

## Dağıtılmış Anahtarlamalı Özdirenç Görüntüleme Sistemi

### Distributed Switching Resistivity Imaging System

İNAN ULUSOY<sup>1\*</sup>, HARUN ARTUNER<sup>2</sup>, ERKAN AYDAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe-Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Hacettepe Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe-Ankara, Türkiye

Geliş (received) : 19 Nisan (April) 2012

Kabul (accepted) : 30 Kasım (November) 2012

#### ÖZ

Doğru akım özdirenç görüntüleme tekniği son otuz yıl içinde hem mekanik anlamda hem de edinilen bilgilerin işlenmesi anlamında oldukça gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir. Gelişme, daha çok elektrot ile mekanik yerdeğiştirmenin azaltılması ve buna bağlı olarak sayıca daha çok örnek alabilme yöntemlerinin iyileştirilmesi biçiminde olmaktadır. Görüntüleme tekniği, ya klasik anlamda merkezi bir anahtarlama sistemi ile yıldız bağlantı biçiminde ya da anahtarlamanın elektrotlar üzerine yapılmasına olanak sağlayacak dağılımı-akıllı elektrot olarak adlandırılan anahtarlama sistemleri ile yapılmaktadır. Arazi uygulamaları açısından her iki sistemin de bazı getirileri ve götürüleri vardır. Ancak kullanıcılar açısından arazi şartlarındaki en büyük etken sistemin toplam ağırlığı olmaktadır. Akıllı elektrot sistemleri kablo ağırlığını azalttığı için uzun hatlı ölçümlerde avantaj sağlayabilir. Hacettepe Üniversitesinde geliştirilen akıllı elektrot sistemi, benzeri olan merkezi anahtarlama sistemlerine göre yaklaşık %75 daha hafiftir. Sistem temelde küçük bir merkezi kontrol ünitesi, elektrotlar üzerine monte edilen akıllı elektrot üniteleri ve ana kablodan oluşmaktadır. Ana kablo içinden, ikisi girişim etkisine karşı yalıtımlı olan 6 adet kablo geçmektedir. Sistem, denetim ünitesine seri bağlanan bir dizüstü bilgisayar aracılığıyla denetlenmektedir. Sistemin kısa ve uzun profillerde denemeleri yapılmış, sorunsuz çalıştığı gözlenmiştir. Sistem, hafifliği nedeniyle özellikle uzun hatlı ölçümlerde büyük kolaylık sağlamaktadır, ayrıca bilgi giriş/çıkış ve tetikleme kapasitesine sahip her tür özdirenç aletine adapte edilebilir özelliktedir. Düşük sayıda kablodan oluşması nedeniyle çok kanallı ölçüm yapabilen bir sistem haline de dönüştürülmesi çalışmaları da yapılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Özdirenç, Özdirenç görüntüleme, Doğru akım, Çoklu elektrot, Akıllı elektrot, Merkezi anahtarlama

#### ABSTRACT

Within last three decades, direct current resistivity imaging method has been subjected to a considerable development both due to the instrumental evolution and due to the increase in the speed and the capacity of the computation. The application is generally made using a central switching system or another switching system which is distributed over electrodes, called smart electrode system. In terms of field surveys, both systems have advantages and disadvantages. Smart electrode systems may be advantageous due to the possibility of producing lightweight cables. The smart electrode system developed in the Hacettepe University is 75% lighter than the equivalent systems that are operating with a central switching unit. Principally, system is composed of a small central control unit, smart electrode units that are connected to the electrodes and the main cable. Inside the main cable, there lie 6 inner cables; two of them are isolated due to interference. System runs automatically via a laptop computer which is serially connected to the control unit. The system was tested with short and long profiles and observed to be working properly. The lightweight of the system provides a considerable ease especially during the measurement

*of long profiles, it can be conveniently adoptable to any resistivity meter that has a capacity of digital input/output communication and triggering. Due to the small number of inner-cables, it has a potential of evolving into a multi-channel equipment.*

**Keywords:** Resistivity, Resistivity imaging, Direct current, Multi-electrode, Smart electrode, Central switching

## GİRİŞ

Özdirenç yöntemi, doğru bir hat boyunca belli aralıklarla dizilmiş elektrotlardan bir çifti aracılığıyla yere akım verilirken diğer bir çifti arasındaki potansiyel farkının ölçülmesi esasına dayanır (Wenner, 1912; Schlumberger, 1920; Carpenter, 1955; Parasins, 1962, 1965; Telford vd., 1990). Uygulamada, genelde bir profil boyunca elektrotların bağıl uzaklıkları değiştirilerek ya da eş/sabit aralıktaki elektrotların kaydırılmasıyla, yeraltında dikey ya da yatay ölçüm noktaları boyunca, tek boyutta özdirenç değerleri ölçülür. Temelde aynı prensibe dayanan “doğru akım özdirenç görüntüleme” ya da diğer isimleriyle “elektrik rezistivite tomografi / çoklu elektrot / çok-elektrotlu özdirenç” yöntemi de “özdirenç yönteminin” otomatikleştirilmiş biçimidir. Özdirenç görüntüleme yöntemi, tek boyutlu özdirenç ölçümlerinde kullanılan elektrot konumlarının, denetimli olarak değiştirilmesi / kaydırılması ile çok boyutlu ölçümlerin kısa sürede, daha az işgücüyle yapılmasına olanak sağlar. Bu otomatik değiştirme için çok sayıda elektrot, hangi elektrotların akım ve potansiyel elektrotları olarak kullanılacağını seçen bir anahtarlama sistemi ve ölçüm için de bir özdirenç birimi gereklidir. Değişik elektrot dizilimlerinin bir ölçüm süresince aynı profil boyunca uygulanabilmesi ve/veya bir hat boyunca binili profiller atılabilmesi, klasik uygulamalara kıyasla onlarca kat daha fazla veri üretilmesine imkan verir.

Doğru akım özdirenç görüntüleme tekniklerinde geçmiş yıllarda oldukça hızlı gelişmeler olmuştur (Dahlin, 2001). Bu gelişmeler hem veri elde etme hem de ters modelleme tekniklerinde gerçekleşmiş ve yöntemin pratik uygulanabilirliğini büyük oranda artırmıştır (Hoover ve Leberfinger, 1999; Dahlin, 2001). Yeni gelişmelerle, doğru akım özdirenç görüntüleme tekniği

jeoloji (Griffiths ve Barker, 1993; Pellerin, 2002; Barde-Cabusson vd., 2009; Finizola vd., 2009), hidrojeoloji (Christensen ve Sørensen, 1998; Slater vd., 2002; De Franco vd., 2009), çevre (Carpenter vd., 1990; Dahlin, 1996; Yaramancı, 2000; Drahor vd., 2006), jeo-arkeoloji (Noel ve Xu, 1991; Griffiths ve Barker, 1994; Drahor, 2006; Drahor vd., 2008) ve mühendislik uygulamalarında (Dahlin, 1996; Dahlin vd., 1999; Soutos vd., 2007) önemli bir yer almaya başlamıştır. Bunun sonucunda yeraltı ile ilgili yadsınamaz oranda veri üretme yeteneğine sahiptir. Burada sıralanan örnekler dışında da konuyla ilgili çok sayıda örnek çalışma sunmak mümkündür.

## Özdirenç Görüntüleme Ölçüm Sistemleri

Bilgisayar kontrollü doğru akım özdirenç görüntüleme sistemi özdirenç ölçüm aleti, anahtarlama ünitesi, bilgisayar, elektrot kabloları, çeşitli bağlantı elemanları ve elektrotlardan oluşur (Overmeeren ve Ritsema, 1988; Hoover ve Leberfinger, 1999; Dahlin, 1993, 2001). Bazı sistemlerde, iki ya da daha fazla ünite, bir tek üniteye birleştirilmiştir; örneğin bilgisayar, özdirenç ölçüm aleti ve anahtarlama ünitesi tek bir cihaz halindedir (Dahlin, 2001).

