

TOPRAĞIN NEM TAYİNİNDE KULLANILAN YENİ BİR YÖNTEM TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY)

Taşkın ÖZTAŞ⁽¹⁾

ÖZET: *Tarla koşullarında bitkiye yararlı su miktarının saptanması, laboratuvar koşullarında ise toprağın fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi için toprağın nem içeriğinin tayin edilmesi gerekmektedir. Son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan TDR yöntemiyle, toprakların dielektrik özelliklerinin ölçülmesi yoluyla volumetrik nem içerikleri daha kolay, daha güvenli ve kısa sürede belirlenebilmektedir. Bu yöntem, toprağa birbirlerine paralel olarak yerleştirilen metal çubuklar vasıtasıyla bir voltaj kaynağından gönderilen elektromanyetik dalgaların toprak içerisinde iki nokta arasındaki seyahat zamanının ölçülmesi esasına dayanmaktadır.*

GİRİŞ

Toprağın nem içeriği bitki gelişmesini, bitki besin elementlerinin toprak profili boyunca dağılımlarını, toprak havalanmasını, infiltrasyonu ve yüzey akışı doğrudan etkiler. Toprağın plastiklik, kıvam ve şişme-büzülme gibi mekaniksel özellikleri de nem içeriğinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, toprağın nem içeriğinin belirlenmesi toprak, hidroloji ve mühendislik çalışmalarında temel bir ihtiyaçtır. Tarla koşullarında bitkiye yararlı su miktarının saptanması, laboratuvar koşullarında ise toprağın fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi için toprağın nem içeriğinin tayin edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, bugüne kadar çok sayıda ve değişik metotlar kullanılmış ve halen yeni yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde büyük gayretler sarf edilmektedir.

Toprağın nem tayininde kullanılan yöntemler işlevlerine göre suyun kütlelerinin belirlenmesi prensibini dayanan direkt yöntemler ve toprak nem içeriğine bağımlı herhangi bir toprak özelliğinin ölçülmesi prensibine dayanan indirekt yöntemler olarak iki grupta toplanmaktadır.

Direkt yöntemler gravimetrik yöntemler olup, bu yöntemlerde topraktaki su bir toprak örneğinden buharlaştırma, 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 makroporların oluşmasına yol açmakta, bu durum ise toprak nem rejiminin değişmesine sebebiyet verebilmektedir (Kutilek ve Nielsen, 1994). Diğer bir

(1) Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü, 25240-Erzurum.

dezavantajı ise, değişik zamanlarda alınan toprak örneklerinin nem içeriklerindeki farklılıkların, hem toprak nemindeki varyasyonu hem de toprağın heterojen yapısından kaynaklanan varyasyonu yansıtacak olmasıdır. Gravimetrik yöntemin en önemli özelliği ise indirekt yöntemlerin kalibrasyonu için başvuru standart bir yöntem olmasıdır.

İndirekt yöntemlerde, toprağın belli fiziksel ve fizikokimyasal özelliklerinin su miktarına bağlı olarak değişimleri esas alınmaktadır. Bu yöntemlerin bir çoğunda nem tayini ya toprağa yerleştirilmiş kalıcı sensörler veya toprakta açılmış özel yuvalar içerisinde okuma anında yerleştirilen sensörler yardımıyla 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 sık ve sürekli ölçüme olanak sağlamalarıdır. Ayrıca, toprağın nem içeriği sensörün okunmasıyla birlikte belirlenmiş olmaktadır. İndirekt yöntemler arasında, elektriksel iletkenlik yöntemi, termal iletkenlik yöntemi, nötron yöntemi ve gamma-ışınları zayıflama yöntemi önemli bir yer tutmaktadır.

Bu derleme, son zamanlarda toprak nem tayininde büyük bir güvenle ve yaygın olarak kullanılmaya başlanan TDR (Time Domain Reflectometry) yönteminin çalışma prensibini açıklanmak amacıyla hazırlanmıştır.

TDR YÖNTEMİNİN TEMEL PRENSİPLERİ

TDR yöntemi, toprağa birbirlerine paralel olarak yerleştirilen metal çubuklar (probe, sensör, iletken) vasıtasıyla bir voltaj kaynağından gönderilen elektromanyetik dalgaların (sinyallerin) toprak içerisinde iki nokta arasındaki seyahat zamanının ölçülmesi esasına dayanır. Elektromanyetik sinyalin metal çubuğun iki ucu arasındaki iletişim zamanı ortamın dielektrik sabiti (ϵ) ile ilişkilidir. Bu sabite toprağın iletkenlik yeteneği (soil permittivity) olarak tanımlanmaktadır (Hartmann, 1996).

