

HİDROELEKTRİK SANTRAL (HES) İLETİM HATLARINDA YER ALAN GEOTEKNİK RİSKLERİN BİR HEYELAN VAKASI ÖZELİNDE 3 BOYUTLU (3D) ANALİZİ

3D ANALYSIS OF GEOTECHNICAL RISKS IN HYDROELECTRIC POWER PLANT (HPP) TRANSMISSION LINES AS A LANDSLIDE CASE STUDY

Yusuf YAŞAR¹, Özgen KÖKTEN²

ÖZET

İletim hatları ile projelendirilen hidroelektrik santraller (HES) tarafından üretilen elektrik enerjisi ülkemiz toplam enerji üretiminde önemli bir bölümü teşkil etmektedir. Bu bağlamda iletim hatlarının uzun mesafeler boyunca karşılaşılabileceği muhtemel heyelan, erozyon, ani çökme ve drenaja bağlı oluşabilecek geoteknik risklerin detaylı olarak incelenerek tanımlanması ve tasarımın bu riskleri minimize edecek şekilde yapılması gerekmektedir. Bu nedenle hidroelektrik santrallerine bağlanan iletim hatlarında enerji üretimini aksatacak geoteknik risklerin hızlı ve etkili bir şekilde tespit edilerek uygun rehabilitasyon önerilerinin uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada, bir vaka analizi özelinde benimsenen tasarım kriterleri ve metodolojisi özetlenerek, Hidroelektrik santral (HES) iletim hattında meydana gelen heyelan ve bunun neticesinde iletim hattında meydana gelen kopukluğun 3 Boyutlu (3D) analiz yöntemleri kullanılarak geoteknik ve yapı mühendisliği kapsamında değerlendirilmesini kapsamaktadır. Gerçekleştirilen analizlerde heyelan meydana gelen bölgenin jeolojik ve gözlemsel değerlendirmelere bağlı olarak strength reduction method (SRM) analizleri ve iletim hattında meydana gelen kopukluğun rehabilitasyonuna yönelik 3 boyutlu (3D) yapısal analizler gerçekleştirilerek sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidroelektrik santral (HES), iletim hatları, Heyelan, Sonlu elemanlar modeli

ABSTRACT

Electrical energy produced by hydroelectric power plants (HPPs) designed with transmission lines constitutes an important part of our country's total energy production. Geotechnical risks due to landslides, erosion, subsidence and drainage that transmission lines may encounter must be examined and defined in detail and the design must be made

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., yusuf.yasar@temelsu.com.tr (Sorumlu Yazar)

² İnşaat Yüksek Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., ozgen.kokten@temelsu.com.tr



to minimize these risks. For this reason, geotechnical risks that will disrupt energy production in transmission lines connected to hydroelectric power plants must be identified quickly and effectively and appropriate rehabilitation recommendations must be implemented. In this study, the design criteria and methodology adopted in a case study are summarized. This study includes the evaluation of the landslide that occurred in the Hydroelectric Power Plant (HPP) transmission line and the resulting break in the line within the scope of geotechnical and structural engineering using 3D analysis methods. In the analyses, strength reduction method (SRM) analyzes were carried out based on geological and observational evaluations of the region where the landslide occurred, and 3D structural analyzes were carried out for the rehabilitation of the break in the transmission line and the results were evaluated.

Keywords: *Hydroelectric power plant (HPP), Transmission lines, Landslide, Finite element model*

