst hortumdan su kaba gelmeye başlamış ve zaman tekrar belirlenmiştir. Bu işlemlerden sonra K=(a*L/A*t)*Ln (H1/H2) formülüyle iletkenlik hesaplanmıştır (cm/saat). Yukarıdaki eşitlikte; a:pipet alanı, l:çelik silindirin boyu, A:toprak kesit alanı, t:zaman, H1:pipet su yüksekliği, H2: düşen su yüksekliği (Klute ve Dirksen, 1986).

3.3.3. Tekstür (Bünye) Tayini

Bouyucos hidrometre yöntemi ile yapılmıştır (Bouyoucos, 1951). 50 gr hava kuru toprak alınarak 250 mililitre'lik bir behere konulup üzerine 10 ml kalgon çözeltisi ilave edilmiştir. Saf suyla 150 ml ye tamamlanarak cam çubuk ile karıştırılmış ve bir gece beklemeye bırakılmış ve daha sonra karıştırma aletine aktarılarak ve 10 dakika karıştırılmıştır. Örnek 1 lt'lik silindire alınmış ve saf su ile hacim bir litreye tamamlanmıştır. Delikli disk ile örnek 20 defa karıştırılarak ve zaman tespit edilmiştir. 20 sn sonra hidrometre yavaşça örneğe yerleştirilmiş ve 40. sn yede hidrometre okuması yapılarak ve sıcaklık tespit edilmiştir. 2 saat sonra tekrar hidrometre okuması ve sıcaklık tespiti yapılmıştır. Hidrometre okumalarının düzeltilmesiyle elde edilen değerlerden %silt, %kum ve %kil hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen yüzde değerlerin tekstür üçgeninde yerine koyulması ile toprak tekstür sınıfları saptanmıştır.

Çizelge. 3.1. Denemede kullanılan toprakların hacim ağırlığı, tekstür ve hidrolik iletkenlik değerleri

Tekstür Sınıfı	Hacim ağırlığı (gr/cm^3)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	Hidrolik iletkenlik ($cm.sa^{-1}$)
SCL	1,40	51,19	22,97	25,84	0,74
SiC	1,18	18,87	43,42	37,71	0,25
S	1,67	93,41	1,07	5,52	4,95
SL	1,58	80,81	7,39	11,80	4,88
CL	1,53	33,40	29,60	37,00	0,10
C	1,26	25,41	28,76	45,83	0,15
L	1,30	45,50	32,38	22,12	1,02

3.3.4. Toprak Su Karakteristikleri

Bozulmamış toprak örneklerinde, doygunluk ile 1 bar arasındaki değişik gerilimlerde tutabildikleri hacimsel su içeriğini gösteren toprak suyu karakteristikleri saptanmıştır. Basınçlı plaka aletinde toprak suyu gerilimleri, doygunluktan başlayarak 0.1, 0.33, 1.0 bar şeklinde uygulanmış, her bir toprak suyu geriliminde tutulan hacimsel su içerikleri üç tekerrürün ortalaması olarak bulunmuştur. Yine aynı şekilde bozulmuş toprak örneklerinde ise 5 ve 15 bar gerilimleri uygulanmış ve bu gerilimlerde tutulan hacimsel su içerikleri üç tekerrürün ortalaması olarak bulunmuştur (Klute, 1986).

Çizelge 3.2. Denemde kullanılan toprakların basınç nem değerleri

Tekstür Sınıfı	0.001 (bar)	0,1 (bar)	0,333 (bar)	1 (bar)	5 (bar)	15 (bar)
SCL	43,86	26,75	19,58	16,43	14,01	11,90
SiC	56,57	37,42	31,59	22,56	19,02	17,04
S	42,73	7,93	6,66	5,22	4,02	3,26
SL	43,57	22,42	19,07	15,90	10,91	6,86
CL	46,54	35,29	31,67	29,42	26,89	22,36
C	57,62	39,43	36,37	32,53	28,65	23,77
L	44,21	29,41	23,25	16,03	14,24	10,90

3.3.5. Gözeneklilik

Toprakta bulunan gözenek miktarı, toprak su karakteristiklerinde (TSK) bulunan değerlerden hesaplanmıştır. Doygunluktaki su hacmi toplam gözenekliliği verirken, mikro gözenek hacmini 0.333 bar (Tarla Kapasitesi) da tutulan su miktarından hesap edilmiştir. Makro gözenek hacmini ise, toplam gözenek miktarından mikro gözenek miktarının çıkarılmasıyla bulunmuştur (Danielson ve Sutherland, 1986).

Çizelge 3.3. Denemede kullanılan toprakların gözeneklilik değerleri

Tekstür Sınıfı	Toplam gözeneklilik (%)	Mikro gözeneklilik (%)	Makro gözeneklilik (%)
SCL	43,86	19,58	24,28
SiC	56,57	31,59	24,98
S	42,73	6,66	36,07
SL	43,57	19,07	24,50
CL	46,54	31,67	14,87
C	57,62	36,37	21,25
L	44,21	23,25	20,96

3.4. Kimyasal Özellikler

3.4.1. Kireç ($CaCO_3$)

Asit ile muamele edilen topraktan çıkan CO_2' in ölçülmesi esasına dayanan Scheibler kalsimetresi ile belirlenmiştir (Schlichting ve Blume, 1966).

3.4.2. Tuz Yüzdesi

Saturasyon ekstraktında, elektrikli kondaktivitimetre aleti ile ölçülmüştür (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

3.4.3. Toprak Reaksiyonu (pH)

Saturasyon ekstraktında, cam elektrotlu pH-metre aleti kullanılarak ölçülmüştür (Schlichting ve Blume, 1966).

Çizelge 3.4. Denemede kullanılan toprakların % kireç, pH ve % tuz değerleri

Tekstür Sınıfı	$CaCO_3$ (%)	pH (1:1)	Tuz (%)
SCL	23,95	7,69	0,035
SiC	34,16	7,78	0,060
S	15,96	8,02	0,009
SL	18,52	7,75	0,052
CL	31,13	7,73	0,059
C	22,19	7,77	0,065
L	11,49	6,86	0,042

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Örneklerin hacim ağırlıkları dikkate alınarak temel fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Örnekler alındıkları yerdeki hacim ağırlıklarına uygun olacak şekilde 49,5x34x23 cm ebatlarındaki plastik kasalara konulmuştur ve daha sonra örnekler su dolu küvetler içerisine yerleştirilerek örneklerin su ile doyurulmaları sağlanmıştır. Kasalar içerisindeki örnekler tamamen suyla doyurulduktan sonra, örneklerde doygunluktan itibaren düşen nem düzeylerine doğru başlayarak üç tekerrürlü TDR ölçümleri ve paralelinde gravimetrik örnekler alınarak kalibrasyon çalışması yürütülmüştür.

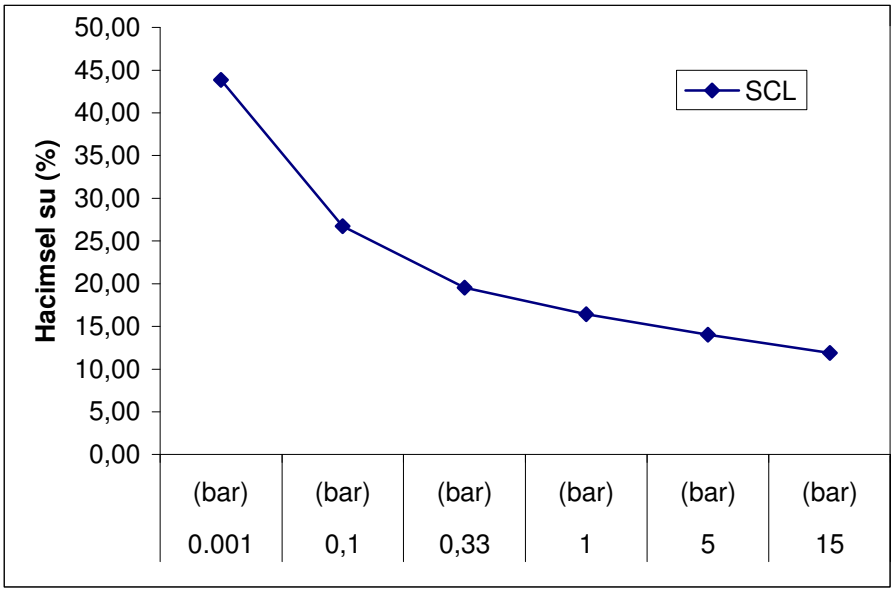
Araştırmada aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Araştırmadan elde edilen veriler aletin ölçümünün toprak tekstüründen önemli derecede etkilendiğini göstermiştir. Her bir tekstür sınıfı için farklı kalibrasyon ilişkileri elde edilmiştir. Toprakta kil içeriğinin artışı gerçek ölçüme göre TDR ölçümünü oldukça yükseltmektedir. Bu durum literatürden elde edilen bilgilere göre spesifik kil yüzeyinin artışına bağlı olarak hapsedilmiş su oranındaki artışla ifade edilmektedir (Ponizovsky ve ark., 1999). Ayrıca killi toprak kurudukça oluşan çatlaklar arasındaki boşlukların da aletin ölçümünü etkilediği düşünülebilir. Aletin çalışması kil içeriğinin yanı sıra topraktaki organik madde içeriği, tuz konsantrasyonu, toprak sıcaklığı ve aletin kablo uzunluğu, probun geometrik yapısı ve uzunluğu gibi kendi teknik özelliklerine de bağlı olduğu literatürde bildirilmektedir (Corvin, 2005). Araştırmada kullanılan toprakların organik madde içeriklerinin düşük ve tuz konsantrasyonlarının ise normal değerlerde olduğu belirlenmiştir.

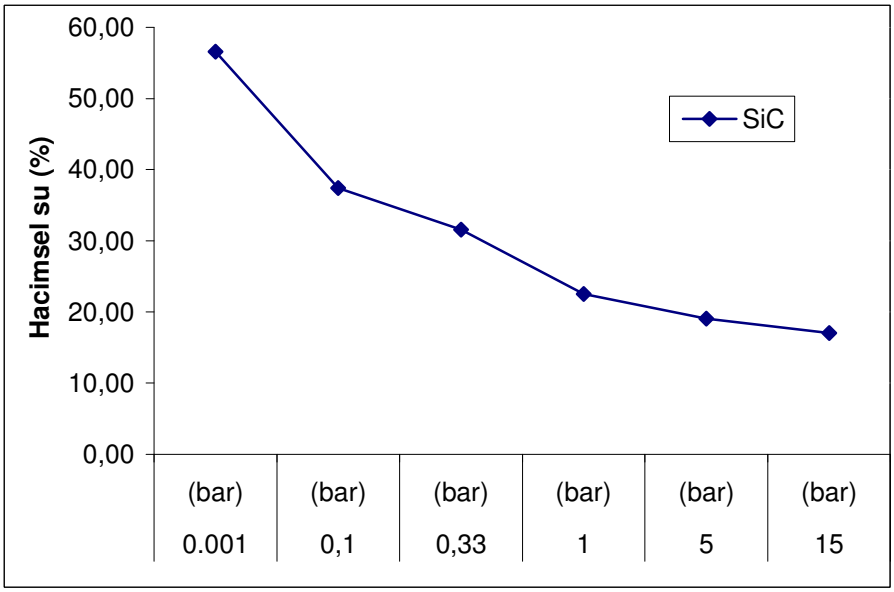
Topraklarda yarayışlı su seviyelerinin belirlenmesi ve özellikle bu konu ile ilgili geliştirilecek paket program için toprakların toprak su karakteristik eğrilerine (TSK) ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için her serinin toprak TSK eğrileri çizelge 3.2' deki verilerden yararlanarak ortaya konulmuştur. Söz konusu bilgilerin (özellikle, tarla kapasitesi (TK) ve solma noktası (SN)) literatürlerle uyumlu olup olmadığının bilinmesi için gereklidir. Çünkü kalibrasyon için ortamda sistematik hata kaynağı varsa (topraklarda sıkışma dururumu, aniden değişen tekstür, iç bükeylik v. b.), söz

konusu durumlar TSK eğrilerinden belirlenebilmektedir. Bu nedenle her bir toprağın TSK eğrileri sırasıyla aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.1'den 4.7'ye).

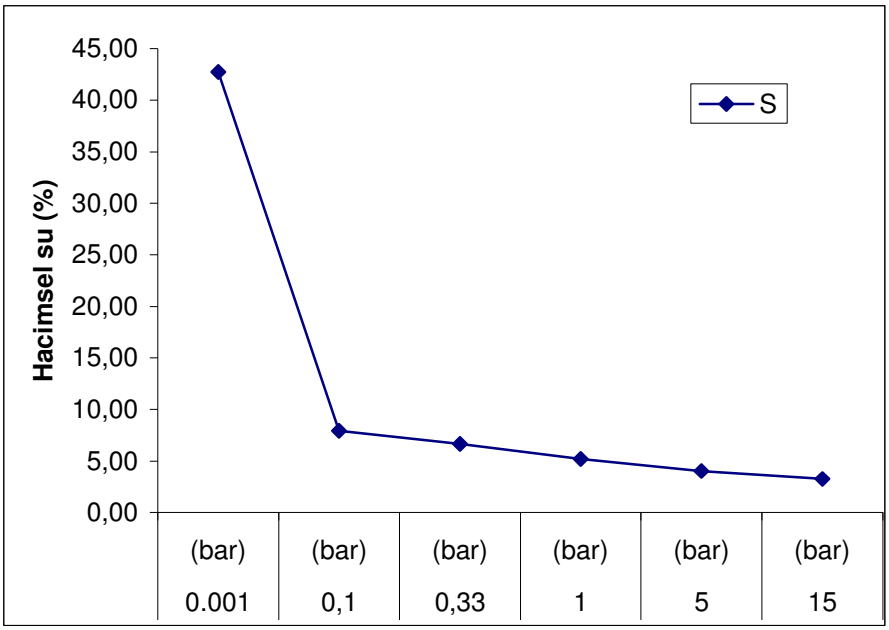
Aşağıdaki şekillerde her bir tekstür sınıfına ait toprakların Toprak Su Tutma Karakteristik (TSK) eğrileri verilmiştir.