Dielektrik Sabiti ile Toprak Nemi Arasındaki İlişki

Herhangi bir maddenin dielektrik sabiti o maddenin moleküllerinin elektriksel ortamda polarize olmalarına bağlıdır ve bu nispi dielektrik katsayısının kuantitatif olarak ölçülmesi ile tanımlanabilmektedir (Kutilek ve Nielsen, 1994). Eğer bir maddeyi oluşturan moleküller kalıcı dipol özellik taşıyorsa elektriksel ortamda bunu gösterirler. Bir cismin dielektrik sabitesi, iki elektrik yük arasındaki elektrostatik kuvveti azaltan miktardır (Berkem ve ark., 1994). Yani, dielektrik sabitenin büyüklüğü oranında iki yük arasındaki kuvvet o derece azdır. Her materyalin bir dielektrik sabite değeri vardır. Bir başka ifadeyle, her materyal kendisine ulaşan elektromanyetik akımı yavaşlatma yeteneğine sahiptir. Bu değer 1 ile 81 arasında değişmektedir. Su molekülleri, dipolar momente sahiptir ve dielektrik sabitesi 81 dir. En düşük değer ($\epsilon=1$) ise havaya aittir. Toprağın katı fazı için dielektrik sabite değeri 3 ile 5 arasında değişmektedir (Hartmann, 1996). Toprak katı, sıvı ve gaz fazından oluştuğuna göre katı faz

sabit olduğu durumda bu karışımın ϵ değeri doğrudan toprağın nem içeriğinin bir fonksiyonudur (Kutilek ve Nielsen, 1994). Mineral bir topraktaki gözeneklerin büyük bir kısmının hava, geriye kalan kısmının da su ile dolu olduğu durumda ortamın dielektrik sabite değeri 3 ile 6, buna karşılık gözeneklerin büyük bir kısmının su ve geriye kalan kısmının da hava ile dolu olduğu durumda ise 40 ile 50 arasında değişmektedir (Soil Moisture Equ. Corp. Manual, 1995).

Bu yöntemde, TDR sensörü elektromanyetik sinyalin taşıyıcısı, toprak ise dielektrik ortam olarak işlev görür. Dolayısıyla, dielektrik sabitenin ölçülmesi toprak neminin dolaylı yoldan belirlenmesine olanak sağlar.

Dielektrik Sabiti ile Elektromanyetik Sinyalin Hızı Arasındaki İlişki

Toprağa gömülen birbirine paralel metal çubuklar boyunca 50 MHz'nin üzerinde frekansa sahip elektromanyetik sinyalin hızı (Kutilek ve Nielsen, 1994);

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

Burada c ışık hızı (3.10^8 m/sn) dır.

Metal çubuk boyunca gönderilen sinyalin hızının direkt olarak ölçülememesine karşılık, sinyalin hareket ettiği çubuğun uzunluğu belirlenebilmektedir. Metal çubuğun başlangıç noktasından yani elektromanyetik sinyalin toprağa girdiği andan itibaren metal çubuğun sonunu yakalayıp kaynağa geriye yansıtıldığı ana kadar geçen süre sinyalin geçiş zamanı (t) olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda hız;

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

olur ve yukarıdaki eşitlikte yerine konulup ϵ için çözüldüğünde;

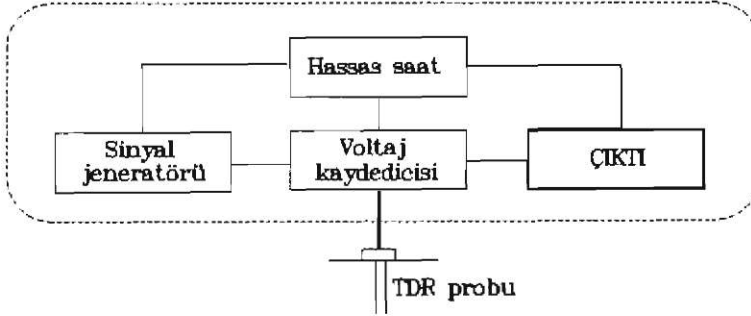
$$\epsilon = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2$$

elde edilmiş olur. Bu durumda, eğer sinyalin geçiş zamanı tespit edilebilirse, ϵ için bir değer elde etmek mümkün olacaktır. Ortamın dielektrik sabitinin, TDR probunun uzunluğu boyunca gönderilen sinyalin seyahat zamanını etkilemesi ve doğrudan toprağın nem içeriğinin bir fonksiyonu olması nedeniyle, toprağın volumetrik nem içeriği de indirekt yoldan belirlenmiş olur.

