

# Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) ve yüzey dalgası analiz yöntemleriyle aktif bir heyelan alanının incelenmesi, Sakarya, Hendek

## Investigation of an active landslide area with the Electrical Resistivity Tomography (ERT) and surface-wave analysis methods in Hendek, Sakarya

Hasan KARAASLAN<sup>1\*</sup> , Ali SILAHTAR<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.  
hkaraaslan@sakarya.edu.tr, asilahtar@sakarya.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.02.2023  
Kabul Tarihi/Accepted: 31.10.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 13.09.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.99492  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Yıkıcı doğal afetlerden birisi olan heyelanlar, şev stabilitesinin doğa veya insan kaynaklı aktiviteler ile tetiklenmesi sonucu meydana gelmektedir. Bu tür kütle hareketlerini başladıktan sonra onları durdurmak çok zor ve hatta bazı durumlarda neredeyse imkânsızdır. Bu kütle hareketinin öncesi veya sonrasında, heyelanın karakterinin ve mekanik özelliklerinin yüksek çözünürlüklü belirlenmesinde jeofizik yöntemler oldukça etkilidir. Bu çalışmada Sakarya ili Hendek ilçesi Çamlıca Mahallesi'nde meydana gelen ve devam etme eğiliminde olan bir heyelanın elektrik öz direnç (ERT), yüzey dalgaları analizi (MASW-ReMi) ve mekanik zemin sondajı ile tanımlanması amaçlanmıştır. Elde edilen jeofizik kesitlerdeki düşük öz dirençli ve düşük kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) birim sondaj logundan suya doymuş killi kalın örtü tabası olarak belirlenmiştir. Kayma yüzeyi üzerinde kütle hareketine sebep olan bu birimin altındaki andezit-bazalt içerikli anakaya birimi jeofizik kesitlerde yüksek öz dirençli ve yüksek hızı olarak tespit edilmiştir. İlerleyici hareket mekanizmasına uygun olarak belirlenen bu heyelanda jeofizik yöntemlerin tümleşik kullanımı, heyelanın iç yapısının gerçeğe yakın olarak modellenmesine önemli katkı sağlamıştır.

**Anahtar kelimeler:** Heyelan, Jeofizik, Elektrik Rezistivite Tomografisi (ERT), Yüzey dalgaları analizi (MASW-ReMi), Sakarya-Hendek.

### Abstract

Landslides, one of the natural disaster problems, occur due to slope stability triggered by natural or human activities. Once such mass movements have begun, they are challenging to stop and, in some cases, almost impossible. Geophysical methods are very effective in determining the character and mechanical properties of landslides with a high resolution before or after mass movement. This study aims identifying the landslide that tends to continue in the Çamlıca neighborhood of the Hendek district of Sakarya province by electrical resistivity (ERT), surface waves analysis (MASW-ReMi), and mechanical soil drilling. The low resistivity and low shear wave velocity ( $V_s$ ) unit in the geophysical sections was determined as a saturated clayey thick cover layer from the borehole log. This clayey unit causes mass movement on the slip surface. Andesite-basalt-containing bedrock unit under the slip surface has been identified as having high resistivity and high velocity in geophysical sections. The integrated use of geophysical methods in this landslide, determined as the progressive mechanism, contributed significantly to the realistic modeling of the landslide internal structure.

**Keywords:** Landslide, Geophysics, Electrical Resistivity Tomography (ERT), Surface-wave Analysis (MASW-ReMi), Sakarya-Hendek.

## 1 Giriş

Heyelanlar, ciddi can ve mal kaybı meydana getirebilme potansiyelleri nedeniyle yer bilimleri açısından önem taşımakta ve çoğunlukla eğim açısı yüksek ( $>25^\circ$ ) ve genellikle suya doymuş zayıf kesme dayanımına sahip kil-silt içerikli kayma yüzeyleri mevcut olan alanlarda meydana gelmektedir [1]-[4]. Heyelanın tespit edilememesi ve gerekli güvenlik önlemlerinin alınmaması nedeniyle 1995 Senirkent heyelanında olduğu gibi yerleşim alanları tamamen onarılamaz ve kullanılamaz hale gelebilmektedir. Bu bağlamda heyelan riskine karşı önlem almada heyelanın geometrisinin, hidrojeolojisinin, materyal özelliklerinin, kinematiklerinin araştırılması gerekmektedir [5].

Sismik tehlikesi, jeolojisi, jeomorfolojisi ve yıllık yağış miktarı göz önüne alındığında, Adapazarı bölgesinin doğal afet açısından oldukça riskli olduğu bilinmektedir. Bölgedeki yıkıcı depremler etkisiyle oluşan sismik kuvvetlerden kaynaklanan deformasyonlar ve eğim yüzeyi boyunca oluşan yıkım büyük bir problem yaratmaktadır. Sakarya ili için, 1999 İzmit depremi sonrasında nüfus yoğunluğunda önemli bir artış söz konusudur. Bu artışın beraberinde şehirleşme baskısını da

getirmesiyle doğal afetlerden heyelan da bölgede öne çıkmıştır. Buna göre, Sakarya ve çevresinde birçok aktif heyelan ve olası heyelan alanları dikkat çekmektedir [6],[7]. Yağış kaynaklı kayma (heyelan) ve akma (debris) Sakarya ve çevresinde geniş bir alanı tehdit eden kütle hareketi modelleridir. Bu tür heyelanlarda katı ana kaya üzerinde gevşek zemin hareketi ve sürekli gerçekleşen su sızıntısı yamaç stabilitesindeki dengeyi kritik bir şekilde etkilemektedir [2],[8]. Çalışma alanının bulunduğu Adapazarı bölgesini tehdit eden büyük yıkıcı deprem tehlikesi heyelan alanları için geniş çaplı çalışma ve önlemleri gerektirmektedir. Heyelanlar başladıktan sonra onları durdurmak çok pahalı, çok zor, bazen de imkânsızdır. Bu sebeple heyelanlar başlamadan gerekli önlemleri almak çok önemlidir.

Heyelan araştırmalarında jeolojik, geoteknik ve jeofizik yöntemler iyi bir çözüm gücüne sahiptir [11],[12]. Jeofizik yöntemler, son yirmi yılda heyelan yapısının, heyelan jeolojisinin, kayma düzleminin belirlenmesinde, hidrojeolojik özelliklerin tespitinde, heyelan hareket karakterinin ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde diğer yöntemlere göre daha esnek, hızlı, hasarsız ve maliyetsiz bir şekilde heyelan

