

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**AŞAĞI KALEKÖY BARAJINDA HEYELAN NEDENİYLE OLUŞAN
GÖÇME MEKANİZMASININ ARAŞTIRILMASI VE HEYELAN ÖNLEME
TEDBİRLERİ**

Dilek Elif TAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM

TUNCELİ-2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AŞAĞI KALEKÖY BARAJINDA HEYELAN NEDENİYLE OLUŞAN GÖÇME
MEKANİZMASININ ARAŞTIRILMASI VE HEYELAN ÖNLEME TEDBİRLERİ**

Dilek Elif TAN
(210150025)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM

TUNCELİ 2024

T.C
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AŞAĞI KALEKÖY BARAJINDA HEYELAN NEDENİYLE OLUŞAN GÖÇME
MEKANİZMASININ ARAŞTIRILMASI VE HEYELAN ÖNLEME TEDBİRLERİ**

Dilek Elif TAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 29/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza	İmza	İmza
Dr. Öğr. Üyesi Hilal ARSLANOĞLU IŞIK (Munzur Üniversitesi)	Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM (Munzur Üniversitesi)	Dr. Öğr. Üyesi Sibel KAYGILI (Fırat Üniversitesi)
BAŞKAN	DANIŞMAN	ÜYE

Bu tez, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Altuğ KAZAR

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza
Dilek Elif TAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim ve tez sürecim boyunca desteklerini benden esirgemeyen danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM'e teşekkür ederim. Hayatımın her döneminde destekleri ile yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Dilek Elif TAN
TUNCELİ-2024



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
RESİMLER LİSTESİ	VI
TABLOLAR LİSTESİ	VII
SEMBOLLER LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Heyelan ve Özellikleri.....	1
1.1.1. Heyelan	1
1.1.2. Heyelan çeşitleri	1
1.1.3. Heyelan kısımları.....	4
1.1.4. Kütle hareketlerinin oluşum şekilleri	5
1.1.4.1. Düşme.....	5
1.1.4.2. Devrilme	6
1.1.4.3. Kayma.....	7
1.1.4.4. Yayılmalar	9
1.1.4.5. Akmalar	10
1.1.5. Heyelanların sebepleriyle ilgili yaklaşımlar	10
1.1.5.1. Morfolojik sebepler	10
1.1.5.2. Jeolojik sebepler	11
1.1.5.3. Fiziksel sebepler	11
1.1.5.4. İnsan temelli sebepler	12
1.1.6. Heyelan önleme yöntemleri.....	12
1.1.6.1. Yamaç geometrisinin değiştirilmesi	13
1.1.6.2. Kaymaya karşı destek sistemlerinin oluşturulması	13
1.1.7. Literatür taraması.....	16
2. JEOLJİK DEĞERLENDİRME	20
2.1. İnceleme Alanının Yeri	20
2.2. Veriler ve Çalışma Yöntemi	21
2.3. Önceki Çalışmalar	21
2.3.1. Genel jeoloji	21
2.3.2. Stratigrafik jeoloji.....	22
2.3.2.1. Solhan Volkaniti	22
2.3.2.2. Bingöl Formasyonu (Plyb)	23
2.3.2.3. Zırnak Formasyonu (Pvz).....	24
2.3.2.4. Karabakır Formasyonu (Tkb)	24
2.3.2.5. Kuvaterner birimler (Q).....	25
2.4. Deprem Durumu	26
2.5. Hidrojeoloji.....	28
2.6. Mühendislik Jeolojisi.....	29
2.7. Araştırma Sondajları.....	29

2.8. Kaya ve Zemin Mekaniği Çalışmaları.....	35
2.8.1. Arazi deneyleri	35
2.8.1.1. İnklinometre deneyleri.....	35
2.8.1.2. Jeofizik çalışmaları (Özdirenç – DES)	36
2.8.2. Heyelan türü	36
2.8.3. Jeolojik koşullar.....	37
2.8.4. Drenaj önlemleri	40
3. SOL SAHİL KAZILARININ FOSİL HEYELANA ETKİLERİNİN	
DEĞERLENDİRİLMESİ	41
3.1. Analiz Kesitleri.....	41
3.2. Heyelan Malzemesi Reziduel Kayma Dayanımı Parametreleri	43
3.3. Stabilite Analizleri.....	46
3.4. Analiz Sonuçları	49
4. GERİ ANALİZLER VE REZİDÜEL ZEMİN PARAMETRELERİ	51
4.1. Malzeme Parametreleri.....	52
4.2. Malzeme Modeli.....	53
4.3. Zemin Bağlı Kayma Gerilmeleri (Soil Relative Shear Stresses).....	54
4.4. Heyelan Aşamaları	54
4.5. Olası Kayma Düzlemleri ve Ara Yüz Elemanları	55
4.6. Tanımlı Deplasmanlar	55
4.7. Analiz Sonuçları	55
5. HEYELAN EDEN KÜTLE İÇİN ÖNERİLEN DÜZENLEME KAZILARI ve	
TASARIM KRİTERLERİ	56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62
7. KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	
EKLER	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Heyelanların hareketin tipi ve malzemenin türüne göre sınıflandırılması	3
Şekil 1.2. Tipik heyelan kesiti	4
Şekil 1.3. Düşmeye heyelan örneği	6
Şekil 1.4. Devrilme örneğinde heyelan	7
Şekil 1.5. Düzlemsel Kayma (1-2) ve Kama Tipi Kayma (3-4) türü stabilite yenilemeleri	8
Şekil 1.6. Kama türü kayma ve Düzlemsel kayma stabilite yenilemelerinin kinematik analizi	8
Şekil 1.7. Dairesel kayma yapısının genel şematik görünümü	9
Şekil 1.8. Yanal yayılma örneği	10
Şekil 1.9. İstinat duvar yapısı	13
Şekil 1.10. Palplanş perdesinin ortaya çıkarılması	14
Şekil 1.11. Ankraj uygulaması örneği	14
Şekil 1.12. Heyelanın oluşumu esnasında fore kazıkların uygulanması	15
Şekil 1.13. Fore kazık ve baret kazık kesitlerinin görünüşleri	16
Şekil 1.14. Baret kazıkların kesitleri	16
Şekil 2.1. Proje alanının yeri ve ulaşım haritası	20
Şekil 2.2. Proje alanı stratigrafik kesiti (ölçeksiz)	25
Şekil 2.3. Proje Alanının Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası'ndaki Yeri	27
Şekil 2.4. Gereçlerin devinim türlerine göre durumları	37
Şekil 3.1. Baraj sol sahil planı	41
Şekil 3.2. İdealize zemin profilleri	43
Şekil 3.3. Drenajlı durum gerilme – deformasyon ilişkisi	44
Şekil 3.4. Kohezyonsuz zemin rölatif sıkılık ve içsel sürtünme açısı değerleri	45
Şekil 3.5. Kohezyonlu zeminler için rezidüel içsel sürtünme açısı	45
Şekil 3.6. Zemin doğal birim hacim ağırlıkları	46
Şekil 3.7. Rezidüel zemin parametreleri	46
Şekil 3.8. Yapılan sınırlı miktardaki kazıların öncesi durumu	47
Şekil 3.9. Yapılan sınırlı miktardaki kazıların sonrası durumu	47
Şekil 3.10. Yapılan sınırlı miktardaki kazıların öncesi durumu	48
Şekil 3.11. Yapılan sınırlı miktardaki kazıların sonrası durumu	48
Şekil 4.1. Geri analizi yapılan kritik heyelan kesiti ve idealize jeolojik profili	51
Şekil 4.2. Kohezyonlu – kohezyonsuz zeminler için rezidüel kayma dayanımı parametreleri	52
Şekil 5.1. Northridge depremi yatay ivme zaman grafiği	58
Şekil 5.2. Northridge depremi düşey ivme zaman grafiği	58
Şekil 5.3. Önerilen heyelan düzenleme kazıları ve analiz kesitleri	59
Şekil 5.4. Analiz kesitleri	59
Şekil 5.5. Önerilen kazı öncesi deprem (Obe) durumu	60
Şekil 5.6. Önerilen kazı sonrası deprem (Obe) durumu	61

RESİMLER LİSTESİ

Resim 2.1. Heyelan malzemesinin tipik bir kesiti.....	38
Resim 2.2. Heyelan bölgesinin genel görünümü ve çatlaklar	39
Resim 3.1. Sol Sahil Baraj Kazıları	42
Resim 3.2. Geçici Demiryolu Kazıları	42



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Heyelanların hareketin tipi ve malzemenin türüne göre sınıflandırılması	2
Tablo 2.1. Baraj yerinde güncel ve önceki çalışmalar sırasında açılan temel sondaj kuyularında ölçülen yeraltı suyu düzeyleri.....	28
Tablo 2.2. Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının özeti.....	29
Tablo 2.3. Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının elastisite modülleri.....	30
Tablo 2.4. Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının litoloji tablosu ..	33
Tablo 3.1. Edilen güvenlik sayıları	49
Tablo 4.1. Sonlu elemanlar modeli yapım aşamaları.....	55



SEMBOLLER LİSTESİ

(N₆₀)₃₀	: % 60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
(V_s)₃₀	: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı
C_B	: Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı
C_E	: Enerji oranı düzeltme katsayısı
CL	: Düşük plastisiteli kil
C_M	: Tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısı
C_N	: Kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme düzeltme katsayısı
C_R	: Tij boyu düzeltme katsayısı
CRR_{M7.5}	: M _w = 7,5 olan deprem için çevrimsel dayanım oranı
C_s	: Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı
d	: Yoğunluk
Dr	: Rölatif sıkılık
E	: Elastisite modülü
F₁	: 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
F_s	: Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
G	: Kayma modülü
GM	: Siltli çakıl
H	: Kademe ortası ile kuyu ağzı arası mesafe
h_s	: Sismik ölçümlerden elde edilen tabaka kalınlığı
K	: Bulk modülü
L	: Kademe orta noktası ile kuyu başındaki manometreye kadar olan mesafe
M_L	: Yerel büyüklük
M_s	: Yüzey dalgası büyüklüğü
M_w	: Moment büyüklüğü
N	: Standart penetrasyon deneyi darbe sayısı
N_{1,60}	: Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
N_{1,60f}	: İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
NP	: Non-plastik zemin
PGA	: En büyük yer ivmesi
PGV	: En büyük yer hızı
P_m	: Manometre basıncı
P_T	: Efektif basınç
r_d	: Gerilme azaltma katsayısı
S₁	: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
SC	: Killi kum
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
S_{Ds}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
SM	: Siltli kum
SPT-N	: Ham SPT verileri
S_s	: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
U_d	: Dinamik boşluk suyu basıncı
U_s	: Statik boşluk suyu basıncı
V_P	: Boyuna dalga hızı

V_s	: Sismik s dalgası hızı
W	: Enjeksiyon yapılan şerbetin yoğunluğu
W_1	: Suyun yoğunluğu
z	: İnceleme derinliği
ZD	: D sınıfı yerel zemin grubu
ZE	: E sınıfı yerel zemin grubu
ZF	: F sınıfı yerel zemin grubu
α	: $N_{1,60f}$ 'in elde edilmesi için kullanılan katsayı
α_1	: Enjeksiyon deliğinin düşey ile yaptığı açığı
β	: $N_{1,60f}$ 'in elde edilmesi için kullanılan katsayı
ΔU	: İlave boşluk suyu basıncı
σ'_{v0}	: Efektif düşey gerilme
σ_{v0}	: Toplam düşey gerilme
τ_{deprem}	: Zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi
τ_R	: Zeminin sıvılaşma direnci

KISALTMALAR LİSTESİ

TADAS	: Türkiye ivme veri tabanı ve analiz sistemi
DD-2	: 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yer hareketi düzeyi
TBDY	: Türkiye bina deprem yönetmeliği
DTS	: Deprem tasarım sınıfı
PI	: Plastisite indisi
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
IDI	: İnce dane içeriği
NCEER	: National Center for Earthquake Engineering Research
NSF	: National Science Foundation
MASW	: Çok kanallı yüzey dalgası yöntemi
SK	: Sondaj kuyusu
UD	: Örselenmemiş zemin numunesi
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı
G.S.	: Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı
TS EN 197-1	: Çimento-Bölüm 1: genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri
TS EN ISO 13500	: Pertol ve doğal gaz sanayi-sondaj akışkanı maddeleri- özellikler ve deneyler
YASS	: Yer altı su seviyesi
K-1	: 1 numaralı enjeksiyon kuyusu

ÖZET

Heyelan; yamaçları oluşturan malzemenin yer çekiminin etkisi ile eğitim yönünde hızlı ya da yavaş hareketi olarak açıklanabilmektedir. Heyelanlar, Türkiye’yi çok yakından ilgilendiren depremler, su baskınları gibi, doğal afetler içerisinde yer alırlar. Heyelanlar doğal afetler kapsamında değerlendirilmektedir. Bu da heyelanın bir kütle hareketinden ziyade bir afet olduğunu göstermektedir. Diğer doğal afetlerde olduğu gibi heyelanlarda da afet durumu gerçekleşmeden çalışmalar yapılarak hem önleyici tedbirler alınabilmekte hem de afet sonrası durum için hasar oranları azaltılabilmektedir. Depremler, seller gibi heyelanlar da Türkiye’yi yakından ilgilendiren doğal afetlerdir.

Yapılan çalışma içerisinde Bingöl ili içinde bulunmakta olan Aşağı Kaleköy Barajında ortaya çıkan bir heyelan incelenmekte ve bu heyelanı engellemek amacıyla ortaya konabilecek iyileştirme teknikleri araştırılmıştır. Elazığ Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 9. Bölge Müdürlüğü’nden elde edilen zemin etüt verilerinin kullanımıyla, incelenen kesitler üzerinde kısa ve uzun vadeli analizler meydana getirilmiştir. İnkometre arazi gözlemleri ve verilerine göre belirlenmiş olan yenileme düzlemlerinin kullanımıyla geri dönütler sağlanmış, kayma yüzeylerini temsil etmekte olan uzun süreli kalıcı zeminlerin parametreleri belirlenmiştir. Limit denge tekniğiyle iyileştirilmiş modellerin dinamik ve statik durumlar adına güvenlik katsayılarına bakılmış, şevlerdeki deformeler de incelenerek yapısal öğelerin tasarım değerleri de araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Heyelan, iyileştirme, şev.

ABSTRACT

Investigation of Landslide-Induced Collapse Mechanism and Landslide Prevention Measures at The Lower Kaleköy Dam

Landslide can be explained as the rapid or slow movement of the material forming the slopes in the direction of education with the effect of gravity. Landslides are included in natural disasters such as earthquakes and floods, which are very closely related to Turkey. Landslides are considered within the scope of natural disasters. This shows that a landslide is a disaster rather than a mass movement. As in other natural disasters, preventive measures can be taken and damage rates can be reduced for the post-disaster situation by conducting studies before the disaster occurs in landslides. Landslides, like earthquakes and floods, are natural disasters that are closely related to Turkey.

In this study, a landslide occurring at the Aşağı Kaleköy Dam in Bingöl province is analyzed and the improvement techniques that can be put forward to prevent this landslide are investigated. With the use of soil survey data obtained from the 9th Regional Directorate of the General Directorate of State Hydraulic Works of the Ministry of Forestry and Water Affairs of Elazığ, short and long term analyses were carried out on the sections examined. Feedbacks were provided with the use of renewal planes determined according to inometer field observations and data, and the parameters of long-term permanent soils representing slip surfaces were determined. The coefficients of safety of the improved models for dynamic and static conditions were examined by the limit equilibrium technique, and the design values of the structural elements were also investigated by examining the deformations in the slopes with the finite element technique.

Key Words: Landslide, remediation, slope.

1. GİRİŞ

1.1. Heyelan ve Özellikleri

1.1.1. Heyelan

Heyelan; yamaçları oluşturan malzemenin yer çekiminin etkisi ile eğim yönünde hızlı ya da yavaş hareketi olarak açıklanabilmektedir. Bir başka ifadeyle heyelan; kaymanın meydana geldiği yerde, hareket eden kütlenin yanında ya da altında bulunan topraktan, bir düzlemle ya da bitişik düzlemlerin bulunduğu bir hat ile ayrıldığı olaylara verilen isimdir. Kayma düzlemi ya da zonu, toprak malzemesinin maksimum kesme kuvvetine ulaştığı ve bu durum nihayetinde büyük deformasyonların yaşandığı kesintisiz yüzeyi temsil etmektedir. Çökme yığını kırılarak alt birimlere ayrılabilir fakat çoğu zaman tek parça halinde kalmaktadır (Mc Charty, 2010).

