# TARIM ALANLARINDA TUZLULUĞUN BELİRLENMESİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

G. Duygu Kesmez[1] Donald. L. Suarez[2]
Scott M. Lesch[2] Ali Ünlükara[3] Engin Yurtseven[4]

1Araş. Gör., Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü. DuyguKesmez@agri.ankara.edu.tr
2 Dr., USDA-ARS E. Brown Jr. Salinity Laboratory, 450 W. Big Spring Rd.
3Yrd. Doç. Dr., Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü.
4 Prof. Dr., Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü.

## ÖZET

Yeryüzünde kurak ve yarı-kurak alanlarda yaygın olarak tuzluluk sorunuyla karşılaşılmaktadır. Tuzluluk nedeniyle her yıl kaybedilen alan oranı, sulamaya açılan alan oranını geçmiştir. Tuzluluğun kontrol edilebilmesi için gerekli toprak ve su yönetim kararlarının alınması, tuzluluk düzeyinin ve yayılımının zamanında bilinmesini gerektirmektedir. Toprak tuzluluğu ($EC_e$) geleneksel olarak, laboratuarda toprak saturasyon çamuru ekstraktının elektriksel iletkenliğinin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Toprak tuzluluğu aynı zamanda toprak suyu örneğinden elektriksel iletkenlik ölçümü ile de bulunabilmektedir ($EC_w$). Ancak klasik yöntemle toprak tuzluluğunun belirlenmesi çok zaman alıcı ve yorucu olması yanında tuzluluğun sürekli takip edilmesinin gerektiği büyük alanlarda pratik olmamaktadır. Alternatif olarak toprak tuzluluğu dolaylı şekilde, toprağın saturasyon çamuru elektriksel iletkenliğinin ($EC_p$) arazide veya laboratuarda ölçülmesiyle veya toprağın hacimsel elektriksel iletkenliğinin ($EC_a$) arazide ölçülmesiyle belirlenebilmektedir. $EC_a$ değeri arazide ya toprağa yerleştirilen elektrotlar yardımıyla veya elektromanyetik dalgalar yayan cihazlarla uzaktan algılamayla yoluyla ölçülebilmektedir. Arazi ölçüm yöntemleri GIS tabanlı yapıldığı için tuzluluğun ölçüm yapılan alandaki yayılımı haritalanabilmekte ve yersel olarak değişimi değerlendirilebilmektedir. Arazide $EC_a$ ölçümünde kullanılan cihazlar pahalı olmasına karşın sağladığı yersel değişkenlik bilgileri nedeniyle son derece verimlidirler. Uygun yazılım ile $EC_p$ ve $EC_a$ ölçümleri toprak tuzluluğuna ($EC_e$ veya $EC_w$) dönüştürülebilmektedir. Kullanılacak algılayıcılar ve yöntemler, tuzluluğu belirlemenin amacına, ele alınacak alanın büyüklüğüne, gerek duyulan ölçüm sıklığı ve sayısına, istenilen doğruluğa ve mevcut ekipman/insan kaynaklarına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada tuzluluğun belirlenmesinde son zamanlarda yaygın şekilde kullanılmakta olan elektrik ve elektromanyetik yöntemler ve algılayıcıları, hakkında bilgi verilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar kelimeler**: *toprak tuzluluğu, EM38, dört prob, ECa, ECe, ESAP*

.

**ABSTRACT**
Customarily, soil salinity has been defined and assessed in terms of laboratory measurements of the electrical conductivity of the extract of a saturated soil-paste sample. Soil salinity can also be determined from the measurement of the electrical conductivity of a soil-water sample ($EC_w$). Alternatively, salinity can be indirectly determined from measurement of the electrical conductivity of a saturated soil-paste ($EC_p$) or from the electrical conductivity of the bulk soil ($EC_a$). $EC_p$ can be measured either in the laboratory or in the field using simple and inexpensive equipment. $EC_a$ can be measured in the field either using electrical probes (electrodes) placed in contact with the soil or remotely using electromagnetic induction devices. The latter two sensors are more expensive than those used to measure the EC of water samples, of soil-extracts or soil-pastes. However, their use is much cost effective when one considers the amount of spatial information that can be acquired with them. From measurements of $EC_p$ and $EC_a$, soil salinity can be deduced in terms of either $EC_e$ or $EC_w$. The appropriate sensor and method to use depends upon the purpose of the salinity determination, the size of the area being evaluated, the number and frequency of measurements needed, the accuracy required and the available equipment/human resources (Rhoades et. al. 1999).
**Key words;** *Soil salinity assessment, EM38, four electrode-probes, ECa, salinity mapping,*