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

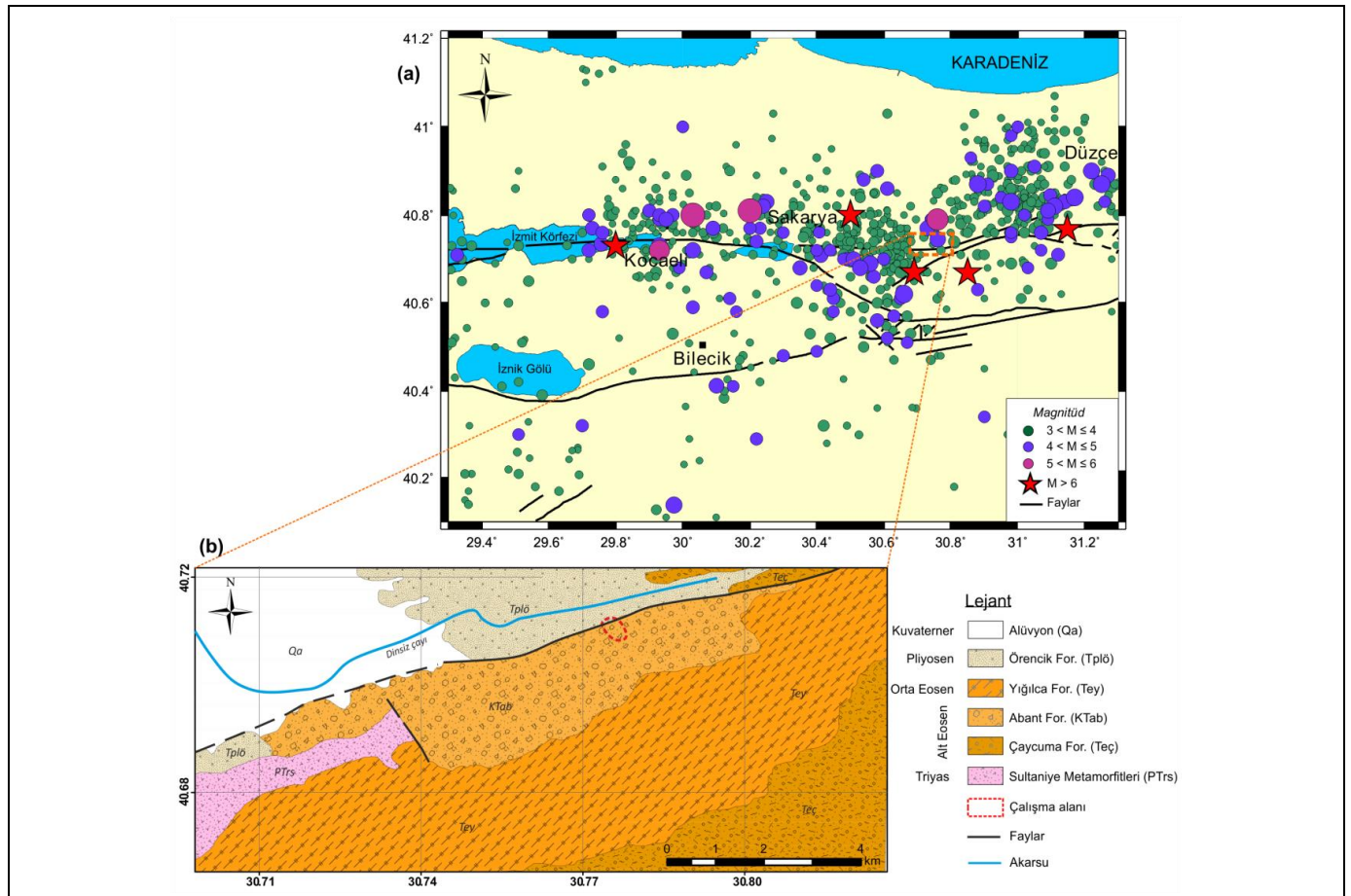
yüzei boyunca uygulanabilirliği sebebiyle öne çıkmaktadır [13]-[15]. Elektrik rezistivite ve sismik yöntemler heyelan alanlarında jeofizik yöntemlerden en çok tercih edilenler olarak karşımıza çıkmaktadır [16]-[19]. Jeofizik yöntemler, heyelan alanlarında kullanılan uzaktan algılama ve hava fotoğrafları gibi diğer metotlara göre en büyük özelliği yeraltı yapısı ve fiziksel özellikleri hakkında düzlemsel-boyutsal ve hacimsel olarak bilgi sağlamasıdır [20]. Jeofizik yöntemlerin heyelan alanı boyunca kütle hareketine neden olan malzemenin yanal-düşey farklı fiziksel özelliklerine odaklanmaları yöntemlerin avantaj ve dezavantaj durumlarını ortaya çıkarır. Bu bağlamda jeofizik yöntemleri tümleşik kullanmak herhangi bir jeofizik yöntemin kısıtı kaldığı noktaları farklı yöntemler ile çözümlenmeyi sağlar. Bu sayede elde edilen jeofizik yer altı modelinin gerçek jeolojik yapıya ait olması güvenilirliği oldukça artar [3],[8],[21]. Öte yandan, yer altında farklı yapıların benzer jeofiziksel cevabı üretebilmesi çoklu çözüm problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu problem, jeolojik ve geoteknik yaklaşımların jeofizik modelleri desteklemesiyle aşılmaktadır.

Bu çalışma, Sakarya ili Hendek ilçesi Çamlıca Mahallesi'nde yağmur suları ile tetiklenen ve devam etme eğiliminde olan kütle hareketinin tanımlanmasına odaklanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle mevcut ve eski heyelan alanlarının tanımlanması için saha gözlemleri doğrultusunda bir mühendislik jeolojisi

haritası hazırlanmıştır. Bu harita yardımıyla alandaki heyelanın geometrisinin karakteristiğini, sığ zemin yapısını ve yanal-düşey geçişleri irdeleyebilmek adına toprak akış yönüne paralel 141 m'lik bir hat üzerinde ERT ölçümü ve aynı profil üzerinde 3 noktada sismik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Gerçek yeraltı modelinin oluşturulmasına yönelik heyelan alt kotunda gerçekleştirilen 1 adet mekanik zemin sondajı ve jeolojik saha gözlemleri jeofizik sonuçlar ile korele edilerek heyelan kütle hareketinin sebepleri tartışılmıştır.

## 2 Heyelan alanı tanıtımı ve genel jeoloji

Bu araştırmaya konu olan heyelan Sakarya ili Hendek ilçesi Çamlıca Mahallesi'nde meydana gelmiştir. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) batı uzanımında Marmara Bölgesi'nde yer alan çalışma alanı ve yakın çevresi, son yüz yıllık süreçte yüksek deprem aktivitesi ile dikkat çekmektedir Şekil 1(a). Bu sismik aktivite içerisinde yer alan Sakarya ili; Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun kuzeyi (İstanbul-Zonguldak Zonu), yakın çevresi (Ara Zon) ve güneyi (Sakarya Zonu) olmak üzere üç farklı jeolojik bölge ile incelenmektedir. Heyelanın meydana geldiği Çamlıca Mahallesi ve yakın çevresi bu üç bölgeden biri olan Ara Zon üzerinde yer almaktadır. Şekil 1(b)'de çalışma alanı ve yakın çevresinin genel jeoloji haritası verilmiştir.



Şekil 1(a): Batı Marmara Bölgesi'nin depremselliği (depremlerin dış merkez dağılımları Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü'nden (KOERİ), faylar ise Emre ve diğ. [9]'den düzenlenmiştir). (b): Çalışma alanı ve çevresinin genel jeolojisi (Sarıaslan ve diğ. [10]'dan düzenlenmiştir)

Figure 1(a): The seismicity of the West Marmara region (the epicentral distributions of the earthquakes were taken from Kandilli Observatory Earthquake Research Institute (KOERİ), and the faults were modified from Emre et al. [9]). (b): The general geology of the study area and its vicinity (modified from Sarıaslan et al. [10]).

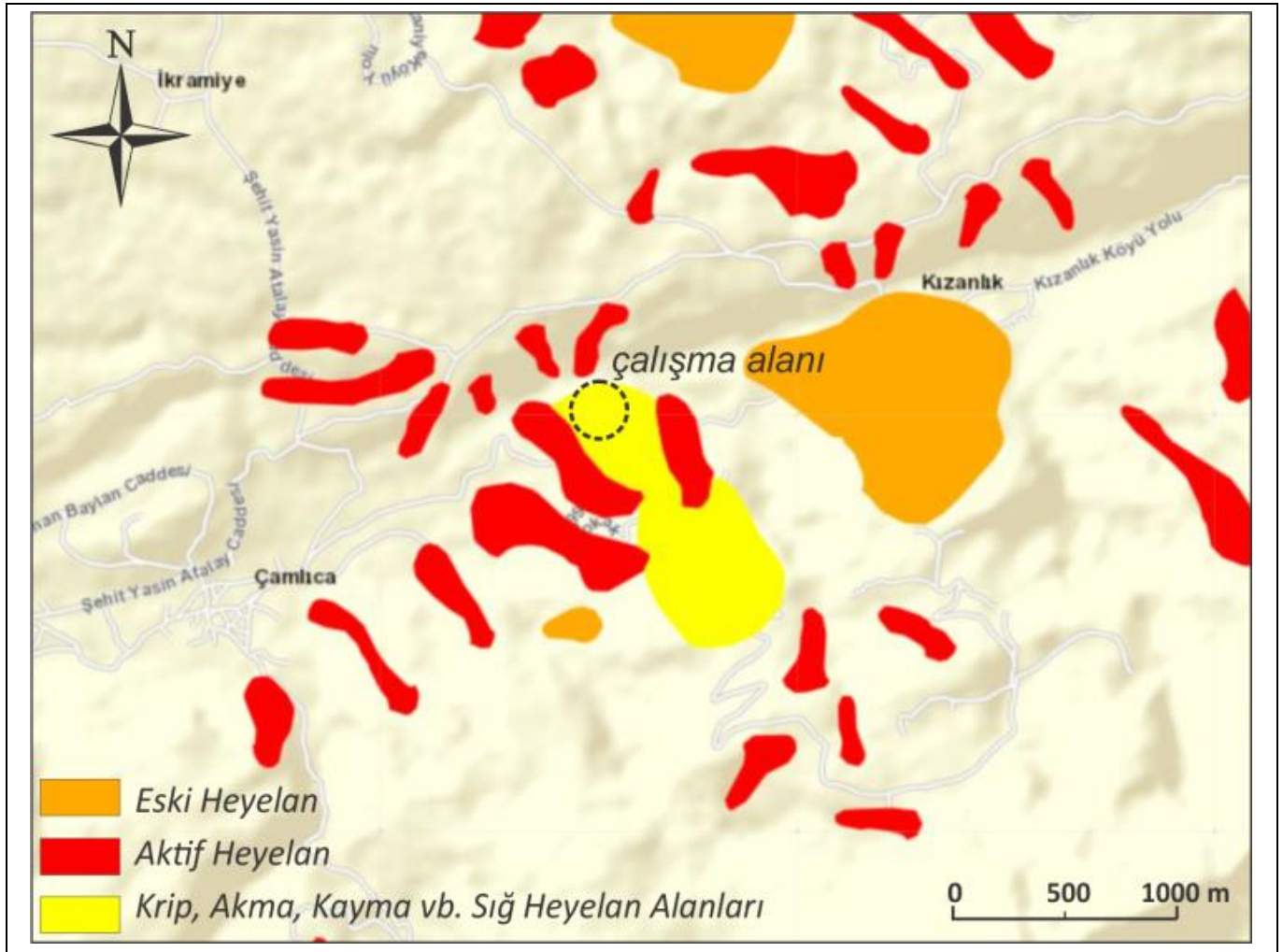
Harita görülen jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru Üst Kretase-Alt Eosen yaşlı Abant Formasyonu (KTab), Alt-Orta Eosen yaşlı Çaycuma Formasyonu (Teç) ve Yığılca Formasyonu (Tey), Pliyosen yaşlı Örencik Formasyonu (Tplö) ve Kuvaterner alüvyonlarıdır (Qa) [10]. Heyelanın meydana geldiği birim; piroklastik kayalar ile andezit ve bazalt içeren Yığılca Formasyonudur. Kumtaşı, çamurtaşı, marn, nummulitli kireçtaşı, piroklastik ve andezit-bazalt gibi volkanik kayalardan oluşan bu birim üzerinde iklimin de etkisiyle yaygın ve kalın killi bir zemin örtüsü mevcuttur [10]. Bu durum, formasyonu kütle hareketlerine karşı hassas hale getirmiştir.