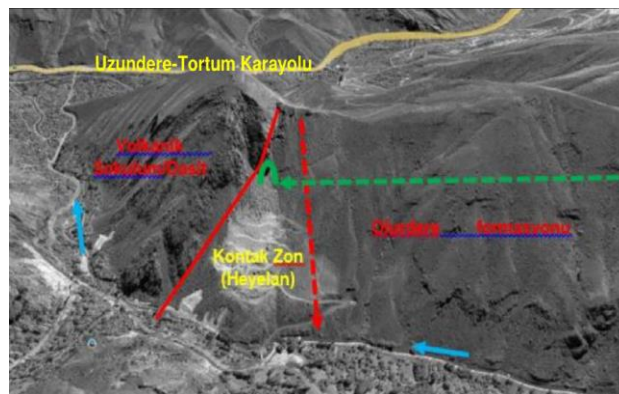
1. GİRİŞ

Bu çalışma, bir enerji üretim tesisinin su iletim hattında meydana gelen heyelan ve bu olayın ardından bu iletim hattında yaşanan kopuklukların kapsamlı bir şekilde rehabilitasyonuna yönelik yapılan geoteknik ve yapısal analizleri ayrıntılı olarak incelemektedir. Çalışma, heyelan etkisi altında kalan bölgelerde ve kopan iletim hattında gerçekleştirilen geniş çaplı saha çalışmaları ve jeoteknik değerlendirmeler ile bu doğrultuda yapılan geoteknik hesaplamaları kapsamaktadır. Çalışma alanının güncel durumunu ve yapılan iyileştirmeleri net bir şekilde gösterebilmek amacıyla, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan üç boyutlu (3D) modellerle analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular bu çalışma kapsamında sunulmuştur.

2. GEOTEKNİK TASARIM

2.1. Çalışma Alanı Jeolojisi

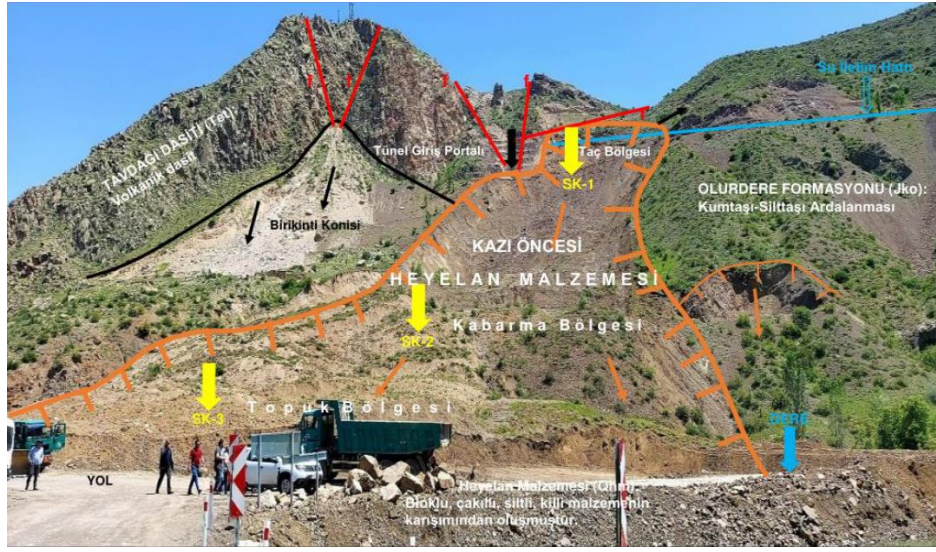
Çalışma alanında ve çevresindeki jeolojik birimler, Jura yaşlı Olurdere Formasyonu, Eosen yaşlı Tavdağı Dasiti ve Kuvaterner yaşlı Alüvyon olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma alanına ait yapısal jeoloji gösterimi Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı yapısal jeoloji gösterimi



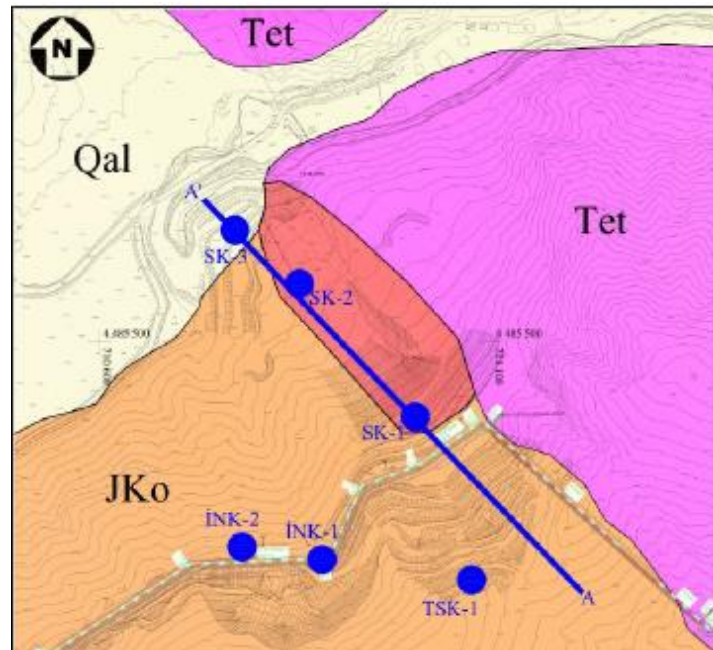
Çalışma alanı ve çevresinde yer alan birimler yaşlıdan gence doğru; Jura yaşlı Olurdere Formasyonu (JKo), Eosen yaşlı Tavdağı Dasiti (Tet), ve Kuvaterner yaşlı Alüvyon (Qal) birimleridir.