## GİRİŞ

Tarımın birincil amaçlarından birisi insanlığın gıda ve lif ihtiyaçlarının karşılanmasıdır. Gelecekte gıda üretiminde beklenen artışlar önemli oranda doğru sulamaya ve sulama yönetimine, mevcut tarımsal kaynak tabanının ve çevrenin uygun kullanımına bağlıdır (Rhoades et al. 1992). Global açıdan sulanan alanlar, dünya gıda ihtiyacının çok önemli bir kısmını karşılamaktadır. Dünya tarım alanlarının %15'i hali hazırda sulanırken bu alanların dünya gıda ihtiyacına katkısı kabaca %35-40 civarındadır (Rhoades ve Loveday, 1990). Sürekli artan dünya nüfusunu beslemek, nüfus artışına paralel sürdürülebilir bir tarım sistemini gerektirmektedir (Corwin and Lesch 2005). Aşırı sulama ve diğer kötü tarımsal faaliyetler sonucu tuzlulaşma, sulanan alanların geniş ölçüde bozulmasına neden olduğu için üretimde beklenen artışın sağlanmasının zor olacağı tahmin edilmektedir (Ghassemi *et al*. 1995). Dünya genelinde doğru ve güvenilebilir tuzluluk verileri mevcut olmamasına rağmen, sulanan alanların yaklaşık yarısının (250 milyon ha) tuzluluktan etkilendiği belirtilmektedir (Rhoades ve Loveday, 1990). Mevcut bilgiler, bozulma hızının sulamaya açılan alanların genişlemesinden daha fazla olduğunu göstermektedir (Seckler 1996). Bazı yerlerde sürdürülebilir sulu tarımı, bu bozulma tehdit etmektedir (Rhoades et al. 1997, Rhoades 1998). Aynı zamanda sulu tarım su kaynaklarını tüketmekte ve kirletmektedir. Sulama randımanının artması su kaynaklarının kurumasını önlemekte, drenajı, su işgalini, ikincil tuzlulaşmayı ve sulamayla ilişkili olan kirlenmeyi azaltmaktadır. Sulama projelerinden tuzlu drenaj sularının tahliye edilmesi konusundaki kanunsal kısıtlamalar giderek artmaktadır. Sonuç olarak da tuzlu drenaj sularının sulamada yeniden kullanımı yaygınlaşmaktadır. Daha az yıkama ve drenaj tahliyesi ve sulamada tuzlu suların daha sık kullanımı bazı alanlarda toprak tuzluluğunun artmasına neden olacaktır.

Böylece sulanan alanlarda toprak tuzluluğunun nedenlerinin tam vaktinde belirlenmesine, ilgili yönetim planlarının uygunluğunun değerlendirilmesinde pratik bir metodolojiye ihtiyaç duyulmaktadır. Tuzluluk yönetiminde toprak tuzluluğunu belirleyen ve haritalayan araçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Toprak tuzluluğunun bitki verimliliği üzerindeki etkisi ve zaman-uzaysal dinamikliği nedeni ile gerçek zamanlı ölçümler, uzaysal ve zamansal görüntüleme, özellikle hassas tarım açısından son derece önemlidir.

Ülkemizde de hali hazırda tuzdan etkilenmiş alanların ülke çapında bir envanteri mevcut değildir. Ancak genel olarak tuzdan etkilenmiş alanların her geçen yıl arttığı kabul görmektedir. Sulanan alanlardaki doğal kaynakların bozulmasının tuzluluk oluşumu nedeniyle olduğu kabul edilse dahi ülkemizde hangi toprakların tuzlandığı, hangi dereceden sonra verimliliği düşüreceği, artan veya azalan tuzluluk eğilimlerini, yeraltı ve drenaj sularında tuzluluğun noktasal kaynaklarını halen kesin olarak bilinmemektedir.

Günümüze kadar toprak tuzluluğunu arazide belirleyebilmek için beş yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler; (i) görsel bitki gözlemleri yöntemi, (ii) toprak saturasyon süzüğü elektriksel iletkenliği veya normalden daha yüksek suyla hazırlanmış süzüklerin elektriksel iletkenliği ölçüm yöntemi, (iii) elektriksel direncin (ER) yerinde ölçüm yöntemi, (iv) elektromanyetik yayılımla (EM) elektriksel iletkenlik ölçüm yöntemi ve çoğunlukla son zamanlarda kullanılmakta olan (v) Zaman Etkili Yansıma Yöntemiyle (TDR) elektriksel iletkenliğin yerinde ölçüm yöntemi şeklinde sıralanabilir. Bu yöntemlerden ER, EM ve TDR toprak hacimsel elektrik iletkenliğini ($EC_a$) ölçmektedirler (Corwin and Lesch 2005). Görsel bitki gözlemleri yöntemi hızlı ve ekonomik bir metot olmasına karşılık, bitkide tuzluluk nedenli zararlar meydana geldikten sonra yapılabilmektedir. Açık nedenlerle bu yöntem toprak tuzluluk bilgisi elde edilmesinde en az kullanılmak istenen yöntem olmaktadır. Kullanımı gelenekselleşmiş olan saturasyon çamuru süzüğünden toprak tuzluluğu belirlenmesi yöntemi, toprak örneklerinin toplanması ve ekstraktlarının elde edilmesini gerektirdiği için ne arazide kullanıma uygun olmakta ne de yoğun haritalama ve görüntüleme uygulamalarında kullanılabilmektedir. Aynı zamanda bu yöntem nispeten daha fazla zaman almakta ve pahalıya mal olmaktadır. Yüksek oranlarda su kullanılarak hazırlanan çamurlardan elde edilen süzüklerde elektriksel iletkenliğin belirlenmesi, saturasyon çamuru yöntemine göre daha kolay olmakla birlikle anlamlı toprak özellikleriyle daha az ilişkili olması, peptizasyon, hidroliz, katyon değişimi ve mineral madde çözümünden kaynaklanan hatalara daha açık olması gibi sakıncalı yönleri bulunmaktadır (Rhoades et al. 1999, Corwin and Lesch 2005).