Çalışma alanı; Sakarya il afet projesi [6] kapsamında çok yüksek heyelan tehlikesi barındıran zon içerisinde yer almaktadır ve bu durum Şekil 2'de verilen MTA heyelan envanteri haritasından da açık bir şekilde görülmektedir [22].

Çalışma kapsamında hazırlanan 1/1000 ölçekli mühendislik jeoloji haritasında (Şekil 3), ana heyelan düzlemi ve bu düzlemin batı kenarında yoğunlaşan tali heyelan izleri kütle hareketi aktivitesi yoğunluğunu göstermektedir. Heyelan alanında eğim yaklaşık %25 civarında iken daha yüksek

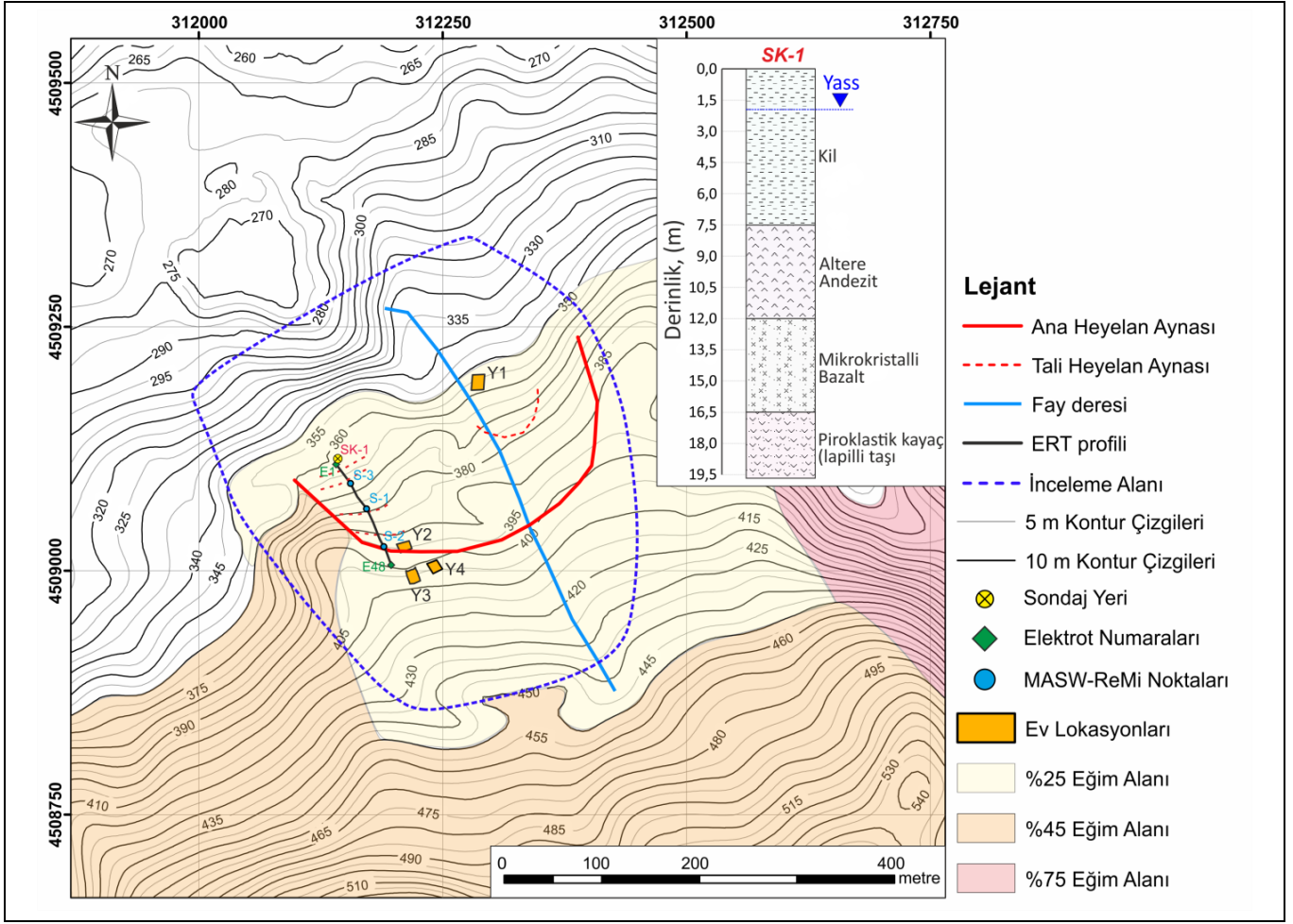
kotlardaki eski heyelan düzlemlerinin gözlemlendiği lokasyonlarda %45-75 arasında değişmektedir. Yaklaşık 140 m uzunluğunda bir alanı etkileyen heyelanın üst ve alt kotu arasındaki yükseklik farkı ise yaklaşık 36 m'dir.

Jeofizik çalışma öncesi heyelan alanının litolojisi ve yer altı su seviyesi bilgisinin elde edilebilmesi için jeomorfolojik koşulların uygun olduğu heyelan alt kotunda 1 adet mekanik zemin sondajı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Bu mekanik sondaja göre yüzeyde 7.5 m'lik kalın bir killi toprak örtüsü yer almaktadır. Yüzeye yakın derinliklerde atmosferik etkilere daha fazla maruz kalan çimentolaşmamış bu killer kayma yüzeyi boyunca kütle hareketini meydana getiren birimi oluşturmaktadır. Bu seviyenin altında 7.5-12 m arasında altere ve parçalı andezit, 12-16.5 m arasında mikrokristalli bazalt ve 16.5 m'den sonra ise ayrılmış piroklastik kayacık (lapilli taşı) bulunmaktadır (Şekil 3). Yer altı su seviyesi ise yüzeye yakın, yaklaşık 1.5 m derinliktedir. Öte yandan, heyelan alanının orijinal yüzey stabilitesi, ormanlık alanın kesilerek fındıklık yapılması ve yeni evlerin heyelanın üst tarafına inşa edilmesi gibi insan aktiviteleri sebebiyle bozulmuştur.



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın çevresine ait heyelan envanteri haritası (Duman ve diğ. [22]'den düzenlenmiştir).

Figure 2. Landslide inventory map of the study area and its surroundings (modified from Duman et al. [22]).



Şekil 3. Çalışma alanının mühendislik jeolojisi haritası.

Figure 3. Engineering geology map of the study area.

### 3 Materyal ve yöntem

Yeraltı yapısının yüzeyden gözlemlenemediği ve mekanik sondajların gerçekleştirilme imkanının kısıtlı olduğu alanlarda tabakaların konumları, kayma yüzeyinin derinliği-sınırı ve yeraltı suyu içeriğinin tespit edilmesi olası bir heyelana çözüm üretmek için en gerekli bilgilerdir. Jeolojik olarak heyelana oluşturan tabakalar ve ortamlar ERT ve sismik yöntemler ile modellenebilir ve ilişkilendirilebilir. Böylelikle, iki-boyutlu (2-B) ERT ve sismik yöntemler ile heyelan geometrisi elde edilebilir. Bu bağlamda ERT ve sismik yöntemler heyelan alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır [23]-[26].

