



**Bir Heyelanın Anatomisi: 17 Mart 2005 Kuzulu (Koyulhisar - Sivas, Türkiye)
Heyelanı Örneğinde Temel Jeolojik Araştırmaların Öneminin Değerlendirilmesi**
*Anatomy of a Landslide: Evaluation of the Importance of Basic Geological Investigations as exemplified
in the Kuzulu (Koyulhisar – Sivas, Türkiye) Landslide of 17 March 2005*

**Halil Gürsoy^{1,*}, Orhan Tatar², Bekir Levent Mesci¹
Oktay Canbaz¹, Ali Polat³, Zafer Akpınar⁴**

¹ Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas

² AFAD Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, Ankara

³ Sivas Valiliği AFAD İl Müdürlüğü, Sivas

⁴ Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Balıkesir

• Geliş/Received: 10.10.2023 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 30.11.2023 • Kabul/Accepted: 30.11.2023
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 26.12.2023 • Baskı/Printed: 30.01.2024

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: 17 Mart 2005 günü Koyulhisar (Sivas, Türkiye) ilçesinin batısında büyük ve karmaşık bir heyelan oluşmuştur. Daha çok moloz ve çamur akması şeklindeki bu heyelan çok kısa bir sürede vadi içerisindeki Kuzulu yerleşim alanı üzerine akmış ve 15 kişi yaşamını yitirmiştir. Kuzulu heyelan bölgesi ve yakın çevresinin gerek bölgesel topografik yapısı gerekse taç ve topuk bölgesinin konumu, bu heyelanın tek türde ve tek bir hareketle sınırlı olarak gelişmiş basit bir kütle hareketi olmadığını göstermektedir. Bu bölgede 17 Mart 2005-Ağustos 2007 dönemleri arasında en az 4 büyük akma hareketi daha gerçekleşmiştir. Bu heyelanı hazırlayan ve hızlandıran en önemli faktörlerden birisi, taç bölgesi ve çevresinde gözlenen yoğun süreksizlik ve normal fay düzlemlerini kullanarak eriyen karlardan sızan yüzey ve yeraltı sularıdır. Bu sular oldukça altere olmuş volkanik kayalar suya aşırı doygun hale getirmiştir. Altta yer alan kireçtaşı ile altere olmuş volkanik kayalar arasında gelişen bir yenilme yüzeyi boyunca büyük çoğunluğu volkanik kayalardan türemiş malzemenin hareket etmesine neden olmuştur.

Günümüzde son derece gelişmiş teknolojik cihazlarla detaylı bir şekilde hareket hızları ve yönü izlenebilen kütle hareketlerinin neden ve sonuçlarının doğru yorumlanabilmesi için aynı zamanda bölgenin detaylı temel jeolojik haritalarının da yapılması gereklidir. Kuzulu heyelanının gelişim biçimi ve tetikleyici faktörleri hakkında farklı görüş ve yorumlamalar söz konusu olup, farklılığın temel nedeninin heyelan bölgesi ve çevresinin jeolojik ve tektonik yapısının ayrıntılı araştırılmamasından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada, bölgenin temel jeolojik özelliklerini ortaya koyan detaylı yeni jeolojik harita yapılmış olup, önceki yapılan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak heyelanın özellikleri yeniden değerlendirilmiştir. Kuzulu Heyelan bölgesinin heyelan öncesi ve heyelan sonrası uydu görüntülerinden oluşturulan Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) haritaları yardımıyla toplam 10.367.766 m³'lük bir hacimsel hareket oluşmuş olup, heyelan sınırları içerisinde kalan bölgeden net olarak 9.372.880 m³'lük bir malzemenin aktığı hesaplanmıştır.

Kentsel planlama ve yerleşime uygunluk açısından yapılacak çalışmalarda zeminin mühendislik jeolojisi özelliklerinin yanı sıra çevredeki bölgenin jeomorfolojik yapısı da önem taşımaktadır. Koyulhisar ilçe merkezinin KAFZ gibi aktif bir fay zonunun hemen yakınında ve aktif bir heyelan üzerinde olması, buna tipik bir örnektir. Ayrıntılı jeolojik, jeomorfolojik, heyelan duyarlılık, tehlike ve risk haritalarının yapılması deprem ve heyelanların öncesi ve sonrasında oluşabilecek her türlü zararları önleme açısından büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hacim hesaplama, jeolojik haritalama, jeomorfoloji, Koyulhisar, Kuzulu heyelanı.

Abstract: *On 17 March 2005, a large and complex landslide occurred west of Koyulhisar (Sivas, Turkey). This landslide, mostly comprising debris derived from volcanic rocks and mud flow, moved over the Kuzulu settlement area in the valley in a very short time and 15 people were killed. The Kuzulu landslide zone is not a simple mass movement limited to a single movement. Instead, complexities are introduced by the regional topographic structure and location of the crown and heel zone so that at least 4 other large flow movements occurred in this region between 17 March 2005 and August 2007. One of the most important factors initiating and accelerating this landslide has been the influence of surface and groundwater seepage from melting snow. This seepage has followed the dense pattern of discontinuities and normal fault planes observed in and around the crown region. These waters saturated the profoundly altered volcanic bedrocks with water, and as a result, a slip surface developed between the underlying limestone and weathered volcanic rocks. This was responsible for the catastrophic mass movement.*

To correctly interpret the causes and consequences of mass movements, where the movement speeds and directions can be monitored in detail using the advanced technological tools available today, detailed geological mapping is essential. There are currently differing interpretations of the development and triggering factors responsible for the Kuzulu landslide. This is primarily because the geological and tectonic structure of the landslide zone and its surroundings have not hitherto been investigated in the necessary detail.

In this study, a detailed new geological map revealing the basic geological features of the region has been compiled and the characteristics of the landslide re-evaluated for comparison with previous studies. With the help of Digital Elevation Model (DEM) maps created from the satellite images of the Kuzulu Landslide area before and after the landslide, a total volumetric movement of 10.367.766 m³ is estimated to have occurred. We calculate that a net 9,372,880 m³ of material flowed from the area within the landslide boundary.

Any assessments of ground suitable for settlement with a view to urban development and planning requires a proper understanding of the geomorphological structure of the surrounding region and the engineering geological properties of the ground. The fact that Koyulhisar district centre is located both in the immediate vicinity of an active fault zone such as KAFZ and on an active landslide area emphasises this issue. Detailed geological, geomorphological, landslide susceptibility, hazard and risk maps are of great importance to prevent or mitigate the damaging consequences of earthquakes and the landslides that they may be motivated.

Keywords: *Geological mapping, geomorphology, Koyulhisar, Kuzulu landslide, volume calculation.*

GİRİŞ

Yeryuvarı üzerinde meydana gelen deprem, tsunami, volkanik faaliyet, heyelan ve çığ gibi büyük doğal afetler meydana geldikleri bölgelerdeki toplum yaşamını olumsuz etkileyerek çoğu zaman önemli can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir. Heyelan toprak, moloz veya kaya kütlelerinin yamaç aşağı hareketi olarak tanımlanmaktadır (Cruden, 1991). Heyelanlar, bu doğal afetler içerisinde insanoğlunun en yaygın olarak karşılaştığı bir türdür ve yaratmakta olduğu olumsuz etkilerden dolayı önemli bir yere sahiptir. Bilinçsizce yapılan yamaç-şev kazısı, yapay patlatmalar, yamaç eğimi yönünde bitki örtüsünün yok edilmesi, çeşitli amaçlarla arazinin yanlış kullanılması gibi doğal olmayan çeşitli faktörler de

bu tür kütle hareketlerinin daha hızlı gelişmesine katkı sağlamaktadır. Hareketin hızı ve büyüklüğü, topografik eğim, şev açısı, kayaçların süreksizlik düzlemlerinin sıklığı ve eğimlerinin yanı sıra zeminin içerdiği su miktarı ile de doğru orantılıdır. Etkin oldukları bölgelerdeki yerleşim alanlarında neden olduğu can kayıplarının yanında, kara ve demiryolları, enerji nakil hatları, baraj gölleri, tarımsal alanlar ve konutlara verdiği zararlar da ülke ekonomisi açısından oldukça önemlidir.

Dünya'nın farklı bölgelerinde birçok can ve mal kaybına neden olmuş büyük heyelan örnekleri vardır. Örneğin Schuster ve Flemming (1986), ABD, Japonya, Hindistan ve İtalya'nın her birinin heyelanlar nedeniyle yıllık ekonomik kaybının 1 Milyar Dolar veya daha fazla olduğunu

tahmin edildiğini belirtmektedir. İsviçre'nin Elm kasabasında 1881'de terkedilen bir taş ocağında 10 milyon m³ moloz ve kayadan oluşan malzemenin hareketi sonucu 115 kişi yaşamını yitirmiştir. Orta Amerika'daki Panama kanalı inşaatında planlanan toplam kazı 70 milyon m³ iken, heyelanlar sonucunda bu değer 175 milyon m³'e yükselmiştir. Semenza ve Ghirotti (2000), 1963 Vaiont heyelanında heyelan tarihinin ve jeolojik faktörlerin önemini araştırmışlardır. 1963 yılında İtalya'daki Vajont (Vaiont) barajında Jura kireçtaşlarında eski bir heyelan yeniden harekete geçmiş ve 270 milyon m³ malzeme baraj göl alanı içerisine akarak oluşturduğu su taşkını sonucunda yaklaşık 2000 kişinin boğularak ölümüne neden olmuştur (Kilburn ve Petley, 2003). And dağlarında (Peru) Huascarán tepesinde moloz kaymasından 5.000 kişi ve 1970 Peru depremine bağlı olarak aynı yerde yine moloz akması sonucu 18.000 kişi hayatını kaybetmiştir. 1971 yılında Japonya'da deprem ve Muson yağışları etkisiyle oluşan heyelan sonucu 5.000 konut yıkılmış ve 180 kişi, And dağlarında Montara vadisinde ise 1974'te kaya kayması sonucunda ise 450 kişi yaşamını yitirmiştir.

Türkiye'de ise özellikle Karadeniz, Marmara ve Doğu Anadolu bölgeleri başta olmak üzere ilkbahar aylarında artış gösteren heyelanlar, birçok bölgede ciddi can kaybının yanı sıra, ekonomik ve sosyal kayıplara da neden olmuştur. Son 50 yılda kolayca hatırlanabilen 23 Haziran 1988 Çatak (Maçka) heyelanında 65 kişi yaşamını yitirmiş ve büyük maddi kayıplar ortaya çıkmıştır. Aşırı yağıştan kaynaklanan kütle hareketlerine bağlı olarak 13 Temmuz 1995 günü Senirkent (Isparta)'te yaşanan sel ve çamur akıntısı sonucunda ise 74 kişi hayatını kaybetmiş, yüzlerce konut akan çamur altında kalmıştır (Öztürk, 2002). 1950-2023 yılları arasında heyelandan etkilenmiş konut sayısı yaklaşık 79.774, meydana gelen heyelan olayı sayısı yaklaşık 23.735 ve heyelandan etkilenmiş ve/veya etkilenmekte olan yerleşim yeri sayısı ise yaklaşık 8.277'tir. Meydana gelen

heyelanlar nedeni ile yeri değiştirilen konut sayısı ise 92.615'tir (AFAD-ARAS, 2023a ve b). Sivas ili, Koyulhisar ilçesi, Sugözü köyü'nün Kuzulu Mahallesi'nin yerleştiği alanın üst kotlarında 17.03.2005 tarihinde büyük ölçekli bir heyelanın meydana gelmesi sonucunda 15 kişi toprak altında kalarak hayatını kaybetmiş, 72 konut ise heyelandan etkilenmiştir (AFAD-ARAS, 2023a ve b). Yakın tarihte ise Ordu ili Aybastı İlçesi Sağlık Mahallesinde 15.02.2019'da meydana gelen heyelanda can kaybı yaşanmamış fakat 80'i konut olmak üzere toplam 96 yapı etkilenmiştir.

