

Araştırma Makalesi

JEOFİZİK YÖNTEMLERLE HEYELAN ARAŞTIRMALARI

Geophysical Methods for the Investigation of Landslides

Kenan GELİŞLİ*¹

ÖZ

En önemli doğal afetlerden birisi olan heyelanlar, can ve mal kayıplarına neden olan çok yaygın bir kütle hareketi çeşididir. Heyelanlar karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle heyelan problemlerinin çözümü kolay değildir. Bir yamacın heyelan tehlikesinin belirlenebilmesi için detaylı araştırmalara ihtiyaç vardır. Bunun için birçok teknikten oluşan çok disiplinli, bütünlük bir çalışma gereklidir. Bu makalede son yıllarda heyelan araştırmalarında kullanımı giderek artan jeofizik yöntemlerin genel olarak heyelan araştırmalarında nasıl kullanılacağı açıklanarak bazı heyelanlarda gerçekleştirilmiş jeofizik uygulama örnekleri verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, jeofizik yöntemler

ABSTRACT

Landslides, one of the most important natural disasters, are a very common type of mass movement that causes loss of life and property. Landslides have a complex structure. For this reason, it is not easy to solve landslide problems. Detailed research is needed to determine the hazard of landslide on a slope. This requires an integrated and multidisciplinary investigation. Geophysical applications provide a lot of data about landslides. In this article, the use of geophysical methods, which are increasingly used in landslide investigations in recent years, has been explained by giving examples of geophysical applications realized in some landslides.

Keywords: Landslides, geophysical methods

GİRİŞ

Doğal afetler açısından dünyanın en riskli bölgelerinden biri olan ülkemizde, jeolojik özellikleri, topoğrafik yapısı ve iklim özellikleri gibi nedenlerden dolayı yoğun heyelanlar oluşmakta ve heyelanlar önemli oranlarda can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Heyelanlar depremden sonra ülkemiz için en önemli doğal olaylardan birisidir. Heyelanlar farklı yerlerde, değişik zamanlarda meydana geldiği için kamuoyunun dikkatini depremler kadar çekmemektedir. Heyelanlar nedeniyle yerleşim yerlerinde, kara yollarında, tarım ve orman alanlarında her yıl oluşan zararın parasal değeri yüz milyonlarca dolar boyutundadır.

Topraktaki çok yavaş kaymadan kaya çıkına kadar geniş bir yelpazedeki kütle hareketleri, Türkçe’ de yaygın olarak heyelan terimi ile ifade edilmektedir. Heyelanlar, düşmeler, devrilmeler, kaymalar, yanıl yayılmalar ve akmalar olmak üzere değişik şekilde meydana gelebilmekte olup, bunlar arasında en önemlileri ve tehlikeye neden olanları; kaymalar, moloz akmaları, moloz çıkı gibi hızlı hareket eden heyelan türleridir (Cruden ve Varnes, 1996; Sidle ve Ochiai, 2006). Heyelanlar, “durgun”, “etkin” ve “gelişmekte olan” kayan yerler olarak ayrılır. Durgun alanlar bir hareket başlamış, gelişmiş, kaymış ve etkinliğini yitirmiş alanlar olup, bu yöreler yüzeyde kayma aynaları ile tanınırlar. Genellikle yerleşim ve tarım için tercih edilen bu alanlarda stabilite açısından bir denge söz konusudur. Etkin heyelan alanları günümüzde hareketin sürdüğü yerlerdir. Gelişmekte olan heyelan alanları ise henüz kaymamış, ancak kaymaya aday olan yerler olarak ifade edilebilir. Günümüzde heyelan tehlikesi olabilecek bölgeler; mevcut ve eski heyelanlı kütleler, yamaçların zirve ve alt kesimleri, ana drenaj

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon-TÜRKİYE

*İlgili yazar / Corresponding author: gelisli@ktu.edu.tr

Gönderim Tarihi: 07.09.2018

Kabul Tarihi: 05.12.2018

ağları ve yakınları, eski dolgu şevlerin üst veya taban kısımları, kil oranı yüksek formasyonun bulunduğu kısımlar, dik eğimli yamaçların alt ve üst kesimleri sayılabilir. Heyelana karşı güvenli bölgeler olarak ise, geçmişte herhangi bir harekete maruz kalmamış sert, çatlaksız ana kaya kütleleri, topoğrafik olarak nispeten düz bölgeler, sırtların üst ve düz uzanımlı kesimleri söylenebilir.

Yamaçlarda denge bozukluğunun habercisi belirtiler, başka bir ifade ile sahada önlem alınması gerektiğini ortaya koyan uyarı işaretleri olarak; eğilmiş direkler, ağaçlar, istinat duvarları ve bahçe çitlerinde hareket yönünde meydana gelen eğilmeler, bükülme, eğimde ani değişiklikler, yer yer kabarmış yamaç formları, ondüleli bir yüzey görüntüsü, yamaçta yer yer su sızıntıları, daha önce gözlemlenmemiş su kaynakları ve suya doygun zeminler, zemin, kaldırım ve yollarda daha önce gözlemlenmiş yeni yarık, çatlak oluşumları ve kabarmalar, çökmeler, su/gaz boruları gibi yer altı yapılarının kırılması ya da patlaması, yarlar, şev topukları, binalarda sıva, alçı yarılmaları, hasarlı bacalar, kapı ve pencerelerin çerçevelerinde oluşan deformasyonlar, temellerde ve taşıyıcı sistemlerde meydana gelen çatlaklar sayılabilir.

Genel olarak heyelanların nedenleri; yüksek eğim, aşırı yağış, çeşitli mühendislik yapıları (baraj, kanal, yol ve köprü gibi) ile doğaya müdahale, topuktan malzeme kaybı, ayrışma, zayıf zeminler, uygun olmayan bitki örtüsü, doğal ve yapay sarsıntılar olarak ifade edilebilir. Heyelanların ıslahı ve heyelan tehlikesinin bertaraf edilmesi, özel inşaa çalışmaları gerektirir. Özet olarak; heyelanların önlenmesi için yapılması gerekenler ise; yükü kayma alanı dışındaki sağlam zemine aktaran yapılar vasıtasıyla direnen kuvvetlerin artırılması, heyelan sahasındaki yüzey ve yeraltı suları uzaklaştırılarak yerin kurutulması, taç kısmındaki yükler kaldırılarak göçmeye neden olan yüklerin azaltılması ve topuk dolgusu sayılabilir (Turnbull ve Hvorslev, 1967).