1.1.2. Heyelan çeşitleri

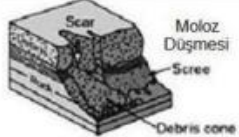
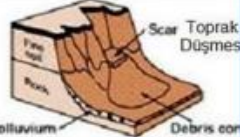
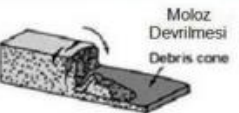
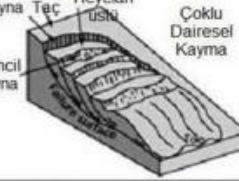
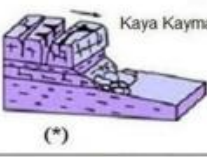
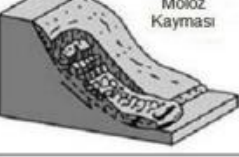
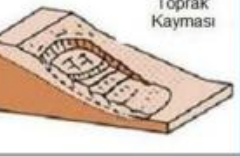
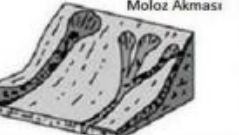
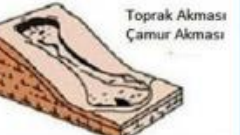
Heyelan, Varnes (1978) tarafından “yamaç hareketi” olarak tanımlanmıştır. Avrupa Birliği INSPIRE direktifi de heyelan hakkında Varnes gibi bir tanımlamada bulunmuş ve heyelanı yamaç hareketi olarak tanımlamıştır. Varnes, yamaç hareketlerini çeşitli biçimlerde sınıflandırarak her bir sınıflamada tanıma, kontrol, ıslah ya da diğer gayelerin ön plana çıkabileceğini vurgulamıştır. Araştırmacı tarafından tanıma ve sınıflama için belirlenen tanımlamalar şu başlıklar altında gruplandırılmıştır:

- Hareketin tipi,
- Hareketin hızı,
- Malzemenin türü,
- Yaş,
- Nedenler,
- Yenilenen malzemenin ve yenilenen alanın geometrisi,
- Yer değiştiren kütlenin kopma derecesi,
- Gelişme derecesi,
- Jeolojik yapı ile kayma geometrisi arasındaki ilişki
- Tip örneğinin coğrafik konumu

Tablo 1.1. Heyelanların hareketin tipi ve malzemenin türüne göre sınıflandırılması (Varnes, 1978).

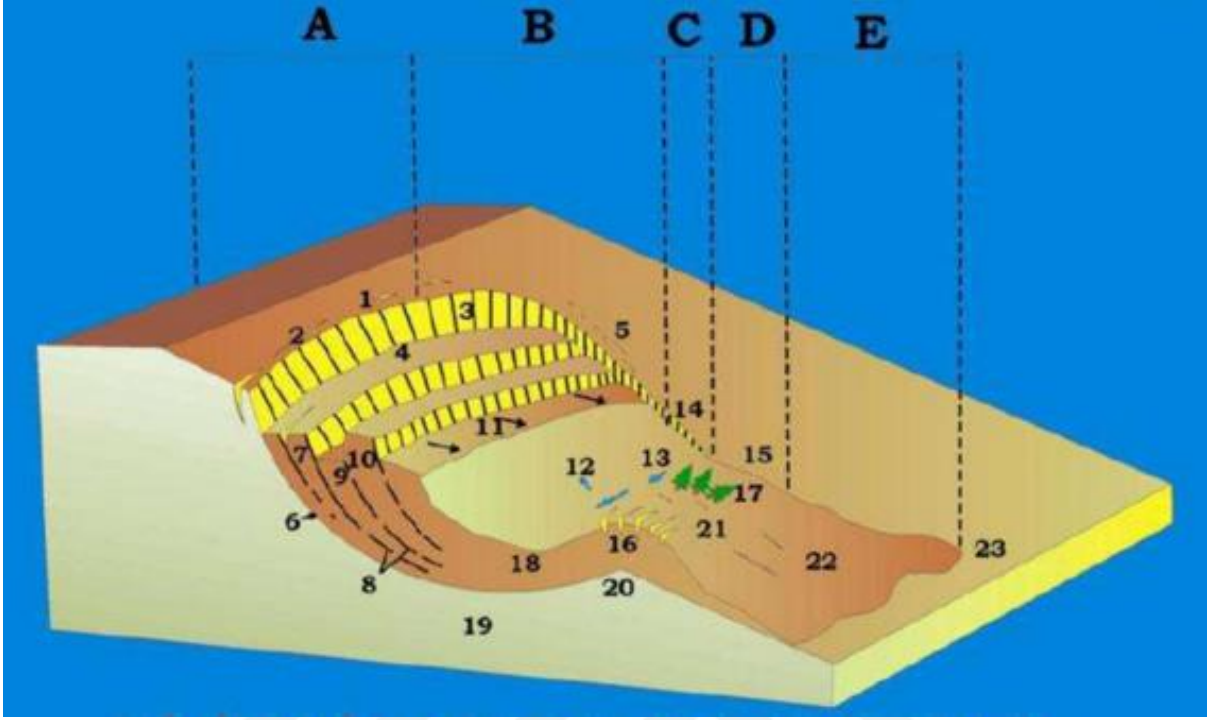
HAREKETİN TİPİ			MALZEME TÜRÜ		
			Anakaya	Toprak/ zemin	
				İnce Tane egemen	Kaba tane egemen
DÜŞME			Kaya düşmesi	Toprak düşmesi	Moloz düşmesi
DEVİRİLME			Kaya devrilmesi	Toprak devrilmesi	Moloz devrilmesi
	Rotasyonel		Kaya kayması	Toprak kayması	Moloz kayması
KAYMA	Translasyonel	Birkaç birim	Kaya blok kayma	Toprak blok kayması	Moloz blok kayması
		Birçok birim	Kaya kayması	Toprak kayması	Moloz kayması
YATAY YAYILMA			Kaya yayılması	Toprak yayılması	Moloz yayılması
AKMA			Kaya akması	Toprak akması	Moloz akıntısı
			Kaya çığı		Moloz çığı
			Derin krip		Toprak krip
KARMAŞIK VE KARMA			İki veya daha fazla hareket tipinin zaman ve mekan içindeki karışımı		

Tablo 1.1’de de görüldüğü üzere heyelan; düşme, devrilme, kayma, yatay yayılma, akma ve karmaşık olmak üzere altı gruba ayrılmaktadır. Tablo 1.1’de yer alan heyelan çeşitlerine, Şekil 1.1’de görsel olarak yer verilmiştir.

Malzeme Hareketin Türü		KAYA	MOLOZ	ZEMİN
DÜŞMELER		 Kaya Düşmesi	 Moloz Düşmesi Scree Debris cone	 Toprak Düşmesi Colluvium Debris cone
		 Kaya Devrilmesi	 Moloz Devrilmesi Debris cone	 Toprak Devrilmesi Debris cone
KAYMALAR	DÖNEL	 Tek Dairesel Kayma	 Heyelan uslu Ayna, Taç İkincil ayna Çoklu Dairesel Kayma	 Ardışık Dönel Kayma
	ÖTELENMELİ (Düzlemsel)	 Kaya Kayması (*)	 Moloz Kayması	 Toprak Kayması
YAYILMALAR		 Örtü kayması Normal yataya yakın yapı Dışbükey eğim ve fay yapısı Çatlak Tabakların incelmeleri Taban bindirmesi düzlemi Safilam ana kaya	 Örnek: Bombelenme ve Vadi oluşumu	 Toprak yayılması
AKMALAR		 Kaya Akması Buzul moloz akması	 Moloz Akması	 Toprak Akması Çamur Akması
KARMAŞIK		 Kaya-Toprak akması ile kaya etek döküntüsü	 Örnek: Kompozit, dairesel olmayan, kısmen dönel/kısmen düzlemsel ve eteğe doğru toprak akması şeklinde	

Şekil 1.1. Heyelanların hareketin tipi ve malzemenin türüne göre sınıflandırılması (Varnes, 1978).

1.1.3. Heyelan kısımları



Şekil 1.2. Tipik heyelan kesiti (Ünsal, 2010; Ulusay, 2001).

Heyelanlar beş temel kısımdan meydana gelmektedir. Bahsi geçen beş temel kısım şu şekilde açıklanmaktadır;

- I. Hareket etmeyen bölge
- II. Heyelan bölgesi
- III. Çökme bölgesi
- IV. Kabartma bölgesi
- V. Akma bölgesi

Beş temel kısım içerisinde şunlar bulunmaktadır;

Heyelan taç kısmı: Şekil 2.1 içerisinde “1” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Esas aynanın en yüksekteki kısmına en yakında bulunan ve hareket etmeyen malzemelerin bulunduğu bölgedir.

Esas Ayna: Şekil 2.1 içerisinde “3” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Kopma/Kayma yüzeylerinin görünmekte olan bölümüdür.

Heyelan tepesi: Şekil 2.1 içerisinde “4” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Esas aynayla heyelan kütlesi arasında bulunan en yüksek nokta olmaktadır.

Heyelanın (akma) ucu: Şekil 2.1 içerisinde “22-23” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Heyelan üstünden topuğuna gelen noktayı temsil etmektedir.

Topuk: Şekil 2.1 içerisinde “20” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Hareket etmekte olan kütlenin genel olarak eğri biçimde bulunan alt ucunu temsil etmektedir.

Kayma yüzü: Şekil 2.1 içerisinde “8” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Heyelana sebep olan veya heyelan oluşmuş olan kütlenin alt sınırlarını meydana getiren ve doğal zeminin yüzeyinin kesişme noktasını temsil eden noktadır.

Heyelan kütlesi: Şekil 2.1 içerisinde “18” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Yamaç veya şevlerde meydana gelen heyelan neticesinde doğal bölgesinden ayrılmış bulunan kayıp malzemelerdir.

Kabarma bölgesi: Şekil 2.1 içerisinde “D, 15” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Heyelan kütlelerinin başlangıç aşamasındaki doğal arazi yüzeyinin altında kalan heyelan kütlesidir.

Çökme bölgesi: Şekil 2.1 içerisinde “10” ile gösterilen bölgeyi temsil etmektedir. Kama yüzeyi üstünde, fakat başlangıç aşamasındaki doğal arazi yüzeyleri altında kalan heyelan kütlesi olmaktadır.

Kabarma: Başlangıç noktasındaki doğal arazi (20) yüzeyinin üzerine yükselmekte olan yer değiştirmiş bulunan heyelanın hacmini temsil etmektedir.

Kaymayan Doğal arazi yüzeyi: Kütle hareketi meydana gelmeden öncesinde arazinin kesitte görülen yüzüdür.

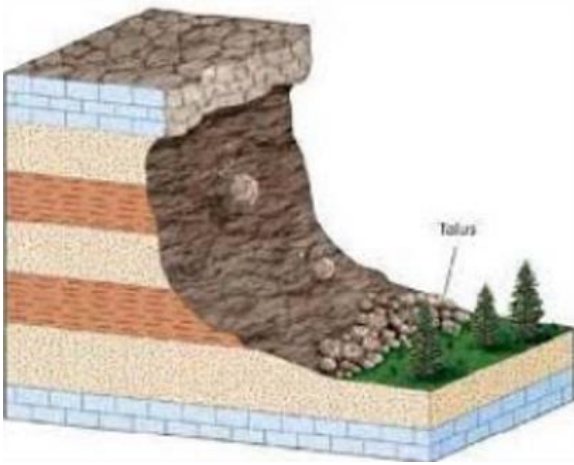
1.1.4. Kütle hareketlerinin oluşum şekilleri

Kütle hareketlerinin başlangıç biçimleri incelendiğinde, jeoloji olarak ortaya çıkış cinsleri, yapısal nitelikleri, yeraltı suyu, dayanım-ayırıştırma, tabakalanma, viskozite, çatlak ve fay benzeri çeşitli çok fazla etkenden ötürü çeşitli geometrik özellikte farklı hızlarda ve çeşitli yayılım niteliklerinde gelişme meydana getirmektedirler.

1.1.4.1. Düşme

Yeraltı mağaralarının tavanlarından, eğimleri yüksek bulunan kazı şevleri bölgelerinden, deniz kenarlarında bulunan dik falez bölgelerinden, yerçekiminden dolayı

toprak ve kaya parçalarının ayrılmaları olayları olarak kaydedilmektedir (Tarhan, 2002, s.26). Düşmeye heyelan örneği Şekil 1.3'te verilmiştir. Ünsal (2010), yamaç bölgelerinde ortaya çıkan kütlelerin düşmeleri olaylarını kendi içerisinde üç çeşide ayırmaktadır. Moloz düşmeleri, kaya düşmeleri, zemin düşmeleri biçiminde üç çeşitte bulunmaktadır. Erguvanlı (1994), kayaç zeminli bölgelerde kırık ve çatlaklarda ortaya çıkan topuk oyulmaları, düşme hareketleri arka arkaya çözünme-donma durumlarının zemin daneleri aralarında ortaya çıkardığı hidrostatik basınçtan kaynaklı kayaç türünden oluşan zeminin ayrışan ve gevşeyen kaya parçalarının düşmeleri yoluyla ortaya çıkmaktadır. Bahsi geçen durumlar devamlı incelenmediklerinden dolayı etkili şekilde fark edilememelerine karşın devamlı şekilde incelenebilirse kısmen arazilerin azaldığı veya arazilerde değişimlerin yaşandığı ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 1.3. Düşmeye heyelan örneği (Pehlivan, 2019).

1.1.4.2. Devrilme

Sıklıkla yüksek eğimli şekilde bulunan yamaç bölgelerinde görülmekte olan zeminlerin eğimli bulunan taraflara doğru olacak şekilde ortaya çıkan duyarsızlık olaylarıdır. Devrilme şeklinde isimlendirilen hareketlerin nedeni, zeminde bulunmakta olan blokların ağırlık vektörlerinin zemin tabanları dışlarına düşmeleri durumudur. Devrilme örneği Şekil 1.4'te verilmiştir. Sleyt ve şist çeşidi kayalar ile, kolon biçiminde bulunan kayaçlardaki düşme hareketleri genel olarak sıkça meydana gelebilmektedir. Aynı anda da diğer kayaç çeşitlerinde de meydana gelebilmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü (2015) devrilme türü hareketleri, kaya oluşumlarının karakteristik bakımdan nitelikleri incelenerek çeşitli adlarla açıklanabilmektedir. Şevlerin eğimlerine uyumlu biçimde ortaya çıkmalarının

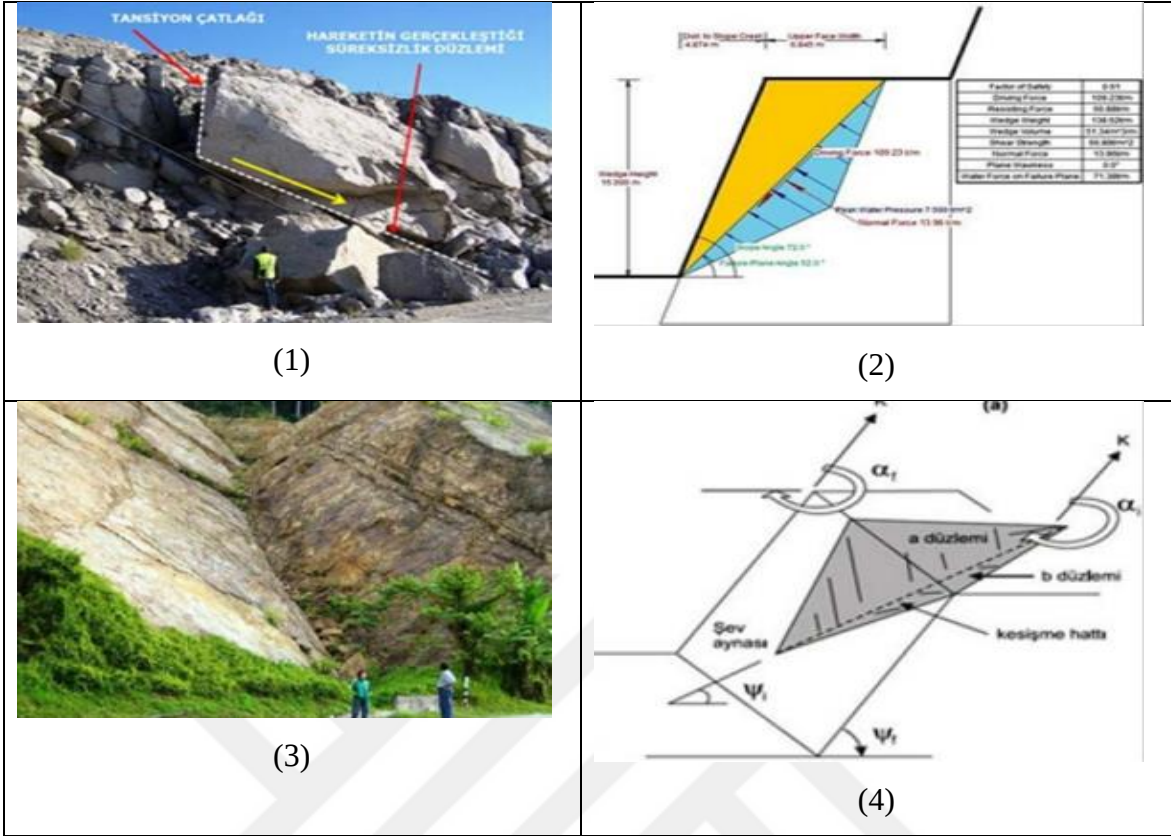
durumlarında kaya düşmesi şeklinde isimlendirilmektedir. Şev eğimlerinin yoğun bulunduğu bölgelerde molozların devrilmesi veya zeminin devrilmesi biçiminde ortaya konmaktadır.



