



Bir toprak dolgu barajındaki sızıntı yollarının belirlenmesinde elektrik özdirenç görüntüleme ve doğal potansiyel yöntemlerin uygulaması

Application of electrical resistivity imaging and self-potential methods to determine leakage pathways in an earth fill dam

Sedat YILMAZ^{1*}, Meriç KÖKSOY¹

¹Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
sedatylimaz@sdu.edu.tr, merickocksoy@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 10.03.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 28.11.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.60862
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Toprak dolgu barajlarındaki yaygın sorun baraj inşasından sonraki olağandışı sızıntı veya aşırı kaçaklardır. Toprak dolgu barajı olarak tasarılan Akdeğirmen barajı (Afyonkarahisar, Türkiye) su ile dolmaya başlamasıyla, sağ sahil mansabında ve dolu savak temelinde sızıntı gelişmiştir. Bu barajdaki sızıntı elektrik özdirenç ve doğal potansiyel ölçümleri kullanılarak araştırılmıştır. Özdirenç görüntüleme araştırması için 10 m birim elektrot aralıklı dipol-dipol elektrot dizilimi ve verileri değerlendirmek için robust ters çözüm tekniğini esas alan bir algoritma kullanılmıştır. Doğal potansiyel verileri baza indirgeme ölçü tekniği ile toplanmış ve grafiksel sunum ile nitel olarak yorumlanmıştır. Araştırma sonuçları yeraltı tabaka dağılımını ve sağ sahil mansabı boyunca sızıntı yollarını ortaya çıkarmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektrik özdirenç, Doğal potansiyel, Baraj, Sızıntı

Abstract

The most common problem in earth dams is abnormal seepage or excessive leakage after the foundation of the dam. When water started to fill the reservoir in Akdeğirmen dam (Afyonkarahisar, Turkey) designed as a zoned earth dam, the seepage developed at the base of the spillway and the downstream of the right bank. The leakage at this dam was investigated by using electrical resistivity and self-potential measurements. The dipole-dipole electrode array with unit electrode spacing of 10 m was used for resistivity imaging survey. An algorithm based on robust inversion technique was used to invert electrical resistivity data. The self-potential data were collected by fixed reference method and interpreted qualitatively by graphs. The investigation results revealed the distribution of strata and the leakage paths along the downstream of the right bank.

Keywords: Electrical resistivity, Self-potential, Dam, Leakage

1 Giriş

Türkiye’deki barajların %80’inden fazlası toprak dolgu barajlardır. Bu tür barajlarda yaygın sorun, baraj rezervuarında su tutulmaya başlamasından sonra oluşan aşırı sızıntı ve su kaçaklarıdır. Barajlardaki su sızıntıları, genellikle baraj gövdesi içinden, kenarlarından ve rezervuar alanındaki jeolojik katmanlardan ileri gelmektedir. Böyle bir toprak dolgu barajındaki sızıntı, barajın güvenliği ve verimliliğini sürdürmesi bakımından kontrol altına alınmalıdır.

Barajlardaki sızıntı sorunlarının araştırılmasında, kuyu verileri, boya izleme deneyleri, yeraltı suyu seviyesini izleme gibi doğrudan yöntemlerin yanında jeofizik arama yöntemleri (örneğin, elektrik özdirenç ve doğal potansiyel) gibi dolaylı yöntemler kullanılmaktadır. Elektrik özdirenç yöntemi yer içindeki su doygunluğuna duyarlı olduğu için, daha ileri evrelere gelişmeden önce bir baraj sızıntısını belirlemede faydalıdır. Çevre ve mühendislik çalışmaları için iki-boyutlu (2-B) elektrik özdirenç görüntüleme (Electrical Resistivity Imaging-ERI) yöntemi, geleneksel bir-boyutlu düzey elektrik sondaj araştırmalarının yetersiz kaldığı karmaşık jeolojik bölgelerdeki yeraltı özdirenç dağılımının nispi olarak doğru bir resmini sağlamaktadır [1]. Bu yöntem baraj sızıntı sorunlarının araştırılmasında yaygın olarak kullanılmıştır [2]-[7]. Doğal Potansiyel (Self Potential-SP) ölçümleri de baraj sızıntı araştırmalarında kullanılmıştır [8]-[10].