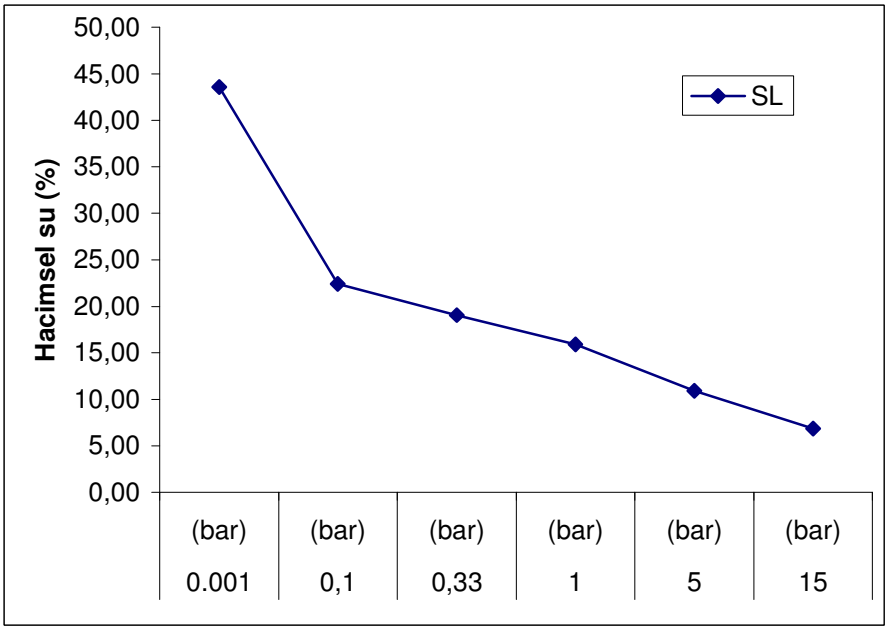
Şekil 4.1. Kumlu killi tın (SCL) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi



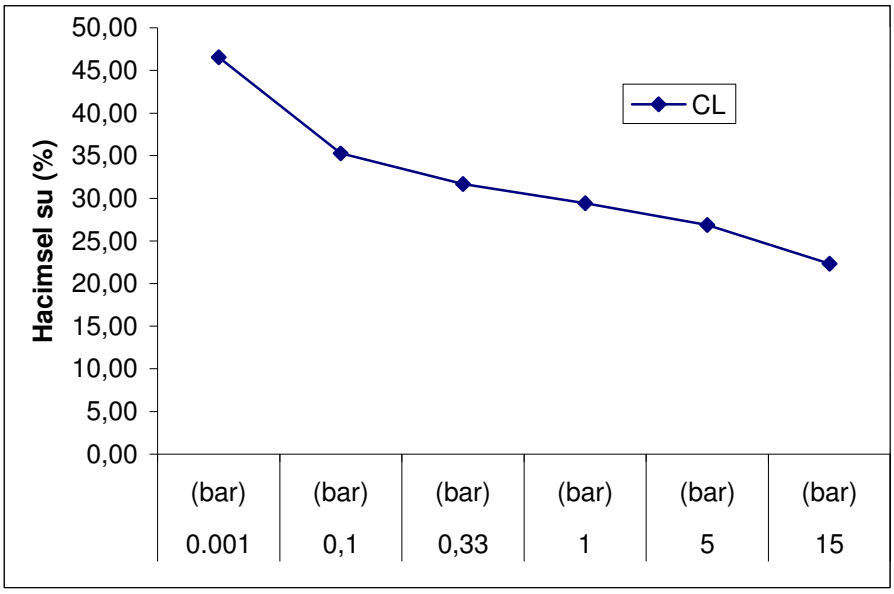
Şekil 4.2. Siltli kil (SiC) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi



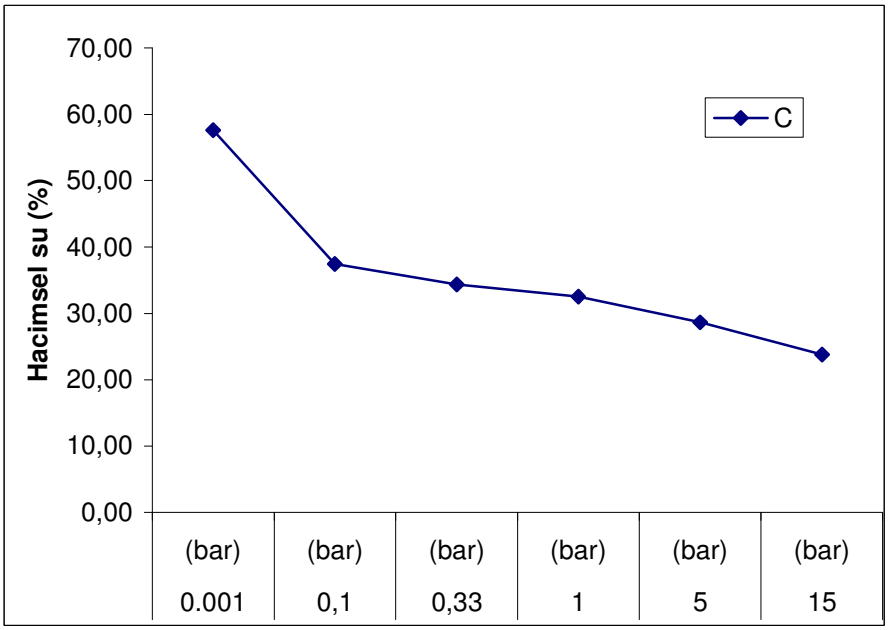
Şekil 4.3. Kum (S) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi



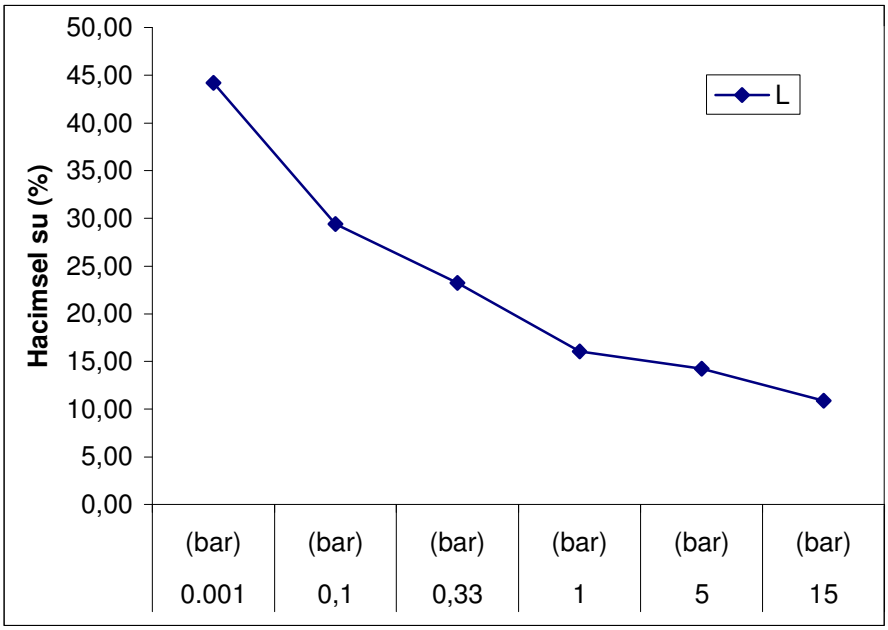
Şekil 4.4. Kumlu tın (SL) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi



Şekil 4.5. Killi tın (CL) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi



Şekil 4.6. Kil (C) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi



Şekil 4.7. Tın (L) tekstürlü toprağa ait TSK eğrisi

Yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi araştırmaya tabi olan toprakların TSK verilerinde sistematik hataya yol açacak durumlar (sıkışma, iç bükeylik, ani tekstür değişimi v.b) söz konusu olmamaktadır. Ayrıca TSK verileri literatür bilgileriyle uyumlu bulunmuştur.

Araştırma sonuçlarını irdelersek, kalibrasyon sürecinde TDR ölçüm değerlerinin tüm tekstür sınıfları için toprakların gerçek su içeriklerine göre daha yüksek değerler verdiği görülmüştür. Düşük nem içeklerinde TDR ve gerçek su içerikleri değerleri arasında iyi bir trend izlenirken nem içeriğinin artışı ile TDR değerlerinin gerçek su içeriği değerlerinden uzaklaştığı tüm tekstür sınıflarına ait genel TDR ve gerçek su içerikleri arasındaki ilişkiyi gösteren Şekil 4.23'de açıkça görülmektedir. TDR ve gerçek su içerikleri arasındaki trend kaba bünyeli topraklarda daha uyumlu seyrederken killi topraklarda bu trend TDR ölçümlerinin daha yüksek seyretmesi nedeniyle uyumsuz gerçekleşmiştir.

Her bir toprak serisi için belirlenen ve ölçülen TDR ve gerçek hacimsel su içerikleri değerleri aşağıdaki Çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kumlu killi tın (SCL) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri

Kumlu killi tın(SCL)				
TDR ile ölçülen hacimsel su içeriği (%)	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	Doygunluk değeri (%)	Tarla kapasitesi değeri (%)	Solma noktası değeri (%)
89	44,95	43,86	19,58	11,90
87	44,95			
86	42,86			
56	26,97			
56	26,76			
55	25,66			
35	20,52			
34	19,94			
34	19,17			
34	16,28			
34	16,23			
33	15,01			
18	14,93			
18	14,43			
18	13,29			
9	5,84			
8	5,83			
8	5,68			

Çizelge 4.2. Siltli kil (SiC) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri

Siltli kil (SiC)				
TDR ile ölçülen hacimsel su içeriği (%)	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	Doygunluk değeri (%)	Tarla kapasitesi değeri (%)	Solma noktası değeri (%)
61	31,79	56,57	31,59	17,04
61	31,33			
61	29,76			
50	24,30			
49	23,08			
43	22,78			
35	19,69			
34	19,04			
33	16,44			
33	15,85			
31	15,78			
31	15,39			
21	11,02			
21	9,81			
21	8,62			
8	1,05			
9	1,05			
9	1,04			

Çizelge 4.3. Kum (S) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri

Kum (S)				
TDR ile ölçülen hacimsel su içeriği (%)	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	Doygunluk değeri (%)	Tarla kapasitesi değeri (%)	Solma noktası değeri (%)
52	38,17	42,73	6,66	3,26
50	37,54			
49	36,39			
17	11,10			
16	10,98			
16	10,79			
15	9,48			
15	9,14			
14	9,04			
14	8,27			
14	8,26			
13	8,21			
11	7,27			
11	7,10			
11	6,84			
10	6,02			
10	6,02			
10	5,58			

Çizelge 4.4. Kumlu tın (SL) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri

Kumlu tın (SL)				
TDR ile ölçülen hacimsel su içeriği (%)	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	Doygunluk değeri (%)	Tarla kapasitesi değeri (%)	Solma noktası değeri (%)
93	40,99	43,57	19,07	6,86
89	40,67			
38	19,51			
38	19,51			
37	19,21			
22	19,09			
21	18,65			
21	18,28			
21	10,31			
19	10,23			
18	9,56			
18	8,89			
17	8,71			
17	8,06			
20	7,95			
19	7,88			
17	7,68			
11	7,27			
11	7,19			
11	7,18			
5	2,71			
5	2,70			
5	2,69			

Çizelge 4.5. Killi tın (CL) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri

Killi tın (CL)				
TDR ile ölçülen hacimsel su içeriği (%)	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	Doygunluk değeri (%)	Tarla kapasitesi değeri (%)	Solma noktası değeri (%)
96	55,86	46,54	31,67	22,36
96	55,59			
95	55,35			
56	32,78			
56	32,37			
54	32,26			
56	30,43			
52	30,39			
49	29,20			
47	25,93			
46	25,19			
44	24,32			
47	21,76			
45	21,58			
44	21,32			
27	14,72			
26	11,60			
25	10,25			
10	7,54			
10	7,50			
10	7,46			

Çizelge 4.6. Kil (C) tekstürlü toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri

Kil (C)				
TDR ile ölçülen hacimsel su içeriği (%)	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	Doygunluk değeri (%)	Tarla kapasitesi değeri (%)	Solma noktası değeri (%)
75	33,25	57,62	36,37	23,77
73	33,22			
73	33,11			
63	32,72			
63	32,35			
62	32,20			
62	21,52			
61	21,46			
61	20,92			
37	18,13			
35	17,96			
34	17,82			
9	8,80			
9	8,73			
8	8,71			
9	8,80			
9	8,73			
8	8,71			

Çizelge 4.7. Tın tekstürlü (L) toprağa ait TDR ile ölçülen ve gerçek hacimsel su içerikleri, doygunluk, tarla kapasitesi, solma noktası hacimsel esasa göre % değerleri

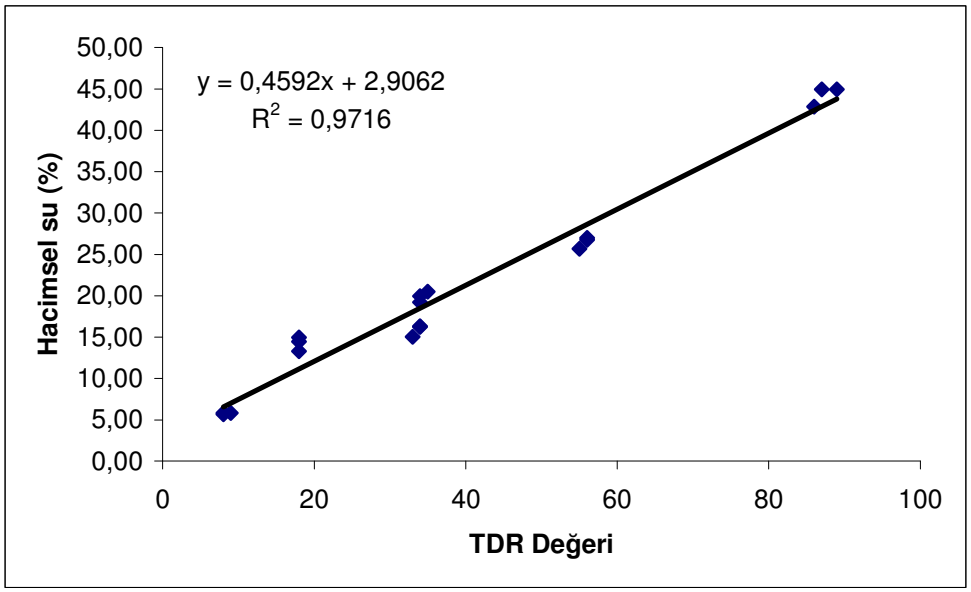
Tın (L)				
TDR ile ölçülen hacimsel su içeriği (%)	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	Doygunluk değeri (%)	Tarla kapasitesi değeri (%)	Solma noktası değeri (%)
87	47,61	44,21	23,25	10,90
86	47,56			
86	46,94			
49	30,32			
47	28,02			
45	27,69			
40	24,27			
38	23,95			
38	23,84			
29	18,14			
28	16,67			
27	16,38			
17	12,44			
17	12,42			
16	12,18			
13	8,48			
12	8,43			
12	7,28			

Yukarıdaki veriler Excel paket programı ile incelenerek her bir tekstüre ait kalibrasyon ilişkileri, eğim çizgileri ve uyum trendi ilişkileri irdelenmiştir.