Özdirenç görüntüleme ölçümleri temelde iki farklı topolojideki sistemle tasarlanmaktadır; bunlar merkezi anahtarlama sistemler (Barker, 1981; Dahlin, 1993; Meju ve Montague, 1995) ve akıllı elektrot sistemleri (Dahlin, 1989, Abdelhadi, 2007) olarak isimlendirilebilir. Her iki sistemde de ölçüm prensibi aynı olmakla birlikte anahtarlama sistemi ve elektrot bağlantıları ve iletişim/işletim biçimi farklıdır. Her iki sistemde de yere bir hat boyunca çok sayıda (ör. 16, 21, 32, 48 ve katları) elektrot döşenir. Merkezi anahtarlama sisteminde; özdirenç ölçüm aleti, bilgisayar, bir merkezi anahtarlama sistemi

ve elektrot sayısı kadar iç-kabloyu muhafaza-ya alan bir ana kablo bulunur (Şekil 1a, Barker, 1981, 1992; Dahlin, 1993). Bilgisayarın kontrol ettiği bir yazılımla, hangi elektrotların “akım”, hangi elektrotların “potansiyel” elektrodu olacağı merkezi anahtarlama sistemine bildirilir. Anahtarlama sistemi, röleler aracılığıyla öz direnç aleti ve kablo arasındaki köprüyü kurar. Bilgisayar tarafından anahtarlama sistemine iletilen akım ve potansiyel elektrotlar atanır; bu işlemin yapılmasıyla merkezi kablo içindeki 4 adet kablo ölçüm yapmak üzere iletişime açık, diğerleri kapalıdır. Ölçüm yapıldıktan sonra sıradaki akım ve potansiyel elektrot çifti seçilerek yeni bir atama yapılır ve ölçüm daha önce belirlenen dizilime göre otomatik olarak gerçekleştirilir. Şekil 1a’da gösterildiği gibi, 1. ölçüm, 1, 2, 3 ve 4 numaralı elektrotları kullanarak alınır. Sonraki adım, bu elektrotları sıfırlar (bu elektrotları adresleyen röleler kapalı konuma getirir) ve bu sefer örneğin 2, 3, 4 ve 5. elektrotlar adreslenerek 2. ölçüm alınır. Bir Wenner- $\alpha$  dizilimiyle ölçüm yapıldığı takdirde, ölçüm yapılan noktalar ve oluşacak kesidin veri-seti yine Şekil 1a’da gösterilmektedir. Bu şekilde bir dizilimle ölçüm alındıktan sonra, ilk kablo seti hattın sonuna kaydırılıp eklenerek ölçüm hattı uzatılabilir, böylece binili ölçümlerle uzun bir hat taranabilir (Şekil 1b). Daha önce de belirtildiği gibi, bir merkezi anahtarlama sistemi örneğin 48 elektrotlu bir dizilim kullanılıyorsa, ana çoklu-elektrot kablo-sundan 48 adet iç-kablo geçer.

Akıllı elektrod sistemlerinde ise merkezi bir anahtarlama ünitesi yoktur. Anahtarlama işlevini yapan röleler, küçük üniteler biçiminde elektrotlar üzerine yayılmış durumdadır, bu nedenle sisteme akıllı elektrot sistemi denilmektedir. Sistem işletilirken, bilgisayar yardımıyla seçilen elektrotlar, ilgili akıllı elektrot ünitesi sayesinde aktif hale getirilerek, akım ya da potansiyel elektrot olarak atanır ve ölçüm yapılır. Yine bu sistemde de binili ölçümler yapmak mümkündür.

Günümüzde, her iki anahtarlama sistemini kullanan cihazlar ticari olarak üretilmekte ve kullanılmaktadır. İki sistemin de avantajları ve dezavantajları vardır (Çizelge 1). Merkezi sistemin en büyük avantajı çok kanallı ölçüm kapasitesidir; günümüzde 4, 8, 10 ve 12 kanallı sistemler

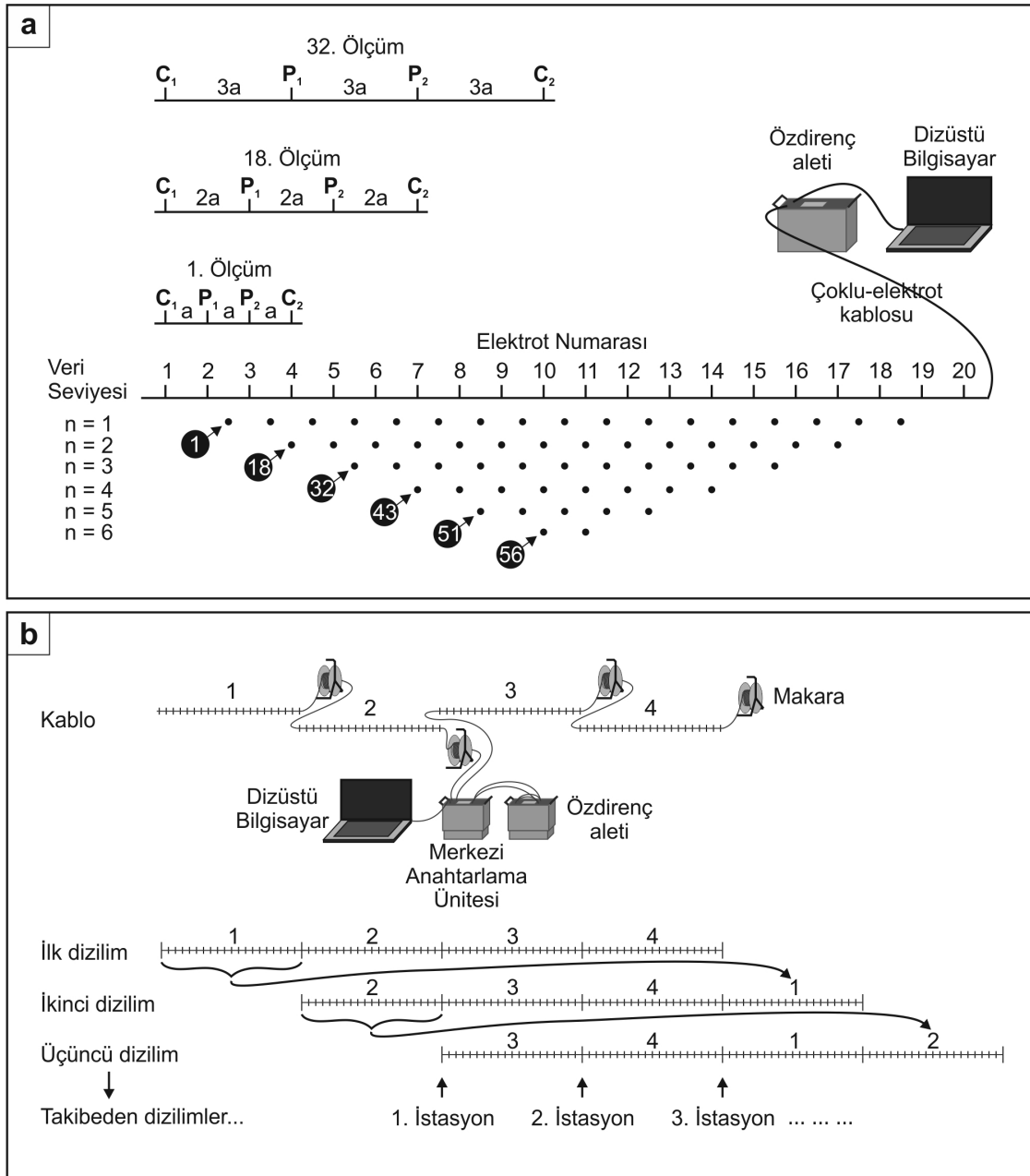
üretilmektedir. Her kanal ayrı bir potansiyel ölçüme bağlıdır. Çok kanallı ölçümde, örneğin bir çift elektrottan akım verilirken kanal sayısına göre birçok elektrot çiftinden aynı anda potansiyel ölçümü yapılabilir. Dolayısıyla 8 kanallı bir sistemde ölçüm tek kanallı bir sisteme göre neredeyse 8 kat daha hızlıdır. Buna karşın anahtarlama sisteminin merkeze alınması, her elektroda ayrı bir kablo atanması nedeniyle ağır bir kablolama sistemi gerektirmektedir. Akıllı elektrot sistemleri ise kablo ağırlığını oldukça düşürmekte ve uzun mesafeli profillerde avantaj sağlamaktadır. Bu sistemin en büyük dezavantajı, sistemin çok kanallı hale getirilmesi durumunda ana kablo içinden geçen iç-kablo sayısının artması nedeniyle kablo ağırlığının artacak olmasıdır. Bu durumda arazideki elektronik unite sayısı göz önüne alındığında, arazi dayanımı daha fazla olan merkezi anahtarlama sistemleri avantajlı konumdadır.