TDR Ünitesinin Bileşenleri

Bir TDR ünitesi 5 temel bileşenden oluşmaktadır (Şekil 1).

1. Sinyal jeneratörü
2. Voltaj kaydedicisi
3. Zaman kaydedicisi (Hassas saat)
4. Bilgisayar donanımı
5. Kablolar



Şekil 1. Bir TDR ünitesinin temel bileşenleri. (Santini ve D'urso, 1996' dan uyarlanmıştır).

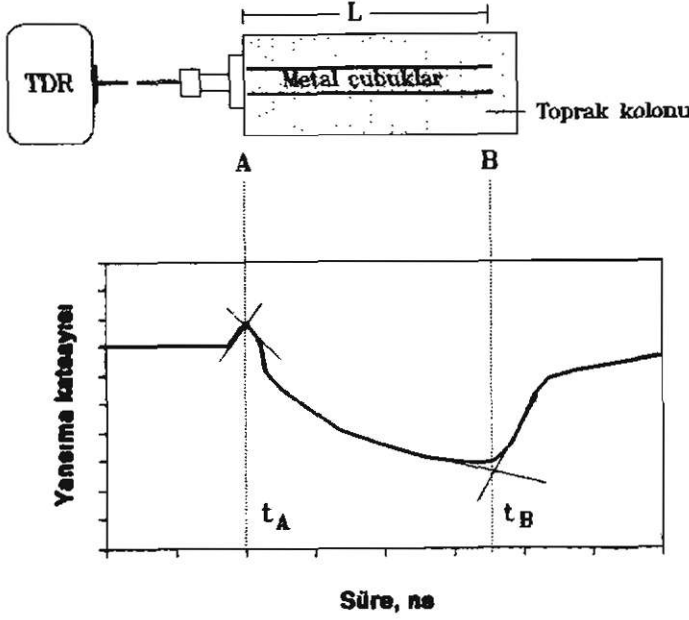
Figure 1. A schematic diagram of TDR apparatus (Adapted from Santini and D'urso, 1996).

Sinyal jeneratörü elektromanyetik akımı üretmekte, voltaj kaydedicisi toprağa gömülen metal çubuk üzerindeki voltajı belli aralıklarla ölçmekte, zaman kaydedicisi ise sinyalin seyahat zamanını kaydettiği gibi her iki sistemin kontrol edilmesini de sağlamaktadır. Bilgisayar donanımı ölçülen verilerin ve elde edilen görüntülerin kayıt edilmesini, kablolar ise TDR ünitesi ile toprağa gömülen metal çubuklar arasındaki bağlantıyı sağlamaktadırlar. TDR kablosu ile metal çubukları birbirlerine bağlayan noktada kısmi yansımaya engel olmak ve açığa çıkan enerjinin büyük bir bölümünü toprağa aktarabilmek için balon adı verilen bir ayarlayıcı (transformer) mevcuttur.

TDR Yönteminde Ölçüm

TDR yönteminde, metal çubuklar birbirlerine paralel olacak şekilde toprak içerisine düşey, yatay veya herhangi bir açı ile yerleştirildikten sonra kaynaktan gönderilen elektromanyetik sinyalin ekrana yansıyan görüntüsünün analizinden toprağın nem içeriği tahmin edilir. Gönderilen dalga metal çubuk boyunca ilerler ve ilerleme hızı ortamın dielektrik sabitesine bağlıdır. Sinyalin şiddeti zaman ilerledikçe dereceli olarak azalır. Sinyal metal çubuğun sonunu yakaladığı anda TDR ünitesindeki kaydediciye geriye yansıtılır ve bunun sonucu olarak voltaj artar. TDR ünitesinin zaman kaydedicisi giriş voltajını ve geri dönen

yansıma voltajı sinyalin başlangıcından itibaren geçen sürenin bir fonksiyonu olarak kaydeder. Bu değişim bir dalga şeklinde ekrana yansıtılır (Şekil 2). Topraktaki elektro-manyetik sinyalin hızı kullanılan metal çubuğun uzunluğu ve sinyalin metal çubuk sonuna vardığında kaynağa gönderilen yansıma için geçen süreden hesaplanır.



