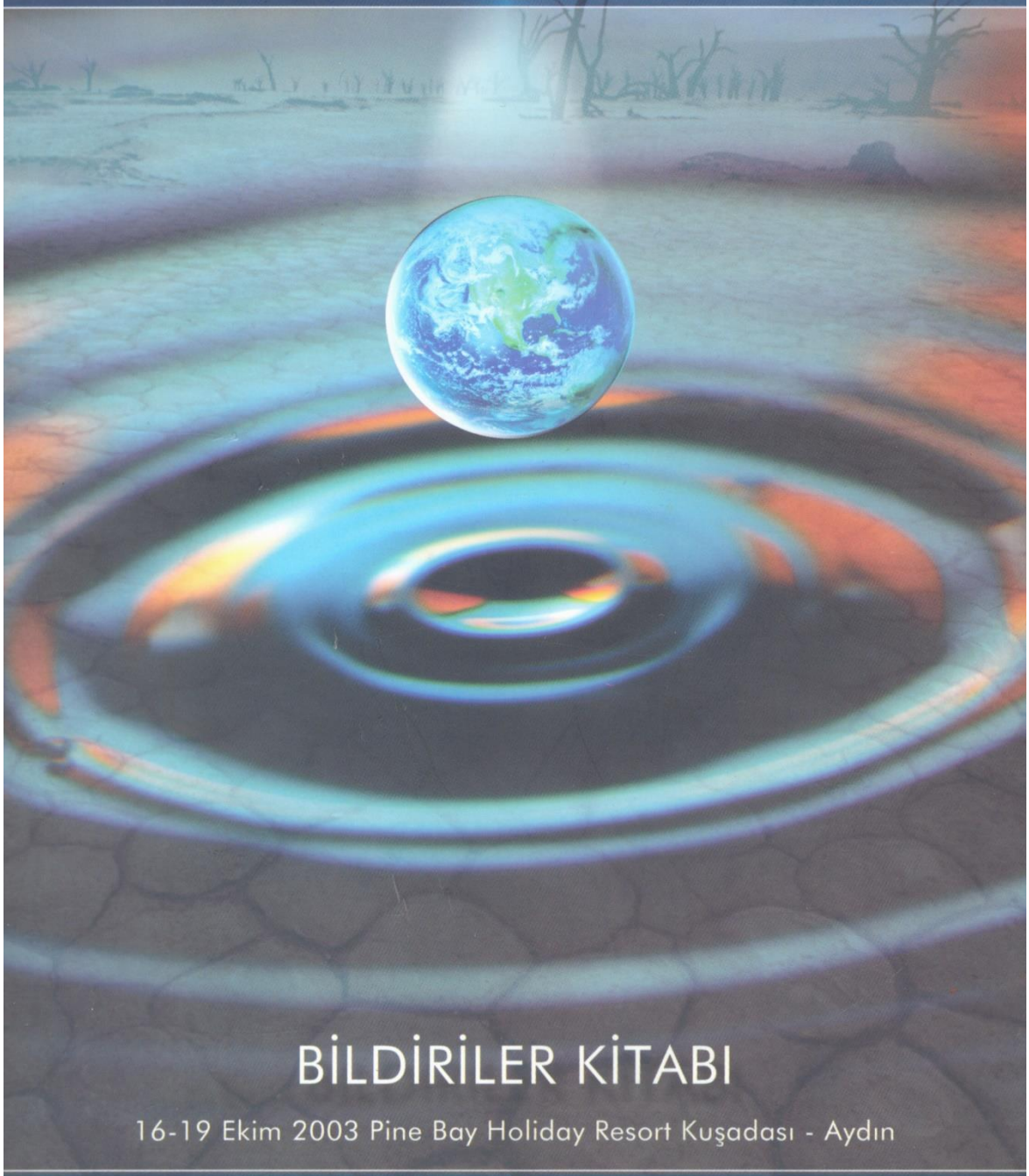
# 2. ULUSAL SULAMA KONGRESİ



## BİLDİRİLER KİTABI

16-19 Ekim 2003 Pine Bay Holiday Resort Kuşadası - Aydın

KÜLTÜRTEKNİK DERNEĞİ

# ZAMAN ETKİLİ YANSIMA YÖNTEMİ (TDR) İLE TOPRAK NEMİNİN ÖLÇÜLMESİ

Engin YURTSEVEN[1] Ali ÜNLÜKARA[2] Hasan S. ÖZTÜRK[3]