Heyelanları incelemek, izlemek ve yamaç duraylılığını belirlemek için jeoloji, jeofizik, jeoteknik, kuyu logu ve jeodezik uygulamalara ihtiyaç vardır. Bu uygulamalarda, jeomorfolojik, jeolojik, hidrolojik, mühendislik jeolojisi ve jeofizik haritalamalar, yerinde ölçüm ve izleme (monitoring), laboratuvar analizleri, uzaktan algılama ölçüleri, jeodezik gözlemler, heyelanların matematiksel-fiziksel-jeolojik modellenmesi, jeodinamik işlemleri ve deformasyon süreçlerini saptamak için toplanan bilgilerin istatistiksel analizi çalışmaları yürütülmektedir.

Heyelan duraylılığının hesabı için birçok bilgiye ihtiyaç vardır. Bu bilgilerin bir kısmı, sadece sondaj gibi klasik prospeksiyon yollarının yanında son yıllarda büyük gelişmeler gösteren jeofizik yöntemler kullanılarak elde edilebilir. Jeofizik; yerin yüzeyinde ve açılmış kuyularda yapılan fiziksel ölçümleri kullanarak, yer içinin incelenmesini kapsar. Heyelan nedeniyle yamaçtaki jeofizik parametrelerde oluşan değişim yamacın yapısını belirlemede ve yamaç hareketini izlemede kullanılmaktadır. Bazı dik yamaçlarda kuyu açmanın zorluğu sondaja ihtiyaç duyan jeoteknik uygulamaları sınırlar. Son yıllarda yeraltının iki ve üç boyutlu görüntülenmesinde kullanılan jeofizik tekniklerde büyük gelişmeler meydana gelmiştir (Craig ve diğ., 2006; Mudge ve Dentith, 2014). Aletsel ve veri işleme tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak, jeofizik yöntemler heyelanları incelemek ve izlemek için ana araç olmuştur. Bunların yanında jeofizik uygulamaların maliyetinin sondaja göre çok daha az olmasına rağmen, jeofizik tekniklerin uygulanmasında hala bir isteksizlik mevcuttur. Jeofizik mühendislerinin gerçekleştirdiği işin fiyatı, diğer profesyonel arazi hizmetleri gibidir. Jeofizik ölçüler ve yorum sondaj sayısından önemli tasarruf sağlar. Böylece saha incelemesinin fiyatı gereksiz sondaj fiyatı düşüldüğünde azalır. Jeofiziğin en önemli avantajı sondajla direk örnekleme göre yıkıcı olmaması, daha ucuz ve tehlikesiz olmasıdır.

Heyelanların jeofizik özellikleri; Elektrik Özdirenç, Doğal Potansiyel, Elektromanyetik, Sismik Kırılma, Sismik Yansıma, Yüzey Dalgalarının Analizi, Mikrotremor ölçüleri ile belirlenebilir. Bu ölçümlerle heyelanın sınırları, kayan kütle kalınlığı, heyelan bölgesindeki değişik malzemelerin dağılım düzeni ve suyun varlığı ve dağılımı araştırılır. Ayrıca, heyelanlarda sismik gürültü kaydı ve ivme ölçüleri ile izleme yapılmaktadır.

Heyelanlarda Bogoslovsky ve Ogilvy (1977)'nin öncü çalışmalarından bu yana jeofizik tekniklerin kullanımı giderek artmıştır. Heyelan araştırmalarında jeofizik yöntemlerin uygulanması ile ilgili olarak, farklı heyelan çalışmalarını içeren ilk çalışmalardan birisi Mc Cann ve Forster (1990) tarafından sunulmuştur. Hack (2000)'in ve Jongman ve Garambois (2007)'in çalışmalarında yamaç duraylılık analizleri için değişik jeofizik tekniklerin kullanımı yer almaktadır. Şimdiye kadar bu konu ile ilgili bir çok makale yayınlanmıştır (Bogoslovski ve Ogilvy, 1977; Mc Cann ve Forster, 1990; Cummings ve Clark, 1998; Frasher ve diğ., 1999; Bruno ve Marillier, 2000; Gallipoli ve diğ., 2000; Hack, 2000; Jongmans ve diğ., 2000; Mauritsch ve diğ., 2000; Lapenna ve diğ., 2003; Israil ve Pachauri, 2003; Bichler ve diğ., 2004; Glade ve diğ., 2005; Lapenna ve diğ., 2005; Meric ve diğ., 2005; Godio ve diğ., 2006; Friedel ve diğ., 2006; Denis ve diğ., 2007; Jomard ve diğ., 2007; Jongmans ve Garambois, 2007; Marescot ve diğ., 2008; Sass ve diğ., 2008; Chambers ve diğ., 2011; Grandjean ve diğ., 2011; Bievre ve diğ., 2012; Epada ve diğ., 2012; Malehmir ve diğ., 2013; Perrone ve diğ., 2014; Gelişli ve Ersoy, 2017; Marinescu ve diğ., 2017; Magdalena ve diğ., 2018). Heyelan araştırmalarında uygulanan jeofizik yöntemlerin prensipleri temel jeofizik kitaplarında bulunabilir (Telford ve diğ., 1990; Reynolds, 1997; Sharma, 1997; Kearey ve diğ., 2002).

JEOFİZİK YÖNTEMLER VE HEYELANLARDA JEOFİZİK UYGULAMALAR

Bir heyelanın stabilitesinin belirlenebilmesi için heyelanın yapısı, hidrolojik rejimi ve jeoteknik özellikleri çalışılmalıdır. Jeofizik yöntemler daha çok heyelan araştırmalarında bu amaçlar için kullanılmaktadır. Jeofizik uygulamaların genel olarak üç ana hedefi vardır: heyelanın kayma yüzeyinin, düşey ve yanal sınırlarının belirlenmesi, heyelanın iç yapısının haritalanması ve kayan kütle içerisindeki suyun bulunmasıdır. Son yıllarda jeofizik alet teknolojisi ve yazılımlardaki gelişmelere bağlı olarak, bir heyelanın bu özellikleri jeofizik uygulamalarla başarılı bir şekilde belirlenebilmektedir. Jeofizik yöntemler heyelan araştırmalarında göreceli olarak hızlıdır, doğaya zarar vermezler, yamaçlarda uygulanabilir, zeminin veya kayanın iç yapısı hakkında bilgi ve geniş hacimli araştırmalara izin verirler. Herhangi bir arazi uygulamasından önce jeofizik araştırma iyi tasarlanmalıdır. Uygulanan yöntemin yeterliliği ve problemin çözümü bazı faktörlere bağlıdır. Öncelikle çalışılan alanın yeraltı koşullarında belirgin bir fiziksel farklılık olmalıdır. Herhangi bir farklılık olmadığında, hedef jeofiziksel olarak belirlenemez. Jeolojik, hidrolojik veya mekanik bir sınırın varlığı (heyelan kütesinin sınırı) jeofizik özellikler açısından bir değişim göstermeyebilir. Ayrıca, Jeofizik uygulamalarda ayrımlılık ve penetrasyon arasında ilişki vardır. Yüksek penetrasyon kötü ayrımlılık verir. Uygulanan yöntem hangi derinliklere kadar duyarlı olabilir? Tüm bu sınırlamalar jeofizik araştırmalarda dikkate alınmalıdır.