Şekil 2. Elektromanyetik sinyalin TDR ekranındaki görüntüsü (Hartmann, 1996'dan uyarlanmıştır).

Figure 2. Display of an electromagnetic pulse on the TDR screen (Adapted from Hartmann, 1996).

Görüntü Analizi

Toprağa yerleştirilen metal çubuklar yardımıyla taşınan elektromanyetik sinyalin TDR ekranındaki yansıması Şekil 2' de görülmektedir. Buradaki TDR kaydı zamanın bir fonksiyonu olarak kaynaktan gönderilen voltajın yansıyan voltaja oranı olarak tanımlanan yansıma katsayısındaki değişimi göstermektedir (Santini ve D'urso, 1996). A noktasından önceki düz kısım kablunun uzunluğu ile ilgilidir ve ilgi alanı dışındadır. Elektromanyetik sinyal kablo ile metal çubukları bağlayan reçineden yapılmış kısımdan geçerken çok belirgin bir pik oluşturur. Bu nedenle ayrımı son derece basittir. A noktası sensörün toprağa girişinde oluşan geçirgenlik değişiminden dolayı meydana gelen ilk yansımayı gösterir ve bu nokta kablo boyu ile daima aynıdır. B noktası ise nem içeriğine bağlı olarak değişir ve metal çubuğun sonundaki yansımayı

gösterir. Toprakta geçen net zaman aralığı (t), A ve B noktaları arasındaki zaman farkıdır. A ve B noktaları arasındaki çoklu yansımaların analizi oldukça zordur ancak bunun nem içeriğinin ölçümü açısından önemi yoktur (Santini ve D'urso, 1996).

Grafik üzerinde A noktasının tayini çok açık olarak belirlenebilmesine karşılık B noktasının belirlenmesinde bazı zorluklar görülebilmektedir. Özellikle metal çubuğun son kısmında enerji kaybından dolayı voltaj yükselmesi çok hızlı olmayabilir. Bu durum özellikle killi ve tuzlu topraklarda kullanımlarına ve metal çubuğun uzunluğunun 35-40 cm den daha fazla olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu belirsizlikleri ortadan kaldırmak ve B noktasının yerini doğru olarak belirleyebilmek için yatay olarak ilerleyen eğri ile yükselmeye başlayan kesimin tanjant hatlarının kesiştirilmesi en pratik yol olarak gösterilmektedir (Heimovaara, 1993).

TDR Ölçümlerinden Volumetrik Nem İçeriğinin Hesaplanması

TDR, yönteminde toprak nem içeriği ile dielektrik sabite değeri arasındaki ilişkiyi ifade eden kalibrasyon eğrisine ihtiyaç vardır. TDR ünitesinin kaydetmiş olduğu dielektrik sabiti (ϵ) ile toprağın volumetrik nem içeriği (θ) arasındaki ilişkiyi belirlemek için geliştirilmiş eşitlikler arasında Topp ve ark. (1980) tarafından geliştirilen ve aşağıda verilen 3. dereceden polinom eşitliği universal olarak kullanılmaktadır.

$$\theta = - 5.3.10^{-2} + 2.91.10^{-2} \epsilon - 5.5.10^{-4} \epsilon^2 + 4.3.10^{-6} \epsilon^3$$

Bu eşitlik, nem aralığının 0.05-0.60 olduğu ve toprağın kil içeriği ve organik madde içeriğinin çok yüksek olmaması durumunda mineral topraklarda çok iyi sonuçlar vermektedir. Ölçülen dielektrik sabite değeri ve kullanılan metal çubuğun uzunluğunun söz konusu eşitlik esas alınarak hazırlanan çevirim tablosunda çakıştırılması yoluyla toprağın volumetrik nem içeriği anında belirlenebilmektedir (D'urso, 1996).