Bu çalışmada, kütle hareketi ve bu hareket neticesinde tali heyelan aynalarının meydana geldiği, arazi koşullarının jeofizik çalışmaya elverişli olduğu ana heyelan düzleminin batı kenarında ERT ve sismik yöntemlerden çok kanallı yüzey dalgaları analizi (MASW ve ReMi) yöntemleri eş zamanlı kullanılmıştır. Jeofizik ölçümler bu hareketi modelleyebilmek adına Şekil 4'te verildiği gibi gerçekleştirilmiştir.

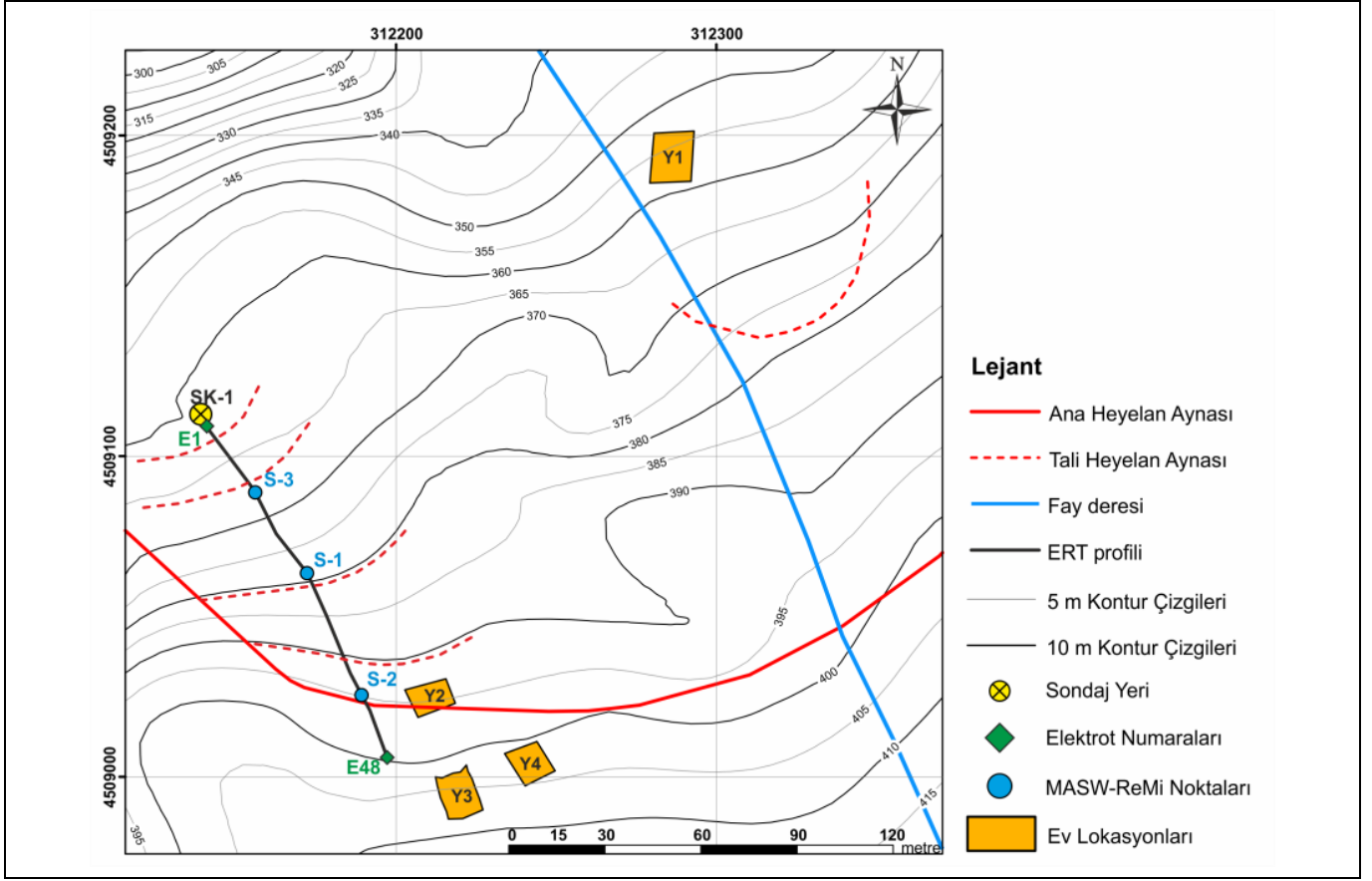
#### 3.1 Yöntem

##### 3.1.1 Elektrik rezistivite tomografi (ERT)

Elektrik öz direnç yöntemi, kayma yüzeyi boyunca kayan birim kalınlığını, derinliğini, heyelanın iç yapısını, suya doygun

bölgeyi ve kırılma (çatlak) sistemlerini tespit etmedeki başarısı nedeniyle heyelan incelemesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [8],[14],[25]. Bu tür jeolojik sistemlerin heyelan alanlarında oluşturacağı öz direnç kontrastı 2-B ERT kesitleri ile elde edilebilir [27],[28].

Çalışmada ERT hattının doğrultusu ve uzunluğunun seçimi için arazide yapılan gözlemlerde, alandaki yumuşak malzemenin eğimli topografyada vadiye doğru alt kotlara kayma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle heyelan alanı içinde birçok tali aynalar meydana gelmiştir. Elektrot açılımı da kayma yüzeyini tespit edebilmek amacıyla bu tali aynaları dik kesecek şekilde belirlenmiştir (Şekil 4). ERT verisi, elektrot aralığı 3 m olan 141 m uzunluğundaki 48 kanallı bir sistem ile (KB-GD doğrultulu)  $n=4$  seviyesine kadar Dipol-dipol dizilimi kullanılarak toplanmıştır. Toplanan bu veriden düzgünlük-kısıtlamalı (smoothness-constrained) en küçük kareler algoritmasını [29] yüzey topografya etkisini model ağına dahil eden sonlu-elemanlar tekniği ile kullanan RES2DINV (version 3.59.116) ters çözüm programı yardımıyla 2-B yer elektrik kesiti elde edilmiştir. Veri toplama aşamasında her bir elektrot koordinatındaki kot değerleri ölçülmüş ve 2-B ERT kesiti bu kot değerlerine göre topoğrafik düzlemler olarak görselleştirilmiştir. En büyük 7 yinleme sonucunda elde edilen kesitlerin ters çözümündeki hata değeri (RMS) 2.2'dir.



Şekil 4. Heyelan alanında elektrik ve sismik ölçüm lokasyonları

Figure 4. Electrical and seismic measurement locations in the landslide area.

### 3.1.2 Çok kanallı yüzey dalgaları analizi

Sismik yöntemler zeminin yapısal özelliklerine karşı çok duyarlı olup kayma düzleminin ve kayan kütlelerin tespitinde oldukça etkilidir. Bu çalışmada hem derin hem de sığ tabakalaşmayı detaylı bir şekilde görüntüleyebilmek adına aktif kaynaklı MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Wave) ve pasif kaynaklı ReMi yöntemleri (Refraction-Microtremor) kullanılmıştır. Bu yöntemler heyelanlarda akan kütle hareketinin dinamik özelliklerini yüksek çözünürlüklü belirlemede oldukça etkilidir [18]. Her iki tekniğin temel hedefi faz hızının frekansla değiştiği Rayleigh dalgası dispersiyonunu elde etmek ve ters çözüm tekniği ile bunu kesme dalgası hızı ( $V_s$ ) ve tabaka derinliğine dönüştürmektir [30]. MASW yönteminde dispersif yüzey dalgalarından frekans-dalgı sayısı (f-k) analizi ile dispersiyon eğrileri üretilir [30]. ReMi yönteminde ise, x-t ortamındaki veriler tau-p dönüşümü ile yavaşlık-frekans alanına (p-f) dönüştürerek Rayleigh dalgaları diğer dalgalardan ayrılır ve dispersiyon eğrisi elde edilir [31]. Bu yöntemler çoğunlukla saha araştırmaları ve zemin karakterizasyonu çalışmalarında [32]-[34] kullanılmakla birlikte heyelan gibi mühendislik problemlerinin çözülmesine de olanak sağlamaktadır [17],[35],[36].