## GELİŞTİRİLEN HAFİF KABLOLAMA SİSTEMİ

2007 ve 2008 yıllarında yaptığımız çalışmalarla öz direnç görüntüleme tekniği için hafif bir kablolama sistemi geliştirilmiştir. Sistem bir akıllı elektrot anahtarlama kullanmakta, hafif bir ana kablo, akıllı elektrot üniteleri, elektrotlar, anahtarlama kontrol ünitesi, öz direnç aleti ve bir dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 2). Çalışmamızda sinyal ortalama dizgeli bir öz direnç aleti (ABEM Terrameter SAS 300B) ve bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır.

## Kablo

Akıllı elektrot anahtarlama sistemlerinde, sistemin en büyük avantajı olan kablo hafifliği, ana kablo içinden geçen iç-kablo sayısına bağlıdır. Bugüne kadar çeşitli kablolama sistemleri geliştirilmiştir; bunlar arasında anahtarlama işlevini 7 iç-kablo (Abdelhadi, 2007), 8 iç-kablo (Dahlin, 1989) ile çözümlenen sistemler bulunmaktadır. Geliştirdiğimiz kablolama sistemi, 6 adet yalıtımlı iç-kablo kullanarak anahtarlama yapmaktadır. Bu kablolardan dördü, akım ve potansiyel kablo çiftleri olarak kullanılmakta, iki adet kablo ise anahtarlama ünitelerini kontrol etmektedir. Potansiyel kablosu olarak kullanılan kablo çifti olası bir girişimin önlenmesi amacıyla ayrıca bir de yanses yalıtımına sahiptir.



Şekil 1. Merkezi anahtarlmalı doğru akım özdirenç görüntüleme sistemlerinin çalışma prensibi: a) bir görünür öz-direnç kesidi oluşturmak için ölçüm dizisi. (Barker, 1992'den), şekilde wenner- $\alpha$  dizilimiyle veri toplama gösterilmektedir. Siyah noktalar ilgili ölçüm ile alınan veri noktasını ve siyah daireye alınmış numaralar da ilgili ölçüm numarasını ifade etmektedir. b) Bilgisayar kontrollü veri toplama sisteminin taslak gösterimi. Kablolar üzerindeki her küçük çizgi elektrotları göstermektedir. Şekil aynı zamanda binili ölçüm sırasında kabloları taşıma prensibini de göstermektedir (Dahlin, 2001, Overmeeren ve Ritsema, 1988'den değişikliklerle).

Figure 1. Operation principal for direct current resistivity imaging systems using central switching unit: a) the measurement sequence for building up a pseudo-section. (from Barker, 1992), data collection with a wenner- $\alpha$  array. Black points are referring to the data point collected by the corresponding measurement and numbers in the black circles refer to the corresponding measurement. b) Sketch outline of computer-controlled data collection system, where each mark on cables indicates electrode position. Figure also shows principle of moving cables when using roll-along technique (Dahlin, 2001 with modifications from Overmeeren and Ritsema, 1988).

Çizelge 1. Merkezi anahtarlama ve akıllı elektrot anahtarlama öz direnç görüntüleme sistemlerinin temel nicel ve nitel özelliklerinin kıyaslanması.

Table 1. Comparison of fundamental qualitative and quantitative properties of the resistivity imaging systems using central switching and smart electrodes.

	Merkezi Anahtarlama Sistemler	Akıllı elektrot sistemleri
<b>Ana Kablo</b>	Elektrot sayısı kadar iç-kablo kullanımı gerekir (ör. 16, 21, 32, 48), kablo pahalıdır.	İç-kablo sayısı azdır (ör. 6, 10, 12), kablo daha ucuzdur.
<b>Ağırlık</b>	Ağır kablolar kullanılır.	Hafif kablo sistemlerine olanak sağlar.
<b>Ölçüm kanalları</b>	Çok kanallı ölçümlere olanak sağlar.	Kanal sayısının artması iç-kablo sayısını artıracığı için ana kablo ağırlaşır.
<b>Dayanım</b>	Merkezi anahtarlama ünitesi tek bir ekipmandan oluşur, titiz bir kullanımla sert iklim şartlarında dahi dayanımı yüksektir.	Arazide kullanılan elektronik ünite sayısının artması sistemin sert iklim şartlarına dayanımını azaltır.
<b>Onarım</b>	Merkezi anahtarlama ünitesi içindeki tek bir rölenin bile arızalanması arazi çalışmasının kesilmesi ve merkezi ünitenin tamamının servise gönderilmesi demektir. Kabloda meydana gelecek bir kopukluk daha pahalı bir yenileme işlemi anlamına gelir.	Akıllı elektrot ünitelerinden birinde meydana gelen bir arıza kolay ve ucuz yoldan telafi edilebilir. Yedek anahtarlama ünitelerinin arazide devreye sokulabilmesi arazi çalışmalarının devamını sağlar. Kablonun yenilenmesi çok daha ucuzdur.
<b>İşletim</b>	Sistem sabittir, örneğin 3 boyutlu ölçümlerde bir hat boyunca sabit elektrot sayısına bağlı kalınmalıdır.	Sistem daha dinamik, değişken elektrot sayısı kullanımına olanak verir.

## Kontrol ünitesi

Bilgisayar, öz direnç aleti ve akıllı elektrot ünitelerinin eşgüdümünü kontrol ünitesi sağlamaktadır. Hem bilgisayar hem de öz direnç aleti birer seri bağlantı aracılığıyla, öz direnç aletinden çıkan akım ve potansiyel uçları da yalıtımlı, sarımlı birer bakır kablo aracılığıyla anahtarlama kontrol ünitesine bağlanmaktadır (Şekil 2a, 2c). Kontrol ünitesi de, hafif ana kablo ile akıllı elektrot ünitelerine bağlanır. Kontrol ünitesi 6V, 2300 mAh güç sağlayan dört adet kalem pille beslenmektedir.