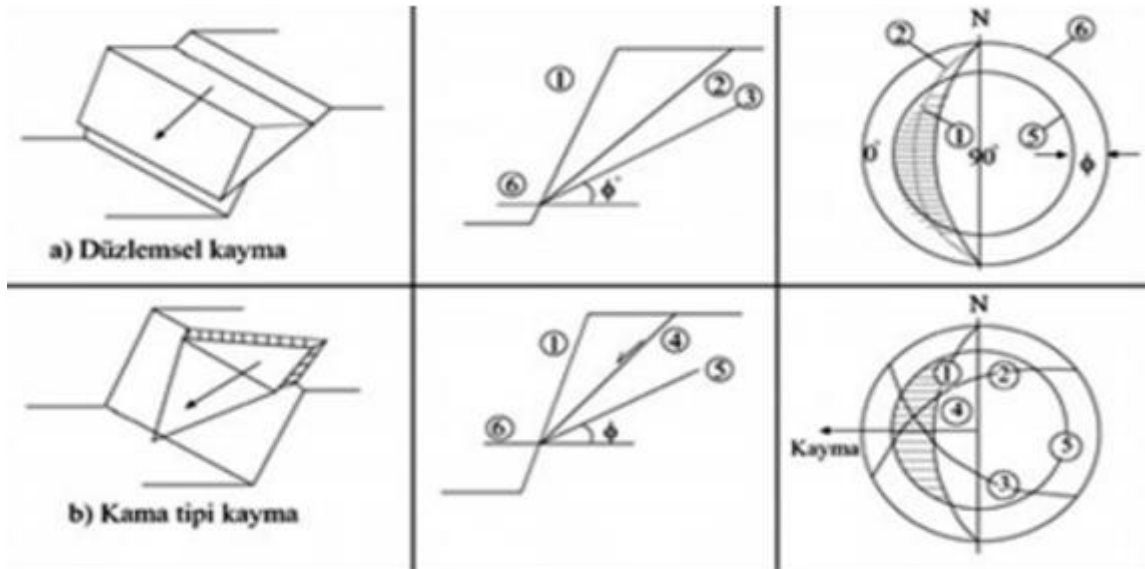
Şekil 1.4. Devrilme örneğinde heyelan (Taner, 2001).

1.1.4.3. Kayma

Kayma durumları dairesel bakımdan kayma ve ötelenmeli düzlemsel kayma biçiminde iki şekilde görülmektedir (Şekil 1.5, 1.6). Dairesel kaymalar tanımlandığı durumlarda blok biçimine gelmiş kaya oluşumları içerisinde tek oval kayma, moloz biçiminde ve çoklu dairesel kayma şeklinde, zemin haline gelmiş birimler içerisinde ardışık dairesel kaymalar şeklinde sınıflandırılmış bulunmaktadır (Şekil 1.5). Ötelemeli düzlemsel kaymalarsa Varnes (1978)'in düşüncesinden farklı bir biçimde kaya oluşumları içerisinde düzensizlik düzlemleri noktalarının kesişimleri ve konumları kaymaların yönlerini yüzeye meydana getirdikleri arakesit meydana getirme niteliklerine bağlı biçimde düzlemsel kama tipi kayma ve kayma şeklinde tanım bulmaktadır. Bu kayma tanımları Şekil 1.5, Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de verilmiştir.



Şekil 1.5. Düzlemsel Kayma (1-2) ve Kama Tipi Kayma (3-4) türü stabilite yenilemeleri (Varnes, 1978).

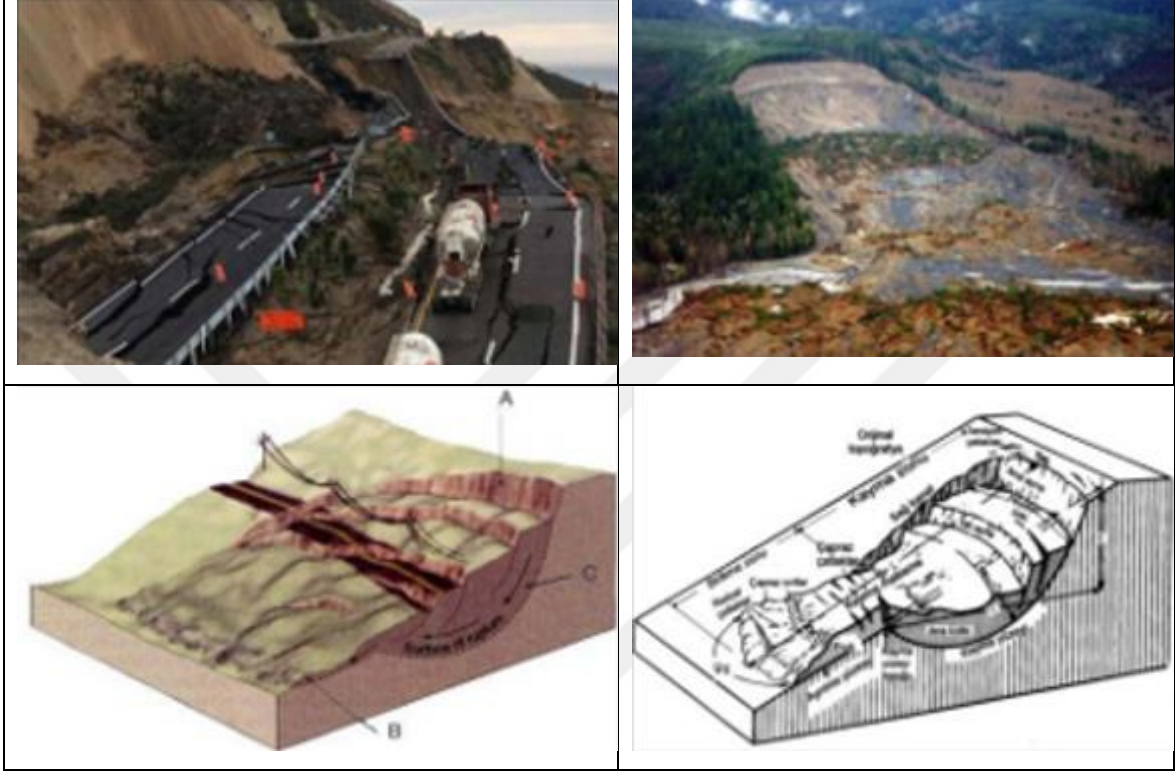


Şekil 1.6. Kama türü kayma ve Düzlemsel kayma stabilite yenilemelerinin kinematik analizi (Varnes, 1978).

Şekil 1.6'da verilen numaraların açıklamaları;

- 1) Şev yüzeyi
- 2) Süreksizlik (S1)

- 3) Süreksizlik (S2)
- 4) Süreksizlik kesişme noktası
- 5) Sürtünme açısı
- 6) Yatay düzlem



Şekil 1.7. Dairesel kayma yapısının genel şematik görünümü (Varnes, 1978).

1.1.4.4. Yayılmalar

Zeminde meydana gelen çekme etkisiyle ortaya çıkan ve zeminini sıvılaşması sonrası meydana gelen kayma hareketlerinden farklı şekilde, kayma yüzeyini bulunduran kütle hareketleri biçiminde açıklanabilir duruma yanal yayılma denmektedir (Aytekin, 2004, s.624). (Şekil 1.8). Sıklıkla eğimlerin orta düzeyde bulunduğu yamaçlar üzerinde meydana gelmektedir ve çok yol kat edebilmelerinden kaynaklı olarak hasar verici etkileri çok yüksek olmaktadır (Cotudo, 2006, s.42). Eğimli araziler içerisinde şevlerin altlarında bulunmakta olan tabaka, şevli zeminlerin tabakalarından yumuşak halde bulunmaktadır. Şevlerin altlarında bulunmakta olan yumuşak malzeme şevlerin dışlarına doğru olacak şekilde plastik davranış göstermektedir, akma şekillerindeki ötelenme durumlarına göre üstte bulunan sert materyaller de bloklar haline gelmekte ve plastik durumda bulunan malzeme tarafınca taşınıp hareketin bir parçası haline gelmektedir (Öz, 2009, s.). Bu duruma yanal kaya

yayılması ismi verilmektedir. Yanal zemin yayılmasıysa esnek ve zayıf halde bulunan zemin tabakası içerisinde var olan sert kaya bloklarının, esnek ve zayıf malzemeyle birlikte hareket bulması şeklinde tanımlanabilmektedir.



Şekil 1.8. Yanal yayılma örneği (Yıldırım, 2002).

1.1.4.5. Akmalar

Akma durumları genel anlamda moloz, moren ve parçalı kaya birimlerinde molozların akmaları sonucunda tabanda bulunan sağlam ve dayanımlı oluşumların sınırlarının geometrilerine bağlı şekilde veya vadilerin uzanımları süresince molozların akmaları biçiminde meydana gelmektedir. Toprakların akmalarıysa ayrı şekilde bulunan zemin birimleri veya rezidüel zeminlerin su içeriklerine bağlı şekilde sıvılaşmasıyla çamur veya toprak akması biçiminde gözlenmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2015).

1.1.5. Heyelanların sebepleriyle ilgili yaklaşımlar

Heyelan sebepleri çeşitli araştırmacılarca farklılık göstermekteyken, heyelanların oluşmalarına sebep olan etkenleri; insanlardan kaynaklı, fiziksel, morfolojik ve jeolojik sebepler şeklinde tanımlamak mümkündür (Cruden, Varnes, 1996). Bahsi geçen sebepler başlıklar halinde açıklanmaktadır.

1.1.5.1. Morfolojik sebepler

- Volkanik ve tektonik yükselme
- Yamaç topuklarının akarsu tarafınca aşındırılması

- Buzul gerilemesi
- Yeraltı aşındırmaları (kanal sistemi yoluyla aktarma, çözülme)
- Yamaç topuklarında meydana gelen dalga aşındırması
- Yamaç topuklarına meydana gelen buzul aşındırması
- Yamaç tepesinde veya üzerinde yüklerin bulunması
- Bitki örtüsünün tahrip veya yok edilmesi (kuraklık, orman yangınları)

1.1.5.2. Jeolojik sebepler

- Zıt sertlikler (plastik, katı malzeme üzerinde bulunan yoğun materyaller)
- Zır geçirgenlikler
- Ters uzanmakta olan kütlenin süresiz halde bulunması (yapraklanma, tabaklanma vb.)
- Ters uzanmakta olan yapıların kırılmaları (dokanak, uyumsuzluk, fay vb.)
- Fisürlü ve eklemli malzemeler
- Makaslamaya maruz kalmış malzemeler
- Hassas malzemeler
- Zayıf malzemeler

1.1.5.3. Fiziksel sebepler

- Olağan üstü biçimde yağmurların devamlılık göstermesi
- Büzülme- şişme şeklinde taşınmaların yaşanması
- Çözülme-donma şeklinde taşınmaların meydana gelmesi
- Çözülme
- Volkanik püskürme
- Deprem
- Gel-git ve taşkın durumlarında suların hızlı biçimde çekilmeleri
- Karların ani erimeleri
- Şiddetli ve sürekli yağmur

1.1.5.4. İnsan temelli sebepler

Topukların veya yamaçların kazılmasıyla yamaçların eğim açılarının yükselip insanlar veya doğa adına tehlikeli durumları meydana getirmesi, Yamaçlara veya yamaç tepelerinde yüklerin bulundurulması doğa içerisindeki dengesiz biçimde değişmesiyle tehlike bulunduran alanlar içerisinde hane ve konutların bulundurulması, ormansızlaşma benzeri bireylerin meydana getirdikleri doğal ve büyük zararlar şeklinde açıklanabilmektedir.

1.1.6. Heyelan önleme yöntemleri

Heyelanların engellenmesi kapsamında uygulanmakta olan teknikler esasında heyelanları meydana getiren nedenlerin yok edilmesiyle alakalı ortaya konan çalışmaları içeriğinde barındırmaktadır. Heyelanların engellenmesi adına, kütlelerin yamaç boyunca aşağı yönlü hareketlerine sebebiyet veren sürüklenme kuvvetinin düşürülmesi veya kütlelerin hareketlerini engelleyen tutma kuvvetini yükseltmek gerekmektedir. Bu durum içerisinde alınması gerekli olan önlemlerden bazıları şöyledir;

- Fore kazık sistemi
- Kaya veya zemin ankrajları
- Palplans perdesi
- İstinat duvarı
- Kayma durumlarına karşın destek sistemlerinin varlığı
- Yer altı drenajı
- Yüzeysel drenaj
- Drenaj
- Basamaklandırma
- Topuklara yük koyulması
- Yük kaldırma
- Yamaç geometrisinin değişimi

1.1.6.1. Yamaç geometrisinin değiştirilmesi

Yamaçların duyarlı şekle getirilmesi ve eğimlerinin açılarının azaltılması adına yamaçların daha dik şekilde bulunan üst noktalarından malzemelerin alınması ve topuk kısmının doldurulması durumudur. Bu durumda heyelanların topuk bölgeleri desteklenmiş olmaktadır. Yamaçların eğimlerinin yükselerek veya basamaklandırma tekniği uygulanarak da kayma gerilmeleri düşürülebilmektedir.

1.1.6.2. Kaymaya karşı destek sistemlerinin oluşturulması

İstinat duvarı: Var olan şevlerin veya yapılması planlanan kazı çalışmalarının desteklenmesi aşamalarında, kot farklarının bulunduğu veya zeminlerin tutulması durumlarında çözüm olarak istinat duvarları kullanışlı bulunmaktadır. Yamaçların bulundurdıkları stabilitelerin yükseltilmesinde büyük önem taşıyan istinat duvarları; yamaç veya şevlerin topuk noktalarına kurulmaları yoluyla zeminde var olan kaymaların dirençleri yükseltilmektedir. Fakat istinat duvarlarının kayma düzlemlerinin altlarında bulunması, inşaat çalışmaları esnasında yamaçların kayma durumları karşısında güvenliklerini düşürerek heyelanların oluşumlarını pozitif yönlü etkileyebilmektedir. İstinat duvar yapısı Şekil 1.9'da verilmiştir.



Şekil 1.9. İstinat duvar yapısı (URL-1, 2013).

Palplans Perdesi: Yamaç bölgesindeki dayanımları yükselen esnek biçimli yapı elemanları olmaktadır. Çelik ve betonarme benzeri malzemelerden üretilmekte olan, dizi halinde veya tekli şekilde zeminlere uygulanan materyallerden meydana gelmektedir.

Palplanş perdesi Şekil 1.10’da verilmiştir. Heyelanların iyileştirilmesi kapsamında genel olarak geçici teknik şeklinde kullanım alanı bulan palplanşlar acil durumlar içerisinde hasarları engellemek amacıyla kullanım görmektedir. Fakat kayma yüzeylerinin derinde bulunduğu alanlarda palplanş perdelerinin yapımlarında büyük çaplı titreşimler ortaya çıkacağından kayma karşısında güvenlik düşmektedir.



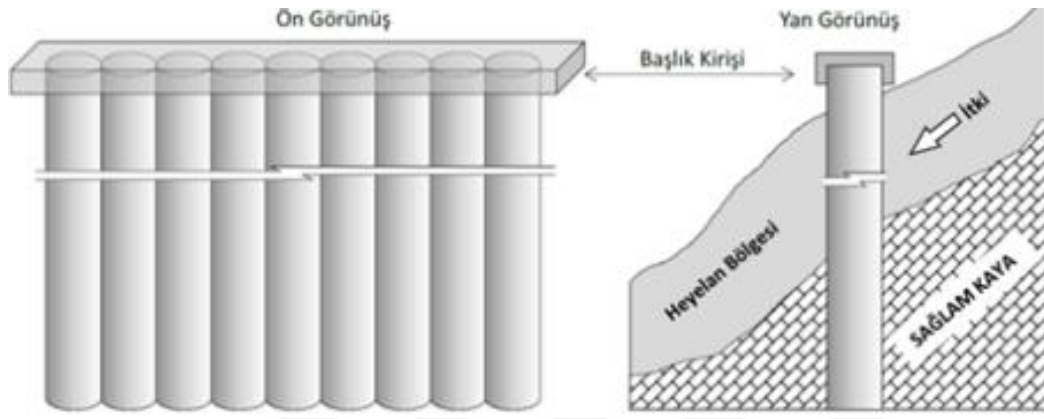
Şekil 1.10. Palplanş perdesinin ortaya çıkarılması (URL-2, 2021)

Ankrajlar: Zemin içerisinde yatayla belirli biçimde bir açı oluşturan ve sonradan oluşturulmuş deliklere, yüksek mukavemet içeren, korozyona karşı güçlü öngermeli biçimde çelik hatlar döşenmesi, deliklerin içine beton enjeksiyonu yapılması yoluyla meydana getirilen ve üstüne verilmekte olan gerilme kuvvetlerini sağlam zeminlere iletmekte olan yapısal faaliyetlere ankraj ismi verilmektedir. Ankraj faaliyetleriyle, kritik kayma dairelerinin fazlasıyla ilerisine uzanmakta olan enjeksiyonlu kuyular ve içlerindeki çelik çubuklardan meydana gelen sistemle yapısal bakımdan stabilizasyon yerine getirilmektedir (Coduto, 2006, s.51). Ankraj: kök, gövde ve kafa şeklinde üç kısma ayrılmaktadır. Kök kısmının enjeksiyonla tutulmasıyla yerleştirilmesinden dolayı çekme kuvvetinin meydana geldiği yer kafa kısmı olmaktadır. Ankraj uygulaması Şekil 1.11’de verilmiştir.