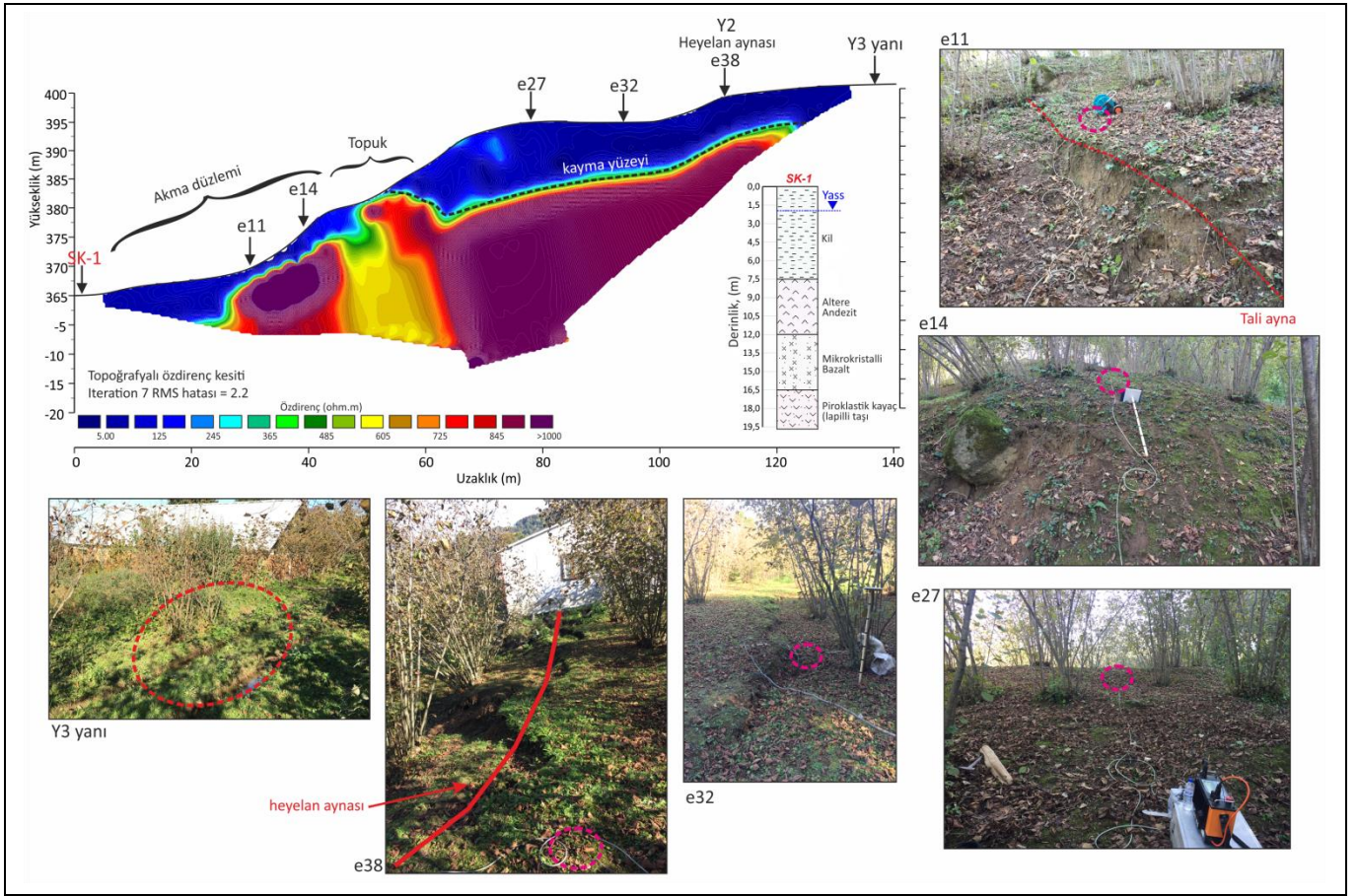
Sismik veri kazanımında veriler 4.5 Hz jeofonlar ve DoReMi marka 24 kanallı sismografla toplanmıştır. Park ve diğ. [37], Louie [31] tarafından önerildiği şekilde muhtemel heyelan yüzeyini tespit edebilme adına düşey yönde çözünürlüğünü arttırmak amacı ile jeofonlar arası mesafe 2 m, ofset 8 m ve

toplam profil boyu ise 54 m olarak belirlenmiştir. ERT çalışmasında elde edilen sonuçları sıklık yönünden irdelenebilir ve yöntemsel olarak ters çözüm sırasında ERT kesitinin her iki yanında meydana gelen veri kaybından kaynaklanan eksikliği giderebilmek amacı ile ERT profilinin üzerinde 3 noktada MASW ve ReMi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Zeng ve diğ. [38] tarafından ifade edildiği üzere arazi eğimi %10'dan fazla ise dispersiyon eğrilerinin modellenmesinde statik düzeltme yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda ölçümler kot farkı bulunmayacak şekilde eğime dik açılımlar ile toplanmıştır. Elde edilen verilerin bütünleşik (aktif+pasif) çözümlenmesinde açık kaynak MASWaves (1.07.2017) programı [39] kullanılmıştır.

## 4 Araştırma bulguları

Çalışma alanında gerçekleştirilen ERT ve MASW-ReMi ölçümleri ile heyelan içyapısı jeofizik anlamda karakterize edilmiştir. ERT-1 profiline ait ters çözüm sonucu öz direnç değerleri topografya bilgileriyle ilişkilendirilerek Şekil 5'te verilmiştir.

ERT-1 profilinde, profil başlangıcı ile sonu arasındaki kot farkı 36 m'dir. Bu kesit üzerinde, arazi koşullarının mekanik sondaja elverişli olduğu ve ERT profilinin başlangıç noktası altındaki yolda heyelan içyapısının belirlenmesinde kullanılmak üzere gerçekleştirilen mekanik sondaja ait litoloji bilgisi de verilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. ERT profilinin 2-B ters çözüm sonucu ve profil üzerindeki saha gözlemleri.

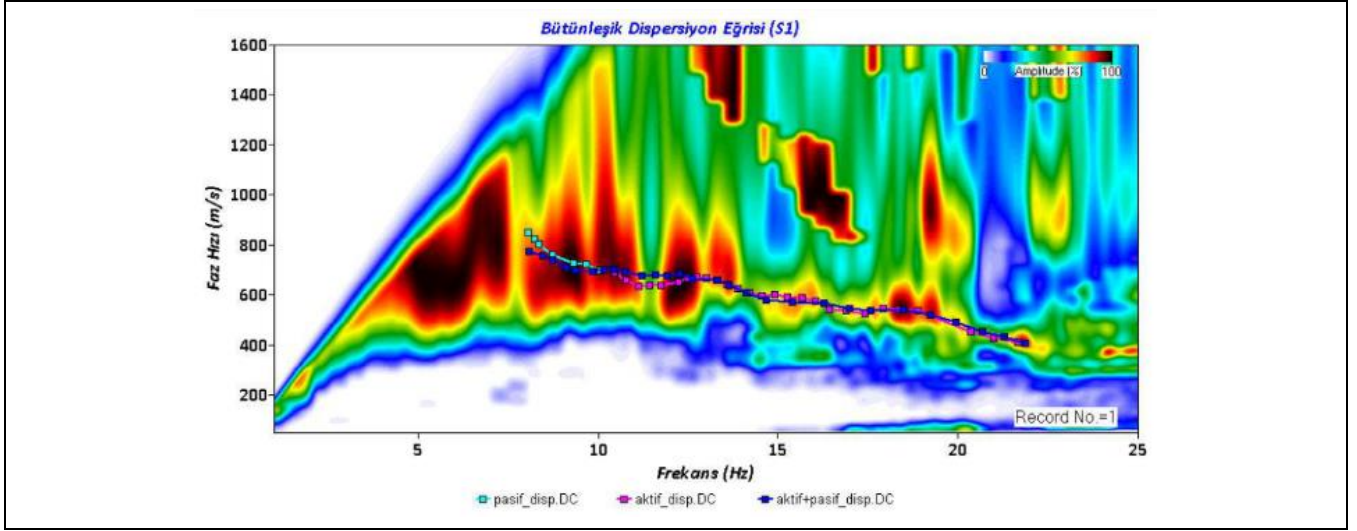
Figure 5. 2-D inversion result of the ERT profile and field observations on the profile.

ERT-1 ölçümüne ait 2-B özdirenç kesitinde elektrik özdirenç değerleri 5-2000 ohm.m arasında değişmektedir (Şekil 5). Bu kesitte, özdirenç kontrastı eğim aşağı yönde heyelan kayma yüzeyi ile sınırlanmış 2 birime işaret etmektedir. Bunlardan birincisi, 5-190 ohm.m arasında değişmektedir. Bu kısım sondaj litolojisi dikkate alındığında kil ve bozunmuş andezit parçalarından oluşan kayan dolgu malzeme olarak yorumlanmıştır. Birim içinde ıslak killer düşük özdirenç, özdirenç kile göre daha yüksek olanlar ise killeşmeye başlamış andezitlerdir. Sondaj verisinden de anlaşılacağı gibi gevşek ve bozmuş bu birim, yüzey sularından dolayı suya doygun halde daha iletkenidir. Şekil 5'te verilen Y3 binası çevresindeki yüzey suları bu doygunluğun açık bir göstergesidir.