Bu çalışmada, 2-B ERI ve SP yöntemleri kullanılarak Afyonkarahisar ilinin içme suyunu sağlayan Akdeğirmen

barajının sağ sahil mansabında oluşmuş sızıntı araştırılmıştır. Jeofizik araştırma sonuçlarına ek olarak, yeraltı suyu akış durumu hakkında doğrudan bilgi sağlayan boya izleme deneyi sonuçları da irdelenmiştir.

2 Çalışma alanı

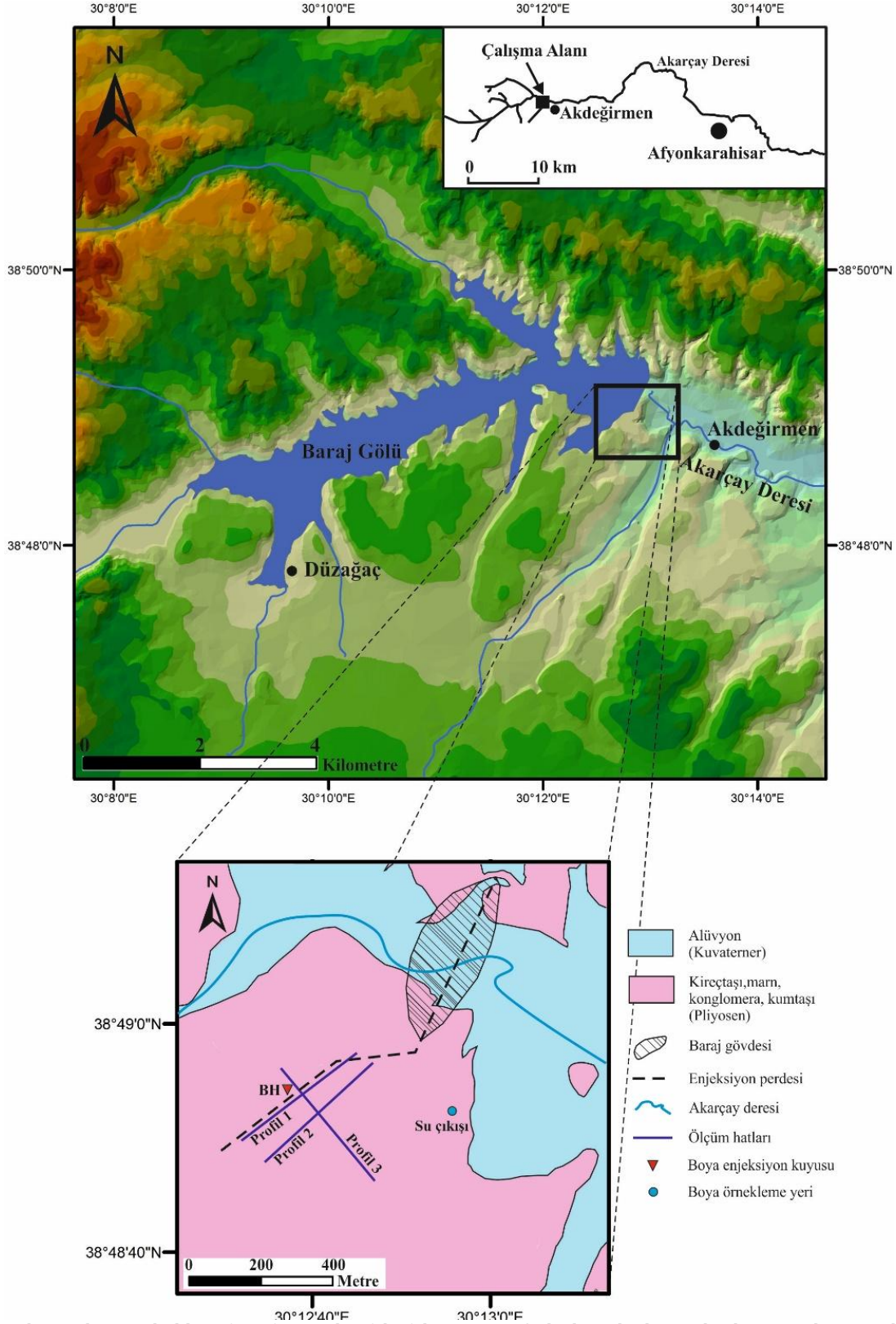
Çalışma alanı Afyonkarahisar ilinin 30 km batısında bulunan Akarçay deresi boyunca Akdeğirmen köyü yakınındadır (Şekil 1). Akdeğirmen barajı Akarçay deresine bir bariyer oluşturmaktadır. Akarçay 7300 km² alanı kapsayan kapalı bir havzadır. Bu havzada yıllık ortalama sıcaklık 11.2 °C, yağış miktarı 437 mm/yıl ve buharlaşma miktarı 1170 mm/yıl olup yarı kurak bir iklime sahiptir.

