

YAĞIŞIN HEYELAN MEKANİZMASI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN SAHADA ALETSEL GÖZLEM ÇALIŞMALARıyla İNCELENMESİ: BARTIN İLİ ÖRNEĞİ

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF RAINFALL ON THE LANDSLIDE MECHANISM BY INSTRUMENTAL OBSERVATION STUDIES IN THE FIELD: A CASE OF BARTIN/TURKIYE

Serdar ALLI¹, Taha TAŞKIRAN², Yüksel YILMAZ³

ÖZET

Bu çalışmada Türkiye’de yağış kaynaklı heyelanların en fazla görüldüğü illerinden Bartın’da heyelanlı bir bölge belirlenmiş, yağış infiltrasyonunun heyelanı tetikleme mekanizması sahada iki yıl süren aletsel izleme çalışmalarının sonuçları kullanılarak incelenmiştir. Mevsimsel koşullara bağlı olarak kuru ve ıslak dönemlerde ölçülen matrik emmelerin ve yer altı su seviyelerinin ortalama değişimleri kullanılarak limit denge stabilite analizleri yapılmıştır. Yamacın göçmeye karşı güvenlik sayısı kuru dönem başlangıç koşullarında 1.74, ıslak dönem başlangıç koşullarında 1.32 bulunmuştur. Yapılan analizler dönemsel matrik emme ve pozitif boşluksuyu basıncında meydana gelen değişimlere göre stabilitenin ne şekilde etkilendiğini ortaya koyması açısından önemlidir. Islak dönem koşullarının kuru dönem koşullarına göre yenilme öncesi daha kritik bir durum oluşturduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Yağış, Matrik Emme, Stabilite, Erken Uyarı, Veri Toplama ve Analiz

ABSTRACT

In this study, a landslide area was determined in Bartın/Turkiye, one of the provinces where rainfall-induced landslides are most common in Turkiye, and the landslide triggering mechanism of rainfall infiltration was investigated using the results of instrumental monitoring studies that lasted for two years in the field. Limit equilibrium stability analyzes were carried out by using the average changes of matric suctions and groundwater levels measured in dry and wet periods depending on seasonal conditions. Factor of safety of was 1.74 in the dry period initial conditions and 1.32 in the wet period initial conditions. The analyzes are important in terms of revealing how the stability is affected according to the changes in periodic matric suction and positive pore water pressure. It has been seen that wet period conditions create a more critical situation before failure compared to dry period conditions.

Keywords: Landslide, Rainfall, Matric Suction, Stability, Early Warning, Data Collection and Analysis

1. GİRİŞ

Yağmurla tetiklenen heyelanlar dünyanın pek çok ülkesinde olduğu gibi ülkemiz açısından da olumsuz neticeleri olan doğal afetlerin başında gelmektedir. Yağış kaynaklı heyelanların tahmin edilmesinde kullanılan

¹ Arş. Gör., Bartın Üniversitesi, salli@bartin.edu.tr

² Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, ttaskiran@ybu.edu.tr

³ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, yyuksel@gazi.edu.tr

(Sorumlu Yazar: Serdar ALLI)

yöntemler incelendiğinde bunların çoğunlukla ampirik (istatistiksel) yağış eşiği bağıntılarına veya doymun zemin mekaniğinde kullanılan prensiplere dayandığı görülmektedir. Bu yöntemler, zeminin doymun olmayan

hidro-mekanik özelliklerini ve yağmur suyunun doymayan zemine sızma mekanizmasını dikkate almadığından heyelan vakalarının tahmin edilmesinde güvenilirliği önemli ölçüde etkilemektedir. Yağmurla tetiklenen heyelanların mekanizmasının ve heyelanlara neden olan faktörlerin anlaşılmasında yağmurun zemine sızmasıyla zeminin matrik emmesinde, su içeriğinde, boşluk suyu basıncında ve hidro-mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin incelenmesi gerekmektedir.

