

Araştırma Makalesi / Research Article

Silifke-Mut (Mersin) Karayolunda Meydana Gelen Kargıcak Heyelanının Değerlendirilmesi

An Assessment of the Kargıcak Landslide on the Silifke-Mut (Mersin) Highway

Muhammet NURDUHAN¹ , Hidayet TAĞA^{2,*} 

¹Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü, 33220 Mersin

²Mersin Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy Kampüsü, 33343 Mersin

Geliş (Received): 06 Ocak (January) 2023, Düzeltme (Revised): 20 Ocak (January) 2023, Kabul (Accepted): 04 Şubat (February) 2023

ÖZ

Bu çalışmada, Silifke-Mut ilçelerini birbirine bağlayan D-715 Karayolu'nun Km 31+300-31+500 arasında Kargıcak mahallesinde aşırı yağışların arkasından 8 Ocak 2020 tarihinde oluşan kütle hareketinin mekanizması, kayma derinliği ve bölgede yüzeyleyen litostratigrafi birimleri ile olan ilişkisi ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle inceleme alanının insansız hava aracı (İHA) ile çekilen fotoğraflardan, fotogrametrik yöntemle 2 cm çözünürlüklü sayısal yüzey modeli ve mühendislik jeolojisi haritası yapılmıştır. Heyelan alanında açılmış olan 9 adet karotlu sondajdan elden edilen örselenmiş ve örselenmemiş örnekler üzerinde, indeks ve jeomekanik parametreleri belirlemeye yönelik laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Sondaj kuyularına yerleştirilen inklinometre düzeneklerinden elde edilen veriler kullanılarak kayma derinliği ve hızı belirlenmiştir. Bölgede 8 Ocak 2020 öncesi oluşan sağanak yağışlar heyelan alanında yüzeyleyen ayrılmış kıltaşı-kil biriminde boşluk suyu basıncını artırarak birimin kayma dayanımının azalmasına neden olmuştur. Elde edilen verilere göre Kargıcak heyelanı, dairesel başlayıp, ayrılmış kıltaşı-kil birimi ile kıltaşı-marn yüzeyinde düzlemsel olarak gelişmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silifke-Mut Karayolu, Kargıcak heyelanı, İHA, inklinometre, aşırı yağış.

ABSTRACT

This study evaluates, the mass movement that occurred after heavy rains on January 8, 2020 in the Kargıcak district between Km 31+300 and 31+500 of the D-715 highway connecting Silifke and Mut districts. For this purpose, a 2 cm resolution digital surface model and an engineering geological map were first made, using photogrammetric methods from the photographs taken by the unmanned aerial vehicle (UAV). The index and geomechanical parameters of the units were determined by taking disturbed and undisturbed samples obtained from nine boreholes in the area where the landslide occurred. The depth of the sliding surface and velocity of movement were determined using the data acquired from the inclinometers placed on the boreholes. The heavy rains that occurred in the region before January 8, 2020 increased the pore water pressure in the weathered claystone-clay unit outcropping in the landslide area, which in turn caused a decrease in the shear strength of the unit. The Kargıcak Landslide started rotationally and developed planarly on the claystone-marl surface with the weathered claystone-clay unit.

Keywords: Silifke-Mut Highway, Kargıcak landslide, UAV, inclinometer, heavy rainfall.

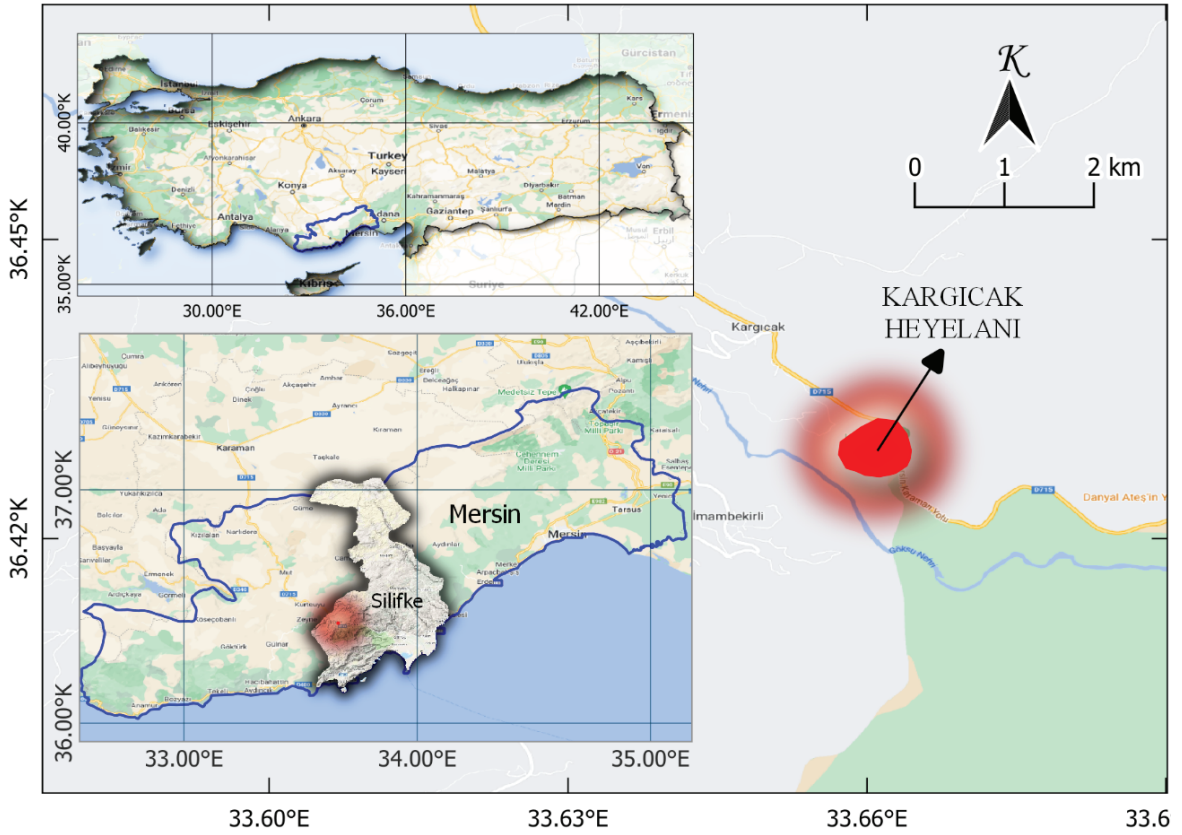
Nurduhan, Tağa

GİRİŞ

Mersin ili ile Karaman ilini birbirine bağlayan 402 km uzunluğundaki D 715 Devlet yolunun Mut-Silifke ilçeleri arasında 31+300 ile 31+500 km'lerinde 8 Ocak 2020 tarihinde oluşan kütle hareketi meydana gelmiştir (Şekil 1 ve 2). 1/25000 ölçekli Silifke P31a2 paftasında yer alan çalışma alanından geçen D 715 karayolu, İç Anadolu ile Doğu Akdeniz Bölgesi'ni birbirine bağlayan en önemli arterlerden birini oluşturmaktadır.

Yoğun yağışların tetiklediği kütle hareketleri ülkemizde ve dünyada giderek artan bir ilgi ile

çalışılmaktadır (Bishop 1955; Finlay vd., 1997; Zêzere vd., 1999; Ocakoğlu vd., 2002; Lee vd., 2009; Reis, vd., 2008; Chowdhury vd., 2010). Çalışma alanını da kapsayan doğu Akdeniz bölgesinde aşırı yağışların arkasından, başta otoyol ve devlet yolu gibi önemli mühendislik projelerini etkileyen heyelanlar meydana gelmiştir (Tağa vd., 2015; Tağa 2017; Tağa ve Yalçın, 2019). Tekin (2019) tarafından Kargıcak heyelanının geliştiği bölge heyelana çok yüksek duyarlı alan olarak değerlendirilmiş olup eski heyelan alanı içerisinde yer almaktadır (Duman vd., 2011).