Akdeğirmen barajını çevreleyen bölge ve rezervuar alanı Pliyosen çökelleri ve Kuvaterner alüvyondan oluşur (Şekil 1). Farklı kalınlıktaki Pliyosen yaşlı görsel çökeller kireçtaşı, marn, konglomera ve kumtaşıdan meydana gelmektedir. Kuvaterner alüvyon ise farklı kökenli çakıl, kum, kil ve siltten oluşur. Kuvaterner alüvyonun alt seviyeleri Pliyosen yaşlı kireçtaşı ve marndan oluşmaktadır. Bölgedeki kireçtaşı ve marn araldanması kuyu verilerinden gözlenmiştir [11].

Zonlu toprak dolgu barajı olarak inşa edilen Akdeğirmen barajı Afyonkarahisar ilinin içme suyunu sağlamaktadır. Bu baraj 430 m uzunluğunda ve kreti ise dere yatağından 35 m yüksekliktedir. Baraj 1134 m kret yüksekliği ve 6 km² rezervuar alanına sahiptir. Baraj tamamlandıktan sonra rezervuar su ile dolmaya başlayınca, dolusavak temelinde ve baraj sağ sahil mansabında sızıntı gelişmiştir. Rezervuar su

seviyesi yükseldikçe sızıntı artmış ve vadide birkaç noktada su çıkışları gözlenmiştir. 2009 ve 2013 yılları arasında aşırı sızıntıyı engellemek amacıyla, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü tarafından bir takım jeoteknik ve jeofizik çalışmalar yapılmış olup bu çalışmalar sonucunda baraj

inşasındaki enjeksiyon perdesine ek olarak ilave perde enjeksiyonları yapılmıştır. İyileştirme çalışmaları dolu savaktaki sızıntıyı engellese de, sağ sahil mansap yamacındaki su çıkışı devam etmektedir (bkz. Şekil 1).



Şekil 1: Çalışma alanı yer bulduru (üstte) ve jeoloji (altta) haritası. Jeofizik ölçüm hatları jeoloji haritasında gösterilmiştir.

