

## Ayrışma Özelliklerinin Elektriksel Özdirenç Tomografisi (EÖT) Yöntemi Yardımı İle Karşılaştırılması

*Comparison of Weathering Properties by the Help of Electrical Resistivity Tomography Technique (ERT)*

**Ömer ÜNDÜL, Atiye TUĞRUL, İ. Halil ZARİF**

*İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İSTANBUL*

Geliş (received) : 11 Mayıs (May) 2011  
Düzeltilme (revised) : 21 Haziran (June) 2011  
Kabul (accepted) : 21 Haziran (June) 2011

### ÖZ

Kayaçların ayrışma dereceleri ve derinlikleri, mühendislik çalışmalarının maliyetini, etkinliğini ve devamlılığını etkileyen önemli jeo-mühendislik özelliklerdendir. Ayrışma özellikleri temel, sevi tünel vb. çalışmaların ön araştırmaları sırasında belirlenmelidir. Ayrışmanın tek türlü olmamasından ve yönlere göre farklılık göstermesinden dolayı, yeraltının gerçeğe en yakın şekilde tanımlanabilmesi için fazla sayıda sondaja ihtiyaç duyulmaktadır. Pek çok çalışmada, sondaja göre daha geniş alanların, daha hızlı ve daha az masraflı olarak tanımlanabilmesi ve bu alanlar hakkında bilgi toplanabilmesi için Elektriksel Özdirenç Tomografisi (EÖT) Yöntemi kullanılmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle EÖT Yöntemi'nin, Bursa bölgesinde yüzeylenen piroksenit ve dunitlerin ayrışma özelliklerinin tespitinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. EÖT çalışmaları üç hat boyunca gerçekleştirilmiştir. Bunlardan iki tanesi dunitlerin bir tanesi ise piroksenitlerin üzerindedir. Çalışma alanında yapılan yüzey gözlemleri sonucunda, dunitlerin ayrışmamış seviyeden, tamamen ayrışmış seviyeye kadar; piroksenitlerin ise az ayrışmış seviyeden, tamamen ayrışmış seviyeye kadar olduğu saptanmış, bu ayrışma seviyeleri üzerinde seçilen kesit güzergâhlarında yapılan EÖT ölçümleri ile yüzey gözlem sonuçları ve laboratuvar verileri karşılaştırılmıştır. EÖT çalışmaları sırasında, Wenner dizilimleri ile dipol-dipol dizilimleri denenmiştir. Elde edilen veriler 2B ters çözüme tabi tutularak elektriksel yapı modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller, dunit ve piroksenitlerin mühendislik özelliklerinin ayrışmaya bağlı değişimleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, Wenner diziliminin, özellikle dunitlerin ayrışma özelliklerinin belirlenmesinde, kullanılabilir sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Ayrışma, Dunit, Elektriksel özdirenç tomografisi (EÖT), Orhaneli, Piroksenit.

**ABSTRACT**

*Weathering grades and their depths are some of the most important geo-engineering properties determining the cost, efficiency and sustainability of the engineering projects. Weathering properties of the rocks should be clearly defined during the preliminary surveys of the studies on foundations, slopes etc. As weathering properties are heterogeneous and anisotropic more boreholes are needed to increase the accuracy of the interpretations of the subsurface. Electrical Resistivity Tomography (ERT) technique is used for different purposes to obtain faster and more economical data from wider area than drilling. Due to such specialities of ERT, the technique was used for determining the weathering properties of the pyroxenites and dunites outcropping in Bursa region. ERT studies were carried out in three lines. Two- of the lines were on the dunites and the other line on the pyroxenite. Dunites in this study were observed from unweathered to completely weathered stages, and the pyroxenites were observed from slightly to completely weathered stages. During ERT studies both dipole-dipole and Wenner configurations were deployed. According to the data obtained, inversion model sections were generated. These sections were evaluated regarding the changes in engineering properties of the dunites and pyroxenites. According to the evaluations, it is concluded that Wenner configuration especially for the dunites represents better resistivity distributions for the weathering properties.*

**Key Words:** *Weathering, Dunite, Electrical resistivity tomography (ERT), Orhaneli, Pyroxenite.*

**GİRİŞ**

Ayrışma, kaya malzemesinin ve dolayısıyla kaya kütlelerinin jeo-mühendislik özelliklerinde önemli değişimlere neden olmaktadır. Bu nedenle, ayrışma derecesi ve ayrışma derinliklerinin belirlenmesi, pek çok mühendislik çalışmasının güvenilirliğinde ve devamlılığında önemli rol oynamaktadır. Ayrışma derecelerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler, farklı araştırmacılar tarafından uygulanmıştır (Kılıç, 1999; Tuğrul ve Zarif, 2000; Orhan vd., 2006; Ceryan, 2008; Gökçeoğlu vd., 2009; Diamantis vd., 2009; Kılıç vd., 2010).

EÖT Yöntemi, yüzeye yakın derinliklerde, mühendislik problemlerinin, çeşitli jeolojik ve çevresel problemlerin çözümü için kullanılmaktadır (Griffiths ve Barker, 1993; Dahlin ve Owen, 1998; Beauvais vd., 2004; Drahor vd., 2006). Bunun yanısıra, elektriksel iletkenliğin kristalli kayaların ayrışmasıyla

önemli derecede farklılaştığı, taze seviyelerde yüksek değerler elde edildiği, ayrışmanın artmasıyla bu değerlerin düştüğü ifade edilmektedir (Giao vd., 2008). Ayrıca, EÖT kullanımındaki gelişmeler, yeraltındaki kütlelerin 2 ve 3 boyutlu dağılımlarının güvenli ve hızlı bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır (Loke ve Barker, 1996; Barker vd., 2001; Chandra vd., 2010). Bu nedenlerden dolayı, ayrışma özelliklerinin daha geniş alanlardaki değişimlerinin daha hızlı belirlenmesine yönelik olarak jeoelektrik çalışmaların gerçekleştirilebileceği düşünülmüş ve Bursa-Orhaneli bölgesindeki piroksenitlerin ve dunitlerin ayrışma özellikleri EÖT Yöntemi ile tespit edilmeye çalışılmıştır. EÖT çalışmalarının yanısıra, arazi gözlemleri ve laboratuvar çalışmaları sonrasında dunit ve piroksenitlere ait ayrışma dereceleri tespit edilmiştir. Ayrışma derecelerinin tespitinde, ANON (1995) tarafından önerilmiş olan altı dereceli ayrışma sınıflaması dikkate alınmıştır. Buna göre, saha

çalışmalarında dunitler ayrışmamış seviyeden tamamen ayrışmış seviyeye, piroksenitler ise az ayrışmış seviyeden tamamen ayrışmış seviyeye kadar tanımlanabilmiştir. Her iki kaya grubu için laboratuvarında, ince kesitler üzerinde petrografik incelemeler ile fiziksel özelliklerin belirlenmesine yönelik deneyler, tek eksenli sıkışma dayanımı, ultrasonik dalga hızları ve suda dağılmaya karşı dayanım deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise, EÖT Yöntemi ile elde edilen kesitler, birlikte değerlendirilmek üzere, arazi ve laboratuvar verileri yardımıyla belirlenen ayrışma dereceleri ile karşılaştırılmıştır.

### ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

Çalışma alanı ve çevresinde Paleozoyik yaşlı temeli oluşturan metamorfik kayaçlar ile bunları bindirmelerle üzerleyen Mesozoyik (Üst Kretase) dönemine ait birimler gözlenmektedir. Bu birimler; Senozoyik (Miyosen-Pliyosen) yaşlı karasal çökeller tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir. Bölgedeki yüksek debili nehirler hafif engebeli arazilerde alüvyon birikintileri oluşturmuştur. Özellikle ayrışma etkisi ile serbestlenen irili ufaklı bloklar yamaç molozlarını oluşturmaktadır. Bu çalışma, Orhaneli ofiyoliti olarak adlandırılan (Emre,

1986) Üst Kretase-Paleosen yaşlı kayaçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Arazi gözlemleri ile araziden alınan örnekler üzerinde yapılan petrografik çalışmaların ışığında; ofiyolit istifinde dunit, harzburjit, lertzolit, piroksenit ve bunların çeşitli derecelerde serpantinleşmiş seviyeleri ile serpantin ve diyorit türü kayaçlar olduğu belirlenmiştir. Orhaneli Ofiyoliti Miyosen-Pliyosen yaşlı çakıltaşı kumtaşı, siltaşı, marn ve kiltaşlarından oluşan Burmu formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir (Özkoçak, 1969; Emre, 1986).

### İNCELENEN KAYAÇLARIN PETROGRAFIK VE LİTOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Arazi çalışmalarından elde edilen örneklerden, dunitlere ait 82 ve piroksenitlere ait 37 ince kesit hazırlanmıştır. Petrografik incelemelere göre dunitler %90'dan fazla olivin minerali içermekte olup, ortopiroksenlerin ve/veya klinopiroksenlerin oranı %5-9 arasında değişmektedir. Kromit ve magnetit minerallerine de nadiren rastlanmaktadır. İncelenen diğer kaya grubu olan piroksenitler ise %60'tan fazla piroksen minerali içermektedir. Olivin mineralleri %40'tan daha az oranda bulunmaktadır. Bunların yanında nadir olarak kromit mineralleri de gözlenmiştir (Çizelge 1).

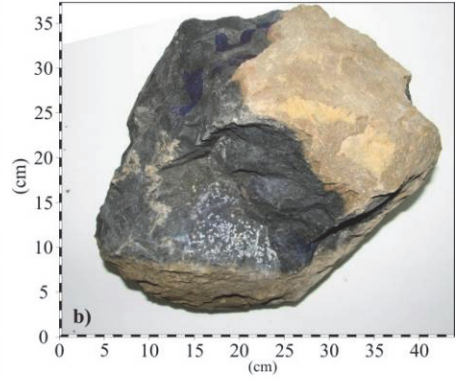
Çizelge 1. İncelenen kayaçların petrografik özellikleri

Table 1. Petrographical properties of the investigated rocks

Kayaç ismi	Mineralojik bileşim	Ayrışma ile gelişen mineraller
Dunit	%90'dan fazla olivin. %5-9 arası ortopiroksen ve/veya klinopiroksen	Serpantin, brusit, iddingsit, demiroksit, kil mineralleri, nadiren karbonat
Piroksenit	%60'tan fazla piroksen mineralleri ve %40'tan az olivin mineralleri	Serpantin, kil mineralleri, klorit, talk ve demir oksit

Orhaneli Ofiyoliti içerisindeki dunitler genelde; alacalı koyu yeşil, kahverengi ve siyahımsı, yer yer çok çatlaklı, çatlaklı ve ender olarak masif şekilde gözlenmektedir. Taze yüzeyleri boyunca siyaha yakın çok koyu yeşil ve siyah renklindedir. Ayrışma dereceleri arttıkça yüzeyleri farklı tonda kahverengiye dönüşmekte,

çekirdek taşları ise mat siyah renkte gözlenmektedir. Ayrışma derecesinin artmasıyla siyah mat kesim kaybolmakta ve demir oksitçe zenginleşen kahverengi bölge, kayacın tüm rengini oluşturmaktadır (Şekil 1). Ayrışma derecesinin artmasıyla kayaç tamamen serpantinleşmektedir.



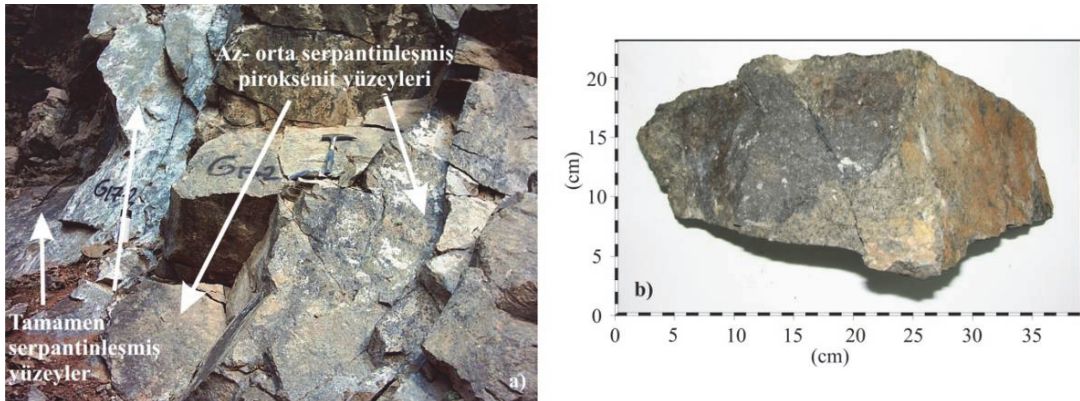
Şekil 1. Dunitlerin çevresinde serpantinleşme ve demir oksitleşme oluşumu: (a) serpantinleşmiş yüzeylerin görünümü, (b) dunitin çevresinde gelişen demir oksitleşme ve serpantinleşmenin görünümü.

Figure 1. Serpentinization and iron oxide formation around the dunite: (a) view of serpentinized surfaces, (b) view of iron oxide formation and serpentinization around the dunite.

Dunitlerin süreksizlik aralığı taze-az ayrılmış seviyelerde ortalama 95.6 cm iken ileri derecede ayrılmış seviyelerde 17.4 cm'ye kadar düşmektedir (Ündül, 2007). Dunit bileşimli kayalarda, özellikle süreksizlik yüzeyleri boyunca serpantinleşme ve değişik seviyelerde asbestleşme, serisitleşme, killeşme, talklaşma, karbonatlaşma ve kloritleşme saptanmıştır.

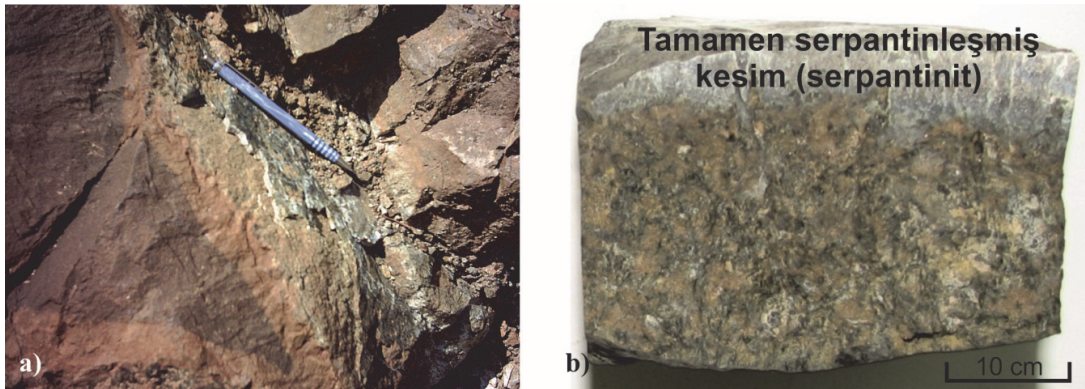
Orhaneli Ofiyoliti içindeki piroksenitler, arazi çalışmalarında, yeşilden siyahımsı yeşile kadar olan renklerde gözlenmiştir. Ayrışma

etkilerinin düşük olduğu yüzeylerde piroksen mineralleri kolayca ayırt edilebilmektedir. Ayrışma derecesinin artmasıyla, yeşil tonları daha açık bir hâl almakta ve parlak bir görünüm kazanmaktadır. İlerleyen ayrışma derecelerinde kayaç tamamen serpantinleşmektedir (Şekil 2). Dunitlerden farklı olarak, kayaç yüzeyindeki serpantinleşerek kayganlaşan kısım tamamen pürüzsüz olup, daha kalın ve daha kaygandır. Serpantinleşme, kayaç içine doğru daha fazla nüfuz etmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Farklı derecede ayrılmış piroksenitler: (a) piroksenitlerde gelişen farklı derecelerdeki serpantinleşmeler (b) orta-az ayrılmış piroksenit üzerinde gelişen demir oksitleşme ve serpantinleşme.