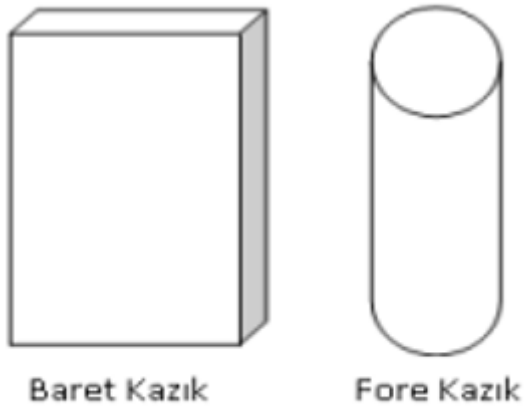
Şekil 1.11. Ankraj uygulaması örneği (Gurpersaud, ve ark. 2011).

Fore kazık sistemi: kayma hareketlerinin engellenmesi adına etkin bir teknik olmaktadır. Kazıkların boyları sağlam zeminlere dek indirilecek biçimde istenen çap ve boyda seçim yapılabilmektedir. Arazilerde farklı yöntemler yoluyla delikler açılmasıyla, açılmış olan kuyulara demir donatı indirilerek beton dökülmesiyle meydana getirilmektedirler. Sığ yapıli heyelanlar içerisinde de fazlasıyla etkili neticeler alınmaktadır. Fore kazık uygulaması Şekil 1.12’de verilmiştir.



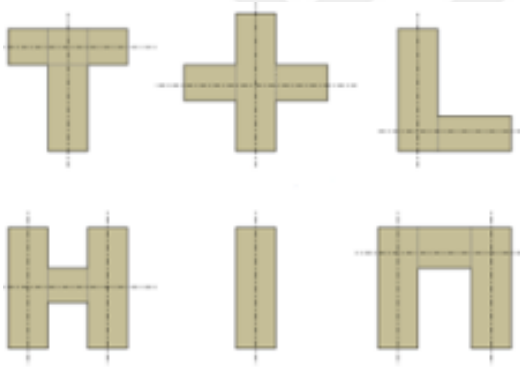
Şekil 1.12. Heyelanın oluşumu esnasında fore kazıkların uygulanması (URL-3, 2022).

Baret Kazık Sistemi: Kayma durumları karşısında destek sistemleri içerisinde baret kazıklar bulunmaktadır. Baret kazıklar, fore kazıkların görece daha özel kesitli biçimleri şeklinde açıklanabilmektedir (Şekil 1.13). Fore kazıkları benzeri zeminlerde delinmiş olan kuyuların donatı yerleştirilmesi yoluyla betonla doldurulması şeklinde meydana gelmektedir. Kazı hidrolik kova, mekanik kova veya kesici ekipman kullanımıyla meydana getirilmektedir. Kazılar esnasında duvarların yıkılmasını engellemek adına bentonit süspansiyonu aktif biçimde kullanılmaktadır. Bu süspansiyon ters dolaşım sistemiyle sürekli dolaşım halinde bulundurulurken yinelenerek kullanılmaktadır. Fore kazık ve baret kazık görüntüleri Şekil 1.13’de verilmiştir.



Şekil 1.13. Fore kazık ve baret kazık kesitlerinin görünüşleri

Baret kazıkların ölçüleri kullanılmakta olan kazı ekipmanlarının boyutları oranında değişim göstermektedir. Genel olarak 60, 80, 100, 120 santimetre genişliğinde ve 220, 280 santimetre uzunluklarında bulunacak biçimde ve proje koşullarına bağlı şekilde; T, +, H, L, I gibi biçimlerde üretilmektedirler. Baret kazık kesitleri Şekil 1.14’te verilmiştir.



Şekil 1.14. Baret kazıkların kesitleri

1.1.7. Literatür taraması

Poşluk ve ark. (2018) tarafından yapılan bir araştırmada, Ankara - İstanbul Hızlı Tren Projesinde yer alan yarma şevi imalatı sonrasında arazide meydana gelen heyelan incelenmiştir. Meydana gelen kütle hareketinin nedeni ve durdurulması için gerekli olan toplam dayanma kuvvetlerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında arazi çalışmaları ile jeolojik birimler ayırtlanmış, gerilme çatlakları ve inklinometre ölçüm verileri kullanılarak kayma modeli gerçekleştirilmiştir. Bu modelde limit denge şartında geri analiz yöntemi kullanılmış ve heyelan malzemesi için kütle parametreleri tespit edilmiştir. Daha sonrasında stabilitenin sağlanması amacı ile depremsiz ve depremli (0,2) durumda gereken dayanma kuvveti, janbu yöntemi ile limit denge analizi yapılarak hesaplanmıştır. Bu

kapsamda analiz sonucunda heyelan kütlesinin, 500 metre boyunda ve 280 metre genişliğinde bir alanı kapsadığı, derinliğinin 10.20 ile 49.80 m arasında değiştiği ve günlük 1,5 ile 2 mm' lik bir ivmeyle hareketini devam ettirdiği tespit edilmiştir. Uzun dönemde stabilitenin sağlanmasının ancak yük hafifletme, topuğu dolgu ve dayanma yapısı sistemlerinin birlikte değerlendirilmesiyle beraber olabileceği tespit edilmiştir.

Biricik ve Karakaş (2019) tarafından yapılan bir araştırmada, heyelana neden olan faktörler incelenmiş, heyelan önleme yöntemleri ile baret kazık yöntemi karşılaştırılmış, baret kazıkların diğer yöntemlere karşılık olumlu ve olumsuz yönler ele alınmıştır. Bu amaç kapsamında çalışmada İzmir ili Çiğli ilçesi Evka-5 Sementi Atatürk Mahallesiinde yaşanan heyelan hareketinin önlenmesine ilişkin planlanan baret kazık sistemi değerlendirilmiştir.

Fawaz ve ark. (2014) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Lübnan'ın Dahr Elbaidar kentinde yol yapım çalışmaları esnasında gerçekleşen heyelan hareketinin yorumlanması ve çözüm üretilmesi için fore kazık, baret kazık, drenaj, yük kaldırma ve zemin çivisi gibi çeşitli yapısal önlemlerin incelenmesi ele alınmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile değerlendirilmiştir. Yapılan analizler kapsamında 3,6 m aralıklı, 1,2 m çapında ve uzunluğu 36 m olan fore kazıkların 1,7 güvenlik faktörü değerini sağladığı, deprem etkisi altında ise güvenlik faktörünün 1 üzerinde kalabilmesi için 3 sıra fore kazık gerektiği, 3,6 m aralıklı, T şeklinde baret kazıkların 2,07 güvenlik faktörü değerini sağladığı, deprem etkisi altında ise güvenlik faktörünün 1 üzerinde kalabilmesi için 2 sıra fore kazık ve 1 sıra baret kazık yapmanın gerekli olduğu ve 3 sıra fore kazık yapmanın daha ekonomik, sahadaki suyun zemin parametrelerini olumsuz etkilediği ve drenajla suyun tahliyesinin stabilitenin kontrol edilmesindeki en etkili yöntem olduğu, kısmi drenaj uygulamasındaysa kazık ya da zemin çivisiyle takviye edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Neves ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak şev stabilitesinin iyileştirilmesi yöntemi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Plaxis 2D ve limit denge yöntemi ile hesaplanan SLOPE/W yazılımları kullanılmıştır. Bu kapsamda çalışmada en yaygın kullanılan iyileştirme yöntemleri ele alınmış ve bu yöntemler karşılaştırılmıştır.

Aydın ve Özer (2023) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, Ankara Çubuk ilçesi Adnan Menderes Parkında yaşanan heyelan incelenmiş ve bu heyelanın durdurulması amacıyla yapılabilecek yöntemleri araştırmalara bakılmıştır. Bu kapsamda çalışmada, Ankara Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Dairesi Başkanlığı Sanat Yapıları Proje Şube Müdürlüğünden elde edilen zemin etüt verileri değerlendirilerek idealize zemin kesiti

ıkarılmıştır. Sev duraylılık analizleri limit denge yöntemlerini esas alan Slide 8.0 kullanarak yapılmıştır. Araştırma sonucunda yatay drenler ve YASS'nin düşürülmesi, kaza yapılarak şevin düzenlenmesi ve 120 cm çapında 300 cm ara ile çift sıra fore kazık ve bunları birbirine bağlayan 1 m kalınlığında başlık kirişi yapılması ve yol kotuna kadar toprakarme duvar yapılmasıyla heyelanın durdurulabileceği belirlenmiştir. Bu tedbirler uygulanarak yapılan duraylılık analizleri sonucunda şevin güvenlik katsayısı 1,6 olarak hesaplanmıştır.

Tekin (2011) sonlu elemanlar ve limit denge yöntemlerini kullanarak heyelan analizi yapmıştır. Mevcut senaryo çalışmalarında iki farklı metodoloji eşdeğer sonuçlar vermiştir. Yaptığı inceleme sonucunda Janbu yaklaşımıyla elde edilen güvenlik değerlerinin daha düşük olduğu sonucuna varmıştır.

avumirza (2018), Kocaeli'nin Kartepe ilçesinde meydana gelen heyelan olayını araştırmıştır. GeoSlope programında yaptığı analiz sonuçlarını elle hesaplamalarla yaptığı sonuçlarla karşılaştırmıştır. Bu analizlere göre basamaklandırmanın ancak şevin istinat yapılarıyla güçlendirilmesi durumunda yapılması gerektiği belirlenmiştir.

Yasser ve ark. (2012), İran'ın Harsin kentinde baraj inşası için dört potansiyel alan belirlemişlerdir. Daha sonra baraj inşaatı için en uygun yeri belirlemek amacıyla AHY yöntemini kullanmışlardır.

Garni ve Awasthi (2017), Suudi Arabistan'da güneş enerjisi santrallerinin kurulumu için en uygun yerleri belirlemek amacıyla bir çalışma yürütmüştür. Maliyet etkinliği sağlamak ve enerji üretimini maksimuma çıkarmak amacıyla AHY'nin ekonomik ve teknik bileşenleri üzerinde bir değerlendirme yapılmıştır. Analiz, Suudi Arabistan'da bir güneş enerjisi santralinin geliştirilmesi için en uygun yerlerin kuzey ve kuzeydoğu bölgeleri olduğunu belirlemiştir.

Myronidis ve ark. (2016), hem AHY hem de frekans oranı tekniklerini kullanarak Kıbrıs'ın batı bölgeleri için heyelan duyarlılık modeli oluşturmuştur. Araştırmacılar, çalışmada analiz edilen 10 parametreden heyelanlar üzerinde en büyük etkiyi arazi örtüsünün oluşturduğunu belirlemiştir.

Panchal ve Shrivasta (2022), çevresinde heyelanların sıklıkla meydana geldiği Hindistan'ın 5 No'lu Ulusal Karayolunu etkileyebilecek heyelan tehlikesini değerlendirmek için AHY'yi kullanmıştır. Eğim, bakı, fay yoğunluğu, drenaj yoğunluğu, jeoloji ve topoğrafya gibi kriterlerin kullanıldığı çalışmada karayolu için heyelan tehlike haritası oluşturulmuş ve haritanın inşaat ve bakım çalışmalarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

Mital ve ark. (2017), tedarik zincirleri içindeki en uygun ürün tedarikçisini belirlemek için AHY'yi kullanarak bir risk analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada, piyasadaki dört farklı kategorideki ürünleri analiz etmişler ve kapsamlı bir risk çerçevesi geliştirmişlerdir. Risk miktarının tedarik zincirleri arasında farklılık gösterdiği ve aynı tedarik zinciri içerisinde farklı ürünlerin farklı risk düzeylerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Das (2020), Hindistan'ın batı Ghat bölgesi için taşkın duyarlılığı, zarar görebilirlik ve taşkın riski haritaları oluşturmak için AHY yöntemini kullanmıştır. Çalışma, taşkın oluşumunu analiz etmek için sosyo-ekonomik göstergelerin yanı sıra diğer hususları da içermektedir.

Lentswe ve Molwalefhe (2020), Doğu Botsvana'daki yarı kurak Motloutse Havzasında yeraltı suyunun yenilenebileceği olası yerleri belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada uzaktan algılama verileriyle birlikte akifer litolojisini, eğimini, doğrusal yoğunluğunu, drenaj yoğunluğunu, toprak dokusunu ve kalınlık değişkenlerini kullanmıştır. Yeraltı suyu beslemesi için potansiyel yerlerin belirlenmesi AHY yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

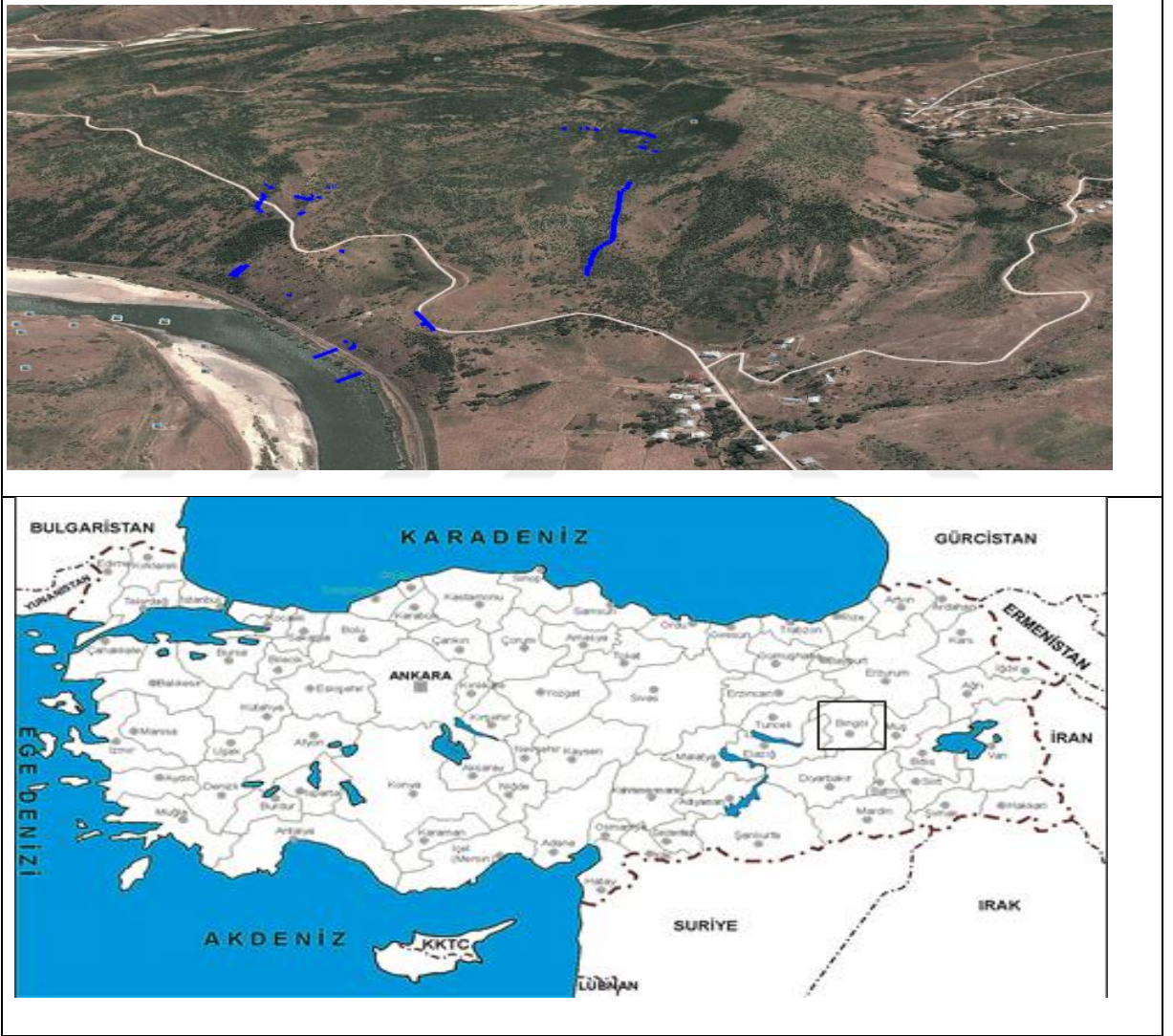
Sönmez (2011), İstanbul'un Zeytinburnu ilçesinde depremin potansiyel etkisine odaklanan sismik tehlike değerlendirmesi yapmıştır. Yeraltı suyu seviyesi, fay hatlarına yakınlık ve eğim kriterlerine göre litolojik sınıflar belirlenmiş ve ağırlıklar belirlenmiştir. Araştırma, beş farklı risk grubuna ayrılan bir bölge sismik hasar risk haritasının oluşturulmasıyla sonuçlanmıştır.