Yeryüzündeki yağış ve buharlaşma döngüsüne bağlı olarak zeminin su içeriğinde, matrik emmesinde ve yeraltı su seviyesinde çeşitli şekillerde değişimler söz konusudur. Bu değişimlere bağlı olarak zeminlerin kayma dayanımı değişmektedir. Yamaçların stabilitesi üzerine yapılan çeşitli çalışmalarda (Ng ve Shi,1998; Yeh vd., 2006; Sharma ve Nakagawa, 2010; Oh ve Lu, 2015; Pramusandi vd., 2015; Song vd., 2016; Tran vd., 2016; Zaky ve Oh, 2017) doymayan zemin ortamına yağmur suyunun infiltrasyonunun yamaçların duraylılığını önemli ölçüde etkilediği ifade edilmiştir. Başlangıçta suya doymayan zeminler yağmurdan önce belli bir matrik emme değerine sahiptir. Bu matrik emme değerinin zeminin kayma dayanımı üzerinde artırıcı bir etkisi söz konusudur. Yağmur suyunun doymamış zemin şevine infiltrasyonu ile zeminin su içeriği ve doymunluğu artmaya, matrik emmesi azalmaya başlamaktadır. Yamaçlarda duraysızlık zeminin kritik kayma yüzeyindeki matrik emmelerin azaldığı durumda olabileceği gibi matrik emmelerin tamamen kaybolup pozitif boşluksuyu basınçlarının geliştiği durumda da olabilmektedir. Bu davranışın gelişimi yağış şiddeti, yağış süresi, yamaç geometrisi, zeminin hidro-mekanik özellikleri, şevin başlangıç sınır koşulları (yeraltı su seviyesi, su içeriği, doymunluk derecesi, matrik emmesi vs) gibi çeşitli parametrelere bağlı oldukça karmaşık bir konudur. Yağmurla tetiklenen heyelanların gözlemlendiği çeşitli coğrafi bölgeler için bu mekanizmanın aydınlatılması heyelan literatürüne önemli katkılar sunacaktır.

Bu çalışmada heyelanların hidro-mekanik davranışının aydınlatılması amacıyla Bartın'da temsili bir heyelanlı bölge belirlenmiştir. Yağış infiltrasyonunun heyelanı tetikleme mekanizması sahada iki yıl süren aletsel izleme çalışmalarının sonuçları kullanılarak incelenmiştir. Heyelanlı bölge zemininin temel fiziksel, mekanik ve hidrolik özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Sahada mevsimsel koşullara bağlı olarak kurak ve ıslak dönemlerde ölçülen ortalama zemin matrik emme gerilmeleri ve yer altı su seviyeleri kullanılarak limit denge stabilite analizleri yapılmıştır. Yamacın stabilitesinin dönemsel olarak ne ölçüde etkilenebileceği yapılan çalışmalarda gösterilmiştir.