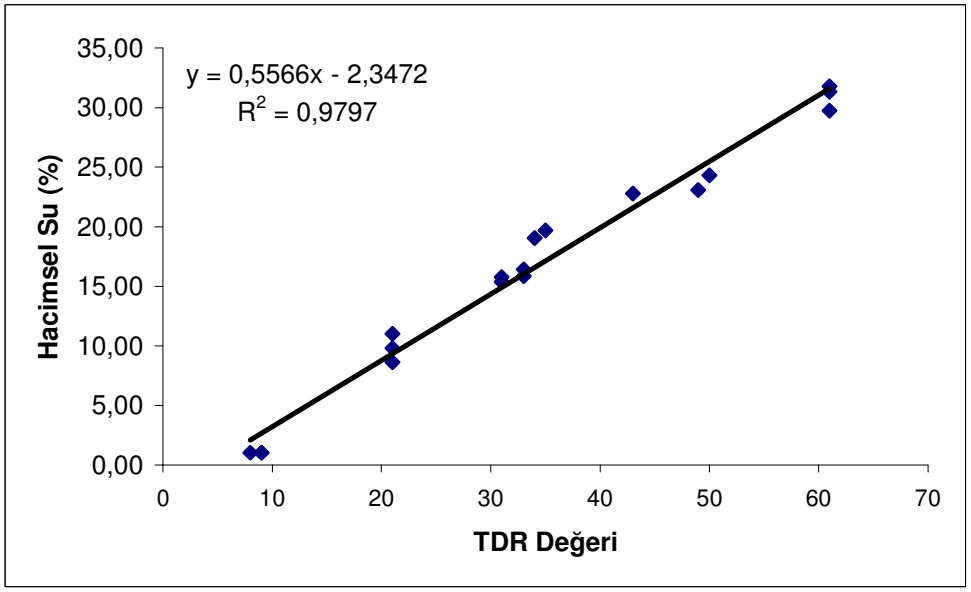
4.1. Araştırmada kullanılan topraklarda TDR ölçümleri ile gerçek su içerikleri arasındaki eğim grafikleri

Çizelge (4.1–4.7) verileri kullanılarak, her bir toprak tekstür sınıfı için, Excel paket programında TDR ölçümleri ve gerçek su içerikleri arasında eğim çizgileri ve

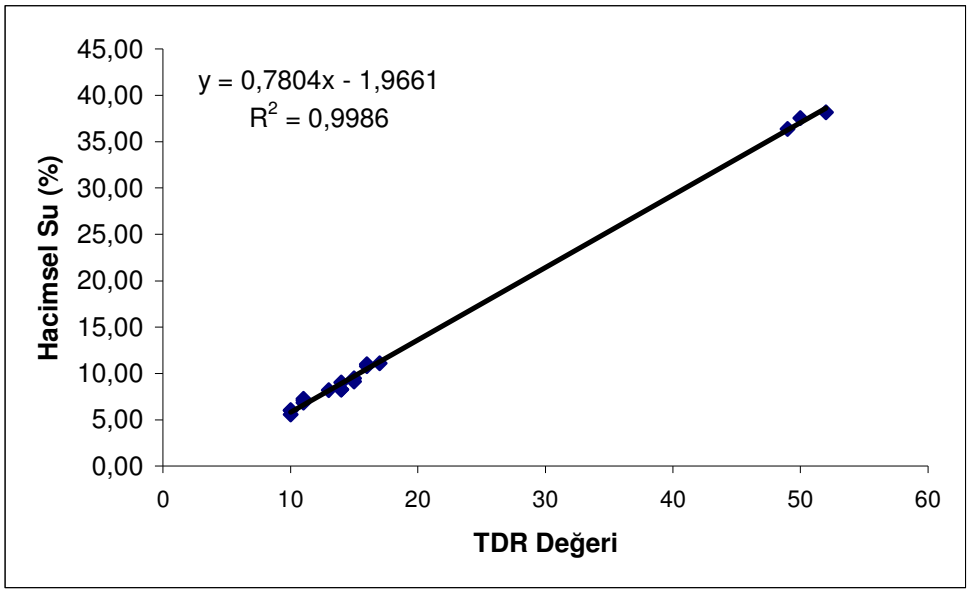
R^2 değerleri aşağıda verilmiştir.



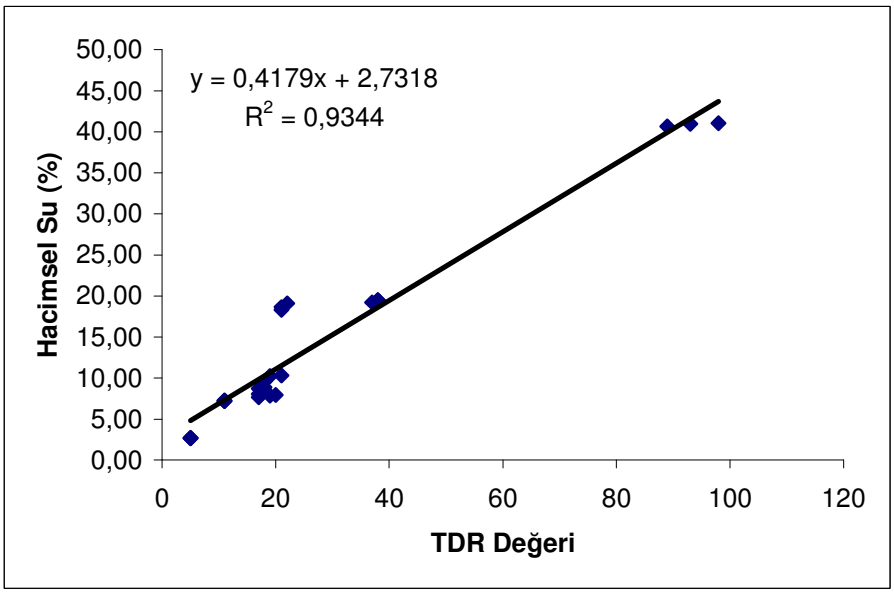
Şekil 4.8. Kumlu killi tın tekstürlü (SCL) toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki



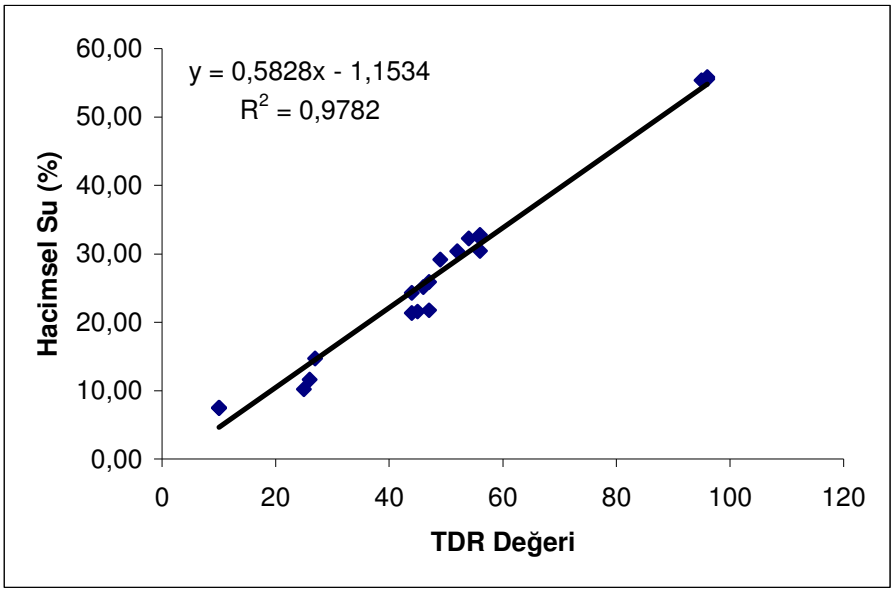
Şekil 4.9. Siltli kil (SiC) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri Hacimsel su içeriği değerleri



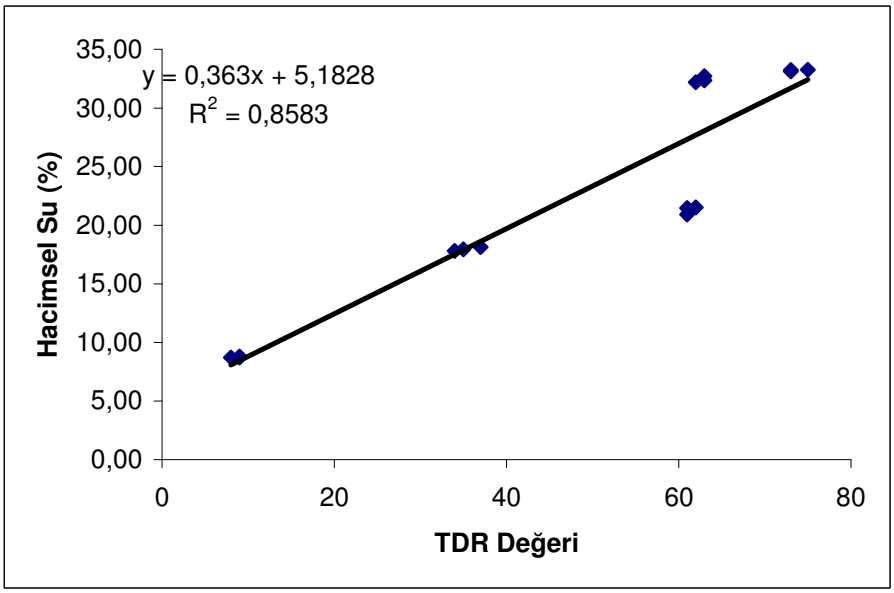
Şekil 4.10. Kum (S) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki



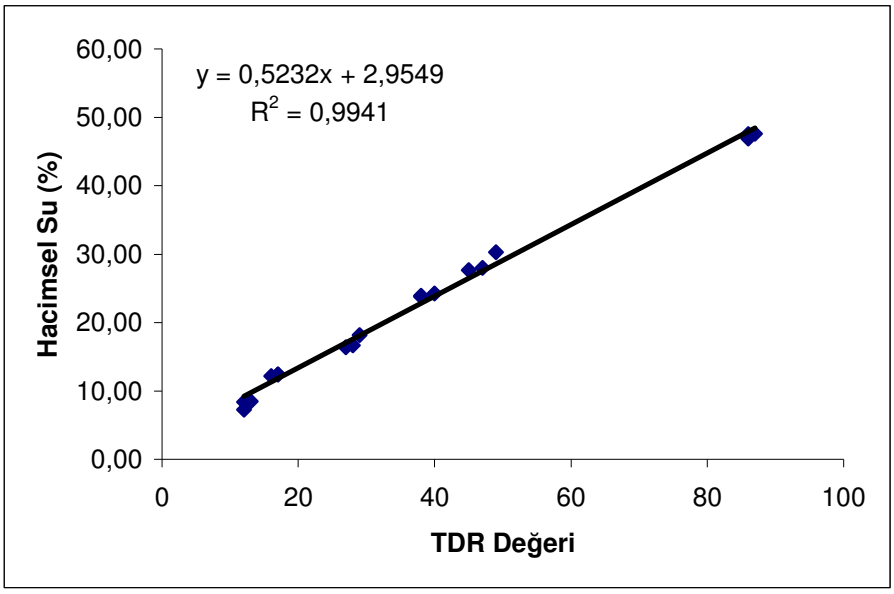
Şekil 4.11. Kumlu tın (SL) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki



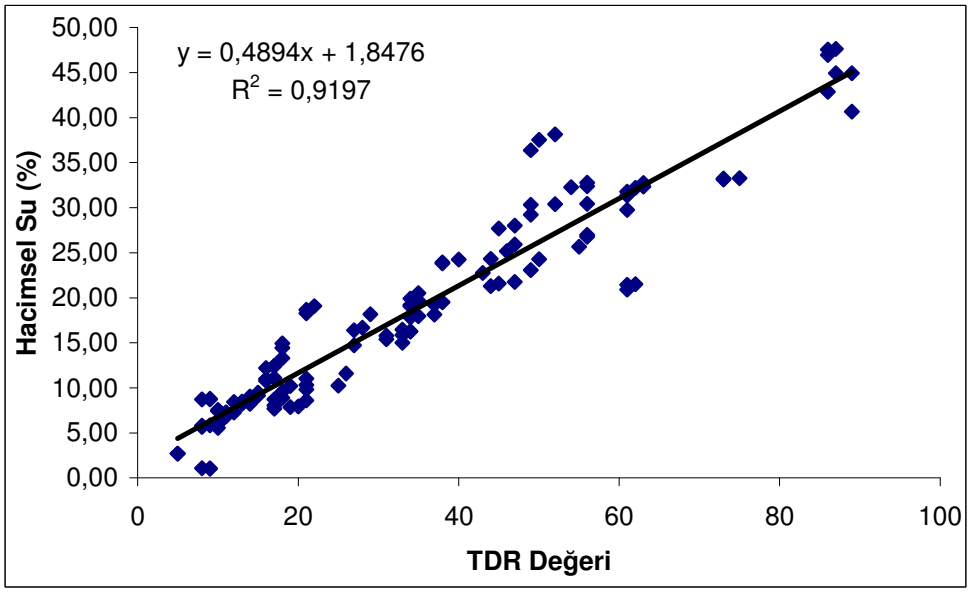
Şekil 4.12. Killi tın (CL) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.13. Kil (C) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.14. Tın (L) tekstürlü toprağa ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.15 Tüm tektür sınıflarına ait TDR değerleri ile Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki ilişki

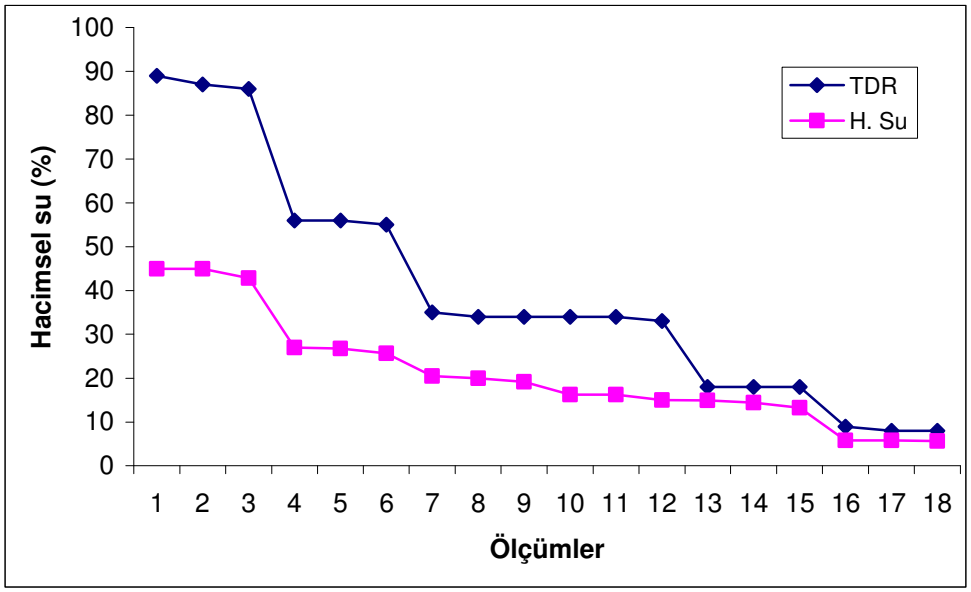
Çizelge 4.8. Çalışmada kullanılan toprak tekstür sınıflarına ait elde edilen kalibrasyon ilişkisi ve R^2 değerleri*