Dünyadan ve Türkiye'den verilen heyelan örneklerinden de görüleceği üzere, özellikle son yıllarda iklimsel değişimlere bağlı olarak mevsim dışı dönemlerde gerçekleşen anormal yağışların neden olduğu su ve sel baskınlarının artmasının yanı sıra suya doymun hale gelen topraklarla ilişkili gelişen heyelan sayılarında artış gözlenmektedir. Heyelan olaylarının en yoğun gözlendiği ülkelerden Çin'de 1951-1989 yılları arasında 5.000'den fazla can ve yıllık 500 Milyon Dolar ekonomik kayıp yaşanmıştır (Li ve Wang, 1992). Bu yüksek kayıplar nedeniyle heyelan riskini azaltabilmek amacıyla risk değerlendirmesi ve risk yönetimi konusunda çeşitli yaklaşımların uygulanabilirliği arayışları devam etmektedir (Dai vd., 2002). Heyelanların verdiği bu zararları en aza indirmek için son yıllarda teknolojiye gelişimlere paralel olarak elektronik cihazlar yardımıyla ve jeodezik yöntemler kullanılarak kütle hareketleri izleme çalışmalarına başlanmıştır. Küresel ölçekte uydu sayılarının artmasıyla birlikte, diğer jeodezik ölçümlere göre heyelanlar GPS ile de izlenmeye başlanmış ve ölçümlerinin yatayda 12-16 mm ve düşeyde 18-24 mm'ye kadar daha hassas biçimde ölçülebildiği görülmüştür (Gili vd., 2000). Nitekim Hastaoğlu ve Şanlı (2011) tarafından Koyulhisar kent merkezi ve çevresindeki heyelanının dikey hızlardan sapmalarını izlemek amacıyla statik GPS kullanılarak birtakım ölçümler yapılmıştır.

Türkiye'de doğal afet risk kapsamında değerlendirilen heyelanlarla ilgili son yıllarda ülke

çapındaki kurumsal çalışmalar Heyelan Yoğunluk Haritaları (AFAD-ARAS, 2023a) ve Türkiye Heyelan Envanteri Haritası (Duman vd., 2011) başlıkları altında toplanmış, basılmış ve MTA'nın web sayfasında (Çan vd., 2013) yayımlanmıştır. Tüm ülkeyi kapsayan Türkiye Heyelan Envanteri (AFAD-ARAS, 2023b; Duman vd., 2011) ve Heyelan Duyarlılık Haritaları tüm kamu kurum ve kuruluşlarının kullanımına açık durumdadır. Ayrıca güncel bazı çalışmalarla yersel ölçekte yapay sinir ağları ve sayısal işlemlerle (Gökçeoğlu vd., 2005; Yılmaz, 2009; Das vd. 2013) heyelan duyarlılık haritaları da üretilmiştir.

Bu makalede 15 kişinin can kaybına ve 72 konutun yıkılmasına neden olan 17 Mart 2005'te meydana gelen Kuzulu Heyelanı (Koyulhisar, Sivas) ele alınmıştır. Bu çalışma ile Kuzulu Heyelanı ve yakın dolayının detaylı temel jeolojik haritalaması, heyelan sahası ve yakın çevresinin ana yapısal jeolojik özelliklerinin ortaya çıkarılması, heyelan morfolojisi ve karakteristik özellikleri ile heyelan kütesinin hacimsel hesaplamalarını kapsamaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ile literatürdeki çalışmalara ait sonuçlarının tartışılması amaçlanmaktadır.

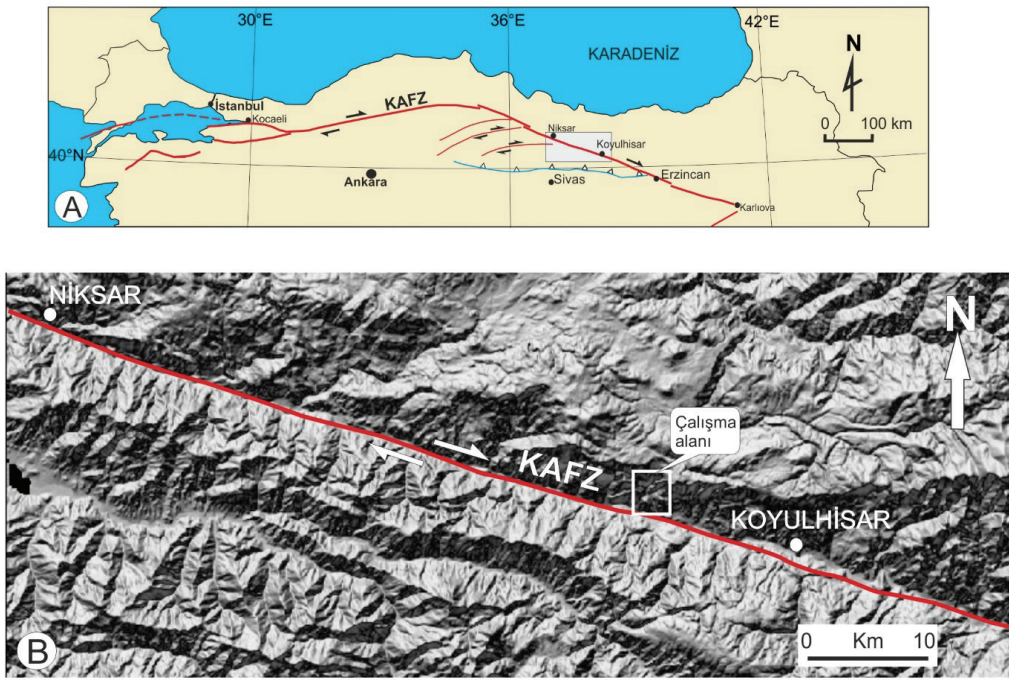
HEYELAN BÖLGESİNİN GENEL KONUMU ve ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın konusu olan heyelan 17 Mart 2005 de saat 10.30 dolayında Sivas ili Koyulhisar ilçesinin 15 km batısındaki Sugözü köyüne bağlı Kuzulu mahallesinde meydana gelmiştir. Heyelan, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ana kırığının Kelkit Çayı vadisi segmentinin kuzey kenarındaki topografik sarplık üzerinde başlamış, Kuzulu Mahallesi yerleşim alanının bulunduğu Agnus Deresi vadisi içerisine doğru moloz ve çamur akması şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 1).

Kütle hareketinin ana kaynak alanı, Kuzulu mahallesi kuzeydoğusundaki Sorkun yaylası ve güneydoğusundaki Agnus Deresi vadisinin 1.500 ile 1.650 m kotlarında güneye akan doğal su

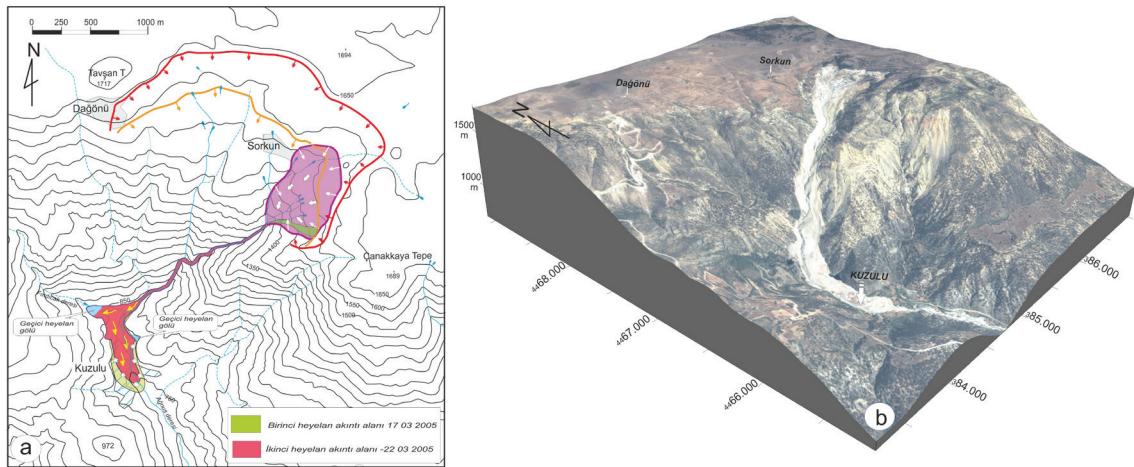
kaynakları bölgesidir. (Şekil 2). Bu kütle hareketi sonucunda 15 kişi ve birçok evcil hayvan toprak altında kalarak hayatını kaybetmiş, 72 ev hasar görmüştür.

Heyelandan hemen sonra bölgede yapılan gözlemlere ait ilk bulgular Tatar vd. (2005) tarafından ortaya konulmuştur. Bu değerlendirmeden kısa bir süre sonra Duman vd. (2005) tarafından da benzer içerikte bir değerlendirme raporu hazırlanmıştır. Erik ve Yılmaz (2005) ise Kuzulu Heyelanını bir moloz çığı olarak nitelemiştir. Daha sonra yapılan diğer bazı çalışmalarda ise heyelan bölgesinin daha çok jeoteknik ve heyelan duyarlılık özellikleri irdelenmiştir. Örneğin Gökçeoğlu vd. (2005) heyelan bölgesi ve yakın çevresinin CBS ortamında heyelan duyarlılık haritasına yönelik bir çalışma yapmıştır. Yılmaz vd. (2006) ise heyelanı jeoteknik açıdan değerlendirmiş ve heyelanın oluşumunun kireçtaşlarındaki karstik çöküntü ile ilgili olduğunu öne sürmüştür. Bu heyelanın olası nedenlerine yönelik jeoteknik açıdan bir başka çalışma ise Ulusay vd. (2007) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar heyelanın altta yer alan kireçtaşı ile onun üzerindeki oldukça altere olmuş volkanikler arasındaki gelişen bir yenilme yüzeyi boyunca, yeraltı ve eriyen kar sularının da etkisiyle geliştiğini belirtmektedir. Ulusay vd. (2007) Kuzulu heyelanı öncesi ve sonrasında, bölge ve yakın dolayında bu heyelanı tetikleyebilecek herhangi bir deprem kaydının olmadığını belirtmektedir. Kuzulu heyelanının bölge jeomorfolojisi ve KAFZ ile ilişkisini ortaya koymaya yönelik bir başka çalışma ise Yıldırım (2006) ve Karadoğan ve Yıldırım (2007) tarafından yapılmıştır. Ayrıca bu araştırmacılar, Ulusay vd. (2007)'nin aksine, Kuzulu heyelanının oluşumunun ana nedenlerinden birisinin 150 km daha doğuda Kelkit ilçesi yakınında meydana gelen 2.8 büyüklüğündeki deprem olduğunu öne sürmektedir.