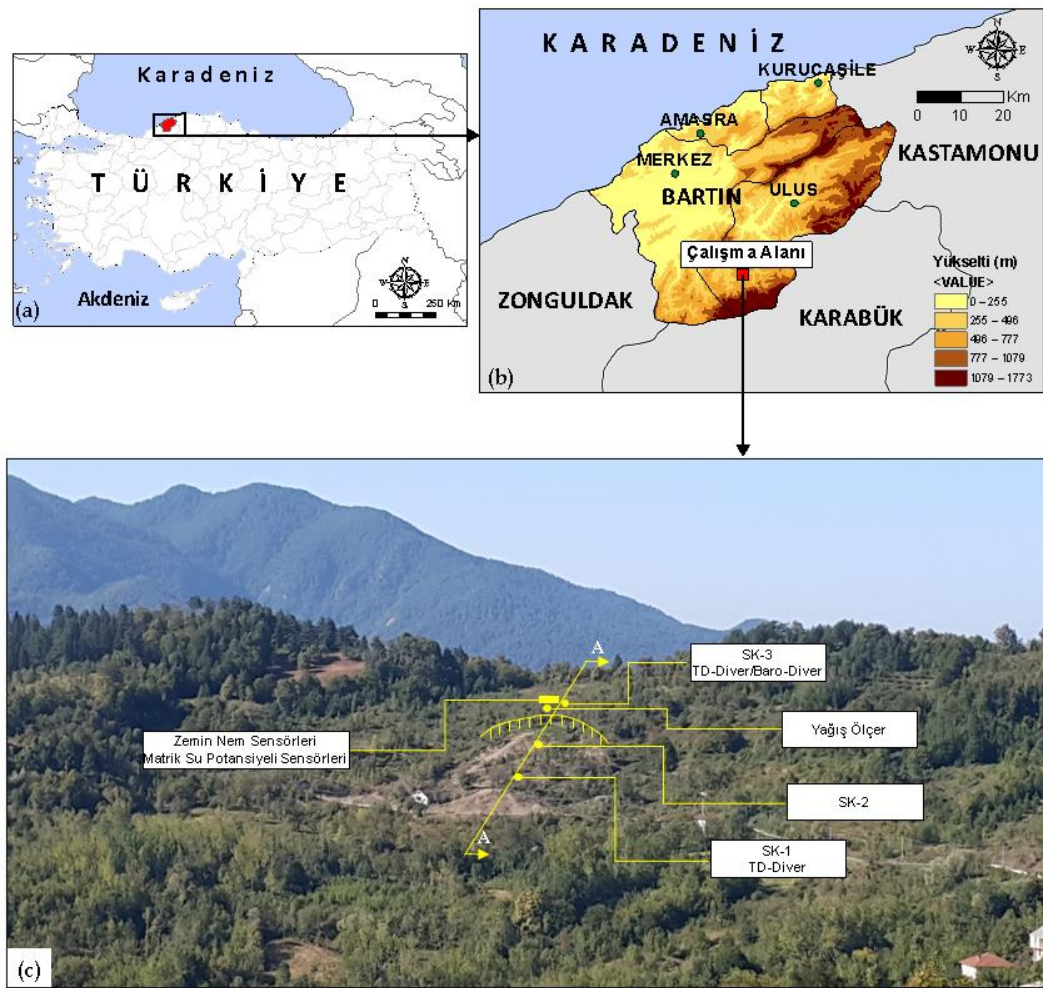
2. ÇALIŞMA SAHASI

Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesinde yer alan Bartın ili, heyelan vakaları açısından oldukça aktif bir bölgede bulunmaktadır. Topografya, yağış rejimi ve zemin koşulları yağış kaynaklı heyelanların oluşumuna uygun bir ortam teşkil etmektedir. Bartın ilinde 1950-2004 yılları arasında yapılan heyelan etütleri ile 59 yerleşim biriminde toplam 955 konutun heyelandan etkilendiği kaydedilerek nakil yolu ile korunmaları öngörülmüştür. Geçmişte meydana gelen heyelanlar sonucu altyapıda üstyapıda önemli hasarlar oluşmuş, birçok tarım ve orman alanı kullanılamaz duruma gelmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemi ortamında Bartın İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü yetkililerince yapılan çalışmalarda ilde hareketine devam eden, eski ve duraklamış toplam 475 adet heyelanlı alan tespit edilmiştir. İlin yüz ölçümünün %15'i çok yüksek, %28'i yüksek, %38'i orta, %17'si düşük, %2'si çok düşük duyarlılıkta heyelan afeti meydana gelebilecek özelliklere sahiptir (Saraç vd., 2017). İlde geçmiş dönemlerde meydana gelen heyelanların Ulus formasyonu olarak tanımlanan Kretase yaşlı filiş çökellerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Gökçe vd. (2008)'e göre Bartın'ın Ulus ilçesi Türkiye'nin en fazla heyelan vakasının görüldüğü ilçesidir.