Şekil 2. Yaşanan Heyelan Sonrası Çalışma Sahasının Genel Durumu

Çalışma alanının jeolojisinin net olarak ortaya konabilmesi amacıyla açılan sondajlar Şekil 3.'de gösterilmiştir. Açılan sondaj kuyularında kesilen litolojik birimler ise Tablo 1.'de gösterilmiştir.

Çalışma, heyelan bölgesinde yapılan 406,65 metre uzunluğundaki 11 adet karotlu sondaj, inklinometre yerleştirilen sondajlar ve laboratuvar deney sonuçları, heyelan malzemesinin temizlenmesi ve stabilize iyileştirmelerine yönelik kazı ve şevlendirme çalışmalarını içermektedir. Bu kapsamda oluşturulan jeolojik profiller Şekil 4. ve Şekil 5.'de gösterilmiştir.

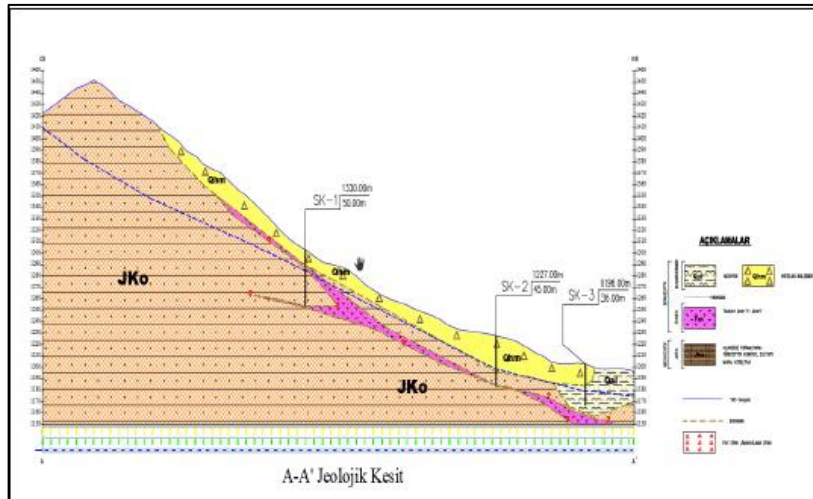


Şekil 3. İnceleme Alanı Kesit Yerleri ve Sondaj Konumları

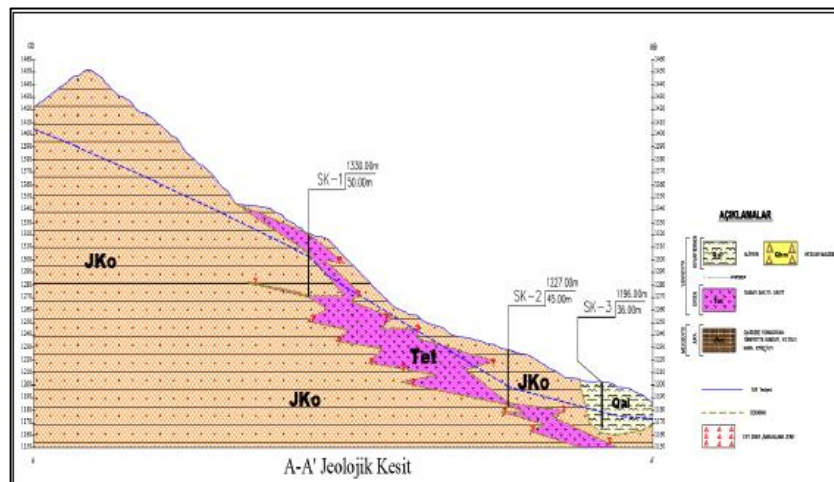


Tablo 1. Sondaj kuyularında kesilen litolojik birimler

Kuyu no	Derinlik	Yeri	Kesilen litolojik birim	Diğer
SK-1	50	Heyelan taç bölgesi	0.00 – 13.50	Heyelan malzemesi
			13.50 -15.65	Dasit
			15.65-49.80	Kumtaşı-Silttaşı Ardalanması
			49.80-50.00	Dasit
SK-2	45	Heyelan kabarma bölgesi	0.00 – 33.25	Heyelan malzemesi
			33.25 -43.50	Kumtaşı-Silttaşı Ardalanması
			43.50-43.90	Dasit
			43.90-45.00	Kumtaşı-Silttaşı Ardalanması
SK-3	36	Heyelan topuk bölgesi	0.00 – 19.30	Heyelan malzemesi
			19.30 -36.00	Alüvyon
TSK-1	85	Tünel güzergahı	0.00 – 85.00	Kumtaşı-Silttaşı Ardalanması
INK-1	50	Tünel portalı	0.00 – 47.60	Kumtaşı-Silttaşı Ardalanması
			47.60 -50.00	Dasit
INK-2	50	Tünel portalı	0.00 -32.00	Kumtaşı-Silttaşı Ardalanması
			32.00-33.65	Dasit
			33.65-50.00	Kumtaşı-Silttaşı Ardalanması



Şekil 4. A – A' kazı öncesi jeolojik kesiti



Şekil 5. A – A' kazı sonrası jeolojik kesiti