Figure 2. The pyroxenites with different weathering grades: (a) serpentinization with varying grades on pyroxenites (b) iron oxide formation and serpentinization on moderately-slightly weathered pyroxenite.



Şekil 3. İncelenen kayalarda gelişen serpantinleşmiş yüzeylerin görünümü: (a) dunitlerin etrafında gelişen serpantin kılıfı (b) piroksenitin çevresinde gelişen serpantinleşme.

Figure 3. A view of serpentinization on the studied rocks: (a) serpentine crust around dunite (b) serpentinization on pyroxenite.

Piroksenitlerin süreksizlik aralığı az ayrılmış seviyede 83.5 cm iken ileri derecede ayrılmış kesimlerde 16.2 cm'ye kadar düşmektedir (Ündül, 2007). Piroksenitlerin süreksizlikleri boyunca genel olarak serpantinleşme, kloritleşme ve talklaşma gözlenmiştir. Arazi gözlemleri sırasında süreksizlik özellikleri, ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlere uygun olarak belirlenmiştir.

Her iki kaya grubunda da süreksizlik (çatlak) ara uzaklığının ve iki süreksizlik duvarı (süreksizlik açıklığı) arasındaki mesafenin ayrışma ile arttığı gözlenmiştir. Süreksizlikler, kil parçacıkları ile çeşitli boyutlarda serpantin parçaları ile dolmuştur (Çizelge 2). İncelenen kayaların petrografik ve litolojik özellikleri Ündül (2007) ile Ündül ve Tuğrul (2010) tarafından ayrıntılı olarak tanımlanmıştır.

Ündül, Tuğrul ve Zarif

Çizelge 2. Dunit ve piroksenitlerin süreksizlik özellikleri.

Table 2. Discontinuity properties of the dunite and pyroxenite.

	Ayrışma Derecesi	Çatlak ara uzaklığı (cm)			Açıklık (cm)	Dolgu	Pürüzlülük
		En Düşük	En Yüksek	Ortalama			
Piroksenit	W IV	1-5	38-58	16.2	5-20	Serpantin parçaları ve kil	Düz - az dalgalı, kaygan
	W III	5-8	98-213	44.3	0.5-5	Kil, nadiren serpantin parçaları	Düz - az dalgalı, kaygan
	W II	18-27	178-327	83.5	0-0.8	Açık ve kil	Az dalgalı, nadiren kaygan
Dunit	W IV	1-5	60-72	17.4	2.5-10	Serpantin parçaları ve kil	Dalgalı, kaygan
	W III	8-12	110-204	42.1	0.5-2.5	Kil	Dalgalı, düz - kaygan
	W I - II	24-32	198-577	95.6	0-0.5	Açık	Dalgalı, pürüzlü-düz

## İNCELENEN KAYAÇLARIN AYRIŞMA ÖZELLİKLERİ

Arazi çalışmaları sırasında dunit ve piroksenitlerin ayrışma profilleri ANON (1995) tarafından önerilmiş olan altı dereceli ayrışma sınıflamasına uygun olarak tanımlanmıştır. Ayrıca laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar, ayrışma dereceleri sınırlarının daha belirgin bir şekilde ortaya konmasına ve değişimlerin anlaşılmasına yardımcı olmuştur. Dunitler ayrışmamış seviyeden tamamen ayrışmış seviyeye kadar tanımlanmıştır. Piroksenitler ise yeterli taze seviyenin gözlenmemesinden dolayı, az ayrışmış seviyeden tamamen ayrışmış seviyeye kadar tanımlanmıştır. Çalışma alanının genelinde yüksek eğimli yamaçlar olmasından dolayı

toprak zonu yamaç aşağı dökülmektedir. Bu nedenle, bu ayrışma derecesi, kesin ayırtılabilecek şekilde gözlenememiş olup örnekleme yapılamamıştır.

Laboratuvar çalışmaları sırasında incelenen kayaçların, her ayrışma derecesi için, özgül ağırlık, kuru birim hacim ağırlık, su emme, etkin gözeneklilik değerleri ISRM (1981)'de belirtilen yöntemler yardımıyla belirlenmiştir. Ultrasonik dalga hızları, tek eksenli sıkışma dayanımları ve suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi değerleri ise, ISRM (1981) tarafından önerilmiş yöntemlere uygun örnek alınabilen ayrışma seviyeleri için tayin edilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde fiziksel ve mekanik özelliklerin ayrışma dereceleri ile uyumlu olarak değiştiği belirlenmiştir (Ündül, 2007; Ündül ve Tuğrul,

2010). Laboratuvar çalışmalarına ait bilgiler ve fiziko-mekanik özelliklerin ayrışma özellikleri ile ilişkileri Ündül (2007) ile Ündül ve Tuğrul (2010) tarafından ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bu çalışmada, elektriksel yöntemlerin yorumlanmasında önemli özelliklerden olmaları nedeniyle, su emme ve etkin gözeneklilik değerleri ile süreksizlik ara uzaklığı ve açıklığı değerleri kullanılmıştır.

### **ELEKTRİKSEL GÖRÜNTÜLEME ÇALIŞMALARI**

Jeoelektriksel yöntemler, günümüzde, mühendislik girişimlerinin ön çalışmalarında güvenilir bir şekilde, yaygın olarak kullanılmaktadır (Dahlin vd., 1999; Cavinato vd., 2006; Ganerød vd., 2006; Danielsen ve Dahlin, 2009). Yeraltındaki zeminlerin EÖT Yöntemi ile jeoteknik açıdan incelenmesi üzerine de pek çok çalışma bulunmaktadır (Cosenza vd., 2006; Gay vd., 2006; Drahor vd., 2006; Sudha vd., 2009; Danielsen ve Dahlin, 2009). Kristalli kayaçların ayrışma derecelerinin artmasıyla elektriksel iletkenliklerinde düşüşler gözlenmiş olmasından dolayı (Giao vd., 2008), kullanılabilir sonuçlar elde edilebileceği düşünülerek bu çalışmada söz konusu yöntem denenmiştir.

EÖT çalışmalarında, düşey değişimlere karşı daha hassas olan Wenner elektrot dizilimi, yatay değişimlere karşı daha duyarlı olan dipol-dipol dizilimleri kullanılmıştır. Her iki dizilim için 60 adet elektrot kullanılmış olup, dunitler üzerinde elektrot açıklıkları 0.5 m ve 2 m olan iki hat, piroksenitler üzerinde ise elektrot aralıkları 0.5 m olan bir hat boyunca ölçümler yapılmıştır. Elektrotların alıcı ve verici olarak düzenlenmesi için elektronik devre anahtarlı bir sistem kullanılmıştır.

Arazi çalışmaları ile elde edilen görünür özdirenç değerlerinden RES2DINV programı (Loke, 2000) kullanılarak andıran kesitler hazırlanmıştır. Bu kesitlerde sunulan verilerin topoğrafik koşullar gözetilerek ters çözümlenmesi yardımıyla en iyi model tepkisi ve arazi verisi ile uyumunu veren model gerçek özdirenç modeli kabul edilerek görüntülenerek sunulmuştur.