Şimdiye kadar jeofizik yöntemler; birkaç dereceden (yer kayması) düşeye (kaya düşmesi) kadar değişen açılı yamaçlar için farklı heyelan tiplerine uygulanmıştır. Yapılmış uygulamalarda penetrasyon derinlik aralığı, 3 metre 'den 400 metreye kadar değişir. Hangi yöntemin hangi tür heyelanın özelliklerini belirlemede daha etkin olduğu, hangi heyelan parametresinin hangi jeofizik yöntemle elde edilebileceğine dair çalışmalar vardır. Farklı heyelan tipleri ve heyelan ile ilgili özellikler için değişik jeofizik yöntemlerin uygunluğu Hack (2000) ve Bouillon (2005) tarafından incelenmiştir.

Heyelan alanında sürekli ölçümler yaparak, zaman içinde incelenen fiziksel özelliğin değişimi izlenir. Zaman içinde, suya doygunluğun artması, elektrik iletkenliği, kütleinin ağırlığını artırır, manyetik duyarlılığı düşürür, sismik dalga geçiş hızını yavaşlatır, doğal potansiyel oluşturur, kopma ve kayma başlangıcında titreşimler oluşur, hacim artışı, kabarma ve kayma meydana gelir. Heyelan araştırmalarında, heyelan kütleisi farklı yerlerden koparak bir araya gelmiş malzemelerden oluştuğu için kısa mesafelerde farklı jeofizik özellikler ölçülmüş olabilir. Karmaşık jeolojik yapısı nedeniyle heyelanın yapısının anlaşılabilmesi için ayrıntılı çalışılması gerekir. Ölçümler birbirine paralel hatlar boyunca ve sık aralıklı alınmalıdır. Topografik bilgi yoksa ölçümler topografyadan en az etkilenen şekilde eğime dik yönde alınmalıdır. Profiller heyelan sınırları dışından başlatılmalıdır. Heyelan

malzemesi son derece heterojen olduğundan elektrik akımını vermek zor ve sismik dalga sönümü yüksek olabilir.

Heyelanlarda su doygunluğunun fazlalığından dolayı mevsimsel ölçüler dikkate alınmalıdır. Özdirenç, doğal potansiyel gibi bazı parametreler nemlilik oranının ve sıcaklığın değişiminden etkilenir. Bu gerçekler, kayan malzemenin fiziksel özelliklerinin değişiminin yılın farklı dönemlerinde incelenmesini gerektirir. Tamamıyla ya da kısmen ağır kil içeren bir heyelan bölgesinde, ayrı bir yer altı suyu tablası olmaz. Bu gibi yerlerde heyelandaki malzemelerin nemliliğinin farklı derecede olmasından söz edilir. Pek çok heyelanda killi tabakaların bulunması, elektrik yöntemlerle yer altı suyunun belirlenmesi çalışmalarını olumsuz etkiler.

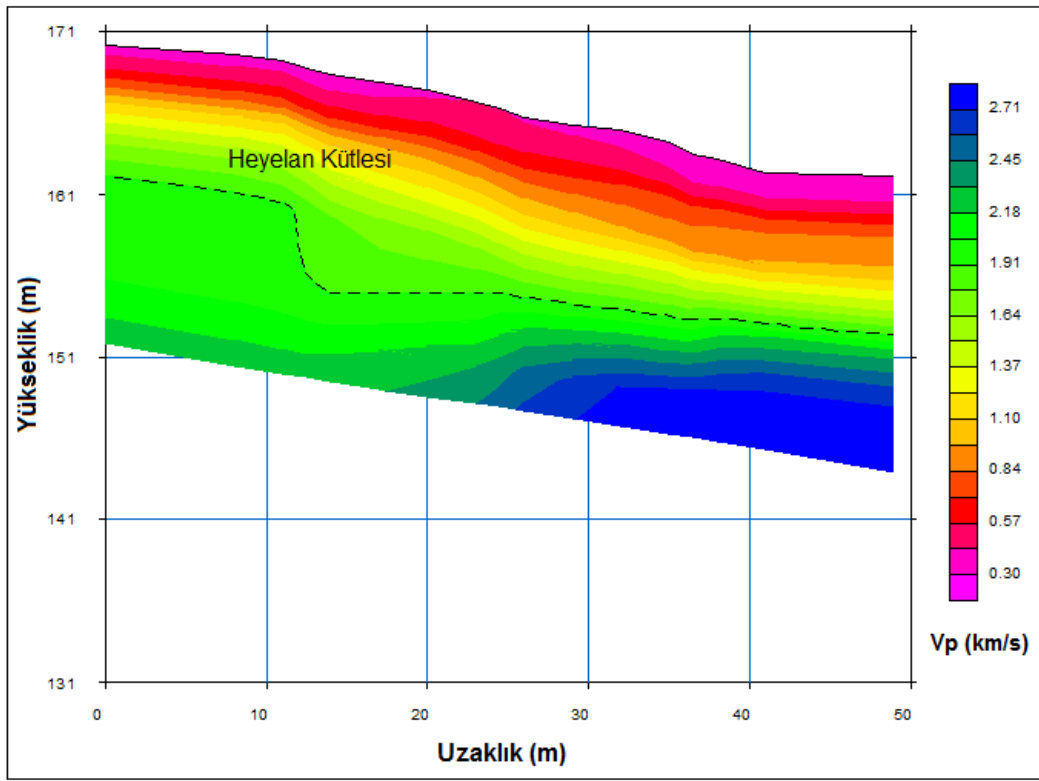
Jeofizik tekniğin performansı Sinyal/Gürültü (S/G) oranına çok fazla bağlıdır. Jeofizik yöntemler toplanan veriler işlendikten sonra, ölçülen fiziksel parametrenin 1-boyutlu (1B), 2-boyutlu (2B) veya 3-boyutlu (3B) değişimini sağlarlar. 1B bilgi bir profile karşılık gelirken, 2B ve 3B bilgi genellikle bir ters çözüm işlemi ile elde edilen bir jeofiziksel görüntüdür. Son yıllarda gelişen jeofizik görüntüleme yöntemi, incelenen alanın sürekli bilgisini sağlama gibi büyük bir avantaja sahiptir. Jeofizik kesitlerin jeolojik veya jeoteknik yorumu sahada tüm veriler göz önüne alınarak yapılmalıdır. Modelleme ve ters çözüm çalışmaları yapılmalıdır. Güvenilir bir yorum elde edebilmek için, jeofizik verilerin jeolojik veya jeoteknik veri ile kalibre edilmeleri gerekir.