**Özet :** Bu çalışmada hacimsel toprak nem içeriğini hızlı ve doğru bir şekilde ölçen TDR yöntemi tanıtılmaya çalışılmıştır ve bu konu ile ilgili son çalışmalar derlenerek sunulmuştur. Bitki gelişimi ve üretkenliğinde toprak nemi önemli bir kontrol edici etkendir. Toprak suyu bitki gelişimini, bitkinin su potansiyelini kontrol ederek doğrudan, havalanmasını, sıcaklığını, bitki besin elementlerinin taşınması, alınması ve iletilmesini kontrol ederek dolaylı yoldan etkilemektedir. Toprak su sistemi dinamikleri nedeniyle ve özellikle sulama yapılan şartlar altında, sistem içerisindeki su hareketi, sulama gereksinimlerini belirlemede önemlidir. Toprak suyu genellikle ya su içeriği veya toprak su potansiyeli cinsinden ölçmektedir. Zaman Etkili Yansıma (TDR-Time Domain Reflectometry), hacimsel toprak nem içeriğini dolaylı olarak ölçen bir yöntemdir. TDR, toprağın dielektrik sabitine bağlı olarak değişen bir elektrik sinyali yayılımını ölçmektedir. Toprak su içeriği ve elektriksel iletkenliği, toprağın dielektrik sabitini doğrudan etkilemektedir. Dielektrik sabiti ve nem içeriği arasındaki ilişkiden yararlanılarak toprağın hacimsel nem içeriği bulunmaktadır. TDR ölçümleri, toprak bünyesi, sıcaklığı ve tuz içeriğinden bağımsızdır. Özellikle kalibrasyon işlemlerine gereksinim duymaması nedeniyle son yıllarda TDR yöntemi popüler hale gelmiştir.

## Measuring Soil Water by Time Domain Reflectometry (TDR)

**Abstract :** In this study, The TDR method that measures volumetric soil water content rapidly and accurately has been introduced and recent studies on TDR has been analyzed. One of the main important controlling factor in plant growth and crop productivity is the soil water content. Soil water affects plant growth directly through its controlling effect on plant water potential and indirectly through its effects on aeration, temperature and nutrient transport, uptake and transformation. Because of the dynamics of the soil water system and particularly under irrigated conditions, the rate of water movement within the system is also important in determining the need for irrigation. Soil water is usually measured as water content or as soil water potential. Time Domain Reflectometry (TDR) is a method that measures volumetric soil water content indirectly. TDR measures the propagation of an electrical signal which is dependent on the dielectric constant of soil. The soil water content and electrical conductivity directly affect the soil dielectric constant. The TDR measurement is independent of soil texture, temperature and salt content. Time domain reflectometry has become popular in recent years, mainly because the method does not need calibration procedures.

## GİRİŞ

Toprak su içeriği doğrudan veya dolaylı yöntemler kullanılarak belirlenebilir. Toprak örneğine çeşitli dış güçler uygulanmak suretiyle toprak örneğinden suyun çıkartılmasını sağlayarak ölçüm yapan yöntemler doğrudan yöntemlerdir. Su içeriği tarafından etkilenen bazı toprak özellikleri ve bu özellikler üzerine suyun etkisini ölçen yöntemler, dolaylı yöntemlerdir. Doğrudan toprak nem içeriğini ölçen yöntemlerde, topraktan uzaklaştırılan suyun hacmi veya ağırlığı ölçülür. Doğrudan toprak nem

[1] Prof. Dr., Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü
[2] Araş.Gr., Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü
[3] Dr., Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü

içeriğini belirleyen gravimetrik yöntem standart olarak sıkça kullanılmasına rağmen, gravimetrik örneklemede gerekli zaman veya doğrudan ölçümün zarar verici etkisi dikkate alındığında toprak su içeriğinin dolaylı olarak ölçümüne gereksinim duyulmaktadır. Dolaylı ölçümler elektronik olarak ve sürekli yapılabilmektedir. Toprak su içeriğinden doğrudan etkilenen veya etrafındaki toprakta bulunan suyla dengeye gelmesine izin veren bir gözenekli ortam aracılığıyla, bu yöntemlerde toprağın bazı fiziksel özellikleri ölçülmektedir. Genellikle gözenekli ortamın denge durumu toprağın su içeriğinden ziyade suyun enerji durumuna bağlı olmaktadır. Dolaylı yöntemlerde toprak su içeriği, bir kalibrasyon eşitliğiyle belirlenebilmektedir. Nötron yöntemi, Zaman Etkili Yansıma yöntemi (TDR), Toprak Su Potansiyeli yöntemleri, Termokapl Psikrometre, Tansiyometreler, Elektriksel Direnç yöntemleri, Isı Kaybının Ölçülmesi gibi yöntemler bazı dolaylı toprak nem ölçümü yöntemleridir (Hoffman et al., 1992). Nötron Yayılımı Yöntemi, Gama Işını Zayıflaması Yöntemi, Kapasitans Yöntemi ve Zaman Etkili Yansıma (Time domain reflectometry "TDR") Yöntemi, tarla şartlarında uygulanabilir oldukları ispat edilmiş, toprak yapısına zarar vermeyen tekniklerdir (Kabat and Beekma, 1994).