Yağmurla tetiklenen heyelanların hidro-mekanik davranışının anlaşılmasına katkı sunmak amacıyla Bartın ili Ulus ilçesine bağlı Hisar köyünde temsili bir heyelanlı bölge belirlenmiştir. Çalışma alanının konumu ve genel görünümü Şekil 1 'de verilmektedir. Hisar köyü Bartın Merkeze 42 km, Ulus ilçe merkezine 24 km mesafede yer almaktadır. İncelenen heyelan bölgesi Hisar köyü'nün Çandırılar mahallesinde yer almaktadır. Heyelan, mahalleye giden aşağıdaki yolun sağ tarafındaki yamaçta meydana gelmiştir. Yamacın stabilitesini kaybettiği bölgede eğim ortalama 18 derece kadardır. Heyelan nedeniyle topoğrafyada gerilme çatlakları, ondülasyonlar ve kayma şeklinde değişimler gözlemlenmiştir. Yamaç üzerinde yaklaşık 70 -75 metre genişliğinde 100 – 110 metre uzunluğunda zemin malzemesi yamaç aşağı ötelenerek hareket etmiştir. Sahada yapılan gözlemlerden kayma derinliğinin 4,5 – 5,00 metre kadar olduğu tahmin edilmektedir. Heyelanın meydana geldiği zemin üzerinde konut bulunmamasıyla birlikte topuk kısmında yer alan tek katlı metruk bir konutta heyelan nedeniyle çeşitli ölçeklerde hasar oluşmuştur. ⁱ

Yağışın Heyelan Mekanizması Üzerindeki Etkilerinin Sahada Aletsel Gözlem Çalışmalarıyla İncelenmesi: Bartın İli Örneği

İklim koşullarına bağlı olarak zemin bünyesinde meydana gelen değişimler sahada iki yıl süren aletsel izleme programı kapsamında incelenmiştir. Bu bağlamda heyelanlı bölgeye zemin nem sensörleri, matrik su potansiyeli sensörleri, yeraltı su seviyesi ölçüm sensörleri (TD-Diver ve Baro-Diver), yağış ölçüm sensörü ve veri toplama üniteleri Şekil 1c'de verilen plana göre yerleştirilmiştir. Yerleştirilen sensörler ve veri toplama üniteleri ile heyelanlı bölgeye yağın yağış miktarı, yeraltı su seviyesindeki değişimler, zeminin su içeriği ve matrik emme gerilmelerinde meydana gelen değişimler saatlik olarak ölçülmüştür. Heyelan bölgesine 2 adet zemin nem sensörü ile 3 adet matrik su potansiyeli sensörü heyelanın taç bölgesinin gerisinde sırasıyla 1.10, 1.63 metre ve 0.58, 1.10, 1.63 metre derinliklerinde açılan 5 adet sensör kuyusuna yerleştirilmiştir. Yeraltı su seviyesi ölçümleri SK1 ve SK3 kuyularında yapılmıştır. 2019 – 2021 yılları arasındaki iki yıllık periyotta gerçekleşen saha izleme ölçümlerine göre heyelan bölgesinde yılların ilk beş ayının ıslak, diğer ayların kurak geçtiği gözlemlenmiştir. Dönemsel matrik emme ve yeraltı su seviyeleri Tablo 1'te belirtildiği şekilde sınıflandırılmıştır.



Şekil 1. Heyelan bölgesinin konumu ve genel görünümü

Tablo 1. Heyelan bölgesi dönemsel matrik emme ve yeraltı su seviyeleri

Derinlik (m)	Kuru Dönem Haziran-Aralık		Islak Dönem Ocak-Mayıs	
	Matrik Emme (kPa)	Yeraltı Su Seviyesi (m)	Matrik Emme (kPa)	Yeraltı Su Seviyesi (m)
Yamaç Yüzeysi	60		0	
0.58	60	3.49	0	2.21
1.10	60		0	
1.63	15		0	

3. NUMERİK ANALİZ

Saha çalışmaları ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen verilerden yararlanılarak heyelan bölgesinin Şekil 1’de gösterilen kritik kesiti modellenmiştir. İdealize zemin profili jeolojik gözlem, araştırma sondajı verileri ve çalışma bölgesinin topografyası göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Heyelan bölgesinde numerik modellemeye esas idealize zemin profilini, yüzeyde değişken kalınlıkta zemin karakterli birim ile bu birimin altında Bartın ilinde heyelanların en fazla görüldüğü Ulus formasyonunun orta-çok ayrılmış seviyeleri oluşturmaktadır. Zemin nitelikli birimin kalınlığı SK-3 ve SK-2 sondaj bölgelerinde 4.50 m, SK-1 sondaj bölgesinde 6.50 m olup yamaç yüzeyi boyunca değişmektedir.