Sismik yansıma yönteminde yeryüzünde bir kaynaktan ses dalgası üretilerek yer içerisine gönderilir. Oluşan dalgacık yer içine doğru seyahat ederken farklı elastik özelliklere sahip tabakaları ayıran arayüzeylerden geri yansır. Gelen dalgalar sismik alıcılar tarafından kaydedilir. Bir heyelanda kayan malzeme ile temel kaya arasındaki sınır, iki ortamın elastik dalga hızlarının farklı olması nedeniyle sismik yöntemlerle belirlenebilir. Genel olarak, kayan malzemenin boyuna (P) ve enine (S) dalga hızları temel kayanın hızından daha düşüktür. Yamaçta boyuna ve enine dalga hızları saptanır ve bu hızlar kullanılarak elastik parametreler hesaplanır. Heyelanlarda üstteki yumuşak malzeme sismik dalgaları önemli oranda soğurduğu için, bu malzemelerin altına enerjiyi gönderebilecek uygun kaynaklar kullanılmalıdır. Boyuna dalga enerji kaynağı olarak çekiç, ağırlık düşürme veya heyelanda tetiklemeye sebep olmayacak oranda patlayıcı, enine dalga için ise daha çok kalas kullanılır. Sismik yansıma yönteminde kaydedilen veri; işlendikten sonra elde edilen sonuçlar bir sismik kesittir ve elde edilen yansıma kesitlerinden stratigrafik yapı yorumlanabilir. Sismik yansıma yöntemi ile daha çok tabaka içi yapılar veya kayma yüzeyleri gibi heyelan yapısının geometrisi görüntülenebilmektedir (Ferrucci ve diğ., 2000; Bichler ve diğ., 2004). Eğer hız yapısı bilinirse derinlik kesiti elde edilebilir. Elde edilen hız-derinlik kesiti yeraltı yapısının bir resmini gösterir. Diğer jeofizik teknikler ile karşılaştırıldığında, sismik yansıma yöntemi özellikle engebeli topoğrafya koşullarında jeofon düzeninin tesis edilmesinin zorluğu, zaman alıcı ve masraflı olması gibi nedenlerle daha az kullanılmıştır. Ayrıca, sığ sismik yansımanın başarısı iyi S/G oranı gerektirir ve istenilen çözüme ulaşmak için yüksek frekanslı dalgaların kaydına ihtiyaç vardır. Bu koşulların son derece engebeli ve heterojen olan, jeofon yer temasının zor olduğu, dalgaların sönümünün çok olduğu, saçılmanın olduğu yerlerde sağlanması zor olabilir.

Sismik kırılma yöntemi, kayıt edilen sinyallerin ilk varış zamanlarının okunup değerlendirilerek yorumuna dayanır ve hızın derinlikle arttığını varsayar (Kearey ve diğ., 2002). Heyelan kütlelerinin duraylı yere göre, boyuna ve enine dalgası hızları daha küçük olduğu için yöntemin heyelan incelemelerinde uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır. Yöntem, daha çok heyelan kütlelerinin iç yapısının ve ana kaya yüzeyinin topoğrafyasının belirlenmesinde kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, seyahat zamanı verileri gecikme zamanı yöntemleri kullanılarak yorumlanmıştır. Heyelanlarda ondüveli kayma yüzeyini haritalamayı mümkün kılan artı-eksi tekniği veya genelleştirilmiş karşılıklı yöntem (GRM) gibi uygulamalar geliştirilmiştir (Kearey ve diğ., 2002). Sismik tomografi tekniği, yeraltının P-dalgası hız dağılımı görüntüsünü elde etmek için ilk varış zamanlarının ters çözümünün yapılmasından ibarettir. Bu uygulama, klasik sismik kırılma ile karşılaştırıldığında, çok daha fazla seyahat-zamanı verisi ve arazi çalışması gerektirir. Ancak, yanal ve

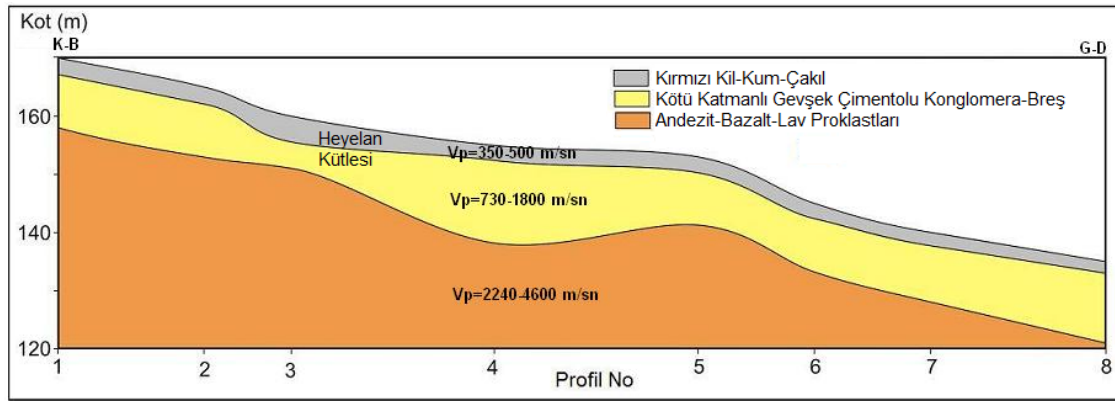
düşey olarak sismik hız değişimlerinin tespit edilmesini sağlar. Sismik hızların derinlikle değişimi belirlendikten sonra, çeşitli derinlikler için hız haritaları oluşturulur. Bu haritalardan duraylı, duraysız, boşluklu, çatlaklı ve kırıklı bölgeler, yer altı su seviyesi ve malzemenin su doygunluğundaki değişim belirlenebilir. Ayrıca, elastik parametrelerin de her tabaka için haritaları oluşturularak benzer çalışmalar yapılabilir (Mc Cann ve Forster, 1990; Caris ve Van Asch, 1991; Glade ve diğ., 2005).