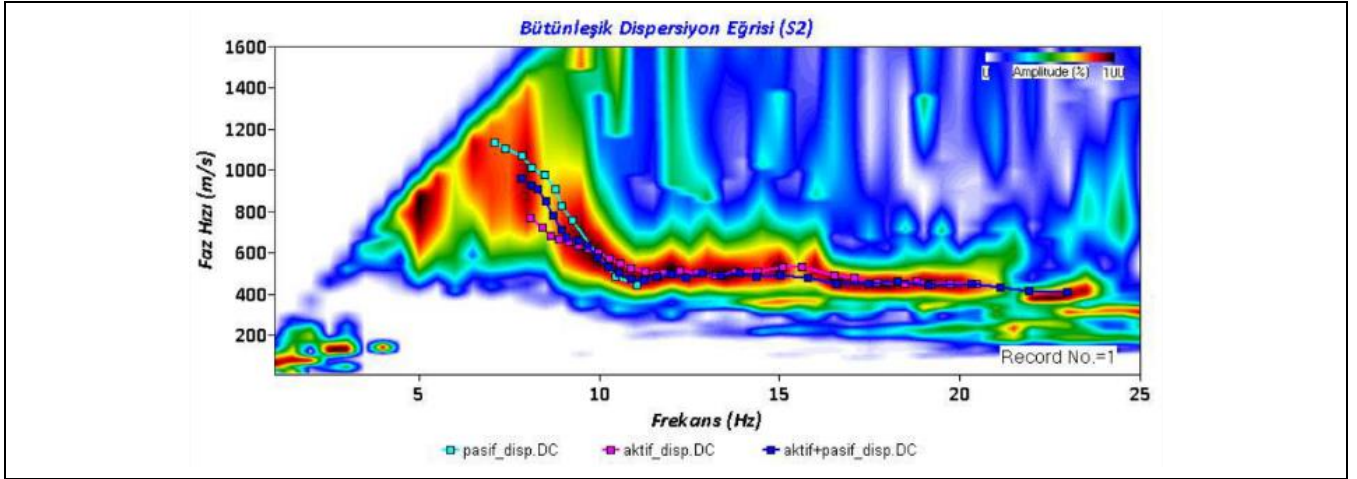
Kayma yüzeyinin altında özdirenç 190-2000 ohm.m arasında değişen değerler anakaya durumundaki sıkı bazalt ve andezit olarak tanımlanmıştır. Bu birimin gözenekli olmayıp masif halde bulunması sonucunda, yüzey sularını geçirmeyecek ve dolayısıyla yağışlı mevsimlerde suların birikmesine sebep olarak kaymayı daha kolay bir hale getirecektir. 2-B kesitin yaklaşık 50'nci metresinde bulunan anakaya içindeki kısmi özdirenç düşüşü süreksizliklerin yoğunlaştığı bölgeyi göstermektedir. Profil boyunca, yukarıdan aşağı doğru eğimin azaldığı, serimdeki 60'ncü metre civarında heyelan topuğu olarak yorumlanan bölge tespit edilmiştir (Şekil 5). Heyelan alanlarında topuk kısmının belirlenebilmesi mukavemet alanlarını ve önlem alanlarını tespit açısından önemlidir.

Heyelanın dinamik yapısını sıklık yönünden irdeleyebilmek adına aktif ve pasif kaynaklı sismik yöntemler ile elde edilen saha verilerinden Şekil 6'daki gibi dispersiyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu dispersiyon eğrilerinin ters çözümü ile 1-B derinlik-Vs değişimi elde edilmiştir (Şekil 7). Aktif ve pasif kaynaklı sismik yöntemlerin bütünlük kullanılmaları ile 27 m derinlik seviyesine kadar modelleme yapılabilmektedir. Sismik kesitlerde genel çerçevede Vs hızları 250-1180 m/s aralığında değişim sergilemektedir. Şekil 7'de verilen ERT profilin üst kotundan alt kota doğru olarak sıralandığında ölçümler S-2, S-1, S-3 şeklindedir. Bu bağlamda S-2 derinlik kesitinde ilk 6 metrelik kısımda Vs yaklaşık 300-400 m/sn. civarındadır. Sondaj verisi dikkate alındığında bu kısım kil içerikli dolguya karşılık gelmektedir. Bu seviyeden itibaren 16 m boyunca yaklaşık 22 m derinlik seviyesine kadar ortalama 500 m/sn. kayma dalgası hızına sahip tabakalanma söz konusudur. Kısmen yüksek hızları içeren bu seviye kırıklı çatlaklı bazalt ve andezit olarak değerlendirilmiştir. 22 m derinlik seviyesinden itibaren, yaklaşık 5 metre kalınlığındaki kayma dalgası hızı 1180 m/sn. olan birim ise kısmen daha sıkı ve daha az bozunmuş bazalt-andezit ile tanımlanmıştır.

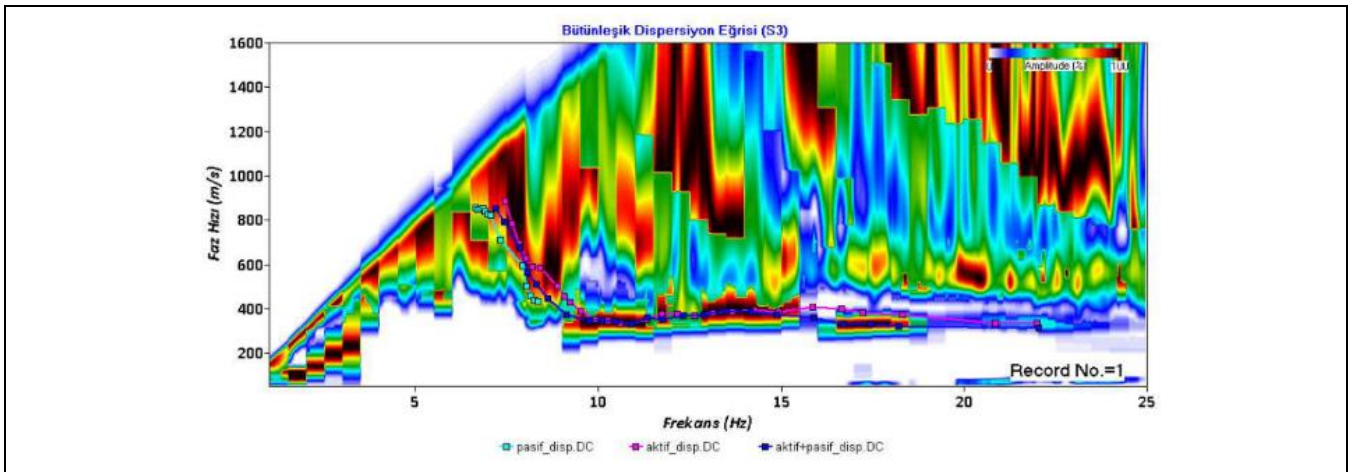
Eğim aşağı 2 No.lu sismik ölçüm noktası olan S-1'de (Şekil 7) yüzeyden itibaren ilk 9 m'de ortalama 380 m/s hıza sahip tabakalanma söz konusudur. Kil dolgu olarak tanımlanan bu kısımda hızların göreceli olarak yükselmesi, sondaj logundaki kil içerisinde gözlemlenen henüz ayrılmamış andezit bloklarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



(a)