Tekstür sınıfı	Kalibrasyon ilişkisi	R^2 değeri
Kumlu killi tın	y = 0,4592x + 2,9062	0,9716
Siltli kil	y = 0,5566x - 2,3472	0,9797
Kum	y = 0,7804x - 1,9661	0,9986
Kumlu tın	y = 0,4179x + 2,7318	0,9344
Killi tın	y = 0,5828x - 1,1534	0,9782
Kil	y = 0,363x + 5,1828	0,8583
Tın	y = 0,5232x + 2,9549	0,9941

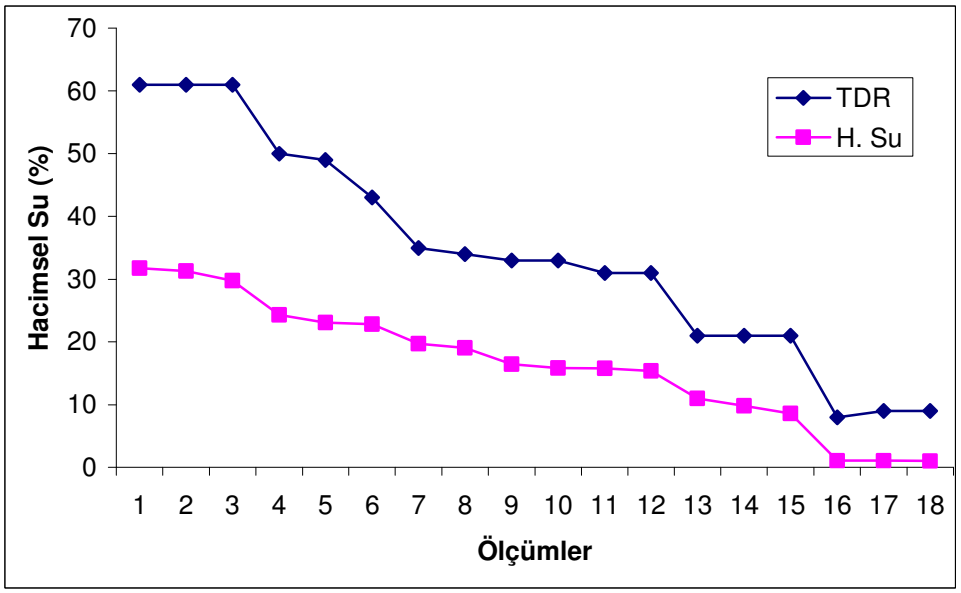
* Eğim çizgisindeki X değerleri TDR göstergesi, Y değeri ise hacimsel su içeriğini ifade etmektedir.

Grafiklerden ve eğim ilişkilerden görüldüğü gibi, toprakta kil içeriğinin artışına bağlı olarak, TDR ölçümleri ile saptanan hacimsel su içerikleri, gerçek su içerikleri arasındaki uyum azalmaktadır (hata payı yükselmektedir).

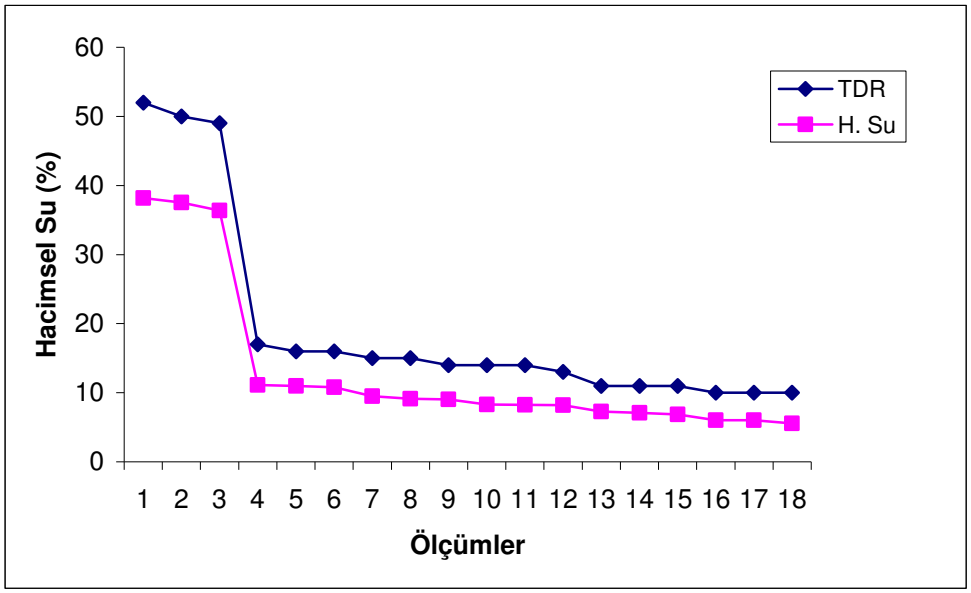
Aşağıdaki şekillerde her bir tekstür sınıfına ait toprak için saptanan TDR ve hacimsel gerçek su içerikleri arasındaki trendler verilmiştir. Genel olarak TDR ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki trendlerde bir uyum gözlenirken toprakta kil içeriğinin artışına bağlı olarak trend çizgileri arasındaki farklar belirgin bir şekilde açılım göstermiştir. Tüm tekstür sınıflarına ait topraklarda yaklaşık olarak örneklerin tarla kapasitesi değerlerine kadar artan toprak suyu düzeylerinde TDR ve gerçek hacimsel su içerikleri değerleri arasında genel olarak bir uyum izlenirken örneklerin tarla kapasitesi değerlerinden doygunluk düzeylerine doğru olan trendler arasında anormal açılımlar gözlenmiştir.



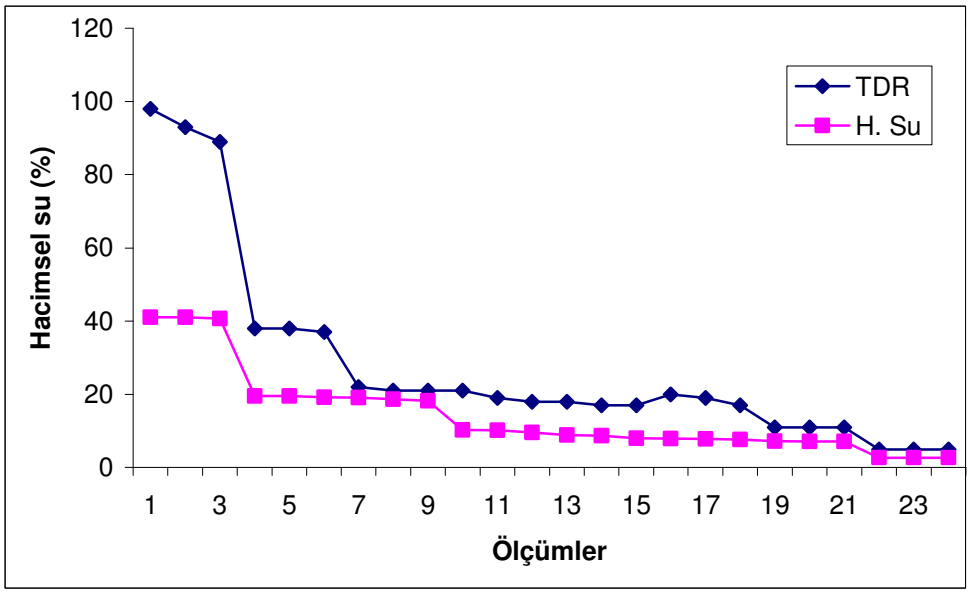
Şekil 4.16. Kumlu killi tın (SCL) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri



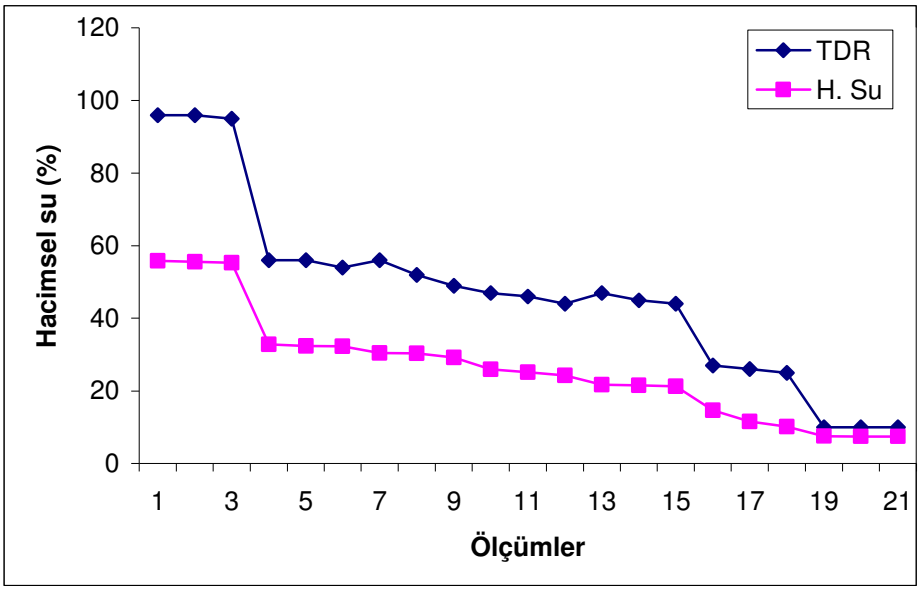
Şekil 4.17. Siltli kil (SiC) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri



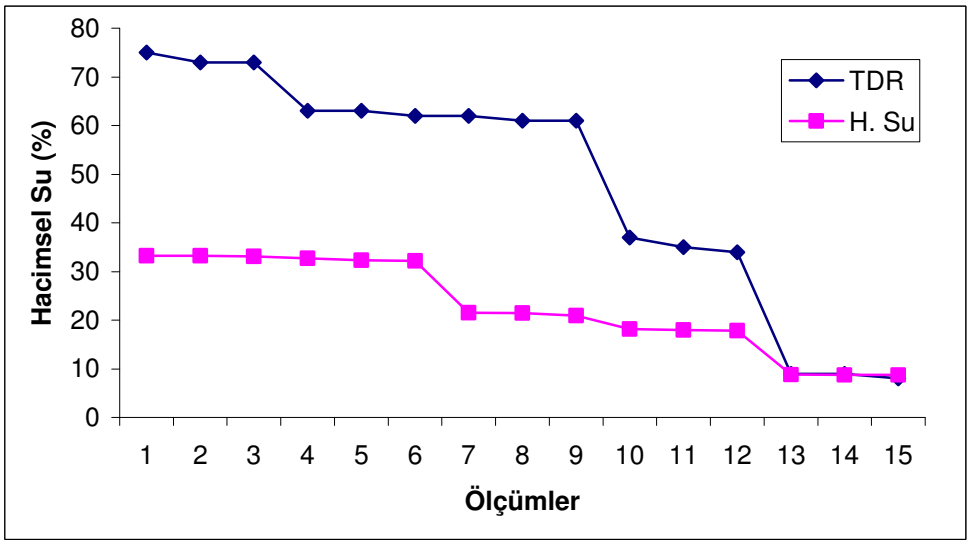
Şekil 4.18. Kum (S) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri



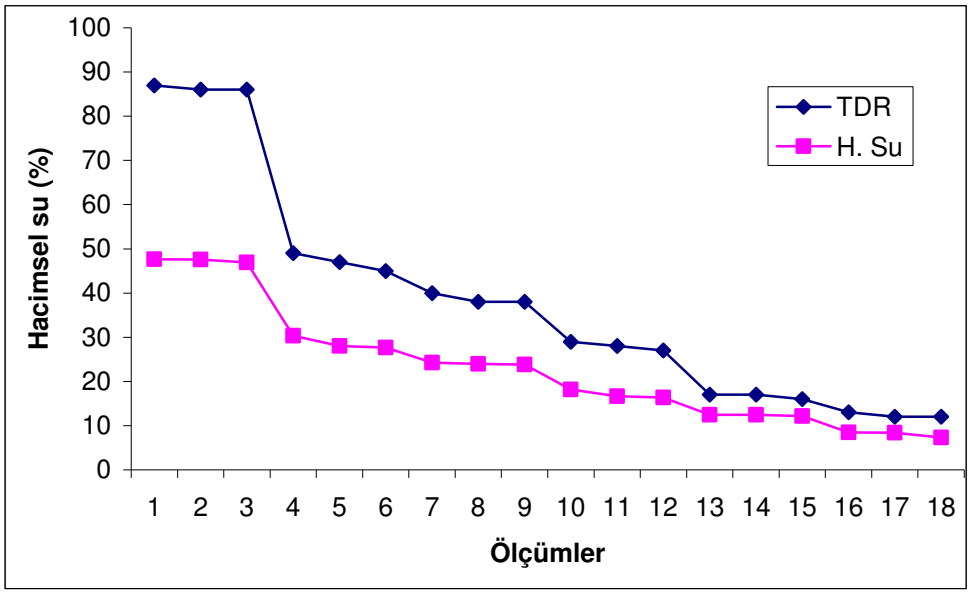
Şekil 4.19. Kumlu tın (SL) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri



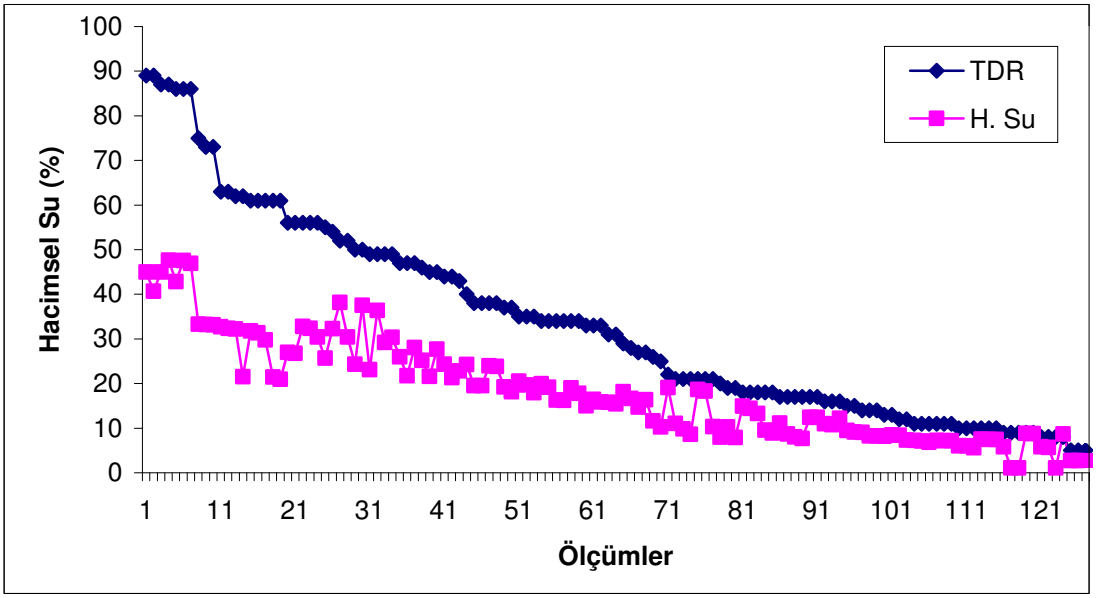
Şekil 4.20. Killi tın (CL) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri



Şekil 4.21. Kil (C) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri



Şekil 4.22. Tın (L) tekstürlü toprağa ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri



Şekil 4.23. Tüm tekstür sınıflarına ait TDR ve Gerçek Hacimsel Su içerikleri değerleri

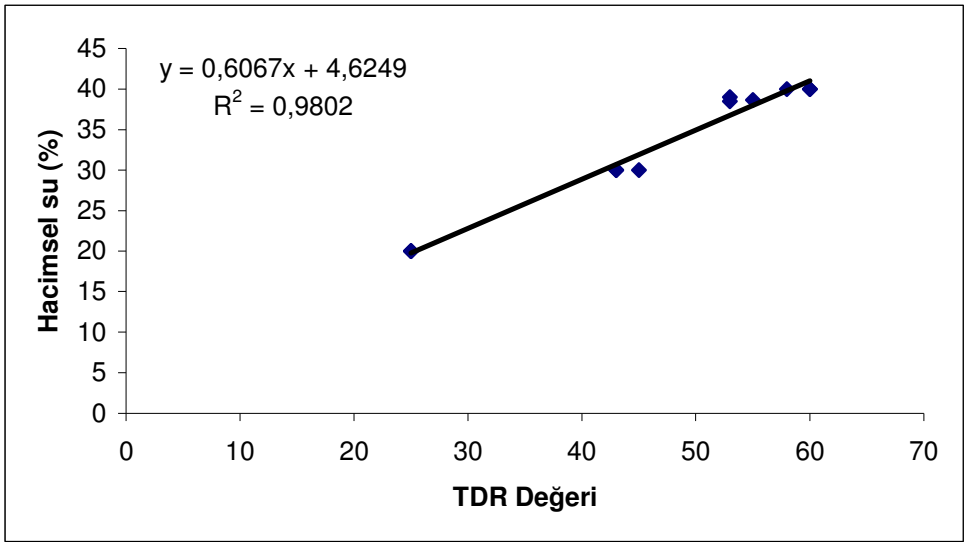
Literatür taramasından ve yukarıdaki araştırma sonuçlarından görüldüğü gibi, topraklarda bünyenin kabadan ince sınıfına doğru değişmesi durumunda, kil yüzdesinin ve kil tipinin TDR ölçümlerini önemli düzeyde etkilediği görülmektedir. Bu nedenle başat kil tipi kaolinit olan killi toprakla (%59,48 kil, %34,24 silt, %6,28 kum) tınlı toprak (%22,12 kil, %32,28 silt, %45,50 kum) karıştırılarak, örneğin kil içerikleri sırasıyla %30, %40 ve %50 artırılmıştır. Denemede örneklere konulan su miktarı bilindiğinden, kil yüzdesinin artışının TDR ölçümleri ile uyumu incelenmiştir. Deneme ortamına %20 (hacimsel olarak) den başlayarak su ilave edilmiştir. Deneme ile ilgili veriler (Çizelge 9 ve10'da) ve grafikler ise (Şekil 4.24–4.27 de) aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.9. TDR kalibrasyonuna kil içeriğinin etkisi üzerine yürütülen denemeye ait TDR ve gerçek hacimsel % su içeriği verileri

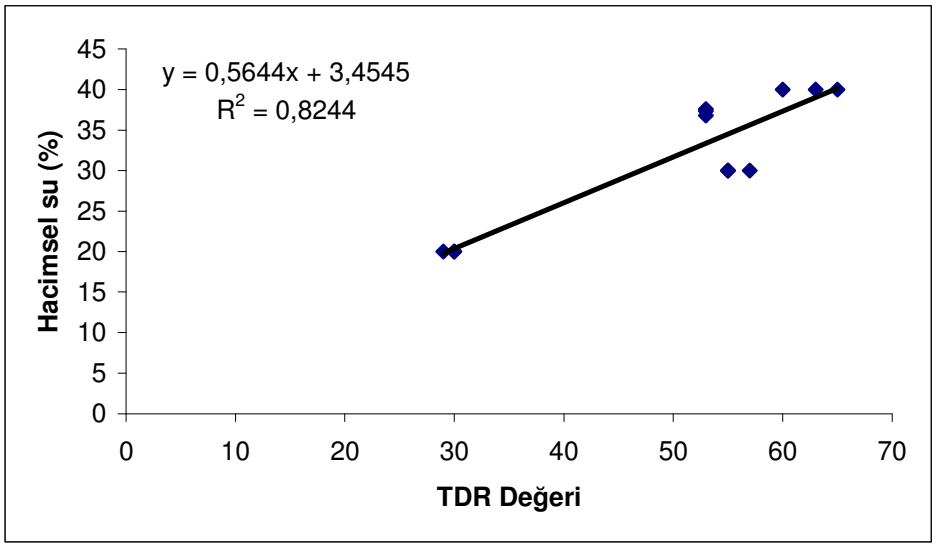
Kil içerikleri							
% 22		**% 30**		**% 40**		**% 50**	
Gerçek Hac. su içeriği (%)	TDR değeri	Gerçek Hac. su içeriği (%)	TDR değeri	Gerçek Hac. su içeriği (%)	TDR değeri	Gerçek Hac. su içeriği (%)	TDR değeri
20	25	20	29	20	39	20	38
20	25	20	30	20	41	20	39
20	25	20	30	20	45	20	43
30	43	30	55	30	75	30	86
30	43	30	55	30	75	30	86
30	45	30	57	30	77	30	88
38,49	53	36,81	53	40	83	40	-
38,64	55	37,37	53	40	93	40	-
39,00	53	37,58	53	40	93	40	-
40	58	40	60	41,17	93	46,85	-
40	60	40	63	41,51	93	49,97	-
40	60	40	65	43,38	93	51,18	-

Çizelge 4.10. TDR kalibrasyonuna kil içeriğinin etkisi üzerine yürütülen denemeye ait TDR ve gerçek hacimsel % su içeriği verileri

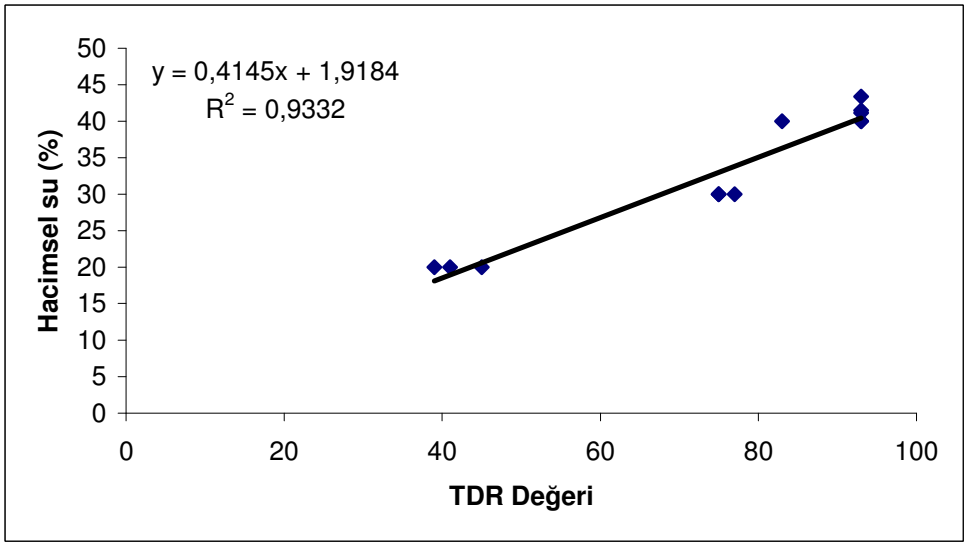
Örnek	% Kil	% Silt	% Kum	Tekstür sınıfı
% 22	22,12	32,38	45,50	L
% 30	27,96	29,78	42,26	CL
% 40	39,44	29,87	30,70	CL
% 50	50,35	33,39	16,26	C
Kaolinit	59,48	34,24	6,28	C



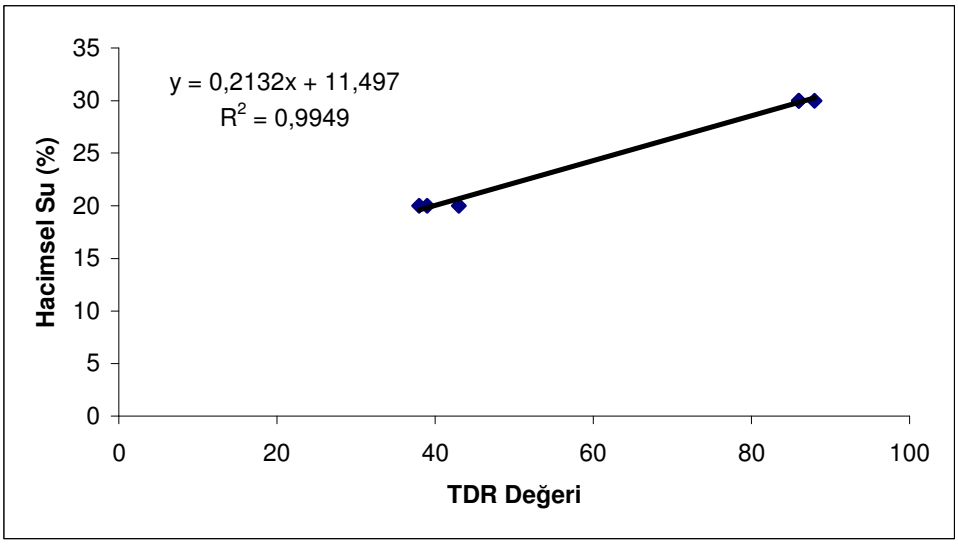
Şekil 4.24. % 22 Kil içeren kaolinit ve tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve % Hacimsel su arasındaki ilişki



Şekil 4.25. % 30 Kil içeren kaolinit ve tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve % Hacimsel su arasındaki ilişki



Şekil 4.26. % 40 Kil içeren kaolinit ve tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve % Hacimsel su arasındaki ilişki



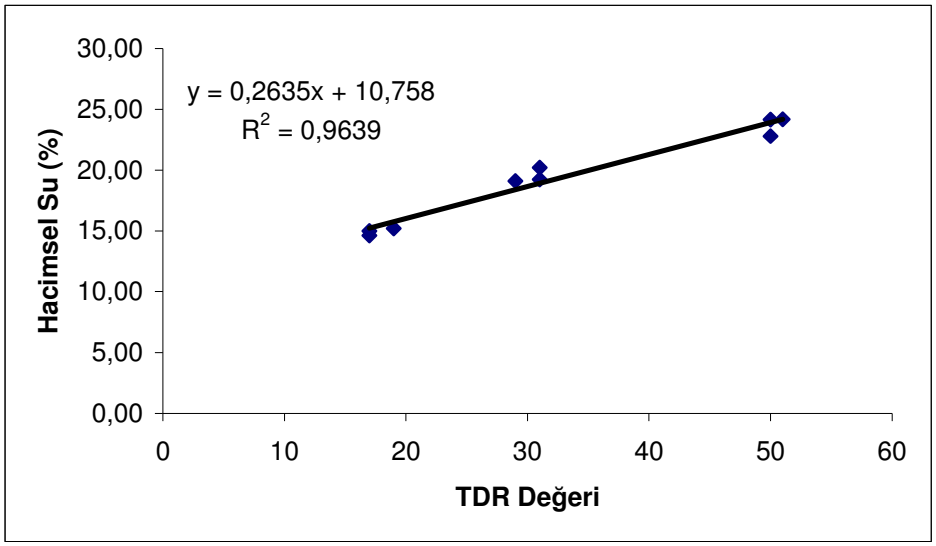
Şekil 4.27. % 50 Kil içeren kaolinit ve tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve % Hacimsel su arasındaki ilişki

Araştırma sonuçlarına göre, yakın su düzeylerinde, kil içeriğinin artışı ile ölçülen hacimsel su içeriği TDR aletinin ölçümlerine göre önemli farklılık göstermiştir. Bir başka deyişle TDR aleti kil içeriğinin artışı ile daha yüksek ve bazen de anlamsız (% 100'ün üzerinde) hacimsel su içeriği ölçmektedir.

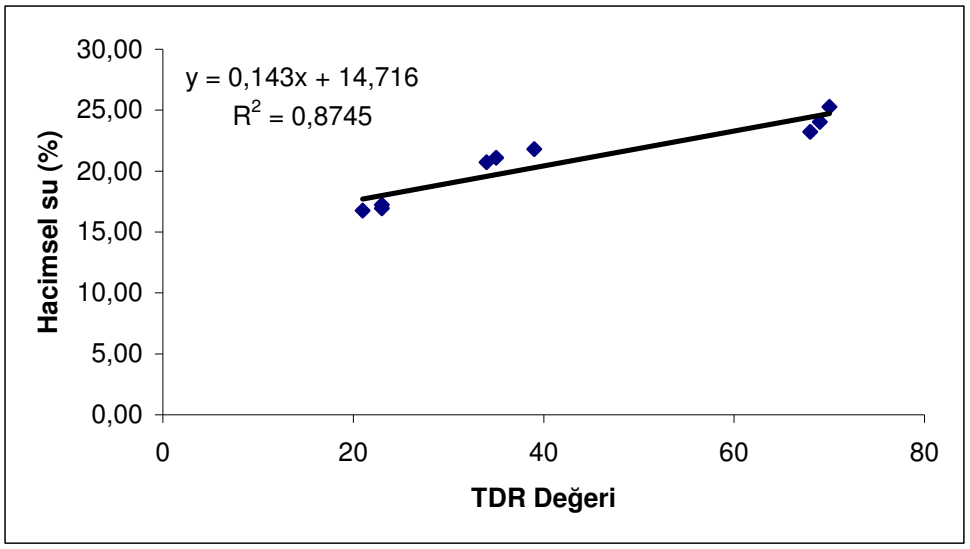
Toprakların organik madde içeriğinin artışı ile su tutma kapasitelerinin arttığı ve diğer toprak fizikokimyasal özelliklerinin iyileştiği bilinmektedir. Diğer taraftan kaynaklarda da belirtildiği gibi organik maddenin etkisinin TDR ölçümlerini önemli düzeyde etkilediği rapor edilmiştir (Schaap ve ark.,1995; Corvin, 2005). Bu bakımdan TDR ölçümleri üzerine organik maddenin etkisinin araştırılması çalışmanın önemli bölümünü oluşturmuştur. Bu amaçla Toprak Bölümü deneme alanında oluşturulan kompostun yardımıyla (% 16.60 organik madde) fakültemiz yaygın toprak serilerinden (Menzilat serisi) killi tınlı toprağa %3, %5 ve %7 organik madde eklenmiştir. Ölçüm sonuçları çizelge 4.11'de ve şekil 4.28–4.30'da verilmiştir.