Trabzon Araklı-Yiğitözü mahallesinde 2006 yılında 130x240 m² bir alanda, bir evin yıkılmasına neden olan bir heyelan meydana gelmiştir. Heyelan alanında; ince taneli, kumlu, siltli ve konglomeratik seviyeler yer almaktadır. Bölgede meydana gelen heyelanların genel olarak kayma dairesinin derin olmadığı, sıg, yüzeysel kayma ve akmalar şeklinde olduğu anlaşılmaktadır. Heyelan alanında bir profil boyunca alınan sismik kırılma ölçülerinin ters çözümü ile elde edilen yeraltı hız dağılımı Şekil 1’de görülmektedir. Sismik hız değişimlerinden heyelanın kütlesi ve kayma düzlemi açık olarak izlenmektedir. Sahada sekiz farklı profilden elde edilen yeraltı yapısı kesitlerinden hız-derinlik bilgileri birleştirilerek oluşturulan heyelan dikme kesiti Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 1. Araklı-Yiğitözü Heyelan alanında bir profilden alınan sismik kırılma verilerinden elde edilen yeraltı hız dağılımı

Figure 1. Underground velocity distribution obtained from seismic refraction data taken from a profile in Araklı-Yiğitözü landslide area



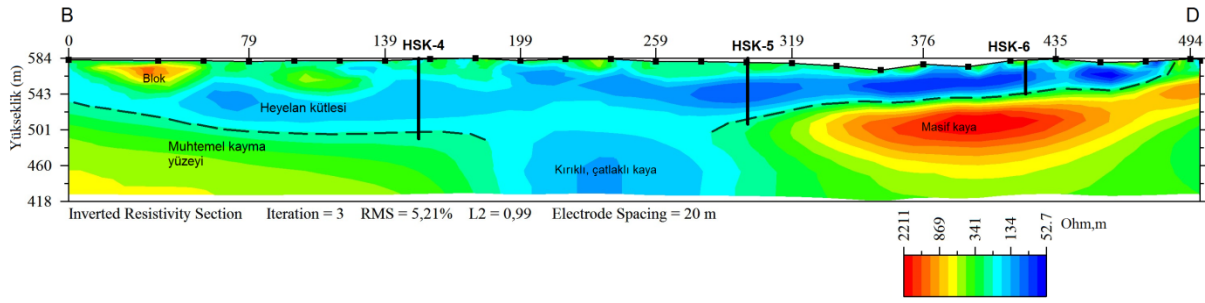
Şekil 2. Sismik kırılma yöntemi ile elde edilen Araklı-Yığıtözü heyelanı yeraltı yapı kesiti

Figure 2. Underground structure of the Araklı-Yığıtözü landslide obtained by seismic refraction method

Mikrotremor Yöntemi ile, heyelan araştırmalarında H/V eğrilerinden temel frekans belirlenerek kayma yüzeyi derinliği hesaplanmaktadır (Gallipoli ve diğ., 2000; Lapenna ve diğ., 2003; Meric ve diğ., 2007). Elde edilen sonuçlar genellikle elektrik özdirenç, jeoteknik sondaj veya kuyu ölçümleri ile karşılaştırılmaktadır. Yöntem, sismik gürültü ölçümlerinden; örtü tabakasının geometrisi ve enine dalga hızlarının tespit edilmesini sağladığı için, mühendislik jeofizikinde kullanımı giderek artmaktadır. Kayma yüzeyleri; kayma dalgası hız kontrastları oluşturur ve yöntem teorik olarak doğrudan bu yüzeyleri algılayabilir.

Heyelan araştırmalarında en çok kullanılan elektrik özdirenç yönteminin uygulanmasının ana amacı; kayma yüzeyinin ve yeraltı su durumunun belirlenmesidir (Havenith ve diğ., 2000; Batayneh ve Al Diabat, 2002; Demoulin ve diğ., 2003; Wisen ve diğ., 2005; Lebourg ve diğ., 2005). Özdirenç yönteminde, yere bir çift elektrot ile direkt doğru akım verilir ve diğer bir elektrot çifti arasındaki elektrik potansiyel ölçülür. Yöntem; Düşey Elektrik Sondajı (DES), elektrik özdirenç profili ve özdirenç tomografi olmak üzere üç şekilde kullanılabilir. DES uygulaması ve yorumu hızlı ve kolaydır. Ancak, DES'in derinden bilgi alması için ölçümlerin büyük açılımlarla yapılması, özdirençin düşey değişimlerinin 1B olarak göz önüne alınması ve çok çözümlülük gibi bazı sorunları da vardır. Heyelanlar genellikle heterojen malzeme içerdiklerinden fiziksel parametreleri yanal değişim sergiler ve DES verilerinin yorumlanması zor hale gelir. Elektrik özdirenç tomografi (ERT), yeraltının 2B görüntüsünü sağladığı için son yıllarda standart bir jeofizik görüntüleme tekniği olarak ortaya çıkmıştır. Özdirenç; malzemenin doğasına (özellikle kil yüzdesi), su içeriğine, ayrışma, parçalanma gibi faktörlere duyarlıdır. Elektrik özdirenç değerleri geniş bir aralıkta değişim gösterir. Özdirenç yönteminde başarı için veri toplama parametrelerinin seçimine dikkat edilmelidir. Ayrıca, elde edilen görüntüler karmaşık olabilir ve yorum bazen sayısal modelleme kullanılarak kontrol edilmelidir.