Arazide daha hızlı, pratik ve güvenilir şekilde tuzluluğun belirlenmesine izin veren toprak hacimsel tuzluluğu ($EC_a$) ölçüm yöntemleri bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Sözü edilen bu metot özellikle yoğun haritalama ve görüntüleme uygulamalarına uygun bir metodolojiye sahiptir. Uluslararası bilim dünyasında toprak özellikleriyle ilgili bilgileri toplamak amacı ile son 20 yıldan bu yana toprağın hacimsel elektriksel iletkenliğine ilişkin ölçümler yapıla gelmektedir

(Corwin ve Lesch, 2003). Başlangıçta toprak tuzluluk deseninin ve özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmışken (Rhoades et al. 1999a, Hendrickx et al. 1993) hassas tarım çalışmaları çerçevesinde bazı toprak özelliğinin belirlenmesinde de $EC_a$ ölçümleri kullanılmaya başlanmış ve bu amaca yönelik $EC_a$ ölçümleri artarak devam etmektedir. Farklı arazi koşullarında toprak hacimsel elektriksel iletkenliği ile çeşitli toprak özellikleri (tuzluluk, toprak tekstürü, toprak su içeriği, vs) arasında çok iyi düzeyde korelasyon ilişkisi sağlanmaktadır (Corwin and Lesch 2003). Hacimsel EC ($EC_a$) olarak Türkçeye çevirebileceğimiz bu terim, ölçüm kolaylığı ve güvenilirliği nedeni ile özellikle hassas tarım uygulamaları açısından arazi değişkenliğini ölçümünde en güvenilir ve en çok kullanılan yöntem haline gelmiştir (Rhoades et al., 1999b).

Bu çalışmada aktarılan toprak tuzluluğu ölçüm metotları dünya çapında yapılan çalışmalarla geniş ölçüde ve başarı ile arazide test edilmiş olup söz konusu yöntemlerin sağlam, güvenilir, doğru ve uygulanabilir oldukları kabul edilmiştir. Bu yöntemler için ihtiyaç duyulan donanım ticari olarak bulunabilmektedir. Enstrümanların metodolojisi gerekli tüm genel uygulamalar için pratik ve nispeten düşük maliyetlidir. Toprak örnekleme ve laboratuar analizlerine dayanan geleneksel tuzluluk ölçüm metotlarından daha aydınlatıcı ve hızlıdır. Bu yöntemler arazide tuzluluğun doğal sebeplerinin belirlenmesinde özellikle GIS teknolojileri ve model çalışmaları ile entegre edildiğinde başarılı sonuçlar vermesi beklenilmektedir. Gelecek yıllar için dünya gıda ihtiyacını karşılamak ve sürdürülebilir sulama uygulamalarını yürütmek zorunluluğundan dolayı tanıtılan tuzluluk belirleme teknolojileri, su ve toprak tuzluluğunun potansiyel envanteri, izlenmesi, yönetimi ve kontrolü için sağlam uygulamalar sunmaktadır.

## Toprak Tuzluluğunun Toprak Çamuru ve Toprak Hacimsel Elektriksel İletkenliğinden ($EC_a$) Belirlenmesi

Rhoades et al., (1999b) tuz içeren toprak solüsyonunun elektriksel iletkenliği paralellik gösteren üç yol (veya element) izlenerek tanımlanmıştır 1) toprak partiküllerinin değişen katmanları boyunca ve bu partikülleri çevreleyen toprak çözeltisinin iletkenliği 2) devamlı toprak çözelti yolları boyunca iletkenlik, 3) toprak partikül yüzeylerinin direkt ve devamlı teması boyunca iletkenlik.

Çoğu toprak minerali iletken olmadığından yeterince nemli toprakların elektriksel iletkenlik değerleri, öncelikle büyük gözeneklerde bulunan suların içerdiği tuzları temsil eder. Yüzey kondüksiyonu olarak ifade edilen katı fazın, nemli topraklarda elektriksel iletkenliğe katkısı, öncelikle kil minerallerine yapışmış değişebilir katyonlar yoluyla olmaktadır. Yüzey iletkenliği genellikle gözeneklerde bulunan çözelti iletkenliğinden daha düşüktür çünkü kil parçacıklarına bağlı olan değişebilir katyonların miktarları ve hareketlilikleri daha sınırlıdır. Toprak elektriksel iletkenlik modelinde yüzey kondüktansın derecesi, ele alınan herhangi bir toprak için çözülmüş tuzların bağımsız ve sabit olduğu varsayılmaktadır (Rhoades *et al*. 1976, Bottraud and Rhoades 1985). Yüzey kondüktansı aynı zamanda toprağın katı yüzeyine bağlanmış su filminde bulunan ve nemli topraklarda akımını sağlayan

küçük ikincil yollarda bulunan elektrolit ile seri halde birleştiği varsayılır. Bu yollar birincil devamlı yollarla (tuzlu çözeltiyi içeren su ile dolu büyük gözenekler) paralel hareket ediyormuş gibi modellenir. Katı element yolları sert tabakalı topraklarda oluşmuş olabilir. Bu tür tabakalarda, iletkenlik toprak partikül yüzeyleri boyunca görünebilir.

$$EC_a = \left[ \frac{(\Theta_{ss} + \Theta_{ws})^2 EC_{ws} EC_{ss}}{\Theta_{ss} EC_{wz} + \Theta_{wz} EC_s} \right] + \Theta_{sc} EC_{sc} + \Theta_{wc} EC_{wc}$$

(1)

$\Theta_{ws}$ ve $\Theta_{wc}$ sırasıyla seri halde birleşen küçük boşluklardaki su miktarı ve büyük boşluklardaki su miktarı ($cm^3/cm^3$), $\Theta_{ss}$ ve $\Theta_{sc}$ sırasıyla toprağın yüzey kondüktansının ve sert tabakanın volümetrik miktarı ($cm^3/cm^3$), $EC_{ws}$ ve $EC_{wc}$, sırasıyla katı partiküllerle seri halde birleşmiş toprak suyunun elektriksel iletkenliği ve devamlı iletkenlik elementinin elektriksel iletkenliği (dS/m), $EC_{ss}$ ve $EC_{sc}$, sırasıyla yüzey direncinin ve sert tabakanın elektriksel iletkenliği ifade etmektedir. Devamlı yoldaki toprak suyu daha büyük boşluklardaki suyu ifade eder ve genellikle hareketli su olarak tarif edilir. Bu su küçük boşluklardaki suyun içeriğinden farklıdır ve hareketsiz su olarak ifade edilir. Sonuç olarak difizyon süreci $EC_{ws}$ ve $EC_{wc}$'in birbirine eşit olmasına neden olur. Bununla beraber sulama veya yağmur ile su ekleniyor veya drenaj ve evapotranspirasyon ile kayboluyorsa eşitlik ortadan kalkar sonuçta, $EC_{ws}$ ve $EC_{wc}$ bu periyotta farklılaşır.