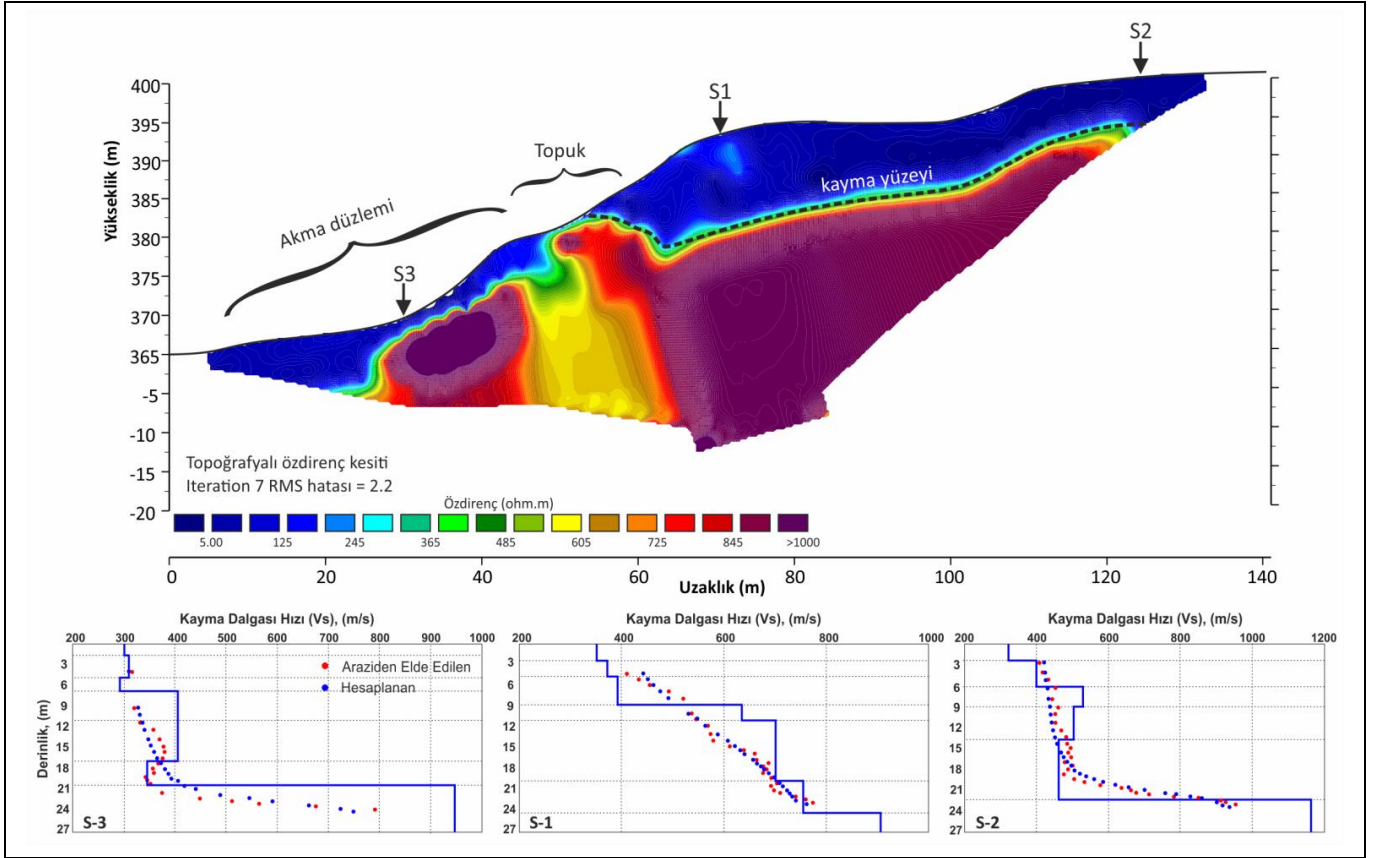
(b)



(c)

Şekil 6. Aktif ve pasif kaynaklı yüzey dalgaları analizi bütünleşik dispersiyon eğrileri (pembe eğri: MASW, açık mavi eğri: ReMi, mavi: MASW+ReMi). (a): S1. (b): S2. (c): S3.

Figure 6. Integrated active and passive source surface waves analysis dispersion curves (pink curve: MASW, light blue curve: ReMi, blue: MASW+ReMi). (a): S1. (b): S2. (c): S3.



Şekil 7. 1-B sismik derinlik-hız profilleri ve bu profillerin ERT kesitindeki lokasyonları.

Figure 7. 1-D seismic depth-velocity profiles and their locations in the ERT section.

Bu derinlik seviyesinden itibaren 24 m derinlik seviyesine kadar ortalama 700 m/sn. hız değerine sahip 15 m'lik bir tabakalanma yer almaktadır. Bu tabaka seviyesi S-2'de verilen kırıklı çatlaklı bazalt-andezit birimlerinin devamı olarak yorumlanmıştır. Kesitteki yarı sonsuz tabakalanmaya ait hız değeri ise 900 m/sn. olarak tespit edilmiştir. Hızlardaki göreceli artış sertliğin artmasına işaret etmektedir.

Son sismik profil olan S-3'te sığ yüzeyde ortalama 300 m/sn. kayma dalgası hızına sahip 7 m kalınlığa sahip birim kil dolgu olarak yorumlanmıştır. Bu derinlik seviyesinden 20 m derinlik seviyesine kadar ortalama 400 m/sn. kayma dalgası hızı ile 10 m'lik bir tabakalanma tespit edilmiştir. Sondaj litolojisi ile benzer derinlik seviyesine kadar izlenen bu birim S-2 ve S-1 de dolgu malzeme altında yer alan kırıklı çatlaklı andezit-bazaltın devamı olarak nitelendirilmiştir. Hızlardaki göreceli düşüş kırıklık ve çatlaklık oranının arttığına işaret etmektedir ki sondaj litolojisi de bu yorumu desteklemektedir. Bu kesitte 17-21 m aralığında ise bir önceki seviyeden göreceli düşük ortalama 350 m/sn. hıza sahip tabakalanma tespit edilmiştir. Sondaj kesitinde de benzer seviyelerde gözlemlenen lapilli türü ileri derecede ayrılmış ve gözenekli piroklastik kayaç tabakasının hızlardaki azalmaya neden olduğu düşünülmektedir. 21 m seviyesinden itibaren ise yarı sonsuz tabakalanmanın hızı 950 m/sn. olarak belirlenmiştir.

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, ERT, MASW ve mekanik sondaj tekniklerinin tümleşik olarak kullanılması ile güncel bir heyelanın modellenmesine odaklanmıştır. Bu modellemede jeolojik saha

gözlemleri, ERT ve sismik yöntemler (MASW ve ReMi) bütünleşik olarak kullanılmıştır. Jeolojik saha araştırmasında büyük eğim değerlerine sahip üst kotlarda heyelan aynalarının atmosferik etkiler ile bozunarak örtüldüğü gözlemlenmiştir. Güncel heyelan alanında ana ve tali heyelan aynaları benzer durumun olmaması kütle hareketinin ilerleyici türde gerçekleştiğini göstermiştir. Jeofizik kesitlerde kayma yüzeyinin altında yer alan yüksek özdirenç ve hızlı birimin, sondaj litolojisinde bazalt-andezit ve piroklastik kayalardan oluştuğu anlaşılmıştır. Bu ana kaya üzerinde hareket eden kütlelerin kalınlığı yüksek kotlarda, heyelan aynası civarında 5-10 m aralığında değişirken; topuk kısmında ise bu kütlelerin yaklaşık 2 m civarında olduğu belirlenmiştir. Topuktan aşağı kotlarda, akma ve ayrılma düzlemi olarak tanımlanan kısımda dolgu malzeme kalınlığı 6-9 m tespit edilmiştir.

Sonuç olarak güncel heyelanda kütle hareketinin, doğal sebeplerden (jeoloji, eğim, bakı, yükseklik, kalın kil varlığı, iklim şartları) ve yanlış arazi kullanımından (orman arazinin kesilip fındık bahçesi haline getirilmesi ve kütle hareketini tetikleyecek yapılaşma) kaynaklandığı anlaşılmıştır. Çalışma sonuçları, bu tür kütle hareketinden meydana gelen problemlerinin çözümünde yorum belirsizliğini gidererek gerçeğe yakın yeraltı heyelan modellerinin elde edilmesinde jeofizik yöntemlerin tümleşik ve karşılaştırmalı olarak kullanılmasının etkili olduğunu bir kez daha göstermiştir. Ayrıca bu çalışma, benzer sorunlarla karşılaşacak araştırmacılara afet risk yönetimi ve değerlendirmesi konusunda katkı sağlayacaktır.



## 6 Conclusions

This study focused on modeling an active landslide using ERT, MASW, and mechanical drilling techniques. In this modeling, geological field observations, ERT, and seismic methods (MASW and ReMi) were integrated. In the geological field survey, it has been observed that the landslide scarps at the upper elevations with large slope values are distorted by atmospheric effects and covered. The absence of a similar situation in the main and minor landslide scarps in the current landslide area showed that the mass movement occurred in a progressive type. It was understood that the high resistivity and fast unit in the geophysical sections, located below the slip surface, corresponded with basalt-andesite and lapilli stone in borehole log. While the thickness of the moving mass (sliding material) on this bedrock varies between 5-10 meters around the landslide scarp at high elevations, it has been determined that this thickness is around 2 meters in the slip surface toe part. The thickness of the sliding material below the toe at the lower elevations, in part defined as the accumulation zone, was determined as 6-9 m.

As a result, it has been understood that the mass movement in the current landslide is induced by natural reasons (geology, slope, aspect, elevation, thick clay presence, climatic conditions) and incorrect land use (cutting the forest area for hazelnut cultivation and the buildings above the landslide area that will trigger the mass movement). The study results showed that the integrated and comparative use of geophysical methods effectively obtains realistic subsurface models by removing the interpretation uncertainty. In addition, this study will contribute to researchers who will encounter similar problems in disaster risk management and assessment.

