

Kentsel Heyelanlara Bir Örnek: Alkaya Heyelanı (Tekirdağ)

An Example to the Urban Landslides: Alkaya Landslide (Tekirdağ)

Emre Özşahin^{1*}, Mikayil Öztürk²

¹Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 59030, Tekirdağ/Türkiye.

²Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, 59030, Tekirdağ /Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Emre Özşahin
eozsahin@nku.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1530698

Yayın süreci

Geliş tarihi: 09.08.2024
Kabul tarihi: 04.09.2024
Basım tarihi: 26.09.2024

Özet

Bu çalışmada Tekirdağ kentinde 16.12.2023 tarihinde meydana gelmiş Alkaya heyelanının oluşum özelliklerinin ve mekanizmasının yerbilimsel perspektiften ele alınması amaçlanmıştır. Böylece Tekirdağ kentinde gelecekte meydana gelme olasılığı yüksek diğer kentsel heyelanların potansiyel lokasyon özelliklerinin tahminlerine yönelik çıkarımlarda bulunulması hedeflenmiştir. Çalışma verileri, arazi çalışmaları ve İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı Uzaktan Algılama (UA) tekniklerinden yararlanılarak üretilmiştir. Bunun için Phantom 4 marka otonom bir İHA sistemi kullanılarak kentsel heyelanın dijital hava fotoğrafları çekilmiştir. Elde edilen veriler bilgisayarda Pix4D yazılımıyla işlenmiş ve sahanın Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ve orto-foto görüntüleri üretilmiştir. Bu görüntüler uzman görüşüne bağlı doğrudan haritalama yöntemi kullanılarak amaç doğrultusunda analiz edilmiştir. Bunun yanında bir taraftan da heyelan oluşumunda etkili rol oynayan faktörlere ait diğer veriler toplanmıştır. Çalışmanın tematik haritaları, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımlarından biri olan ArcGIS Pro (Version 3.0.1) paket programı kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda Tekirdağ kentindeki Alkaya heyelanının hazırlayıcı (litoloji, eğim ve yerçekilleri) koşullar ve tetikleyici (yağış ve insan etkinlikleri) faktörlerin denetimi altında meydana geldiği anlaşılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, Tekirdağ kenti özelinde hazırlanacak heyelan risk değerlendirme çalışmalarına önemli katkılar sağlayabilir.

Anahtar kelimeler: Kentsel heyelan, İHA, UA, CBS, Tekirdağ

Abstract

In this study, it is aimed to investigate the formation features and mechanism of the Alkaya landslide that occurred on 16.12.2023 in Tekirdağ city from a geoscientific perspective. Thus, it is aimed to make inferences for the prediction of the potential location characteristics of other urban landslides that are likely to occur in Tekirdağ city in the future. The study data were generated by utilizing field studies and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Remote Sensing (RS) techniques. For this purpose, digital aerial photographs of the urban landslide were taken using an autonomous Phantom 4 UAV system. The data obtained were processed on the computer with Pix4D software and Digital Elevation Model (DEM) and ortho-photo images of the site were produced. These images were analyzed for the purpose by using direct mapping method based on expert opinion. In addition, other data on the factors that play an effective role in landslide formation were collected. The thematic maps of the study were prepared using ArcGIS Pro (Version 3.0.1) package Systems (GIS) software. As a result of the study, it was understood that the Alkaya landslide in Tekirdağ city occurred under the control of predisposing (lithology, slope and landforms) conditions and triggering (precipitation and human activities) factors. The results of this study can provide important contributions to landslide risk assessment studies to be prepared for Tekirdağ city.

Keywords: Urban landslide, UAV, RS, GIS, Tekirdağ

1. Giriş

Hızlı nüfus artışının bir sonucu olarak kentsel alanlarda zamansal süreçte mekânsal koşullar yetersiz kalmıştır. Bu durum çevresine doğru kontrolsüz bir şekilde büyüyen kentlerde altyapı sorunlarına yol açmasının yanında kentsel gelişim sürecinin temel bileşenlerinden birisi olarak kabul edilen jeomorfolojik özelliklerle ilişkili bazı problemlerin de ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Uludağ & Özşahin, 2023). Böylece kentler, jeomorfolojik kökenli doğal afetlerin daha yaygın bir şekilde yaşandığı, düzensiz ve sağlıksız mekânlara dönüşmüştür (Özşahin, 2015a).

Kentsel alanlarda doğal güzellikleri ve manzarası nedeniyle insanlar tarafından daha fazla tercih edilen alanların başında yamaçlar gelmektedir (Olshansky, 1996). Hatta yakın zamanda kentsel alanlardaki yamaçlarda kentsel genişlemenin daha fazla artacağı tahmin edilmektedir (Schuster & Highland, 2007). Ancak kentsel alanlardaki yamaçlarda görülen bu yerleşme baskısı, heyelan başta olmak üzere çeşitli türden kütle hareketlerinin daha fazla oluşma tehlikesinin de artmasına sebep olmaktadır. Nitekim kentsel alanlardaki heyelanların tüm kütle hareketleri arasında en tehdit edici jeomorfolojik tehlikelerden biri olduğu belirtilmiştir (Petley, 2009). Bundan dolayı kentsel alanlarda görülen heyelanlar ayrı bir fenomen olarak görülmüş ve kentsel heyelan (urban landslide) şeklinde tanımlanmıştır (Alexander, 1989).

Kentsel heyelanlar, özellikle konut ve/veya diğer kentsel büyüme alanlarında çoğu zaman doğal olarak meydana gelen süreçler (şiddetli yağışlar gibi) ve antropojenik faaliyetler tarafından tetiklenen çevresel ve sosyo-ekonomik kayıplara neden olan jeomorfolojik tehlikelerden birisidir (Özşahin, 2014a; 2015a). Ancak şaşırtıcı bir şekilde özellikle Türkiye'deki diğer ortamlarda meydana gelen heyelanlarla karşılaştırıldığında kentsel heyelanların araştırılmasına yönelik çok daha az çalışma yapılmıştır (Akıncı vd., 2010; 2015; Alptekin & Yakar, 2020; Çakıcı vd., 2012; Görüm & Nefeslioğlu, 2015; Nefeslioğlu vd., 2010;). Bu durum literatürde önemli bir boşluk oluşturmaktadır.

Son yıllarda, İnsansız Hava Araçları (İHA) tabanlı Uzaktan Algılama (UA) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknikleri kullanılarak kentsel heyelanların incelenmesine yönelik bilimsel çalışmaların sayısı artmıştır (Eker vd., 2018). Zira bu tür çalışmalar, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlük, yüksek verimlilik ve düşük maliyet gibi heyelan topografyası modellemesine katkıda bulunan avantajlara sahiptir (Yu vd., 2017). Dolayısıyla düşük maliyetli ve yüksek doğrulukta verimli ve hassas veri toplamak için yaygın bir şekilde kullanılan İHA tabanlı UA ve CBS teknikleri, kentsel heyelan araştırmalarının da ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir (Karantanellis vd., 2020; Turner vd., 2015).

Türkiye'de kentsel heyelanların görüldüğü yerlerden birisi de Tekirdağ kentidir (Özşahin, 2015b). Tekirdağ kentsel alanında doğal faktörlerin heyelana elverişli olduğu yerlerde antropojenik faaliyetler sonucunda meydana gelen fosil ve aktif heyelanlar görülmektedir (Kayran, 2006). Hatta buna dikkat çekmek için bazı bilimsel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Aral & Avcıyener, 2011; Özşahin, 2014a; 2015b). Ancak bu bilimsel çalışmaların sonuçları yeterince dikkate alınmamıştır. Zira 16.12.2023 tarihinde Tekirdağ kentsel alanındaki Alkaya mevkinde yeni bir kentsel heyelan meydana gelmiştir.