## ZAMAN ETKİLİ YANSIMA YÖNTEMİ (TDR)

TDR, toprakta hacimsel nem içeriğini belirleyen dolaylı bir yöntemidir. Söz konusu yöntem, toprakta gömülü bir prob boyunca ilerleyen elektromanyetik pulsun yayılma hızını ölçmeyi içermektedir. Bu hız, toprak dielektrik katsayısının ($\varepsilon$) bir fonksiyonu olup hacim yüzdesi cinsinden toprak neminin ($\theta$) duyarlı bir ölçüsüdür. Bu yöntem, suyun dielektrik sabiti veya dielektrik geçirgenliğinin diğer toprak bileşenleri dielektrik sabitinden daha yüksek olması gerçeğinden hareketle geliştirilmiştir.

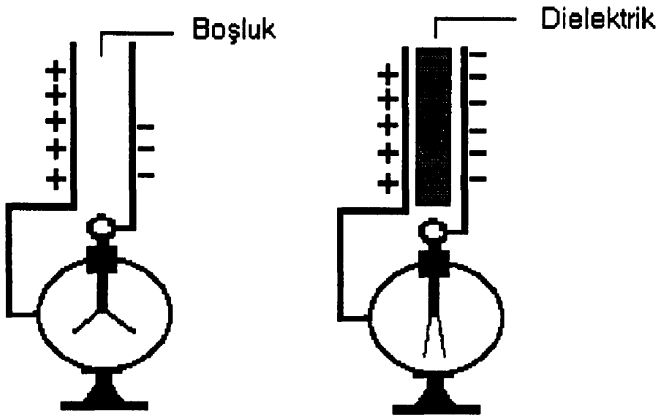
Toprak nemi ile dielektrik katsayısı arasındaki ilişki için deneysel kalibrasyon eşitlikleri bulunmaktadır. Bu kalibrasyon eşitlikleri kullanıldıkları topraklar için tatmin edici düzeyde değilse, özel kalibrasyon eşitlikleri kolayca kurulabilir. Son zamanlarda geliştirilmiş olmasına rağmen, TDR çok çekici özelliklerinin bir sonucu olarak dünya çapında kullanılır hale gelmiştir. Toprağa zarar vermemesi, hızlı bir şekilde ölçüm yapılabilmesi, tekrarlanan ölçümler arasındaki sapmanın çok az olması, arazide kullanım amaçları için farklı versiyonları bulunması, cihazın güvenilir olup insan sağlığını tehdit etmemesi, bir otomatik veri kaydedici sistemle birleştirilebilmesi, toprak yüzeyi neminin ölçülebilmesi, istenilen derinlikteki toprak neminin yüksek derecede duyarlı şekilde belirlenebilmesi, istenilen uzunlukta elektrotlarının bulunabilmesi ve tamamıyla otomatik olarak kullanılabilmesi TDR yönteminin üstünlükleri arasında sayılabilir (Dirksen, 1995; Kabat and Beekma,1994).

Şayet yoğun yersel tarama isteniyorsa, pahalı eloktrotlar ve veri kaydedici sistemlerinin kullanımını gerektirmesi, taşlı ve sıkışmış ağır topraklarda elektrotların yerleştirilmesinin zor olması, tuzlu topraklarda ve ağır killi topraklarda güvenli sonuçlar vermemesi, TDR yönteminin sakıncalı yönleri sıralanabilir (Kabat and Beekma,1994).

### Dielektrik Sabiti ve Toprak Nem İlişkisi

Bir ortamın dielektrik davranışı, dielektrik sabiti (dielektrik geçirgenliği) ile tanımlanmaktadır. Geçirgen olmayan bir ortamın nispi dielektrik geçirgenliği ($\varepsilon$), bir

kondansörde plaklar arasında bulunan vakum yerine söz konusu ortam malzemesi konulduğunda, kondansör kapasitesini artıran bir faktör olarak tanımlanır (Dirksen, 1995). Şekil 1'de bir elektroskopa bağlı iki plak arasına yerleştirilen geçirgen olmayan




Şekil 1. Dielektrik malzemenin iki paralel plak arasında oluşturduğu etki

dielektrik malzemenin, elektroskop yaprakları açılımına etkisi gösterilmektedir (Nasuhoğlu ve Tokmakçıoğlu, 1990).