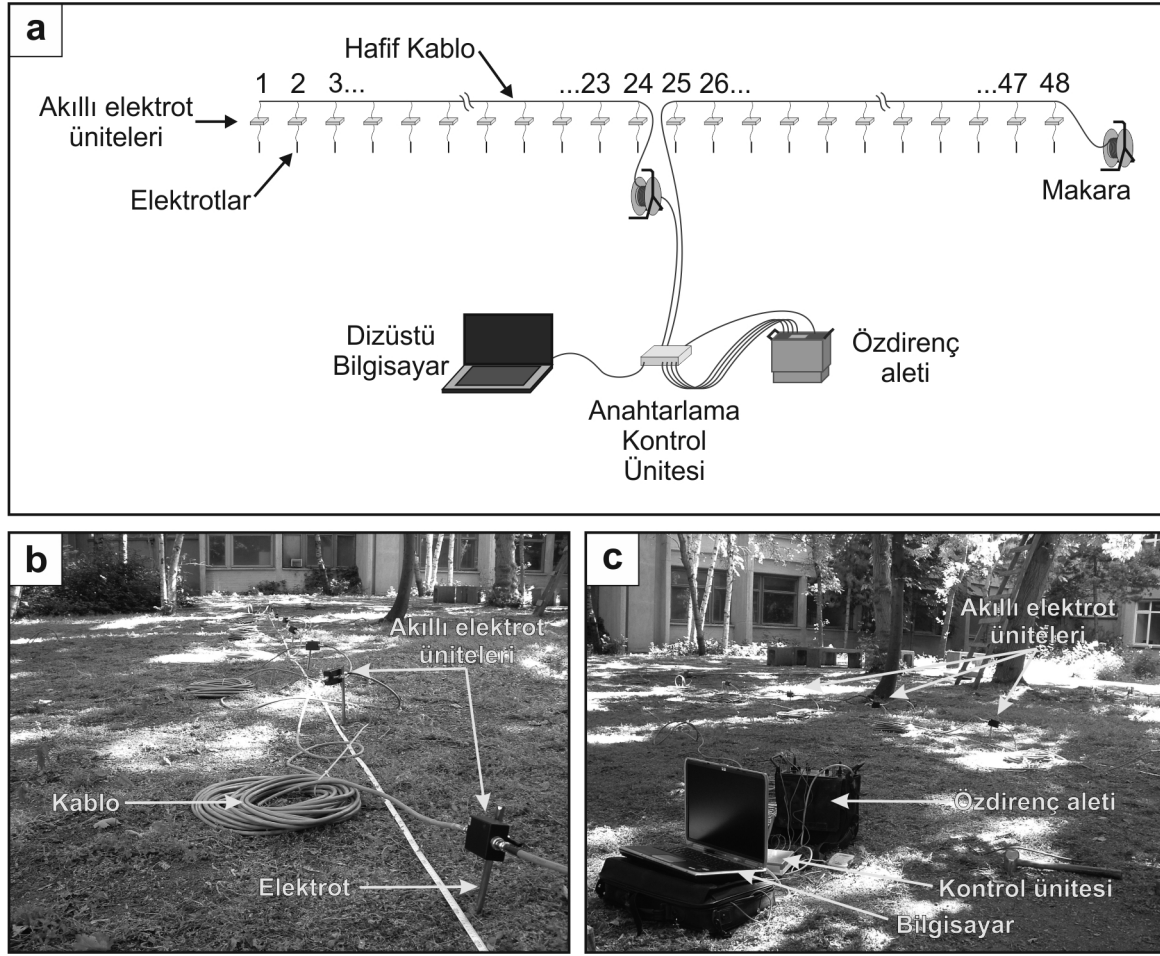
## Akıllı elektrot üniteleri

Akıllı elektrot üniteleri, anahtarlama kontrol eden elektronik bir devre, plastik bir muhafaza ve kablo bağlantı elemanlarından oluşmaktadır (Şekil 2b). Akıllı elektrot üniteleri ilgili elektroda ve ana kabloya bağlanmaktadır (Şekil 2a, 2b). Üniteler iki şekilde programlanabilmektedir. Birinci programda, her elektrot belli bir numara ile isimlendirilir, işlemler boyunca bu numara kullanılır. Arazide serim esnasında, elektrot

üniteleri bu numaralama sistemi baz alınarak sıralanır ve elektrotlara/kabloya serim sırasına göre bağlanır. İkinci programda ise akıllı elektrot ünitelerine belirli bir numara verilmez, ölçüm başlamadan önce sistem her elektrotun konumunu aradaki kablo direncine bağlı olarak ölçer ve elektrot ünitesinin o esnadaki konumuna göre ona bir numara atar. Daha sonra ölçüm boyunca, elektrot ünitesini adreslemek için bu numara kullanılır. Ayrıca gerek duyulduğunda, akıllı elektrot ünitesi üzerinde ünitenin çalışıp çalışmadığını kontrol edebilmek için bir de ışıklı gösterge mevcuttur.

## İşletim

Uygulamada, elektrotlar, akıllı elektrot üniteleri ve kablo döşendikten, sistemin bağlantıları yapıldıktan sonra kontrol ünitesi çalıştırılır. Kontrol ünitesi bilgisayar ile kendi arasındaki iletişimi kontrol eder. İkinci aşamada tüm elektrot üniteleri ile iletişim kurulur, bu iletişimin sağlıklı olup olmadığı test edilir. Daha sonra isteğe bağlı olarak elektrot çiftlerinin yer ile bir akım



Şekil 2. Geliştirilen hafif kablolu akıllı elektrot anahtarlama sistemi, a) sistemi oluşturan elemanların taslak gösterimi, b) akıllı elektrot üniteleri, elektrotlar ve ana kablunun serimi, c) sistemin özdirenç aleti, bilgisayar ve kontrol ünitesiyle birlikte fotoğrafı.

Figure 2. Built lightweight cable - smart electrode switching system, a) schematic sketch of the system units, b) layout of the smart electrode units, electrodes and the main cable, c) photograph of the system with resistivity meter, computer and the control unit.

döngüsü kurup kuramadıkları test edilebilir. Bu pek çok diğer sistemin de uyguladığı (ör. ABEM, 2007) basit bir elektrot kontağı testidir. Testler tamamlandıktan sonra ölçüm işlemi başlatılır. İşlem emri ile bilgisayardan gerekli dizilime ait veriyi alan kontrol ünitesi, gerekli elektrotların anahtarlama işlemlerini kontrol ederek atamalarını yapar. İlgili elektrotlar akım ve potansiyel çiftleri olarak atandıktan sonra, kontrol ünitesi özdirenç ölçüm birimini çalıştırır ve arkasından ölçüm sonucu bilgisayara iletir. İşletim, elektrotların rölelerinin sıfırlanması ve yeni atamalarla sürer.

## HAFİF KABLOLAMA SİSTEMİ İLE YAPILAN ÖLÇÜMLER

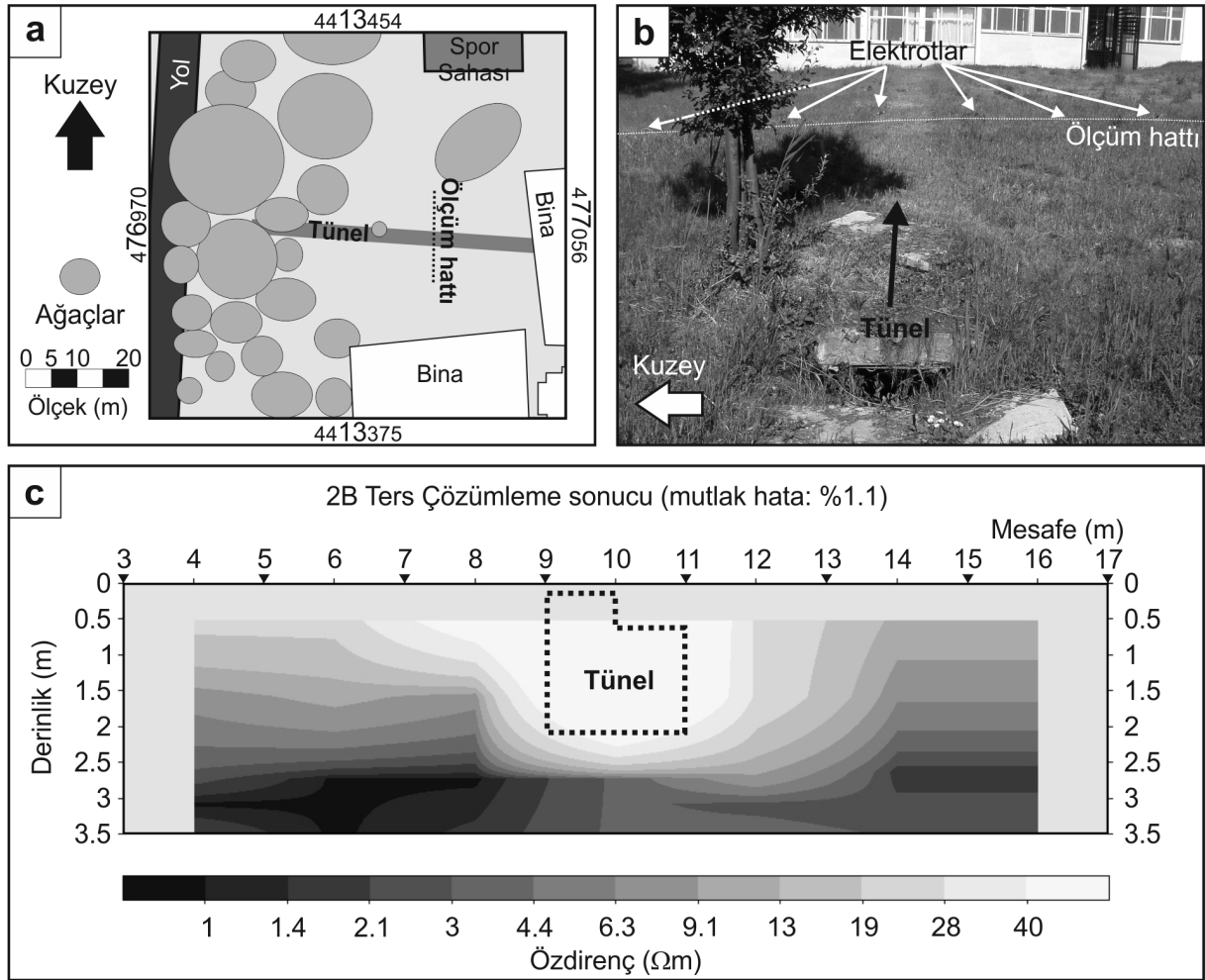
Geliştirilen hafif kablo sistemiyle pek çok test ve arazi ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerden iki tanesi bu bölümde örnek olarak sunulmaktadır. Ölçüm sonuçlarının ters çözümlemesinde Res-2Dinv yazılımı (Loke, 2001) kullanılmıştır.