Eşitlikteki $\Theta_{sc}$ $EC_{sc}$, genellikle ihmal edilebilir. Tipik tarımsal topraklar akımı kesintisiz olarak iletmek için yeterli direkt partikül temasını sağlayacak devamlı katı faz yollarına izin vermez. İkinci potansiyel yol partiküllerin etrafını saran su filmi tarafından bozulur. Deneysel veriler bu terimin ihmal edilebileceğini göstermektedir (Rhoades *et al*. 1976, 1990; Rhoades,1990). Böylece sert katmana sahip topraklar dışındaki tüm topraklar için basitleştirilmiş iki yol modeli şu şekildedir (eşitlik 2) (Rhoades *et al*. 1989a);

$$EC_a = \left[ \frac{(\Theta_s + \Theta_{ws})^2 EC_{ws}\ EC_s}{\Theta_s\ EC_{wz} + \Theta_{wz}\ EC_s} \right] + \left(\Theta_w - \Theta_{ws}\right) EC_{wc}$$

(2)

$\Theta_w = \Theta_{ws} + \Theta_{wc}$, toplam hacimsel su içeriğidir ($cm^3/cm^3$) ve $\Theta_{sc}$ $EC_{ss}$ sert katmanı olmayan toprağın yüzey kondüktansıdır. Bu eşitlik Amerika'nın güneybatısındaki kurak yörelerdeki mineral topraklara ve dünyanın herhangi bir yerindeki benzeri topraklara da uygulanabilir (Rhoades *et al*. 1989a, 1990a). Yüksek miktarlarda jips içeren topraklarda jips partikülleri silikat minerali partiküllerine göre daha iletken olduğu için $EC_{ss}$ ve $EC_{sc}$ daha yüksek değerler alacağından ve model jipsli topraklar için henüz test edilemediğinden bu modelin jipsli topraklarda uygulanması doğru olmaz.

$EC_{ws}$ değerinin 2-4 dS/m den yüksek ve $EC_s$ değerinin 1.5 dS/m den düşük olduğu koşullarda $\Theta_s \times EC_{ws}$ değeri $\Theta_{ws} \times EC_s$ değerinden çok daha büyük olacağı için son

çarpım değeri ihmal edilebilir böylece eşitlik tipik tuzlu topraklar için şu şekilde basitleştirilir;

$$EC_a = \left[ \frac{(\Theta_s + \Theta_{ws})^2 EC_s}{(\Theta_s)} \right] + (\Theta_w - \Theta_{ws})\, EC_{wc}$$

(3)Beşinci eşitliğin uygulanabilirliği daha geneldir ve $EC_{ws}$ değeri düşük olan topraklarda uygulanmalıdır (tuzsuz topraklarda) çünkü düşük düzeylerdeki $EC_{wc}$ için $EC_a$ değeri ile $EC_{ws}$ değeri arasındaki ilişki eğriseldir. Bu eşitliğin ikinci tarafındaki ilk terim $EC_a$ ile $EC_{wc}$ arasındaki nonlineer eğrinin şeklini belirler. Basitleştirilerek ifade edilen **6.** eşitlik ise yalnızca $EC_{ws}$>2 dS/m ($EC_e$>1-2 dS/m) ve $EC_s$<1.5 dS/m olduğu koşullarda yani tipik tuzlu topraklarda uygulanabilir. Bu tür durumlarda $EC_a$ ile $EC_{ws}$ arasındaki ilişki doğrusaldır. Eşitlik 6 yaklaşık olarak $EC_s$ ye eşittir ve $EC_s$ olarak sembolize edilebilir.

Yukarı da da açıklandığı gibi $EC_w$ (veya $EC_e$) nin $EC_a$ dan doğru tahmin edilebilmesi $\Theta_w$ değeri düştükçe düşmektedir. Bu nedenle $EC_a$ ölçümlerinin tarla kapasitesinin yarısından daha düşük olmadığı koşullarda yapılması önerilir. Çoğu sulanan toprakta yetiştirme periyodu boyunca topraktaki nem düzeyi bu değerin üstündedir. Daha öncede belirtildiği gibi (Rhoades *et al*. 1976) $\Theta_w$ değerinin çok düşük olduğu koşullarda ne $EC_a$ değeri okunması ne de bu tür koşullarda elde edilen $EC_a$ değerlerinin tuzluluk tahmininde kullanılması mümkündür. Bu nedenle ölçümleri yapabilmek için toprakta elektrik akımını sağlayacak devamlı yolların olması şarttır. Toprak EC modelinde, sözü edilen iki yolun açık olarak elektrik akımını meydana getirebilmesi için toprakta yeterli düzeyde nemin bulunduğu kabul edilir. Yukarıda açıklandığı gibi $\Theta_w$ için eşik değeri gerekli okumaları yapabilmek için 0.1 civarında olmalıdır kumlu topraklarda ise daha yüksek olabilir. Bu minimum limit genellikle karşılanır ancak sulama periyodunda sulanan alanlarda yüzeyde kuru malç tabakası bulunur. Bu durum ise kuru topraklar için diğer bir problemdir. Kuru toprak önemli bir yalıtkandır ve tuzluluk ve diğer toprak özellikleri hakkında gerekli bilgilerin $EC_a$ ölçümleri sonucu yorumlanmasını engeller. Dahası $EC_a$-toprak özelliklerini kalibrasyonu için gerekli toprak örneklerinin alınmasını engeller. Kuru tarım alanlarında $EC_a$ ölçümlerinin yalnızca elektriği iletebilecek düzeyde yeterli neme sahip olduğu dönemlerde yapılabilir. Tekrar etmekte fayda vardır ki, kuru topraklarda $EC_a$ ölçümlerinden tuzluluk hakkında yorum yapmaya çalışmak uygun değildir.