### **Piroksenitler Üzerinde Yapılan Elektriksel Özdirenç Çalışmaları**

Çalışmanın ilk EÖT ölçümleri az ayrışmış seviyeden tamamen ayrışmış seviyeye kadar farklı ayrışma derecelerindeki piroksenitler ile serpantinleşmiş piroksenitler içeren alanda gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Wenner ve dipol-dipol dizilimine göre veri elde edebilmek ve yaklaşık 1.5-2.5 m derinlikten yeterli bilgi sağlayabilmek için 60 adet elektrot 0.5 m aralıkla dizilmiştir. Ölçülen gerçek özdirenç değerlerinden andıran kesitlerin çıkartılmasının ardından RES2DINV yazılımı yardımıyla elektriksel yapı modeli ortaya konmuştur.

Wenner dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı kesitinde, en düşük özdirenç değerlerine (<236  $\Omega$ m) sahip koyu mavi bölgeler, bitkisel toprak ile ezik zonları, makaslama zonlarını ve süreksizlik dolgularını tanımlamaktadır. Bu alanlardaki su emme değerleri ve etkin gözeneklilik değerleri oldukça yüksektir. 364  $\Omega$ m'ye kadar olan, nispeten daha yüksek özdirenç değerleri, ileri derecede ve tamamen ayrışmış seviyeleri temsil etmektedir. Su emme değerleri ve etkin gözeneklilik değerlerindeki azalmalar bu alanlarda elde edilen özdirenç değerleri ile uyumludur. Orta derecede ayrışmış piroksenitler 871  $\Omega$ m'ye kadar olan özdirenç değerleri sunmaktadır. Bu seviyeye ait su emme değerleri, etkin gözeneklilik değerleri ve süreksizlik

açıklıkları oldukça düşük değerler sunmaktadır. Kesitlerdeki en yüksek özdirenç değerleri az ayrılmış seviyeleri belirtmektedir. Az ayrılmış seviyelerin su emme değerleri ve etkin gözeneklilik değerleri en düşük seviyededir. Bu az ayrılmış seviyeler, süreksizlik açıklıkları en düşük, çatlak ara uzaklıkları ise en fazla olan kesimlerdir (Çizelge 2 ve 3). Elde edilen veriler ışığında, ayrılmaya bağlı olarak gelişen kil minerallerinin, kayacın su emme değerlerini yükselttiği görülmektedir. Bu nedenle, ayrışmanın artmasıyla özdirenç değerleri düşmektedir.

Kesitte sunulan (Şekil 4) yapı modelinde, 9 m ve 20 m arasındaki yüksek özdirenç zonu, çevresi ile keskin sınırlıdır. Arazi çalışmalarında, bu sınır zonunda ezik zonlar ve makaslamalar gözlenmiştir. Bu gözlemler elektriksel yapı kesiti ile oldukça uyumludur. Ayrıca süreksizlikler boyunca ayrışma etkilerinin artmasına bağlı

olarak kaya kütlesi, düzensiz bir görünüm kazanmaktadır. Bu durum, süreksizlik bölgelerinden elde edilen farklı elektrik özdirenç değerleri ile örtüşmektedir. Bunun yanında, piroksenitlerin dış kısmından itibaren gelişen ve pek çok örnekte tamamen serpantinleşen kısımlar düşük özdirenç değerleri verirken (Şekil 4 ve 5), daha az ayrılmış kesimler yüksek özdirenç değerleri vermektedir. Piroksenitlere ait su emme değerleri, etkin gözeneklilik değerleri ve süreksizlik özelliklerinin ayrışma derecelerine göre değişimleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

Dipol-dipol dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı kesiti ilk bakışta Wenner dizilimi ile benzerlikler gösterse de özdirenç sınırları daha keskindir. Dikkatli incelendiğinde, yüzlek ile uyumlu olmayan yerlerin uyumlu olan yerlere göre oldukça fazla olduğu gözlenmektedir.

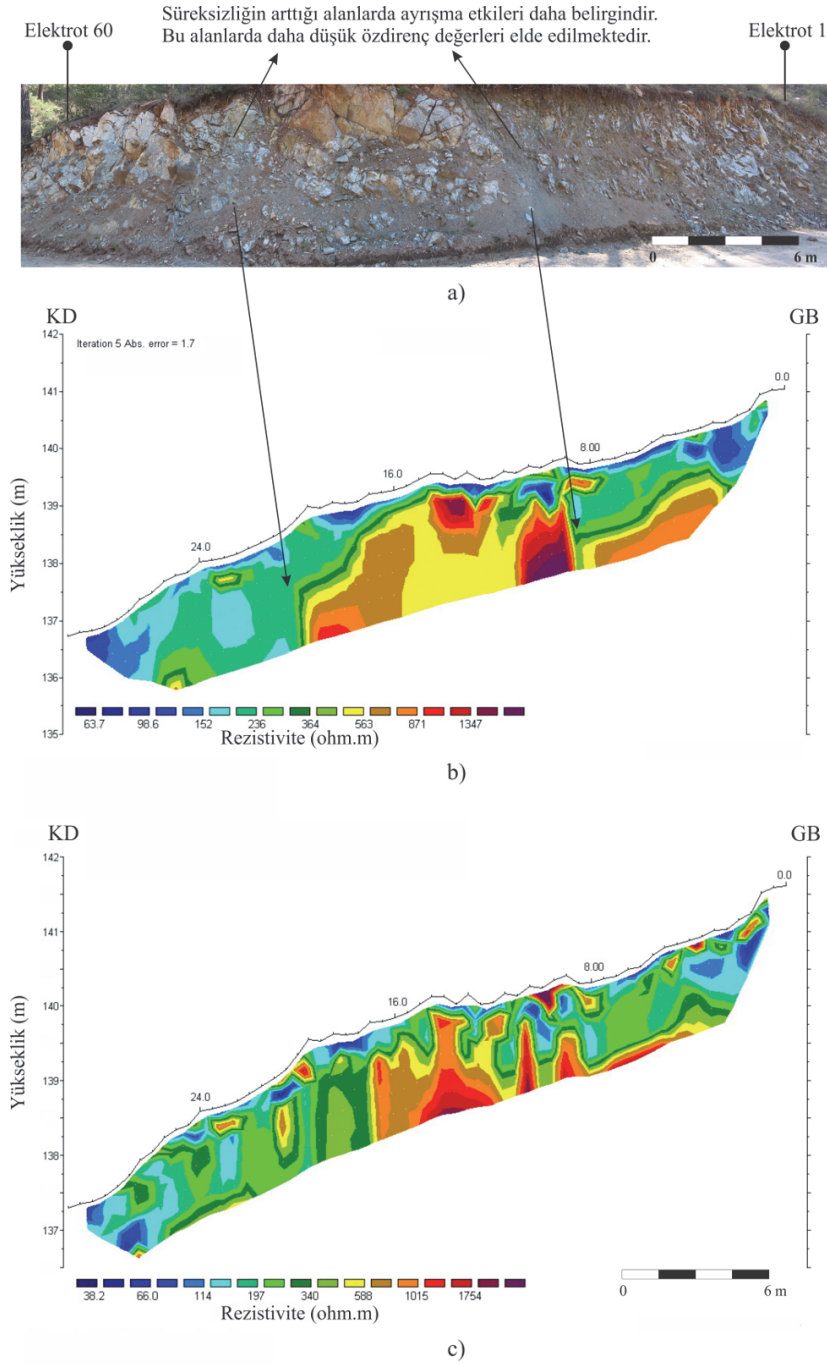
Çizelge 3. Piroksenitlere ait su emme ve etkin gözeneklilik değerlerinin ayrışmaya bağlı değişimi.

Table 3. The changes of water absorption and effective porosity due to weathering for the pyroxenites.