Bir malzemenin dielektrik katsayısı aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\,\varepsilon''$$

Burada, $\varepsilon$ gerçek dielektrik katsayısını, $\varepsilon'$ malzeme bileşimi polarizasyon ölçütünü, $\varepsilon''$ sanal dielektrik sabitesini ve j bir katsayıyı temsil etmektedir. Sanal dielektrik sabite kısmı, enerji absorpsiyonunu göstermekte olup, enerji absorpsiyonu, iyonik geçirgenlik ve dielektrik kayıpları nedeniyle oluşmaktadır (Dirksen ve Hilhorst, 1994):

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}$$

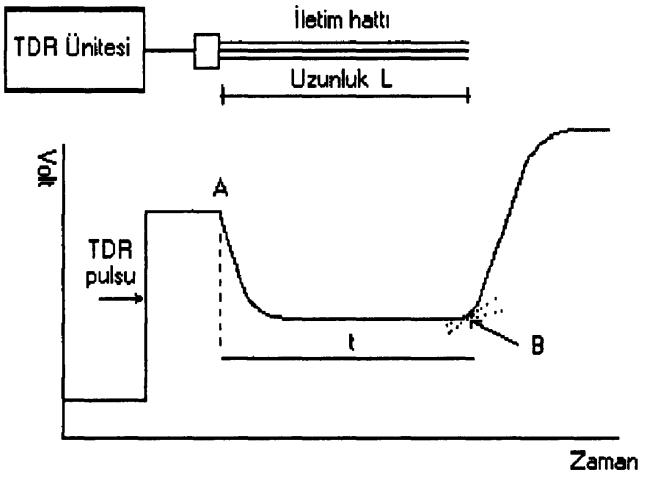
Eşitlikte, $\sigma$ iyonik geçirgenliği, $\omega$ açısal frekansı ve $\varepsilon_0$ serbest yüzey dielektrik sabitini göstermektedir. Dielektrik geçirgenliği karmaşık bir ölçü olmakla birlikte toprak su içeriği ölçümlerinde eşitliğin sanal kısımları çok küçük olduğu için çoğunlukla ihmal edilebilir. Dielektrik geçirgenliği, vakum ve hava için $\varepsilon = 1$ (tam değeri $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m), su için $\varepsilon = 81$ ve çoğu toprak mineral maddeleri için $\varepsilon = 3$-5 dir. Üç fazlı toprak içerisinde en fazla dielektrik geçirgenliğine su sahiptir. Sonuçta nemli toprağın dielektrik geçirgenliği su içeriği ile sıkı bir ilişkiyle değişim gösterir ve toprak su içeriğini belirlemek amacıyla kullanılabilir.

TDR ile dielektrik geçirgenlik, bir elektromanyetik pulsun yayılma hızının ölçülmesiyle belirlenmektedir. Vakum içerisinde bir elektrodinamik pulsun hızı, ışık hızına eşit olmaktadır ($3x10^8$ m/s). Toprakta bulunan bir prob için etkili dielektrik geçirgenliği;

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$$

dir. Eşitlikte; v elektromanyetik puls hızını (m/s), c elektrodinamik puls hızı ($3x10^8$ m/s), ε dielektrik geçirgenliği göstermektedir.

TDR ile dolaylı yoldan toprak neminin ölçülmesi prensibi, Şekil 2'de gösterilmiştir. Bir TDR birimi, örneğin yaygın olarak kullanılan TEKTRONIX Model 1502 B kablo test edicisi, çok hızlı yüksek zamanlı kademeli gerilim pulsu üretir. Üretilen elektromanyetik dalga, koaksiyal kablodan toprakta gömülü olan bir proba gider. Bu TDR probu bir parçaya monte edilmiş bir birine paralel iki veya üç adet metal elektrot çubuklardan ibarettir. Prob çubuklar bir iletim hattı olmakta, toprak ise bir dielektrik ortam görevi yapmaktadır. Kademeli puls, bir zahiri direnç değişimiyle karşılaştığında (metal çubukların toprağa girdiği yerde), pulsun bir kısmı geri yansır, geri kalanı ise yoluna devam eder. Bu tip yansımalar genellikle prob başlangıcı ve sonunda oluşur. Cihaza doğru aynı yolda geriye yansıyan sinyaller, puls dağılana kadar direnç değişimleri ve benzeri etkiler nedeniyle kısmen yansıtılmaktadır. TDR biriminde bulunan bir örnekleme alıcısı ve zaman ünitesi, kademeli gerilim girdi toplamını ve puls başlangıcından beri geçen zamanın bir fonksiyonu olarak cihazda geri dönen tüm yansımış gerilimleri ölçer. Tüm bu yüksek frekanslı bileşenlerin net sonucu, bir dalga şeklinde osiloskop (salınım ölçer) üzerinde kaydedilir. Kademeli pulslar gönderilir ve düzenli zaman aralıklarında elde edilen dalga şekilleri güncelleştirilir. Ölçümlerin doğruluğunu artırmak için örneklemelerin (değişken) her bir dalga şekli için ortalaması alınır.