3 Materyal ve yöntem

ERI ölçümleri 10 m elektrot aralıklı dipol-dipol elektrot dizilimine göre Terrameter SAS 1000 özdirenç cihazına bağlı 41 elektrotlu Lund Imaging System ile güneybatı (GB)-kuzeydoğu (KD) yönünde iki hat boyunca ve kuzeybatı (KB)-güneydoğu (GD) yönünde bir hat boyunca yapılmıştır (bkz. Şekil 1). Dipol-dipol dizilimi yanal heterojeniteleri belirlemede iyi ayrımlılığa sahiptir [12],[13]. Ölçülen veriler Res2Dinv yazılımını kullanarak 2-B ERI kesitlerine dönüştürülmüştür. Bu 2-B özdirenç verilerini değerlendirme yazılımında, ölçülen saha verileri ile model verileri arasındaki farkları en küçüklemek için, hem düzgünlük-kısıtlı en küçük kareler ters çözümü hem de robust ters çözüm yöntemleri kullanılmaktadır [13]. Robust ters çözüm yöntemi, yeraltı materyallerindeki elektrik iletkenlikler arasında büyük farklar olduğunda, yeraltı modelindeki keskin sınırları ortaya çıkarmada daha yeteneklidir [5]. Bu sebepten dolayı, bu çalışmadaki tüm ERI verilerinin ters çözümünde bu yöntem kullanılmıştır. SP ölçümleri baza indirgeme ölçü tekniği ile GB-KD yönündeki özdirenç hatlarında yapılmıştır. Her bir profil için ölçülen SP verilerine uygulanan düzeltmelerden yığma değerleri hesaplanmış ve bu veriler grafiksel sunum ile nitel olarak yorumlanmıştır.

Boya izleme deneyi enjeksiyon perdesine yakın bir yerde açılmış BH kuyusunda (bkz. Şekil 1) gerçekleştirilmiştir [14]. Hidrojeolojik izleyici boya olarak kullanılan uranın ve rodamin en yaygın olanlarıdır [15]. Burada izleyici boya olarak uranın kullanılmış ve su örneklerindeki boya şiddeti bir fluorometre (Model 111, Turner Designs Inc., Sunnyvale, CA) kullanılarak ölçülmüştür. Boya izleme deneyi 200 sa. boyunca su çıkışı örnekleme yerinde (bkz. Şekil 1) sonuçlar üretmiştir. Boya enjeksiyonu ve en yüksek boya şiddeti arasındaki zaman ve test boyunca ortalama akış hızı [16], boya enjeksiyon kuyusu ile örnekleme yeri arasındaki doğrusal mesafeden hesaplanmıştır.

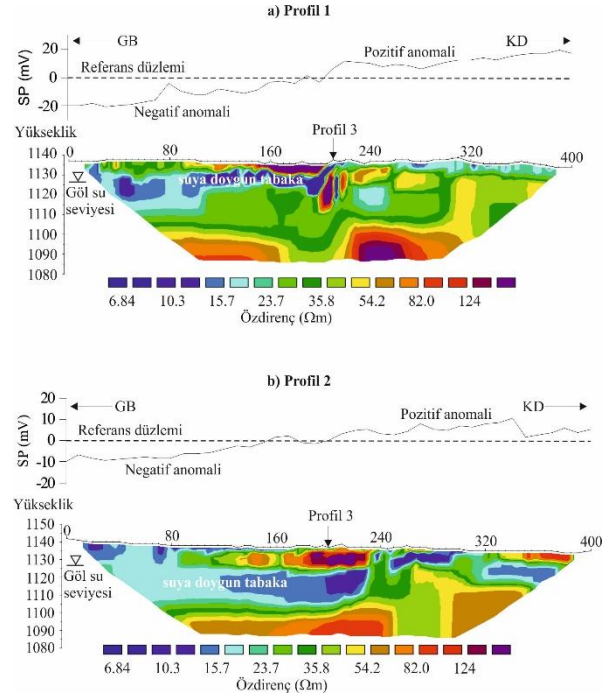
4 Saha verilerinin yorumu

Baraj sağ sahilindeki Profil 1-3'ten elde edilen 2-B özdirenç kesitler ve SP belirtiler Şekil 2 ve 3'te gösteriliyor. Saha özdirenç verisinin ters çözümünden sonuçlanan özdirenç kesitler, Profil 1 için 6 yineleme sonunda %4.41 hata, Profil 2 için 6 yineleme sonunda %3.16 hata ve Profil 3 için 4 yineleme sonunda %4.5 hata ile hesaplanmıştır. Her üç kesit yüzeyden yaklaşık olarak 50 m derinliğe kadar bilgi vermektedir. SP verileri ise, Profil 1 için -20 mV ve +20 mV arasında ve Profil 2 için -10 mV ve +10 mV arasında olmak üzere hem negatif hem de pozitif değerlere sahiptir.