Panahi ve ark. (2013), Tahran'daki okul yapılarının sismik duyarlılığını belirlemek için Analitik Hiyerarşi Sürecini (AHP) kullanmıştır. Jeoteknik haritaların hazırlanmasında dikkate alınan faktörler maksimum yer ivmesi, eğim ve sıvılaşmadır. Okul binalarının yapısal hasar görebilirliğini değerlendirmek için dikkate alınan belirleyiciler inşaat malzemesi türü, inşaat yılı ve sismik rezonansa duyarlı kat sayısıdır. Nihai harita, analizlerden elde edilen jeoteknik ve yapısal hasar görebilirlik haritalarının üst üste bindirilmesiyle oluşturulmuştur.

2. JEOLJİK DEĞERLENDİRME

2.1. İnceleme Alanının Yeri

Aşağı Kaleköy baraj yeri Murat Nehri üzerinde 1012,0 m talveg kotunda ve Genç İlçe Merkezi'nin kuş uçuşu 16 km kuzeydoğusundadır. Söz konusu heyelan alanı sol yakada üst kotlarda yer almaktadır. Çalışma alanının yeri ve ulaşım haritası Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Proje alanının yeri ve ulaşım haritası (URL-4, 2018).

2.2. Veriler ve Çalışma Yöntemi

İnceleme alanına özgü, Harita Genel Müdürlüğü'nün 1/25 000 ölçekli topografik haritası ile Kalehan A.Ş. tarafından hazırlanan baraj yerinin 1/1000 ölçekli topografik haritaları bulunmaktadır.

Baraj yeri ve yakın yöresinin bu aşamada yapılan 1/1000 ölçekli jeolojik haritası topografik haritalar üzerinde pusula ve GPS ile kontak izleme yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmalarda, öncelikle alanın ve yakın yöresinin jeotektonik modelinin oluşturulması için proje alanı ve yakın yöresinin tektonik bağlantılı güncel yer bilimsel yazınca (literatür) araştırmaları yapılarak gerekli veriler derlenmiştir. Bu veriler heyelan yeri ve yakın yöresinde yapılan yerel arazi çalışmaları ile denetlenmiştir. Bu bağlamda proje alanı ve yakın yöresinin jeolojik koşullarına özgü kayaçların kütle özelliklerine ilişkin genel tanımlamalar yapılmıştır.

2.3. Önceki Çalışmalar

MTA proje alanı ve yakın çevresinde yörenin genel jeolojisine yönelik çalışmalar yaparak bölgenin 1/100 000, 1/250 000 ve 1/500 000 ölçekli jeoloji haritalarını hazırlamıştır. Ayrıca 2016 yılında Temelsu A.Ş. tarafından Aşağı Kaleköy Barajı ve Hidroelektrik Santrali Proje Yapım İşi Kesin Proje Aşaması Jeoteknik Etüt Raporu hazırlanmıştır.

2.3.1. Genel jeoloji

Proje alanı Doğu Anadolu Fay Zonu içinde yer almaktadır. Proje alanının yer aldığı Murat nehri yatağı bu fay tarafından belirlenmiş olup, yatağın sol sahilinde yer alan Doğu Anadolu Fayı Genç Bölüğü olarak tanımlanmıştır.

Bölgesel jeolojik verilere göre proje alanında Pütürge Metamorfitlerine ilişkin şistler, Pliyosen yaşlı Solhan Formasyonuna ilişkin piroklastikler ve volkanik lavlar ile Holosen yaşlı Kuvaterner ve yamaç molozu yüzeylenmektedir. Piroklastik ve yer yer andezit ve bazalt lavlarından oluşan formasyon sol sahil boyunca Genç ilçesine kadar olan alanda görülür.

Genç ilçesi civarında ana yatağa kavuşan Göynük çayı ve Murat nehri civarında ise geniş alüvyal çökeller bulunmaktadır.

2.3.2. Stratigrafik jeoloji

Solhan volkanitler ile uyumsuz bir şekilde yer alan Karabakır Formasyonu yaygındır. Birimin yaşı geç Miyosen-Pliyosen'dir. İstife göre Muş bölgesinde deniz erken Miyosen sonunda çekilmiştir. Bölgede Orta Miyosen yaşlı kayaç birimleri saptanamamıştır. Neotektonik döneme ait çökeller Paleotektonik dönem kayaçlarını açısız uyumsuzlukla örtmektedir. Solhan Volkanitleri ile Karabakır Formasyonu arasındaki uyumsuzluğun ve yaygın volkanik kayaçların varlığı Neotektonik dönemde tektoniğin etkin olduğunu belirtmektedir. Neotektonik dönemde havzanın jeolojik evrimi şu şekilde özetlenebilir; Erken Miyosen sonunda Doğu Anadolu'da peneplene yakın bir paleomorfoloji gelişmiştir. Orta Miyosen'de bölge K-G yönlü tektonizmanın etkisi altında sıkışmaya başlayınca kıvrım ve kırıklar kazanarak topografya hızla dalgalanmaya ve değişmeye başlamıştır. Bu yükselme nedeniyle deniz bölgeden çekilmeye başlamış; hafif dalgalanmalara bağlı olarak gelişen sırtlar birbirinden ayrı havzaların belirlenmesine yol açmıştır. Birbirlerinden ayrılmaya başlayan bu havzalardan Ahlat-Adilcevaz'da Develi Formasyonu çökelmiştir. Geç Miyosende ise deniz bölgeden tamamen çekilmiştir. Bu sırada gelişen K-G açılma çatlaklarından volkanlar çıkmaya başlamış, bunlar göl veya akarsulara eşlik etmiştir. Güneyde Solhan Volkanitleri çökelmiş; bu çökeller volkanit unsurlara ait katkılar almışlardır. Akdağ ve Sakaltutan dağları bu dönemde yüksek sırtlar olarak, adı geçen havzaların sınırlarını oluşturmuştur. Geç Miyosen sonunda ortaya çıkan yeni morfoloji bölgede geniş alanlar kaplayan göllerin oluşumuna neden olmuştur. Ahlat- Adilcevaz yöresinde çukurlarda kireçtaşı çökelmiştir. Kıta kabuğunun sıkışma, kıvrılma sonucunda kalınlaşmış olması, doğrultu atımlı fayların gelişmesine neden olmaya başlamıştır.

2.3.2.1. Solhan Volkaniti

Solhan Volkaniti Doğu Anadolu havzalarında yer alan Karakut Volkanikleri ile litoloji ve zaman açısından eş anlamlı olup, genellikle Muş Havzası'nın kuzey alanında yaygın olarak yüzlekler vermektedir (Sahintürk ve ark. 2002). Bulanık, Hamurpet, Golibaba dolaylarında Murat Nehri vadisi boyunca yaygındır. Genellikle bazalt, andezit, piroklastik

tabakalardan oluşmuştur. Bazen tortul arakatları kapsayıp, yer yer de tümüyle volkano tortullardan kuruludur. Bej renkli, kalın tabakalı kötü boylanmalı tuf-aglomera düzeyi ile onun üstünde bazaltları bulunmaktadır. Birim genellikle lav ve piroklastiklerden oluşurken genellikle Murat Nehri'nin her iki yakasından da volkanotortular şeklinde izlenmektedir. Solhan volkanitlerini özellikle inceleme alanının Doğusunda yüzeyleyen Kuvaterner yaşlı Nemrut volkaniklerinden ayırmak oldukça güçtür. Solhan volkanitlerinde görülen eğimlilik ve kıvrımlar yapısal özellik kazanmamış Nemrut'un litolojilerini Solhan'dan ayrılması için bir kriter olarak kullanmıştır. Birimin kalınlığı özellikle Muş Havzası kuzey alanında 1000-1250 m dolayındadır. Birimin adı her ne kadar volkanit dahi olsa genelde bu volkanikler dönemin eş yaşlı Zırnak Formasyonu çökel ortamı ile ilişkilendirilmesi gereklidir. Birimin alt kesimlerinde göl çökelleri bulunmakta olup, orta kesimlere doğru ise piroklastik arakatlı göl çökelleri vardır. Üst kesimlere doğru ise yer yer kömür bloklulu alüviyal çökeller arakatlı olarak yer alır. Bu bilgiler Solhan Formasyonu volkanitlerinin çöken bir havza içerisinde biriktiğinin kanıtıdır. Solhan Volkanitlerinin oluşum ve yayılım yaşı geç Miyosen olarak kabul edilmektedir. Bilindiği gibi Zırnak Formasyonunun sedimenter istifleri ile yanal yönde ilişkili olması yaş konusunda da Solhan Volkanitlerinin Zırnak Formasyonu ile eş yaşlı olduğunu söylemektedir. Pliyosen zamanında gelişen çökeller Pliyosen dönemi öncesi çökelmiş tüm birimler üzerine açısal uyumsuzlukla gelen çökeller, çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, marn, çok ince gölsel karakterli kireçtaşı ve tufitten oluşmakta olup, 'Bulanık-Elmakaya' Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Birim hemen hemen bugünkü morfolojik çukurlukları doldurmuştur. Özellikle Murat Nehri'nin yarmalarında daha iyi izlenmektedir. Tabanda oldukça kalın lamine kumtaşı, çapraz tabakalanmalı kumtaşı, Biyaly içeren killi kireçtaşı, kumtaşı, kireçli kumtaşı olarak gözlenmektedir. Kumtaşları gevşek olup, çok bol küçük biyaly parçaları kapsamaktadır. Geç Miyosen'den beri devam eden volkanik aktivite ve ürünleri Pliyosen döneminde de bazalt, aglomera, tuf olarak görülmektedir. Birimin kalınlığı 500-2000 m arasında değişiklik göstermektedir. Bulanık-Elmakaya Formasyonu türbiditler, flüviyal ortam ve bazen de gölsel koşullar içermektedir.

2.3.2.2. Bingöl Formasyonu (Plyb)

Çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı aralanmasından oluşan birim Doğu Anadolu Fayı Atlası (Herece, Mta, 2008) çalışmasında adlandırılmıştır. Bazı çalışmalarda ise çakıl, kum, kilden oluştuğu belirtilen formasyon Bingöl ile Genç arasında yüzeyleyir.

Gümüşköy ve Kumgeçit köyü dolayındaki formasyonun üst aşınım yüzeyi ile vadi tabanı arasındaki yüzeylenmeleri, istifin bu bölümü için tip kesit yerleridir. Alt dokanağında Solhan Formasyonu üzerinde açısal uyumsuzlukla gelen formasyon, Holosen yaşlı alüvyonlar tarafından uyumsuz olarak örtülür. Havzanın taban topoğrafyası ve çökel kalınlığı bilinmemektedir. Zayıf ve gevşek seviyeleri yoğundur. Formasyonda yaş verisi yoktur; ancak stratigrafik yaşı Pleyistosen olmalıdır. Bahçeköy ve Palu formasyonlarının yanal karşılığını oluşturan formasyon, DAF'ın Bingöl bölütünün Genç bölütünden sola sıçraması ile oluşan bir çek-ayır havzada gelişmiştir.

2.3.2.3. Zırnak Formasyonu (Pvz)

Birimi ilk kez İlker (1966) tarafından adlandırılmıştır. Birim alt bölümlerinde çakıltaşı-kumtaşı üst bölümlerinde ise kiltası-kumtaşı-kireçtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Alt dokanağında Adilcevaz Formasyonu üzerinde açısal uyumsuzlukla yer almaktadır. Çalışma alanında haritalanabilir ölçekteki tek yüzeylemesini Yorgançayır köyü güneydoğu kesimlerinde sunmaktadır.

Birimde yaş verilebilecek fosil bulunamamıştır. Stratigrafik olarak erken Pliyosen yaşlı olduğu düşünülmektedir (Tarhan,1991). Solhan Formasyonu ile düşey ve yanal geçişlidir. Pliyosen yaşlı Hamurpet Lavı ve Yolüstü Formasyonu tarafından uyumsuzlukla örtülür.

2.3.2.4. Karabakır Formasyonu (Tkb)

Formasyon; volkanitler, kireçtaşı çakıltaşı - kumtaşı olarak üç birime ayrılmıştır.

Karabakır formasyonu, Keban Metamorfitletlerini, Elazığ Mağmatitletlerini ve Kırkgeçit Formasyonunu uyumsuzlukla örter. Üzerinde de uyumsuz olarak Pleystosen yaşlı alüvyonlar bulunur.

Tkb üyesi bazalt, andezit (cürufıları) litolojisinde ve kıta içi volkanizma ürünüdür. Tkb üyesi killi kireçtaşı- kiltası ardalanmasından oluşmakta ve yer yer marnlı seviyeler içermektedir. Tkb üyesi çakıltaşı- kumtaşı birimleri ise zayıf çimentolu gölsel ortam ürünleridir. Formasyonun yaşı, Sungurlu vd.'nin paleontolojik bulgularına göre geç Miyosen'dir. Türkmen, elde ettiğı paleontolojik verilere göre birimin yaşını geç Miyosen-Piliyosen olarak kabul etmiştir.

2.3.2.5. Kuvaterner birimler (Q)

Üst Sistem	Sistem	Seri	Formasyon	Simge	Litoloji	Açıklamalar
Senozoyik	Kuvaterner	Pliyosen - Güncel		Qal		Alüvyon; tutturulmamış çakıl, kum, silt
				Qym		Yamaç Döküntüsü; kum, kil, çakıl
			Bingöl Formas.	Plyb		Çakıltaşı, gevşek çimentolu kumtaşı, kilaşı
	Tersiyer	Üst Miyosen - Pliyosen	Solhan Formas.	Mis		Solhan Volkanikleri; bazalt, andazit lavları, tuf , aglomera, gölsel kilaşı ve kumtaşı
			Karabakır Formas.	Tkb		Karabakır Formasyonu; bazalt, andazit, kilaşı, killi kireçtaşı
			Zirnak Formas.	Pvz		Zirnak Formasyonu; Çakıltaşı - Kumtaşı, Kireçtaşı - Kumtaşı - Kilaşı Ardalanması.

Şekil 2.2. Proje alanı stratigrafik kesiti (ölçeksiz)

Karabakır Formasyonu (Tkb); volkanitler, kireçtaşı çakıltaşı - kumtaşı olarak üç birime ayrılmıştır. Tkb üyesi bazalt, andezit (curufları) litolojisinde ve kıta içi volkanizma ürünüdür. Tkb üyesi killi kireçtaşı- kilaşı ardananmasından oluşmakta ve yer yer marnlı seviyeler içermektedir. Tkb üyesi çakıltaşı- kumtaşı birimleri ise zayıf çimentolu gölsel ortam ürünleridir. Formasyonun yaşı, Sungurlu vd.'nin paleontolojik bulgularına göre geç Miyosen'dir. Türkmen, elde ettiği paleontolojik verilere göre birimin yaşını geç Miyosen-Pliyosen olarak kabul etmiştir.

Bingöl Formasyonu (Plyb); Çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardananmasından oluşan birim Doğu Anadolu Fayı Atlası (Herece, Mta, 2008) çalışmasında adlandırılmıştır. Bazı çalışmalarda ise çakıl, kum, kilden oluştuğu belirtilen formasyon Bingöl ile Genç arasında

yüzeylenir. Zayıf ve gevşek seviyeleri yoğundur. Formasyonda yaş verisi yoktur; ancak stratigrafik yaşı Pleistosen olmalıdır.