Bu çalışmada Tekirdağ kentinde 16.12.2023 tarihinde meydana gelmiş Alkaya heyelanının oluşum özelliklerinin ve mekanizmasının yerbilimsel perspektiften ele alınması amaçlanmıştır. Böylece Tekirdağ kentinde gelecekte meydana gelme olasılığı yüksek diğer kentsel heyelanların potansiyel yayılış alanlarının tahminine yönelik çıkarımlarda bulunulması hedeflenmiştir. Çalışma kentsel heyelanların incelenmesine yönelik küçük ölçekli bir perspektif model sunması bakımından önemlidir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. İnceleme Alanı

İnceleme alanı, Marmara Denizi'ne kıyısı olan koy şeklinde gelişmiş bir kıyının etrafında hilal biçiminde uzanan Tekirdağ kentidir (Şekil 1). İdari yönden Süleymanpaşa ilçesinin merkezini oluşturan Tekirdağ kenti 18 farklı kentsel mahalleden oluşmaktadır (Şekil 1). Kentsel heyelan, inceleme alanının Cumhuriyet Mahallesi'nin Süleymanpaşa Alkaya Paşa sahilinin kıyı gerisindeki yamaç arazide meydana gelmiştir (Şekil 1).

İnceleme alanında, Paleojen'den günümüze kadar çeşitli yaş ve türde jeolojik birimler bulunmaktadır. Ancak en geniş alanda heyelana karşı yüksek duyarlı bir özellik gösteren Orta-Üst Oligosen'e ait litolojik birimler yayılış göstermektedir. Danişmen Formasyonu olarak adlandırılan bu birimler, kıyı kesimlerde kıltaşı, kara yönüne doğru ilerledikçe sırasıyla kumtaşı ve silttaşı geçişinin görüldüğü litolojilerle karakterize edilmektedir (Kayran, 2006). İnceleme alanındaki kentsel heyelan ilgili jeolojik birimin yayılış alanında kalmaktadır. Bunun dışındaki diğer jeolojik birimler ise yaşlıdan gence doğru sırasıyla; Orta-Üst Miyosen'e ait killi-ince çakıllı kum ara seviyeli siltli kil (Ergene Formasyonu), Üst Miyosen-Pliyosen'e ait çakıl ve kil ara seviyeli siltli kil (Trakya Formasyonu), Kuvaterner'e ait alüvyon, Holosen'e ait kıyı çökelleri ve güncel dolgu yüzeyleridir (Kayran, 2006). Aktif tektonik etkinin yüksek olduğu inceleme alanı, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'nin hemen kuzeyinde konumlanmaktadır. Marmara Denizi içerisinden geçen bu zon, inceleme alanına 10-20 km uzaklıktadır.



Şekil 1. İnceleme alanının lokasyon haritası (ArcGIS Pro kullanılarak erişilebilen altlık haritalar ESRI tarafından sağlanmıştır)

İnceleme alanı Pliosen yaşlı aşınım yüzeyi şeklinde gelişmiş bir platoya karşılık gelmektedir. Flüvyal süreçlerin ve kıyı dinamiklerinin etkisiyle şekillenen bu plato, eğimi %10'un üzerinde olan yamaçlarla karakterize edilmektedir. İnceleme alanındaki kentsel heyelan da bu tür bir yamaçta meydana gelmiştir. Ayrıca inceleme alanı ve yakın çevresinde vadi, falez, denizel taraça, alüvyal vadi tabanı ve delta gibi farklı elemanter yerşekilleri de gözlenmektedir (Özşahin, 2014a).

Tekirdağ Meteoroloji İstasyonu tarafından tutulan uzun süreli (Ölçüm periyodu: 1940 - 2023) rasat kayıtlarına göre inceleme alanında yıllık ortalama sıcaklık 14,1 °C ve yıllık toplam yağış ise 580,0 mm'dir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024a). Buna göre Akdeniz ikliminin etki alanında yer almasına rağmen yaz kuraklığının Akdeniz iklimindeki kadar hissedilmediği inceleme alanında, Yarı Nemli Marmara (Geçiş) iklim koşulları hakimdir (Özşahin, 2015b).

İnceleme alanında farklı toprak özellikleri görülmektedir. Buna bağlı olarak katenasal ilişki içinde farklı toprak tipleri oluşmuştur. İnceleme alanında Toprak Taksonomisi sınıflandırmasına (U.S. Department of Agriculture, 1975) göre Entisol, Alfisol, İnceptisol ve Mollisol olmak üzere 4 toprak ordosu teşhis edilmiştir (Özşahin, 2015c). Ancak inceleme alanındaki kentsel heyelanın gerçekleştiği sahada İnceptisol ordosuna ait toprak türü bulunmaktadır. Gelişiminin başlangıç aşamasında olan bu toprak türü daha çok killi ana materyal üzerinde oluştuğu için heyelana duyarlı bir karakter göstermektedir (Özşahin, 2014b).

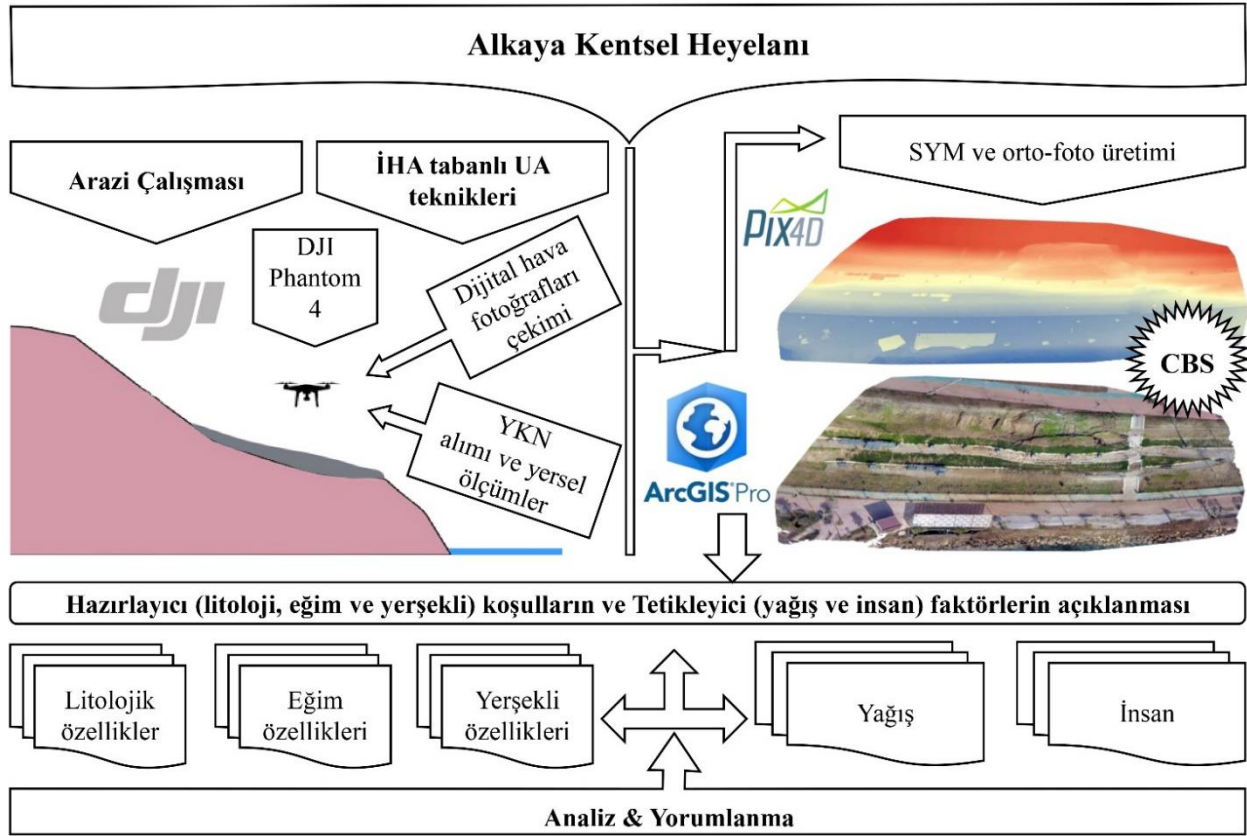
İnceleme alanı yoğun insan etkisine maruz kalan bir yerleşim alanına karşılık gelmektedir. Bu bakımdan çeşitli türden yerleşme faaliyetlerinin izlendiği bu sahada tarım, orman ve mera gibi arazi kullanım türleri de bulunmaktadır (ESRI, 2023). İnceleme alanındaki kentsel heyelan, kentsel yerleşim alanı içerisindeki rekreasyon faaliyetlerine yönelik düzenlenmiş bir sahada meydana gelmiştir.