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.

Mersin ili, Silifke ilçesi, Kargıcak mahallesinde bulunan ve Silifke ile Mut bağlantısını sağlayan D715 nolu karayolu üzerinde, 2019 Aralık ayı sonu ile 2020 yılı Ocak ayı başındaki aşırı yağışların arkasından (Metaoblue, 2021) yolda derin çatlaklar şeklinde başlayan kütle hareketi (Şekil 2) ile Silifke-Karaman-Mut yolu trafiğe kapanarak (Haberler, 2020), ulaşım Gülnar üzerinden sağlanmıştır. Aşırı yağış ve jeolojik özelliklerin neden olduğu Kargıcak heyelanı üzerinde JEMAS Mühendislik (2020) ile Nurduhan (2022) ayrıntılı değerlendirmeler yapmışlardır. Kargıcak heyelanının oluştuğu alanı da kapsayan bölgede, 1968 yılında gerçekleşen aşırı yağışların arkasından büyük boyutlu kütle hareketleri meydana gelmiştir (Anonim, 2020).

Bu çalışmada İHA ile çekilen görüntülerden heyelan alanının ortofotosu ve sayısal yükseklik modeli oluşturularak heyelanın mühendislik jeolojisi haritası hazırlanmıştır. Ayrıca heyelanın kayma yüzeyi ve kayma mekanizmasının ortaya konulması amacıyla 9 adet sondaj ile bu sondaj kuyularına tesis edilen inklinometre ölçümlerinden yararlanılmıştır.

ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

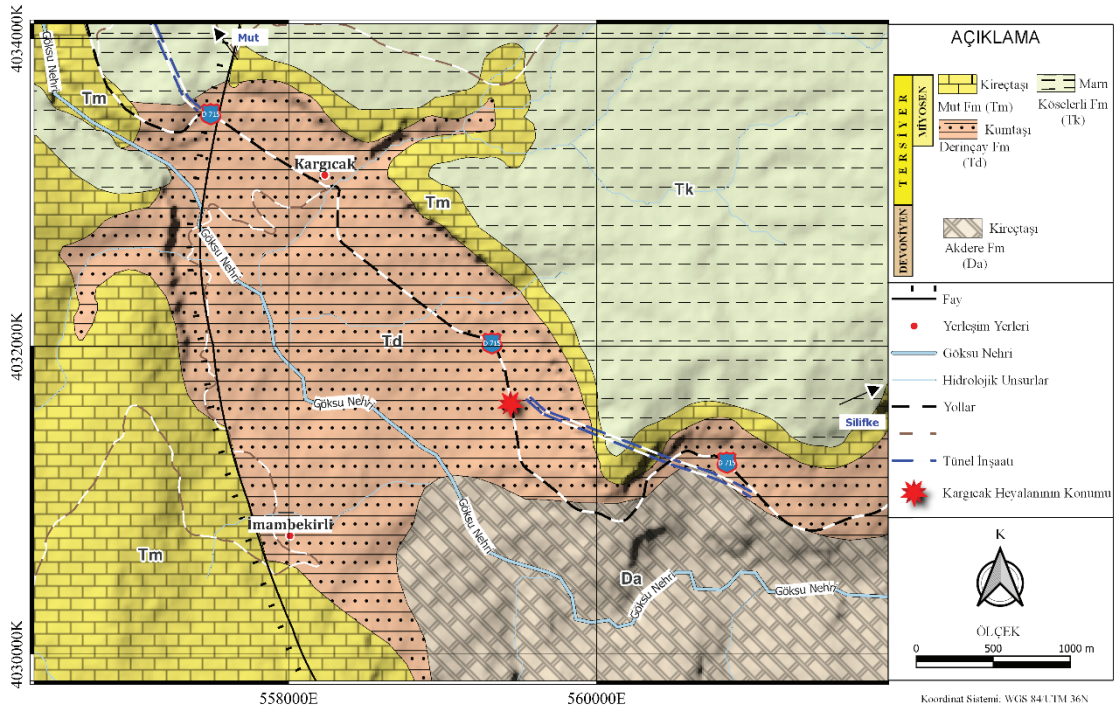
İnceleme alanı ve çevresinde Devoniyen yaşlı Akdere formasyonu ile Tersiyer yaşlı Mut, Köşelerli ve Derinçay formasyonları bulunmaktadır (Şekil 3 ve 4).



Şekil 2. Heyelanın taç kısmından bir görünüm.

Figure 2. A view from the scarp of the landslide.

Nurduhan, Tağa



Şekil 3. İnceleme alanı ve çevresine ait jeoloji haritası (Gedik vd., 1979' dan değiştirilerek).

Figure 3. Geological map of the study area and its surroundings (modified from Gedik et al., 1979).

Kireçtaşı ve şeyl birimleri ile temsil edilen Akdere formasyonu (Da) Göksu nehri vadisi kuzeybatı ve güneydoğu doğrultusunda, heyelanın güneyinde yer alan geniş bir bölgede yayılım göstermektedir. Formasyon kireçtaşı şeyl ardalanmalı olup, kireçtaşı seviyeleri gri renkli, orta katmanlı, fosilli, sert özelliklere sahiptir (Gedik vd., 1979) (Şekil 5).

Derinçay formasyonunda (Td) ise hâkim litoloji çakıltası ve kumtaşı olarak belirlenmiştir. Marn, şeyl ve killi kireçtaşının egemen olarak yüzeylediği alanlar da Fakırca üyesi olarak ayrılmıştır (Gedik vd., 1979). Formasyon, heyelanın kuzey batısı ile güneyini yüzulemektedir. Kanal dolgusunda ise çakıltıları ve kumtaşlarının taneleri ofiyolit ve kireçtaşı biriminden meydana gelmiştir (Atabey

vd., 2000). Formasyon tabanında ofiyolitik birimler ile açılal uyumsuz, üst kısımlarda ise Mut ve Köşelerli formasyonları ile uyumlu olarak istiflenmiştir. Formasyonda görülen kumtaşı ile çakıltası birimleri nehir çökeli, diğer birimler ise gölsel çökel olarak yorumlanmıştır (Gedik vd., 1979). Kargıcak Heyelanı Derinçay formasyonunun ayrılmış kiltası-kil ile kiltası-marn birimleri içerisinde oluşmuştur. Mut formasyonu (Tm) resifal kireçtaşı litolojisinde olup yer yer killi kireçtaşı, kumtaşı ve marn bantlarından oluşmaktadır. Mut formasyonu ile Köşelerli formasyonu yatay ve düşey geçişli olduğundan çoğu yerde bu iki formasyonun birbirinden ayrılması oldukça güçleşmektedir (Gedik vd., 1979) (Şekil 6).

SİSTEM	SERİ	KAT	FORMASYON	SİMGE	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
Kuvarterner						Alüvyon
TERSİYER	MİYOSEN	SERRAVALİYEN-LANGİYEN	Mut-Köseli Formasyonu	Tk-Tm		Mut: Beyaz krem renkli resifal kireçtaşı. Köseli: Yeşil gri renkli, marn
			Derinçay Formasyonu	Td		Kırmızı renkli kumtaşı-çakıltaşı
DEVONİYEN		İVESİYEN-FRASİYEN	Akdere Formasyonu	Da		Siyah renkli mercanlı kireçtaşı

Şekil 4. İnceleme alanına ait genelleştirilmiş dikme kesiti (Gedik vd., 1979'dan değiştirilerek).