Solhan Volkaniti (Mivs); Genellikle bazalt, andezit, piroklastik tabakalardan oluşmuştur. Bazen tortul arakatları kapsayıp, yer yer de tümüyle volkano tortullardan kuruludur. Bej renkli, kalın tabakalı kötü boylanmalı tüf-aglomera düzeyi ile onun üstünde bazaltları bulunmaktadır. Birim genellikle lav ve piroklastiklerden oluşurken genellikle Murat Nehri'nin her iki yakasından da volkanotortular şeklinde izlenmektedir. Solhan volkanitlerini özellikle inceleme alanının Doğusunda yüzeyleyen Kuvaterner yaşlı Nemrut volkaniklerinden ayırmak oldukça güçtür. Solhan volkanitlerinin oluşum ve yayılım yaşı geç Miyosen olarak kabul edilmektedir.

Alüvyon (Qal); Bu alanlardaki ovayı dolduran alüvyon çökeller genelde tutturulmamış, seyrekçe az tutturulmuş çakıl, kum, silt ve çamurdan oluşmaktadır. Köken olarak vadinin üst kotlarındaki volkanit parçalarını içerir. Önceki çalışmalar ışığında eksende kalınlığının yaklaşık 25,00 m dolayında olduğu görülür.

Yamaç Molozu (Qym); Heyelan ve yakın yöresinde en üstte bütünüyle Kuvaterner yaşlı güncel çökeller bulunmaktadır. Bu çökeller çalışma içerisinde "Qym" olarak adlandırılmış heyelan malzemesini tanımlamaktadır.

Heyelan malzemesinin üst kotlarında yaklaşık 10m kalınlığında kahverenkli kil birimleri yer almaktadır. Bu birimler altında daha geçirimli olan bloklu kumlu siltli killi Çakıl birimi üzerinde geçirimsiz tabaka oluşturmaktadır. Yağış olan dönemlerde üzerinde küçük gölcüklerin oluştuğu gözlenmiştir.

Heyelan malzemesi içerisinde farklı kökenlerden kayaçlar gerek yüzey çalışmaları, açık kazılar gerekse yapılan sondaj çalışmaları sırasında gözlenmiştir. Bu kayaç parçaları ağırlıklı olarak bazalt, aglomera gibi volkanik kökenli kayaçlardan meydana gelmektedir.

2.4. Deprem Durumu

Tektonik Evrim bölümünde ayrıntılı olarak sunulduğu gibi proje kapsamındaki tesisler Doğu Anadolu Fayı Zonu (DAFZ) yakın yöresinde yer almaktadır. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından hazırlanan "Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası" verilerine göre; proje alanı 1. Derece Deprem Bölgesi'ne girmektedir. Bu nitel verinin nicel karşılığı; "İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayın No: 25'te, Etkin Yer İvmesi Katsayısı; $A_0 \geq 0,40$ olarak tanımlanmaktadır.

2.5. Hidrojeoloji

Yeraltı Suları; İnceleme alanı, kil, yamaç molozu, süreksizlikleri yer yer kapalı bazalt ve volkanik birimlerinden oluşmaktadır.

Heyelan yerinde güncel çalışmalar sırasında açılan temel sondaj kuyularında ölçülen yeraltı suyu düzeyleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Heyelan yerinde açılan temel kuyularına göre suyun akım yönü eteklerden vadi içine doğrudur.

Tablo 2.1. Baraj yerinde güncel ve önceki çalışmalar sırasında açılan temel sondaj kuyularında ölçülen yeraltı suyu düzeyleri

Sıra No	Kuyu Adı	X	Y	Z	YASS	Açılabilen Derinlik
1	LSK-1	388289	4300231	1120	57,00	70
2	LSK-2	388681	4299969	1179	42,90	54
3	LSK-3	388488	4300007	1147	35,70	55
4	LSK-4	388283	4300053	1135	68,00	76
5	LSK-5	388067	4300103	1086	32,20	75
6	LSK-6	387667	4300098	1021	8,94	25
7	LSK-7	388055	4300149	1082	32,17	50
8	LSK-8	388073	4299941	1118	-	36
9	LSK-9	388316	4300447	1112	20,45	45
10	LSK-10	388287	4299910	1145	-	35
11	LSK-11	388288	4299853	1162	36,30	57
12	LSK-12	388679	4300329	1151	61,00	81
13	LSK-13	388488	4299687	1237	-	85
15	LSK-14	389064	4299906	1218	57,00	60
16	LSK-14B	389210	4300062	1228	41,25	80
17	LSK-15	389229	4300212	1237	-	75
19	LSK-16	388999	4300433	1198	29,50	50
20	LSK-17	388819	4299939	1172	17,00	51
21	LSK-18	388832	4300164	1177	42,00	82
22	LSK-19	388910	4300324	1164	23,00	71
23	LSK-20	388813	4300509	1171	32,05	50
25	LSK-22B	388177	4300517	1063	45,02	60
26	LSK-24	387876	4299923	1066	18,00	60
27	LSK-25	388765	4299702	1228	77,00	90
28	LSK-27	388702	4300677	1133	63,34	110
32	LSK-31	388511	4300568	1126	-	105
34	LSK-33	388882	4299992	1169	9,00	127
	Toplam					1.815,0

2.6. Mühendislik Jeolojisi

Heyelan yerindeki jeolojik birimler, bölgesel ölçekli tektonik devinimler nedeni ile çok karmaşık bir yapı sunmaktadır. O bakımdan heyelan ve yakın alanında temel araştırma sondaj programı, karşılaşılan jeolojik koşullara göre birkaç aşamalı yürütülmüştür. İzleyen bölümlerde bu araştırma sondajlarına ilişkin bilgiler sunulmaktadır. Araştırma sondajlarının konumları, logları, renkli karot fotoğrafları; karot yüzdesi (CR), RQD ve inklinometre grafikleri ile yeraltı suyu düzeyleri eklerdeki ilgili çizimlerde verilmiştir. Sondaj logları ve karot fotoğrafları eklerde ayrıca verilmiştir.

2.7. Araştırma Sondajları

Temelsu tarafından heyelan bölgesinde uygulanmak üzere araştırma programı önerilmiştir. Ayrıca önerilen bu araştırma programına ek olarak Kalehan tarafından 15 adet araştırma sondaj kuyusu ve 12 adet jeofizik araştırması eklenmiştir.

Bu aşamada heyelan koşullarını, yamaç molozu kalınlığı, jeolojik koşullarının genel tanımı için açılan bu sondajların özet bilgileri izleyen Tablo 2.2, Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tanımlama sondajlarından sağlanan jeoteknik veriler orta derece ve zayıf kaya özelliğini taşıyan birimlerin detaylı olarak araştırılmasını gerektirmiştir.

Toplamda 27 adet sondaj, 1815 metre delgi açılmış ve bunun 1404 metresine inklinometre montajı yapılabilmektedir.

Tablo 2.2. Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının özeti

Sıra No	Kuyu Adı	X	Y	Z	YASS	Açılabilen Derinlik	YPZ/İNK Montaj Edilebilen Derinlik
1	LSK-1	388289	4300231	1120	57,00	70	42
2	LSK-2	388681	4299969	1179	42,90	54	53
3	LSK-3	388488	4300007	1147	35,70	55	46
4	LSK-4	388283	4300053	1135	68,00	76	74
5	LSK-5	388067	4300103	1086	32,20	75	75
6	LSK-6	387667	4300098	1021	8,94	25	25

7	LSK-7	388055	4300149	1082	32,17	50	İptal Edildi
8	LSK-8	388073	4299941	1118	-	36	İptal Edildi
9	LSK-9	388316	4300447	1112	20,45	45	45
10	LSK-10	388287	4299910	1145	-	35	-
11	LSK-11	388288	4299853	1162	36,30	57	44
12	LSK-12	388679	4300329	1151	61,00	81	63,5
13	LSK-13	388488	4299687	1237	-	85	67
14	LSK-14	389064	4299906	1218	57,00	60	58,5
15	LSK-14B	389210	4300062	1228	41,25	80	75
16	LSK-15	389229	4300212	1237	-	75	54
17	LSK-16	388999	4300433	1198	29,50	50	50
18	LSK-17	388819	4299939	1172	17,00	51	28
19	LSK-18	388832	4300164	1177	42,00	82	67,5
20	LSK-19	388910	4300324	1164	23,00	71	71
21	LSK-20	388813	4300509	1171	32,05	50	48
22	LSK-22B	388177	4300517	1063	45,02	60	59
23	LSK-24	387876	4299923	1066	18,00	60	58
24	LSK-25	388765	4299702	1228	77,00	90	82
25	LSK-27	388702	4300677	1133	63,34	110	103,5
26	LSK-31	388511	4300568	1126	-	105	inilemedi
27	LSK-33	388882	4299992	1169	9,00	127	115
	Toplam					1.815,0	1.404,0

Tablo 2.3. Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının elastisite modülleri

Sondaj No	Derinlik 1	Derinlik 2	E modülü
LSK-1	0	22	10
LSK-1	22	60	1000
LSK-1	60	68,5	1000
LSK-1	68,5	70	3500
LSK-2	0	43	10
LSK-2	43	54	1100
LSK-3	0	2	10
LSK-3	2	43	1000
LSK-3	43	48	800
LSK-3	48	54	3500
LSK-3	54	55	1200
LSK-4	0	61	1000
LSK-4	61	62,5	1200
LSK-4	62,5	71	6500
LSK-4	71	74	1000
LSK-5	0	30	10
LSK-5	30	70	1000
LSK-6	0	9	10

LSK-6	9	24,5	10
LSK-6	24,5	25,5	3500
LSK-7	0	20	10
LSK-7	20	49,7	10
LSK-8	0	33	10
LSK-8	33	35	10
LSK-8	0	34	10
LSK-8	34	36	10
LSK-9	0	23	10
LSK-9	23	42,5	1100
LSK-9	42,5	45	5000
LSK-10	0	25	10
LSK-10	25	35	5000
LSK-11	0	18	10
LSK-11	18	42	1000
LSK-11	42	57	2500
LSK-12	0	6	10
LSK-12	6	57	10
LSK-12	57	81	2000
LSK-13	0	37	10
LSK-13	37	85	5000
LSK-13	0	37	10
LSK-13	37	85	2000
LSK-14	0	51	10
LSK-14	51	80	1000
LSK-14	0	42	10
LSK-14	42	47	10
LSK-14	47	80	1300
LSK-15	0	75	10
LSK-16	0	24	10
LSK-16	24	30	10
LSK-16	30	50	1000
LSK-16	0	24	10
LSK-16	24	30	10
LSK-16	30	50	10
LSK-17	0	18	10
LSK-17	18	28	1000
LSK-17	28	51	5000
LSK-18	0	51	10
LSK-18	51	76,5	1000
LSK-18	76,5	83,5	3500
LSK-18	0	51	10
LSK-18	51	76	1000
LSK-18	76	83,5	2000

Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının elastisite modülleri devamı

LSK-19	0	9	10
LSK-19	6	51	10
LSK-19	51	63	1000
LSK-19	63	71	1400
LSK-20	0	38	10
LSK-20	38	50	1100
LSK-22	0	40	10
LSK-22	0	41	10
LSK-22	41	46	3500
LSK-22	46	60	800
LSK-22B	0	41	10
LSK-22B	41	46	3500
LSK-22B	46	60	1250
LSK-24	0	34	10
LSK-24	34	59	5000
LSK-25	0	5	10
LSK-25	5	23	10
LSK-25	23	79	1100
LSK-25	79	90	5000
LSK-27	0	4	10
LSK-27	4	23	10
LSK-27	23	37	1400
LSK-27	37	51	1200
LSK-27	51	59	1400
LSK-27	59	110	1400
LSK-31	0	4	10
LSK-31	4	22	10
LSK-31	22	43	10
LSK-31	43	51	1100
LSK-31	51	85	1000
LSK-31	85	107	2000
LSK-31	107	109	1000
LSK-31	109	127	5000
LSK-33	0	20	10
LSK-33	20	40	10
LSK-33	40	127	1000

Tablo 2.4. Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının litoloji tablosu

LSK-1	0	22	Qym
LSK-1	22	60	BTA
LSK-1	60	68,5	BTA
LSK-1	68,5	70	Basalt
LSK-2	0	43	Qym
LSK-2	43	54	Basalt
LSK-3	0	2	Qym
LSK-3	2	43	BTA
LSK-3	43	48	Tuff
LSK-3	48	54	Basalt
LSK-3	54	55	Basalt
LSK-4	0	61	BTA
LSK-4	61	62,5	P.Basalt
LSK-4	62,5	71	Basalt
LSK-4	71	74	BTA
LSK-5	0	30	Qym
LSK-5	30	70	BTA
LSK-6	0	9	Dolgu
LSK-6	9	24,5	Qal
LSK-6	24,5	25,5	Basalt
LSK-7	0	20	Clay
LSK-7	20	49,7	Qym
LSK-8	0	33	Qym
LSK-8	33	35	Qym
LSK-8	0	34	Qym
LSK-8	34	36	Qym
LSK-9	0	23	Qym
LSK-9	23	42,5	Basalt
LSK-9	42,5	45	Basalt
LSK-10	0	25	Qym
LSK-10	25	35	Basalt
LSK-11	0	18	Qym
LSK-11	18	42	BTA
LSK-11	42	57	Basalt
LSK-12	0	6	Clay
LSK-12	6	57	Qym
LSK-12	57	81	Basalt

Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının litoloji tablosu devamı

LSK-13	0	37	Qym
LSK-13	37	85	Basalt
LSK-13	0	37	Qym
LSK-13	37	85	Basalt
LSK-14	0	51	Qym
LSK-14	51	80	BTA
LSK-14	0	42	Qym
LSK-14	42	47	Clay
LSK-14	47	80	Basalt
LSK-15	0	75	Qym
LSK-16	0	24	Qym
LSK-16	24	30	Clay
LSK-16	30	50	BTA
LSK-16	0	24	Qym
LSK-16	24	30	Clay
LSK-16	30	50	Qym
LSK-17	0	18	Clay
LSK-17	18	28	BTA
LSK-17	28	51	Basalt
LSK-18	0	51	Qym
LSK-18	51	76,5	BTA
LSK-18	76,5	83,5	Basalt
LSK-18	0	51	Qym
LSK-18	51	76	BTA
LSK-18	76	83,5	Basalt
LSK-19	0	9	Clay
LSK-19	6	51	Qym
LSK-19	51	63	BTA
LSK-19	63	71	Basalt
LSK-20	0	38	Qym
LSK-20	38	50	Basalt
LSK-22	0	40	Qym
LSK-22	0	41	Qym
LSK-22	41	46	Basalt
LSK-22	46	60	Tuff
LSK-22B	0	41	Qym
LSK-22B	41	46	Basalt
LSK-22B	46	60	CG.Tuff

Uygulama aşamasında açılmış heyelan bölgesi sondajlarının litoloji tablosu devamı

LSK-24	0	34	Qym
LSK-24	34	59	Basalt
LSK-25	0	5	Clay
LSK-25	5	23	Qym
LSK-25	23	79	Basalt
LSK-25	79	90	Basalt
LSK-27	0	4	Clay
LSK-27	4	23	Qym
LSK-27	23	37	P.Basalt
LSK-27	37	51	Basalt
LSK-27	51	59	P.Basalt
LSK-27	59	110	Basalt
LSK-31	0	4	Clay
LSK-31	4	22	Qym
LSK-31	22	43	Qym
LSK-31	43	51	Basalt
LSK-31	51	85	BTA
LSK-31	85	107	Basalt
LSK-31	107	109	BTA
LSK-31	109	127	Basalt
LSK-33	0	20	Clay
LSK-33	20	40	Qym
LSK-33	40	127	BTA

2.8. Kaya ve Zemin Mekaniği Çalışmaları

2.8.1. Arazi deneyleri

2.8.1.1. İnklinometre deneyleri

Sondaj kuyularında yapılan inklinometre sonuçları ilgili çizimlerde yorumlanarak sunulmuştur.

2.8.1.2. Jeofizik çalışmaları (Özdirenç – DES)

Heyelan bölgesinde 12 adet kesiti elde edecek şekilde Jeofizik çalışmaları (DES) gerçekleştirilmiştir. Alınan bu kesitler açılmış olan araştırma sondajları ile korele edilmiş ve benzerlik gösterdiği gözlenmiştir.