3D modelleme ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde kullanılmak üzere, saha kaya kütlesinin RMR₈₉ değeri 48 (Orta Kaya), kohezyon (c) 200-300 kPa, içsel sürtünme açısı (φ) 25°-35° ve GSI değeri 54 olarak tespit edilmiştir. Kaya kütlesinin statik deformasyon modülü, Serafim ve Pereira (1983) ve Hoek ve Brown (1998) yöntemlerine göre sırasıyla E_m=8,91 GPa ve E_m=7,44 GPa olarak hesaplanmıştır. Roclab 1.0 yazılımına göre yapılan hesaplamalarda ise, tek eksenli basınç dayanımı σ_{ci}=35 MPa, kohezyon c=452 kPa, içsel sürtünme açısı φ=57°, ve deformasyon modülü E_d=5,41 GPa olarak bulunmuştur.

2.2. Çalışma Alanı Depremselliđi

Çalışma alanı için deprem ivmesi AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) tarafından hazırlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre 0,216g olarak belirlenmiştir.

2.4. Proje Kavram Esasları

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde, c-Ø azaltımı methodu kullanılarak mevcut duruma ait toptan kaymaya karşı güvenlik sayısı hesaplanmıştır.

$$\Sigma Msf = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}} = \frac{S_{u,input}}{S_{u,reduced}}$$

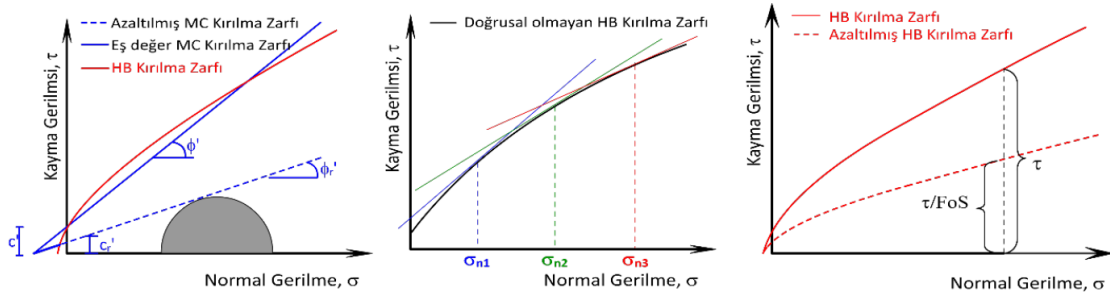
Şev stabilite analizlerinde kullanılan çeşitli SRM metodolojileri, farklı zemin ve kaya ortamlarına uygulanabilirlik bakımından değerlendirilmiştir. Eşdeğer Mohr-Coulomb, Lokal Mohr-Coulomb ve doğrudan Hoek-Brown parametrelerinin kullanıldığı yöntemler farklı koşullara uyum sağlama açısından önem arz etmektedir. Doğru metodun seçimi, mühendislik uygulamalarında hem güvenliği hem de maliyet etkinliğini doğrudan etkileyen kritik bir unsurdur.