Figure 4. Generalised columnar section of the study area (modified from Gedik et al., 1979).



Şekil 5. Akdere (Da), Derinçay (Td) ve Mut (Tm) formasyonlarından bir görünüm.

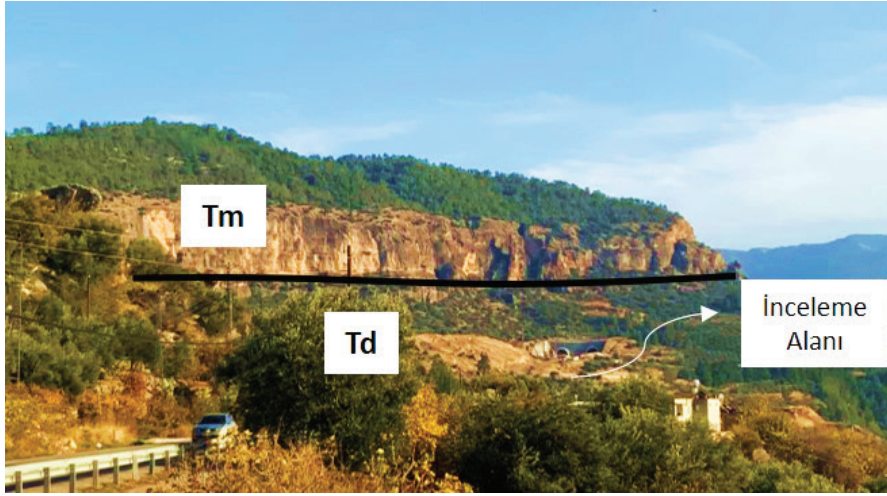
Figure 5. A view from Akdere (Da), Derinçay (Td), and Mut (Tm) formations.

Köseli Formasyonunda (Tk) ise hakim litoloji marn birimi olup, killi kireçtaşı, kireçtaşı, kumtaşı, çakıltaşı birimleri görülmektedir (Gedik vd., 1979). Köseli formasyonu heyelanın kuzeydoğusunda yayılım göstermektedir. Mut formasyonu ile yatay ve düşey olarak geçişli olan Köseli formasyonunun alt bölümünde marn, killi kireçtaşı, şeyl birimlerinin yanı sıra, mikrofosilli vaketaşı-istiftaşı bulunmaktadır (Atabey vd., 2000). Göksu nehrinin oluşturduğu alüvyon (Qa) Mut Formasyonu ile Köseli Formasyonunu örtmektedir. Birim yamaç molozu ile Göksu Nehri çevresindeki çakıl, kum ve silt litolojilerinden oluşur (Gedik vd., 1979).

MALZEME ve YÖNTEM

İnceleme alanındaki deformasyonları haritalamak için insansız hava aracı (İHA) ile uçuşlar 19 Ocak 2020 tarihinde gerçekleştirilmiştir. İHA ile gerçekleştirilen bu uçuş 85 m yükseklikten %70 düşey ve yanal aşmalı olup, 609 adet fotoğraf çekilmiştir.

Nurduhan, Tağa



Şekil 6. Kargıcak Heyelanının geliştiği alandaki Derinçay (Td) ve Mut (Tm) formasyonlarından bir görünüm.

Figure 6. A view of Derinçay (Td) and Mut (Tm) formations in the area of Kargıcak Landslide.



Şekil 7. 8 Ocak 2020 tarihinde oluşan Kargıcak Heyelanı fotoğrafları (a,b ve c) ile heyelanın 1/25000 ölçekli topoğrafik haritadaki konumu (d).

Figure 7. Pictures of the Kargıcak landslide that occurred on January 8, 2020 (a,b and c) and its location on the 1/25000 scale topographic map (d.)

Çekilen fotoğraflardan, 3 adet yer kontrol noktası ile dengeleme hesabı yapılarak 2 x 2 cm çözünürlükteki ortofoto ve sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Ayrıca kütle hareketinin değerlendirilmesinde, jeolog pusulası, diferansiyel GPS, 1/25000 ölçekli Silifke P31a2 topoğrafik haritası ve farklı ölçekteki hâlihazır haritalardan yararlanılmıştır (Şekil 7). Meydana gelen Kargıcak heyelanının kayma derinliği ve mekanizmasını ortaya koymak için derinlikleri 25 m ile 50 m arasında değişen 9 adet tam karotlu zemin sondajı ile bu sondajlara yerleştirilen inklinometreler kullanılmıştır (JEMAS Mühendislik, 2020).

Yol güzergâhında yüzeyleyen zeminin jeomekanik özelliklerinin ve heyelanın geometrisinin belirlenmesi amacıyla açılan sondajlardan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınmış ve Çizelge 1’de belirtilen deneyler gerçekleştirilmiştir. Araştırma sondajları (Şekil 8) elmas uçlu TSM-750 sondaj makinesi kullanılarak açılmış ve karot numuneleri alınmıştır. Yapılan sondajların özet bilgileri Çizelge 2’de verilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Laboratuvar Çalışmaları

İnceleme alanından alınan örselenmiş (SPT örnekleri); ve örselenmemiş (UD örnekleri) zemin numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kargıcak heyelanından alınmış olan örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri üzerinde gerçekleştirilen tane boyu analizlerine göre (TS EN 17892-4), heyelan malzemesinin ince taneli zeminlerden oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 9).

Sondaj kuyularından alınmış olan örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri üzerinde gerçekleştirilen kıvam limit ve tane boyu dağılımı

deneylerine göre çalışma alanındaki zeminlerin birleştirilmiş zemin sınıflama sistemine göre CH, CL, GC ve GM türü zeminlerden oluştuğu; kayma düzlemini temsil eden zemin örneklerinin ise CL-CH olduğu görülmüştür (ASTM D-2487, 2020) (Şekil 10).

Çizelge 1. Laboratuvar deney yöntemleri (JEMAS Mühendislik, 2020’den değiştirilerek).

Table 1. Laboratory test methods (modified from JEMAS Engineering, 2020).

Yapılan Deneyler	Adet	Yöntem
Su Muhtevası	30	TS EN ISO 17892-1
Doğal Birim Hacim Kütle	5	TS EN ISO 17892-2
Kuru Birim Hacim Kütle	5	TS EN ISO 17892-2
Özgül Ağırlık	5	TS EN ISO 17892-3
Atterberg Limitleri	29	TS 1900-1
Tane Boyu Dağılımı	30	TS EN 17892-4
Üç Eksenli Basınç Dayanımı	6	TS 1900-2
Direkt Kesme Deneyi	6	TS 1900-2
Şişme Deneyi	6	TS 1900-2
Yoğunluk	24	ISRM 1981
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	24	TS EN 1926/ISRM 1981
Elastisite Modülü	18	ASTM D-7012
Poisson oranı	9	ASTM D-7012