Heyelan bölgesinin stabilite analizleri Slope/W yazılımında Bishop limit denge yöntemiyle kuru dönem ve ıslak dönem olmak üzere iki türde yapılmıştır. Kuru ve ıslak dönem stabilite analizleri Tablo 1’de sunulan iki yıllık gözlem süresince sahada ölçüme dayalı elde edilen ortalama matris emmelerin ve yeraltı su seviyelerinin modele başlangıç sınır koşulu olarak tanımlanmasıyla yapılmıştır. Doygun olmayan zeminlerin kayma dayanımının hesaplanmasında Vanapalli vd. (1996) tarafından önerilen aşağıdaki denklemden yararlanılmıştır.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi' \left[\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \quad (1)$$

Denklemden τ zeminin kayma dayanımını, c' efektif kohezyonu, $(\sigma - u_a)$ yenilme düzlemindeki net normal gerilmeyi, ϕ' efektif içsel sürtünme açısını, $(u_a - u_w)$ kayma düzlemindeki matris emmeyi, θ_w hacimsel su içeriğini, θ_r residüel su içeriğini, θ_s doymuş su içeriğini göstermektedir. Heyelan bölgesinin zemin ve kaya kütlesi geoteknik özellikleri laboratuvar deneyleri ve sondaj verilerine dayalı olarak Taskiran vd. (2023) tarafından incelenmiştir. Analizlerde bu araştırmacılar tarafından elde edilen değerler kullanılmıştır. Modellemede kullanılan zemin özellikleri Tablo 2’de, kaya kütlesi özellikleri Tablo3’te verilmiştir.

Tablo 2. Zemin malzemesine ait modellemede kullanılan geoteknik özellikler

Parametre	Zemin
Malzeme Modeli	Mohr-Coulomb
c' (kPa)	8
ϕ'	21
γ (kN/m ³)	20
α	0.015
n	3.045
m	0.134
θ_s (%)	40.8

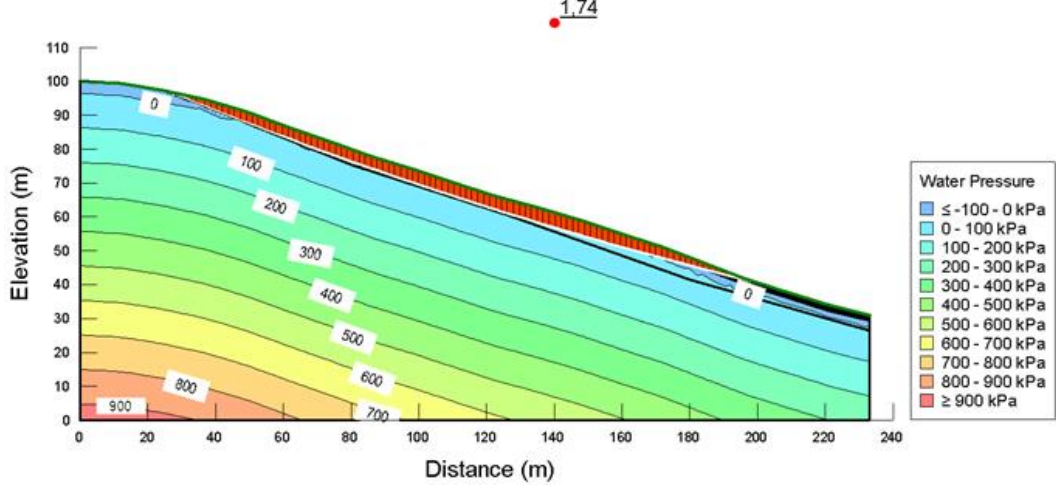
Tablo 3. Kaya kütlesine ait modellemede kullanılan geoteknik özellikler