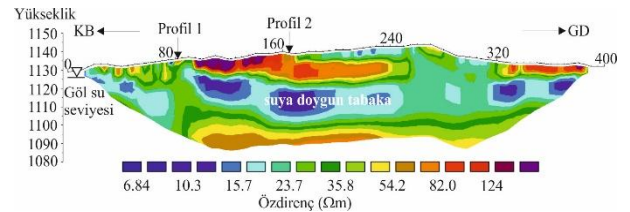
Profil 1 için özdirenç kesitin (Şekil 2a) sol kısmında 5 m kalınlığında nispi olarak yüksek özdirençli (>50 Ωm) bir bölge vardır. Profilin 200 m uzaklığına kadar 5-10 m kalınlığa sahip düşük özdirençli (<20 Ωm) bir tabaka jeolojik formasyondaki suya doygunluğu göstermektedir. Yaklaşık olarak 30 m derinliğe kadar ortalama 20-50 Ωm özdirençli bir orta tabaka ve bu derinlikten sonra yüksek özdirençli (>50 Ωm) bir alt tabaka vardır. Profil 2 için özdirenç kesitin (Şekil 2b) tamamında görülen ve kesitin başlangıcında yüzeyden 30 m derinliğe, kesitin orta kısmında 20 m kalınlığa ve kesitin sonunda ise 10 m kalınlığa sahip düşük özdirençli (<20 Ωm) tabakanın suya doygunluğunu göstermektedir. Onun altında 20-50 Ωm özdirençli bir orta tabaka ve altında ise yüksek özdirençli (>50 Ωm) bir alt tabaka temel kayaya karşılık gelmektedir.

Profil 1 ve 2 için gözlenen SP belirtiler (Şekil 2a ve 2b), her iki profilin orta kısmına kadar referans düzleminin altında negatif değerler gösterirken, profillerin geri kalan kısmında ise referans düzleminin üzerinde yani pozitif değerler göstermektedir. Negatif SP değerleri yeraltı suyu akışının güçlü bir belirtisi iken pozitif değerler ise bu akışın yüzeye doğru olduğunu göstermektedir. Ayrıca negatif SP değerlerin pozitif SP değerlere doğru eğilimi, özdirenç kesitlerde görülen sığ temel kaya yüzey geometrisi ile tutarlıdır.

Baraj sağ sahilindeki memba tarafından mansap tarafına doğru olan Profil 3 için özdirenç kesit Şekil 3'te gösteriliyor. Baraj gölü seviyesi 1127 m yüksekliğinde olup kesitte gösterilmiştir. Kesitin tümünde gözlenen ve yüzeyden ortalama 35 m derinliğe kadar olan düşük özdirençli (<20 Ωm) tabaka jeolojik formasyonun suya doygun olduğunu göstermektedir. Onun altında yaklaşık 10 m kalınlığında orta özdirençli (20-50 Ωm) bir tabaka vardır. Onun altında ise yüksek özdirençli (>50 Ωm) bir tabakanın varlığı az da olsa görülebilmektedir. Kesitin sol kısmındaki düşük özdirençli (<10 Ωm) bölge jeolojik formasyona suyun girişini açıkça göstermektedir.

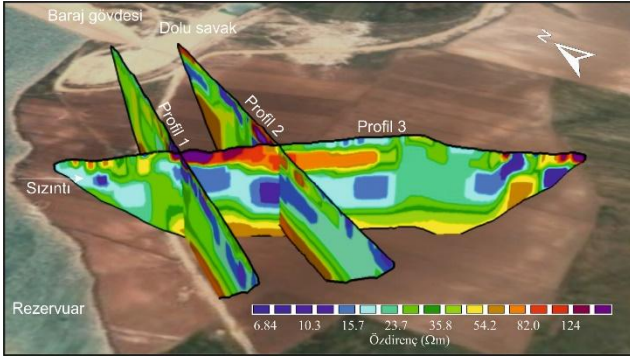


Şekil 2: 2-B özdirenç kesitler ve SP anomaliler. (a): Profil 1 ve (b): Profil 2.