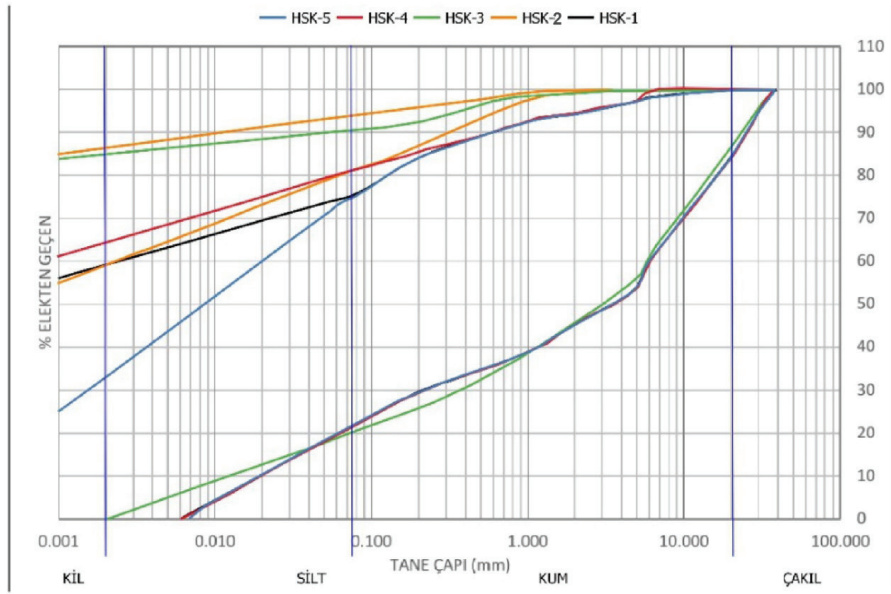
İnklinometre Çalışmaları

8 Ocak 2020 tarihinde aşırı yağışların arkasından oluşan Kargıcak heyelanının kayma mekanizması ile kayma derinliğinin belirlenmesi amacıyla Çizelge 3’de belirtilen sondaj noktalarında inklinometre okumaları gerçekleştirilmiştir. HSK-1 ve HSK-2 kuyularında 48 saat içinde 6. ve 7. metrelerde kırılma gerçekleşmiştir.

Nurduhan, Tağa



Şekil 8. Çalışma alanındaki sondajların dağılımı.
Figure 8. Distribution of boreholes in the study area.



Şekil 9. Sondaj kuyularına ait tane boyu değişim aralığı.
Figure 9. Soil grain size distributions of the boreholes.

Çizelge 2. Sondajlara ait bilgiler (JEMAS Mühendislik, 2020'den değiştirilerek).

Table 2. Borehole information (modified from JEMAS Engineering 2020).

SK-No	Koordinatlar (UTM WGS84)			Derinlik (m)	Yeraltı Suyu Derinliği (m)	Litoloji
	X (m)	Y (m)	Z (m)			
HSK-1	559458	4033308	204.99	30	5.2	0-6 m: Dolgu
						6-12.5 m: Kil
						12.5-30m: Kilitaşı-Marn
HSK-2	559437	4033307	196.3	28	5.1	0-4.2 m: Kil-Blok
						4.2-16 m: Kil
						16-28 m: Kilitaşı-Şeyl
HSK-3	559551	4033317	224.15	50	16.5	0-10.5 m: Çakıllı Kil
						10.5-19.5 m: Ayrılmış Kilitaşı-Marn
						19.50-50 m: Kilitaşı
HSK-4	559505	4033385	218.36	30	17.4	0-16.5 m: Kil
						16.5-30 m: Kilitaşı
HSK-5	559629	4033205	230.94	30	16.6	0-6 m: Kil
						6-30 m: Kilitaşı
HSK-6	559397	4033534	202.44	30	8.1	0-12 m: Ayrılmış Kilitaşı-Çakıl
						12-30 m: Kilitaşı
HSK-7	559679	4033323	247.17	30	16.8	0-5 m: Ayrılmış Kilitaşı-Marn
						5-10 m: Kumtaşı
						10-19 m: Ayrılmış Kilitaşı-Kilitaşı
						19-30 m: Kilitaşı
HSK-8	559264	4033657	193.07	25	11.2	0-17 m: Ayrılmış Kilitaşı-Marn
						17-25 m: Kilitaşı
HSK-9	559712	4033216	247.7	25	16.6	0-10.50 m: Ayrılmış Kilitaşı-Marn
						10.50-25 m: Kilitaşı

Yağış ve Yeraltı Suyu Durumu

8 Ocak 2020 tarihinde oluşan kütle hareketi, aşırı yağışların olduğu 7 Ocak 2020 tarihinde 85 mm yağışın ardından gerçekleşmiştir (Şekil 11). Bu yağış meteorolojik olayların şiddetine

göre sınıflandırıldığında çok şiddetli yağış olarak tanımlanır (MGM, 2021).

Kargıcak heyelanı kapsamında açılmış olan sondaj kuyularındaki yeraltı su seviyeleri ölçülmüştür (Çizelge 2). HSK-1 ve HSK-2

Nurduhan, Tağa

sondaj kuyularındaki yeraltı su seviyesi ile aktif kayma düzlemi örtüşmektedir. Heyelan alanında gerçekleşen aşırı yağışlar Derinçay formasyonunun ayrışmış kiltası-kil seviyelerinde boşluk suyu basıncının artmasına neden olmuştur.

DURAYSIZLIĞIN DEĞERLENDİRİLMESİ

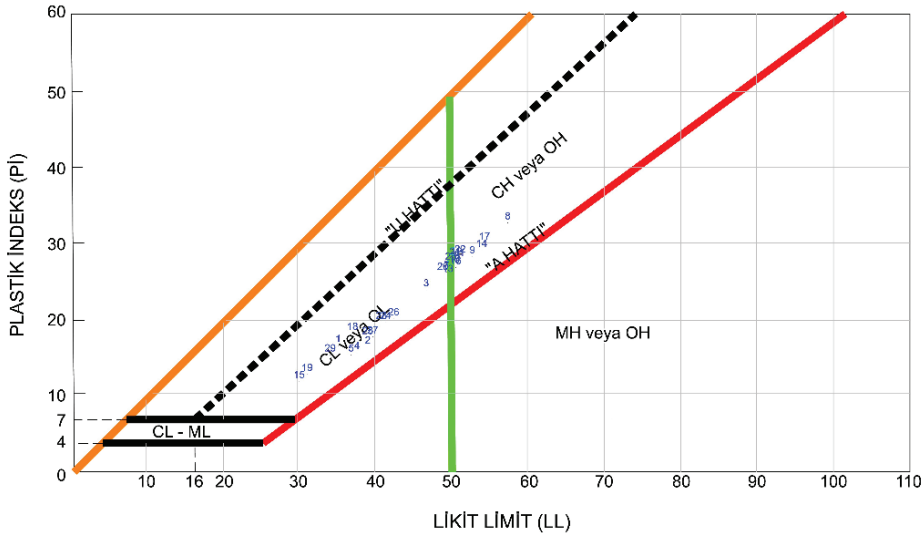
8 Ocak 2020 tarihinde meydana gelen Kargıcak Heyelanının yanal ve düşey devamlılığını belirlemek ve haritalamak için elde edilen ortofoto ve yüzey çalışmaları ile 8 Ocak 2020 tarihinde oluşan Kargıcak heyelanının mühendislik jeolojisi haritası hazırlanmıştır (Şekil 12a). Heyelanın taç kısmı D 715 Silifke-Karaman kara yoluna denk gelmektedir. Oturma ve kabarma çatlakları ise tarımsal faaliyet gösteren taşınmazlar üzerinde etki etmiştir.

Duraysızlığın Türü ve Mekanizması

İnceleme alanında yapılan inklinometre okumalarına göre (JEMAS Mühendislik,

2020) en derin noktalarda meydana gelen deformasyonlar birleştirilerek ana ve tali kayma sınırları belirlenmiştir. Ana kayma sınırının en derin kayma noktası (topoğrafya ile ana kayma sınırı arasındaki kot farkı) 29.49 m olarak gözlemlenmiştir. HSK-1 ve HSK-2 inklinometre okumalarına göre aktif heyelan sınırı Şekil 12b'de lejantta 2. kayma sınırı olarak belirtilen kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.