Şekil 2. Cihazın uzunluk ölçeği ile dalga şeklinin zaman ölçeği arasındaki karşılığı gösteren TDR'ın çalışma prensibi

Toprakta elektromanyetik pulsun yayılma hızı, dalga şekli üzerideki A ve B noktaları arasındaki zaman (t) ile prob çubukları uzunluğundan (L) bulunabilir (Şekil 2). A

noktası, toprakta prob çubukların girişindeki direnç değişimi nedeniyle ilk yansımaya karşılık gelmektedir. Verilen bir prob ve kablo uzunluğu için A noktası hep aynıdır. B noktası, prob çubukları sonundaki ilk yansımaya karşılık gelir ve toprak su içeriğine bağlı değişim gösterir. Toprakta elektromanyetik pulsun net geçiş süresi ($t_s$), dalga üzerinde bulunan A ve B noktaları arasındaki zaman farkıdır. Dalga hareketi, toprakta gömülü L uzunluğundaki çubuklar boyunca ileriye ve geriye doğru olduğundan, mekaniksel yayılım hızı;

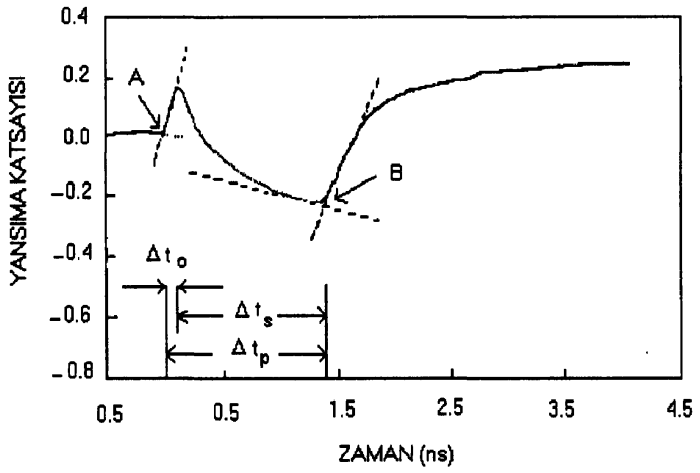
$$v = \frac{2L}{t_s}$$

dir. Bu mekaniksel yayılım hızı eşitliği ile elektromanyetik puls hızı eşitliğinden dielektrik geçirgenliği;

$$\varepsilon = (\frac{c \times t_s}{2L})^2$$

şeklinde hesaplanabilir. Özel bileşimli topraklar, TDR cihazı ve prob için bir kalibrasyon ilişkisi bulunduğunda, elde edilen ε değeri hacimsel toprak nem içeriğine (θ) çevrilebilir. Kalibrasyon eşitlikleri, toprak dielektrik sabiti ile hacimsel nem içeriği arasındaki ilişkiyi ortaya koyan ve bu şekilde hacimsel toprak nem içeriğinin tahminini sağlayan çeşitli yaklaşım modelleri sonucu elde edilmişlerdir. Topp eşitliği, De Loor Modeli, Karma Dielektrik Modeli, Ledieu ve arkadaşları (1986) tarafından geliştirilen model, Dirksen ve Darsberg (1993) modeli, çeşitli yaklaşımlar sonucu elde edilen modellerden bir kaçına örnek olarak verilebilir.

Şekil 2'de gösterilen dalga şekli, yalnızca probun başlangıç ve sonundaki ilk yansımalara karşılık gelen kısmıdır. Daha uzun zaman aralığında TDR kablo test edicisi tarafından yansımalar güncel şekilde kaydedilirler. A noktasından önceki düz kısım koaksiyal kablo boyu ile oransaldır ve toprak nem içeriğinin belirlenmesi amacıyla dalga analizinde bu kısımla ilgilenilmemektedir. B noktasını takip eden çoklu yansımalar karmaşıktır ve analizi de zordur. Fakat su içeriği ölçümleri için bu kısımlara da gereksinim duyulmamaktadır. Yansımanın düşen gerilime oranı olan yansıma katsayısı şekilde düşey eksende, havadaki geçiş zamanı, $c.t_s/2L = \sqrt{\varepsilon} = 1$ ifadesinin katları şeklinde yatay eksende gösterilmiştir. Böylece, prob sonundaki ilk yansıma havada $ct_s/2L=1$ düzeyinde, su içerisinde $ct_s/2L = \sqrt{81} = 9$ düzeyinde meydana gelirken nemli toprak içerisinde bu iki değer arasında meydana gelmektedir.