Şekil 1. (A) Sağ yanıl doğrudu atımlı KAFZ'nun bölgesel konumu. (B) Kelkit Çayı Vadisi segmentinin Niksar-Koyulhisar arası morfolojisini yansıtan SYM görüntüsü ve Kuzulu heyelanının yerbulduru haritası.

Figure 1. Regional location of the NAFZ (A). DEM image illustrating the morphology of the Kelkit Stream Valley segment between Niksar-Koyulhisar and the location map of the Kuzulu landslide (B).



Şekil 2. Kuzulu Heyelan bölgesinin (a) genel topografik yapısı, eski ve yeni heyelanların ana sınırları (b) Uydu görüntüsü giydirilmiş üç boyutlu blok diyagramı.

Figure 2. General topographic structure of the Kuzulu landslide area (a), main boundaries of old and new landslides (b) Three-dimensional block diagram overlaid with satellite image.

HEYELAN BÖLGESİNİN JEOMORFOLOJİK ve JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

En batıda Saroz körfezinden başlayıp, ülkemizin kuzeyinden geçerek en doğuda Karlıova'ya (Bingöl) kadar uzanan KAFZ, genişliği yer yer 10-15 kilometreye ulaşan büyük bir makaslama zonu (Şengör vd., 2005) oluşturmaktadır (Şekil 1). Doğuya doğru gittikçe daralan bu makaslama zonu üzerinde yer alan Kelkit Çayı Vadisi, büyük ölçüde KAFZ denetiminde gelişmiş Türkiye'nin en genç jeomorfolojik oluşumlarından birisidir. Bu vadi, aynı zamanda heyelan ve toprak akması gibi kütle hareketlerinin oluşumuna uygun jeolojik, jeomorfolojik ve iklimsel özelliklere sahiptir (Sendir ve Yılmaz, 2009; Das vd., 2013). Bu deformasyon zonunda özellikle kil ara katkılı kireçtaşı, kumtaşı ve volkanotortul kayalarda yoğun ezilme ve parçalanmalar yaygın olarak gelişmiştir. Yeraltı/yüzey sularıyla etkileşimine bağlı olarak, bu bölgede yüzeyleyen kayalarda devamlı bir potansiyel heyelan tehlikesi söz konusudur. Bölgenin aktif sismik etkinlikleri de bu heyelan tehlikesini arttırıcı bir diğer etmendir. Bu türden derin çizgisel vadi oluşum bölgelerinde heyelan hareketleri sonucunda sık sık heyelan set gölleri oluşmaktadır. Bu kuşak üzerindeki en iyi örneklerden birisi Zinav deresi üzerindeki Zinav gölüdür. KAFZ'nun Kelkit Çayı Vadisi segmenti üzerinde büyük miktarda oyularak yay/yarı dairesel geometrilik topografik yapılar da gelişmiştir. Nitekim KAFZ'nun Koyulhisar-Niksar arasındaki kesiminde bu türden jeomorfolojik yapılar çok belirgindir (Şekil 1).

Kuzulu Heyelan bölgesi ve çevresini kapsayan yaklaşık 25 km²'lik alandaki topografik yükseklik 600 ile 1.850 m arasında değişmektedir (Şekil 2). Özellikle 600 ile 1.500 m kotları arasındaki topografik yapı Kelkit Çayı vadisini, 1.500 ile 1.850 m arasındaki topografik yapı ise dalgalı bir plato düzlüğünü oluşturmaktadır. Bu sarp topografik yapıyı ve Kelkit Çayı vadisi segmentinin gelişimini KAFZ ile kontrol eden bir diğer etmen ise bölgede yüzeyleyen kaya

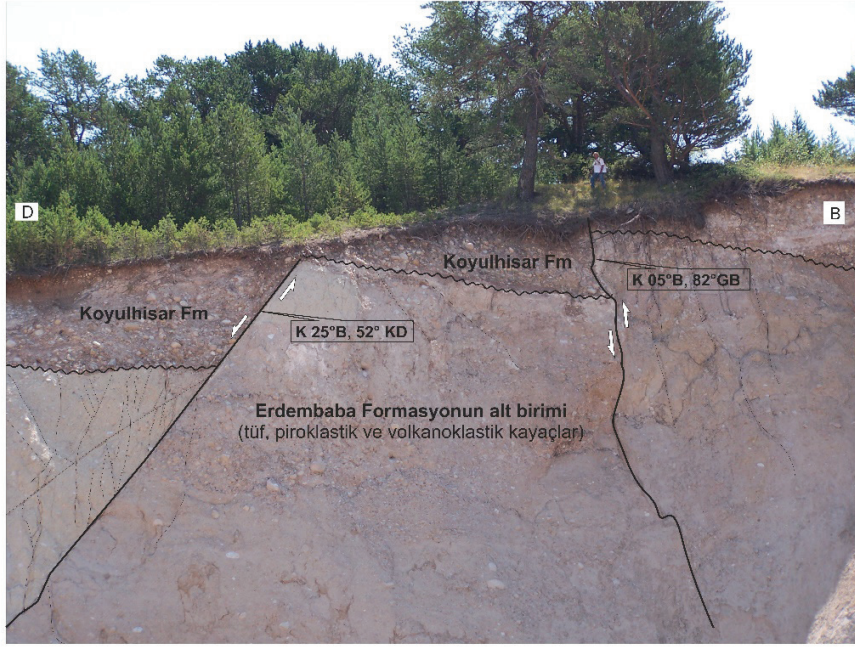
birimlerinin jeolojik özellikleridir. Heyelan bölgesindeki Kelkit Vadisinin kuzey yamacının taban kısmında yer yer tuf, aglomera, ince bazaltik lav akıntısı ile ara katkılı kırmızı renkli pelajik kireçtaşı, silttaşı, kumtaşı ve kiltası araldanmalı volkanosedimanter kayalar yüzeylemektedir (Şekil 3). İçyapısı oldukça deforme ve altere olmuş bu birim, üst kotlarda yüzeyleyen karbonat bileşimli kayalara göre daha kolay aşındığı ve ayrıştığı için vadi tabanında daha yumuşak bir topografya oluşturur. Bol Globotruncana'lı kırmızı renkli pelajik kireçtaşı tabakaları da içeren bu kayalar, Toprak (1989) tarafından Kapaklı Formasyonu olarak tanımlanmış ve Geç Santoniyen-Erken Maestrihtiyen (Geç Kretase) olarak yaşlandırılmıştır. Bu çalışmada saptanan *Globotruncana linneiana d'ORBIGNY*, *Globotruncana arca CUSHMAN*, *Globotruncana fornicata PLUMMER*, *Globotruncana contusa CUSHMAN*, *Globotruncanita stuartiformis d'ALBIEZ* planktonik foraminiferlerine ve *Orbitoides medius d'ARCHIAC*, *Omphalocyclus macroporus LAMARCK*, *Selimina spinalis İNAN* bentik foraminiferlerine göre Kapaklı Formasyonu'nun yaşı Geç Maestrihtiyen (Geç Kretase) olarak yaşlandırılmıştır. Genelde kalın katmanlı, kumlu-killi kirli beyaz, gri, sarı renkli bol makro fosil kavkılı kireçtaşlarından oluşan kaya birimi, ilk kez Terlemez ve Yılmaz (1980) tarafından Reşadiye Formasyonu'nun bir üyesi şeklinde "İğdir kireçtaşı" olarak adlandırılmıştır. Birden fazla litoloji topluluğundan oluşması nedeniyle bu kayaç topluluğu Toprak (1989) tarafından İğdir Formasyonu olarak tanımlanmıştır. Kapaklı Formasyonunun üzerinde uyumlu olarak bulunan yer yer kalın katmanlı karbonat bileşimli bu kayaç topluluğu, bölgenin sarp topografyasını oluşturan en önemli faktördür (Şekil 2 ve 3). Özellikle üst kesimlerinde yoğun alg, rudist ve lamellibrans kavkuları içeren gittikçe sığlaşan bir denizel ortamda çökelen İğdir Formasyonu'nun yaşı Toprak (1989) tarafından Geç Maestrihtiyen olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada da *Rotalia* sp. ve Miliolidae gibi fosiller gözlenmiş olup, aynı yaş benimsenmiştir.

Taban kısımlarında karbonatlı kayalardan türemiş karbonatlı-killi bir çimento ile bağlanmış köşeli çakıllar içeren, üste doğru fosil açısından fakir, kirliliği sarı renkli killi kumtaşı istifi, kısmen litolojik benzerliği nedeniyle Şihlar Formasyonu (Toprak 1989) olarak kabul edilmiştir. Özellikle İğdir Formasyonunun üzerinde Sorkun Yaylası ve güneyinde yer yer yatay konumlu olarak bulunan bol çatlaklı bu formasyon, üstte ise Erdembaba Formasyonunun alt kesimlerinde yüzeyleyen gri, pembemsi gri ve açık mor renkli dasitik/andezitik tuf, aglomera ve piroklastikleri tarafından uyumsuz olarak üzerlenir. İğdir Formasyonu ile Şihlar Formasyonu arasında bu bölgede çok belirgin bir açılmal uyumsuzluk gözlenmemekle birlikte, tabaka durumlarının farklılığı yersel bir açılmal uyumsuzluğu işaret etmektedir (Şekil 3). İnceleme alanının kuzey kesiminde sarı renkli ince-orta katmanlı kireçtaşı, kumtaşı, siltaşı ardalıktan oluşan istif Seymen (1975) tarafından Düdenyaylası Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Kıvrımlı birimlerle ardalımalı, ince-orta katmanlı yapısı ile diğer karbonatlı kayalardan belirgin olarak ayırtılabilen bu formasyon, Toprak (1989)'a göre sığ bir ortamda çökelmiş olup, yaşı da Monsiyen-Erken Tanesiyen (Orta-Geç Paleosen) dir. Düdenyaylası Formasyonu da İğdir Formasyonu gibi, Erdembaba Formasyonu'nun tuf, piroklastik ve bazaltik lav akıntıları tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir.