### Sığ Derinlikte Aktarma Tüneli Ölçümü

Hafif kablo ve akıllı elektrot sistemini test etmek için Hacettepe Üniversitesi kampüsü içinde kısa hatlı bir ölçüm gerçekleştirilmiştir (Şekil

3). Ölçümün yapıldığı sahanın planı Şekil 3a'da sunulmuştur. Ölçüm, yeraltından ölçüm hattına dik olarak uzanan L profilli bir aktarma tüneli üzerinde yapılmıştır (Şekil 3a, 3b). Aktarma tüneli yaklaşık 2 metre yüksekliğinde, 1.5 metre genişliğindedir, betondan oluşan yan duvar kesitleri yaklaşık 20 cm, üst duvar kesidi de 30 cm

kalınlığındadır. Tünelin içinde, Şekil 3b'de arka planda görülen binaya giriş ve çıkış yapan tesisat boruları bulunmaktadır. Tünelin tabanında su birikmiş olduğunu not etmek yerinde olur; ölçüm, yağışlı bir dönem sonrasında, bir vadi tabanında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Hafif kablolu akıllı elektrot anahtarlamalı sistemle aktarma tüneli üzerinde test ölçümü, a) ölçümü yapılan sahanın plan gösterimi, aktarma tüneli ve noktalı çizgi ile tüneli dik kesen ölçüm hattı şekilde sunulmuştur. UTM(m)-WGS84 projeksiyonu. b) Ölçüm hattını ve tüneli gösteren fotoğraf. Tünelin takip ettiği hat (siyah ok), üzerindeki ince toprak katmanında daha az büyüme imkanı bulabilen kısa otlarla da belirgin şekilde görülmektedir. c) Tünel üzerinde yapılan ölçümün ters çözümleme sonucu. L profilli aktarma tünelinin izdüşümü siyah noktalı çizgiyle gösterilmiştir.

Figure 3. Test measurement on a maintenance tunnel using lightweight cable – smart electrode switching system, a) plan view of the study area, maintenance tunnel and the profile line (pointed line) perpendicular to the tunnel is shown in the figure. UTM(m)-WGS84 Projection. b) Photograph showing the measurement profile and the tunnel. Verge defined by the short vegetation due to the thin soil cover on the tunnel (black arrow) is evident in the photograph. c) Inverse modelling result measured on the tunnel. L shaped profile of the maintenance tunnel is projected on the profile with black pointed line.

Tünele dik olarak serilen ölçüm hattının uzunluğu 18 metredir; ölçümde 2 metre elektrot aralıklarıyla Wenner- $\alpha$  açılımı kullanılmıştır (en yüksek n-faktörü = 3). Alınan verinin ters çözümlenmesi “L1 norm ya da robust” olarak isimlendirilen bloklu en küçük mutlak değerler yöntemi kullanılarak 10 yineleme ile yapılmıştır. Artakalan mutlak ortalama değeri (AMS) %1.1’dir. İki boyutlu özdirenç görüntüleme verilerinin ters çözümlenmesinde L1 yönteminin, keskin sınırlar/geçişler gösteren ortamlarda yumuşak en küçük kareler yöntemine (L2 norm veya smooth) göre daha güvenilir sonuçlar ürettiği bilinmektedir (Loke vd., 2003; Olayinka ve Yaramanci, 2000).

Elde edilen iki boyutlu ters çözümlenme sonucu oluşturulan model Şekil 3c’de verilmiştir. Test edilmesi hedeflenen L profilli aktarım tünelinin sınırları kesikli çizgilerle özdirenç kesidi üzerinde gösterilmiştir. Modelde en yüksek özdirenç değeri 103  $\Omega$ m, en düşük özdirenç değeri de 0.8  $\Omega$ m bulunmuştur. Düşük özdirenç değerlerinin alt seviyelerde yoğunlaştığı gözlenmektedir, bu değerlerin aktarım kanalından sızan atık su kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Tünelin yeraldığı bölüm de kesitte yüksek özdirenç değerleriyle belirgindir (Şekil 3c).

### Uzun Profilli Dikey Süreksizlik Ölçümü

Akıllı elektrot sistemi arazi çalışmalarında da kullanılmıştır. 2008 yılı Eylül ayında Nevşehir Acıgöl kalderasında kaldera sınır fayını ve kısmen gömülü olan kaldera duvarını ortaya çıkarmak amacıyla özdirenç görüntüleme ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4).

Bölgedeki ignimbirit akıntılarının ana kaynaklarından biri olduğu bilinen (ör. Ekingen, 1982; Le Pennec vd., 1994; Mouralis vd., 2002) Acıgöl kaldera sistemi üzerinde uzun süredir volkanolojik ve jeofiziksel çalışmalar yapılmaktadır (ör. Le Pennec vd., 1994; Aydar vd., 1995; Frogger vd., 1998; Temel vd., 1998; Le Pennec vd., 2005). Bununla birlikte Acıgöl’ün genç patlamaları kaldera duvarı ve yapısal sınırını kısmen örtmüştür. Yine de kaldera duvarının bazı kısımları ve yapısal sınıra bağlı gelişen dayk/lav sokuşumları, sınır yapısallığını kısmen takip edilmeye olanak sağlamaktadır (Şekil 4a). Bölgede

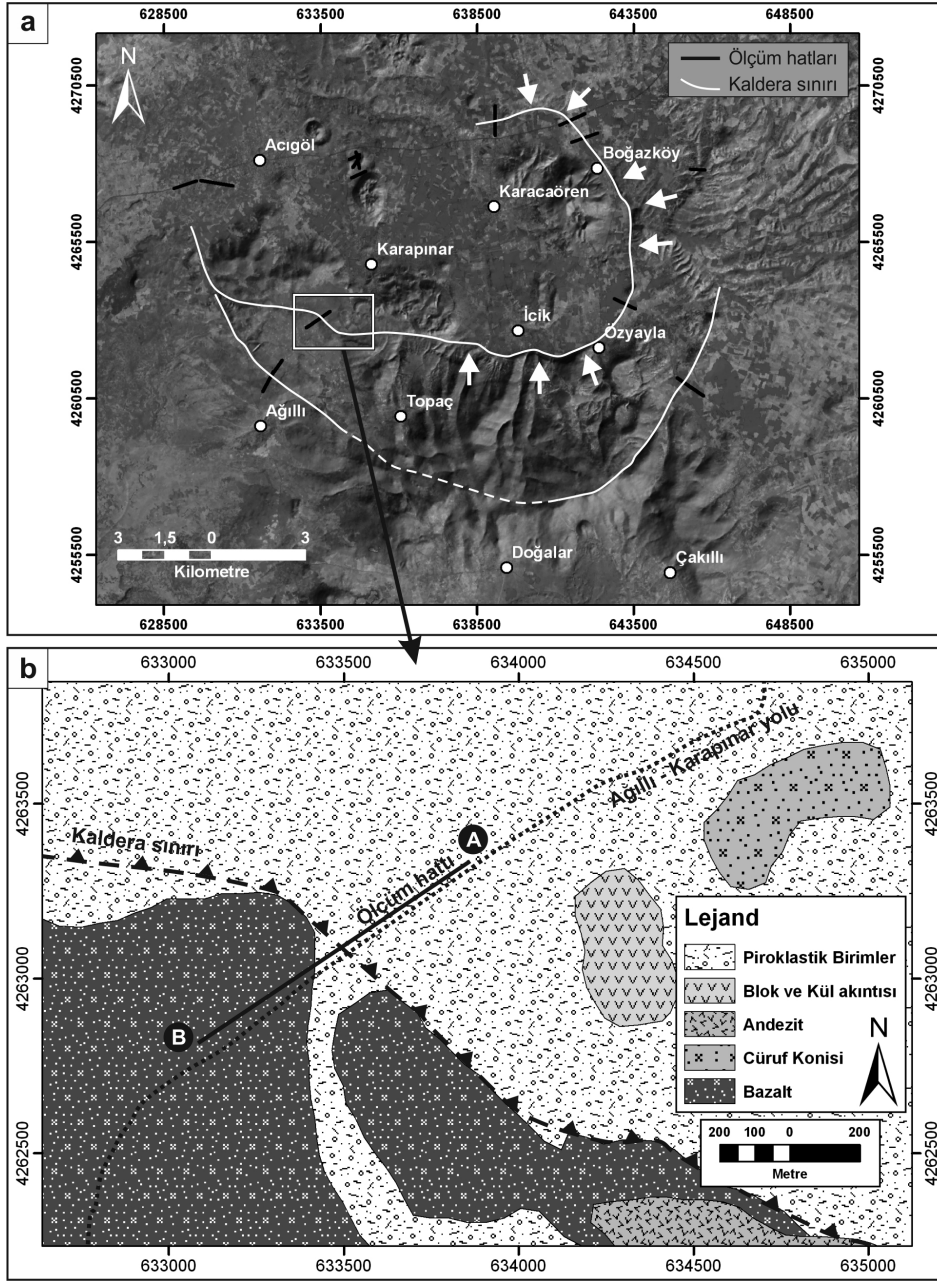
gerçekleştirdiğimiz özdirenç görüntüleme ölçümleri, belirgin olan sınır unsurlarını takip ederek gömülü olan yapısal unsurları da niceselleştirme amacını taşımaktadır. Bu ölçümlerden biri, burada hafif kablolama sisteminin arazi çalışmalarına bir örnek olarak sunulmaktadır (Şekil 4b).