Daha önce Tekirdağ kentinde, kentsel gelişime bağlı olarak (Özşahin, 2015d) jeomorfolojik bakımdan uygun alanlarda antropojenik faaliyetlerin tetiklenmesiyle heyelan oluşumlarının varlığı gözlemlenmiştir (Özşahin, 2014a).

Hatta meydana gelebilecek olası kentsel heyelanların oluşturacağı zararların azaltılmasına yönelik planlama çalışmalarında rehber olması için kentsel alanın heyelan duyarlılık haritası bile üretilmiştir (Özşahin, 2015b). Ancak karar vericiler tarafından Tekirdağ kentsel alanında meydana gelebilecek potansiyel heyelanların önlenmesine yönelik günümüze kadar hala kayda değer bir çalışma yapılmamıştır. Bu durum Alkaya heyelanının oluşumunu da hızlandırmıştır.

2.2. Yöntem

Bu çalışmanın verileri, arazi çalışmaları ve İHA tabanlı UA tekniklerinden yararlanılarak üretilmiştir (Şekil 2). Bunun için ilk aşamada sahaya intikal edilmiş ve inceleme alanının Phantom 4 marka (Araç numarası: TR-IHA0H5909136) otonom bir İHA sistemi kullanılarak dijital hava fotoğrafları çekilmiştir. Görüntülerin çekimi 10 m yükseklikten sırasıyla %80 enine ve %75 boyuna bindirme oranları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı arazi çalışmaları sırasında yerden ve havadan fotoğraf çekimleri yapılmış, 8 adet Yer Kontrol Noktası (YKN) alınmış ve heyelanın bazı yerlerinden derinlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İHA ile elde edilen görüntüler bilgisayarda Pix4D yazılımıyla işlenmiş ve sahanın 0,814 cm/piksel çözünürlüğünde sayısal yükseklik modeli (SYM) ve orto-foto görüntüleri üretilmiştir. Bu görüntüler ve ilgili yazılım kullanılarak heyelanın yüzey alanı ve hacmi de hesaplanmıştır. Ayrıca inceleme alanındaki kentsel heyelanı oluşturan malzemenin mühendislik özelliklerine ait veriler ise literatürden derlenmiştir (Aral & Avcıyener, 2011; Çağlı Mühendislik, 2011).



Şekil 2. Çalışma yönteminin iş akış şeması

Kentsel heyelanın hazırlayıcı (litoloji, eğim ve yerşekli) koşulları ve tetikleyici (yağış ve insan etkinlikleri) faktörleri farklı kaynaklardan elde edilen verilerle açıklanmıştır. Litolojik özellikler, Kayran (2006) tarafından hazırlanan Tekirdağ Belediyesi Kent ve Mücavir Alanının Revizyon İmar Planı Yerleşime Uygunluk Amaçlı Etüt Raporunun ekinde sunulan 1/12.000 ölçekli jeoloji haritasından tedarik edilmiştir. Eğim özellikleri, İHA tabanlı uzaktan algılamayla üretilmiş SYM görüntüsünün CBS yazımında işlenmesiyle yüzde (%) olarak belirlenmiştir. Yerşekli özellikleri, SYM ve orto-foto görüntülerinin uzman görüşüne bağlı doğrudan haritalama yöntemi kullanılarak amaç doğrultusunda analiz edilmesiyle tespit edilmiştir (Görüm ve Nefeslioğlu, 2015). Yağış, Meteoroloji Genel Müdürlüğü bünyesinde hizmet eden Tekirdağ Meteoroloji İstasyonuna ait hem uzun süreli (Ölçüm Periyodu:1940-2023) aylık ortalama yağış (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024a) hem de 2023 yılının aralık ayına ait günlük yağış verileri kullanılarak açıklanmıştır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024b).

İnsan etkinlikleri arazi çalışmalarıyla elde edilen verilerle saptanmıştır. Çalışmanın tematik haritaları, CBS yazılımlarından biri olan ArcGIS Pro (Version 3.0.1) paket programı kullanılarak hazırlanmıştır.