Çizelge 4.11. TDR kalibrasyonuna organik maddenin etkisi üzerine yürütülen denemeye ait TDR ve gerçek hacimsel % su içeriği verileri

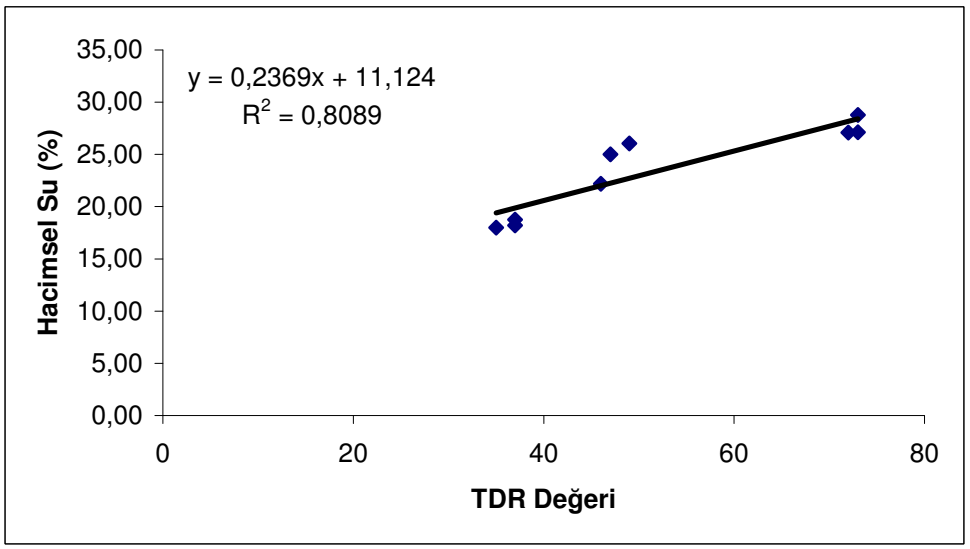
% 3 Organik madde		% 5 Organik madde		% 7 Organik madde	
TDR Değeri	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	TDR Değeri	Gerçek hacimsel su içeriği (%)	TDR Değeri	Gerçek hacimsel su içeriği (%)
51	24,20	70	25,27	73	28,77
50	24,16	69	24,02	73	27,11
50	22,81	68	23,22	72	27,10
31	20,20	39	21,79	49	26,06
31	19,23	35	21,09	47	25,00
29	19,11	34	20,73	46	22,19
19	15,22	23	17,22	37	18,77
17	15,00	23	16,95	37	18,21
17	14,63	21	16,77	35	17,99



Şekil 4.28. %3 Organik madde içeren kompost ve killi tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve Hacimsel su arasındaki ilişki



Şekil 4.29. %5 Organik madde içeren kompost ve killi tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve Hacimsel su arasındaki ilişki



Şekil 4.30. %7 Organik madde içeren kompost ve killi tın tekstürlü karışımlı toprağa ait TDR ve Hacimsel su arasındaki ilişki

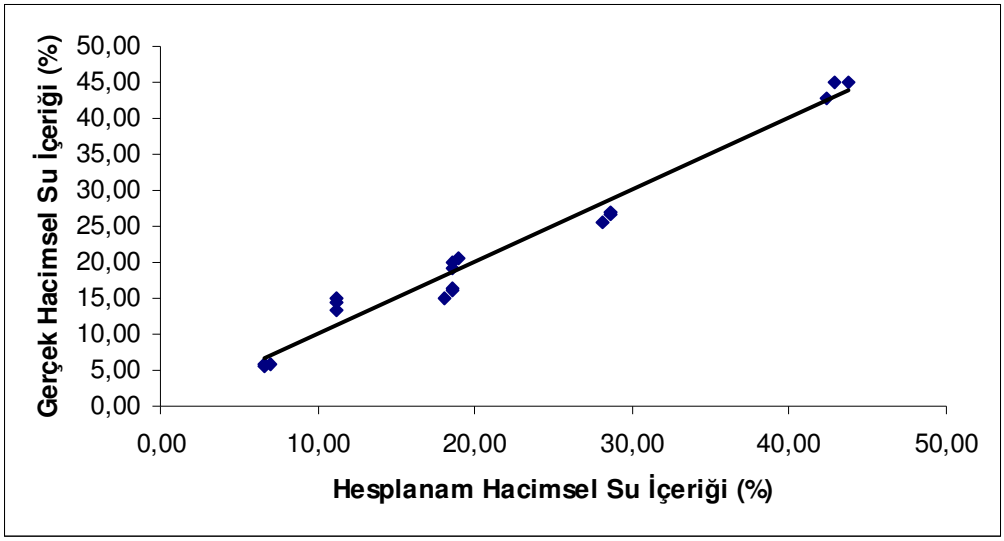
Yukarıdaki verilerden de görüldüğü gibi, topraklarda organik maddenin %3 den % 7 ye kadar artışı durumunda, hacimsel olarak ölçülen toprak su içeriği, TDR aletinde yaklaşık olarak iki kat daha yüksek bulunmuştur. Örnekte su içeriğini

artması TDR ölçümlerini anlamsız (%100'ün üzeri) kılmıştır (örneğin %7 O.M etkisinde su içeriği %30 olduğunda).

Araştırma konumuzun önemli bir bölümünü yarayışlı su oluşturmaktadır. Bu nedenle yukarıda her bir toprak için elde edilmiş eğim çizgisi (kalibrasyon ilişkisi) kullanılarak, (tek profile veya katmanlara göre) TK, SN değerlerinin yeniden ilişkilendirilmesi gerekmektedir. TDR ile ölçülen değer eğim çizgisinde gerçek su içeriğine dönüştürüldükten sonra topraktaki yarayışlı su düzeyi, sulama suyu zamanı ve sulama suyu miktarı hakkında bilgiler üretmek gerekmektedir. Bunun için Excel paket programında ilgili konu çalışılmıştır. Programın ilgili bölümüne toprak tekstür sınıfının girilmesi ile, paket her bir tekstür sınıfına ait kalibrasyon ilişkisini değerlendirerek, yukarıdaki sorulara cevap verilmektedir. İlgili konu aşağıdaki Çizelge 4.12–4.18 ve şekil 4.31–4.37 de görülmektedir. Ayrıca programda her noktada TDR okuması ile ölçülen gerçek hacimsel su içeriği arasında uyum ve hata payları da hesaplanmaktadır

Çizelge 4.12. Kumlu killi tın tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme

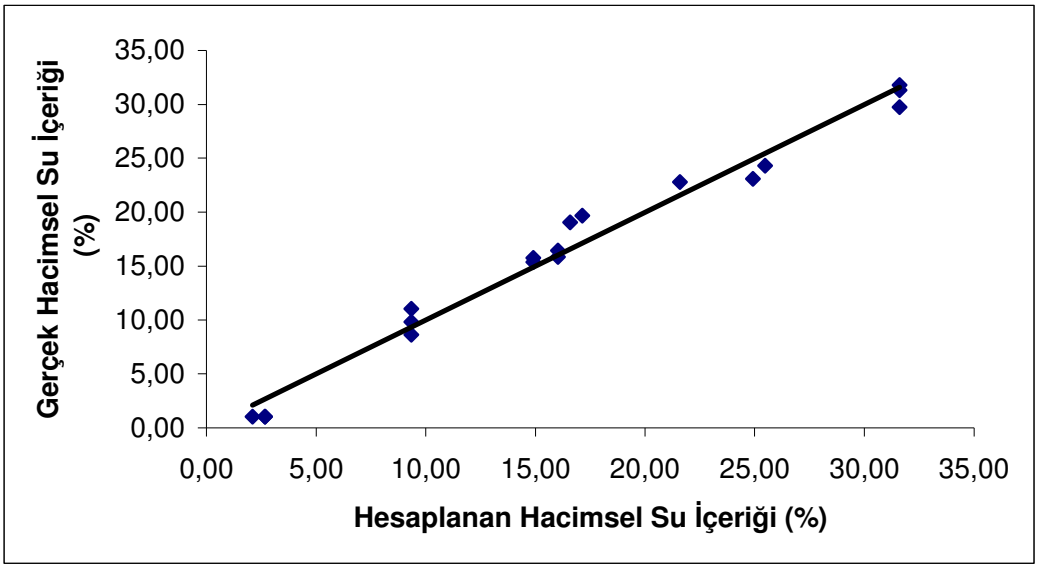
TDR-300 aleti için kalibrasyon çalışması				
Araştırma Topraklarının İlgili verilerini giriniz				
Toprak Bünye Sınıfı	**Kalibrasyon İlişkisi**		**Tarla Kap. (%)**	**Solma Nok. (%)**
Kumlu killi tın	0,4592*TDR+2,9062		19,58	11,90
TDR 300 Al. Ok. değeri	**Gerçek hac. İç. (%)**	**Toprak der. (cm)**		
30	16,68	70	19,58	11,90
TDR 300 ok. Değeri	**Hesaplan H. su içer. (%)**	**Gerçek H. Su içeriği %**	**Hata**	
89	43,78	44,95	2,61	**Yarayışlı Su (%)**
87	42,86	44,95	4,65	
86	42,40	42,86	1,07	62,27
56	28,62	26,97	-6,11	
56	28,62	26,76	-6,96	**Sulama suyu mik. (Ton/da)**
55	28,16	25,66	-9,74	
35	18,98	20,52	7,50	
34	18,52	19,94	7,14	20,3
34	18,52	19,17	3,40	
34	18,52	16,23	-14,11	
33	18,06	15,01	-20,34	
18	11,17	14,93	25,15	
18	11,17	14,43	22,56	
18	11,17	13,29	15,95	
9	7,04	5,84	-20,46	
8	6,58	5,83	-12,82	



Şekil. 4.31. Kumlu killi tın tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.13. Siltli kil tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme

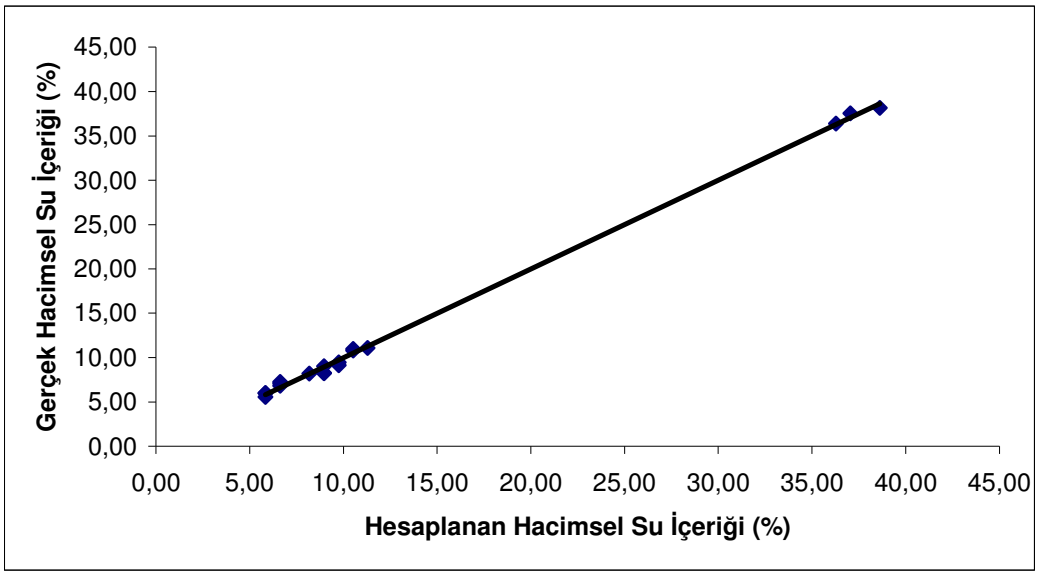
TDR–300 aleti için kalibrasyon çalışması				
Araştırma Topraklarının İlgili verilerini giriniz				
Toprak Bünye Sınıfı	**Kalibrasyon İlişkisi**		**Tarla Kap. (%)**	**Solma Nok. (%)**
siltli kil	0,5566*TDR-2,3472		31,59	17,04
TDR 300 Al. Ok. Değeri	**Gerçek hac. İç. (%)**	**Toprak der. (cm)**		
50	25,48	70	31,59	17,04
TDR 300 ok. Değeri	**Hesaplan H. su içer. (%)**	**Gerçek H. Su içeriği %**	**Hata**	
61	31,61	31,79	0,57	**Yarayışlı Su (%)**
61	31,61	31,33	-0,88	
61	31,61	29,76	-6,20	58,03
50	25,48	24,30	-4,87	
49	24,93	23,08	-7,98	**Sulama suyu mik. (Ton/da)**
43	21,59	22,78	5,25	
35	17,13	19,69	12,99	
34	16,58	19,04	12,95	4,28
33	16,02	16,44	2,56	
33	16,02	15,85	-1,05	
31	14,91	15,78	5,53	
31	14,91	15,39	3,16	
21	9,34	9,81	4,74	
21	9,34	8,62	-8,33	
8	2,11	1,05	-100,78	
9	2,66	1,05	-154,75	



Şekil. 4.32. Siltli kil tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.14. Kum tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme

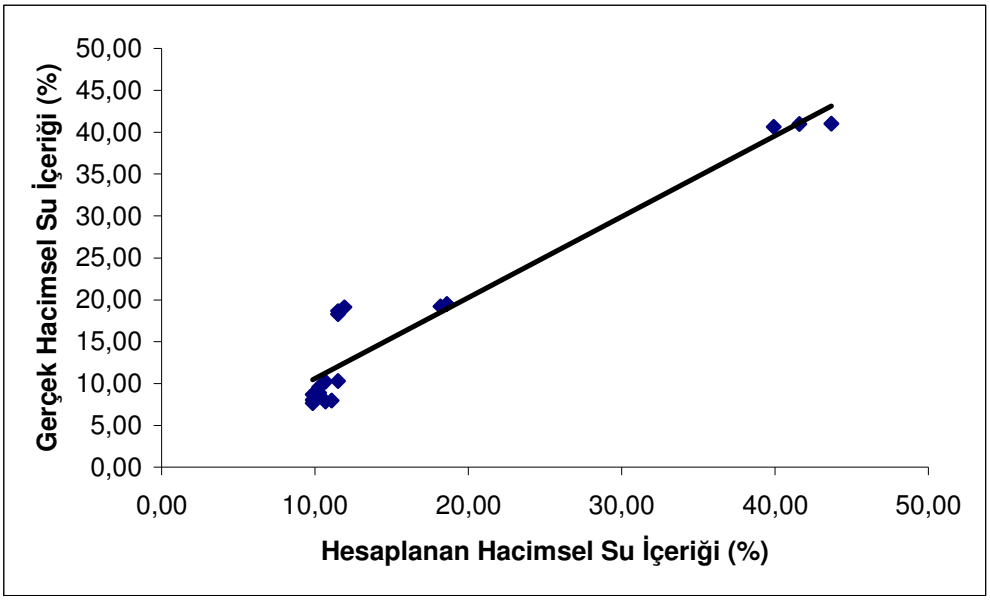
TDR–300 aleti için kalibrasyon çalışması				
Araştırma Topraklarının İlgili verilerini giriniz				
Toprak Bünye Sınıfı	**Kalibrasyon İlişkisi**		**Tarla Kap. (%)**	**Solma Nok. (%)**
kum	0,7804*TDR–1,9661		6,66	3,26
TDR 300 Al. Ok. Değeri	**Gerçek hac. İç. (%)**	**Toprak der. (cm)**		
10	5,84	70	6,66	3,26
TDR 300 ok. Değeri	**Hesaplan H. su içer. (%)**	**Gerçek H. Su içeriği %**	**Hata**	
52	38,61	38,17	-1,17	**Yarayışlı Su (%)**
50	37,05	37,54	1,30	
49	36,27	36,39	0,32	75,82
17	11,30	11,10	-1,80	
16	10,52	10,98	4,21	**Sulama suyu mik. (Ton/da)**
16	10,52	10,79	2,53	
15	9,74	9,48	-2,74	
15	9,74	9,14	-6,57	0,58
14	8,96	9,04	0,87	
14	8,96	8,27	-8,32	
14	8,96	8,26	-8,45	
13	8,18	8,21	0,40	
11	6,62	7,10	6,81	
11	6,62	6,84	3,31	
10	5,84	6,02	2,96	



Şekil. 4.33. Kum tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.15. Kumlu tın tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme

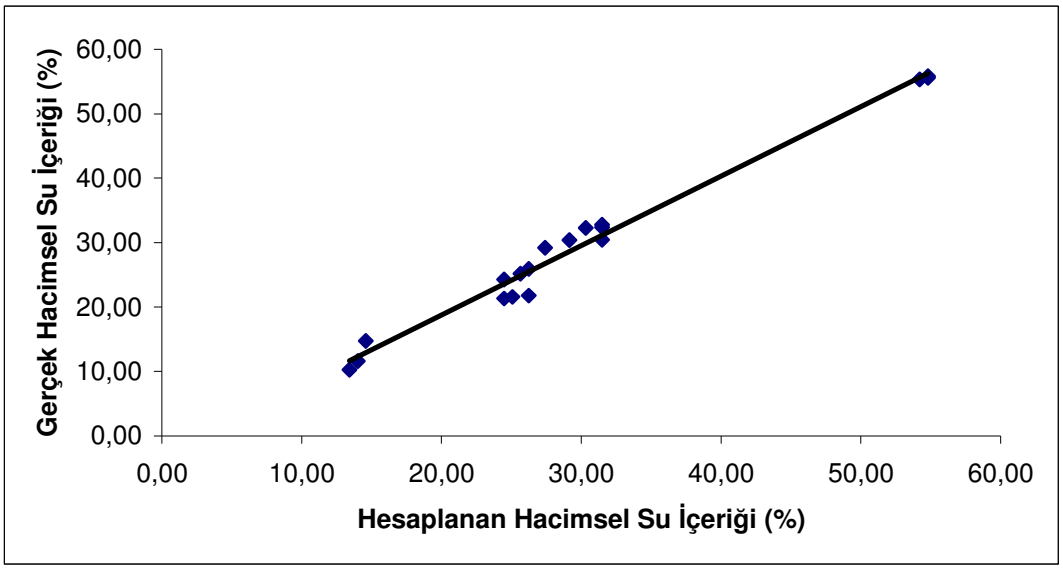
TDR–300 aleti için kalibrasyon çalışması				
Araştırma Topraklarının İlgili verilerini Giriniz				
Toprak Bünye Sınıfı	**Kalibrasyon İlişkisi**		**Tarla Kap. (%)**	**Solma Nok. (%)**
kumlu tın	0,4179*TDR+2,7318		19,07	6,86
TDR 300 Al. Ok. değeri	**Gerçek hac. İç. (%)**	**Toprak der. (cm)**		
30	15,27	70	19,07	6,86
TDR 300 ok. Değeri	**Hesaplan H. su içer. (%)**	**Gerçek H. Su içeriği %**	**Hata**	
98	43,69	41,05	-6,41	**Yarayışlı Su (%)**
93	41,60	40,99	-1,48	
89	39,92	40,67	1,82	68,87
38	18,61	19,51	4,58	
38	18,61	19,51	4,58	**Sulama suyu mik. (Ton/da)**
37	18,19	19,21	5,31	
22	11,93	19,09	37,54	
21	11,51	18,65	38,29	26,6
21	11,51	18,28	37,05	
19	10,67	10,23	-4,34	
18	10,25	9,56	-7,25	
18	10,25	8,89	-15,34	
17	9,84	8,71	-12,89	
17	9,84	8,06	-22,08	
20	11,09	7,95	-39,44	
17	9,84	7,68	-28,09	



Şekil. 4.34. Kumlu tın tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.16. Killi tın tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme

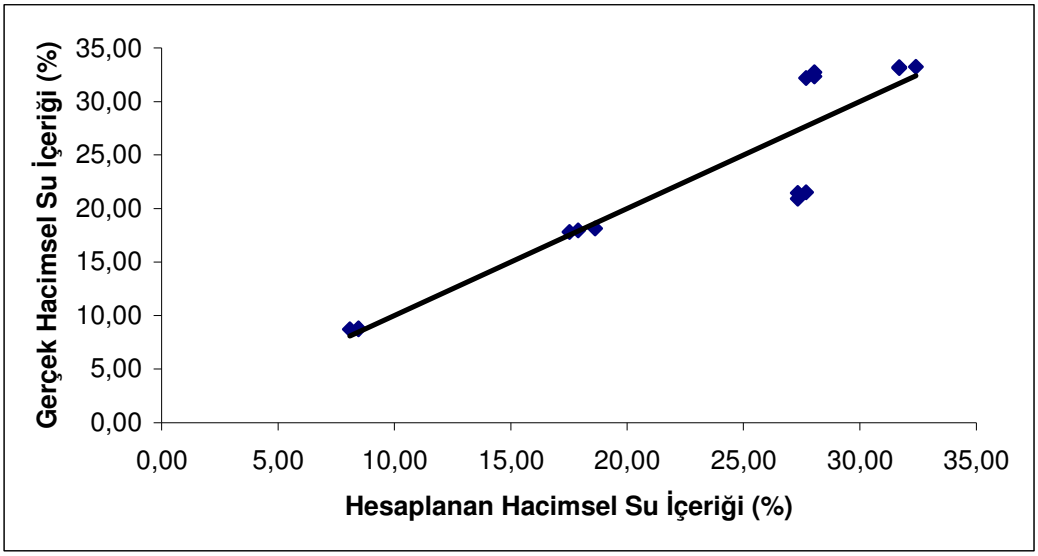
TDR–300 aleti için kalibrasyon çalışması				
Araştırma Topraklarının İlgili verilerini giriniz				
Toprak Bünye Sınıfı	**Kalibrasyon İlişkisi**		**Tarla Kap. (%)**	**Solma Nok. (%)**
killi tın	0,5828*TDR–1,1534		31,67	22,36
TDR 300 Al. Ok. Değeri	**Gerçek hac. İç. (%)**	**Toprak der. (cm)**		
50	27,99	70	31,67	22,36
TDR 300 ok. Değeri	**Hesaplan H. su içer. (%)**	**Gerçek H. Su içeriği %**	**Hata**	
96	54,80	55,86	1,90	**Yarayışlı Su (%)**
96	54,80	55,59	1,42	
95	54,21	55,35	2,06	60,44
56	31,48	32,78	3,94	
56	31,48	32,37	2,73	**Sulama suyu mik. (Ton/da)**
54	30,32	32,26	6,03	
56	31,48	30,43	-3,46	
52	29,15	30,39	4,07	25,8
49	27,40	29,20	6,16	
47	26,24	25,93	-1,17	
46	25,66	25,19	-1,85	
44	24,49	24,32	-0,71	
47	26,24	21,76	-20,57	
45	25,07	21,58	-16,16	
27	14,58	14,72	0,90	
26	14,00	11,60	-20,65	
25	13,42	10,25	-30,94	



Şekil. 4.35. Killi tın tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.17. Kil tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme

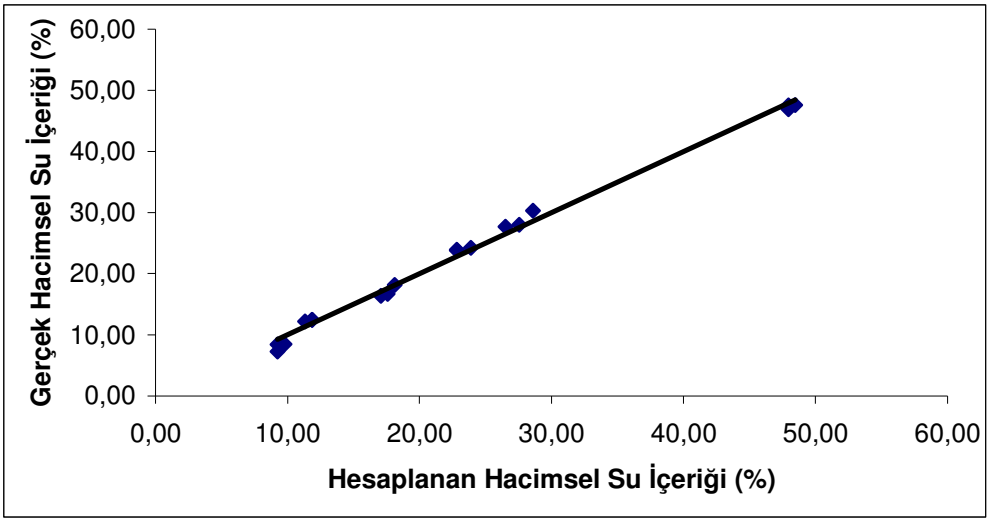
TDR–300 aleti için kalibrasyon çalışması				
Araştırma Topraklarının İlgili verilerini giriniz				
Toprak Bünye Sınıfı	**Kalibrasyon İlişkisi**		**Tarla Kap. (%)**	**Solma Nok. (%)**
kil	0,363*TDR+5,1828		36,37	23,77
TDR 300 Al. Ok. Değeri	**Gerçek hac. İç. (%)**	**Toprak der. (cm)**		
70	30,59	70	36,37	23,77
TDR 300 ok. Değeri	**Hesaplan H. su içer. (%)**	**Gerçek H. Su içeriği %**	**Hata**	
75	32,41	33,25	2,54	**Yarayışlı Su (%)**
73	31,68	33,22	4,63	
73	31,68	33,11	4,31	54,15
63	28,05	32,72	14,28	
63	28,05	32,35	13,28	**Sulama suyu mik. (Ton/da)**
62	27,69	32,20	14,02	
62	27,69	21,52	-28,67	
61	27,33	21,46	-27,33	40,4
61	27,33	20,92	-30,64	
37	18,61	18,13	-2,65	
35	17,89	17,96	0,38	
34	17,52	17,82	1,65	
9	8,45	8,80	4,00	
9	8,45	8,73	3,17	
8	8,09	8,71	7,12	



Şekil. 4.36. Kil tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.18. Tın tekstürlü toprağa ait TDR kalibrasyon programına ait bir değerlendirme

TDR–300 aleti için kalibrasyon çalışması				
Araştırma Topraklarının İlgili verilerini giriniz				
Toprak Bünye Sınıfı	**Kalibrasyon İlişkisi**		**Tarla Kap. (%)**	**Solma Nok. (%)**
tın	0,5232*TDR+2,9549		23,25	10,90
TDR 300 Al. Ok. Değeri	**Gerçek hac. İç. (%)**	**Toprak der. (cm)**		
30	18,65	70	23,25	10,90
TDR 300 ok. Değeri	**Hesaplan H. su içer. (%)**	**Gerçek H. Su içeriği %**	**Hata**	
87	48,47	47,61	-1,81	**Yarayışlı Su (%)**
86	47,95	47,56	-0,83	
86	47,95	46,94	-2,16	62,76
49	28,59	30,32	5,71	
47	27,55	28,02	1,70	**Sulama suyu mik. (Ton/da)**
45	26,50	27,69	4,30	
40	23,88	24,27	1,60	
38	22,84	23,95	4,65	32,2
38	22,84	23,84	4,20	
29	18,13	18,14	0,08	
28	17,60	16,67	-5,64	
27	17,08	16,38	-4,27	
17	11,85	12,44	4,71	
17	11,85	12,42	4,63	
16	11,33	12,18	7,04	
13	9,76	8,48	-15,00	
12	9,23	8,43	-9,59	



Şekil. 4.37. Tın tekstürlü toprak için TDR kalibrasyon programı tarafından hesaplanan ve gerçek hacimsel su içerikleri arasındaki ilişki

Yukarıdaki çizelge ve grafiklerde her tekstür için TDR ile ölçülenle gerçek su içeriği arasındaki hata paylarının noktalardaki hassasiyeti de görülmektedir. Sırası ile kumlu killi tın tektüre sahip olan topraklarda gerçek su içeriğinin %15'in altında TDR hassasiyeti daha da düşmektedir. Siltli killi tekstürde ise % 2'nin altındaki su içeriklerinde hata payı yüzde yüzün üzerinde olmaktadır.