Diğer yandan, organik topraklar için Herkelrath ve ark. (1991) tarafından geliştirilen eşitlik kullanılabilirliği gibi gerekli görüldüğü takdirde killi veya organik topraklar için lokal kalibrasyon eşitlikleri de geliştirilip kullanılabilir.

TDR Yöntemi ile İlgili Önemli Notlar

1. Sinyalin seyahat zamanı probun geometrik özelliklerine ve toprak tipine karşı çok duyarlı olmadığından tek bir kalibrasyon eşitliği bir çok uygulamada başarıyla kullanılabilir (Santini ve D'urso, 1996).
2. Elektromanyetik sinyalin geçiş zamanının çok kısa olması nedeniyle (nanosecond hassasiyetle = 10^{-9} s) ölçüm tekniğinin elektronik donanımı oldukça pahalıdır.

3. TDR yöntemiyle belirlenen volumetrik nem değeri, toprağa gömülen metal çubuklar arasındaki açıklığın 1.4 katı çapa sahip bir silindirin hacmine eşit toprağın ortalama nem içeriğini ifade etmektedir (Topp ve Davis, 1985).
4. TDR yönteminde metal çubukların çapı ve çubuklar arasındaki mesafe çok önemlidir. Kullanılan metal çubuklar arasındaki mesafenin 10 cm den daha az ve çaplarının ise 5-6 mm olması önerilmektedir (Santini ve D'urso, 1996). Metal çubukların çapının çubuklar arasındaki açıklığa oranının ise en fazla 0.1 olması öngörülmektedir (Knight, 1992).
5. Taşınma zamanının ekrana yansıtılan grafik üzerinden doğru olarak tespit edilebilmesi için metal çubuğun uzunluğunun yaklaşık 10 cm olması gerekmektedir (Kutilek ve Nielsen, 1994). Pratikte 10, 20 ve 30 cm'lik çubuklar yaygın olarak kullanılmaktadır.
6. Toprağa gönderilen sinyalin toprak tarafından yavaşlatılması kullanılacak probun uzunluğunu sınırlandırmaktadır. Toprağın nem içeriğinin veya tuz konsantrasyonunun yüksek olduğu durumlarda ortamın elektriksel iletkenliği artacağından, bu durum gönderilen sinyalin geriye yansıtılmadan önce yok olmasına neden olur (Kelly ve ark.,1995). Dolayısıyla, söz konusu topraklarda kısa probların kullanılması zorunludur.
7. TDR eğrisindeki yorumu güçleştiren en önemli konu metalik çubuğun temsil ettiği ortamda nem içeriğindeki değişimin çok fazla olması veya farklı toprak katmanlarının bulunması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Çünkü bu durum eğrideki yansımaların artmasına ve dielektrik kesikliğe neden olmaktadır. Eğer toprakta iletkenin yerleştirildiği toprak gövdesinde nem içeriği bakımından heterojen bir durum mevcut ise TDR okuması iletken boyunca nem değişiminin tartılı nem içeriğini ifade etmekten ziyade iletken boyunca en kuru bölgenin nem içeriğine yakın bir değer vermektedir (Hokett ve ark., 1992). Dolayısıyla ölçülen nem içeriği toprağın mevcut nem içeriğinden daha düşük olmaktadır. Bu nedenle, farklı nem içeriğine sahip katmanlardan oluşan topraklarda iletkenin toprağa düşey değil yatay olarak yerleştirilmesi önerilmektedir.
8. TDR yöntemi toprakta ortamın dielektrik özelliklerinden yararlanılarak nem içeriklerinin belirlenmesinde kullanılmasının yanı sıra iletken üzerinde gönderilen sinyalin zayıflaması prensibinden yararlanılarak toprağın elektriksel iletkenliğinin ölçülmesinde de başarıyla kullanılmaktadır (Dalton ve ark., 1986; Nadler ve ark., 1991).
9. TDR yönteminin en önemli avantajlarından bir diğeri de yüzey topraklarının nem içeriklerinin kolaylıkla tayin edilebilmesine imkan sağlamasıdır. Yüzey toprağın nem içeriğinin belirlenmesi yoğun bir örnekleme zorunlu kılmaktadır.