Erdaş dağıının kuzey kenarını oluşturan, Özyayla köyünden batıya doğru uzanan duvar (Şekil 4a) Acıgöl kaldera sistemindeki kaldera duvarının bir kısmını oluşturmaktadır. Andezit akıntıları ve blok ve kül akıntılarında oluşan duvar, batı kenarında, çalışmanın yapıldığı bölgede kuzeydoğudan gelen genç piroklastik akıntılar tarafından örtülmüştür. Kaldera sınırının geçtiği düşünülen hat Şekil 4b’de kesikli ve üçgenli çizgiyle belirtilmiştir. Ölçüm, gömülü olduğu düşünülen kaldera sınırına dik bir hat boyunca yapılmıştır. KD-GB yönünde uzanan ölçüm hattının GB kenarı kaldera öncesine ait bir bazalt akıntısı, KD kenarı da kalderayı örten piroklastik akıntılarla kaplıdır (Şekil 4b).

Karapınar – Ağılı yoluna paralel uzanan ölçüm hattının uzunluğu 940 metredir; 48 adet elektrot kullanılarak tek serimde alınan ölçümde 20 metre elektrot aralıklarıyla Wenner- $\alpha$  açılımı kullanılmıştır (en yüksek n-faktörü = 15). Ters çözümlenme işlemi yine L1 - bloklu en küçük mutlak değerler yöntemi kullanılarak, 16 yineleme ile yapılmıştır. Çözümlemeye topoğrafya da dahil edilmiştir. Ters çözümlenme sonucunda artakalan mutlak ortalama değeri (AMS) %3.7’dir.

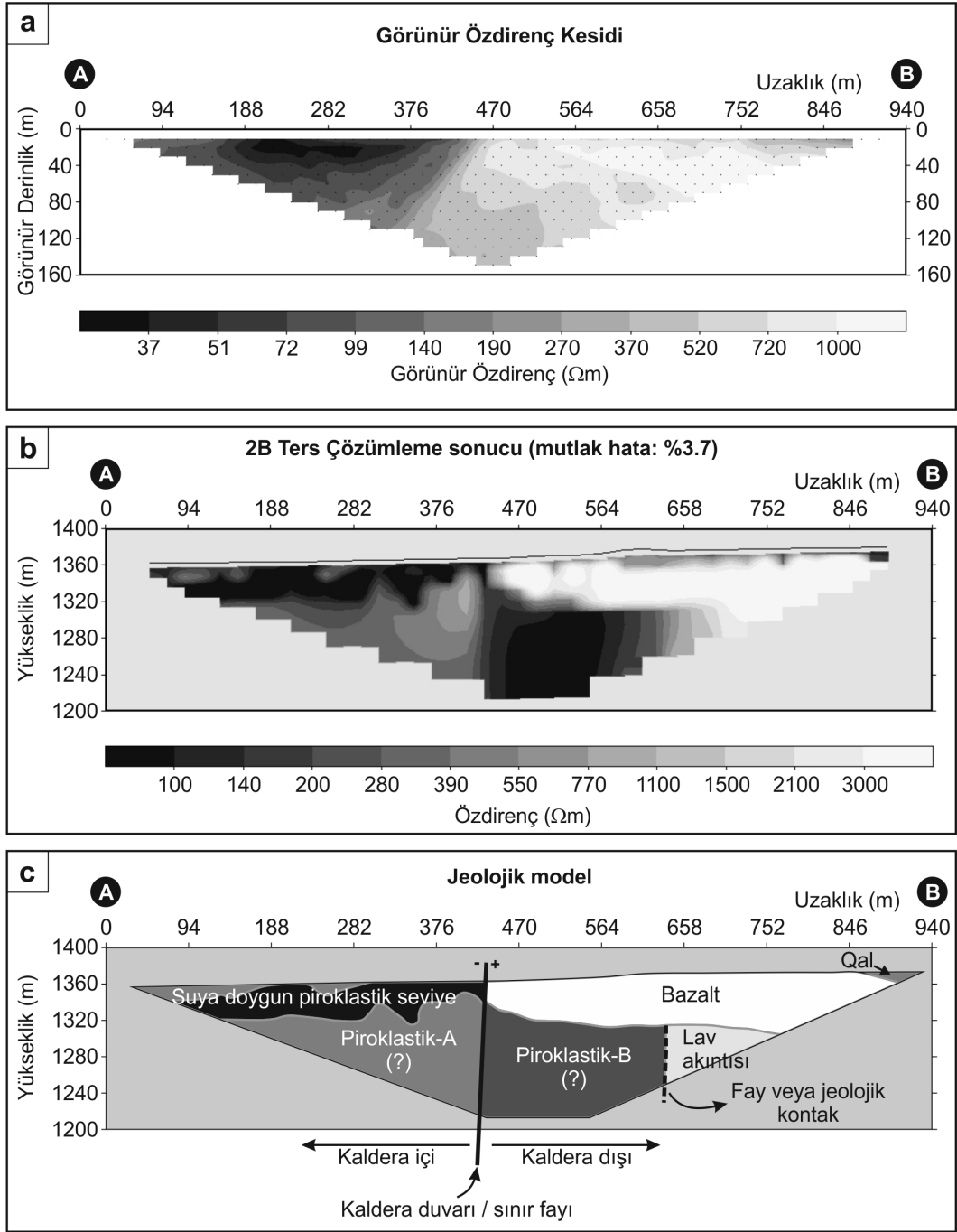
Ölçüm sonucunda elde edilen görünür özdirenç kesidi, ters çözümlenme sonucu ve jeolojik model Şekil 5’te sunulmaktadır. Görünür özdirenç kesidinde elde edilen görüntü (Şekil 5a) tipik bir fay / dikey süreksizlik ölçümü örneğidir. Ters çözümlenme sonucunda elde edilen iki boyutlu kesitte de kesidin ortasından geçen fay / dikey süreksizlik net bir şekilde görülmektedir (Şekil 5b, 5c). Dikey süreksizliğin iki tarafı göz önüne alındığında, kesidin B kenarında, yüzeyde, yüksek özdirenç değerleriyle (>1500  $\Omega$ m) bazalt akıntısı temsil edilmektedir (Şekil 5b). Bazalt akıntısının altında yine muhtemel dikey bir sınırla ayrılan, yanyana iki seviye (<550  $\Omega$ m ve 550 - 3000  $\Omega$ m özdirenç aralıklarıyla) yeralmaktadır (Şekil 5b). Kesidin A kenarında ise yüzeyde düşük özdirençli (<100  $\Omega$ m), suya doygun piroklastik malzemedan oluşan bir seviye ve yaklaşık