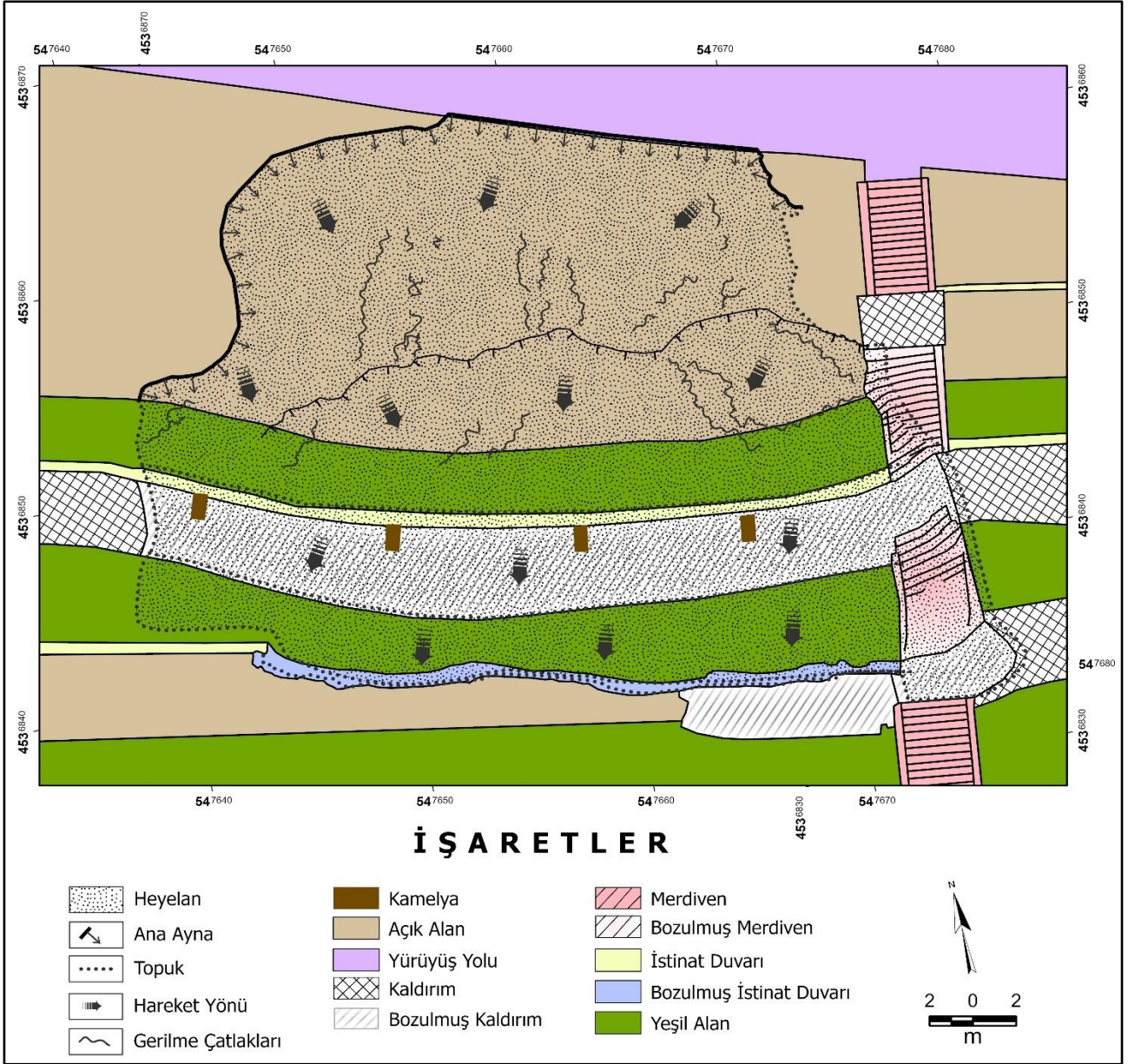
3. Bulgular

İnceleme alanındaki kentsel heyelan 16.12.2023 tarihinde meydana gelmiştir. Sadece maddi hasara yol açan bu doğal afet, çok sığ (yüzeysel) ve dairesel (dönel) kayma şeklinde gelişmiştir (Şekil 3). Aral ve Avcıyener (2011) Tekirdağ kentindeki heyelanların kayma yüzeyi derinliğinin oldukça sığ olduğu ve eğimin arttığı yerlerde ikincil kaymalar geliştiği için "eğim yukarı doğru gerileyen birleşik heyelan sistemi" olarak tanımlayabileceğini rapor etmişlerdir.

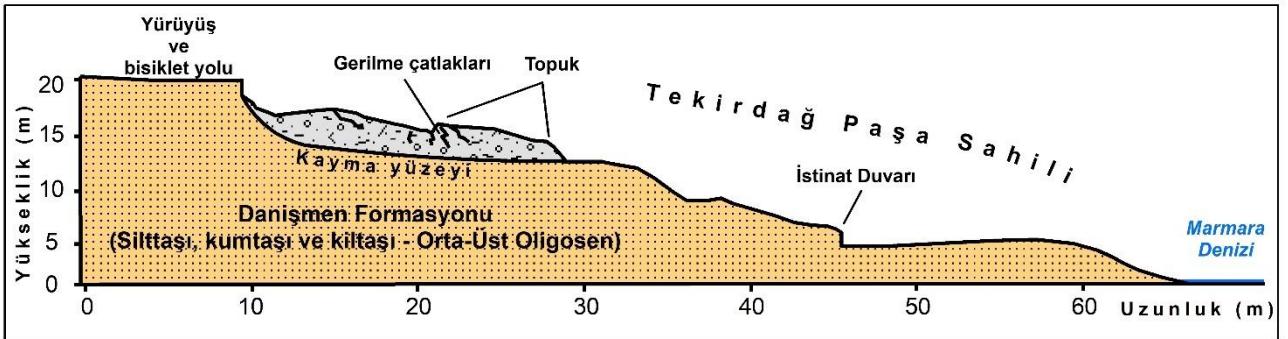


Şekil 3. İnceleme alanındaki Alkaya heyelanının orto-foto görüntüsü

Kentsel heyelanın uzunluğu 26,73 m, taç kısmındaki en geniş yeri 26,52 m, ana ayna uzunluğu ise 42,34 m'dir. Taç kısmında çökmenin maksimum değeri 4 m olup, çöken kısım güneydoğuya doğru ötelenmiştir. Heyelan esnasında ve sonrasında meydana gelmiş enine ve boyuna gerilme çatlakları ise heyelanın kuzey ve güney yönünde genişleme eğiliminde olduğunu göstermektedir (Şekil 4; 5, 6). Yükselti değeri heyelanın taç kısmında 20 m iken, topuk kısmında 11 m'dir. Yüzey alanı 1109,44 m² olan heyelanın hacmi ise 284,95 m³ olarak hesaplanmıştır. Kentsel heyelanın yüzey alanı SYM verisinin işlenmesiyle, hacmi ise yüzey alanının ortalama derinlikle çarpılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4. İnceleme alanındaki heyelanın jeomorfolojik özellikleri ve kentsel arazi kullanım haritası



Şekil 5. Alkaya heyelanının şematik enine kesiti



Şekil 6. Alkaya heyelanının havadan görünümü

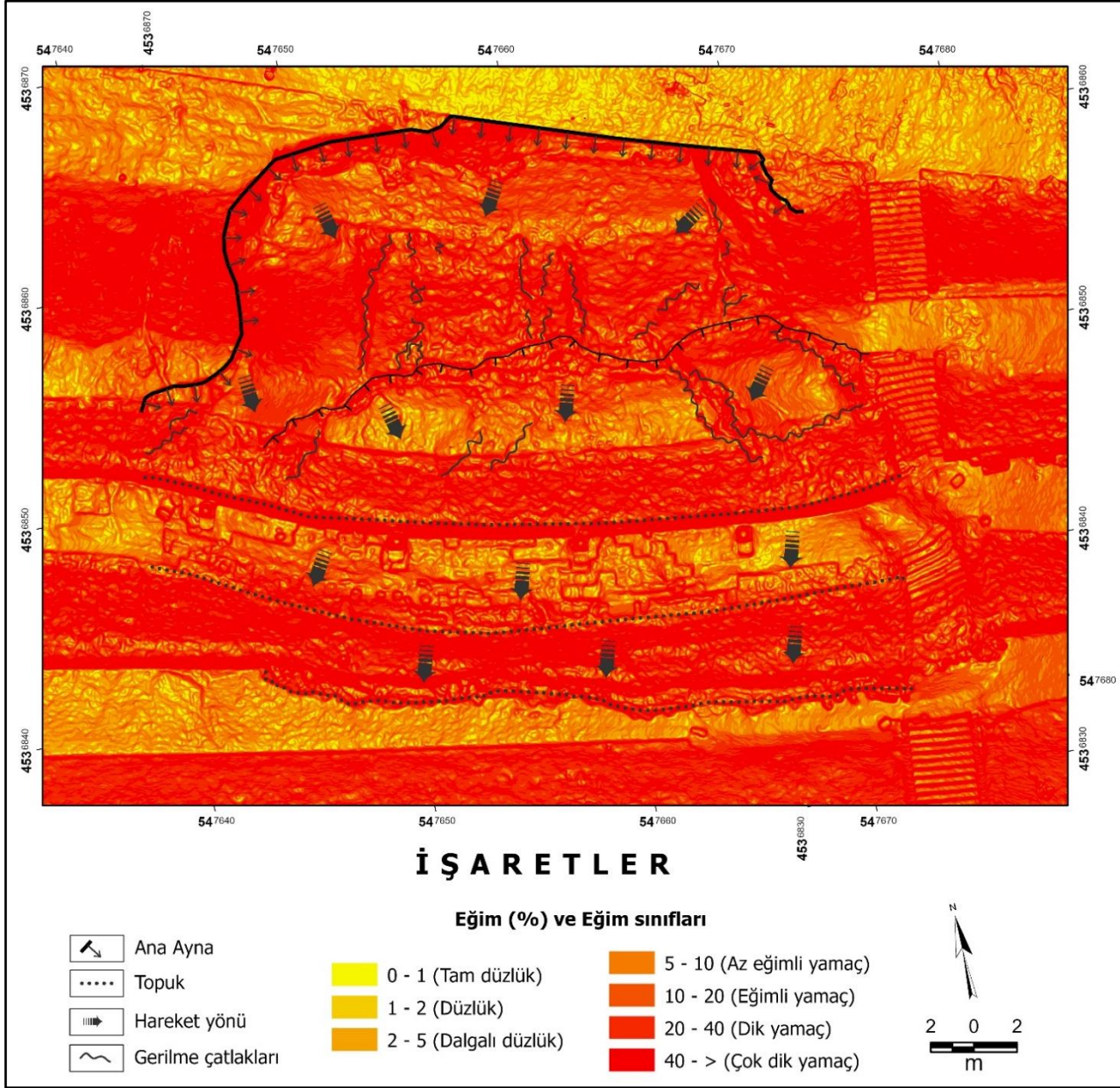
İnceleme alanındaki kentsel heyelan, hazırlayıcı (litoloji, eğim ve yerçekli) koşullar ve tetikleyici (yağış ve insan etkinlikleri) faktörlerin denetiminde meydana gelmiştir. Bu bakımdan kentsel heyelan litoloji ve eğim özelliklerinin uygun olduğu Alkaya sahilindeki yamaç arazide, şiddetli yağış ve yamacın amaç dışı kullanılmasına bağlı yanlış arazi kullanımının etkisiyle gerçekleşmiştir. Görüm ve Nefeslioğlu (2015) inceleme alanının bulunduğu bölgedeki kentsel heyelanların en büyük hazırlayıcı ve tetikleyici faktörünün ani yağışlar olduğunu belirterek, yoğun nüfus artışı ve yanlış arazi kullanımları sonucu zarar görübilirlik oranının giderek yükseldiğini vurgulamışlardır (Görüm & Nefeslioğlu, 2015).