$\Theta_s = \rho_b / \rho_s$, tuzluluğun yanında toprak hacim yoğunluğu ($\rho_b$) ve toprak partikül yoğunluğu ($\rho_s$) iki toprak özelliği olduğu için $EC_a$ değerini etkilemektedir. Aynı zamanda, $EC_s$ değeri öncelikle katyon değişim kapasitesiyle ilişkili olduğundan dolayı $EC_a$ değeri kil miktarı ve tipinden de etkilenmektedir. Ek olarak $EC_a$, toprağın boşluk hacmi dağılımı ve yapısı, hareketli ($\Theta_{wc}$) ve hareketsiz ($\Theta_{ws}$) su içeriğini etkilediğinden dolayı bu değerlerden etkilenir. Diğer taraftan hareketli ve hareketsiz fazdaki ($EC_{wc}$ ve $EC_{ws}$) tuz konsantrasyonu dağılımını etkileyen sulama, yağış ve bitki su tüketimi ve bunun süreçleri (örn. difizyon) $EC_a$‘ yı etkilemektedir. Bu faktörlerin her birinin $EC_a$ değeri üzerindeki hassasiyeti eşitlik 5’den belirlenebilir

örneğin $EC_s$=f (%kil, kil tipi), $\Theta_s$ ve $\Theta_w$ = f ($\rho_b$ ve $\rho_s$). Bu eşitliğin hassaslık analizi Rhoades *et al*. 1989b, Rhoades ve Corwin 1990 tarafından yapılmıştır.

Toprak tuzluluğunun ($EC_w$ yada $EC_e$) $EC_a$ dan belirlenmesinde eşitlik 5 veya 6 yı kullanmak için $EC_s$, $\Theta_{ws}$ ve $\Theta_w$ değerleri bilinmek zorundadır. $EC_s$, $\Theta_{ws}$ ve $\Theta_w$ değerleri sırasıyla şekil 9 ve 10 yardımıyla tahmin edilebilir. Bu ilişkilerin elde edilme yolları Rhoades *et al*. (1989a)'da anlatılmıştır. Eğer tuzluluk çok yüksek değil ise $\Theta_w$ arazide çeşitli metotlar kullanılarak doğrudan ölçülebilir. $\Theta_s$ değeri hacim yoğunluğundan ($\rho_B$) $\Theta_s \cong \rho_b$ /2.65, eşitliği ile tahmin edilebilir, burada 2.65 çoğu mineral toprak için ortalama partikül yoğunluğudur. Hacim yoğunluğu aynı zamanda daha sonra anlatılacak bir metotla son derece doğru olarak bulunabilir.

$EC_a$ değerini etkileyen diğer bir faktörde toprak sıcaklığıdır. Nemli bir toprakta elektriksel iletkenlik sıcaklığın her bir derece artması ile %2 civarında artar. Toprak tuzluluğu verilerinde bu yanlışı gidermenin yolu $EC_a$ okumasının yapıldığı toprak sıcaklığı için düzeltme tablolarından referans bir sıcaklık için düzeltme yapmaktır (Rhoades 1976). Eşitlik 2 den elde edilen *Sıcaklık faktörü* $f_t$ bu amaç için uygundur (McKenzie *et al*. 1989, Johnston 1994, Heimovaara 1995). Bununla beraber bazen $EC_a$ ölçümlerinin yapıldığı zaman ve özel arazi koşuları için toprak tuzluluğunun tahmininde kurulan kalibrasyon ilişkilerini kapsayarak sıcaklık etkisini çevrelemek tercih edilir. Eşitlik 5'de $EC_{ws}$=$EC_{wc}$ kabul edilerek ikinci dereceden denklem formunda ve pozitif kökü için düzenlenerek $EC_w$ için çözülebilir:

$$EC_w = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \qquad (4)$$

burada;

$$a = \left[ (\Theta_s)(\Theta_w - \Theta_{ws}) \right], \quad b = \left[ (\Theta_s + \Theta_{ws})^2 (EC_s) + (\Theta_w - \Theta_{ws})(\Theta_{ws} EC_s) - (\Theta_s EC_a) \right]$$

$$c = \left[ \Theta_{ws} EC_s EC_a \right]$$

$EC_e$ değeri şu şekilde bulunabilir;

$$(EC_{wc}\Theta_{wc} + EC_{ws}\Theta_{ws}) = EC_w\Theta_w \cong EC_e\rho_b \frac{SP}{100} \qquad (5)$$

**$EC_a$ ölçümünde kullanılan metot ve ekipmanlar**

Toprak tuzluluğunun belirlenmesinde $EC_a$ ölçümlerinde EM, Dört prob (Wenner dizilimi) yada TDR kullanılabilmektedir. Her ne kadar TDR ile elektriksel direncin ölçülmesi bir çok bilim adamı tarafından araştırılmış olsa dahi (Heimovaara et al. 1995, Mallants et al. 1996, Spaans ve Baker 1993, Reece 1998) bu yöntem halen arazi bazında hızlı ve etkili ölçüm için yeteri düzeyde pratik ve kullanışlı değildir (Rhoades et al. 1999a). Yalnızca dört elektrot ve EM teknikleri tarla ve daha büyük

ölçekte tuzluluk ölçümleri için adapte edilebilmiştir (Rhoades et al. 1999a ve 1999b).