Ortaya çıkan bu sınır açık mavi renk ile Şekil 12b'de gösterilen yer altı su seviyesine (YAS) denk gelmektedir. İnklinometre okumaları ile arazi gözlemleri ve uçuş fotoğraflarından yararlanılarak 3 ayrı kayma noktası Şekil 12b'de belirtilen kesikli kırmızı çizgi ile ana kayma düzlemi belirlenmiştir. Ayrıca bölgede aşırı yağışların arkasından meydana gelen Kargıcak heyelanı dairesel başlayıp Derinçay formasyonunun ayrışmış kiltası-kil seviyesinde düzlemsel olarak devam etmiştir.



Şekil 10. İnceleme alanındaki numunelerin plastisite diyagramındaki dağılımları.

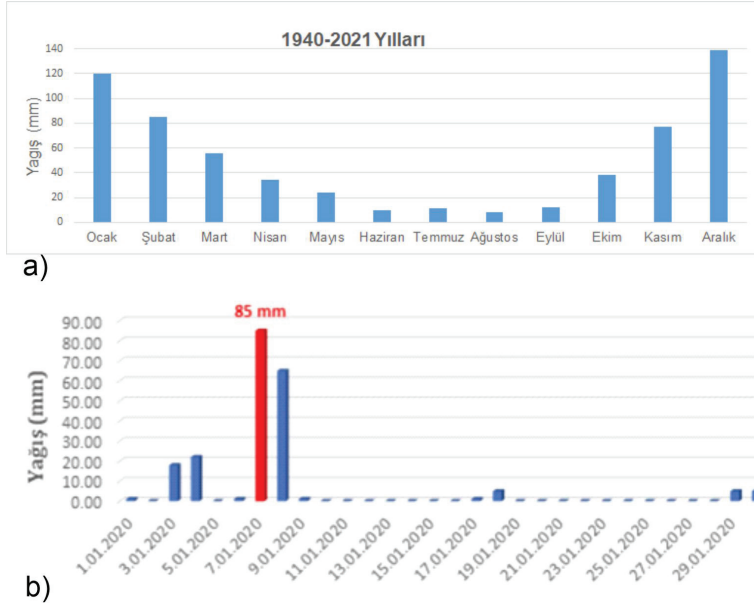
Figure 10. Distribution of soil samples on the Plasticity chart.

Çizelge 3. İnklinometre okumaları (JEMAS Mühendislik, 2020).

Table 3. Inclinator readings (JEMAS Mühendislik, 2020).

Sk. No	Okuma Tarihi	Hareket (mm)	Derinlik(m)	Azimet
HSK-1	-	Kırılma	6	-
HSK-2	-	Kırılma	7	-
HSK-3	25.01.2020	0	0	0
	14.02.2020	18.9	29.49	357
	22.02.2020	23.2	6.5	337
	25.02.2020	23.6	7	318
	18.03.2020	28.9	20.99	108
HSK-4	01.02.2020	0	0	0
	10.02.2020	6.8	15.99	78
	22.02.2020	13.5	9	235
	25.02.2020	16.3	9	231
	18.03.2020	37.9	13.5	224
HSK-5	25.01.2020	0	4	176
	10.02.2020	14.9	18.5	206
	14.02.2020	17.4	18.5	215
	22.02.2020	16.8	18.5	218
	24.02.2020	17.5	18.5	218
	18.03.2020	20.2	18	239
HSK-6	01.02.2020	0	3.5	266
	15.02.2020	4	1.5	218
	22.02.2020	8.2	0.5	304
	25.02.2020	5.2	1	238
	18.03.2020	13.8	10.49	273
HSK-7	18.02.2020	0	1	238
	18.03.2020	32	3.5	203
HSK-8	18.02.2020	0	3.5	203
	22.02.2020	5.6	9	43
	25.02.2020	6	9	47
	18.03.2020	11.5	9	32
HSK-9	18.03.2020	0.01	19.5	72
	03.06.2020	0.1	8.5	88

Nurduhan, Tağa



Şekil 11. Mersin iline ait 1940-2021 yılları ortalama aylık yağış (MGM, 2022) (a) ve 2020 yılı Ocak ayında gerçekleşen yağış miktarı (Meteoblue, 2021) (b).

Figure 11. Average monthly precipitation in Mersin between 1940-2021 (MGM, 2022) (a) and the amount of rainfall in January 2020 (Meteoblue, 2021) (b).

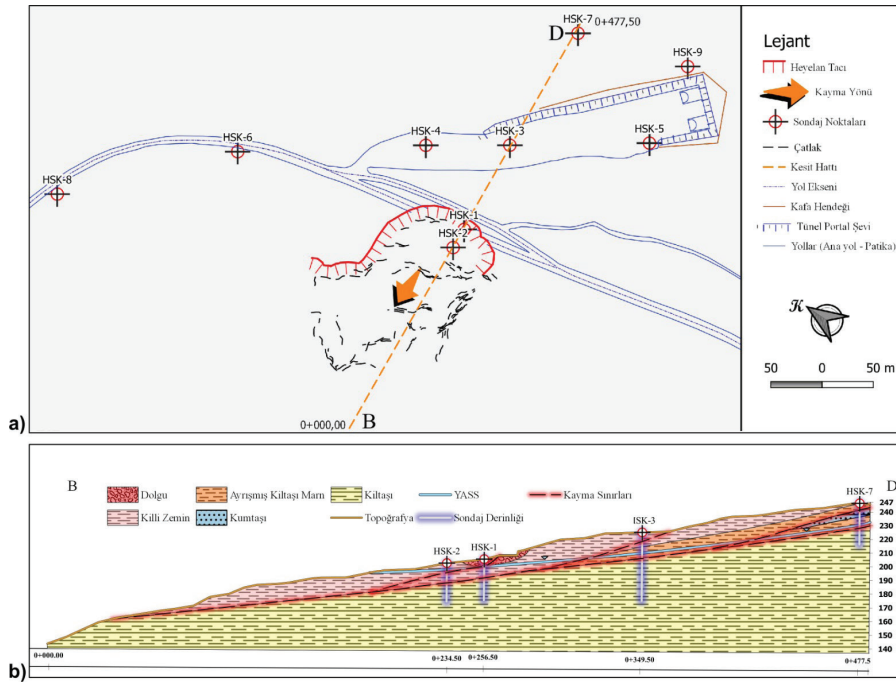
Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Stabilite Analizi

İnşa edilen bir barajdaki gerilme ve deformasyon değerlerini belirlemek amacıyla ilk kez Clough ve Woodward (Clough ve WoodwardIII, 1967) tarafından kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen şev duraylılık analizlerinde yerçekimi artırma (Chen ve Mizuno, 1990) ve makaslama dayanımı azaltma faktörü (SRF) olarak (Zienkiewicz ve Taylor, 1989) uygulanan iki yöntem bulunmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) sürekliliği, nod adı verilen noktalarla (düğüm noktaları) birleşen elemanlar ile tanımlar ve analizlerin gerçekleşeceği ortam, farklı doku seçenekleri ile ağ elemanlarına bölünür.

Sonlu elemanlar yöntemi, bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeye paralel olarak yaygınlaşan bir hızla kaya kütleleri ve ayrık toprak zeminlerdeki heyelan çalışmalarında

uygulanmaktadır (Cheng vd, 2007; ve WoodwardIII, 1967; Dounias vd, 1988; Fernández-Merodo vd, 2014; Griffiths ve Lane, 1999; Pain vd, 2014; Ugai ve Leshchinsky, 1995; Zhu ve Randolph, 2009).