Erdembaba Formasyonu'nun üst kesimlerinde yüzeyleyen koyu gri-siyah renkli yer yer yoğun küresel ayrışma gelişmiş bazaltik lav akıntıları yataya yakın konumlu olup, bölgedeki plato düzlüklerini oluşturur. Bu bazaltik lav akıntısı ve hemen altındaki andezitik/dasitik tuf ve piroklastikler ilk kez Terlemez ve Yılmaz (1980) tarafından "Erdembaba Bazaltları" olarak tanımlanmıştır. Terzioğlu (1986) ise bu birimin yalnızca bazaltlardan oluşmadığını belirterek Erdembaba volkanitleri; Toprak (1989) ise yine aynı yaklaşımla Erdembaba Formasyonu olarak yeniden adlandırmıştır. Herhangi bir radyometrik yaş bulgusu olmayan Erdembaba Formasyonu'nun

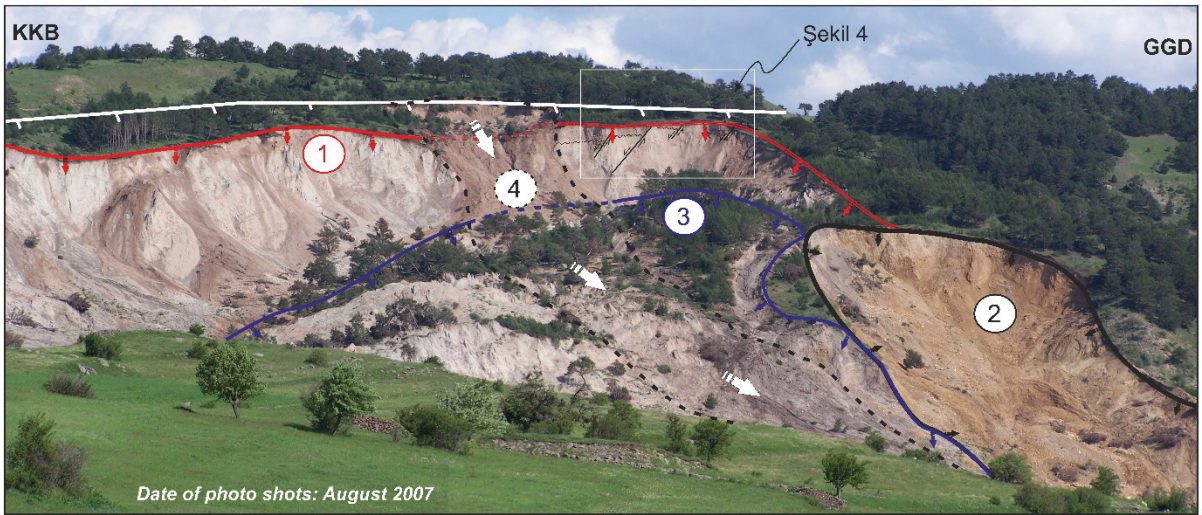
yaşı, stratigrafik ilişkiye göre Eosen'den genç Pliyo-Kuvaterner'den yaşlı olması (Toprak 1989) ve göreceli ilişkiye göre Geç Miyosen yaşlı birimlerin üzerinde gözlenmesi (Terlemez ve Yılmaz 1980; Terzioğlu 1986) gibi verilere dayanarak Pliyosen olarak kabul edilmiştir. Bölgede yüzeyleyen bir diğer kaya birimi ise çok zayıf, gevşek çimentolu çöktür bileşimli çakıl, kum, piroklastik kayaç materyali ve killi topraktan oluşmaktadır. Bu birim Kuzulu heyelanı kaynak bölgesinin hemen doğu ve güneydoğusunda yaklaşık 1,5 km²'lik bir alanda yüzeylenmektedir (Şekil 3). Bu çakılların bir kısmı fosilli Eosen ve Geç Kretase yaşlı karbonatlı kayalardan türemiştir. Özellikle andezitik ve dasitik kayalardan türemiş çakılların çok iyi yuvarlaklaşmış olduğu ve çok zayıf bir çimento ve kahverengi-kırmızı renkli killi-kumlu toprak oluşumu ile gevşek şekilde bağlandığı gözlenmektedir. Stratigrafik ilişkiye göre Pliyosen yaşlı Erdembaba Formasyonunun üzerinde bulunması nedeniyle bu gevşek çimentolu çöktür bileşimli kayaç topluluğu, benzer ilişkilere dayanarak daha önce Toprak (1989) tarafından Koyulhisar Formasyonu, yaşı ise Pliyo-Kuvaterner olarak tanımlanmıştır. Heyelanın kaynak bölgesinde kayma ile ortaya çıkan ayna yüzeylerinde bu zayıf çimentolu çakıl, kum ve toprak oluşumunun Pliyosen yaşlı Erdembaba Formasyonuna ait alttaki andezitik/dasitik tuf ve lavlardan oluşan gri renkli piroklastik kayaçlar üzerinde uyumsuz olarak yer aldığı çok net bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 4).

Koyulhisar Formasyonu'nun faylar tarafından kontrol edilen bir ortamda çökelmiş olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Özellikle ana heyelan aynası doğusunda ve güney ayna yarması üzerinde normal faylar gözlenmektedir (Şekil 4 ve 5). Sorkun yaylası kuzeyinde Pliyosen yaşlı Erdembaba Formasyonu'nun bazaltik lav akıntıları KB-GD uzanımlı normal fay bileşimli sağ yanal doğrultu atımlı bir fay tarafından ötelenmektedir (Şekil 3). Heyelanın kaynak alanı aynasında gözlenen 9 normal fayın stereografik izdüşümü yaklaşık K10°-20°B doğrultusunu göstermektedir (Şekil 6A).



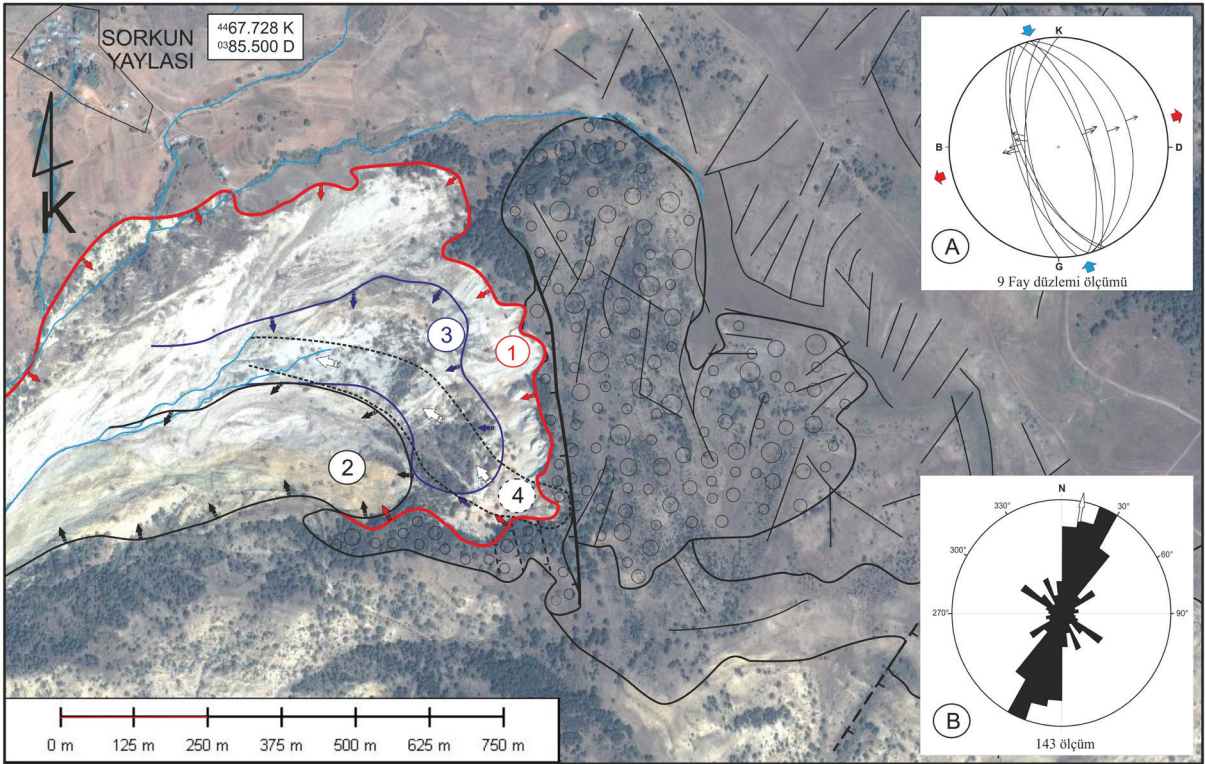
Şekil 4. Kuzulu Heyelanının güney taç düzleminde Pliyo-Kuvaterner yaşlı Koyulhisar Formasyonu ile Pliyosen yaşlı Erdembaba Formasyonu'nun alt kısımlarını temsil eden tuf, piroklastik ve volkanoklastik kayaların faylı ve uyumsuzluk ilişkisi.

Figure 4. Fault and unconformity relationship of tuff, pyroclastic and volcanoclastic rocks representing the lower parts of the Pliocene-aged Erdembaba Formation and the Pliocene-aged Koyulhisar Formation in the southern crown plane of the Kuzulu Landslide.



Şekil 5. Kuzulu Heyelanının ayna kısmında gözlenen kütle hareketlerinin ana sınırları ve aynadaki fayların görünüşü (Sayılar heyelanların oluşum sıralamasını belirtmektedir)

Figure 5. Main boundaries of the mass movements observed in the crown of the Kuzulu Landslide and the appearance of faults on the crown surface (Numbers indicate the order of occurrence of landslides).



Şekil 6. Kuzulu heyelanı ayna kısmının uydu görüntüsü ve (A) Taç kısmında gözlenen normal fayların stereografik izdüşümü ve (B) bölgede gözlenen süreksizlik düzlemlerinin gül diyagramı.

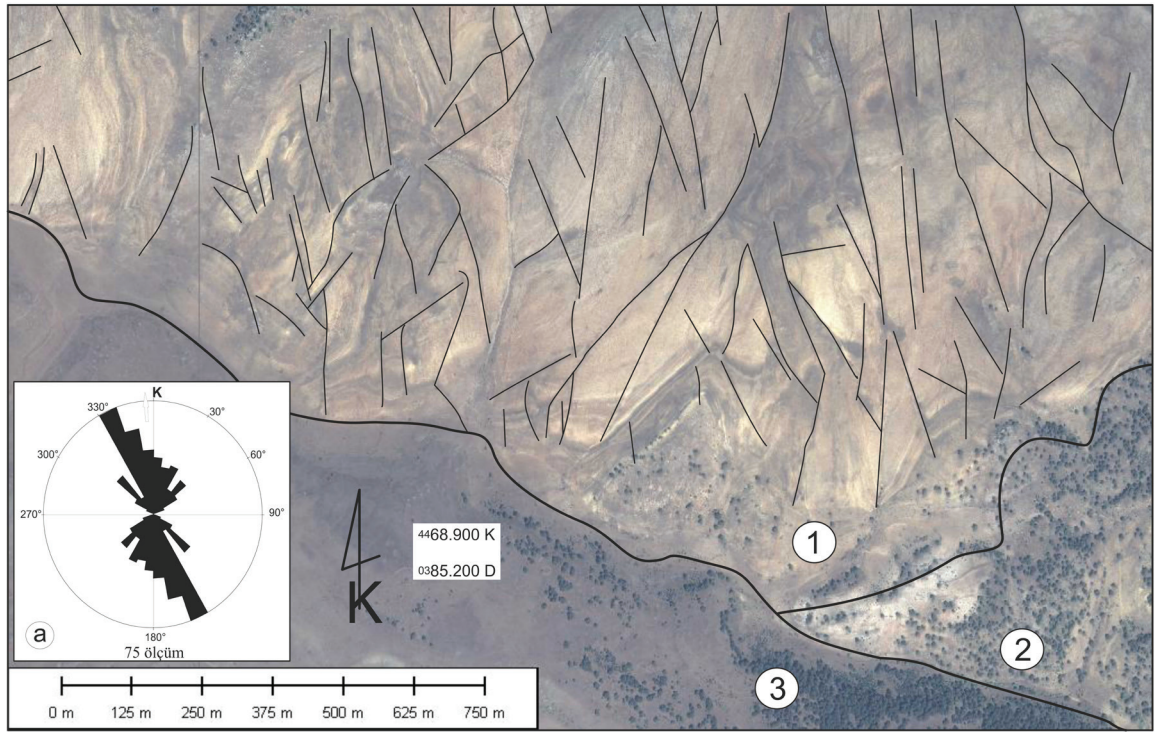
Figure 6. Satellite image of the crown of Kuzulu landslide and (A) stereographic projection of the normal faults observed in the crown and (B) rose diagram of the discontinuity planes observed in the region.