W	Piroksenit				
	Ortalama	En düşük	En yüksek	SS	
$w_a$ (%)	V	8.13	6.37	9.81	1.16
	IV	3.56	2.11	4.79	0.82
	III	0.53	0.25	0.90	0.20
	II	0.38	0.19	0.94	0.17
	I	-	-	-	-
$n_e$	V	16.20	13.04	18.64	1.96
	IV	8.59	4.56	11.65	1.70
	III	1.36	0.54	2.49	0.57
	II	0.94	0.74	1.24	0.33
	I	-	-	-	-

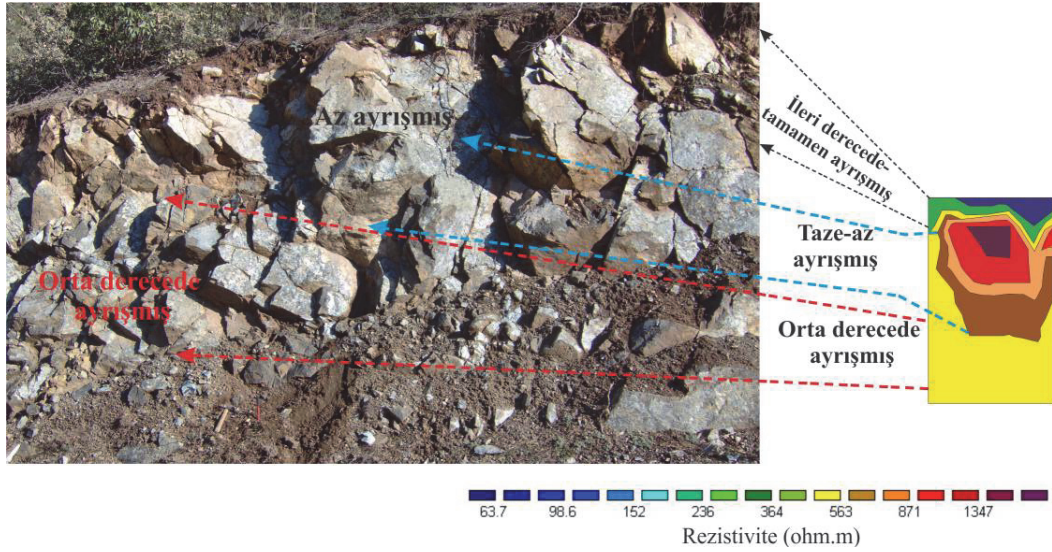
W: Ayrışma derecesi, SS: Standart sapma,  $w_a$ :su emme,  $n_e$ : etkin gözeneklilik





Şekil 4. Piroksenitlerde yapılan öz direnç çalışması: (a) kesit güzergâhının genel görünümü (b) Wenner dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı modeli (c) dipol-dipol dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı modeli.

Figure 4. Resistivity survey on the pyroxenites: (a) a general view of the line (b) resistivity tomogram of Wenner configuration (c) resistivity tomogram of dipole-dipole configuration.



Şekil 5. Piroksenitlere ait ayrışma profili üzerinde özdirenç değerlerinin değişimi.

Figure 5. The changes of electrical resistivities on the weathering profile of the pyroxenites.

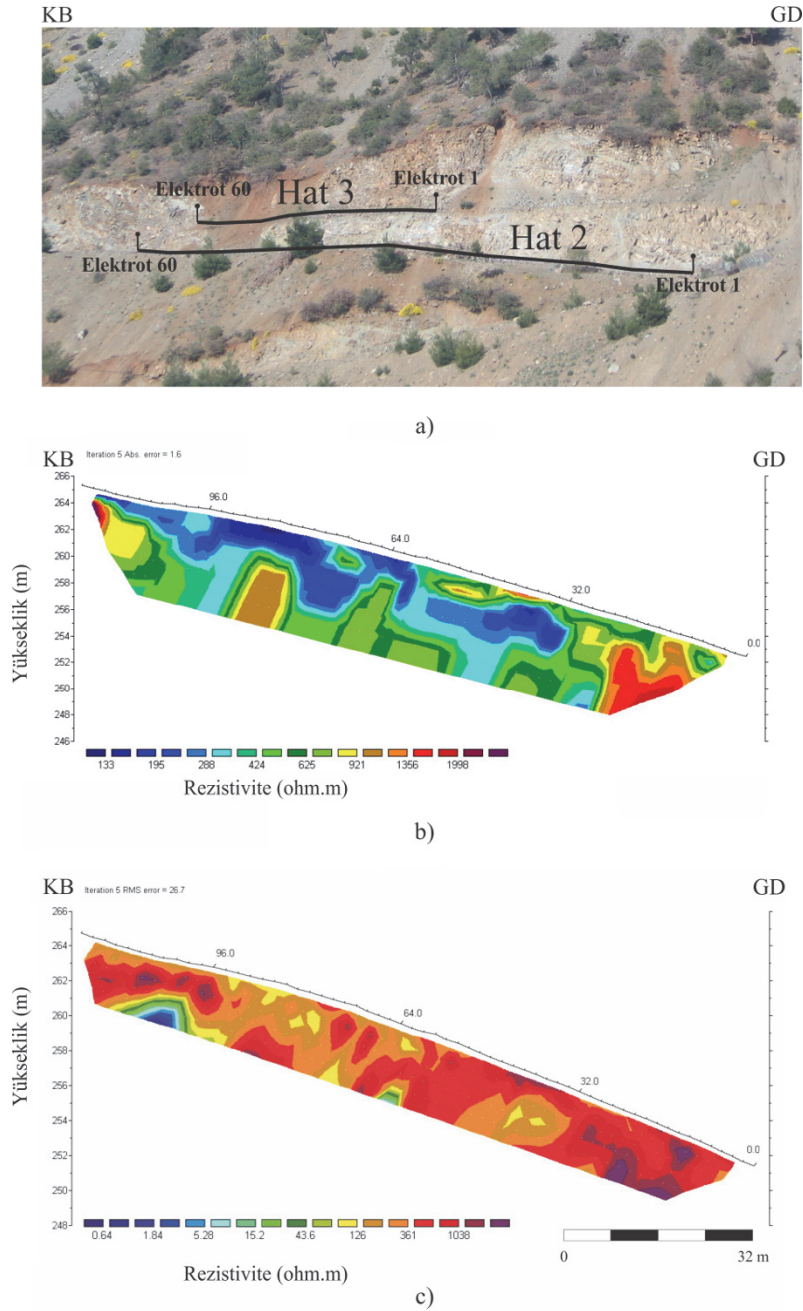
## Dunitler Üzerinde Yapılan Elektriksel Özdirenç Çalışmaları

Çalışma sahasında gerçekleştirilen EÖT çalışmalarındaki ikinci ve üçüncü hatlar, dunitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İkinci hat olan H2 güzergâhında, 60 adet elektrot, yaklaşık 6 m derinlikten veri sağlayabilmek için 2 m aralıklarla yerleştirilmiştir. Bu güzergâhta da hem Wenner hem de dipol-dipol dizilimlerine göre ölçümler yapılmıştır.

H2 güzergâhında, 298  $\Omega$ m'nin altındaki özdirenç değerleri, ileri derecede ve tamamen ayrılmış dunitleri temsil etmektedir. Elektriksel yapı kesitinin kuzeybatı kesiminde yaklaşık 60 ile 120 metreler arasında düşük özdirenç değerleri ölçülmüştür. Bu özdirenç değerleri H2 güzergâhının hemen üzerinden başlayan ve H2 güzergâhının bir kısmını da içine alan duraysız bölgeye ait özdirenç değerleridir. Bu duraysız alandaki malzemeler tamamen ayrılmış, gevşek, tutturulmamış dunitlerden oluşmaktadır.