Şekil 4. Acigöl kaldere sisteminde gerçekleştirilen uzun profilli arazi ölçümleri. Haritalar UTM(m)-Avrupa 1950 projeksiyon sisteminde sunulmuştur. a) Acigöl kaldere sisteminin sayısal arazi modeli üzerine %60 saydamlıkla oturtulmuş 1,2,3 (R,G,B) bant kombinasyonlu ASTER uydu görüntüsü ile gösterimi. 2008-2009 yıllarında gerçekleştirdiğimiz jeolojik ve jeofiziksel arazi çalışmalarıyla ortaya çıkarılan kaldere sınırı (Ulusoy vd., 2009) beyaz çizgilerle ifade edilmiştir. Örnek olarak sunulan ölçümün yapıldığı alan küçük beyaz dikdörtgenle işaretlenmiştir. b) ölçümün yapıldığı alanın jeoloji haritası, ölçüm hattı ve hattın kaldere sınırına göre konumu.

Figure 4. Long profile field surveys performed in the Acigöl caldera system. Maps are presented with UTM(m)-European 1950 projection. a) Representation of the Acigöl caldera system with an ASTER satellite image in 1,2,3 (R,G,B) band combination superimposed on a Digital Elevation Model with 60% transparency. Structural caldera boundary exposed with the geological and geophysical surveys in 2008 and 2009 (Ulusoy vd., 2009) is presented with white lines. White rectangle marks the study area where the presented sample profile is measured. b) Geological map of the area where the profile is measured, caldera border and the position of the profile line with regard to the border.



Şekil 5. Acıgöl kaldera sınırı üzerinde hafif kablolu akıllı elektrot anahtarlama sistemiyle tek serimle yapılan 940 m uzunluğundaki ölçümün a) görünür öz direnç, b) ters çözümleme ve c) jeolojik model kesitleri. Şekilde siyah daire içinde gösterilen harflerle ifade edilen kesit kenarları Şekil 4'te de sunulmuştur. Görünür öz direnç kesidinde, kesit üzerinde işaretlenmiş siyah noktalar ölçümlerin alındığı noktaları göstermektedir. Hat boyunca ölçülen ve çözümleme de kullanılan topoğrafya da ters çözümleme ve jeolojik model kesitlerinde verilmektedir.

Figure 5. Result sections of the 940 m long profile measured in Acıgöl caldera border with a single layout, using lightweight cable – smart electrode switching system. a) Pseudo-section, b) inverted model and the c) geological model of the measurement. Corners of the sections denoted with letters in black circles are also presented in figure 4. Measured topography used in the inversion process is also given in inverted model and the geological model.

50 metre derinden başlayan daha yüksek öz direnç değerlerine sahip (~200 - 1100  $\Omega$ m) ikinci bir seviye yer almaktadır. Ters çözümleme sonucu, arazi çalışmalarından elde edilen bulgular ve yer elektrik modelden faydalanarak yapılan düz çözüm sonucu kullanılarak kesidin bir jeolojik modeli oluşturulmuştur (Şekil 5c, Ulusoy vd., 2009).

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tasarlanan, prototipi üretilen ve bir öz direnç aletine uyarlanan öz direnç görüntüleme yöntemi için akıllı elektrot anahtarlamalı hafif kalbolama sisteminin arazi testleri ve uygulamaları da gerçekleştirilmiş, verimli sonuçlar elde edilmiştir. Sistemin ana özellikleri elektrotlar üzerine dağılmış bir anahtarlama sistemi ve hafif bir kablo sistemi kullanmasıdır. Sistem küçük yazılım değişiklikleriyle seri bağlantı yoluyla iletişim kurabilen her öz direnç aletine uyarlanabilecek niteliktedir.

Geliştirilen sistem akıllı elektrot anahtarlamalı sistemlerin ilk örneği değildir. Bununla birlikte sistemin daha önce üretilen akıllı elektrot anahtarlamalı sistemlere göre iki önemli avantajı vardır. Bu avantajlardan birincisi önceki sistemlere göre daha az sayıda iç-kablo kullanmasıdır. Az sayıda iç-kablo kullanımı, ana kablo ağırlığını düşüren ana etkidir. İkinci avantaj ise akıllı elektrot ünitelerinin daha önceden tanımlanmış bir adresleme kullanmak zorunda olmamasıdır. Geliştirilen sistemde akıllı elektrotlar, arazide ölçüm öncesinde kendi kendilerini adresleyebilmekte, hangi elektroda hükmedeceğini kablunun üzerinde bulunduğu konuma göre belirleyebilmektedir. Bu özellik sisteme büyük bir uygulama esnekliği kazandırmaktadır. Abdelhadi (2007), geliştirdiği sistemde akıllı elektrotların kendi kendini adresleyebilmesi için fazladan bir iç-kablo kullanmıştır. Benzer şekilde Dahlin (1989)'in geliştirdiği sistem de, kullanıcı arayüzü ve zaman kontrolü için fazladan kabloların işlevleri uygulanan yeni tasarım ile sistem içerisindeki iki adet kontrol iç-kablosu tarafından karşılanmaktadır.

Geliştirilen sistemin merkezi anahtarlama sistemlerine kıyasla en önemli avantajı hafif

olmasıdır. Yaygın olarak kullanılan, aynı uzunlukta kablo serimiyle çalışan merkezi anahtarlamalı sistemlere göre %75 daha hafiftir. Bu özellik arazide özellikle uzun serimli ölçümlerde büyük bir çalışma kolaylığı sağlamaktadır. Merkezi anahtarlamalı sistemlerin akıllı elektrot sistemlerine göre en büyük avantajı çok kanallı ölçümlere olanak sağlamasıdır. Bu özellik ölçüm süresini kanal sayısı ile orantılı olarak hızlandırır. Hafif kablolu akıllı elektrot anahtarlama sistemi gelinen aşamada tek kanalla çalışmaktadır, fakat iç-kablo sayısını artırarak bu dezavantajı bir avantaja dönüştürmek mümkündür. Eklenecek her yeni kanal için bir çift potansiyel iç-kablunun eklenmesiyle bu sorun rahatlıkla ortadan kaldırılabilir. Böyle bir sistem, hafifliği nedeniyle çok kanallı merkezi sistemlere de rakip olabilecek niteliktedir.

Akıllı anahtarlama sistemleri sert iklim koşullarında merkezi anahtarlamalı sistemlere kıyasla arazide kullanılan daha fazla sayıdaki elektronik ünite nedeniyle dezavantajlı ise de kablo ve ünite maliyetinin ucuzluğu, bakım, onarım ve uygulamadaki süreyi azaltma nedeniyle avantajlı konumdadır.

Dahlin (2001)'in öz direnç görüntüleme yönteminde süregelen gelişmelerin devam edeceği yönündeki tahmini yersiz değildir. Aletsel gelişmelerin yanısıra modelleme yöntemlerinin çeşitliliğinin artışı hızla devam etmektedir (ör. Binley vd., 1996; Loke, 2001; Günther, 2005). Geliştirilen sistem de akıllı elektrot anahtarlama sistemleri arasında önemli bir yer kazanmaya adaydır, çok kanallı sisteme dönüştürülmesi durumunda merkezi anahtarlamalı sistemlere alternatif olabilecek niteliktedir. Yapılan çalışma patent başvurusu aşamasındadır.