Ana heyelan aynası doğusunda kalan bölgede yüzeyleyen Pliyosen yaşlı Erdembaba Formasyonu ve Pliyo-Kuvaterner yaşlı Koyulhisar Formasyonunun uydu görüntüsü üzerindeki verilerden hazırlanan gül diyagramından bölgedeki çizgiselliğin $K10^{\circ}-30^{\circ}D$ doğrultusunda yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 6B). Bunların yanısıra KD-GB, D-B ve KB-GD uzanımlı değişik boyutta normal faylar da gözlenmektedir (Şekil 3). Bölgedeki en genç çökeller, daha çok küçük yüzlekler şeklinde normal fay sarplıkları önünde, düşen blok üzerinde birikmiş kötü boylanmalı yamaç molozu çökelleridir. Benzer şekilde inceleme alanının kuzey kesiminde yüzeyleyen Düdenyaylası Formasyonunda da çok yoğun bir kırıklı-faylı yapı gelişmiştir. Hazırlanan gül

diyagramına göre bu süreksizlik düzlemlerinin $K10^{\circ}-30^{\circ}B$ doğrultulu olduğu saptanmıştır (Şekil 7).

Kuzulu Heyelanının Karakteristik Özellikleri

Kuzulu Heyelanının kaynak alanını oluşturan plato görünümü yüksek topografyaya sahip Sorkun ve Dağönü yaylaları arasındaki bölge, Tatar vd. (2005) ve Ulusay vd. (2007)'nin de belirttiği gibi, eski bir heyelan bölgesidir (Şekil 2). Bu bölgede heyelan morfolojisini gösteren birçok yeryüzü şekli (kamasal/yay geometrili çöküntüler, küçük gölcükler, su kaynakları) ve ağaç gövdelerinde eğilme gibi yavaş akmayı gösteren düzensizlikler yaygın olarak gözlenmektedir (Şekil 2, 3 ve 5).



Şekil 7. Kuzulu Heyelan bölgesi kuzeyindeki yoğun kırıklı Düdenyaylası Formasyonu (1) ile Erdembaba Formasyonunun (2-Tüf ve Piroklastikler, 3-Bazaltik lav akıntısı) uydu görüntüsü.

Figure 7. Satellite image of the intensely fractured Düdenyaylası Formation (1) and Erdembaba Formation (2-Tuff and Pyroclastics, 3-Basaltic lava flow) in the north of the Kuzulu landslide region.

Kuzulu Heyelanı, tek türde ve tek bir hareketle sınırlı olarak gelişmiş bir kütle hareketi değildir (Şekil 5 ve 6). 17 Mart 2005'de gelişen ilk kütle hareketi sonucunda, arazide tipik bir heyelana ait yay biçimli taş bölgesi, kavisli/dairesel/kamasal kaymalı ayna düzlemi, kademeli çatlaklar, kabarma-çökme bölgeleri gibi heyelanı gösteren birçok morfolojik yapı gözlenmiştir. 17 Mart 2005 ile Ağustos 2007 dönemini kapsayan zaman dilimi içerisinde, Kuzulu Heyelanının taş kısmı ve önündeki kabarma alanında, yüzeydeki morfolojik değişimiyle çok belirgin en az 4 kütle hareketinin daha varlığı saptanmıştır (Şekil 5 ve 6). Bu kütle hareketlerinden birincisi ve en büyüğü moloz-çamur akması şeklinde 17 Mart 2005'te gelişen büyük kütle hareketidir (Şekil 5'teki 1 nolu ana ayna). Bu kütle hareketinin geliştiği ana kaynak alanında, 1.500 ile 1.650 m kotlarında yüzeye çıkan 13 adet su kaynağı

ve Sorkun yaylasının güneydoğusunda bu kaynakların beslediği güneybatıya doğru akan küçük derelerin varlığı bilinmektedir (Şekil 2). Su kaynaklarının hemen tamamı Erdembaba Formasyonu'nun alt kısmındaki gri, pembemsi gri ve açık mor renkli andezitik/dasitik tüf ve piroklastiklerin alt düzeylerinden yüzeye çıkmaktadır (Şekil 3). Daha alt kotlardaki ayrılmış killi kireçtaşı ve kumtaşından oluşan kayaların (Şıhlar Formasyonu) üst sınırına da yakın bu su kaynakları, Erdembaba Formasyonu'nun andezitik/dasitik tüf ve piroklastiklerinden oluşan kaya birimlerini suya aşırı doymun hale getirmiştir. Bu bölgedeki mevsimsel ısı değişimiyle başlayan kar erimelerine bağlı olarak yüzey ve yeraltı sularındaki süzülme de bu olguyu hızlandırmıştır. Bu süzülen suları belirli alanlara doğru drene ederek kontrol eden ve su kaynaklarını da besleyen bir diğer önemli etmen ise bölgede saptanan normal

fay ve çatlak sistemleridir. Heyelan sonrası taç kısmındaki ana aynalarda ortaya çıkan bu normal fayların K10°-20°B ve ana heyelan bölgesi doğu kısmındaki bölgede gözlenen çatlak sistemlerinin ise K10°-30°D gidişli olduğu saptanmıştır (Şekil 6). Erdembaba Formasyonu'nun alt kısmındaki bu volkanik kayaç topluluğunun suya aşırı doygun hale gelmesiyle, Erik ve Yılmaz (2005) ve Ulusay vd. (2007)'nin de vurguladığı gibi, onun altındaki ana kaya niteliğindeki Şıhlar Formasyonu ile arasındaki sürtünmeyi azaltmıştır. Sürtünmenin azalmasıyla birlikte oluşan duraysızlık sonucunda, büyük çoğunluğunu zayıf çimentolu tüf, volkanik ve piroklastik kayaçların oluşturduğu gevşek malzemenin moloz ve çamur akması şeklinde hareket etmesine neden olmuştur. Yılmaz vd. (2006) jeoteknik bakış açısına göre heyelana tamamen ayrılmış kayaçlar olarak sınıflandırılan birimin neden olduğunu belirtmiştir. Bu araştırmacılar, söz konusu heyelandan alınan malzeme örneğinin tamamen ayrılmış bazaltik kayaçlardan türemiş olduğunu ve tane boyu dağılımına göre %3 blok, %30 çakıl, %42 kum, %10 silt ve %5 kilden oluştuğunu saptamışlardır. Gökçeoğlu vd. (2005) ise genelde heyelanları tetikleyen birçok faktörün var olduğunu belirtmekle birlikte, Kuzulu Heyelanının oluşumunu bölgedeki kar erimesi ile ilişkilendirmiştir. Fakat Yılmaz vd. (2006) bu görüşten farklı olarak, Kuzulu heyelanının kireçtaşı karstındaki bir çöküntünün tetikleme sonucu oluştuğunu öne sürmektedir. Bölgede karstik çöküntüyü işaret edebilecek küçük dolin izleri bulunmakla beraber, Kuzulu heyelanının oluşumunu böyle bir mekanizma ile açıklayabilecek yüzeyde yeterli somut veri gözlenmemiştir. Heyelan alanı temelindeki kireçtaşlarının ya yataya yakın veya 20°-30° ile kuzeye doğru eğimli olduğu durum da dikkate alındığı zaman, moloz/çamur akmasının derin vadi boyunca GB'ya doğru taşınmak yerine, kaynak alanında kapalı bir çöküntü içerisine doğru yönelmesi gerekirdi. Karstik çöküntü görüşünün aksine, tipik bir heyelanda gözlenebilen taç kısmında dairesel yenilme düzlemleri, kabarma-çökme yapıları ve tansiyon çatlakları gibi belirteçler birçok araştırmacı (Örneğin Tatar vd.,

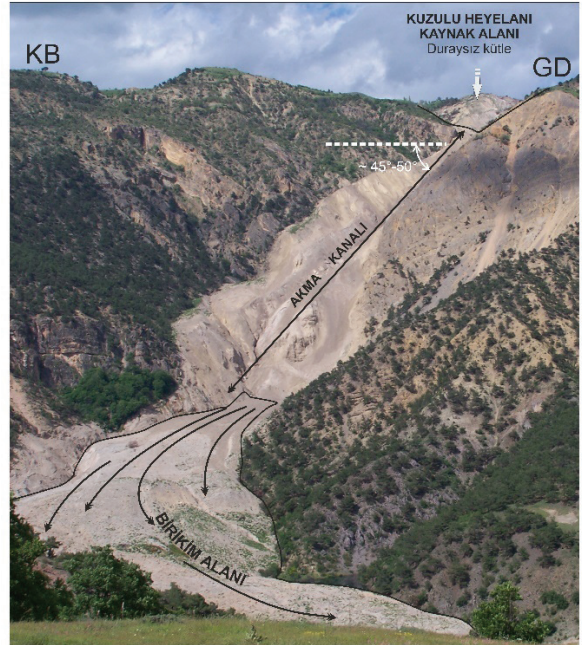
2005; Gökçeoğlu vd., 2005; Ulusay vd., 2007) tarafından da gözlenmiştir.

Sorkun yaylası civarında yaklaşık 1.450 ile 1.650 m kotundaki bir bölgeden, yer yer 45°-50°lik eğime ulaşan dar ve derin bir vadi boyunca 10 milyon m³ hacmindeki toprak ve moloz kütlesi 2,5-3,0 km taşınarak vadi içindeki Kuzulu mahallesinin büyük bir bölümünü toprak altında bırakmıştır (Şekil 2a ve 3). Kuzulu heyelanının taç kısmı ile topuk kısmı arasındaki yatay-düşey uzaklık ve akan kütlelerin taşındığı topografik yapının özellikleri, tipik bir heyelandan önemli farklılıklar gösterir. Heyelanın taç bölgesi ile topuk, tipik bir dolu dolusavağa benzer yaklaşık 2,5 km uzunluğunda tamamen kireçtaşları içerisinde gelişmiş 45°-50°lik eğimli dar ve derin bir vadi ile birbirine bağlanmaktadır (Şekil 8). Taç bölgesinin en alt noktası (1.450 m) ile topuk bölgesinin en yüksek noktası (850 m) arasında yaklaşık 600 m'lik yükselti farkı vardır. Vadi içerisine akan bu kütlelerin en uç noktasının taban kotu Kuzulu Mahallesi içerisinde 754 metre iken, akmanın son bulduğu topuğun gerisinde tavan kotu yaklaşık 850 m dolayındadır. Heyelanın oluştuğu vadiye boşalan daha düşük kotlardaki yan dere kollarından katılan suların etkisi sonucunda akan moloz kütlesi suya aşırı doygun hale gelmiştir. Ayrıca heyelan sonrasında, kütle akmasının gerçekleştiği vadi içerisinde de yeni su kaynakları oluşmuştur. Vadinin batı yamacındaki Fındıcak deresi ağzında geçici heyelan set gölü oluşmuştur (Şekil 9). Göl alanından vadiyi dolduran malzeme içerisine doğru sızan su, akan kütleli suya daha da doygun hale getirmiş ve riskli bir durum yaratmıştır. Bu heyelan set gölü, heyelanı takip eden ikinci günde vadinin batı kenarında önce yüzeysel akış şeklinde başlayan daha sonra doğal olarak gelişen bir dere yatağı boyunca sel ve çamur akması şeklinde boşalmaya başlamıştır. Ancak ilk heyelanda kaynak bölgesinde kabarmış ve duraysız durumdaki 2-3 milyon m³ hacme sahip kütle 22 Mart 2005'te ikinci bir heyelan şeklinde ilk heyelan kütlelerinin üzerine akmıştır (Şekil 9).