## 7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Hasan KARAASLAN ve Ali SILAHTAR fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, veri kazanımı, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## 8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

## 9 Kaynaklar

- [1] Peruccacci S, Brunetti MT, Luciani S, Vennari C, Guzzetti F. "Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy". *Geomorphology*, 139, 79-90, 2012.
- [2] Akpan AE, Ilori AO, Essien NU. "Geophysical investigation of Obot Ekpo Landslide site, Cross River State, Nigeria". *Journal of African Earth Sciences*, 109, 154-167, 2015.
- [3] Rezaei S, Shooshpasha I, Rezaei H. "Reconstruction of landslide model from ERT, geotechnical, and field data, Nargeschal landslide, Iran". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3223-3237, 2019.
- [4] Coruk Ö, Kavak A. "Causes of Bursa Yıldırım district mollaarap landslide and improvement studies". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(8), 1408-1412, 2020.
- [5] Guerriero L, Revellino P, Luongo A, Focareta M, Grelle G, Guadagno FM. "The mount pizzuto earth flow: deformational pattern and recent thrusting evolution". *Journal of Maps*, 12(5), 1187-1194, 2016.
- [6] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. "Provincial Disaster Risk Reduction Plan of Sakarya". AFAD, Ankara, Türkiye, 2022. [https://sakarya.afad.gov.tr/kurumlar/sakarya.afad/Dokumanlar/Sakarya-IRAP-plani-onaylanmis-1\\_.pdf](https://sakarya.afad.gov.tr/kurumlar/sakarya.afad/Dokumanlar/Sakarya-IRAP-plani-onaylanmis-1_.pdf)
- [7] Cihangir ME. "Kayma tipi heyelanların farklı duyarlılık modellerinde kombinasyonu: Sakarya Havzası Yukarı Çığı Örneği". *Türk Coğrafya Dergisi*, 80, 21-38, 2022.
- [8] Su L, Xu X, Geng X, Liang S. "An integrated geophysical approach for investigating hydro-geological characteristics of a debris landslide in the Wenchuan earthquake area". *Engineering Geology*, 219, 52-63, 2017.
- [9] Emre Ö, Duman TY, Özalp S, Şaroğlu F, Olgun Ş, Elmacı H, Çan T. "Active fault database of Turkey". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229-3275, 2018.
- [10] Sariaslan M, Yurdakul ME, Osman ÇR, Keçer M, Basa F, Şentürk K. "Sakarya İlinin çevre jeolojisi ve doğal kaynakları". MTA Raporu, Ankara, Türkiye, 10195, 1998.
- [11] Mezerreg NEH, Kessasra F, Bouftouha Y, Bouabdallah H, Bollot N, Baghdad A, Bougdal R. "Integrated geotechnical and geophysical investigations in a landslide site at Jijel, Algeria". *Journal of African Earth Sciences*, 160, 1-12, 2019.
- [12] Kahyaoglu MR, İmançlı G. "Stabilization of a failed slope with piled structures". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(1), 94-99, 2008.
- [13] Hibert C, Grandjean G, Bitri A, Travalletti J, Malet JP. "Characterizing landslides through geophysical data fusion: Example of the La Valette landslide (France)". *Engineering Geology*, 128, 23-29, 2012.
- [14] Imani P, Tian G, Hadiloo S, El-Raouf AA. "Application of combined electrical resistivity tomography (ERT) and seismic refraction tomography (SRT) methods to investigate Xiaoshan District landslide site: Hangzhou, China". *Journal of Applied Geophysics*, 184, 1-13, 2021.
- [15] Devi A, Israil M, Anbalagan R, Gupta PK. "Subsurface soil characterization using geoelectrical and geotechnical investigations at a bridge site in Uttarakhand Himalayan region". *Journal of Applied Geophysics*, 144, 78-85, 2017.
- [16] Göktürkler G, Balkaya Ç, Erhan Z. "Geophysical investigation of a landslide: The Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey)". *Journal of Applied Geophysics*, 65(2), 84-96, 2008.
- [17] Yalcinkaya E, Alp H, Ozel O, Gorgun E, Martino S, Lenti L, Bourdeau, Bigarre p, Coccia S. "Near-surface geophysical methods for investigating the Buyukcekmece landslide in Istanbul, Turkey". *Journal of Applied Geophysics*, 134, 23-35, 2016.
- [18] Perrone A, Canora F, Calamita G, Bellonova J, Serlenga V, Panabianco S, Trangi N, Piscitelli S, Vignola L, Doglioni A, Simeone V, Sdao F, Lapenna V. "A multidisciplinary approach for landslide residual risk assessment: The Pomarico landslide (Basilicata Region, Southern Italy) case study". *Landslides*, 18(1), 353-365, 2021.
- [19] Hussain Y, Hamza O, Cárdenas-Soto M, Borges WR, Dou J, Rebolledo JFR, Prado RL. "Characterization of Sobradinho landslide in fluvial valley using MASW and ERT methods". *REM-International Engineering Journal*, 73(4), 487-497, 2020.

- [20] Chambers JE, Wilkinson PB, Kuras O, Ford JR, Gunn DA, Meldrum PI, Pennington CVL, Weller AL, Hobbs PRN, Ogilvy RD. "Three-dimensional geophysical anatomy of an active landslide in Lias Group mudrocks, Cleveland Basin, UK". *Geomorphology*, 125, 472-484, 2011.
- [21] Capizzi P, Martorana R. "Integration of constrained electrical and seismic tomographies to study the landslide affecting the cathedral of Agrigento". *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(4), 1-16, 2014.
- [22] Duman TY, Çan T, Emre Ö. "1/1.500.000 ölçekli Türkiye Heyelan Envanteri Haritası". Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayınlar Serisi, 27, 2011.
- [23] Uyanık O, Çathıoğlu B. "Determination of landslide geometry by using electrical resistivity and seismic refraction methods". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(3), 22-29, 2014.
- [24] Yılmaz S, Narman C. "2-D electrical resistivity imaging for investigating an active landslide along a ridgeway in Burdur region, southern Turkey". *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5), 3343-3349, 2015.
- [25] Samodra G, Ramadhan MF, Sartohadi J, Setiawan MA, Christanto N, Sukmawijaya A. "Characterization of displacement and internal structure of landslides from multitemporal UAV and ERT imaging". *Landslides*, 17(10), 2455-2468, 2020.
- [26] Petronio L, Boaga J, Cassiani G. "Characterization of the Vajont landslide (North-Eastern Italy) by means of reflection and surface wave seismics". *Journal of Applied Geophysics*, 128, 58-67, 2016.
- [27] Perrone A, Lapenna V, Piscitelli S. "Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review". *Earth-Science Reviews*, 135, 65-82, 2014.
- [28] Karaaslan H, Karavul C. "Usefulness of electrical and magnetic methods in finding buried structure of the Alabanda Ancient Cistern in Çine Town, Aydın City, Turkey". *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8), 1-11, 2018.
- [29] Loke MH, Barker RD. "Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1". *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131-152, 1996.
- [30] Xia J, Miller RD, Park CB. "Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves". *Geophysics*, 64(3), 691-700, 1999.
- [31] Louie JN. "Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347-364, 2001.
- [32] Garofalo F, Foti S, Hollender F, Bard PY, Cornou C, Cox BR, Ohrnberger M, Sicilia D, Asten M, Giulio GD, Forbriger T, Guillier B, Hayashi K, Martin A, Matsushima S, Mercierat D, Poggi V, Yamanaka H. "InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 222-240, 2016.
- [33] Silahtar A. "Evaluation of local soil conditions with 1D nonlinear site response analysis of Arifiye (Sakarya District), Turkey". *Natural Hazards*, 116, 727-751, 2023.
- [34] Kanbur MZ, Tokbaş İ. "Refraction microtremor (ReMiTM)-based investigation of the accumulation of Quaternary sediments on the northern edge of Isparta, Turkey". *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-10, 2020.
- [35] Harba P, Pilecki Z, Krawiec K. "Comparison of MASW and seismic interferometry with use of ambient noise for estimation of S-wave velocity field in landslide subsurface". *Acta Geophysica*, 67(6), 1875-1883, 2019.
- [36] Xu X, Su L, Zhang G, Zhu H. "Analysis on shear wave velocity structure of a gravel landslide based on dual-source surface wave method". *Landslides*, 14(3), 1127-1137, 2017.
- [37] Park CB, Miller RD, Miura H. "Optimum field parameters of an MASW survey". *Proceedings of the 6th SEG-J International Symposium (Extended Abstracts)*, Tokyo, Japan, 22-23 May 2002.
- [38] Zeng C, Xia J, Miller RD, Tsoflias GP, Wang Z. "Numerical investigation of MASW applications in presence of surface topography". *Journal of Applied Geophysics*, 84, 52-60, 2012.
- [39] Olafsdottir EA, Erlingsson S, Bessason B. "Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils". *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2), 217-233, 2018.