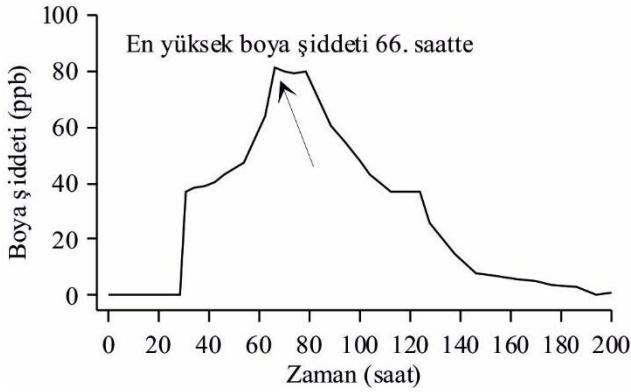
Şekil 3: Profil 3 için 2-B özdirenç kesit.

2-B elektrik özdirenç ters çözüm sonuçlarının üç-boyutlu (3-B) gösterimi Şekil 4'te verilmiştir. Baraj çalışma alanının uyu görüntüsü üzerine yerleştirilmiş bu panel (fence) diyagram, sızıntı bölgesinin ve yollarının 3-B özdirenç dağılımını görmemizde faydalı bir gösterim şeklidir. ERI profillerin kesiştiği yerlerde özdirenç dağılımı birbirleriyle uyumludur.



Şekil 4: 2-B özdirenç kesitlerin panel diyagram gösterimi.

Şekil 5, BH kuyusundan enjekte edilmiş izleyici boyanın su çıkışı örnekleme yerinde ölçülmüş boya şiddeti grafiğini göstermektedir. Enjekte edilen boyanın en büyük geri kazanımı 66. sa. te olmuştur. Yeraltı suyu akış hızı ise, boya enjeksiyon kuyusu ile örnekleme yeri arasındaki doğrusal mesafeden 15.9 m/sa. olarak hesaplanmıştır. Yeraltı suyu akışındaki bu yüksek hız değeri, sızıntı yollarının mansap yamacı boyunca güneydoğu yönünde olduğunu göstermektedir.



Şekil 5: BH kuyusundan enjekte edilmiş boyanın su çıkışı örnekleme yerinde 200 sa. boyunca ölçülmüş boya şiddeti değerleri.

5 Sonuçlar

Akdeğirmen baraj rezervuarında su tutulmaya başlandıktan sonra gelişen sızıntıları engellemek için yapılan mühendislik uygulamalarına karşın, baraj sağ sahil mansap yamacındaki su çıkışında azalma olmamıştır. Baraj rezervuarından jeolojik formasyona su girişinin ve sızıntı yollarının tespiti için ERI ve SP yöntemleri uygulanmıştır.

20 Ωm ve aşağısındaki özdirence sahip tabaka suya doygunudur. 20 Ωm ve 50 Ωm arasında özdirence sahip tabaka su içermemektedir. 50 Ωm ve üzerindeki özdirence sahip tabaka ise az ayrılmış ana kayadır. KB-GD yönündeki ERI kesitinin sol kısmında 1110 m ve 1130 m yükseklikleri arasındaki düşük özdirençli (<10 Ωm) bir bölge vardır. Bu baraj rezervuarından jeolojik formasyona suyun girişini açıkça göstermektedir. Baraj rezervuarından sızıntının olduğu bölgelerde negatif SP belirtileri görülürken, su akışının yüzeye yaklaştığı yerlerde pozitif SP belirtileri görülmektedir. GB-KD yönündeki ERI kesitlerinin sol tarafındaki düşük özdirençli bölgeler ile negatif SP belirtileri birbiriyle uyumludur. Buna ek olarak, BH boya enjeksiyon kuyusu ve su çıkışı örnekleme yeri arasındaki yüksek yeraltısu akış hızı,

jeolojik formasyona giren suyun mansap yamacı boyunca güneydoğu yönünde ilerlediğini göstermektedir.