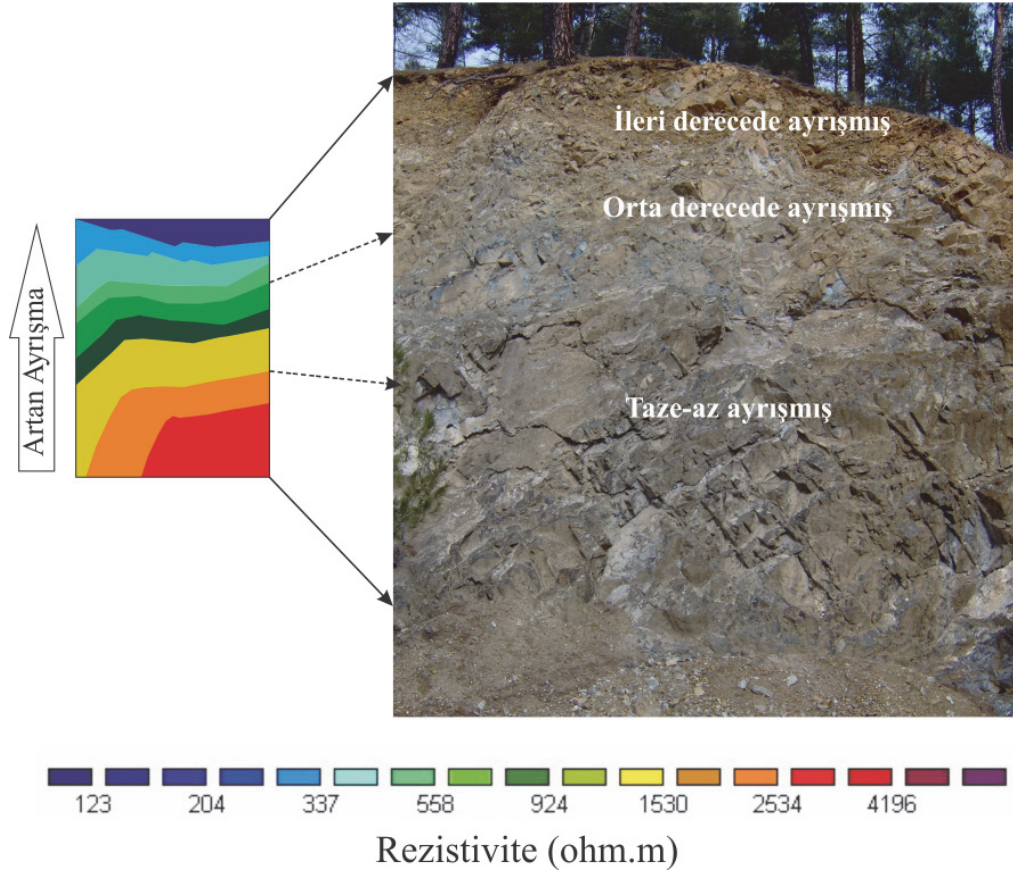
Tamamen ayrılmış dunitler en yüksek su emme ve etkin gözeneklilik değerleri vermektedir. Bu seviyede süreksizlik düzlemleri kaybolduğundan ölçüm yapılamamıştır.

Elektriksel yapı kesitinde yaklaşık 31.5 m ile 62 m arasında yüzeyden 1 - 1.5 m derinliğe kadar inen yüksek özdirençli alanlar, çekirdek taşları içeren orta derecede ayrılmış dunit bloklarını göstermektedir (Şekil 6). Daha alt kesimde ise düşük özdirençli ileri derecede ve tamamen ayrılmış dunitler duraysız alanı temsil etmektedir. Su emme ve etkin gözeneklilik değerleri oldukça yüksektir. Süreksizlikler birbirlerine yakın olup, serpantin ve kil dolgululu süreksizlik açıklıkları oldukça fazladır. Kesit güzergâhı boyunca 0 - 31.5 metreler arasında orta derecede ayrılmış dunitler ile hemen altlarındaki az ayrılmış dunitlerden dolayı yükselen özdirenç değerleri elde edilmiştir (Şekil 6 ve 7). Bu durum, taze ve az ayrılmış dunitlerin çevresinde gelişen daha fazla ayrılmış kılıf şeklinde görünen yapısı ile de uyumludur.



Şekil 6. Dunitlerde yapılan öz direnç çalışmaları: (a) Hat 2 ve Hat 3 kesit güzergahlarının genel görünümü, (b) Hat 2'ye ait Wenner dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı modeli (c) Hat 2'ye ait dipol-dipol dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı modeli.

Figure 6. Resistivity surveys on the dunitites: (a) a general view of the lines 2 and 3, (b) resistivity tomogram of Wenner configuration for line 2, (c) resistivity tomogram of dipole-dipole configuration on line 2.



Şekil 7. Dunitlere ait ayrışma profili üzerinde özdirenç değerlerinin değişimi. Ayrışma derecesinin artmasıyla özdirenç değerleri belirgin bir biçimde azalmaktadır. Özdirenç değerleri farklı bir alandan alınmış olmasına rağmen aynı litolojinin daha iyi ayrılabilen farklı bir yerdeki fotoğrafı üzerinde gösterilmiştir.

Figure 7. The change of electrical resistivities on the weathering profile of the dunites. The electrical resistivities decrease significantly with increasing weathering. Even though the resistivity values belong to another location, the values are shown with another photograph where better differentiation can be made.

Bu seviyede su emme ve etkin gözeneklilik değerleri oldukça düşüktür. Dunitlere ait su emme değerleri, etkin gözeneklilik değerleri ve süreksizlik özelliklerinin ayrışma derecelerine göre değişimleri Çizelge 4'te sunulmuştur.

Dipol-dipol dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı kesitinde ise tüm güzergâh

boyunca yüksek özdirenç değerleri neredeyse homojen bir yapının olduğunu göstermektedir. Yüzlekte gözlenen yapı hemen hemen bir boyutlu (yatay katmanlı) görünümündedir. Dipol-dipol diziliminin yanal değişimlere daha hassas olması nedeniyle bu dizilim ile elde edilen özdirenç dağılımı yeterli çözünürlükte bilgi sağlayamamıştır.

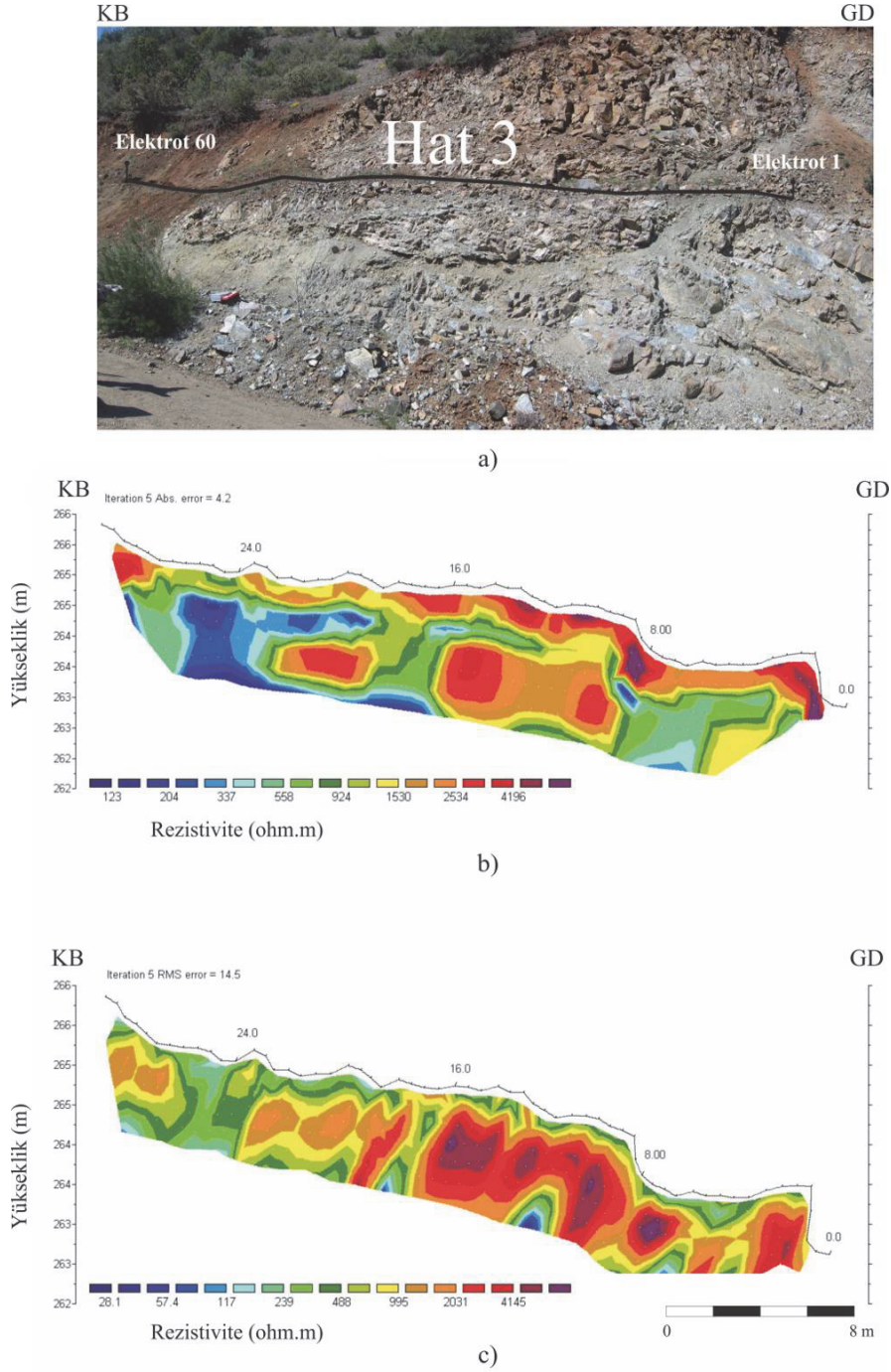
Çizelge 4. Dunitlere ait su emme ve etkin gözeneklilik değerlerinin ayrışmaya bağlı değişimi  
 Table 4. The change of water absorption and effective porosity with weathering for the dunites.