Şekil 3. Bir dalga şekli üzerinde çıplak gözle elle yapılan dalga analizi

Şekil 3'te nemli siltli bir toprakta 0.1 m uzunluğunda üç çubuklu bir prob için dalga şekli görülmektedir. Dalga şekline çizilen teğetler vasıtasıyla A noktasının yeri hassas bir şekilde belirlenebilmektedir. Toprakta net geçiş zamanını belirleyebilmek amacıyla bu prop bağlantı parçası uzunluğu için $\Delta t_0$ düzeltmesi A noktasında yapılmalıdır. Dalga şekillerinin analizi çıplak gözle kablo test edicisinin ekranında veya dalga şeklini kaydeden bir analog kaydedici üzerinde yapılabilmektedir. Çok sayıda ölçüm yapılması durumunda bu işlem yorucu olmakta ve çok zaman almaktadır. Günümüzde, otomatik olarak gerek duyulan dalga kısmını sayısal şekilde önce kaydeden ve sonra dalga şekli üzerine teğetler çizilerek kesim noktalarının belirlenmesi yöntemiyle analiz yapan bilgisayar yazılımları bulunmaktadır (Heimovaara and Bouten, 1990; Heimovaara, 1994). Uzun zaman aralığında neredeyse sabit kalan gerilim (yansıma katsayısı) de kaydedilmekte ve toprağın hacimsel elektriksel geçirgenliğini hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır. Tamamıyla otomatik şekilde çoklu problarla, veri alımı ve analizi mümkün olmaktadır.

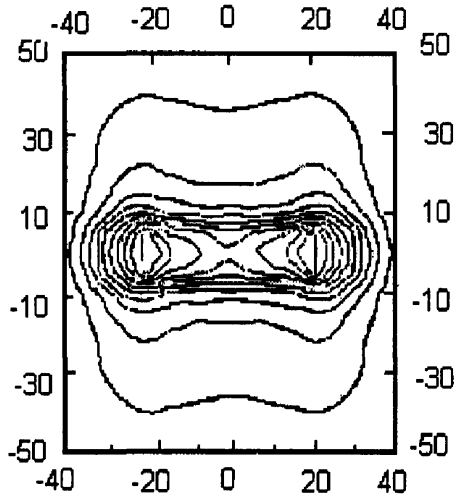
### Frekans Bağımlılığı

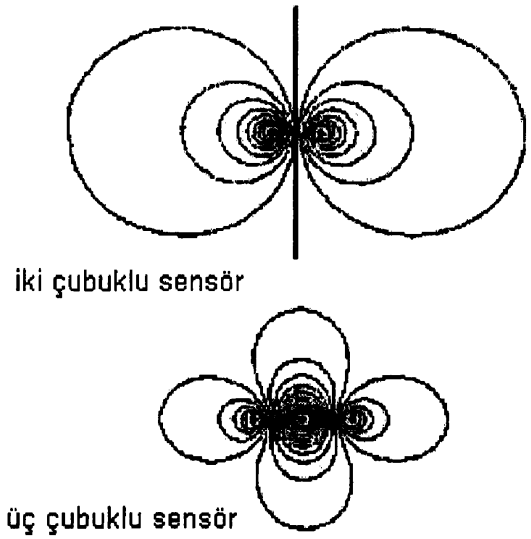
Toprak hacimsel nem içeriği ile dielektrik geçirgenliği ilişkisi $\theta[\varepsilon]$, frekansa bağlı olmaktadır. Bir TDR pulsu üretimi, bir frekans aralığı gerektirir. Maksimum frekansla elde edilebilecek yüksek zamanlı puslarla ilk yerde hassasiyet sağlanmaktadır. Tektronix 1502 B tipi kablo test edicisi, maksimum 5 GHz lik bir frekans gerektiren 200 ps lik yüksek zamanlı bir puls istemektedir. Etkili en yüksek frekans, kablo ve bağlantıların kalitelerine ve uzunluklarına bağlı olarak kablo ve bağlantılarda meydana gelen kayıplar nedeniyle genellikle 1 GHz in altında alınmaktadır (Heimovaara, 1994). En düşük TDR frekansı yaklaşık 20 KHz dir. Bu 20 KHz frekansta siga ölçen yeni bir frekans etkili probun (FD) hacimsel toprak nemi ile dielektrik sabiti ilişkisi $\theta[\varepsilon]$,oldukça farklıdır (Dirksen and Hilhorst, 1994). Radar bandı (frekans > 0.5 GHz) elektromanyetik dalgaları için de $\theta[\varepsilon]$ ilişkisi diğer ilişkilerden farklıdır (Dobson et al., 1985).