Kritik göçme durumunun tespit edilmesinde en sık ve yaygın kullanılan eşdeğer MC Yöntemi, doğrusal olmayan HB eğrisine uygun bir doğrusal MC eğrisinin uydurulmasını içermektedir (Hoek ve diğ., 2002). Bu doğrusal eşdeğer MC kırılma zarfı, göçme anına kadar kademeli olarak azaltılır ve şeve ait güvenlik sayısı hesaplanır (Duncan, 1996) (Şekil 1a).

Lokal Mohr-Coulomb Parametreleri ile SRM Analizi yönteminde ise, doğrusal olmayan HB kırılma zarfı, her bir farklı gerilme durumu için lokal olarak belirlenen çeşitli MC eğrileriyle temsil edilmektedir. MC parametreleri, her bir gerilme durumuna göre türetilir ve göçme durumuna kadar azaltılır (Fu & Liao, 2010) (Şekil 1b).

Hammah vd. (2005) tarafından önerilen Hoek-Brown Parametreleri ile SRM Analizinde bu metod, mukavemet azaltma yönteminde doğrudan doğrusal olmayan HB kriterinin kullanılmasını sağlar. Güvenlik sayısı hesaplamasında, HB kırılma zarfının dikey eksen değeri olan kayma gerilmesi (τ), şevde göçme meydana gelene kadar kademeli olarak azaltılır (Bu yeni eğri için en uygun HB sınıflandırma parametreleri belirlenir. Şevde yenilme meydana getiren güvenlik sayısı bu süreç sonucu belirlenir (Şekil 1c).





Şekil 6. a) Eş değer MC, b) Lokal MC ve c) Doğrusal olmayan HB parametreleri zarfı

2.5. Nümerik Analizler

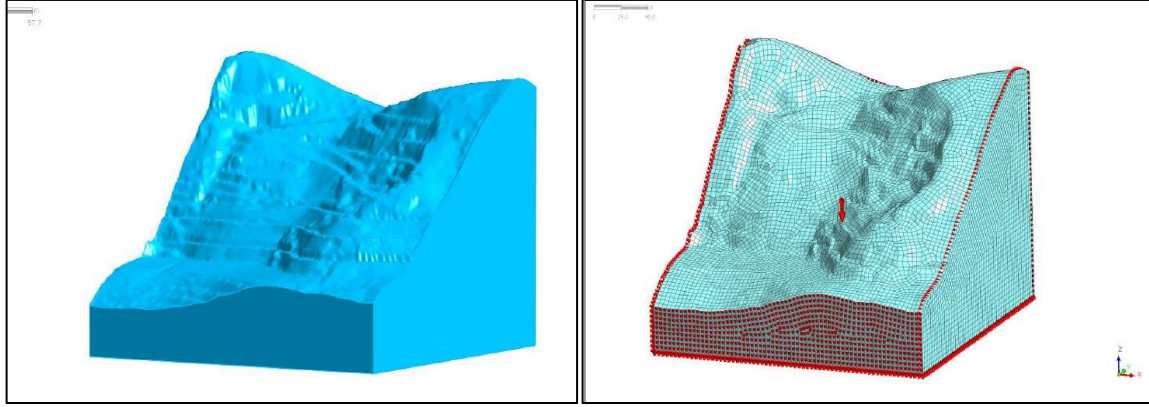
Heyelan sonrası mevcut şev durumunun net olarak değerlendirilebilmesi için, sonlu elemanlar yöntemi ile üç boyutlu modeller oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan eleman sayısı 147,139, node sayısı ise 113,156'dır. Üçgen ve kare meshleme sistemlerinin birlikte kullanıldığı Hybrid mesh yöntemi, şev yüzeyindeki 3D etkileri net bir şekilde ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında yapılan kazılar Şekil 7.'de ve bu kazılara uygun olarak oluşturulan 3D solid modeli ve ağ görüntüsü Şekil 8.'de sunulmuştur.