İnceleme alanındaki kentsel heyelanı hazırlayıcı öncelikli faktör litolojik özelliklerdir. Alkaya heyelanının Orta-Üst Oligosen'e ait silttaşı, kumtaşı ve kiltaşından meydana gelen Danişmen Formasyonunun bileşiminde yer alan kiltaş litolojisinde gelişmiş olması da bu durumu desteklemektedir (Şekil 4). Sahadaki heyelanlı zeminlerden alınan numunelerin sıvılık sınırının (LL) %24,5-64,9, plastiklik sınırının (PL) %20,7-31,9 ve plastisite indisinin (PI) %5,8-38,2 arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu bakımdan inceleme alanındaki litolojik birimin "yüksek plastisiteli siltli kil (CH)" ile "düşük plastisiteli kil (CL)" zemin sınıfında olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca numunelerin gerek LL gerekse PL değerleri bakımından sırasıyla, genellikle "orta-yüksek" ve nadiren de "çok yüksek" olduğu saptanmıştır (Aral & Avcıyener, 2011). Diğer yandan mineralojik bakımdan sahadaki killerin şişme potansiyeli "yüksek" olan "montmorillonit" türünde olduğu belirlenmiştir (Çağıl Mühendislik, 2011). Bütün bu zeminlerin mühendislik özellikleri inceleme alanındaki litolojinin heyelana çok yatkın olduğunu açıkça göstermektedir.

İnceleme alanındaki kentsel heyelanı hazırlayıcı diğer faktörler ise eğim ve yerçekli özellikleridir (Şekil 4; 7). Zira eğimin fazla olduğu yamaçlarda yerçekimi artacağı için heyelan oluşma potansiyelinin yüksek olduğu bilinmektedir (Özşahin, 2015e). Gerçekten de inceleme alanındaki kentsel heyelan eğimin %15'i aştığı bir yamaçta gelişmiştir (Şekil 6). Özşahin (2015b) Tekirdağ kentinde eğim değerlerinin %15'in üzerinde olan yamaç arazilerde heyelanların daha fazla oluştuğunu bildirmiştir (Özşahin, 2015b).

İnceleme alanındaki kentsel heyelanı tetikleyen öncelikli faktör yağıştır (Schwab vd., 2005). Yıllık ortalama yağış miktarının 580,0 mm olduğu inceleme alanında kentsel heyelanın meydana geldiği aralık ayı, aynı zamanda en yağışlı aydır. Zira inceleme alanındaki yıllık toplam yağış miktarının %13,8'i aralık ayında düşmektedir (Tablo 1; Şekil 7). Ancak inceleme alanında 2023 yılının aralık ayında ortalamadan üzerinde bir yağış (85,9 mm) gerçekleşmiştir (Tablo 2; Şekil 7). Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Yağış Şiddeti sınıflandırmasına (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024c) göre "Şiddetli Yağış (76 - 100 mm)" mertebesinde meydana gelen bu hadise, inceleme alanındaki heyelan oluşumunu tetikleyen bir etkiye sebep olmuştur. Lee vd. (2020) son yıllarda anormal hava olaylarının daha sık meydana gelmesiyle birlikte yerel şiddetli yağışların sıklığı arttığı için kentsel alanlardaki heyelan tehlikesinin de arttığını kaydetmişlerdir (Lee vd., 2020).

Dolayısıyla inceleme alanındaki şiddetli yağış neticesinde kentsel heyelanın olduğu zemin, kısmen ya da tamamen suya doymun bir karakter kazanarak akıcı hale gelmiştir (Özşahin, 2015b). Lee vd. (2020) şiddetli yağışlardan sonra zeminin doymunluğa ulaşmaya başlamasıyla beraber gözenek basıncı artarken kayma dayanımı azaldığı için heyelan olasılığının da arttığını ifade etmişlerdir (Lee vd., 2020). Böylece inceleme alanında 16.12.2024 tarihinde aylık ortalamasının yaklaşık yarısına karşılık gelen oranda (%47.6) düşen şiddetli yağış, kentsel heyelanın oluşumunu tetikleyici bir rol oynamıştır.



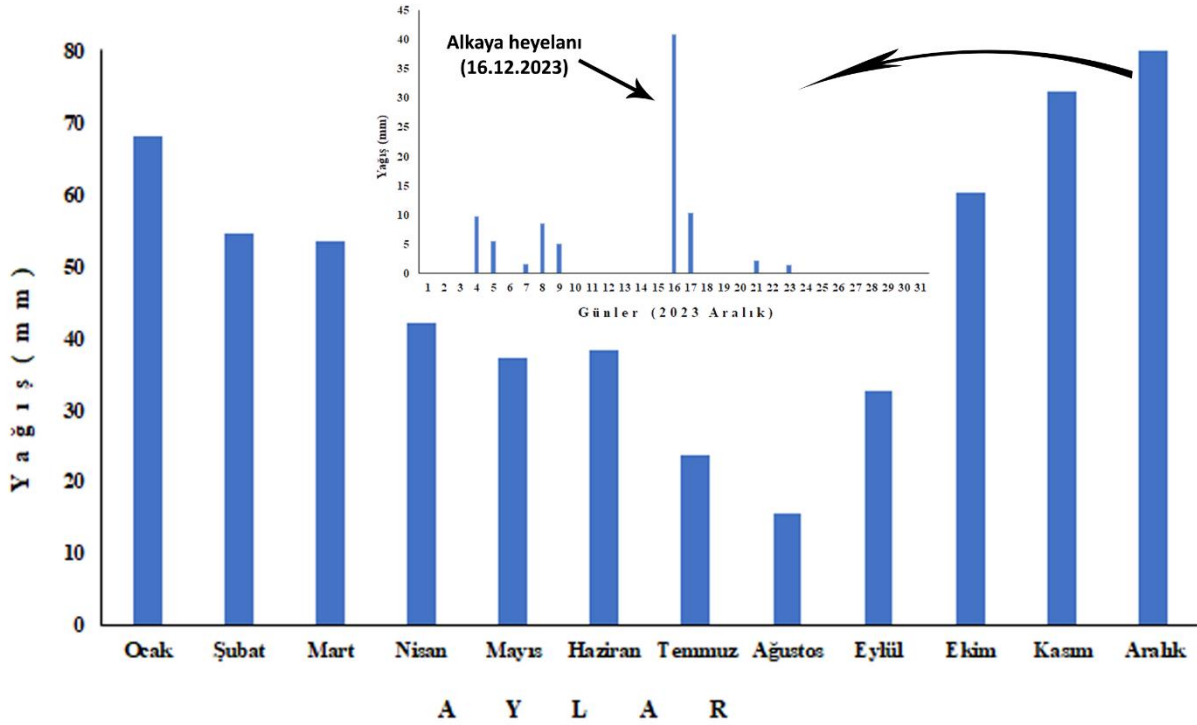
Şekil 7. İnceleme alanının eğim haritası