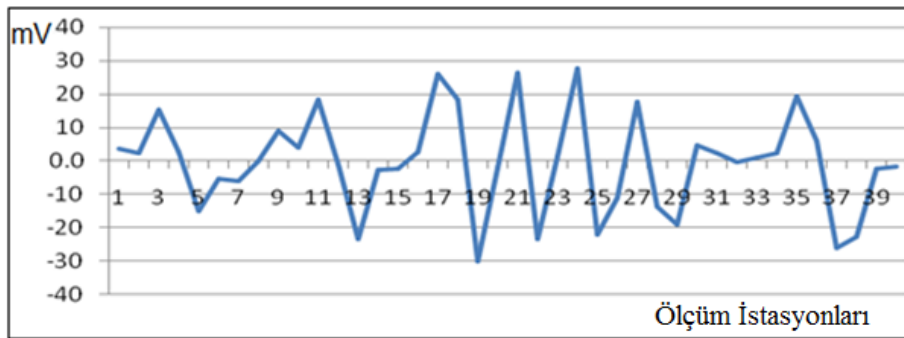
Artvin Barajı ve Hidroelektrik Santrali rezervuar alanı içerisinde kalan Havuzlu köyünde yer alan Havuzlu Heyelanı, eğimli bir yamaçta yer almakta olup, yüzey ve yeraltı suları içeren karmaşık bir yapıya sahip bir paleo heyelandır. Havuzlu Heyelanını oluşturan malzeme çoğunlukla metakumtaşı, metasilttaşı ve fillattan, daha az oranda ise gabro ve bazik volkanik kayalardan oluşmaktadır. Şekil 2'de Havuzlu (Artvin) Heyelanında bir profil boyunca alınan 2B verilerin ters çözümünden elde edilen yeraltı elektrik özdirenç dağılımı görülmektedir. Şekil 3'de yamaçtaki düşük özdirenç değerine sahip zayıf, su içeriği yüksek zonlar ve yüksek özdirençli masif blokların varlığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3. Havuzlu (Artvin) Heyelanında bir profile ait 2B yorumlanmış yeraltı öz direnç kesiti. HSK-4, HSK-5 ve HSK-6 sahada açılmış mekanik sondajları göstermektedir. Muhtemel kayma yüzeyi kesikli çizgi ile işaretlenmiştir (Gelişli ve Ersoy, 2017).

Figure 3. A two-dimensional interpreted underground resistivity section of a profile on the Havuzlu (Artvin) slope. HSK-4, HSK-5 and HSK-6 show mechanical drilling on site. The slip surface is marked by a dashed line (Gelişli and Ersoy, 2017).

Doğal potansiyel (SP) yönteminde, yapay akım kullanılmadan, yerin kendi doğal potansiyelleri ölçülmektedir. Heyelanlar genellikle içerisinde filtrasyon akımının gerçekleştiği büyük bir drenaj oluştururlar. Bu tür bir akımın yapısı ve gelişmesi, SP araştırmalarıyla gözlemlenebilir. SP anomalisi ve dağılımları kayaç litolojisi ile önemli ölçüde ilişkilidir. Yüksek oranda kil içeren kayaçlar, pozitif anomali verirler. Heyelan kütlelerinde bulunan yeraltı suyu ve ilgili akışlar, şev stabilitesinde önemli bir rol oynar. Yapılan araştırmalar yeraltındaki bir su hareketinin doğal bir voltaj meydana getirdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle SP yöntemi heyelanlarda yeraltı suyu hareketinin varlığını belirleme araştırmalarında kullanılmaktadır (Patella, 1997; Revil ve diğ., 1999). SP grafiklerinde -20 mV değerinden büyük anomaliler genellikle su akışının olduğu yerlere işaret etmektedir. Homojen kayaçların olduğu yerlerde SP eş potansiyel haritaları; filtrasyon akımının şekli, yönü ve şiddeti hakkında yararlı bilgiler verir. Şekil 4’de heyelan kütlelerinde sondajlarla belirlenmiş su akıntılarının olduğu kesimler üzerinde ölçülen SP anomalisi görülmektedir (Havuzlu Heyelanı-Artvin).



Şekil 4. Havuzlu heyelanında bir profile ait SP grafiği (Gelişli ve Ersoy, 2017).

Figure 4. SP graph of a profile in Havuzlu (Artvin) landslide (Gelişli and Ersoy, 2017).

Elektromanyetik (EM) yöntemler; bir kaynaktan yayılan değişken elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin oluşturduğu EM dalgalarına yer tabakalarının verdiği tepkiyi ölçmeye dayanır. EM ölçümler iki yatay halka ile zaman ve frekans ortamında gerçekleştirilir. Tek bir görünür elektrik öz direnç değeri veren yöntem, hızlı profillemeye veya haritalamaya imkân verir. Yöntemin penetrasyon derinliği bobin ara uzaklığına bağlıdır ve birkaç metreden onlarca metreye kadar değişir. EM

yöntemler; son zamanlarda heyelan araştırmalarında özellikle duraysız kütlenin geometrik sınırlarını belirlemek ve suyun varlığı ve dağılımını haritalamak için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Pek çok araştırmacı heyelan incelemelerinde EM yöntemlerin diğer jeofizik teknikleri ile kombine edilmesinin daha uygun olduğunu vurgulamışlardır (Bruno ve Marillier, 2000; Mauritsch ve diğer., 2000). EM yöntemlerden birisi olan yer radarı (Ground Penetrating Radar, GPR) yönteminde, verici antenin ürettiği yüksek frekanslı bir EM enerji, kısa zaman dilimleriyle yer içerisine gönderilir. Uygulanan alanın frekansı 10 MHz-Birkaç GHz arasındadır ve bu frekansın yayılımı, yerin elektrik özelliklerine bağlıdır. Jeolojik birimlerin su içerikleri, kayacın kırık, çatlak yapısı elektrik özelliğini değiştirdiğinden yere gönderilen sinyalin bir kısmı saçılır ve geri yansır. Ölçüm almanın kolay olması, yüksek ayrımlılık sağlaması yönetime duyulan ilginin nedenlerindedir. GPR sinyalinin çok iletken formasyonlarda çabuk sönümlenmesi, kırıklar, blok malzemeler gibi heterojenitelerin saçılma yaratması ile penetrasyon derinliğinin azalması gibi nedenler, GPR yönteminin heyelan incelemelerinde kullanımında sınırlamalar yaratır. GPR yöntemi özellikle kayma düzleminin belirlenmesinde başarı ile uygulanmaktadır (Barnhardt ve Kayen, 2000; Jeannin ve diğer., 2006).

Duraysız bölgede kayma mukavemetinin azalması nedeniyle enine dalgası hızında (V_s) düşüş oluşabilir. Derinlikle V_s hızı değişimini birkaç yöntem ile belirlemek mümkündür. Son yıllarda yeraltı incelemelerinde derinliğe karşı enine dalga hız değişimini elde etmek için mikrotremor ve SH kırılma veya yansıma yöntemleri yanında, yüzey dalgalarının analizi (SW) yöntemi giderek artan bir kullanıma sahiptir (Socco ve Jongmans, 2004; Meric ve diğer., 2007). SW yönteminin avantajı, veri toplama aşamasında yeterli kayıt uzunluğu seçilirse, P-dalgası kırılma veya yansıma verileriyle birlikte kaydedilebilir olmasıdır.