Parametre	Ayrılmış Kaya
Malzeme Modeli	Hoek-Brown
γ (kN/m ³)	23
ϕ_b (°)	0
GSI	30
D	0
m_i	6.65
σ_{ci} (MPa)	9.81

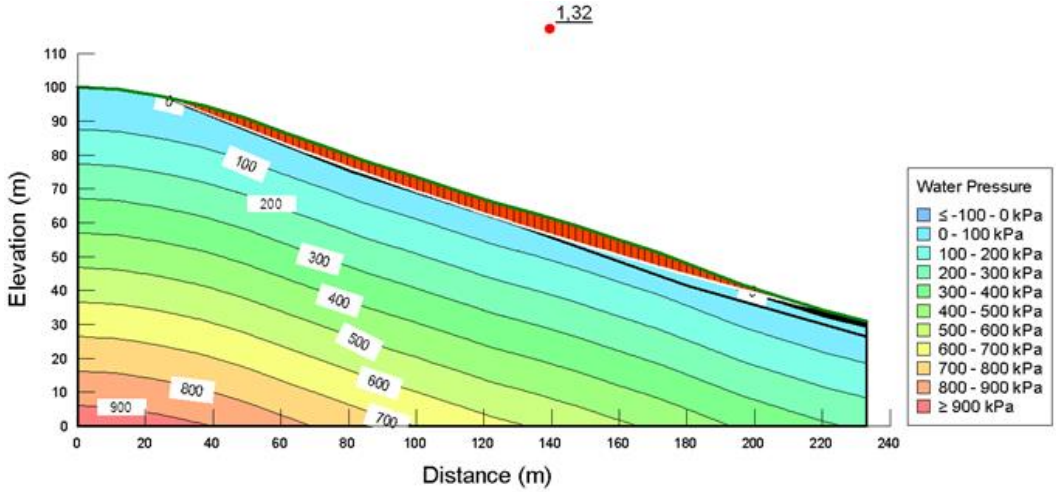
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kuru ve ıslak dönem stabilite analizleri sonucu elde edilen güvenlik sayıları ve kayma yüzeyleri Şekil 2 ve 3’te verilmiştir. Kuru dönem için yapılan stabilite analizinde yamacın göçmeye karşı güvenlik faktörü 1.74, ıslak dönem için 1.32 hesaplanmıştır. Yapılan analizler heyelan bölgesinde mevsimsel koşullara bağlı olarak zemin matris emme profilinde ve pozitif boşluksuyu basıncında meydana gelen değişimlere göre stabilitenin ne şekilde etkilendiğini ortaya koyması açısından önemlidir.

Yamaçların göçmeye karşı güvenlik sayılarının 1.50'nin altında olması stabilite açısından kritik bir durum oluşturabilir. Islak dönem zemin koşulları dikkate alınarak yapılan analizde güvenlik sayısının 1.32 olması, incelenen bölgeye benzer olan kesimlerde yamaç güvenliğinin kritik olduğunu ve kritik eşişe yakın bir yağışın olması durumunda güvenlik sayısının 1.00'a kadar düşebileceğini göstermektedir. Islak dönem koşulları burada göçme öncesine çok yakın kritik bir durum meydana getirmektedir.



Şekil 2. Kuru dönem başlangıç koşullarında güvenlik sayısı ve kritik kayma yüzeyi



Şekil 3. Islak dönem başlangıç koşullarında güvenlik sayısı ve kritik kayma yüzeyi

5. SONUÇLAR

Bartın'da heyelanlı bir bölge belirlenmiş, yağış infiltrasyonunun heyelanı tetikleme mekanizması sahada iki yıl süren aletsel izleme çalışmalarının sonuçları kullanılarak incelenmiştir. Sahaya özgü mevsimsel matrik emme, yeraltı su seviyesi değişimleri, zeminin hidro-mekanik özellikleri göz önüne alınarak stabilite analizleri yapılmıştır.