Şekil 7. Yapılan kazılar sonrası çalışma alanının güncel durumu

Kritik göçme durumunun tespit edildiği ana karşılık gelen düşürülmüş ϕ -c veya SRM değerleri, zeminlerin başlangıç (input) ϕ -c değerleri ile mukayese edilerek program tarafından sistem için bir güvenlik sayısına ulaşılır (ΣMsf). Bu güvenlik katsayısı ilgili şev için toptan stabilite güvenlik sayısı olarak tanımlanır.

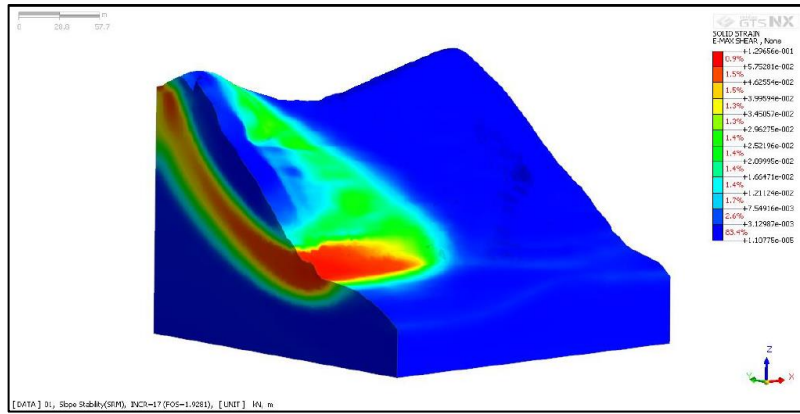




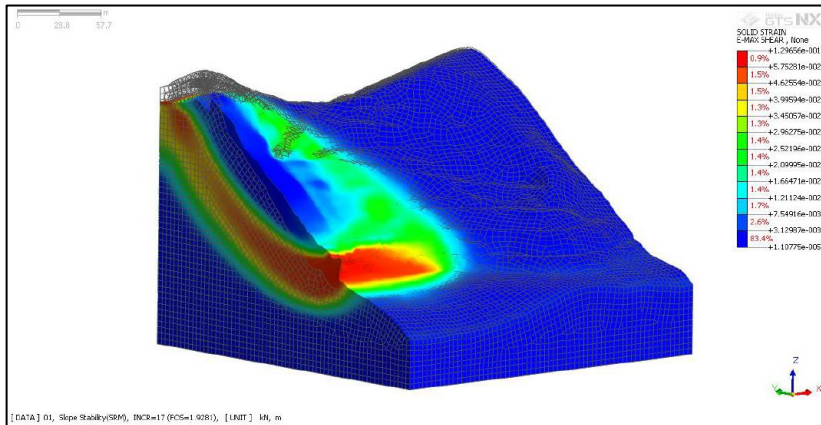
Şekil 8. Oluşturulan 3D solid modeli ve ađ görüntüsü

2.6. Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında belirtilen metodolojiler göz önüne alınarak Şev stabilitesi analizleri 3 boyutlu (3D) statik ve deprem yükleme durumu göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda statik durum için yapılan analizlere ait sonuçlar Şekil 9. ve Şekil 10.'da sunulmuştur.



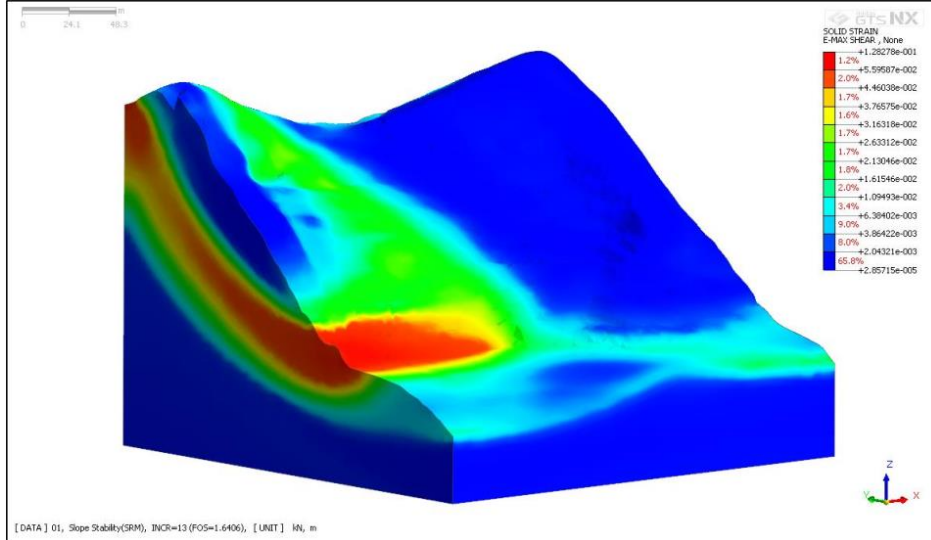
Şekil 9. Meydan gelen kayma birim deformasyon kesit görüntüsü (statik) – FOS=1,93