Yerleşim yerleri yakınında meydana gelen hareketler, jeofizik ölçüler kullanılarak izlenebilir. Kayaçlar gerilmeye maruz kaldıklarında geçici, ses dalgası frekanslı sonik titreşimler yayarlar. Bu gürültüler mikrosismik aletlerle algılanarak gürültü kontrolü heyelan olasılığını kestirmede kullanılabilir (Gelişli ve Çınar, 1991; Supper ve Römer, 2003; Roch ve diğer., 2006). Ayrıca, yapılan ölçüler jeodezik ölçümlerle desteklenebilir.

SONUÇLAR

Bu makalede, heyelan incelemelerinde gittikçe kullanımı artan jeofizik yöntemlerin potansiyelleri ve sınırlamaları irdelenmiştir. Heyelanlar gibi heterojen yapıların incelenmesi, sığ araştırma jeofiziği için en zorlu temalardan biridir. 2B ve 3B jeofizik görüntüleme tekniklerinin gelişimi; heyelan alanlarının karmaşık yapısını araştırmak, heyelan malzemesinin fiziksel özelliklerini ve heyelan kütlesi içerisindeki yeraltı suyu akışlarını belirlemek, heyelan hacmini değerlendirmek için giderek artan bir ilgi uyandırmaktadır.

Heyelan incelemelerinde bir jeofizik araştırmanın tasarımı için hala tartışılan birçok soru vardır ve tek bir strateji yoktur. Bu gibi yapıların araştırılmasında güvenilir sonuçlar elde etmek için, farklı jeofizik teknikler birlikte kullanılmalı ve tekniklerin seçimi açıkça fiziksel parametrelerin beklenen kontrastı tarafından yönlendirilmelidir.

Heyelanlar araştırmalarında belki de jeofizik tekniklerin uygulanmasındaki en büyük zorluk; ölçülen jeofizik parametrelerle istenen jeoteknik ve hidrojeolojik özellikler arasındaki karmaşık ilişkidir. Bu durum mühendislik özelliklerinin direk yorumunu zorlaştırmaktadır.

Jeofizik yöntemlerle elde edilen sonuçlar; jeolojik ve jeoteknik verilerle ilişkilendirilmelidir. Heyelanlar tarafından etkilenen alanların genellikle litolojik ve hidrojeolojik koşulları, mekânsal ve zamansal değişiklikler gösterirler.

Diğer bir konu da jeofizik alıcılar yerleştirilerek heyelanların sürekli izlenmesidir. Bu tür izleme araştırmaları son zamanlarda bazı heyelanlarda gerçekeştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Barnhardt W.A. and Kayen R.E., 2000. Radar structure of earthquake induced coastal landslides in Anchorage, Alaska. *Env. Geos.*, 7, 38-45.
- Batayneh A.T. and Al Diabat A.A., 2002. Application of a 2-D electrical tomography technique for investigating landslides along the Amman-Dead Sera Highway, Jordan. *Env. Geology*. 42, 399-403.
- Bichler A., Bobrowsky P., Best M., Douma M., Hunter J., Calvert T. and Burns R., 2004. Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: the Quesnel Forks landslide. *Landslides* 1, 29-40.
- Bièvre G., Jongmans D., Winiarski T., et al., 2012. Application of geophysical measurements for assessing the role of fissures in water infiltration within a clay landslide (Trieves area, French Alps), *Hydrol. Process*, 26, 2128–2142.
- Bogoslovsky V.A. and Ogilvy A.A., 1977. Geophysical methods for the investigation of landslides. *Geophysics* 42, 562-571.
- Bruno F. and Marillier F., 2000. Test of high-resolution seismic reflection and other geophysical techniques on the Boup landslide in the Swiss Alps. *Survey in Geophysics* 21, 333-348.
- Bouillon A.L., 2005. Geophysics for geohazards on land: state-of-the-art, case studies and education. ICG Report No. 2005-T1-1; NGI Report No. 20051108- 1, International Centre for Geohazards, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Caris J.P.T. and Van Asch W.J., 1991. Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps. *Eng. Geology* 31, 249-276.
- Chambers J.E., Wilkinson P.B., Kuras O., Ford J.R., Gunn D.A., Meldrum P., Pennington C.V.L., Weller A.L., Hobbs P.R.N., Ogilvy, R.D., 2011. Three-dimensional geophysical anatomy of an active landslide in Lias Group mudrocks, Cleveland Basin, UK. *Geomorphology* 125: 472-484.
- Cruden D.M. and Varnes D.J., 1996. Landslide types and processes. In: *Landslides investigation and mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247. National Academy of Sciences, Washington DC., USA, 36-75.
- Cummings D., Clark BR., 1998. Use of seismic refraction and electrical resistivity surveys in landslide investigations, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 25(4), 459-464.
- Demoilin A., Pissart A. and Schroeder C., 2003. On the origin of late Quaternary palaeolandslides in the Liège (E Belgium) area. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 92, 795-805.
- Epada P.D., Sylvestre G., Tabod, T.C., 2012. Geophysical and geotechnical investigations of a landslide in Kekem area, western Cameroon. *Int. J. Geosci.* 3, 780–789.
- Jongmans D. and Garambois S., 2007. Geophysical investigation of landslides: a review, *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2007, t. 178, no 2, pp. 101-112.
- Ferrucci F., Amelio M., Sorriso V. and Tansi C., 2000. Seismic prospecting of a slope affected by deep-seated gravitational slope deformation: the Lago Sackung, Calabria, Italy. *Engineering Geology* 57, 53-64.

Frashëri, A., Liço, R., and Kapedani, N., 1999. An outlook on the influence of geological structures in geothermal regime in Albania: Albanian Journal of Natural and Technical Sciences, Acad. Sci. of Albania, 1, 129-139.

Friedel S., Thielen A., Springman S.M., 2006. Investigation of a slope endangered by rainfall-induced landslides using 3D resistivity tomography and geotechnical testing. Journal of Applied Geophysics 60: 100-114.

Gallipoli M., Lapenna V., Lorenzo P., Muccarelli M., Perrone A., Piscitelli S. and Sdao F., 2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics 4, 117-128.

Gelişli K., Çınar H., 1991. Heyelan araştırmalarında jeofizik yöntemlerin kullanımı. Türkiye 1. Ulusal heyelan sempozyumu, Trabzon-Türkiye, 27-29 Kasım 1991, 356-365.

Gelişli K. and Ersoy H., 2017. Landslide investigation with the use of geophysical methods: a case study in northeastern Turkey. Advances in Biology & Earth Sciences Vol.2, No.1, pp.52-64.

Glade T., Stark P. and Dikau R., 2005. Determination of potential landslide shear plane depth using seismic refraction. A case study in rheinhessen, Germany. Bull. Eng. Geology Env. 64, 151-158.