2.8.2. Heyelan türü

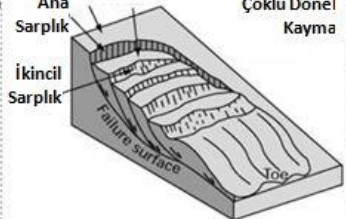
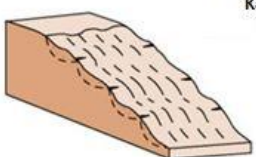
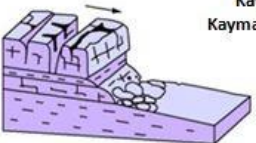
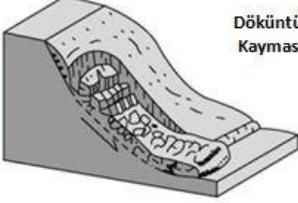
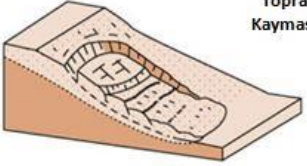
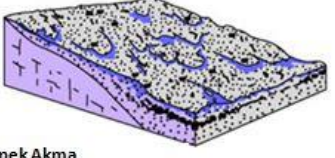
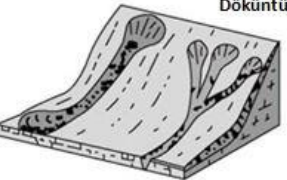
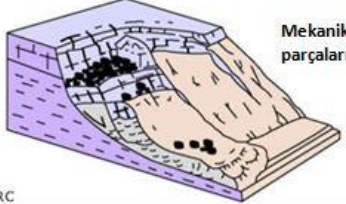
Heyelan araştırmalarında “görsellik” konunun, kavramsal düzeyde somutlaşması için çok yararlı bir araçtır. İzleyen çizelgede “Cruden ve Varnes, 1996” tarafından (a) gereç, (b) hareket türü ve (c) hız parametreleri bağlamında yapılan heyelan sınıflamaları görsel olarak verilmektedir. Genel görünümü Şekil 2.4’de verilen heyelanı “Cruden ve Varnes, 1996” heyelan sınıflaması görselleri ile karşılaştırıldığında aşağıdaki özellikleri içerdiği görülmektedir:

Hareket türü →Düzlemsel Kayma

Gereç →Toprak

Bu iki parametre ile izleyen sayfadaki görsellere girildiğinde heyelan türü kavramsal tanım bağlamında “toprak kayması (earth slide)” olmaktadır.

Heyelanın boyutları göz önüne alındığında genel çerçevede heyelan türü düzlemsel toprak kayması olmakla birlikte, heyelan kütlelerinin harekete geçmesi sonrasında yamaç döküntüsünde ve toprakta oluşabilen kayma türlerinden yersel olarak dönel (dairesel) kayma türü de gözlemlenebilir. Diğer kayma türlerinin gözlemlenmesi de bu boyuttaki bir heyelan kütlesi için olağandır.

Gereç		YAMAÇ DÖKÜNTÜSÜ*		TOPRAK
Devinim türü		KAYA		
KAYMA	Dönel			
	Düzlemsel			
AKMA				
				

* Yamaç döküntüsü ve mekanik ayrışmalı kaya parçalarından oluşan gevşek gereç.

Şekil 2.4. Gereçlerin devinim türlerine göre durumları (Hungar, O ve ark. 2014).

2.8.3. Jeolojik koşullar

Önceki bölümlerde değinildiği gibi heyelan ve yakın yöresinde en altta bulunan Solhan Volkanitlerine ait bazalt birimleri; en üstte ise bütünüyle Kuvaterner yaşlı güncel çökeller bulunmaktadır. Bu çökeller tezde içerisinde "Q_{hm}" olarak adlandırılmış heyelan malzemesini tanımlamaktadır.

Heyelan malzemesinin üst kotlarında yaklaşık 10m kalınlığında kahverenkli kil birimleri yer almaktadır. Bu birimler altında daha geçirimli olan bloklu kumlu siltli killi Çakıl birimi üzerinde geçirimsiz tabaka oluşturmaktadır. Yağış olan dönemlerde üzerinde küçük gölcüklerin olduğu gözlenmiştir.

Heyelan malzemesi içerisinde farklı kökenlerden kayaçlar gerek yüzey çalışmaları, açık kazılar gerekse yapılan sondaj çalışmaları sırasında gözlenmiştir. Bu kayaç parçaları ağırlıklı olarak bazalt, aglomera gibi volkanik kökenli kayaçlardan meydana gelmektedir.

Solhan Volkaniti bej renkli, kalın tabakalı kötü boylanmalı tüf-aglomera düzeyi ile onun üstünde bazaltları bulunmaktadır. Birim genellikle lav ve piroklastiklerden oluşurken genellikle Murat Nehri'nin her iki yakasından da izlenmektedir. Solhan Formasyonu volkanitlerinin çöken bir havza içerisinde biriktiğinin kanıtıdır. Solhan volkanitlerinin oluşum ve yayılım yaşı geç Miyosen olarak kabul edilmektedir. Özellikle Murat Nehri'nin yarmalarında daha iyi izlenmektedir. Birimin kalınlığı 500-2000 m arasında değişiklik göstermektedir.

Geç Miyosen'de Bingöl ve Muş bölgesinde K-G yönlü açılma çatlaklarından çıkan volkanik malzeme ile bunlara eşlik etmiş göl ve akarsu çökelleri birlikte Solhan Volkanitlerini oluşturmuştur. Öncel çalışmalarda ayrıca Solhan Volkanitleri'nde bazaltik ve andesitik lavlar ile bunların piroklastiklerin egemen olduğu volkan bacalarının püskürük ürünlerinin de geniş alanlar kapladığı vurgulanmaktadır. Heyelan malzemesinin tipik bir kesiti Resim 2.1'de verilmiştir.

Bazalt ve andezit lavları ile bunların curuflarının bu piroklastikler içinde karmaşık bir yapı ile salkım saçak bir yapıda bulunduğu vurgusu yapılabilir. Arazi gözlemleri ve sondaj verileri de bu yerbilimsel yorumları doğrulamaktadır. Öte yanda, doğrudan yüzeylemeyen ancak baraj yerinin hemen akışyukarısında sağ yakada dik şevler oluşturarak yüzlek ve kıvrımlı bir yapı gösteren Solhan Volkanitleri'nde ana kaya türünün bazaltik ve andezitik lavlar olduğu ve bu lav akıntılarının içinde aradüzey olarak tüflerin sıkça ardalandığı gözlenmektedir. Heyelan bölgesinin genel görünüşü ve çatlaklar Resim 2.2'de verilmiştir.



Resim 2.1. Heyelan malzemesinin tipik bir kesiti



a- Arazinin geniş görünümü



b- Çatlak genel görüntüsü



c- Çatlak yakın görüntü



d- Çatlak derinlik görüntüsü

Resim 2.2. Heyelan bölgesinin genel görünümü ve çatlaklar

2.8.4.Drenaj önlemleri

Heyelan bölgesinde üç farklı drenaj sistemi tasarlanmıştır ve önerilen drenaj sistemleri aşağıda özetlemiştir.

❖ Yüzey sularının drenajı;

Yüzey sularının drenajı için heyelan alanının sınırları dışında kalacak bir kafa hendeği önerilmiştir. Ayrıca heyelan kazılarında oluşan palyelerde ve heyelanın üst kısımlarında teşkil edilecek drenaj hendekleri ile yüzey sularının drenajı sağlanacaktır.

❖ Heyelan kütlesi içerisinde olan/oluşacak boşluk suyu basıncının azaltılması;

Heyelan kütlesi içerisindeki boşluk suyu basıncının azaltılması için heyelan kazısı ortasında teşkil edilen kanalın en alt iki şevinden heyelan kütlelerinin içerisine doğru yatay drenaj sistemi yapılacaktır. Bu delgilerin içerisine delikli drenaj boruları yerleştirilerek boşluk suyu basıncının azaltılması hedeflenmiştir.

❖ Heyelan bölgesinin sol sahilinden heyelan bölgesine yönelen yeraltı sularının kontrol altında tutulması ve heyelan bölgesindeki yer altı su seviyesinin düşürülmesi;

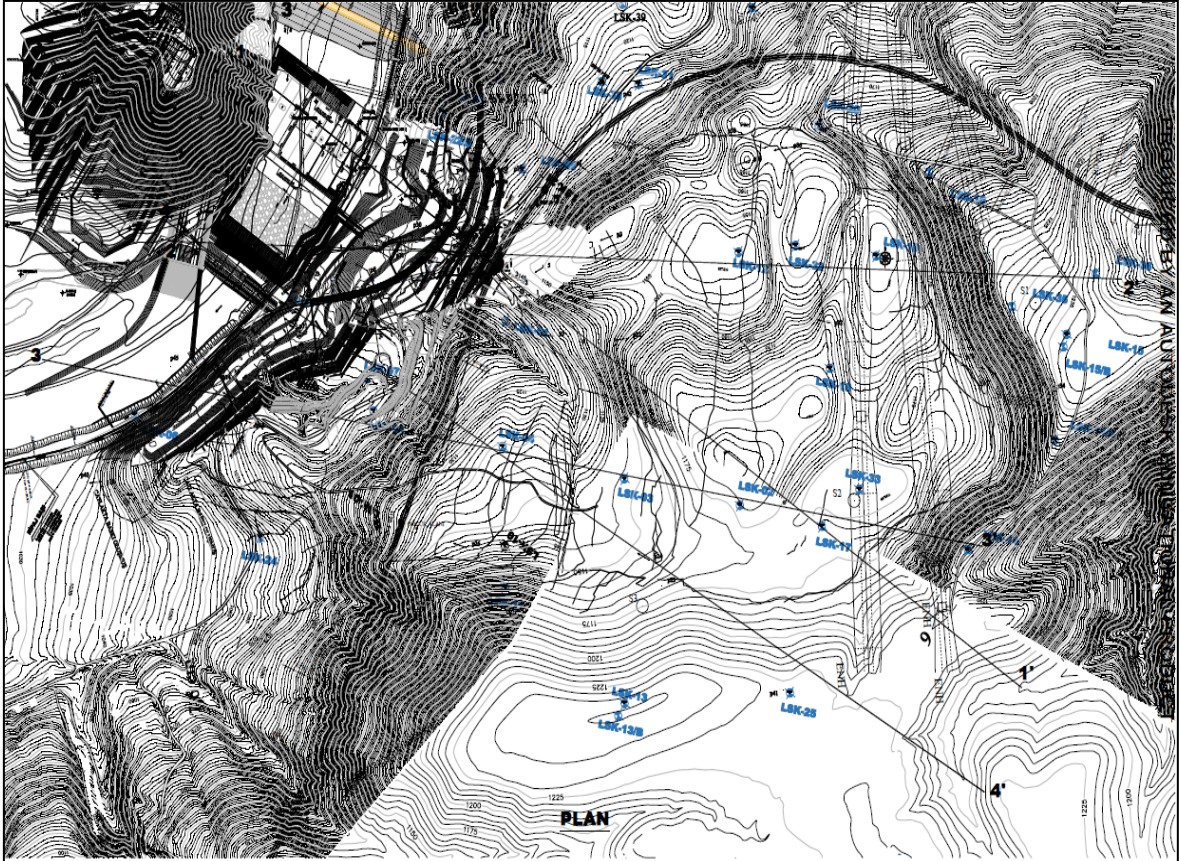
Heyelan bölgesinin içerisinden 1105m kotundan geçen ve heyelan sonrasında terk edilen demiryolu tüneli için belirlenen yeni güzergâh heyelan kütlelerinin sol sahilinde, heyelanın alt kotlarında ve kısmen heyelan alanının dışarısındadır. Heyelan bölgesine yönelen yer altı sularına hem bariyer oluşturmak hem de yer altı su seviyesini düşürmek amacı ile yeni belirlenen demiryolu tüneli içerisinden drenaj delikleri açılacaktır.

3. SOL SAHİL KAZILARININ FOSİL HEYELANA ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın bu bölümünde, baraj sol sahilinde sınırlı alanda ve hacimde yapılan kazıların, baraj sol sahilinde baraj gövdesinin membasında yer alan fosil heyelana olan etkileri yapılan stabilite hesapları ile değerlendirilmiştir. Limit denge yöntemi kullanılarak yapılan stabilite analizleri SLIDE paket bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır.

3.1. Analiz Kesitleri

Zemin ve kaya koşullarının belirlenerek analiz kesitlerine ait idealize zemin profillerinin hazırlanması için çok sayıda sondaj kuyusu açılmıştır.



Şekil 3.1. Baraj sol sahil planı



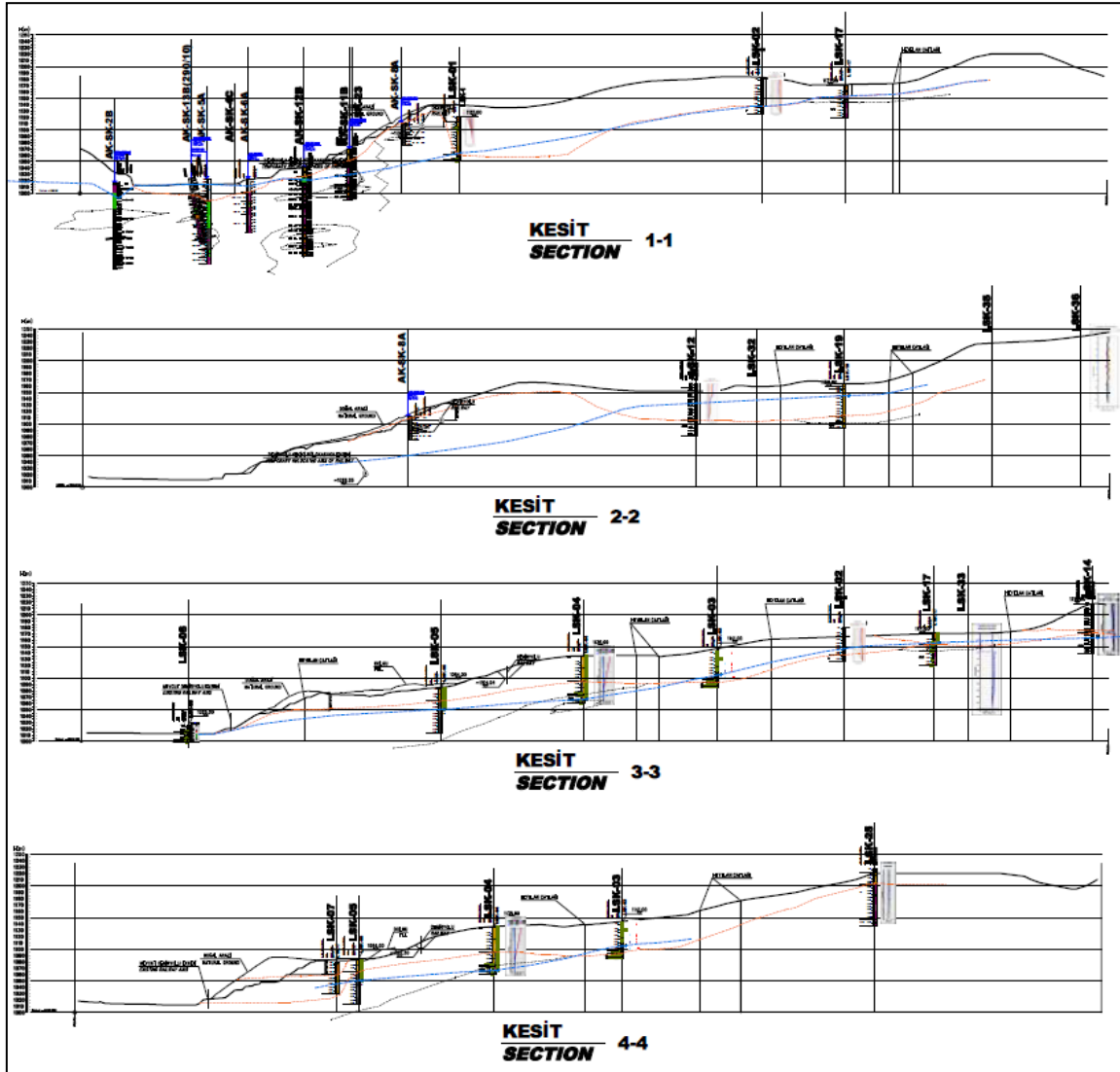
Resim 3.1. Sol sahil baraj kazıları



Resim 3.2. Geçici demiryolu kazıları

Detayları ilgili projelerinde sunulan baraj kazıları, baraj eksenini mansabında yer alan geçici demiryolu kazıları, işveren tarafından yapılan saha ulaşım yolları ve henüz kazı yapılmayan doğal arazi yüzeyleri Resim 3.1 ve Resim 3.2 üzerinde gösterilmiştir.