W	Dunit				
	Ortalama	En düşük	En yüksek	SS	
$w_a$ (%)	V	8.92	7.76	10.34	0.87
	IV	6.55	3.33	9.38	1.18
	III	1.26	0.54	2.39	0.48
	II	0.50	0.17	1.59	0.54
	I	0.13	0.07	0.28	0.06
$n_e$	V	18.39	16.02	20.86	1.74
	IV	13.89	7.24	19.79	2.61
	III	3.38	1.46	6.27	1.29
	II	1.47	0.48	4.11	1.48
	I	0.42	0.21	0.87	0.19

W: Ayrışma derecesi, SS: Standart sapma,  $w_a$ : su emme,  $n_e$ : etkin gözeneklilik

Çalışma sahasında H3 hattında gerçekleştirilen EÖT ölçümleri, H2 profilinin yaklaşık 4 m üzerindeki güzergâh boyunca gerçekleştirilmiştir. H3 hattında 60 adet elektrot 0.5 m aralıklarla yaklaşık 1.5 - 2.5 m derinlikten veri alabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu hat boyunca elde edilen elektriksel yapı kesiti H2 güzergâhından elde edilen kesit ile uyumludur. H2 hattının kuzeybatı kesiminde gözlenen düşük öz direnç değerlerine sahip tamamen ayrılmış dunitlerden oluşan duraysız alanın devamı bu kesitte de gözlenmektedir. Düşük öz direnç değerlerinin olduğu bu bölge H2 kesiti ile örtüşmektedir. Kesitin orta kesimlerinde ölçülen düşük ve orta seviyeli öz direnç değerleri

tamamen ayrılmış ve ufalanmış dunitlerin bulunduğu bir kesimi temsil etmektedir. Bu süreksizlik altındaki yüksek öz direnç değerleri orta derecede ve az ayrılmış dunitleri temsil etmektedir. Bu durum arazi gözlemleri ile uyumludur. Yüzeydeki yüksek öz direnç değerleri ise yamaçtaki iri bloklardan kaynaklanmaktadır (Şekil 8). Bu alandan elde edilen düşük öz direnç değerleri, yüksek su emme ve etkin gözenekliliğe sahip seviyeler ile yakın süreksizlik ara uzaklıkları ve geniş süreksizlik açıklıkları olan alanlarla örtüşmektedir. Öz direnç değerinin yükselmesi ile su emme, etkin gözeneklilik ve süreksizlik açıklıkları azalmakta, süreksizlik ara uzaklıkları ise artmaktadır.



Şekil 8. Dunitlerde yapılan özdirenç çalışmaları: (a) Hat 3 kesit güzergâhlarının genel görünümü, (b) Hat 3'e ait Wenner dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı modeli, (c) Hat 3'e ait dipol-dipol dizilimi ile elde edilen elektriksel yapı modeli.

Figure 8. Resistivity surveys on the dunites: (a) a general view of the line 3, (b) resistivity tomogram of Wenner configuration on line 3 (c) resistivity tomogram of dipole-dipole configuration on line 3.

Dipol-dipol diziliminden elde edilen elektriksel yapı kesitinde, duraysız bölgedeki heyelan malzemesi ile ileri derecede ve tamamen ayrılmış seviyelere ait düşük özdirençli olması gereken bölgelerde daha yüksek özdirenç değerleri görülmektedir. Bu bağlamda, profilin kuzeybatı tarafında görülen duraysız alan, bu dizilimde belirgin olarak ortaya konamamıştır. Ayrıca, elde edilen kesitin geneline bakıldığında arazide gözlenebilen yüzlek ile örtüşmediği görülmektedir.

Dunitler üzerinde yapılan EÖT ölçümlerinde, su tutma özelliği yüksek olan serpantin ve kil minerallerinin ayrışmaya bağlı olarak kayaç içerisinde göreceli bir biçimde artması, su emme ve etkin gözeneklilik değerlerini de yükseltmektedir. Bu durum, ayrışmaya bağlı olarak özdirenç değerlerindeki azalmayı açıklamaktadır.

Piroksenitlerden ve dunitlerden elde edilen özdirenç değerleri, daha önce pek çok araştırmacının da (Chandra vd., 2010; Beauvais vd., 2004; Godio vd., 2006; Giao vd., 2008; Danielsen ve Dahlin, 2009) ifade ettiği gibi taze seviyelerde yüksek, ayrılmış seviyelerde ise düşük olarak belirlenmiştir. Bu benzerlik, elde edilen elektriksel yapı kesitlerinde görülmektedir. Ancak bu çalışmada özellikle yüzeyde gözlenen yüksek özdirenç değerleri, düşen ve/veya kopan çekirdek taşları ve taze/az ayrılmış kaya parçaları ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Granitik kayaçlara ait elektriksel yapı kesitlerinin yüzeylerinde, özdirenç değerlerinin yüksek olmasına ise demirce zengin katmanlar neden olmaktadır (Beauvais vd., 2004). Bunun yanı sıra, çalışılan kayaçların ayrışması ile gelişen demir oksitler, granitlerde olduğu gibi bir seviyede birikme şeklinde değil, mineral boyutunda dağınık bir

biçimde olduğu için, granitlerdeki gibi belirli bir seviye boyunca yüksek özdirenç vermemektedir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, dunit bileşimli kayaçlar, yüzey gözlemleri ve laboratuvar verileri yardımı ile ayrılmamış seviyeden tamamen ayrılmış seviyeye kadar tanımlanmıştır. Piroksenit bileşimli kayaçlar ise yüzey gözlemleri ile taze seviyenin belirgin ve ayırt edici biçimde gözlenmemesinden dolayı az ayrılmış seviyeden tamamen ayrılmış seviyeye kadar tanımlanmıştır.