Godio A., Strobbia C., De Bacco G., 2006. Geophysical characterization of a rockslide in an alpine region, Engineering Geology, 83, 273-286.

Grandjean G., Gourry J.C., Sanchez O., Bitri A., Garambois S., 2011. Structural study of the Ballandaz landslide (French Alps) using geophysical imagery. Journal of Applied Geophysics 75: 531-542.

Hack R., 2000. Geophysics for slope stability. Survey in Geophysics 21, 423-448.

Havenith H.B., Jongmans D., Abdurakmatov K., Trefois P., Delvaux D. and Torgoev A., 2000. Geophysical investigations on seismically induced surface effects, case study of a landslide in the Suusamyr valley, Kyrgyzstan. Survey in Geophysics 21, 349-369.

Israil M., Pachauri A.K., 2003. Geophysical characterization of a landslide site in the Himalayan foothill region, Journal of Asian Earth Sciences, 22, 253-263.

Jeanin M., Garambois S., Gregorie S. and Jongmans D., 2006. Multi-configuration GPR measurements for geometrical fracture characterization in limestone cliffs (Alps). Geophysics, 71, 885-892.

Jomard H., Lebourg T., Tric E., 2007. Identification of the gravitational boundary in weathered gneiss by geophysical survey: La Clapière landslide (France). Journal of Applied Geophysics 62: 47-57.

Jongmans D., Hemroulle P., Demanet D., Renardy F. and Vanbrabant Y., 2000. Application of 2D electrical and seismic tomography techniques for investigating landslides. European Jou. Env. Eng. Geophysics 5, 75-89.

Jongmans D. and Garambois S., 2007. Geophysical investigation of landslides: a review. Bulletin De La Societe Geologique De France 178, no 2, 101-112

Kearey P., Brooks M. and Hill I., 2002. An introduction to geophysical exploration, 3rd Edition. Blackwell, Oxford, 262 p.

Lapenna V., Lorenzo P., Perrone A., Piscitelli S., Rizzo E. and Sdao F., 2003. High-resolution geoelectrical tomographies in the study of the Giarrossa landslide (Potenza, Basilicata). *Bull. Eng. Geol. Env.*, 62, 259-68.

Lapenna V., Lorenzo P., Perrone A., Piscitelli S., Rizzo E. and Sdao F., 2005. 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine chain, southern Italy. *Geophysics*, 70, B11-B18.

Lebourg T., Binet S., Tric E., Jomard H. and El Bedoui S., 2005. Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4D evolution of the water pressure on part of a deep-seated landslide. *Terra Nova* 17, 399-406.

Mita M., Glazer M., Kaczmarzyk R., Dąbrowski M., Mita K., 2018. Case study of electrical resistivity tomography measurements used in landslides investigation, Southern Poland, *Contemp. Trends.Geosci.*, 7(1),110-126.

Malehmir A., Saleem M.U., Bastani M., 2013. High-resolution reflection seismic investigations of quick-clay and associated formations at a landslide scar in southwest Sweden. *Journal of Applied Geophysics* 92: 84-102.

Marescot L., Monnet R., Chapellier D., 2008. Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps. *Engineering Geology* 98: 18- 28.

Marinescu M., Cristea P., Maruntenau C., Mezincescu M., 2017. MASW Seismic Method in Brebu Landslide Area, Romania. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 95 032035.

Mauritsch H.J., Seiberl W., Arndt R., Romer A., Sneiderbauer K. and Sendlhofer G.P., 2000. Geophysical investigations of large landslides in the Carnic region of southern Austria. *Eng. Geology* 56, 373–388.

Mc Cann D.M. and Forster A., 1990. Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations. *Engin. Geol.* 29, 59–78.

Meric O., Garambois S., Jongmans D., Wathelet M., Chatelain J.L. and Vengeon J.M., 2005. Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne, France. *Canadian Geotechnical Journal* 42, 1105-1115.

Meric O., Garambois S., Malet J.P, Cadet H., Gueguen P. and Jongmans D., 2007. Seismic noise-based methods for soft-rock landslide characterization. *Bulletion De La Societe Geologique De France* 178, 2, 137-148.

Patella D., 1997. Introduction to ground surface self-potential tomography. *Geophys. Prospect.*, 45, 653–681.

Perrone A., Lapenna, V., Piscitelli S., 2014. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review, *Earth-Science Reviews* 135 (2014) 65–82 *Earth-Science Reviews* 135, 65–82.

Revil A., Pezard P. and Glover E.W.J., 1999. Streaming potential in porous media. 1, Theory of the zeta potential. *J. Geophys. Res.*, 104, 20,021-20,031.

Reynolds J.M., 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. Wiley & Sons, Chichester, 806 p.

Roch K.H., Schwatal, B. and Bruckl E., 2006. Potentials of monitoring rock fall hazards by GPR: considering as example the results of Salzburg. *Landslides*, 3, 87-94.

Sass O., Bell R., Glade T., 2008. Comparison of GPR, 2D-resistivity and traditional techniques for the subsurface exploration of the Öschingen landslide, Swabian Alb (Germany). *Geomorphology* 93: 89-103.

Sharma P.V., 1997. Environmental and engineering geophysics. Cambridge Univ. Press, New York, 475 p.

Sidele, R.C. and Ochiai, H., 2006. Landslides: Processes, Prediction, and Land Use. Water Resources Monograph Series, volume 18. Washington, D.C.: American Geophysical Union.

Socco V. and Jongmans D., 2004. Special issue on seismic surface waves. *Near Surf. Geophys.*, 2, 163-258.

Supper R. and Römer A., 2003. New achievements in developing a high-speed geoelectrical monitoring system for landslide monitoring. In: Proc. 9th Meeting Env. Eng. Geophys., Prague, Czech Republic. – EAGE Publications, EEGS, Houten, Paper O-004, 6 p.

Telford W.M., Geldart L.P., Sherif R.E. and Keys D.A., 1990. Applied geophysics. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 770 p.

Turnbull, W.J. and Hvorslev, M.J., 1967. Special problems in slope stability. Proceedings of the ASCE 93, (SM4), 499-528.

Wisén R., Auken E. and Dahlin T., 2005. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. *Near Surf. Geophys.*, 3, 71-79.

Mudge S.T. and Dentith M., 2014. Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist, Cambridge University Press, 454 pages.

Craig H.J., Sheehan A.F., Burger H.R., 2006. Introduction to Applied Geophysics : Exploring the Shallow Subsurface, WW Norton & Co New York, United States, 624 pages