Tablo 1. İnceleme alanının aylık ortalama yağış değerleri (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024a)

Aylar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık
Yağış (mm)	68,0	54,5	53,4	42,1	37,2	38,3	23,8	15,5	32,7	60,2	74,3	80,0	580,0
%	11,7	9,4	9,2	7,3	6,4	6,6	4,1	2,7	5,6	10,4	12,84	13,8	100,0

Tablo 2. İnceleme alanının aralık ayı günlük ortalama yağış değerleri (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024b)

Gün	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Yağış	0	0	0	9,80	5,55	0	1,70	8,60	5,05	0	0
%	0	0	0	11,4	6,5	0	2,0	10,0	5,9	0	0
Gün	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Yağış	0	0	0	0	40,85	10,45	0	0	0	2,25	0
%	0	0	0	0	47,6	12,2	0	0	0	2,6	0
Gün	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Aylık Toplam	
Yağış	1,5	0	0	0	0	0	0,1	0	0	85,9	
%	1,7	0	0	0	0	0	0,1	0	0	100,0	



Şekil 8. İnceleme alanının uzun süreli aylık ve 2023 yılı aralık ayı günlük ortalama yağış değerleri

İnceleme alanındaki kentsel heyelanı tetikleyen diğer bir faktör, amaç dışı kullanılmasına bağlı bir şekilde ortaya çıkan yanlış arazi kullanımıdır. Zira daha önce tespit edilmiş başka bir heyelanın yaşandığı (Kayran, 2006) ve heyelan duyarlılığının çok yüksek olduğu (Özşahin, 2015e) inceleme alanı, yoğun insan müdahalesine ve yanlış mühendislik uygulamalarına maruz kalmıştır. Kentsel heyelanın gerçekleştiği yamaç, hemen üst kesiminden karayolunun geçtiği bir yer olmasının yanında, birkaç yıl önceye kadar kullanılmayan ancak yakın zamanda rekreasyon faaliyetleri açısından teraslama usulüyle düzenlenmiştir (Şekil 8). Böylece yamaç arazi gerek üst gerekse bazı yamaç kesimlerinden geçirimsiz yüzeylerle kuşatılmıştır. Yağışlarla gelen suların yüzeyel akışını engellemek için kara yönünde zorunlu olarak yönlendirilmesine yol açan bu durum, suyun şev diplerinden sızmasına etki etmektedir. Böylece sızan sular, alttaki anakayanın su içeriğini arttırmasına karşın sürtünmeyi azaltarak heyelanın hazırlayıcı nedeni olmuştur (Şekil 9).

Dolayısıyla Alkaya heyelanı, hazırlayıcı diğer doğal faktörlerin yanında, yamacın amaç dışı kullanılmasından dolayı meydana gelmiş olmalıdır. Ancak Alkaya heyelanının meydana geldiği tarihten beri (16.12.2023-20.08.2024) sekiz aydan fazla zaman geçmesine rağmen heyelanlı yamaçta hala gerekli önlemler alınmamıştır. Sadece heyelanlı saha güvenlik şeridiyle kapatılmış ve sahanın mevcut kullanımında olan yürüyüş yoluna bakan kısmına “DİKKAT HEYELAN BÖLGESİDİR.” afişi asılmıştır. Bu durum yağışlı dönemin başlamasıyla birlikte sahadaki mevcut heyelanın yeniden aktif hale gelmesine sebep olabilir.



Şekil 9. Alkaya heyelanının meydana geldiği yamaç arazide yanlış arazi kullanımı görülmektedir.



Şekil 10. Alkaya heyelanının meydana geldiği yamaç arazide yağışlarla gelen suyun şev diplerinden sızması, alttaki anakanın su içeriğinin artmasına ve sürtünmenin azalarak heyelanın oluşmasına sebebiyet vermiştir (Gence, 2023)



Şekil 11. Alkaya heyelanının meydana geldiği tarihten beri heyelanlı yamaçta gerekli önlemler alınmamıştır (Fotoğraf 20.08.2024 tarihinde çekilmiştir).

4. Tartışma

Hızlı nüfus artışıyla birlikte kentsel alanlar çevresine doğru kontrolsüz bir şekilde yayılmaya başlamıştır. İlk aşamada eğitim koşullarının uygun olduğu jeomorfolojik birimler üzerinde başlayan bu kontrolsüz yayılma, zamanla doğal güzellikleri ve manzarası nedeniyle yamaç arazilere doğru kaymıştır (Olshansky, 1996). Yamaçların gayri resmi kentleşmesi olarak tanımlanan bu süreç, kentsel heyelan tehlikesinin görülme sıklığının ve şiddetinin artmasına neden olmuştur (Smyth & Royle, 2000). Tekirdağ, Türkiye’de yaygın bir şekilde fosil ve aktif heyelanların görüldüğü kentlerden birisidir (Kayran, 2006). Kabaca kuzey-güney doğrultusunda akan kısa boylu akarsu vadileriyle parçalanmış denize doğru eğimli bir plato yüzeyi üzerinde bulunan kentsel alandaki yamaç araziler, heyelan duyarlılığı bakımından yüksek maruziyete ve hassasiyete sahiptir (Özşahin, 2015b). Bu sebeple 16.12.2023 tarihinde Tekirdağ kentsel alanındaki Alkaya mevkiinde altyapının zarar görmesine ve ekonomik kayba neden olan sığ karakterde bir kentsel heyelan meydana gelmiştir. Bu çalışma Alkaya kentsel heyelanının hazırlayıcı diğer doğal faktörlerin yanında, asıl yamacın amaç dışı kullanılmasından dolayı oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Schwab vd. (2005) kentsel alanlardaki yamaçlar üzerinde gerçekleştirilen insan faaliyetinin çok daha uzun süre dayanabilecek şevleri istikrarsızlaştırarak kentsel heyelanların meydana gelmesini tetikleyebileceğini vurgulamışlardır (Schwab vd., 2005). Thomson ve Tiedemann (1982) kentsel heyelanları tetikleyen insan faaliyetlerinin önceden planlama yapılarak en aza indirilebileceği gibi yönetim organları tarafından önleyici tedbirler alınarak azaltılabileceğini de açıklamışlardır (Thomson & Tiedemann, 1982).