Ayrışma dereceleri yüzey gözlemleri yardımıyla tanımlanan kayaçlar üzerinde EÖT çalışmaları, yol yarmaları da dikkate alınarak, deneysel sonuçlar üretmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Her iki kaya grubunda da Wenner ve dipol-dipol dizilimlerinden yararlanılmıştır. Yüzey gözlemleri ile EÖT çalışmalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, Wenner dizilimi ile elde edilen özdirenç değerlerinin, her iki kayacın ayrışma derecelerinin belirlenmesinde daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Piroksenitler üzerinde yapılan ölçümlerde, düşük özdirenç değerlerinin ileri derecede ve tamamen ayrılmış kesimleri tanımladığı belirlenmiştir. Nispeten daha yüksek özdirenç değerleri ise, orta derecede ayrılmış - az ayrılmış piroksenitlerin ayırt edilmesini sağlamaktadır.

Dunitler üzerinde iki hat boyunca yapılan ölçümlerden elde edilen elektriksel yapı kesitleri, incelenen alandaki yüzleklerin jeolojik yapısı ile oldukça uyumludur. Ayrıca, iki hat boyunca elde edilen kesitler birbirlerini tamamlayıcı niteliktedir. Tamamen ve ileri derecede ayrılmış

dunitler düşük özdirenç değerleri, orta derecede ayrılmış dunitler orta seviyede özdirenç değerleri, az ayrılmış ve taze dunitler ise yüksek özdirenç değerleri ile temsil edilmektedir.

Her iki kaya grubu için, düşük özdirenç değerleri elde edilen alanlarda daha yüksek su emme, etkin gözeneklilik ve süreksizlik açıklığı değerleri elde edilmiştir. Bu alanlarda süreksizlik ara uzaklıkları ise düşük seviyelerdedir. Su emme, etkin gözeneklilik, süreksizlik açıklığı değerlerinin azaldığı, süreksizliklerin ara uzaklıklarının arttığı bölgelerde ise özdirenç değerleri yükselmektedir.

Elde edilen elektriksel yapı kesitleri ayrışma özellikleri ile karşılaştırıldığında, ayrışma özelliklerinin belirlenmesinde EÖT çalışmalarının yüzey gözlemleri gözetilerek kullanılmasının, hem hızlı olması hem de daha geniş alanları kapsamasından dolayı faydalı ve güvenilir olacağı ortaya konulmuştur. Bu çalışmada kullanılan elektrot açıklıkları ve veri elde edilen derinlikler yeterlidir. Daha derin ayrışma derinlikleri için elektrot aralıklarının istenen derinliğe göre ayarlanması gereklidir. Ayrıca ölçüm yapılacak güzergâh sayılarının ve yönlerinin artırılması yararlı olacaktır. Bunun yanında, bu çalışmada elde edilen özdirenç değerlerinin sadece bu profiller için geçerli olacağı göz ardı edilmemelidir.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından (Proje numarası T-394/08032004) desteklenmiştir. Yazarlar, arazide elde edilen özdirenç değerlerinden topoğrafyayı da içeren kesitlerin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Dokuz Eylül Üniversitesi Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Şenol ÖZYALIN ile değerli yorum ve

katkılarından dolayı İstanbul Üniversitesi Öğretim üyesi Prof. Dr. Aysan GÜRER'e teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- ANON, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 207-242.
- Barker, R., Rao, T.V., Thangarajan, M., 2001. Delineation of contaminant zone through electrical imaging technique. *Current Science*, 81 (3), 277-283.
- Beauvais, A., Ritz, M., Parisot, J.-C., Bantsimba, C., Dukhan, M., 2004. Combined ERT and GPR methods for investigating two-stepped lateritic weathering system. *Geoderma* 119, 121-132.
- Cavinato, G.P., Di Luzio, E., Moscatelli, M., Vallone, R., Averardi, M., Valente, A., Papale, S., 2006. The new Col di Tenda tunnel between Italy and France: integrated geological investigations and geophysical prospections for preliminary studies on the Italian side. *Engineering Geology*, 88 (1-2), 90-109.
- Ceryan, S., 2008. New chemical weathering indices for estimating the mechanical properties of rocks: A case study from the Kürtün Granodiorite, NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 187-207.
- Chandra, S., Dewandel, B., Dutta, S., Ahmed, S., 2010. Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences. *Journal of Applied Geophysics*, 71, 137-148.
- Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y.J., Tabbagh, A., Charlery, Y., 2006. Correlations



- between geotechnical and electrical data: a case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*, 60, 165–178.
- Dahlin, T., Bjelm, L., Svensson, C., 1999. Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 163–172.
- Dahlin, T., Owen, R., 1998. Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe. *Proceedings of the 4th EEGS Meeting. Barcelona, 14– 17 September 1998*, 151–154.
- Danielsen, B.E., Dahlin, T., 2009. Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsås Tunnel, Sweden. *Engineering Geology*, 107, 118–129.
- Diamantis, K., Gartzos, E., Migiros, G., 2009. Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations. *Engineering Geology*, 108, 199–207.
- Drahor, M.G., Göktürkler, G., Berge, A.M., Kurtulmus, T.Ö., 2006. Application of electrical resistivity tomography technique for investigation of landslides: a case from Turkey. *Environmental Geology*, 50, 147–155.
- Emre, H., 1986. Orhaneli ofiyolitinin jeolojisi ve petrolojisi. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Doktora Tezi*, 165 s (yayımlanmamış).
- Ganerød, G.V., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B., Braathen, A., 2006. Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65 (3), 231–243.
- Gay, D.A., Morgan, F.D., Vichabian, Y., Sogade, J.A., Reppert, P., Wharton, A.E., 2006. Investigations of andesitic volcanic debris terrains: Part 2 — Geotechnical. *Geophysics* 71, B9–B15.
- Giao, P.H., Weller, A., Hien, D.H., Adisornsupawat, K., 2008. An approach to construct the weathering profile in a hilly granitic terrain based on electrical imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 65, 30–38.
- Godio, A., Strobbia, C., Bacco, G., 2006. Geophysical characterisation of a rockslide in an alpine region. *Engineering Geology*, 83, 273–286.
- Gökçeoğlu, C., Zorlu, K., Ceryan, S., Nefeslioglu, H.A., 2009. A comparative study on indirect determination of degree of weathering of granites from some physical and strength parameters by two soft computing techniques. *Materials Characterization*, 60, 1317-1327.
- Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1993. Twodimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211–226.
- ISRM, 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*. Pergamon, Oxford. 211 p.
- Kılıç, R., 1999. A unified alteration index (UAI) for mafic rocks. *Environmental and Engineering Geosciences*, 4, 475–483.
- Kılıç, R., Ulaş, K., Kadioğlu, Y.K., Yurdakul, M., 2010. Bolu civarındaki metakristalin kayaçların ayrışma derecesinin incelenmesi. *Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni*, 30, 17-34.
- Loke, M.H., 2000. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Unpublished short training course lecture notes, Geotomo software, Penang, Malaysia, 65 p.

- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131–152.
- Orhan, M., Işık, N.S., Topal, T., Özer, M., 2006. Effect of weathering on the geomechanical properties of andesite, Ankara-Turkey. *Environmental Geology*, 50 (1), 85-100.
- Özkoçak, O., 1969. Etude géologique du massif ultrabasique d'Orhaneli et de sa proche bordure (Bursa - Turquie). These de Doctorat, Univ. de Paris, 181 p.
- Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., Rai, J., 2009. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 67, 74–79.
- Tuğrul, A., Zarif, İ.H., 2000. Engineering aspects of limestone weathering in Istanbul, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58 (3), 191–206.
- Ündül, Ö., 2007. Ayrışmanın Çınarcık barajı göl alanındaki (Bursa) ultramafik kayaların mühendislik özelliklerine etkisi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Doktora Tezi, 141 s (yayımlanmamış).
- Ündül, Ö., Tuğrul, A., 2010. Ayrışmanın dünit ve diyoritin mühendislik özelliklerine etkisi. *Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni*, 30, 73-94.