Bu sonuçlara göre, sızıntı yollarının tortul çökellerin arasındaki yüzey boyunca olduğu açıktır. Baraj sağ sahil boyunca rezervuardan formasyona sızıntının olması, baraj inşası ve iyileştirme çalışmalarındaki yetersiz enjeksiyonlar sonucu bazı geçirimli malzemelerin kalması sonucudur. Bu sebeple, bu bölgedeki sızıntıyı engellemek için yeni bir enjeksiyon perdesinin yapılması önerilmektedir.

6 Teşekkür

Yazarlar, "4452-YL1-15" No.lu proje kapsamında verdiği finansal destekten ötürü Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine (BAP) sonsuz şükranlarını sunar.

7 Kaynaklar

- [1] Griffiths DH, Barker RD. "Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology". *Journal of Applied Geophysics*, 29(3-4), 211-226, 1993.
- [2] Bedrosian PA, Burton BL, Powers MH, Minsley BJ, Phillips JD, Hunter LE. "Geophysical investigations of geology and structure at the Martis Creek Dam, Truckee, California". *Journal of Applied Geophysics*, 77, 7-20, 2012.
- [3] Minsley BJ, Burton BL, Ikard S, Powers MH. "Hydrogeophysical investigations at Hidden Dam, Raymond, California". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 16(4), 145-164, 2011.
- [4] Qingyun D, Wang M. "Determining areas of leakage in the Da Ye Dam using multi-electrode resistivity". *Bulletin Engineering Geology Environment*, 69(1), 105-109, 2010.
- [5] Sjö Dahl P, Dahlin T, Johansson S. "Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden". *Environmental Geology*, 49(2), 267-273, 2005.
- [6] Sjö Dahl P, Dahlin T, Johansson S, Loke MH. "Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam". *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4), 155-164, 2008.
- [7] Song SH, Song Y, Kwon BD. "Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam". *Exploration Geophysics*, 36(1), 92-96, 2005.
- [8] Ogilvy AA, Ayed MA, Bogoslovsky VA. "Geophysical studies of water leakage from reservoirs". *Geophysical Prospecting*, 17(1), 36-62, 1969.
- [9] Panthulu TV, Krishnaiah C, Shirke JM. "Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods". *Engineering Geology*, 59(3-4), 281-295, 2001.
- [10] Sjö Dahl P, Dahlin T, Johansson S. "Using the resistivity method for leakage detection in blind test at the Rössvatn embankment dam test facility in Norway". *Bulletin Engineering Geology Environment*, 69(4), 643-658, 2010.
- [11] Devlet Su İşleri. "Afyon Gecek Akdeğirmen Barajının Geoteknik Planlama Raporu". Devlet Su İşleri 18. Bölge Müdürlüğü, Isparta, Türkiye, 1997.
- [12] Dahlin T, Zhou B. "A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays". *Geophysical Prospecting*, 52(5), 379-398, 2004.
- [13] Loke MH. "Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys". <http://www.geotomosoft.com> (24.06.2013).

- [14] Devlet Su İşleri. "Akdeğirmen (Afyonkarahisar) Barajı 3. ve 4. Boya İzleme Deneyleri Raporu". Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2013.
- [15] Flury M, Wai NN. "Dyes as tracers for vadose zone hydrology". *Reviews of Geophysics*, 41(1), 1002, 2003.
- [16] Nienow P, Sharp M, Willis IC. "Velocity-discharge relationships derived from dye tracer experiments in glacial meltwaters: Implications for subglacial flow conditions". *Hydrological Processes*, 10(10), 1411-1426, 1996.