Kargıcak Heyelanın gerçekleştiği alandaki D-B jeoteknik kesit hattında (Şekil 12b) statik şartlarda doğal ve suya doygun olarak değerlendirilmiştir. 6 adet düğüm noktasına sahip, homojen dağılım gösteren 3055 adet üçgensel ağ elemanına bölünerek (Şekil 13) D-B jeoteknik kesit hattında nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Mohr-Coulomb yenilme ölçütünün (Çizelge 4) kullanıldığı sayısal analizlerde makaslama dayanımı azaltma faktörü yöntemi uygulanmış, gerilme dağılımları, oluşan deformasyonlar ile kayma miktarı oranları Phase2 yazılımıyla (Rocscience, 2011) iki boyutlu olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 12. 8 Ocak 2020 tarihinde oluşan Kargıcak Heyelanı haritası (a) ve D-B hattı jeoteknik kesiti (b).

Figure 12. Map of the 8 January 2020 Kargıcak Landslide (a) and geotechnical cross-section along the D-B line (b).

Aşırı yağışların arkasından gelişen Kargıcak Heyelan alanındaki D-B jeoteknik kesit hattında doğal ve suya doymun olarak gerçekleştirilen sayısal analizlerle oluşan Von Mises gerilmeleri, deformasyonlar ile kayma miktarı oranları arasındaki farklar belirlenmiştir. Statik durumdaki doğal şartlara göre 1.45 olarak belirlenen güvenlik katsayısının aşırı yağışların etkisi ile limit değere (1) ulaşmış ve Kargıcak heyelanı gelişmiştir.

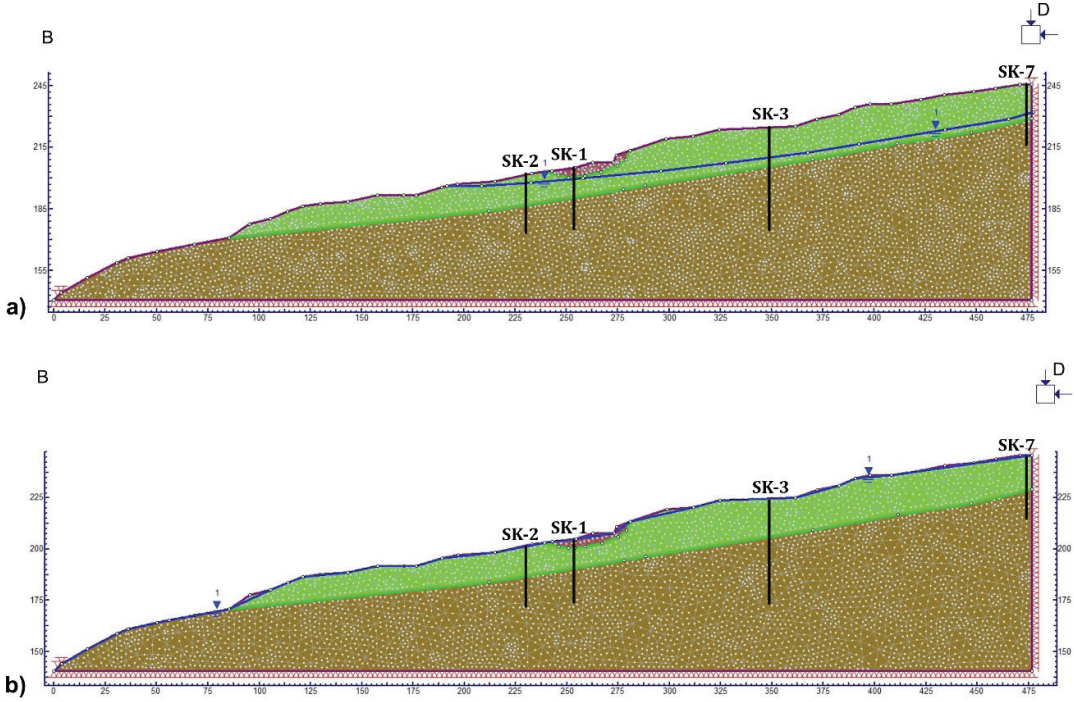
Von Mises gerilmesi, malzemenin herhangi bir yükleme durumundaki plastik şekil değişimi miktarını belirlemek için kullanılmakta olup Von Mises (1913) tarafından önerilmiştir. Doğal durumdaki D-B jeoteknik kesit hattındaki gerilmeler yeraltı su seviyesinin üzerinde gelişen güzel dağılmış durumda iken, aşırı yağışların arkasından yüzey morfolojisine uygun bir düzende gerçekleşmiştir (Şekil 14).

Ayrıca 2020 yılı ocak başında gelişen aşırı yağışlarla yüksek plastik killerden oluşan heyelan alanındaki zeminde 30 cm civarında deformasyon artışları oluşmuştur (Şekil 15).

D-B kesit hattındaki ayrışmış kilitaş-marn birimi ile kilitaş birimi düzleminde kayma miktarı oranları arasındaki fark doğal ve suya doymun olarak değerlendirilmiştir. Suya doymun olarak gerçekleştirilen sayısal analizlere göre kayma miktarı oranlarında önemli artışların olduğu görülmüştür (Şekil 16).

8 Ocak 2020 tarihinde aşırı yağışların ardından oluşan Kargıcak Heyelanında D 715 Silifke-Mut karayolu kullanım dışı kalmış, ulaşım Gülnar üzerinden sağlanmıştır. Heyelan alanındaki kullanım dışı kalan D 715 karayolunda fore kazıklı zemin iyileştirilmesi yapılarak (JEMAS Mühendislik, 2020) tekrar 2020 yılında kullanıma açılmıştır.

Nurduhan, Tağa



Şekil 13. D-B kesit hattının doğal (a) ve suya doygun durumundaki (b) sonlu elemanlar ağ modeli.

Figure 13. Natural (a) and saturated (b) finite element models along the D-B cross section.

Çizelge 4. Stabilite analizlerindeki girdi parametreleri (JEMAS Mühendislik, 2020 ve Nurduhan, 2022'den değiştirilerek).

Table 4. The input parameters in stability analyses (modified from JEMAS Mühendislik, 2020 and Nurduhan, 2022).

Malzeme	Doğal birim hacim ağırlığı, (kN/m ³)	Kalıntı kayma dayanımı parametreleri	
		İçsel sürtünme açısı, °	Kohezyon (kPa)
Dolgu	20	35	5
Ayrışmış kiltası-kil	19	11	28.5
Kiltası-Marn	21	21.3	156.4