Genel olarak doğal veya antropojenik faktörler tarafından tetiklenen kentsel heyelanların zamansal ve mekânsal olarak tahmin edilmesinin oldukça güç olduğu bilinmektedir (Görüm & Nefeslioğlu, 2015). Ancak yaşanmış kentsel heyelanların bilimsel bir bakış açısıyla analiz edilmesi, planlama açısından heyelanların oluşturacağı zararların azaltılmasına yardımcı olduğu gibi gelecekte benzer olayların oluşum sahalarının tahmin edilebilmesine de ışık tutmaktadır (Özşahin, 2014b; 2015b). Alexander (1989) kentsel heyelan felaketleri durdurulamıyorsa bile en azından oluşum özelliklerinin ve mekanizmalarının belirlenmesi gerektiğini vurgulamıştır (Alexander, 1989). Bu bakımdan kentsel heyelan tehlikesine karşı hem heyelan hem de mekânsal planlama uzmanları tarafından dört yaklaşımın uygulanması önerilmiştir.

Bunlar; (1) heyelana eğilimli alanlarda kentsel gelişimin sınırlandırılması; (2) kazı, arazi tesviyesi ve inşaat işleriyle ilgili teknik kuralların uygulanması ve güçlendirilmesi; (3) gelecekteki olası hasarı sınırlandıracak teknikler kullanılarak mevcut yapıların korunması; (4) izleme ve uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve kurulumudur. Bu dört yaklaşımın uygulandığı yerlerde genellikle kentsel heyelan risklerinin azaltılmasına yönelik oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Schuster & Highland, 2007). Dolayısıyla bu çalışma hem güncel hem de gelecek durumun anlaşılmasına katkı sağlaması bakımından önem taşır.

Kentsel yerleşimler için büyük bir problem olarak görülen heyelan tehlikesinin çözümü, ancak disiplinler arası bir yaklaşımla mümkündür. Bu konudaki sorunları yerinde çözmedeki başarısızlık, genellikle bireysel uzmanlık veya metodoloji eksikliğinden değil, farklı alanlardaki uzmanlar arasındaki iletişim eksikliğinden kaynaklanmaktadır (Alexander, 1989). Dolayısıyla gelecekteki kentsel heyelan araştırmalarının multidisipliner bir yaklaşımla gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Başta Alkaya heyelanı olmak üzere Tekirdağ kentindeki ve Türkiye'nin diğer kentsel alanlarındaki potansiyel heyelan alanlarının belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması için jeologlar ve jeomorfologlar başta olmak üzere çeşitli branşlarda uzmanlaşmış yerbilimcilerden faydalanılmalıdır. Ayrıca heyelan tehlikesi duyarlılığının yüksek olduğu kentlerde karar verici pozisyonda olanların yerel saha koşullarını ve altyapıyı iyileştirmek için ortak bir çaba göstermesi gerekir. Böylece heyelan tehlikesinin önemli ölçüde az olduğu daha güvenli ve sürdürülebilir bir kentsel çevrenin kurulması sağlanabilir, aynı zamanda insanların yaşadığı çevrenin kalitesi de artar (Smyth & Royle, 2000).

Son yıllarda kentsel heyelan çalışmalarında CBS ve İHA tabanlı UA teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Karantanellis vd., 2020). CBS tekniklerinden heyelanlar ve heyelanla ilişkili değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri etkili bir şekilde analiz etmek, İHA tabanlı UA tekniklerinden ise daha hassas veri toplamak için yararlanılmaktadır (Lee vd., 2020). Bu tekniklerin dışında zamansal ve mekânsal kentsel heyelan dinamiklerini izlemek için jeofizik yöntemlerden de faydalanılmaktadır. Ancak yakın zamanda CBS ve İHA tabanlı UA tekniklerinin jeofizik sonuçlarının güvenilirliğini artırmak için kullanılan tamamlayıcı bir yöntem olarak daha fazla tercih edildiği bildirilmiştir (Hussain vd., 2022). Bu çalışmada Alkaya kentsel heyelanı CBS ve İHA tabanlı UA teknikleri kullanılarak incelenmiştir. CBS teknikleri kentsel heyelanın tematik haritalarının hazırlanmasında, İHA tabanlı UA teknikleri ise daha yüksek çözünürlüğe sahip verilerin üretilmesi ve daha hassas ölçümlerin gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda kentsel heyelanların incelenmesinde benzer teknikler kullanılabilir gibi jeofizik yöntemlerden de faydalanılabilir. Ayrıca yerel ölçekte, jeofizik teknikleri İHA tabanlı fotogrametri ile birleştirmek, esneklik, verimlilik, alet yerleştirme kolaylığı ve veri işleme hızı gibi çeşitli avantajlar nedeniyle maliyet etkinliği açısından etkin bir çözüm olarak sunulabilir (Hussain vd., 2022).

5. Sonuç

Bu çalışmanın sonuçları Tekirdağ kentinde 16.12.2023 tarihinde meydana gelen Alkaya kentsel heyelanının bazı hazırlayıcı koşullar ve tetikleyici faktörlerin etkisiyle oluştuğunu göstermiştir. Hazırlayıcı faktörler bakımından şişme potansiyeli "yüksek" olan "montmorillonit" türünde killerden oluşan litolojinin yayılış gösterdiği ve eğimin %15'i aştığı bir yamaçta gelişen kentsel heyelan, ortalamanın üzerinde şiddetli yağış ve yamaçın amaç dışı kullanılmasıyla tetiklenmiştir. Dolayısıyla çalışma sonuçları, Tekirdağ kentindeki benzer özelliklerinin görüldüğü alanların belirlenmesinde kullanılabilir. Ayrıca bu sonuçlar Tekirdağ kenti özelinde hazırlanacak heyelan risk değerlendirme çalışmalarına da önemli katkılar sağlayabilir.

Güncel olarak inceleme alanında oluştuğu zamandan beri herhangi bir rehabilitasyon işlemi yapılmadan duran Alkaya kentsel heyelanının yağışlı dönem gelmeden bir an önce ivedilikle tesviye edilmesi gerekmektedir. Bu bakımdan kayan kütlenin tekrar harekete geçmesinin önlenmesi amacıyla ortamdaki uzaklaştırılması oldukça önemlidir. Diğer yandan hem aynı sahada hem de kentsel alandaki diğer yamaçlarda benzer problemin yaşanmaması için yamaç arazilere yapılacak müdahalelerde çok dikkat edilmesi elzemdir. Tekirdağ kentinde özellikle yamaç arazilerin planlanması sırasında yanlış arazi kullanımının engellenmesi için amaç dışı kullanımlara müsaade edilmemelidir. Bununla birlikte şiddetli yağışlar sonucunda geçirimsiz yüzeylere bağlı olarak ortaya çıkan fazla suların şev diplerinden sızmasının önlenmesi için yamaç şevlerinin doğru bir şekilde drene edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu çalışmada olduğu gibi kentsel heyelanların incelenmesinde CBS ve İHA tabanlı UA tekniklerin kullanılması, verimli ve hassas veri toplama ile bu verilerin zamansal açısından etkili ve yüksek doğrulukta analizi bakımından büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Kaynaklar

Akıncı, H., Dogan, S., Kılıçoğlu, C., & Keçeci, S.B. (2010). Samsun İl Merkezinin Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(3), 13-27. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/84939>