**Ölçüm Hacmi**

Toprakta net geçiş zamanı, ölçülmekte olan toprak hacminin ortalama su içeriğinin iyi bir ölçüsüdür. Ölçülen hacim, prob çubukları ucundan öteye fazla yayılmamakta ve enine kesitte dalga şeklinin oluşumuna eşit şekilde katkı sağlamamaktadır. Şekil 4a iki çubuklu prob için ölçülmüş nispi alanı (Baker and Lascano,1989) ve Şekil 4b iki ve üç çubuklu problar için teorik elektriksel alan dağılımını göstermektedir (Zegelin et al., 1989). Bu sonuçlar ölçülen hacmin enine kesitinin çubuklar arası mesafenin yaklaşık iki katı kadar olan bir elips olduğunu göstermektedir.

TDR ölçümlerinde topraktaki hava boşlukları veya problar etrafında öngörülemeyen heterojenlikler potansiyel bir hata kaynağıdır. Knight (1992) çubuk çapı çubuklar arası aralığa göre küçükse, bir "çeper etkisi" oluşacağını ve çubukların çevresinde yüksek enerji yoğunluğu meydana geleceğini teorik şekilde göstermiştir. Knight, çubuklar etrafındaki üniformsuzlukların ve zararlanmaların etkisini azaltmak için çubuk çapının mümkün olduğunca büyük olmasının iyi olacağını fakat çubuklar arası aralıkla olan oranın 10 dan daha büyük olmamasını önermektedir (Dircsen, 1995).




a) İki çubuklu prob için ölçülmüş nispi alan

b) İki ve üç çubuklu problar için teorik elektriksel alan dağılımı.

Şekil 4

**Prob Boyu**

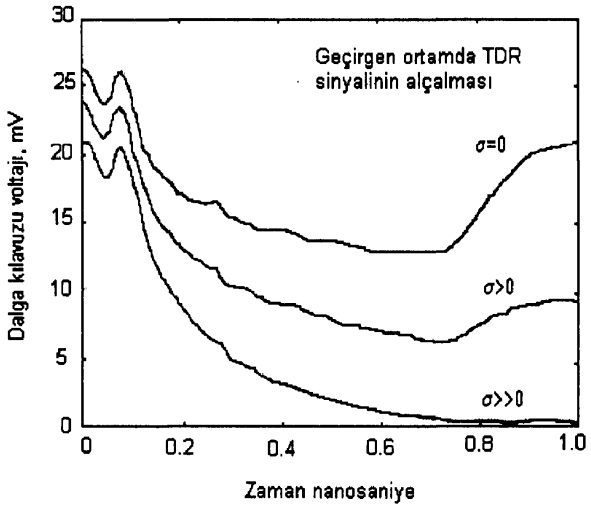
Yeterli doğrulukta geçiş zamanının ölçülebilmesi için, probların çok kısa olması istenmemektedir. Genellikle uygulamadaki prob boyu sınırı 10 cm ve mutlak minimum prob

boyu sınırı 5 cm olarak alınmaktadır. Prob boyunun prensipte üst sınırı bulunmamaktadır. Kumlu fakat tuzlu olmayan topraklarda 100 cm boyundaki problar başarılı şekilde kullanılmaktadır. Birbirine yakın farklı boylardaki problar düşey olarak yerleştirilerek farklı toprak katmanlarındaki su içerikleri hesaplanabilir. Toprak tabakaları veya prob çubukları boyunca ıslanma cepeleri direnç değişimlerine neden olabilir. Prob çubuklarının paralelliği, su içeriği ölçümleri için kritik olarak bulunmamıştır.

**Toprak Tuzluluğu ve Dalga Şekli Alçalması**

TDR, toprak nemini ölçmek için doğru, hızlı ve toprak yapısına zarar vermeyen bir yöntem olması nedeniyle yaygın bir şekilde kabul görmüştür. Hacimsel su içeriği ile havaya göre toprakta dalga yayılım zamanının gecikmesi arasında doğrusal bir ilişki olduğu bulunmuştur. Toprak çözeltisinin elektriksel iletkenliği ($EC_w$) veya toprak saturasyon çözeltisinin elektriksel iletkenliği ($EC_e$) veya hacimsel toprak elektriksel iletkenliği ($\sigma$) terimlerinde yaygın şekilde gösterilmekte olan toprak tuzluluğu, TDR ile nem ölçülmesini birkaç şekilde etkilemektedir. Sürekli akım tarafından enerji kaybı oluşması nedeniyle dalga şeklini alçaltmakta, daha uzun çıkış zamanıyla sonuçlanan sinyal dağılmasına neden olmakta ve ortamın açık dielektrik katsayısını artırmaktadır. Şayet toprak elektriksel iletkenliği belirli bir eşik değerini geçerse, bu etkiler önemli ölçüm hatalarına neden olabilir. Malicki et al. (1994), zaman gecikmesi ölçümleriyle belirlenmekte olan bir siltli tınlı toprağın dielektrik sabiti ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkinin, toprak solüsyonu elektriksel iletkenliğinin $EC_w$=10dS/m'nin üstünde olduğunda normalden sapma gösterdiğini bildirmişlerdir (Sun et al., 1999).