Kumlu tekstürlü topraklarda hata payı oldukça düşük bulunmuştur ve kalibrasyon ilişkisi güvenilir sayılmaktadır. Kumlu tınlı tekstürde ise gerçek su içeriğinin %11 ile %19 arasındaki dilimde hata payı yüksek düzeyde görülmüştür. Killi tınlı tekstürde toprak su içeriğinin %10 -12'lik diliminde hata payı yüksektir, killi bünyeli toprakta gerçek su içeriğinin %21 ile %32'lik diliminde hata payı orta düzeyin üzerindedir. Tınlı bünyeli toprakta ise hata payı düşük düzeylerdedir.

Araştırmalar farklı katmanlara göre su içeriğinin TDR ile belirlenmesi safhasında ise, yarayışlılık düzeyi ve toplam sulama suyu miktarı hakkında bilgiye erişilmesi için Excel paket programı ile ayrı bir düzenleme yapılmıştır. Örnek olarak aşağıdaki çizelgede toprak suyunun yarayışlılığı ve sulama suyu miktarı, katmanlara göre belirlenmiş nem durumlarında geçerlidir.

Topraklarda katmanlara göre nem içerikleri farklılık gösterdiğinden yarayışlı su düzeyinin saptanması için eşdeğer derinlik olarak su içerik çeşidinden yararlanılır. Aşağıdaki örnekte katman derinliği ilgili katmanın hacim ağırlığı TK, SN değerleri sırasıyla geliştirdiğimiz programda ilgili alanlara yerleştirilir. Başlangıçta bu durumda toprak suyunun TK düzeyinde olduğu vasayılır. Birkaç gün sonra (örnekte 3 gün sonra) toprağın nem içeriği aynı derinliklere göre belirlenir . Gravimetrik olarak verilen değerler farklı katmanların hacim ağırlığının dikkate alınması ile hacimsel su içeriğine dönüştrülür. Daha sonra her katmanın eşdeğer derinlik olarak su içerikleri hesaplanır

$$d_İ = \Theta_İ * X_İ \qquad (4.1)$$

$İ$ = Katman sayısı

$\Theta_İ$ = Derinliğe göre toplam hacimsel su içeriği

$X_İ$ = Toplam katman derinliği

TK ve SN'nın ve 3. gündeki toprak neminin eşdeğer derinlikleri toplam katmana göre birikimli eşdeğer derinliğe çevrilir. Daha sonra aşağıdaki ilişki ile yarayışlılık düzeyi belirlenir. Örnekte yarayışlılık düzeyi 51,67 olarak görülmektedir.

$$\text{Yarayışlılık düzeyi} = \%100 - (d_{\Sigma TK} - d_{\Sigma g})/(d_{\Sigma TK} - d_{\Sigma SN})*100 \qquad (4.2)$$

$d_{\Sigma TK}$ = katmanlara göre toplam TK

$d_{\Sigma g}$ = katmanlara göre günlük nem toplamı

$d_{\Sigma SN}$ = katmanlara göre toplam SN

Çizelge 4.19. Farklı katmanlara göre yarayışlı su düzeylerini belirleyen programın bir görünüşü

Katmanlara Göre Yarayışlı Su Düzeylerinin Belirlenmesi						
Başlangıçta Toprak Nemi TK' düzeyindedir						
Derinlik (z)	**cm**	**Hacim Ağ.**	**TK (gr/gr)**	**SN (gr/gr)**	**3. gün Nem**	
0-30	30	1,12	0,38	0,2	0,29	
30-60	30	1,2	0,36	0,13	0,26	
>60	30	1,3	0,355	0,08	0,24	
Hacimsel su içeriği (cm^3/cm^3)			0,4256	0,224	0,3248	
			0,432	0,156	0,312	
			0,4615	**0,104**	**0,312**	
Eşdeğer derinlik olarak su içeriği (d,cm)			127,68	60	97,44	
			129,6	39	93,6	
			138,45	24	93,6	
			395,73	**123**	**284,64**	
						%
Yarayışlı Su			**272,73**		**423**	**59,27**
Sulama Suyu Miktarı			**111,09**	**ton/da**		

Yukarıdaki sonuçların ışığı altında aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Toprak su içeriğinin tarla kapasitesinin üzerine çıkması durumunda TDR ölçümleri doğru sonuçlar vermemektedir.
2. Topraklarda kil içeriğinin artışı TDR aletinin ölçümünde hata payını artırmıştır. Bu nedenle toprak tekstürü her ne kadar killi tekstür sınıfına ait olsa da söz konusu toprak için ayrıca kalibrasyon yapılmalıdır.
3. Topraklarda organik madde içeriğinin artması TDR ölçüm hatalarını arttırmaktadır. Örneğin organik maddenin % 3 den % 7 çıkarılması aynı su içeriğinde (yaklaşık %19) TDR'nin hata payını % 22,6 kadar artırmıştır
4. Her bir toprak için kalibrasyon yapıldıktan sonra, mevcut su içeriğine göre aletin göstergesindeki yarayışlı su düzeyi yeniden düzeltilmelidir
5. TDR ile ölçümlerde aynı derinlikte ölçülen nem durumları, bir ortalama su içeriği değerinde kümeleşirken, bazı durumlarda ortalamanın çok üzerinde ölçümler de görülmektedir. Bu durum toprakta ani değişen tekstür ve strüktür, sıkışma, gözenek dağılımındaki düzensizlik, toprak profilindeki taşlılık v.b. durumlarda ortaya çıkmaktadır. Söz konusu koşullarda ölçüm tekerrürlerini arttırarak anormal verilerin elimine edilmesi gerekmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma sonucu gerçek zaman diliminde, topraktaki su miktarı ve yarayışlı su düzeyleri dikkate alınarak bitkinin suya karşı stres durumu tespit edilebilir. Yarayışlı su içeriği düzeyine göre sulamanın yapılıp yapılmayacağına kanaat getirilir. Bu çalışma ile yerinde sulama suyu miktarını tespit etme imkanı vardır.

Aletin daha geniş boyutta çalışması ve kalibrasyon sonucunun direkt alet programında yapılması ileriki çalışmalar için önerilebilecek bir durumdur. Ayrıca aletin diğer toprak sınıflarında da kalibrasyon işleminin daha uygun olacağı, düşünülmektedir.

Aletin uygulanması ile aşağıdaki sonuçlar ortaya konulmuştur.

Farklı bünye sınıflarında TDR aletinin yeniden kalibrasyonu yapılmıştır.

Ölçümlerden elde edilen su içeriği ve toprak suyu karakteristik eğrisine göre yarayışlı su düzeyi için veri üretilmiştir.

Ortamdaki su içeriğinin tayini ile sulama suyu zamanı, miktarı ve işleme derinliği hakkında hesaplamaların yapılması imkan dahiline girmiştir.

Aletin geniş alanda kullanılabilir olması için Excel de geliştirilen paket programı alet ile yerinde ve eş zamanlı çalışabilen elektronik ortama aktarılırsa TDR'nin kullanılabilirliği daha artmış olacaktır.

KAYNAKLAR

AYDIN, M., POLAT, V., 1995. Bitki Kök Bölgesinde Toprak Su Bütçesi Öğelerinin Nicelleştirilmesi. Doğa Tarım ve Ormancılık Dergisi. 12(2): 111–117.

BLAKE, G.R., HARTGE, K.H.,1986. Bulk Density In: Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods. (Ed: A. Klute) Agr. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison WI. p.363–375.

BONDARENKO, H. F., JUKOWSKY, E. E., MUSKIN, I. G., NERPIN, S. V., POLUEKTOV, R. A., USKOV, I. B., 1982. Simulation of Agroecosystem Productivity, Russia.

BOUYOUCOS, G.J., 1951. Hydrometer Method Improved For Marking Particle Size Analysis of Soils. Agronomy J. 54, pp: 464–465.

CORWİN, D.L., LESCH, S.M., 2005. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 46, issues 1-3, March 2005, Pages 11-43.

ÇEPEL, 1993. Toprak Su Bitki İlişkileri İstanbul Üniv. Orman Fakültesi Üniversite yayın no:3794 1993, İstanbul

DANİELSON, R.E., SUTHERLAND, P.L. 1986. Porosity. In: Klute, A. Editor (2nd Edition) Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Minerological Methods. Agronomy Monograph No:9 Madison USA. P.443-461.

DASBERG, S., HOPMANS, J.W., 1992. Time-domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. Soil Sci. Soc. Am . j. 56, 1341–1345.

DEMİRALAY, İ.,1977. Toprak Fiziği Ders Notları. Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Erzurum.

DİRKSEN, C., DASBERG, S., 1993. Improved calibration of time-domain reflectometry soil water content measurements. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 660–668.

DOBSON, M.C., ULABLY, F.T., HALLİKAİNEN, M.T., EL-RAYES, M.A., 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: dielectric mixing models. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-23, 35-46.

EİTZİNGER, J., TRNKA, M., HÖSCH, J., ZALUD, Z., DUBROVSKY, M., 2004. Ecological Modelling, Vol. 171, issue 3, 15 January 2004, P. 223-246.

GARDNER, W.H., 1986. Water content in methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. A. Klute (ed). P. 493-544. ASA-SSSA. Agronomy No.9. Madison, WI.USA.

GREACEN, E. L., (ed.) 1981. Soil Water Assessment by the Neutron Method. CSIRO, East Melbourne, Australia.

HEİMOVAARA, T.J., 1993. Design of Triple- Wire Time Domain Reflectometry Prope in Practice and Theory. Soil Sci. Am. J. 57, 1410-1417.

HERKELRATH, W. N., Hamburg, S.P., Murphy, F., 1991. Automatic real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time-domain reflectometry. Water Resour. Res. 27, 857-864.

JACKSON, S. H., 2003. Comparison of calculated and measured volumetric water content at four field sites. Agricultural Water Management Vol. 58, issue 3, 26 February 2003, P. 209-222

JACOBSEN, O.H., SCHJONNİNG, P., 1992. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. Journal of Hydrology, Vol.151,issues 2-4, 147-157.

KIRDA, C., SARIYEV, A., 2002. Toprak Fiziği Ders Notları. Çukurova Üniv. Ziraat Fak. Genel yayın no:245

KLUTE, A., DİRKSEN, C.,1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. In: Methods of Soil Analysis, Part1, Physical and Mineralogical Methods. (Ed: A. Klute) Agr. Monogr. 9.ASA and SSSA, Madison WI p. 687-734.

KLUTE, A., 1986. Water Retention: Laboratory Methods. In: Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods. (Ed: A. Klute)Agr. Monogr.). ASA and SSSA Madison WI. p. 635-662.

KOSMAS, C., MARATHİANOU, M., GERONTİDİS, ST., DETSİS, V., 2001. Agricultural Water Management, Vol. 48, issue 1, May 2001, P. 61-78.

KUTİLEK, M.,NİELSEN, D.R.,1994. Soil Hydrology. Catena Verlag. Cremlingen-Destedt. Germany. P.370.

MIYAMATO, T., KOBAYASHI, R., ANNAKA, T., CHIKUSHI, J., 2001. Soil and Tillage Research, Vol. 60. issues 1-2, June 2001, P. 91-99.

MOJID, M. A., CHO, H., 2004. Journal of Hydrology. V. 295, 2004. S: 263–275.

NERPIN, S. V., CUDNOWSKY, A. F., 1975. Energo-i Massoobmeno ve Sistema Rastenya-Pocva-Vozdux. Leningrad, Gidrometeoizdat. 358 sayfa.

OR, D., AND J.M. WRAITH. 2000. Comment on "On water vapor transport in field soils" by Anthony T. Cahill and Marc B. Parlange (Water Resour. Res. 34: 731–739, 1998).

ÖZKAN, A.İ., 1985. Toprak Fiziği. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 946, Ders Kitabı:270. Ankara.

POLUEKTOV, R. A., 1991. Simulasyon of Agroecosystem Dinamics. S. 312, Gidrometoizdat, St- Petersburg, Russia.

PONİZOVSKY, A.A., CHUDİNOVA, S.M., PACHEPSKY, Y.A., 1999. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. Journal of Hydrology, 218, 35-43.

ROBİNSON D. A., BELL J. P., AND BATCHELOR C. H., 1995(Tjele, Denmark: Danish Institute of Plant and Soil Science, 1994),.SP report no. 11, June 1995,Vol. 3 pp. 63-70

RODRİGUEZ, C.G.L., DA CUNHA NETO., PRATA. A.T., 1999 Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 20, issue 1, September 1999, P. 25-33.

SANTİNİ, A., D' URSO. G. 2000. The time domain reflectometry: Theory, principles and applications. In: Kırda, C., Steduto, P. (eds). Soil Water Balance and Transport Processes, Review of Theory and Field applications. Cahiers Options Mediterranean's 46: 113-145.

SARIYEV, L. A., AYDIN, M., POLAT, V., TULİ, A., 1995. Toprak Rutubet Karakteristik Eğrisi ve Toprak-Kök Sisteminde Su Akımının Matematiksel Modellenmesi. Ç.Ü. Ziraat Fakültesi 25. Kuruluş Yılı Özel Sayısı: 257–268.

SCHAAP, M.G., LANGE, L., HEİMOVAARA, T.J.,1996. TDR calibration of organic forest floor media. Soil technology, Vol. 11, issue 2, June 1997, P.205-217.

SCHLICHTING, E. 1989. Çukurova Bölgesi Toprakları. Çukurova Üniv. Ziraat Fak. Yardımcı Ders Kitabı. No. 26.

SCHLICHTING, E., & BLUME, E., 1966. Bodenkundliches Practikum. Verlag Paul Parey. Hamburg and Berlin.

SUTTON, D. B. AND N.P. HARMON, 1973. Ecology: Selected Concepts. John Wiley and Sons, Inc. New York, London

TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16, 574-582.

U.S., SALINITY LABORATORY STAFF, 1954. Diagnosis and Improvement of Soil Saline and Alkaline Soils. Agricultural Handbook No:60.

VAZ, C.M.P., BASSOİ, L.H., HOPMANS, J.W., 2001. Soil and Tillage Research, Vol. 60, issues 1-2, June 2001, P. 35-42.

WANG, J.R., SCHMUGGE, T.J., 1980. An empirical model for the complex dielectric constant of soils as a function of water content. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-18, 288-295.

YEŞİLSOY, 2002. Toprak Bitki Su İlişkileri Ders Notları. Çukurova Üniv. Ziraat Fak. Genel yayın no:94

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Adana' da doğdum. İlk, orta ve lise eğitimini burada tamamladım. 1997 yılında Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bölümünde Lisans öğrenimine başladım. 2001 yılında lisans öğrenimimi tamamladıktan sonra aynı yıl Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladım. 2002 yılında Ç. Ü. Fen bilimleri enstitüsünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladım. Toprak Anabilim dalında Yüksek Lisans öğrencisi olarak öğrenimine devam etmekteyim.