Yan dere kollarından gelen suların ve yeni oluşan su kaynaklarının da etkisiyle vadi içerisine

ilk heyelanda birikmiş olan moloz ve çamur kütle, ikinci heyelanla akan moloz ve çamur akmasının yüküyle birlikte daha hızlı ilerlemiştir. Bu hareket sonucu topuk kısmın ön cephesi 50 m kadar daha güneye doğru ilerlemiş (Şekil 9) ve vadi içinde daha önce hasar görmemiş bazı evler de toprak/moloz akması altında kalmıştır. 22 Mart tarihinde meydana gelen bu ikinci küçük çaplı heyelan sonrasında vadinin doğu yamacında ikinci bir heyelan set gölü daha oluşmuştur (Şekil 9).

Kuzulu heyelanının hemen ardından sahada yapılan ilk gözlemlere göre Tatar vd. (2005) heyelanın toplam hacmini yaklaşık 10-12 milyon m³ ve Gökçeoğlu vd. (2005) ise 12,5 milyon m³'ten fazla malzemenin yer değiştirdiğini öngörmüşlerdir. Gözlemlere dayalı bu hacimsel büyüklüklere göre, Kuzulu heyelanı 5 milyon m³'ün üzerinde bir hacme sahip olması nedeniyle Fell (1994) tarafından yapılan sınıflama kapsamında "aşırı büyük heyelan" sınıfına girmektedir.



Şekil 8. Kuzulu Heyelanının kaynak alanı, akma kanalı ve birikme alanı

Figure 8. Source area, flow channel and accumulation area of the Kuzulu Landslide.



Şekil 9. Kuzulu Heyelanının 1. ve 2. Moloz akmalarının vadi içerisindeki alansal yayılımı ve oluşan geçici iki heyelan set gölünün görünümü

Figure 9. Areal distribution of the 1st and 2nd debris flows of the Kuzulu Landslide in the valley and the appearance of two temporary landslide lakes.

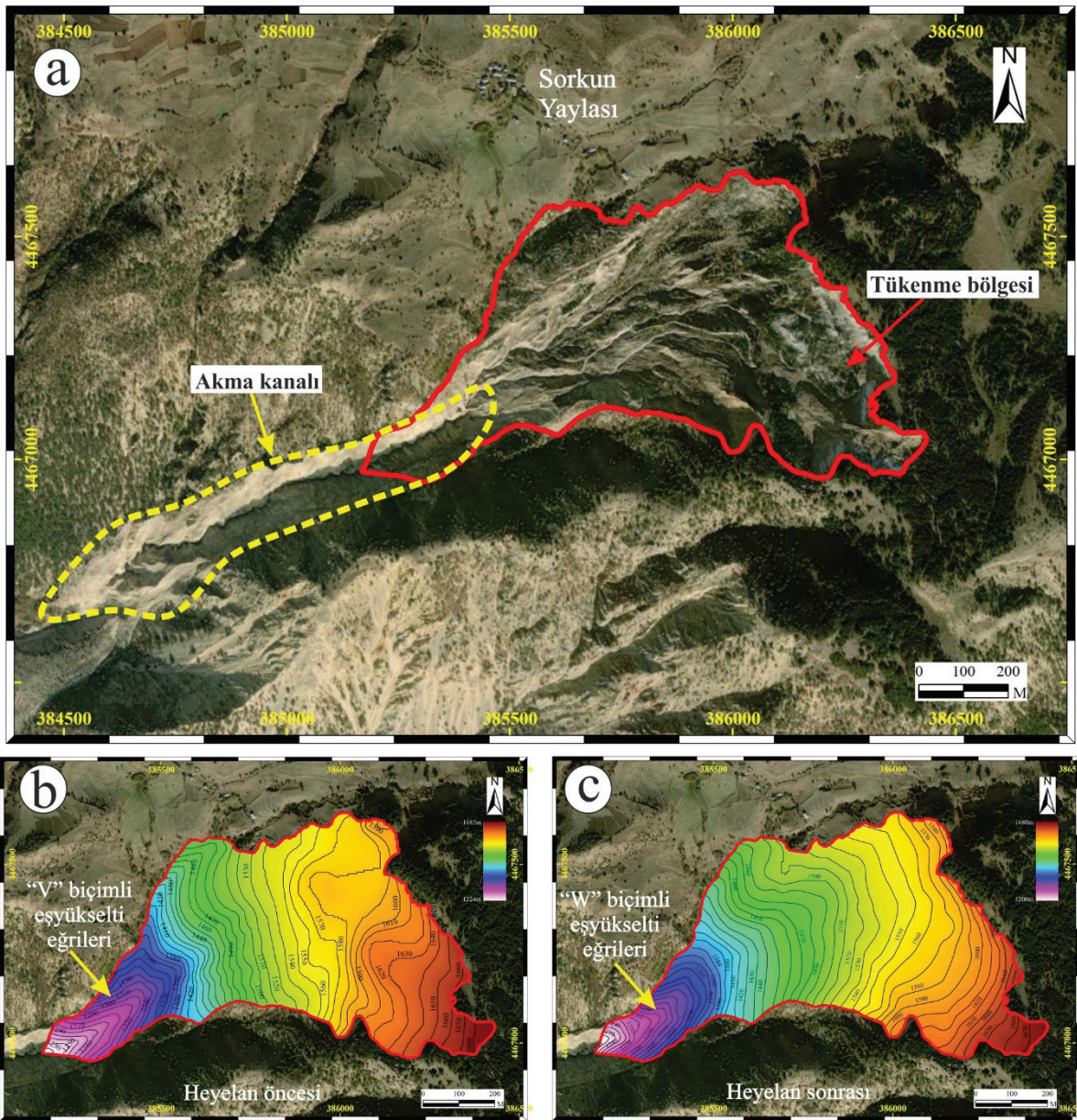
İlk iki heyelandan sonra kaynak bölgesindeki 10 milyon m³ (Tatar vd., 2005) üzerindeki gevşek malzemenin yeni heyelan oluşturma riski uzun süre devam etmiştir. Özellikle 1 nolu ayna önündeki kabarma bölgesindeki malzeme, tamamen vadi içerisine boşalmaktan daha çok, daha kısa mesafe ve daha az hacimli hareketlerle kaynak bölge ucuna doğru zaman içerisinde hareket etmiştir (Şekil 5 ve 6'daki 3 nolu bölge). Bu bölgede önceki heyelan hareketlerini de üzerleyen daha küçük hacimli hareketlerin de gelişmiş olduğu arazi gözlemleriyle saptanmıştır (Şekil 5 ve 6'daki 4 nolu bölge).

Heyelanın Hacimsel ve Alansal Boyutu

Bir heyelanın alansal ve hacimsel olarak gerçek boyutunu hassas bir şekilde bilgisayar ortamında hesaplamak için bölgenin sayısal verilerini oluşturmak amacıyla izlenen yöntemin temel yaklaşımları şöyle özetlenebilir. Düzensiz topografyaya sahip bölgelerdeki hacim hesaplamaları, bilgisayar tabanlı paket programlar yardımıyla çok hassas bir şekilde yapılabilmektedir. Bu programlarla yapılan hesaplamaların ana veri girdisi söz konusu bölgelerin SYM verileridir. SYM verileri, çeşitli saha çalışmalarından (GPS taramaları), uzaktan algılamadan (uydu, hava, radar verileri vb.) ve laboratuvar tekniklerinden (sayısallaştırılmış topografik ve jeolojik haritalar) üretilebilmektedir (Florinsky, 2012). Uydu teknolojisinin de gelişmesine paralel olarak hassas şekilde elde edilen SYM'ler kullanarak, büyük boyutlu bir kütle hareketinin öncesinde ve sonrasındaki morfolojik değişikliklerin hem alansal boyutu hem de hacimsel miktarı kolaylıkla saptanabilmektedir. Hacim hesaplamalarında elde edilen sonuçların doğruluğu heyelan öncesi ve sonrasına ait SYM verilerinin aynı kaynaktan (uydu sensörü ve/veya hava fotoğraflarından) üretilmiş olmasına bağlıdır.

17 Mart 2005 Kuzulu Heyelanının hacim hesaplamasında kullanılan heyelan öncesi ve

sonrasına ait SYM verileri T.C. Milli Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü'nün 1/25.000 ölçekli sayısallaştırılmış topografik haritalarından üretilmiştir. Bu çalışmada eşyüksele haritaları ve hacim hesaplamaları için ArcGIS10.1 ve Surfer10 yazılımı kullanılmıştır. Hesaplama kullanılan ana sınırlar, yüksek çözünürlüklü GoogleEarth görüntüsü üzerinde Şekil 10a'da gösterilmektedir. Heyelan alanının heyelan öncesi ve sonrasına ait 10 metre aralıklı eşyüksele eğrileri heyelan öncesi ve sonrası SYM verilerinden elde edilmiştir (Şekil 10b ve c). Bu şekillerden de görüleceği üzere arazideki heyelan öncesi ve sonrasında ortaya çıkan morfolojik farklılık 10 m aralıklı eşyüksele çizgilerinin biçimlerinden de açıkça görülmektedir. Ağnus Deresi'nin heyelan öncesi keskin "V" biçimli vadi tabanı, heyelan malzemesinin akışı sırasında kazınmasına bağlı olarak, Şekil 10c'de görüldüğü gibi, heyelan alanının üst kotlarında daha yumuşak dalgalı bir biçim kazanmıştır. İki eşyüksele haritası arasındaki fark, esas olarak heyelan alanının orta kısmı ile güneybatısında çok belirgin olarak görülmektedir. Özellikle Şekil 10b'deki sınırın güneybatısındaki vadi içindeki keskin "V" biçimli vadi tabanı, Şekil 10c'deki "W" biçimli eşyüksele çizgilerinin üst kotlara doğru "U" şeklinde yumuşak bir vadi tabanına dönüşmüştür. Hacim hesaplaması, heyelan öncesi ve sonrasına ait SYM verilerinden elde edilen yüzeyler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Heyelan alanında yer değiştiren (kayan ve kaban) kütle hacimsel ve alansal büyüklüğüne ait sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre toplam heyelan hacmi 10.367.766 m³ olarak hesaplanmıştır. Toplam hacmin 9.372.880 m³'ü vadi tabanından akarak Agnus Deresi içini doldurarak Kuzulu yerleşim alanının üzerini örtmüş (Şekil 8 ve 9) ve 994.886 m³ malzeme de ana heyelan bölgesinde kabarmış biçimde birikmiştir. Kuzulu Heyelanı hacimsel büyüklüğü bakımından Türkiye'de meydana gelen en büyük heyelanlardan birisidir.