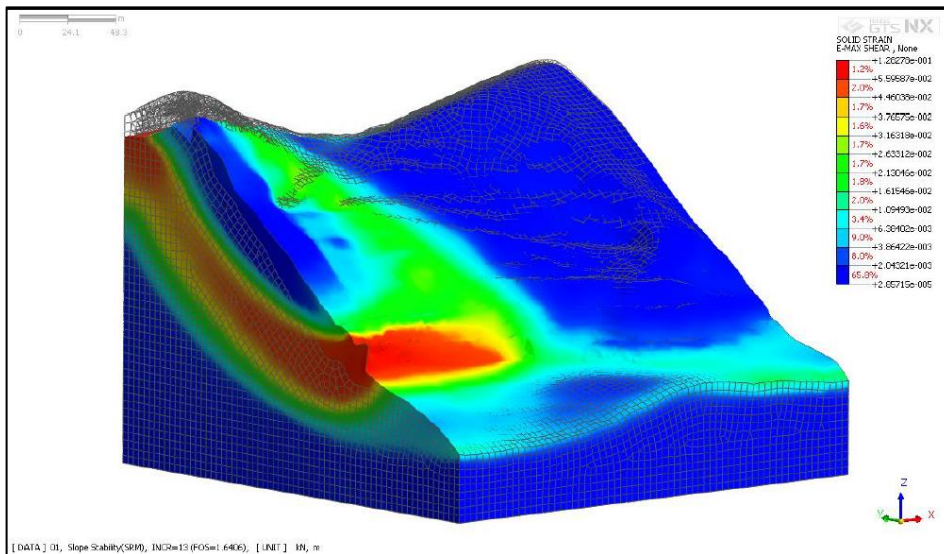
Şekil 10. Meydan gelen kayma birim deformasyon deforme olmuş ađ görüntüsü (statik)



Psödo-statik analiz, geoteknik mühendisliğinde dinamik yüklerin etkilerini değerlendirmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, dinamik yükleri statik bir kuvvet olarak ele alarak, özellikle deprem gibi kısa süreli dinamik olayların zemin stabilitesi üzerindeki etkilerini tahmin etmeye olanak tanır. Bu kapsamda yapılan analizlere ait sonuçlar Şekil 11. ve Şekil 12.'de sunulmuştur.



Şekil 11. Meydan gelen kayma birim deformasyon kesit görüntüsü (dinamik) – FOS=1,64



Şekil 12. Meydan gelen kayma birim deformasyon deforme olmuş ağ görüntüsü (dinamik)

Analizler sonucu elde edilen güvenlik sayısı değerleri Tablo 2.'de sunulmuştur.

Tablo 2. Analizleri sonucu elde edilen güvenlik sayısı

Güvenlik Sayısı - SRM	
Statik durum	1,93
Dinamik durum	1,64



Ayrıca yapısal analizler kapsamında 4 metrelik boru için Sap2000 hesap modeli yapılarak yükler altında Von Mises stress sonuçları irdelenmiştir.

Borular zemin içerisine yerleştirilmiştir. Boru yükleri olarak zemin yükü, içerisi su dolu yükü ve hareketli araç yükü alınmıştır. Borular 2 metrede bir mesnetlenmiş olup yanal olarak dolgu zemin olduğu için boru yan taraflarda tutulmuştur.

Zemin yükü olarak boru üzeri 6 m² alanlık zemin yükü alınmıştır. 6*4*2 = 48 ton toprak yükü gelmektedir. Su yükü boru tamamen dolu ağırlığı alınmıştır. $A = \pi * 2.4^2/4 * 4 * 1 = 18.1$ ton su yükü gelmektedir

Yük Notasyonları; CL (Su yükü), LL (Araç yükü), TOP (Toprak Yükü) ve DEAD (Model Öz Ağırlığı) olarak ifade edilmiştir. Yük notasyonları ve gelen yükler Şekil 13'te verilmiştir. Hesap modeli Von Mises stress sonuçları ise Şekil 14. ve Şekil 15.'de sunulmuştur.