SONUÇLAR

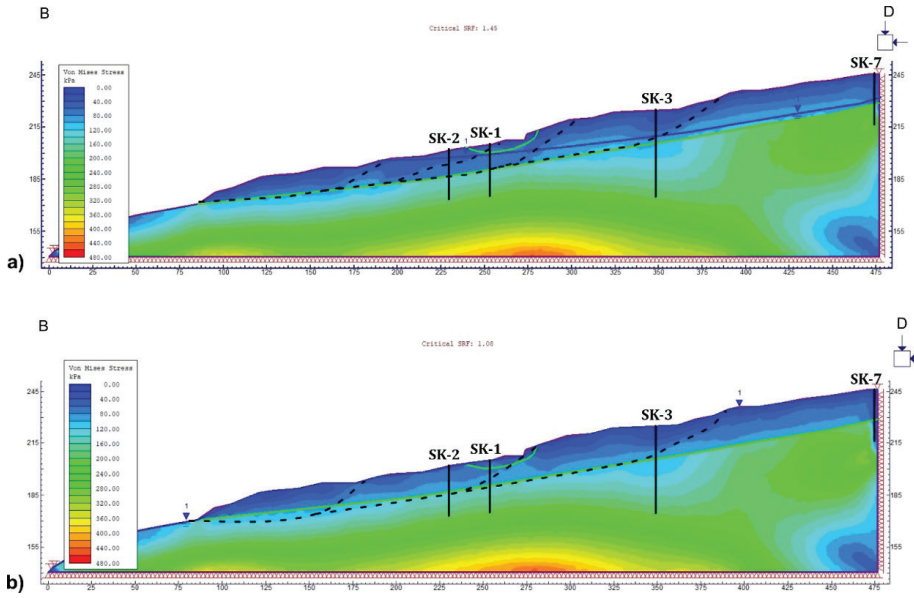
Silifke Mut Karayolu km: 31+300-31+500 arasını da alan bölgede oluşan aşırı yağışların ardından 8 Ocak 2020 tarihinde Kargıcak Heyelanı meydana gelmiştir. Bölgeye ocak ayının başında düşen 150 mm'lik yağış miktarı uzun yıllardaki ocak ayı ortalamasından fazla olup, heyelan alanında mostra veren yüksek plastisiteli (CH) ve düşük plastisiteli kilden

(CL) oluşan zeminlerde boşluk suyu basıncının artmasına neden olmuştur.

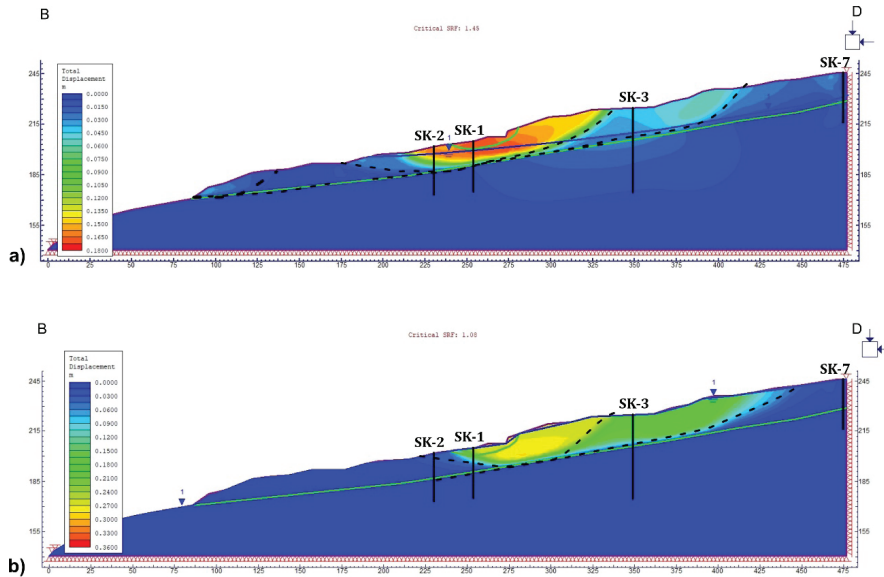
Kargıcak Heyelan alanında kalan D 715 karayolunun iyileştirme projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olan inclinometre okumalarına ve yüzey çalışmalarına göre oluşan heyelan dairesel başlayıp ayrışmış kiltası-kil birimi ile kiltası-marn birimi hattında düzlemsel devam ettiği ve en fazla 29.49 m kalınlığa ulaştığı

belirlenmiştir. D 715 karayolunun geçtiği alandaki kayma derinliği doğal ve doygun şartlara göre gerçekleştirilen stabilite analizleriyle

belirlenmeye çalışılmıştır. Yolun geçtiği bu kesimde teçhiz edilen inklinometre düzenekleri bir gün sonra kırılmıştır.

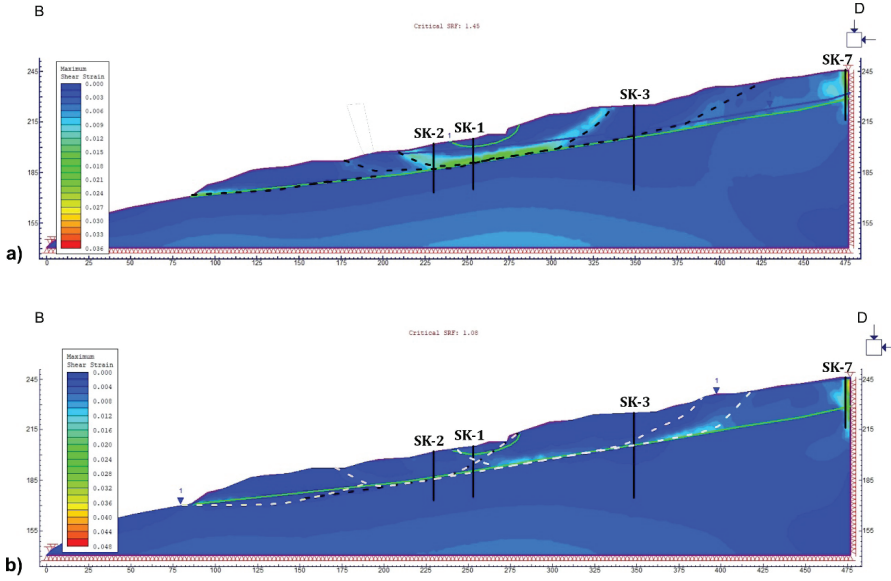


Şekil 14. D-B kesit hattındaki von Mises gerilmelerinin doğal (a) ve suya doygun (b) durumdaki dağılımı.
Figure 14. Natural (a) and saturated (b) von Mises stresses distribution along the D-B cross section.



Şekil 15. D-B kesit hattındaki doğal (a) ve suya doygun (b) durumdaki toplam yerdeğistirmeler.
Figure 15. Natural (a) and saturated (b) total displacements along the D-B cross-section.

Nurduhan, Tağa



Şekil 16. D-B kesit hattının doğal (a) ve suya doymun durumdaki (b) kayma miktarı oranları.

Figure 16. Natural (a) and saturated (b) maximum shear strain rates along the D-B cross section.

Heyelanın gerçekleştiği bölgenin 19 Ocak 2020 tarihinde İHA ile alınmış fotoğraflarından 2 cm çözünürlüklü ortofotolu ile sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ortofoto ve sayısal yükseklik modelinden heyelanın 1/1000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası hazırlanmıştır. Ayrıca heyelan bölgesinde dinamik bir izleme yöntemi olarak 19 Ocak 2020 tarihinde gerçekleştirilen uçuş rotası ile yüksekliğinde, farklı meteorolojik olayların ve D 715 karayolunda uygulanan iyileştirme yönteminin performansının belirlenmesi amacıyla yeni uçuşlar düzenlenerek değerlendirilmelidir.