TDR dalga şekilleri, iyon geçirgenlikleri ve dielektrik kayıplar nedeniyle Şekil 5'de görüldüğü gibi alçalmaktadırlar. Elektromanyetik TDR pulsunun alçalması, yayılma hızını etkilememektedir fakat prob çubukları sonundaki yalnızca uzun yansımayla yapılabilen su içeriği ölçümleri doğru bir şekilde belirlenebilir. Bu belirleme Şekil 5'de görülen $\sigma>>0$ için artık geçerli olmaz. Bu yansıma, prob boyu, su içeriği, kil içeriği ve tuzluluk arttıkça daha da artmaktadır. Dalton ve Van Genuchten (1986), iletilen pulsun en azından %10'nu yansımış puls büyüklüğünde tutmak için toprak suyu elektriksel geçirgenliği ve su içeriğinin fonksiyonu şeklinde maksimum paralel çubuk uzunluklarını hesaplamışlardır. Çubukların yalıtım malzemesiyle kaplanmasıyla dalga alçalması başarılı bir şekilde düşürülmektedir.




Şekil 5. Geçirgen ortamlarda TDR sinyalinin alçalması

Dalton ve ark. (1984) tuzluluktan kaynaklanan dalga alçalmasının kantitatif olarak toprak yığınının elektriksel iletkenliğinin bir ölçüsü olarak yorumlanabileceğini göstermişlerdir. Sonuç olarak, TDR ve nötron ölçümlerinin, TDR ve dört problu ölçümlerinin iyi uyum sağladığı gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR


Anonymous., Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and tecniques. Thematic Paper, pp.19-29. INRA, CIRAD.

Anonymous, 2000. Trace Operation Instructions. Soil Moisture Equipment Corp. 801 S. Kellogg Ave. Goleta. CA 93117.

Dalton, F.N., 1992. Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk electrical conductivity. Soil Science Society of America, pp 143-167.

Dalton, F.N. and M.Th. van Genuchten, 1986. The time domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. Geoderma 38: 237-250.

Dirksen, C., 1995. Dielectric Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurements. International Atomic Energy Agency, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization and International Centre for Theoetical Physics, 11-29 September 1995, Italy.

Dirksen, C. and Dasberg, S., 1993. Improved calibration of time domain reflectometry soil water measurements. Soil Sci. Soc. Am. J., 57: 660-667.

Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T. and 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.

Gardner, H., 1986. Water content. In: A.Klute and R.C. Dinauer (eds.), Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy 9.1. American Society of Agronomy, Madison, pp. 771-798.

Heimovaara, T.J., 1994. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils. Water Resourses Res. 27: 189-199.

Heimovaara, T.J. and Bouten, W., 1990. A computer-controlled 36-channel time-domain reflectometry system for monitoring soil water contents. Water Resources, Res. 26: 2311-2316.

Hoffman, G.J., Howell, T.A and Solomon, K.H., 1992. Management of Farm Irrigation Systems. ASAE Monograph Number 9.

Kabat, P. and Beekma, J., 1994. Drainage Principles and Applications. ILRI Publication 16, pp 383-434,The Netherlands.

Malicki , M.A., Walczak, R.T., Koch, S. and Fluhler, H., 1994. Determining soil salinity from simultaneous readings of its electrical conductivity and permittivity using TDR. Pages 328-336 in Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications. United States Department of Interior Bureau of Mines, Northwestern University, Evanston, IL.

Nasuhoğlu, R. ve Tokmakçıoğlu, E., 1990. Modern Üniversite Fiziği, Elektrik, Cilt 2. Çağlayan Kitabevi, Beyoğlu-İstanbul.

Öztürk, H., 1997. Water Transport and Ion Mobility From CCA Spillage in A Heavy Sandy Clay and A Potting Soil. University of Gent, Faculty of Agriculture and Applied Biologcical Sciences, International Center for Eromology.

Öztürk, H.S. and Hartmann. R., 2002. Monitoring the Soil Water Content Using Time Domain Reflectometry in a Clay Loam and an Organic Soil. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi, 8 (2) 122-127.

Ritzema, H.P., 1994. Drainage Principles and Applications. ILRI Publication 16, The Netherlands.

Sun, Z.J., Young, G.D., McFarlane, R.A. ve Chambers, B.M., 1999. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time-domain reflectometry in sandy soil. Canadian Journal of Soil Science, p 13-22.

Zegelin, S.J.and White, I.,1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry, Water Resources Res., 25, 2367-2376.