**Dört elektrot yöntemi**

Elektriksel direnç (ER) metodu olarak ta bilinen bu metot, toprağa elektrik akımı vererek bu akımın toprak boyunca hareketini ve elektrik potansiyelinin geri ölçümü yönteminden ibarettir. Bu metot 1920'lerde Fransa'da Conrad Schlumberger ve ABD'de Frank Wenner tarafından geliştirilmiştir (Burger 1992, Telford et al., 1990). Bu yöntemde elektrotlar aynı doğrultuda birbirine eş aralıklarla yerleştirildiğinde Wanner dizilimi adını almaktadır. Bu dizilimde içteki iki elektrot potansiyel ya da alıcı elektrot olarak, dıştaki iki elektrot ise akım ya da gönderici elektrot olarak görev yapmaktadır. Ölçüm derinliği elektrotlar arasındaki mesafeye (a) bağlıdır. Daha geniş aralık daha derin ölçüm ve daha yüksek hacimde ölçüm vermektedir. Homojen topraklar için ölçülen toprak hacmi kabaca $\pi a^3$' eşit olmaktadır (Corwin and Lesch 2005). Burada direnç, Wenner dizilimi ile ölçülen direnç $\rho$ (Burger 1992),

$$\rho = 2\pi a \Delta V / i = 2\pi a R$$

(6)

Burada V voltaj (V), a elektrotların aralıkları, i elektrot akımı (A) ve R ise ölçülen dirençtir (w). $EC_a$ direncin tersi olduğu için eşitlik

$$EC_a = \frac{1}{2\pi aR}$$ şeklini alır.

Wenner dizilimi ile elektriksel direncin ölçülmesinde kullanılan araçlar, bir akım kaynağı, bir direnç ölçer, dört metal elektrot, bağlantı kabloları, ölçüm aleti ve toprak termometresinden ibarettir (Rhoades and Halvorson, 1977). Güç kaynağı 0.1 ila 1000 w arasındaki gücü ölçebilen batarya yada elektrik kaynağı olabilir. Elektrotlar paslanmayan ve elektriği ileten herhangi bir metalden yapılabilir. Elektrotların aralığı 1 ila 1.5 m arasında olması ölçüm kolaylığı sağlamaktadır.

Traktöre monte edilmiş sabit aralıklı elektrot versiyonu GPS bağlantılı olarak arazi bazında son derece hızlı ve kolay ölçüm için geliştirilmiştir (Carter et al 1993, Rhoades 1992, 1993). Dört elektrot yöntemiyle elektriksel direnç (ER) ve elektromanyetik ölçüm teknikleri arazi uygulamaları için iyi adapte edilmişlerdir. Bu tekniklerle geniş hacimli ölçümler yapılmakta ve bölgesel ölçekli değişkenlikler en aza inmektedir. Bununla birlikte, ER tekniği toprak içerisine elektrotların girmesini ve toprakla iyi temas sağlanmasını gerektirmekte ve dolayısıyla kuru ve taşlı topraklarda EM tekniğine göre daha az güvenilir sonuçlar vermektedir. Yine de tarla uygulamalarında elektrot aralıkları ayarlanarak ölçüm derinliği ve hacminin kolaylıkla değiştirilebilmesi nedeniyle, ER tekniği esnek bir kullanıma sahiptir (Corwin and Lesch 2005).

**Elektromanyetik Teknik (EM)**

Toprağa temas etmeden EM tekniği ile $EC_a$ ölçülebilmektedir. Bir ucundan elektro manyetik sinyal veren bu alet dairesel akımları toprağa göndererek bunların geri dönüş sayımlarına göre toprağın elektriksel direncini ölçmektedir. Bu dairesel akımların geri dönüş şiddeti toprağın EC si ile doğrudan orantılıdır. Ancak bu akımlar toprak özelliklerinden (kil miktarı, su içeriği ve tuzluluk), bobin aralıkları, yönleri, frekansı ve toprak yüzeyine olan uzaklığından etkilenmektedir (Hendrickx and Kachanoski 2002). Toprak biliminde ve vadoszon hidrolojisinde en yaygın şekilde iki EM geçirgenlik ölçüm cihazı kullanılmaktadır. Bunlar Geonics EM-31 ile EM-38 ölçüm cihazlarıdır. EM cihazı bobini düşey olacak şekilde yerleştirildiğinde ölçüm derinliği yaklaşık olarak kök bölgesi derinliğine (1.5 m) karşılık geldiği için EM-38 tarımsal amaçlı yüksek oranda uygulamaya sahiptir. Bobin yatay olacak şekilde yerleştirildiğinde ölçüm derinliği 0.75- 1.0 m dir (Corwin and Lesch 2005). Şekil 5'de görüldüğü gibi hareketli EM aracı ABD tuzluluk laboratuarı tarafından toprak tuzluluğu ve diğer toprak özelliklerinin belirlenmesi için geliştirilmiştir (Carter et al. 1993, Rhoades 1993). EM 38 aleti düşey ve yatay olarak konumlandırılabilmektedir.