Mevsimsel koşullara bağlı olarak yeraltı su seviyesinde ve matrik emme gerilmelerinde meydana gelen değişimlerinin incelenmesi, sahaya özgü başlangıç koşullarının oluşturulması ve bir heyelanın stabilite durumunun izlenebileceğinin gösterilmesi açısından oldukça önemlidir. Sahada yapılan ölçümlere göre çalışma bölgesinde yılın ilk beş ayının ıslak, diğer ayların kuru geçtiği görülmüştür. Yamacın göçmeye karşı güvenlik sayısı kuru dönem başlangıç koşullarında 1.74, ıslak dönem başlangıç koşullarında 1.32 bulunmuştur. Yapılan analizler dönemsel matrik emme ve pozitif boşluksuyu basıncında meydana gelen değişimlere göre

stabilitenin ne şekilde etkilendiğini ortaya koyması açısından önemlidir. Islak dönem koşullarının kuru dönem koşullarına göre yenilme öncesi daha kritik bir durum oluşturduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 120M436 no'lu projenin ve Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlük Birimi tarafından 06/2018-29 no'lu projenin mali destekleriyle gerçekleştirilmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı ilgili kurumlara teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Gokce, O., Ozden, S., Demir, A. (2008), "Spatial And Statistical Distribution Of Disasters In Türkiye, Disaster Information Inventory", Türkiye General Directorate Of Disaster Works, Ankara, (in Turkish) https://www.afad.gov.tr/kurumlar/AFAD.gov.tr/3491/xfiles/abep_kitap_matbaa_final_04122008_s_mall.pdf
- Ng, C. W. W., Shi, Q. A. (1998), "Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage", Comput. Geotech, 22 (1), 1–28. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(97\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(97)00036-0).
- Oh, S., Lu, N. (2015), "Slope Stability Analysis under Unsaturated Conditions: Case Studies of Rainfall-Induced Failure of Cut Slopes", Eng. Geol. 184, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.007>.
- Pramusandi, S., Rifa'i, A., Suryolelono, K. B. (2015), "Determination of Unsaturated Soil Properties and Slope Deformation Analysis Due to the Effect of Varies Rainfall", Procedia Eng. 125, 376–382. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.090>.
- Saraç, F., Saraç, T.Ö., Soydaş, D., Dilsiz, E., Kaya, S. (2017) "Bartın İli Heyelan Duyarlılık Analizi Raporu", Bartın İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü.
- Sharma, R. H., Nakagawa, H. (2010), "Numerical Model and Flume Experiments of Single- and Two-Layered Hillslope Flow Related to Slope Failure", Landslides, 7 (4), 425–432. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0205-0>.
- Song, Y. S., Chae, B. G., Lee, J. A (2016), "Method for Evaluating the Stability of an Unsaturated Slope in Natural Terrain during Rainfall", Eng. Geol. 210, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.007>.
- Taskiran, T., Allı, S., Yilmaz, Y. (2023) "Hydro–Mechanical Behaviour of a Rainfall-Induced Landslide by Instrumental Monitoring: Landslide–Rainfall Threshold of the Western Black Sea Bartın Region of Türkiye", Appl. Sci., 13, 8703. <https://doi.org/10.3390/app13158703>
- Tran, A. T. P., Sim, Y., Kim, A.-R., Cho, G.-C., Kim, D.-H. (2016), "Numerical Modeling of Rainfall-Induced Slope Failure", 2016 World Congr. Adv. Civil, Environ. Mater. Res., 1–10.
- Yeh, H.-F., Chang, P.-H., Chen, J.-F., Lee, C.-H. (2006), "Instability of Unsaturated Soil Slopes Due to Infiltration", In International Symposium on Geohazards Mitigation; Tainan, Taiwan; p 6.
- Zaky, F. A., Oh, S. (2017), "Transient Infiltration and Stability Analysis of Unsaturated Soils in Busan Landslide Area", Int. J. Environ. Sci., 2 (May), 40–44.