Şekil 10. a) Kuzulu Heyelan bölgesinin GoogleEarth görüntüsü üzerindeki ana sınırları, b) Heyelan öncesi eşyükselti haritası c) Heyelan sonrası eşyükselti haritası

Figure 10. a) The main boundaries of the Kuzulu landslide region on the GoogleEarth image. b) Pre and c) post-landslide contour map

Çizelge 1. Tükenme/Kaynak bölgesindeki heyelan öncesi ve sonrası yüzeylerin hacimsel hesaplamaları.

Table 1. Volumetric calculations of the pre-and post-landslide surfaces in the source/depletion zone.

Kesilmiş Yüzey Alanı	Kesilmiş Hacim	Dolgu Yüzey Alanı	Dolgu Hacmi	Toplam Hacim Volume	Toplam Alan
0,3869 km ²	9.372.880 m ³	0,0967 km ²	994.886 m ³	10.367.766 m ³	0,4836 m ²

TARTIŞMA

Kuzey Anadolu Fay Zonu içerisinde gelişen Kelkit Çayı vadisindeki birçok yerleşim yeri, yüksek deprem tehlikesinin yanı sıra, aynı zamanda heyelan ve su taşkını türünden doğal afetler açısından da büyük risk taşımaktadır. Kelkit Çayı vadisi boyunca, Kuzulu köyünün bulunduğu alanın jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri, heyelan gelişimi için gereken hazırlayıcı ve tetikleyici değişkenlerin birçoğunu bir arada bulduran bir bölgedir. Yıldırım (2006) heyelan öncesine yakın bir periyot içinde en yakını 150 km doğuda en büyüğü 3,1 olan birkaç mikrosismik etkinlikten bahsetmekte, Karadoğan ve Yıldırım (2007) ise suya doymuş hale gelmiş malzemenin akmasıyla oluşan bu heyelanın ana nedeni olarak 150 km doğudaki 2,8 büyüklüğündeki bir depremin varlığını öne sürmektedir. Her iki çalışmada bahsedilen bu mikrodepremlerin bölgedeki bu heyelanı tetikleyecek yeterli mesafeye ve büyüklüğe sahip olmadıkları düşünülmektedir. Ayrıca bu heyelan bölgesinin yüksek sismik tehlike taşıyan bir bölge olması nedeniyle, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Deprem Araştırma Enstitüsü'nün kayıtlarında heyelan öncesi bir dönemde Kuzulu Heyelanına yakın bir bölgede gelişimi tetikleyici rol oynayabilecek mikro düzey de olsa, herhangi bir sismik etkinlik saptanmamıştır.

Önceki çalışmalarda, özellikle heyelan bölgesinin içinde kalan alandaki heyelan öncesine ait uydu görüntüleri ve topografik haritalar üzerinde dolin, uvala gibi karstik yapılardan ve bu verilerden yola çıkarak heyelanı tetikleyen karstik oluşumlar olduğu öne sürülmüştür (Yılmaz vd., 2006). Ancak heyelan bölgesi ve hemen çevresinde heyelanı tetikleyecek boyutta bu yapıların varlığı gözlenmemiştir.

Bölgenin sarp topografyaya sahip olması nedeniyle, çeşitli araştırmacılar tarafından o günün koşullarında yapılan mevcut jeomorfoloji ve jeoloji haritalarında tanımlanan yapı, litoloji ve formasyonların adlama ve sınırlarında yapılan saha çalışmalarında farklılıklar olduğu

gözlenmiştir. Bu farklılıklar nedeniyle, heyelanın oluşumunu tetikleyebilecek başka yapıların olup olmadığını ortaya koyabilmek amacıyla, bölgede yeni ve detaylı bir jeoloji haritasının yapılmasına gereksinim duyulmuştur. Daha önceki çalışmalarda ortaya konulmayan yeni jeolojik yapıların varlığının saptanmış olması, daha önce yapılmış bazı yorumların da yeniden gözden geçirilmesi gerekebileceğini göstermiştir. Heyelanın taç bölgesinde ortaya çıkan ayna düzlemlerinde gözlenen faylanmalar ve çevrede yaygın olarak gelişmiş çatlak sistemlerinin yanı sıra 1/25.000 ölçekli topografik harita üzerinde gözlenen çok sayıda su kaynaklarına eklenen kar suları, Erdembaba Formasyonunu oluşturan kaya birimlerini suya aşırı doymuş hale getirip ilk kütle hareketini tetiklemiştir. 17 Mart'ta meydana gelen ana heyelandan bir süre sonra yüzey ve kar sularının kalan bir kısım malzemeyi de yine suya doymuş hale getirmesiyle 22 Mart'ta ikinci bir kütle akma hareketine neden olmuştur. Bunu takip eden üçüncü ve dördüncü heyelanın izleri kaynak alan üzerinde net olarak gözlenmiştir. Tüm bu gözlem ve bulgular süreksizlik düzlemlerinden süzülen suların ana heyelanın başlıca tetikleyicisi olduğunu göstermektedir. Kuzulu mahallesi üzerine akan ve can ve mal kaybına yol açan bu malzeme, bir dolusavak gibi yukarıdan akışı sırasında dere yatağındaki karbonatlı kayaçlarını parçalaması sonucunda vadi yamaçlarında yüksek debili yeni su kaynaklarını açığa çıkarmıştır. Bu su kaynaklarından ve yukarıdan süzülen sular Kuzulu Mahallesi yerleşim alanının üzerini örten malzemenin önünü kapatması nedeniyle 2 heyelan seti gölü oluşmuştur. Bu malzemenin suya daha da aşırı doymuş hale gelmesi sonucunda heyelan gölü dolup yüzeyden akışa geçerek adeta çamur akması şeklinde yeniden taşınmıştır. Gökçeoğlu vd. (2005) ise eriyen kar suları dışında bu heyelanın oluşumunu tetikleyici başka bir etmenin olmadığını belirtmektedir. Yüzey ve kar sularının drenajına neden olan jeolojik formasyon ve yapılarının varlığının bu heyelanın oluşumundaki rolü de göz ardı edilmemelidir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çalışma alanında, arazi çalışmalarıyla formasyon sınırları ve jeolojik yapılar yeniden gözden geçirilmiş ve tespit edilen faylar dikkate alınarak heyelan bölgesine ait yeni bir detaylı jeolojik haritalama yapılmıştır.

Saha çalışmaları sırasında yapılan gözlemlerde güncel heyelan alanına yakın kısımlarda Erdembaba Formasyonunun alt kısımlarındaki piroklastik kayalarda gelişen yay biçimli eski heyelan yüzeyleri üzerinde ağaç gövdelerinin eğim kazanmış olması Kuzulu heyelanı dışında daha önce gelişmiş daha büyük başka bir heyelanın varlığını da göstermektedir. Uydu görüntüleri ve arazi gözlemleri ile belirlenen çizgiselliklere ait analizlerle heyelan bölgesinin kuzeyinde KB-GD, doğusunda ise KD-GB doğrultulu süreksizliklerin baskın olduğu gül diyagramları ile ortaya konulmuştur. İlkbahar mevsiminin etkisiyle birlikte, bu süreksizlikler vasıtasıyla, yeraltı ve yüzey sularının heyelan bölgesini beslediğini göstermektedir. Özellikle heyelanın taç/kaynak alanında yüzeyleyen tamamen ayrılmış piroklastik kayaların çevrede yoğun olarak gelişmiş çatlak sistemleri ve normal faylar içerisinde dolaşan yüzey ve yeraltı suları tarafından doygun hale gelmesi sonucunda Kuzulu Heyelanı'nın geliştiğini işaret etmektedir.

Jeolojik ve jeomorfolojik hazırlayıcı faktörlerle birlikte hızlı kar erimesi sonucu volkanik/piroklastik birimlerin akması şeklinde gerçekleşmesi ile oluşan Kuzulu Heyelanında toplam hareket eden kütle hacmi 10.367.766 m³ olarak hesaplanmıştır. Heyelan sınırları içerisinde kalan bölgeden net olarak 9.372.880 m³'lük bir malzemenin aktığı hesaplanmıştır. Ana heyelanın hemen ardından taç bölgesi üzerinde ve kenarında birçok küçük geçici su gölcüklerinin oluşması 17 Mart 2005 tarihinden sonra meydana gelen 3 heyelanın da hazırlayıcısı olmuştur. Heyelan bölgesinin mevsimsel olarak yoğun yağış alan bir coğrafyada bulunması nedeniyle izleyen zaman sürecinde topografik dengeye ulaşıncaya kadar zamanla azalan bir şekilde malzeme akması devam etmiştir.

Bu çalışma, depremlerden sonra insanoğlunun en çok karşılaştığı doğal afetlerden olan heyelanların yorumlanmasında detaylı olarak yapılması gereken jeolojik haritalama çalışmalarının önemini ortaya koymaktadır. Kentsel planlama ve yerleşime uygunluk açısından yapılacak çalışmalarda sadece yersel uygunluktan başka, çevreleyen bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik yapısının da önemli olduğunu göstermektedir. Koyulhisar ilçe merkezinin KAFZ gibi aktif bir fay zonunun hemen yakınında ve aktif bir heyelan üzerinde olması, buna tipik bir örnektir. Ayrıntılı jeolojik, jeomorfolojik, heyelan duraylılık haritalarının yapılması deprem ve heyelan öncesi ve sonrasında oluşabilecek her türlü zararları önleme açısından büyük önem taşımaktadır.

EXTENDED SUMMARY

Major natural disasters, such as earthquakes, tsunamis, volcanic eruptions, landslides, and avalanches, have a severe impact on human life in regions of tectonic instability. These disasters often cause a significant loss of life and property and can be a demanding challenge for the affected communities attempting to recover from the disaster. Landslides are among the most common natural disasters and comprise mass movements of one or more soil/rock debris flows sliding on circular or planar surfaces. Movements range from slow soil creep under gravity to rapid movements triggered by earthquakes or exceptional rainfall. Anthropogenic factors such as unconscious slope-slope excavation, artificial blasting, destruction of vegetation in the direction of the slope, or other misuse of land can also contribute to mass movements. The speed and magnitude of these movements are a function of the topographic slope, the slope angle, and the abundance and angle of the discontinuity planes in the bedrocks, with water usually being an essential lubricant.

In addition to the loss of life caused to settlements subject to landslides, the damage they cause to roads and railways, energy transmission

lines, dam lakes, agricultural areas and houses are important for their impact on the regional economy. To minimise this damage, potential landslides can now be monitored with electronic devices and a range of geodetic instruments. Furthermore, the increase in satellite coverage around the world has enabled the use of GPS to monitor landslides with a potential data coverage that surpasses ground geodetic measurements. These observations permit an accuracy of ground measurement to be achieved on a scale up to 12-16 mm horizontally and 18-24 mm vertically (Gili et al., 2000).