Gravimetrik yöntemle nem tayini hem yüzeyin bozulmasına neden olacak hem de zaman alıcı ve masraflı olacaktır. Diğer yandan nötron yöntemi de yüzey topraklarında iyi sonuç vermemektedir. Bu durum TDR yönteminin önemini kat kat artırmaktadır. Nielsen ve ark. (1995) toprağın 2.5 cm derinliğine yatay olarak yerleştirdikleri TDR probları vasıtasıyla birer saat aralıklarla nem içeriğindeki değişimleri incelemiş, ölçülen nem değerlerinin gravimetrik yöntemle belirlenen nem içeriği ile yüksek bir ilişki verdiğini kaydetmişlerdir ($r^2=0.84$).

10. TDR yönteminde kullanılan iletkenler 2 veya 3 çubuklu olabilirler. 3 çubuklu olması yansımanın daha belirgin olmasına olanak sağlamaktadır (Heimovaara, 1993).
11. Çubukların profil boyunca sabitleştirilip ihtiyaç duyulduğunda kablo uçlarının toprak yüzeyindeki TDR ünitesine bağlanarak ölçüm yapılması da mümkündür.
12. TDR ünitesinin görüntü kaydını otomatik olarak yorumlayan özel bir ilaveden dolayı TDR eğrisinin görsel yorumuna ihtiyaç kalmamıştır (Heimovaara ve Bouten, 1990).

KAYNAKLAR

- Berkem, A.R., S. Baykut ve M.L. Berkem. 1994. Fizikokimya. Cilt 1., II.Yayın No. 3628. İstanbul, s. 555.
- Dalton, F.N., and M.Th.van Genuchten. 1986. Time Domain Reflectometry Method for Measuring Soil Water Content and Salinity. *Geoderma*. 38:237-250.
- Demiralay, İ. 1977. Toprak Fiziği Ders Notları. Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Erzurum.
- D'urso, G. 1996. Personal Communication. Adana.
- 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.
- Hartmann, R. 1996. Soil Water Content and Potential Measuring Techniques. In *Advanced Short Course on Soil Water Balance and Transport Processes*. p. 59-105, 9-20 September, 1996. Adana, Turkey.
- Heimovaara, T.J. 1993. Design of Triple-Wire Time Domain Reflectometry Probe in Practice and Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1410-1417.
- Heimovaara, T.J., and W. Bouten. 1990. A Computer Controlled 36 Channel Time Domain Reflectometry System for Monitoring Soil Water Contents. *Water Resour. Res.* 26:2311-2316.
- Herkelrath, W.N., S.P. Hamburg, and F. Murphy. 1991. Automatic Real Time Monitoring of Soil Moisture in a Remote Field Area with Time Domain Reflectometry. *Water Resour. Res.* 27:857-864.
- Hokett, S.L., J.B. Chapman, and S.D. Cloud. 1992. Time Domain Reflectometry Response to Lateral Soil Water Content Heterogeneities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:313-316.
- Kelly, S.F., J.S. Selker, and J.L. Green. 1995. Using Short Moisture Probes with High-Bandwidth Time Domain Reflectometry Instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:97-102.

- Knight, J.H. 1992. Sensitivity of Time Domain Reflectometry Measurements to Lateral Variations in Soil Water Content. *Water Resour. Res.* 28:2345-2352.
- Kutilek, M. ve D.R. Nielsen. 1994. *Soil Hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Germany. p.370.
- Nadler, A., S. Dasberg, and I. Lapid. 1991. Time Domain Reflectometry Measurements of Water Content and Electrical Conductivity of Layered Soil Columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:938-943.
- Nielsen, D.C., H.J. Lagae, and R.L. Anderson. 1995. Time Domain Reflectometry Measurements of Surface Soil Water Content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:103-105.
- Santini, A. ve G. D'urso. 1996. The Time Domain Reflectometry : Theory, Prenciples and Applications. In *Advanced Short Course on Soil Water Balance and Transport Processes*. p.106-130. 9-20 September, 1996. Adana, Turkey.
- Soil Moisture Equ. Corp. Manual.** 1995. Instruments for the Measurment of Moisture and Dielektrik Properties Using Time Domain Reflectometry. Santa Barbara, California. USA.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan.** 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: **Measurements in Coaxial Transmission Lines.** *Water Resour. Res.* 16:574-582.
- Topp, G.C., and J.L. Davis.** 1985. **Measurement of Soil Water Using Time Domain Reflectometry (TDR): A Field Evaluation.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:19-24.