D-B jeoteknik kesit hattında sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen stabilite analizlerinden Von Mises gerilmesi, deformasyon ve kayma miktarı değişim oranları belirlenmiştir. İnklinometre okumaları ile yüzey çalışmalarına göre oluşturulan kayma şekli ve derinliği ile sayısal analizlerden bulunan deformasyon ve kayma miktarı değişim oranlarının aynı kayma düzleminde birbirleri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

KATKI BELİRTME

Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü Taşınmazlar Başmühendisi Yunus Yavuz'a, AR-GE Başmühendisi Ergun Yalçın'a ve Yol Yapım Başmühendisi M. Faruk Okumuş'a çalışmanın gerçekleşmesi esnasında verdikleri destek için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2020. 1968 yılı yağışları sonrasında Kargıcak ve civarında oluşan kütle hareketi konulu görüşme, Silifke Kargıcak Mahallesi.
- ASTM D-2487, (2020). Classification of soils for engineering purposes unified soil classification system. 22 Aralık 2022 tarihinde <https://www.studocu.com/row/document/ege-universitesi/electronics-ii/astm-d-2487-classification-of-soils-for-engineering-purposes-unified-soil-classification-system/8266235>.
- ASTM D-7012, (2017). Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures Atabey, E., Atabey, N., Hakyemez, A., İslamoğlu, Y., Sözeri, Ş.,

- Özçelik, N.N. ve diğerleri. (2000). Mut-Karaman arası Miyosen Havzasının Litostratigrafisi ve Sedimentolojisi (Orta Toroslar). Maden Tetkik ve Arama Dergisi. 122, 53-72.
- Atabey, E., Atabey, N., Hakyemez, A., İslamoğlu, Y., Sözeri, Ş., Özçelik, N.N., Saraç, G., Ünay, E., Babayigit, S., (2000). Mut-Karaman arası Miyosen Havzasının Litostratigrafisi ve Sedimentolojisi (Orta Toroslar). Maden Tetkik ve Arama Dergisi. 122, 53-72.
- Bishop, A.W., (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5:7-7.
- Chen, W.F, Mizuno, E., 1990. *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics: Theory and Implementation*. Elsevier, Amsterdam.
- Cheng, Y.M., Lansivaara, T., Wei, W.B., (2007). Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Comput Geotechnics*, 34(3), 137-150. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.011>.
- Chowdhury, R., (2010). *Geotechnical slope analysis*. Taylor & Francis Group, London
- Clough, R.W., WoodwardIII, R.J., (1967). Analysis of Embankment Stresses and Deformations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(4), 529-549. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001005>
- Dounias, G. T, Potts, D. M., Vaughan, P. R., (1988). Finite element analysis of progressive failure: two case studies. *Comput Geotech*, 6(2), 155-175. [https://doi.org/10.1016/0266-352x\(88\)90078-x](https://doi.org/10.1016/0266-352x(88)90078-x).
- Duman, T.Y., Çan, T., 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.
- Finlay, P.J., Fell. R, Maguire, P.K., (1997). The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Can Geotech J*, 34:811-824.
- Fernández-Merodo, J.A., García-Davalillo, J.C., Herrera, G., Mira, P., Pastor, M., (2014). 2D viscoplastic finite element modelling of slow landslides: The Portalet case study (Spain). *Landslides*, 11(1), 29-42.
- Gedik, A., Birgili, Ş., Yılmaz, H., Yoldaş, R., (1979). Mut-Ermenek-Silifke Yöresinin Jeolojisi ve Petrol Olanakları. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*. 22, 7-26.
- Griffiths, D.V., Lane, P.A., (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3), 387-403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>.
- Haberler.com, (2020). Mersin'de çökme meydana gelen yol ulaşıma kapatıldı. 03 Ocak 2023 tarihinde <https://www.haberler.com/mersin-de-cokme-meydana-gelen-yol-ulasima-12797878-haberi>.
- JEMAS Mühendislik, (2020). Silifke-Mut 3. Bölge Hudut 2. Kısım Yolu Km:31+100-31+650 Arası Heyelan Önleme Projesi.
- ISRM, (1981). *Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*. E.T.Brown (ed.), Pergamon Press, 211 p.
- Lee, M.L., Gofar, N., Rahardjo, H., (2009). A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability. *Eng Geol*, 108: 272-285.
- Meteoblue, (2021). Kargıcak Hava Durumu. 22 Kasım 2021 tarihinde https://www.meteoblue.com/tr/hava/hafta/kargicak_turkiye_309126.
- MGM, (2021). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Meteorolojik Hadiselerin Şiddetlerine ait Sınıflandırma. 22 Kasım 2021 tarihinde <https://www.mgm.gov.tr/site/yaridim1.aspx?m=HadSid> adresinden erişildi.
- MGM, (2022). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, İllere ait mevsim normalleri. 30 Kasım 2022 tarihinde <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=MERSIN>.
- Nurduhan, M., (2022). Silifke-Mut (Mersin) Karayolu Kargıcak Civarındaki Kütle Hareketinin Değerlendirilmesi., Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101 s, Mersin.

Nurduhan, Tağa

- Ocakoğlu, F., Gökçeoğlu, C., Ercanoğlu, M., (2002). Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: a case study from NW Turkey. *Geomorphology*, 42(329–341):330.
- Pain, A., Kanungo, D.P., Sarkar, S., (2014). Rock slope stability assessment using finite element based modelling - examples from the Indian Himalayas. *Geomechanics and Geoengineering*, 9(3), 215–230. <https://doi.org/10.1080/17486025.2014.883465>.
- Reis, S., Bayrak, T., Yalçın, A., Atasoy, M., Nişancı, R., Ekercin, S., (2008). Rize Bölgesinde Yağış Heyelan İlişkisi. *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*. 2008/2 99.
- Rocscience, (2011). Phase 2-2D Finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavation. (v8.14). Rocscience. <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/rocnews/spring2011/Phase2-8.pdf>.
- Tekin, S., (2019). Göksu nehri havzasının coğrafi bilgi sistemleri tabanlı jeomorfometrik analizi ve niceliksel heyelan olası tehlike değerlendirmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 244 s, Adana.
- Tağa, H., Turkmen, S., Kacka, N., (2015). Assessment of stability problems at southern engineered slopes along Mersin-Tarsus Motorway in Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74 (2), 379-391.
- Tağa, H., (2017). Mersin-Tarsus Otoyolunun Kuzey Şevlerindeki Duraysızlıkların Değerlendirilmesi. MühJeo2017: Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, Adana, Türkiye.
- Tağa, H., Yalçın, E., (2019). Tarsus Çamlıyayla Yolu Kütle Hareketinin Değerlendirilmesi. Mühjeo' 2019 Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu bildiriler kitabı (ss. 309-316). Denizli, Türkiye.
- TS EN 1926, (2022). Doğal taşlar- Deney metotları- Basınç dayanımı tayini. Ankara.
- TS EN ISO 17892-1, (2014). Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Su içeriğinin belirlenmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN ISO 17892-2, (2014). Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Birim hacim kütleinin belirlenmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN ISO 17892-3, (2016). Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 3: Tane yoğunluğunun belirlenmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN ISO 17892-4, (2016). Geoteknik Etüt ve Deneyler - Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 4: Tane Büyüklüğü Dağılımının Belirlenmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1900-1, (2006). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1900-2, (2006). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Ugai, K., Leshchinsky, D., (1995). Three-dimensional limit equilibrium and finite element analysis: a comparison of results. *Soils Foundations*, 35(4), 1–7. https://doi.org/10.3208/sandf.35.4_1.
- Von Mises, R., (1913). *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-Physikalische Klasse.* (1): 582–592.
- Zezere, J.L., Ferreira, A.B., Rodrigues, M.L., (1999). Landslides in the North of Lisbon Region (Portugal): conditioning and triggering factors. *Phys Chem Earth A* 24(10),925–934.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., (1989). *The Finite Element Method. Vol.1, 4th Edition*, McGraw-Hill, New York.
- Zhu, H., Randolph, M.F., (2009). Large Deformation Finite-Element Analysis of Submarine Landslide Interaction with Embedded Pipelines. *International Journal of Geomechanics*, 10(4), 145–152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000054](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000054).