**Mobil $EC_a$ ölçümü ve toprak örnekleme (kalibrasyon) Dizaynı**

Her iki ölçüm yönteminde de toprağın genel özelliklerini belirleyebilmek amacı ile araziden 100 adetten binlerce adete $EC_a$ okumaları örnekleme yapılacak yerlerin belirlenmesi amacıyla alınır. Bu iki yöntemin herhangi biriyle yoğun şekilde ölçümler yapıldıktan sonra bu veriler $EC_a$ okumalarından $EC_e$ ölçümlerine çevrilebilmek için kalibrasyon-örnekleme noktalarının belirlenmesi için kullanılır. Toprak örneklerinin alınacağı yerlerin belirlenmesi için Lesch et al. (1995a, 1995b, 2000) geliştirdiği ESAP isimli program paketi kullanılmaktadır. ESAP programı $EC_a$ ölçüm datalarından toprak örneğinin alınacağı optimum bölgelerin belirlenmesinde kullanılır. Bu alanlar gözlenen uzaysal değişimi yansıtan uzaysal istatistik temeline dayanarak seçilir. Alandaki değişkenliğin oranına bağlı olarak genellikle 6 ila 20 örnekleme noktası seçilir. $EC_a$ ölçümlerinin değerlendirilmesi için minimum $EC_a$ alt kümelerinin optimum bölgeleri seçilir. Bu seçim ise tepki-yüzey örnekleme dizayn yöntemi ile yapılır. $EC_a$ ölçümleri sonuç olarak tüm alandaki ölçüm sonuçları ve kalibrasyon alanından elde edilen toprak örnekleri ile ilgili programa girilerek $EC_e$ değerleri $EC_a$ değerlerine çevrilir.

Toprak tuzluluğu temelde iki istatistiksel modelleme yaklaşımı ile $EC_a$ değerlerinden $EC_e$ değerlerine çevrilebilir, deterministik ve stokastik (Rhoades et al., 1999b). Tercih edilecek yöntem eldeki ekipmana, alanın büyüklüğüne ve ölçümün amacına bağlı olarak değişebilir. Deterministik yaklaşımda teorik yada amprik modelleri $EC_a$'ın $EC_e$ ye dönüşümü için kullanılabilir. Deterministik modeller statiktir, tüm model parametrelerinin bilindiği kabul edilir ve ECe nin belirlenmesinde hiçbir $EC_e$ verisine ihtiyaç olmadığı varsayılır. Örneğin eşitlik 3 Rhoades et. al., (1989a) tarafından geliştirilmiş bir modeldir. Deterministik yaklaşım yüksek miktarda, yersel değişimin olduğu toprak tipi söz konusuysa tercih edilir. Bu yaklaşım ek toprak bilgisine ihtiyaç duyar (toprak su içeriği, saturasyon noktası,

hacim ağırlığı, sıcaklık vs). Stokastik yaklaşımda ise uzaysal regresyon, co-kriging gibi istatistiksel modelleme teknikleri kullanılır, böylece elde edilen $EC_a$ verilerinden direkt olarak $EC_e$ verileri elde edilebilir. Bu yaklaşım dinamiktir, model parametreleri, ölçüm sırasında elde edilen $EC_a$ verilerinden ibarettir. Bu kalibrasyon yönteminde aynı noktada ölçülen $EC_a$ datalarının ufak bir kısmı ile elde edilen toprak tuzluluğu dataları (yada diğer toprak özellikleri, toprak saturasyon noktası, tekstür, hacim ağırlığı vs) ile kalibre edilir ve diğer sensör ölçümleri de bu kalibrasyon eşitliği vasıtası ile tahmin edilir. Lesch et al. (1995a, 1995b, 2000) ESAP yazılım programı (Lesch et al 2000) ile ilişkili olarak detaylı olarak açıklamıştır.

## TARTIŞMA

Burada mümkün olduğunca kısaca aktarılamaya çalışılan büyük arazi ölçeğinde tuzluluk haritalarının çıkartılması için yeni yaklaşımlar ve mobil sistemlerin ülkemiz şartlarında da ne denli önemli olduğudur. Bilindiği gibi tuzluluk dinamik bir yapıdır. Özellikle sulamayla birlikte yüksek taban suyu gibi yan etmenlerde toprak tuzluluğuna etki eden faktörlerdir. Toprak tuzluluğunun hassas biçimde haritalanması küçük arazi parçalarında bile son derece fazla iş gücü, zaman ve maddi masrafa ihtiyaç duymaktadır. Özellikle de tuzluluğun dinamik yapısı göz önüne alındığında ölçümlerin bazen defalarca yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu bazen önlem bezen de ıslah gibi mühendislik nedenlerle de olabilmektedir. Hali hazırda ülkemiz topraklarında tuzlulaşmış yada risk altında bulunan kırmızı bölgelerin envanteri bulunmamaktadır. Artan kuraklık nedeni ile gelecek yıllarda tuzluluğun ülkemiz içinde büyük bir sorun oluşturacağı açıktır, ancak veri yetersizliği nedeni ile tam olarak rakamlar ortaya konulamamaktadır. Özetle ülkemiz şartlarında da dünya çapında bilimsel anlamda kabul görmüş ve burada kısaca aktarılmaya çalışılmış olan tuzluluk haritalama yöntemlerinin acilen uygulamaya geçirilmesi ve tuzlu toprakların envanterinin çıkartılması çalışmalarının başlaması gündeme alınmalıdır.

# KAYNAKLAR


Bottraud J.C., and Rhoades J. D., 1985. Effect of exchangeable sodium on soil electrical conductivity-salinity calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1110-1113

Burger H.R., 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ.

Carter L.M., Rhoades J.D., and Chesson J. H., 1993. Mechanization of soil salinity assessment for mapping. Proc., 1993 ASAE Winter Meetings, Chicago, IL., December 12-17, 1993.

Corwin D.L. and Lesch S.M., 2003. Application of Soil electrical Conductivity to Precision Agriculture:theory, Princples, and Guidelines. Agronomy Journal. 95:455-471.

Corwin D.L. and Lesch S.M., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 46: 11-43.

Ghassemi, F., A. J. Jakeman and H. A. Nix. 1995. Salinization of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies, CAB International, 526 pp.