- Akıncı, H., Yavuz Özalp, A., & Temuçin Kılıçer, S. (2015). Coğrafi Bilgi Sistemleri ve AHP Yöntemi Kullanılarak Planlı Alanlarda Heyelan Duyarlılığının Değerlendirilmesi: Artvin Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 40-53. <https://doi.org/10.21324/dacd.20952>
- Alexander, D. (1989). Urban landslides. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 13(2), 157-189. <https://doi.org/10.1177/030913338901300201>
- Alptekin, A., & Yakar, M. (2020). Heyelan bölgesinin İHA kullanarak modellenmesi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 17-21. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1099110>
- Aral, İ. F., & Avcıyener, S. (2011, 1-2 Aralık). *Hürriyet Mahallesi (Tekirdağ) yöresi heyelanlarının mühendislik özellikleri* [Bildiri Sunumu]. 4. Geoteknik Sempozyumu, Adana, Türkiye.
- Çağıl Mühendislik. (2011). *Tekirdağ ili Hürriyet mahallesi 212 ada ve 2247 ada alanları içerisinde gelişen heyelanların Mühendislik jeolojisi araştırması*. İstanbul.
- Çakıcı, H., Tüdeş, Ş., & Bulut, F. (2012). Kentsel Kullanım Alanında Gelişen Heyelanlar ve Jeoteknik Analizi: Kırkdğirmenler (Erzurum) Örneği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(4), 739-751.
- Eker, R., Aydın, A. & Hübl, J. (2018). Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, Article 28. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6402-8>
- ESRI. (2023). *Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Timeseries Downloader (2017-2023)*. 9 Temmuz 2024'te <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/> adresinden alındı.
- Gence, E. (2023, Aralık 16). *Alkaya sahil yürüyüş yolunun üst kısmında yoğun yağış sonrasında heyelan meydana geldi*. 9 Temmuz 2022'te <https://www.facebook.com/100008684106014/posts/pfbid02Qf4Rf8XL2wsrJ5g2fQh9MrQiBoV8V917CrEftZdUMRkXv1vbij4q4eFXd9mbxfkcl/?mibextid=Nif5oz> adresinden alındı.
- Görüm, T., & Nefeslioğlu, H. (2015). Çok zamanlı heyelan aktivitesinin belirlenmesinde jeomorfolojik bir yaklaşım. *Türk Coğrafya Dergisi*, 65, 47-58. <https://doi.org/10.17211/tcd.19041>
- Hussain, Y., Schlögel, R., Innocenti, A., Hamza, O., Iannucci, R., Martino, S., & Havenith, H.B. (2022). Review on the Geophysical and UAV-Based Methods Applied to Landslides. *Remote Sensing*, 14, Article 4564. <https://doi.org/10.3390/rs14184564>
- Karantanellis, E., Marinos, V., Vassilakis, E., & Christaras, B. (2020). Object-Based Analysis Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Site-Specific Landslide Assessment. *Remote Sensing*, 12, Article 1711. <https://doi.org/10.3390/rs12111711>
- Kayran, H. (2006). *Tekirdağ Belediyesi Kent ve Mücavir Alanının Revizyon İmar Planı Yerleşime Uygunluk Amaçlı Etüt Raporu*. Çağıl Mühendislik Müşavirlik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, Tekirdağ Belediyesi.
- Lee, S., Baek, W.K., Jung, H.S., & Lee, S. (2020). Susceptibility Mapping on Urban Landslides Using Deep Learning Approaches in Mt. Umyeon. *Applied Sciences*, 10, Article 8189. <https://doi.org/10.3390/app10228189>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024a). *Tekirdağ Meteoroloji İstasyonunun uzun yıllık (Ölçüm Periyodu:1940-2023) aylık ortalama yağış verileri*. 9 Temmuz 2022'de <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=TEKIRDAG> adresinden alındı.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024b). *Tekirdağ Meteoroloji İstasyonunun 2023 yılının aralık ayına ait günlük yağış verileri* [Data set]. Tekirdağ Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü, Tekirdağ.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024c). *Meteorolojik Hadiselerin Şiddetlerine Ait Sınıflandırma - Yağış Şiddeti*. 9 Temmuz 2022'de <https://www.mgm.gov.tr/site/yardim1.aspx?m=HadSid> adresinden alındı.
- Nefeslioğlu, H.A., Sezer, E., Gokceoğlu, C., Bozkır, A. S., & Duman, T.Y. (2010). Assessment of Landslide Susceptibility by Decision Trees in the Metropolitan Area of Istanbul, Turkey. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010, Article 901095. <https://doi.org/10.1155/2010/901095>
- Olshansky, R.B. (1996). *Planning for Hillside Development* (Report Number 466). American Planning Association, Planning Advisory Service.
- Özşahin, E. (2014a). CBS Kullanılarak Şehir ve Jeomorfoloji Arasındaki İlişkinin İncelenmesi: Tekirdağ Şehri Örneği. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6, 93-122. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2154112>
- Özşahin, E. (2014b). Tekirdağ İlinde Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Analitik Hiyerarşi Süreci Kullanarak Heyelan Duyarlılık Analizi. *Humanitas - Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(3), 167-186. <https://doi.org/10.20304/husbd.84015>
- Özşahin, E. (2015a). Kent Planlaması ve Jeomorfoloji. In M. Karakuyu, A. Keçeli & Ş. Çelikoğlu (Eds.), *Kent Çalışmaları II* (10. Bölüm, 215-231), Pegem Akademi.
- Özşahin, E. (2015b). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Kullanılarak Tekirdağ Şehrinin Heyelan Duyarlılık Analizi. *Avrasya Bilimler Akademisi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6, 50-71. <https://doi.org/10.17740/eas.soc.2015-V6-4>
- Özşahin, E. (2015c). Şehir ve Toprak Arasındaki İlişkinin Coğrafi Yaklaşımla İncelenmesi: Tekirdağ Şehri Örneği. *Turkish Studies-International Periodical For the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic*, 10/3, 733-758. <http://dx.doi.org/10.7827/TurkishStudies.7982>

- Özşahin, E. (2015d). Tekirdağ'da kentsel gelişim ve jeomorfolojik birimler arasındaki ilişkinin zamansal değişimi. *Turkish Studies - International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic*, 10(1), 579-602. <https://doi.org/10.7827/TurkishStudies.7811>
- Özşahin, E. (2015e). Coğrafi Bilgi Sistemleri Yardımıyla Heyelan Duyarlılık Analizi: Ganos Dağı Örneği (Tekirdağ). *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 47-63.
- Petley, D. N. (2009). On the impact of urban landslides. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 22, 83-99. <https://doi.org/10.1144/EGSP22.6>
- Schuster, R. L., & Highland, L. M. (2007). The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0080-z>
- Schwab, J., FAICP, Gori, P., & Jeer, S. (2005). *Landslide hazards and planning*. APA Planning Advisory Service. <https://w1.planning.org/publications/report/9026862/>
- Smyth, C. G., & Royle, S. A. (2000). Urban landslide hazards: incidence and causative factors in Niterói, Rio de Janeiro State, Brazil. *Applied Geography*, 20(2), 95-118. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(00\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(00)00004-7)
- Thomson, S., & Tiedemann, C.E. (1982). A Review of Factors Affecting Landslides in Urban Areas. *Environmental & Engineering Geoscience*, 19(1), 55-65. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xix.1.55>
- Turner, D., Lucieer, A., & de Jong, S. M. (2015). Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7(2), 1736-1757. <https://doi.org/10.3390/rs70201736>
- Uludağ, M., & Özşahin, E. (2023). Şehirsel Yayılmanın Jeomorfolojik Birimlerle İlişkinin Zamansal ve Mekansal Analizi: Edirne Örneği. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 10, 49-66. <https://doi.org/10.46453/jader.1205061>
- U.S. Department of Agriculture. (1975). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys* (Agriculture Handbook 436). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Yu, M., Huang, Y., Zhou, J., & Mao, Y. (2017). Modeling of landslide topography based on micro-unmanned aerial vehicle photography and structure-from-motion. *Environmental Earth Sciences*, 76, Article 520. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6860-x>