## KATKI BELİRTME

Sistemin prototipinin üretimi esnasında ve arazi uygulamalarında büyük emeği geçen Ozan Atak'a, görüşlerinden faydalandığımız Dr. Erdal Şen, Dr. Orkun Ersoy ve Dr. Philippe Labazuy'a, kimini kendisi programladığı ilgili yazılımların kullanımına olanak sağlayan Prof. Dr. Torleif Dahlin'e, desteği için Prof. Dr. Hasan Bayhan'a teşekkür ederiz. İ. Ulusoy, geliştirilen kablolama sisteminin de dahil olduğu bir projeye, İsveç

Enstitüsü'nden bir yıllık doktora sonrası davetli araştırmacı bursuyla desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Abdelhadi, A., 2007. Identically programmed intelligent electrodes for use in geoelectrical surveys. United States Patent, US7158048-B2.
- ABEM Instrument AB, 2007. Instruction Manual. ABEM Printed Matter, No 93109, pp. 135.
- Aydar, E., Gourgaud, A., Deniel, C., Lyberis, N. and Gündoğdu, M.N., 1995. Le volcanisme Quaternaire d'Anatole centrale (Turquie): association de magmatismes calco-alcalin en domaine de convergence, *Can. J. Earth Sci.* 32, 1058-1069.
- Barde-Cabusson, S., Finizola, A., Revil, A. et al., 2009. New geological insights and structural control on fluid circulation in La Fossa cone (Vulcano, Aeolian Islands, Italy). *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 185(3), 231-245.
- Barker, R., 1981. The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. *Geophysical Prospecting*, 29(1), 128-143.
- Barker, R., 1992. A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface, *First Break*, 10(2), 53-62.
- Binley, A., Pinheiro, P. and Dickin, F., 1996. Finite Element based Three-Dimensional Forward and Inverse Solvers for Electrical Impedance Tomography, In: *Proc. Colloquium on Advances in Electrical Tomography, Computing and Control Division, IEE, Digest No. 96(143), p6/1-6/3, Manchester, UK.*
- Carpenter, E.W., 1955. Some notes concerning the Wenner configuration. *Geophys. Prospect.*, 3(4), 388-402.
- Carpenter, P.J., Kaufmann, R.S. and Price, B., 1990. Use of resistivity soundings to determine landfill structure. *Ground Water*, 28, 569-575.
- Christensen, N.B., Sørensen, K.I., 1998. Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeological investigations. *European Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 3(1), 75-90.
- Dahlin, T., 1989. The Development of a Cable System for Vertical Electrical Sounding and a Comparison of the Schlumberger and Offset Wenner Methods, Lic. Thesis LUTVDG / (TVTGD-1005) / 1-77(1989), Lund University, 77p.
- Dahlin, T., 1993. On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications, PhD Thesis, ISRN LUTVDG / TVDG--1007--SE, ISBN 91-628-1032-4, Lund University, 187p.
- Dahlin, T., 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14, 275-283.
- Dahlin, T., Bjelm, L. and Svensson, C., 1999. Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 32, 163-172.
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers and Geosciences*, 27, 1019-1029.
- De Franco, R., Biella, G., Tosi, L., Teatini, P., Lozej, A., Chiozzotto, B., Giada, M., Rizzetto, F., Claude, C., Mayer, A., Bassan, V., Gasparetto-Stori, G., 2009. Monitoring the saltwater intrusion by time lapse electrical resistivity tomography: The Chioggia test site (Venice Lagoon, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 69, 117-130.
- Drahor, M.G., 2006. Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 59(3), 205-223.
- Drahor, M.G., Berge, M.A. ve Kurtulmuş, T.Ö., 2006. Dolgu alanlarda öz direnç tersçözüm modellemesi ve eski bir atık dolgu alanına uygulanması. *Yerbilimleri*, 27(3), 195-209.
- Drahor, M.G.; Berge, M.A.; Kurtulmuş, T.O., Hartmann, M. and Speidel, M.A., 2008.

- Magnetic and Electrical Resistivity Tomography Investigations in a Roman Legionary Camp Site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeological Prospection*, 15(3), 159-186.
- Ekingen, A., 1982. Nevşehir kalderasında jeofizik prospeksiyon sonuçları. *Türk. Jeol. Kurul. Bildiri Özet Kitabı*, pp. 82.
- Finizola, A., Aubert, M., Revil, A., Schuetze, C. and Sortino, F., 2009. Importance of structural history in the summit area of Stromboli during the 2002-2003 eruptive crisis inferred from temperature, soil CO<sub>2</sub>, self-potential, and electrical resistivity tomography. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 183(3-4), 213-227.
- Froger, J.-L., Lénat, J.-F., Chorowicz, J., Le Pennec, J.-L., Bourdier, J.-L., Köse, O., Zimitoglu, O., Gündoğdu, N.M. and Gourgaud, A., 1998. Hidden calderas evidenced by multisource geophysical data; example of Cappadocian Calderas, Central Anatolia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 99-128.
- Günther, T., 2005. Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of Resistivity Structures from DC Measurements. PhD Thesis, University of Mining and Technology, Freiberg (Germany), pp. 160 (yayımlanmamış).
- Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Griffiths, D.H. and Barker, R.D., 1994. Electrical imaging in Archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 21(2), 153-158.
- Le Pennec, J.-L., Bourdier, J.-L., Froger, J.-L., Temel, A., Camus, G. and Gourgaud, A., 1994. Neogene ignimbrites of the Nevşehir plateau (Central Turkey): stratigraphy, distribution and source constraints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63(1-2), 59-87.
- Le Pennec, J.-L., Temel, A., Froger, J.-L., Sen, S., Gourgaud, A. and Bourdier, J.-L., 2005. Stratigraphy and age of the Cappadocia ignimbrites, Turkey: reconciling field constraints with paleontologic, radiochronologic, geochemical and paleomagnetic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141(1-2), 45-64.
- Loke, M.H., 2001. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. *Res2Dinv User Manual*. Geotomo software, pp. 49.
- Loke, M.H., Acworth, I. and Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.
- Meju, M.A. and Montague, M., 1995. Basis for a flexible low-cost automated resistivity data acquisition and analysis system. *Computers and Geosciences*, 21(8), 993-999.
- Mouralis, D., Pastre, J.-F., Kuzucuoglu, C., Türkcan, A., Atici, Y., Slimak, L., Guillou, H. and Kunesch, S., 2002. Les complexes volcaniques Rhyolithiques quaternaires d'Anatolie centrale (Göllü Dag et Acigöl, Turquie) : Genèse, instabilité, contraintes environnementales. *Quaternaire*, 13(3-4), 219-228.
- Noel, M. and Xu, B.W., 1991. Archaeological investigation by electrical-resistivity tomography - A preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107(1), 95-102.
- Olayinka, A.I. and Yaramanci, U., 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 63-81.
- Overmeeren, R.A., van Ritsema, I.L., 1988. Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6(10), 313-324.
- Parasins, D.S., 1962. *Principles of Applied Geophysics*, 176 pp., London: Methuen.
- Parasins, D.S., 1965. *Theory and practice of electric potential and resistivity*

- prospecting using linear current electrodes. *Geoexploration*, vol. 3(1), 3-69.
- Pellerin, L., 2002. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. *Surveys in Geophysics*, 23(2-3), 101-132.
- Schlumberger, C., 1920. *Etude sur la Prospection Electrique du Sous-sol*, Gaultier-Villars et Cie., Paris, 94pp.
- Slater, L., Binley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R. and Sandberg, S., 2002. A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank. *Journal of Applied Geophysics*, 49(4), 211-229.
- Soupios, P.M., Georgakopoulos, P., Papadopoulos, N., Saltas, V., Andreadakis, A., Vallianatos, F., Sarris, A. and Makris, J.P., 2007. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4(1), 94-103.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, 2nd Ed. Cambridge University Press, UK.
- Temel, A., Gündoğdu, M.N., Gourgaud, A. and Le Pennec, J.-L., 1998. Ignimbrites of Cappadocia (Central Anatolia, Turkey): petrology and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 447-471.
- Ulusoy, İ., Labazuy, P., Aydar, E., Atak, O., Yürür, T., Artuner, H. and Dahlin, T., 2009. Multisource geophysical investigation of the Acigöl caldera structure (central Turkey): preliminary results. EGU2009, Vienna, Austria.
- Wenner, F., 1912. The four-terminal conductor and the Thomson bridge, U.S. Bureau of Standards Bulletin, 8, 559-610.
- Yaramanci, U., 2000. Geoelectric exploration and monitoring in rock salt for the safety assessment of underground waste disposal sites. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 181-196.