Heimovaara, T. J. 1995. Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:689-698.

Hendrickx, J.M.H., B. Baerends, Z.I. Raza, M. Sadig, and M. Arkam Proc. 1993 ASAE Winter Meet., Chicago, IL. 12–17.

Hendrickx J.M.H., and Kachanoski R.G., 2002. Solute content and concentration - indirect measurement of solute concentration – nonintrusive electromagnetic induction. In: Dane J.H., Topp G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 4- Physical Methods. Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 1297-1306.

Johnston, M. A. 1994. An evaluation of the four-electrode and electromagnetic induction techniques of soil salinity measurement. Water Research Commission Report No. 269/1/94, South Africa, pp. 191.

Lesch, S.M., D. J. Strauss and J. D. Rhoades. 1995a. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: 1. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging. Water Resour. Res. 31:373-386.

Lesch, S. M., D. J. Strauss and J. D. Rhoades. 1995b. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: 2. An efficient spatial sampling algorithm suitable for multiple linear regression model identification and estimation. Water Resour. Res. 31: 387-398.

Lesch, S.M., J.D. Rhoades, and D.L. Corwin. 2000. ESAP-95 Version 2.01R: User manual and tutorial guide. Res. Rep. 146. ARS George E. Brown, Jr., Salinity Lab., Riverside, CA

Mallants, D., M. Vanclooster, N. Toride, J. Vanderborght, M.Th. Van Genuchten, and J. Feyen. 1996. Comparison of three methods calibrate TDRfor monitoring solute movement in undisturbed soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:747–754.

McKenzie, R.C., W. Chomistek, and N. F. Clark. 1989. Conversion of electromagnetic inductance readings to saturated paste extract values in soils for different temperature, texture, and moisture conditions. Can. J. Soil Sci. 69:25-32.

Reece, C.F. 1998. Simple method for determining cable length resistance in time domain reflectometry systems. Soil Sci. Soc. Am 62:314–317.

Rhoades, J. D. 1976. Measuring, mapping and monitoring field salinity and water table depths with soil resistance measurements. FAO Soils Bulletin. 31:159-186.

Rhoades, J. D. and S. D. Merrill. 1976. Assessing the suitability of water for irrigation: Theoretical and empirical approaches. FAO Soils Bulletin 31:69-109.

Rhoades, J. D., P. A. C. Raats, and R.J. Prather. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 40:651-655.

Rhoades, J.D., and A.D. Halvorson. 1977. Electrical conductivity methods for detecting and delineating saline seeps and measuring salinity in Northern Great Plains soils. ARS W-42. USDA-ARS and cokriging. Water Resour. Res. 31:373–386. Western Region, Berkeley, CA.

Rhoades, J.D., N.A. Manteghi, P.J. Shouse, and W.J. Alves. 1989a. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J. 53:433–439.

Rhoades, J. D., B.L. Waggoner, P.J. Shouse, and W.J. Alves. 1989b. Determining soil salinity from soil and soil-paste electrical conductivities: Sensitivity analysis of models. Soil Sci. Soc. Am. J.53:1368-1374.

Rhoades, J. D., P.J. Shouse, W.J. Alves, N. A. Manteghi, and S.M. Lesch. 1990. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates. Soil Sci. Soc. Am. J.54:46-54**.**

Rhoades, J. D. 1990. Sensing soil salinity problems: New technology. *In* R.L. Elliott (ed.) Proc. 3rd. National irrigation symposium irrigation association and ASCE, October 28 -November 1, 1990. Phoenix, AZ, pp. 422-428.

Rhoades, J.D., and J. Loveday. 1990. Salinity in irrigated agriculture p. 1089–1142. *In* B.A. Stewart and D.R. Nielsen (ed.) Irrigation of Madison, WI.

Rhoades, J. D. 1992. Recent advances in the methodology for measuring and mapping soil salinity. Proc. Int'l Symp. on Strategies for Utilizing Salt Affected Lands, ISSS Meeting, Bangkok, Thailand, Feb. 17-25.
Rhoades J.D., Kandiah A., and Mashali A.M., 1992. The use of saline waters for crop production. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 48, Rome.
Rhoades, J. D. 1993. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. *In*: D. L. Sparks (ed.), Advances in Agonomy. Vol. 49:201-251.
Rhoades J.D., Lesch S.M., LeMert R.D., and Alves W.J., 1997. Assessing irrigation/drainage/salinity management using spatially referenced salinity measurements. Agr.Water Mgt. 35:147-165.
Rhoades, J. D. 1998. Use of Saline and Brackish Waters for Irrigation: Implications and Role in Increasing Food Production, Conserving Water, Sustaining Irrigation and Controlling Soil and Water Degradation. *In* R. Ragab and G. Pearce (eds.) Proceedings of the International Workshop on "The use of saline and brackish water for irrigation - implications for the management of irrigation, drainage and crops", Bali, Indonesia, pages 23-24.
Rhoades J.D., Chanduvi F., and Lesch S., 1999a. Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 57, Rome.
Rhoades, J.D., D.L. Corwin, and S.M. Lesch. 1999b. Geospatial mea surements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. p. 197–215. *In* D.L. Corwin, K. Loague, and T.R. Ellsworth (ed.) Assessment of non-point source pollution in the vadose zone. Geophysical Monogr. 108.
Seckler D., 1996. The New Era of Water Resources Management: From “Dry” to “Wet” Water Savings, Consultative Group on International Agricultural Research, Washington, D C.
Spaans, E.J.A., and J.M. Baker. 1993. Simple baluns in parallel probes for time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:668–673
Telford, W.M., L.P. Gledart, and R.E. Sheriff. 1990. Applied geophysamended soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:99–109.