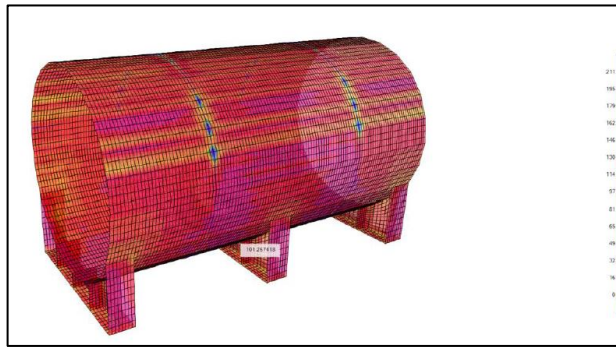
UDSTL7 – 1.4 (DEAD+CL+TOP) UDSTL8 – 1.2(DEAD+CL+TOP) + 1.6(LL)

TABLE: Base Reactions				
OutputCase	CaseType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ
Text	Text	Tonf	Tonf	Tonf
DEAD	LinStatic	0.00	0.00	2.35
CL	LinStatic	0.00	0.00	18.73
LL	LinStatic	0.00	0.00	19.62
TOP	LinStatic	0.00	0.00	49.71

Şekil 13. Yük notasyonları



Şekil 14. Von Mises stress sonuçları – UDSTL7



Şekil 15. Von Mises stress sonuçları – UDSTL8

Sonuçlara göre $235 * 0.9 = 211 \text{ Mpa} > 210 \text{ Mpa}$



3. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında incelenen heyelan, USGS'nin 2005 tarihli "Landslide Hazards and Planning" raporu ve 2008 tarihli "The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides" şartnamelerine göre, "B" kategorisinde bir translational (ötelenme) şeklinde olduğu değerlendirilmiştir. Jeolojik değerlendirmeler, şev yüzeyindeki kayaçların Olurdere Formasyonu'na ait fliş fasiyesinde bulunduğunu ve gri-kahverengimsi, kumtaşı, silttaşı ile yer yer volkanik sokulumların gözlemlendiğini ortaya koymuştur.

Bu makalede, şev stabilite analizleri için en efektif olduğu değerlendirilen Mohr Coulomb malzeme modeli kullanılarak SRM (Strength Reduction Method) analizleri yapılmıştır.

Uluslararası standartlar ve literatür kaynaklarına dayanan nümerik analizlerde, genel kabul görmüş güvenlik faktörü (FOS) 1,50 baz alınarak yapılan statik ve dinamik analizler sonucunda güvenlik faktörleri sırasıyla 1,93 ve 1,64 olarak hesaplanmış ve bu sonuçlar, çalışma alanında mevcut bir stabilite problemi öngörülmediğini göstermektedir. Bu bulgular, bölgedeki heyelan riskinin yönetilebilir seviyelerde olduğunu ve yapılan iyileştirmelerin etkinliğini doğrulamaktadır.

KAYNAKLAR

- Hoek, E., Carranza, C., & Corkum, B. (2002), Hoek-brown failure criterion – 2002 edition, Narms-Tac, 267–273.
- Duncan, J. M. (1996), State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical engineering*, 122(7), 577–596.
- Fu, W., & Liao, Y. (2010), Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation, *Computers and Geotechnics*, 37(3), 288–298.
- Hammah, R. E., Yacoub, T. E., Corkum, B. C., & Curran, J. H. (2005), The shear strength reduction method for the generalized Hoek-Brown criterion, *American Rock Mechanics Association - 40th US Rock Mechanics Symposium, ALASKA ROCKS 2005: Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions*.
- U.S. Department of the Interior (2008), *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides*, USGS.

SEMBOL LİSTESİ

Bildiride kullanılan semboller iki sütunlu tablo halinde 10 punto kullanılarak listelenmelidir.

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
τ	Kayma gerilmesi	g	Yer çekimi ivmesi
\emptyset	İçsel sürtünme açısı	c	Kohezyon