A large and complex landslide occurred in the Kuzulu neighbourhood of Sugözü village, 15 km west of Koyulhisar (Sivas, Turkey) on March 17th, 2005, at around 10:30 am. This landslide, which was mostly in the form of debris and mud flow, moved over the Kuzulu settlement area in the valley in a very short time and 15 people lost their lives (Figure 9). The landslide began on the steep slope of the northern edge of the Kelkit Stream valley, a landscape feature lying along the main fracture of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ). Debris and mud from the landslide flowed into the Agnus Stream valley where the Kuzulu settlement is situated (Figure 2 and 3).

Within Turkey, the NAFZ commences in the Saroz Bay region in the far west, passes through the north of the country and extends to Karlıova (Bingöl) in the east, forming a major intra-continental shear zone with a width locally reaching up to 10-15 kilometres (Şengör et al., 2005). The Kelkit Stream Valley, located on a narrow shear zone, is a young geomorphic feature controlled by the NAFZ with a topography and local climate likely to favour mass ground movement. However, the Kuzulu landslide zone is not a simple mass movement limited to a single phase of activity. Instead, at least 4 other large flow movements have occurred in this region between 17 March 2005 and August 2007 (Figure 5). One of the most important factors that initiated and accelerated this landslide was the presence

of surface and groundwater seepage from melting snow, using the intense network of discontinuities and normal fault planes observed in and around the crown region (Figures 4, 6 and 7). These waters saturated the highly altered volcanic rocks and lubricated the failure between the unconsolidated surface cover and the underlying limestone and altered volcanic rocks.

As noted by Tatar et al. (2005) and Ulusay et al. (2007), the elevated region between the Sorkun and Dağönü plateaus constituted the source area of the Kuzulu Landslide (Figure 2). In this region, many landforms are present, indicating slow ground creep including depressions with wedge/arc geometries, small ponds and the bending of tree trunks. An analysis of the lineaments determined by satellite images and field observations by rose diagrams reveal that NW-SE oriented discontinuities are dominant in the north and NE-SW oriented discontinuities in the east of the landslide zone (Figures 6 and 7). Ground and surface waters fed the landslide zone through these discontinuities, an effect especially important during the Spring melt. Surface and groundwater circulating within the dense network of fracture systems and normal faults in the crown/source area initiated the Kuzulu landslide (Figure 4).

In previous studies, a landslide volume of 10-12 million m³ was reported by Tatar et al. (2005) and 12.5 million m³ by Gökçeoğlu et al. (2005). These volumes fall into the classification of "extremely large landslides" according to the criteria of Fell (1994). In this study, the volume was calculated by comparing DEM data before and after the landslide from 1/25,000 scale digitised topographic maps produced by the Turkish General Directorate of Mapping under the Ministry of National Defence. Before the landslide, the floor of the Agnus Stream had a sharp "V" shape, but after the landslide, the upper elevations of the area affected by the landslide achieved a softer, undulating shape. This is due to the landslide material scraping and moving during the flow and







can be seen in Figure 10c on the relief maps. The difference between the two elevation maps is very clear in the centre and south-west of the landslide area. In particular, the sharp “V” shaped valley floor in the valley to the southwest of the boundary in Figure 10b has turned into a soft “U” shaped valley floor towards the upper elevations of the “W” shaped escarpment lines in Figure 10c. The volume calculation determined from the difference between the surfaces before and after the landslide was performed using Surfer10 software. According to the results, 9,372,880 m³ of the total volume flowed from the valley floor and filled the Agnus Stream and covered the Kuzulu settlement area, while 994,886 m³ of material accumulated in the main landslide area. Together this yields the grand sum of 10,367,766 m³ of material displaced by the landslide. The Kuzulu Landslide is one of the largest landslides in Turkey in terms of its volumetric size.

This study illustrates the importance of detailed geological mapping coverage in the interpretation of landslides where geological and geomorphological constraints are the primary controls, together with climate. When properly evaluated, it can be shown whether a settlement is feasible and correspondingly, whether urban planning is worthwhile. The Koyulhisar district centre located in the immediate vicinity of the NAFZ, an active intracontinental transform fault zone combining earthquake risk with impressive topography, is an ideal example for such a study.

KATKI BELİRTME

Heyelan ile ilgili arazi çalışmaları sırasında lojistik destek sağlayan Sivas Valiliği, Koyulhisar Kaymakamlığı ve AFAD Sivas İl Müdürlüğüne teşekkür ederiz. Ayrıca alınan kayaç örneklerinden paleontolojik yaş determinasyonlarını yapan Mersin Üniversitesi Öğretim üyeleri Prof. Dr. Nurdan İnan ve Prof. Dr. Kemal Taşlı'ya katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

ORCID

- Halil Gürsoy  <https://orcid.org/0000-0003-4398-871X>
Orhan Tatar  <https://orcid.org/0000-0001-9579-1607>
Bekir Levent Mesci  <https://orcid.org/0000-0002-7983-3923>
Oktay Canbaz  <https://orcid.org/0000-0002-8161-1326>
Ali Polat  <https://orcid.org/0000-0002-9147-3633>
Zafer Akpınar  <https://orcid.org/0000-0002-5890-6900>

KAYNAKLAR / REFERENCES

- AFAD-ARAS, (2023a). https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/3506/xfiles/96-2014060215311-heyelan_yogunluk_a1_olceksiz.pdf (Erişim tarihi 20 Ekim 2023)
- AFAD-ARAS, (2023b). <https://www.afad.gov.tr/afet-risk-azaltma-sistemi-aras>. Afet Risk Azaltma Sistemi web sayfası (Erişim tarihi 5 Ekim 2023)
- Cruden, D. M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.
- Çan, T., Duman, T. Y., Olgun, Ş., Çörekçiöğlü, Ş., Karakaya Gülmez, F., Elmacı, H., Hamzaçebi S. ve Emre, Ö. (2013). Türkiye Heyelan Veri Tabanı. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, 11-13 Kasım 2013, Ankara.
- Dai, F. C., Lee C. F. & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64, 65–87.
- Das, H. O., Sönmez, H., Gökçeoğlu, C. & Nefeslioğlu, H.A. (2013). Influence of seismic acceleration on landslide susceptibility maps: a case study from NE Turkey (the Kelkit Valley). *Landslides*, 10, 433–454.
- Duman, T., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A. ve Sönmez H. (2005). 17/03/2005 Kuzulu (Sivas-Koyulhisar) Heyelanı. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi ve Hacettepe Üniversitesi*. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/depem/pdf/sugozu_heyelani.pdf
- Duman, T. Y., Çan, T. ve Emre, Ö. (2011). *1/1.500.000 ölçekli Türkiye Heyelan Envanteri Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayınlar Serisi-27, Ankara, Türkiye. ISBN: 978-605-4075-84-3
- Erik, D. ve Yılmaz, H. (2005). 17.03.2005 Kuzulu (Sugözü Koyulhisar Sivas) moloz çığı. *58. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özetleri Kitabı* (s.: 179-180). 11-17 Nisan 2005, Ankara.

- Fell, R. (1994). Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 261–272. <https://doi.org/10.1139/t94-031>
- Florinsky, I. V. (2012). Digital Terrain Modeling: A Brief Historical Overview, Chapter-1. In I. V. Florinsky (Ed.), *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology* (pp.:1-4). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804632-6.00001-8>
- Gili, J. A., Corominas, J. & Rius, J. (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring, *Engineering Geology* 55, 167-192.
- Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Nefeslioğlu, H., Duman, T.Y. & Çan, T. (2005). The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity. *Engineering Geology*, 81(1), 65–83.
- Hastaoğlu, K.Ö. & Şanlı, D. U. (2011). Monitoring Koyulhisar landslide using rapid static GPS: a strategy to remove biases from vertical velocities, *Natural Hazards*, 58, 1275-1294. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9728-5>
- Karadoğan, S. & Yıldırım, A. (2007). Fault zone landslides: The Effects and Geomorphological Characteristics of Koyulhisar (Sivas-Turkey) Landslide, March 2005. *International Symposium on Geography, Environment and Culture in the Mediterranean Region* (pp.: 193-200). 5-8 June 2007, Kemer-Antalya/Turkey.
- Kilburn, C. R. J. & Petley, D.N. (2003). Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy. *Geomorphology*, 54, 21–32.
- Li, T. & Wang, S. (1992). *Landslide Hazards and their Mitigation in China*. Science Press, Beijing, 84 pp.
- Öztürk, K. (2002). Heyelanlar ve Türkiye'ye etkileri. *G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22(2), 35-50.
- Semenza, E. & Ghirelli, M. (2000). History of the 1963 Vaiont slide: the importance of geological factors. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 59, 87–97 <https://doi.org/10.1007/s100640000067>
- Schuster, R. L. & Fleming, R. W. (1986). Economic losses and fatalities due to landslides. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 23(1), 11–28.
- Sendir, H. & Yılmaz I. (2002). Structural, geomorphological and geomechanical aspects of the Koyulhisar landslides in the North Anatolian Fault Zone (Sivas, Turkey). *Environmental Geology*, 42, 52-60. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0528-9>
- Seymen, İ. (1975). *Kelkit Vadisi Kesiminde Kuzey Anadolu Fay Zonunun Tektonik Özelliği [Dr. Tezi]*. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi.
- Şengör, A. M. C, Tüysüz, O., İmren C., Sakıncı, M., Eyidoğan H., Görür N., Le-Pichon X. & Rangin, C. (2005). The North Anatolian Fault; A new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 37–112.
- Tatar, O., Gürsoy, H., Koçbulut, F. ve Mesci, B. L. (2005). Active fault zones and landslides: the 17 March 2005 Kuzulu (Koyulhisar) landslide. *Cumhuriyet Bilim Teknik Dergisi*, 941, 5–6.
- Terlemeç, İ. ve Yılmaz A. (1980). Ünye-Ordu-Koyulhisar- Reşadiye arasında kalan yörenin stratigrafisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni (Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni)* 23(2), 179-191. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/eacf7a18a32812d_ek.pdf
- Terzioğlu, N. (1986). Reşadiye, Gököy ve Koyulhisar arasındaki Tersiyer-Kuvaterner yaşlı volkanitlerin genel stratigrafik özellikleri. *C.Ü. Müh. Fak Dergisi, Seri A- Yerbilimleri*, 3(1), 3-13.
- Toprak, V. (1989). *Tectonic and stratigraphic characteristics of the Koyulhisar segment of the North Anatolian Fault Zone (Sivas, Turkey)* [PhD thesis]. Middle East University, Ankara.
- Ulusay, R., Aydan, Ö. & Kılıç, R. (2007). Geotechnical assessment of the 2005 Kuzulu landslide (Turkey). *Engineering Geology*, 89, 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.020>
- Wu, W. & Sidle, R.C. (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins, *Water Resources Research*, 31(8), 2097–2110.
- Yıldırım, A. (2006). Koyulhisar-Kuzulu (Sivas) heyelanının jeomorfolojik etüdü, *Eastern Geographical Review*, 11(15), 323-338.
- Yılmaz, I., Ekemen, T., Yıldırım, M., Keskin, I. & Özdemir, G. (2006). Failure and flow development of a collapse induced complex landslide: the 2005 Kuzulu (Koyulhisar-Turkey) landslide hazard. *Environmental Geology*, 49(3), 467-476.
- Yılmaz, I. (2009). A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by artificial neural Networks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68: 297–306. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0185-2>