Heyelan alanında Şekil 3.2’de sunulan idealize zemin profilleri ile birlikte dört kesit teşkil edilmiştir. Hazırlanan dört kesit içerisinde nehir kotuna yakın kotlarda sınırlı alan ve hacimde yapılan mevcut kazıların en yüksek olduğu ve bu kazılardaki heyelan malzemesi kalınlığının en fazla olduğu 3-3 ve 4-4 kesitleri en olumsuz durumu yansıtacağından, güvenli tarafta kalınarak bu kesitler kritik analiz kesiti olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2. İdealize zemin profilleri

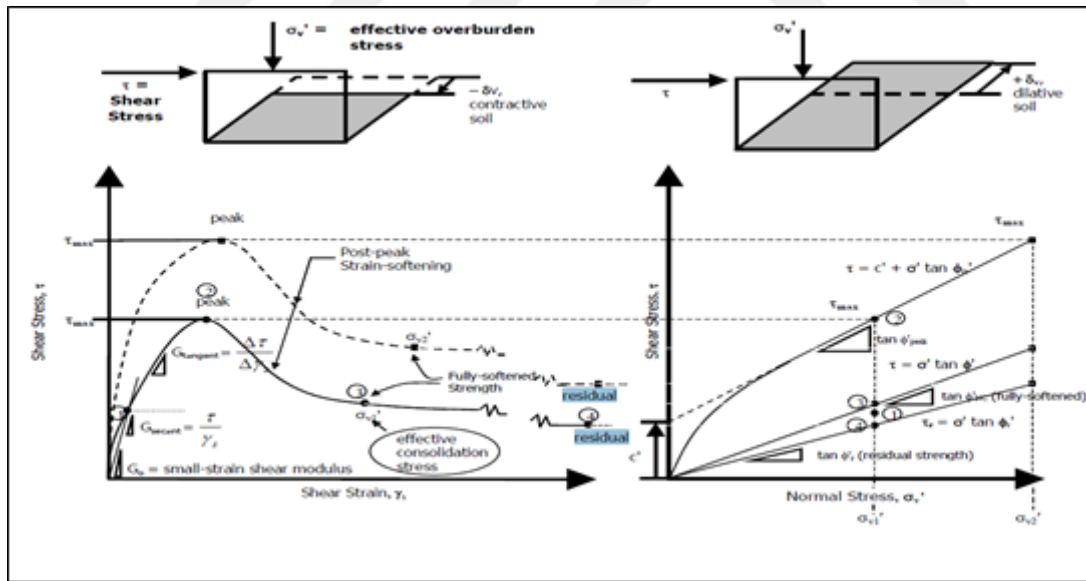
3.2. Heyelan Malzemesi Reziduel Kayma Dayanımı Parametreleri

İdealize zemin profili kesitleri genel olarak bazalt kaya tabakası üzerinde tabakalanan yamaç döküntüsü, bazalt – tuf – aglomera karmaşığı ve kil tabakalarından oluşmaktadır.

Yapılan stabilite analizlerinde yamaç döküntüsü, kil ve bazalt – tuf – aglomera karmaşığı tabakaları rezidüel heyelan malzemesi olarak kabul edilmiştir. Rezidüel heyelan malzemesini teşkil eden tabakaların rezidüel kayma dayanımı parametreleri açılan sondajların sonuçları ve uluslararası alanda konvansiyel olarak kullanılan kaynaklarda benzer koşullar için yapılan değerlendirmelerin ışığında belirlenmiştir.

Heyelan malzemesinin rezidüel kayma dayanımı parametreleri, FHWA-IF-02-34, “Geotechnical Engineering Circular No. 5, Evaluation of Soil and Rock Properties” isimli rehberde yapılan değerlendirmeler esas alınarak belirlenmiştir.

İlgili referansta rezidüel kayma dayanımının aynı referansta yer alan ve aşağıda sunulan şekilde “4. bölüm (4th region)” ile belirlenen kısımla tanımlanan alanın dikkate alınması önerilmektedir. Kayma gerilmeleri – kayma birim deformasyonu ve kayma gerilmeleri – normal gerilme arasında drenajlı durum için sunulan eğrilerde “4. bölüm (4th region)” fosil heyelanlar, aktif heyelanlar, depremler ve benzeri zeminde büyük kayma birim deformasyonlarının oluşmasına neden olabilecek etkilerin sonrasında, zeminin rezidüel kayma dayanımının tariflendiği alanı temsil etmektedir.

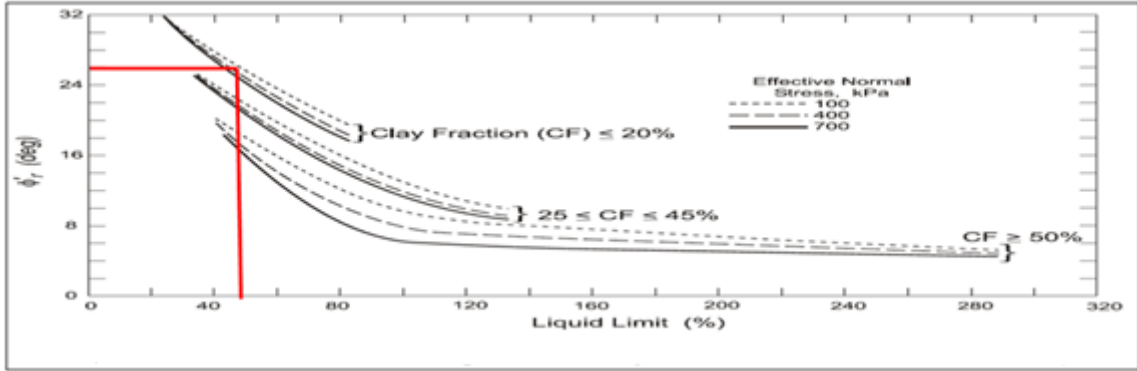


Şekil 3.3. Drenajlı durum gerilme – deformasyon ilişkisi

Yapılan stabilite analizlerinde, heyelan malzemesini oluşturan kil fraksiyonu $\leq 20\%$ ’den düşük ve likit limiti 50 olan rezidüel kohezyonlu ($CF \leq 20$ and $LL = 50$) ve rezidüel kohezyonsuz zeminlerin (Çok gevşek) kayma dayanımı parametreleri sondaj sonuçları da göz önüne alınarak aynı referansta yer alan Şekil 3.4’deki veriler kullanılarak belirlenmiştir.

Paketleme Durumu	Göreceli Yoğunluk (%)	Standart dalma direnci (darbe/300 mm)	Sürtünme açısı (°)
Çok gevşek	<20	<4	<30
Gevşek	20-40	4-10	30-35
Kompakt	40-60	10-30	35-40
Yoğun	60-80	30-50	40-45
Çok yoğun	>80	>50	>45

Şekil 3.4. Kohezyonsuz zemin rölatif sıklık ve içsel sürtünme açısı değerleri



Şekil 3.5. Kohezyonlu zeminler için rezidüel içsel sürtünme açısı

Geoteknik değerlendirmeler ışığında heyelan malzemesinin rezidüel kayma dayanımı parametreleri için heyelan malzemesinin içerdiği ince malzeme miktarı da göz önüne alınarak $c=5$ kPa kohezyon ve $\phi=26^\circ$ içsel sürtünme açısı değerleri güvenli tarafta kalınarak seçilmiştir.

Heyelan malzemesi doğal birim hacim ağırlığı ise “British Standards, BS 8002, Code of Practice for Earth Retaining Structures, 1994” isimli rehberde yer alan ve aşağı sunulan tablo esas alınarak $\gamma=17$ kN/m³ olarak belirlenmiştir. Zemin doğal birim hacim ağırlıkları Şekil 3.6’da, rezidüel zemin parametreleri Şekil 3.7’de verilmiştir.

MATARYAL TİPİ	KURU(kN/m ³)		DOYMUŞ (kN/m ³)	
	GEVŞEK	SIK	GEVŞEK	SIK
Çakıl	16	18	20	21
İyi Harmanlanmış kum ve kil	19	21	21.5	23
Kaba veya orta kum	16.5	18.5	20	21.5
İyi harmanlanmış kum	18	21	20.5	22.5
İnce kum	17	19	20	21.5
Kaya dolgusu ve taş ocağı atıkları	15	17.5	19.5	21
Sıkı tuğla	13	17.5	16.5	19
Geyik dolgusu	12	15	18	20

Kül dolgusu	6.5	10	13	15
Üst toprak	16	19	20	21
Nehir çamuru	14.5	17.5	19	20
Silt	18			18
Çok yumuşak kil	16			16
Yumuşak kil	17			17
Kil	18			18
Sert kil	19			19
Çok sert kil	20.0-21.0			20.0-21.0

Şekil 3.6. Zemin doğal birim hacim ağırlıkları

Rezidüel Zemin Malzeme Parametreleri		
$c_{res}(kPa)$	$\phi_{res}(^{\circ})$	$\gamma (kN/m^3)$
5	26	17

Şekil 3.7. Rezidüel zemin parametreleri

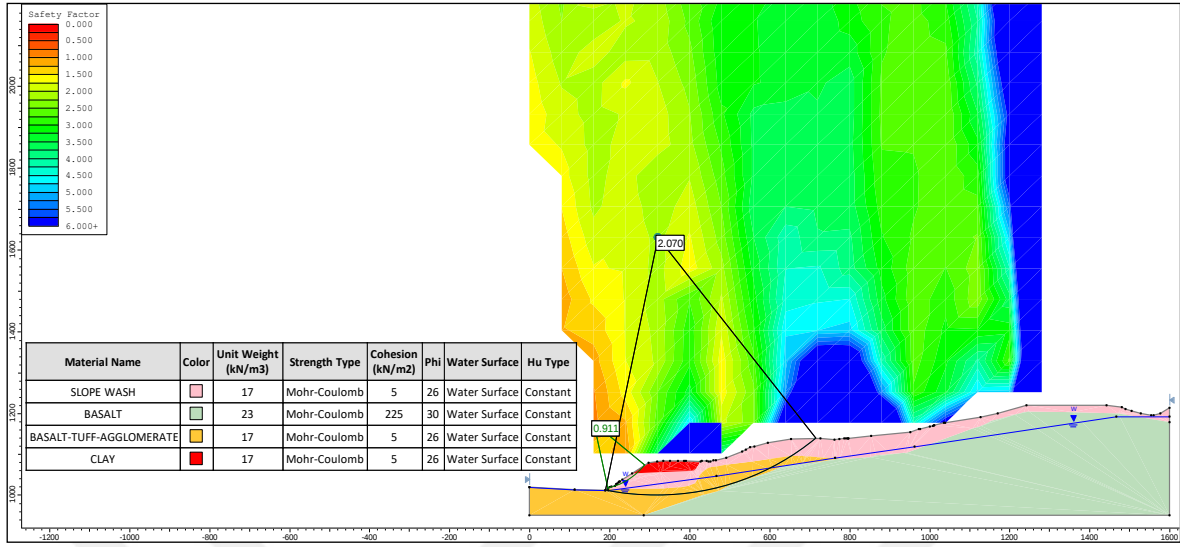
Çalışmanın bu bölümünde yapılan jeolojik ve geoteknik değerlendirmeler, hazırlanan idealize jeolojik profiller ve analizlerde kullanılan zemin tabakalarına ait kayma dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde; Temelsu tarafından önerilen araştırma programına uygun olarak işveren tarafından ve denetiminde yapılan jeolojik - jeofizik araştırmalar (sondajlara ait karot resimleri ve sondaj logları, inklinometre ölçümleri, kontrol noktaları yüzey okumaları) esas alınmıştır.

Bununla birlikte tezin ilgili bölümlerinde anlatıldığı üzere heyelan alanındaki jeolojik birimler, bölgesel ölçekli tektonik devinimler nedeni ile çok karmaşık bir yapı sunduğundan; yapım sırasında idealize edilen jeolojik profillerden farklı birimlerle karşılaşılması durumunda; gerçekleştirilen analizler revize edilecektir.

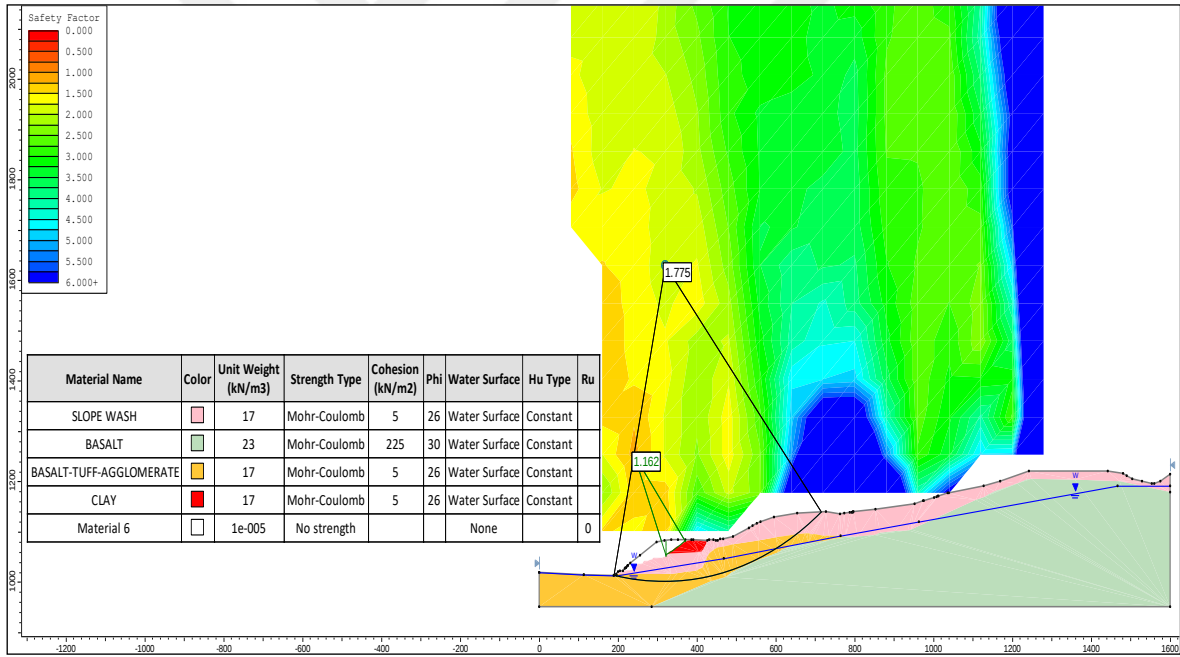
3.3. Stabilité Analizleri

Kritik kesitlerin stabilité analizleri fosil heyelan alanı için belirlenen rezidüel malzeme parametreleri esas alınarak limit denge yöntemi ile SLIDE paket bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır.

Kesit 4 – 4, Limit Denge Yöntemi

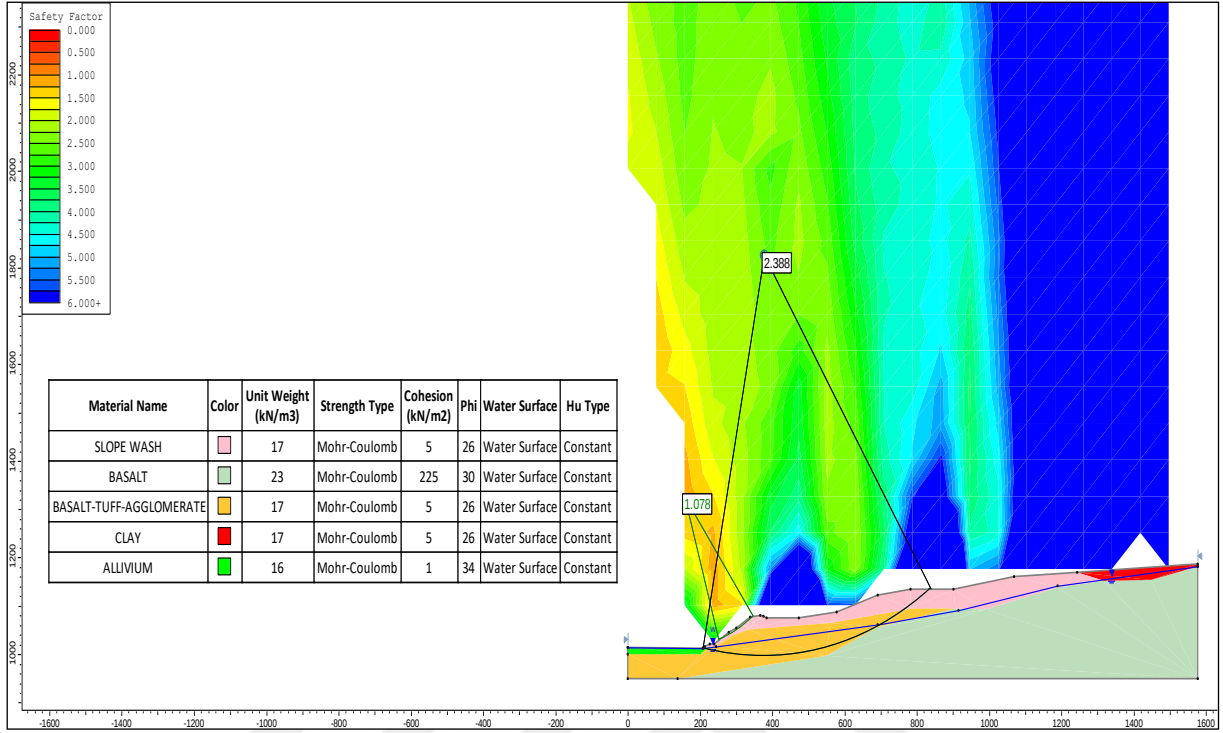


Şekil 3.8. Yapılan sınırlı miktardaki kazıların öncesi durumu

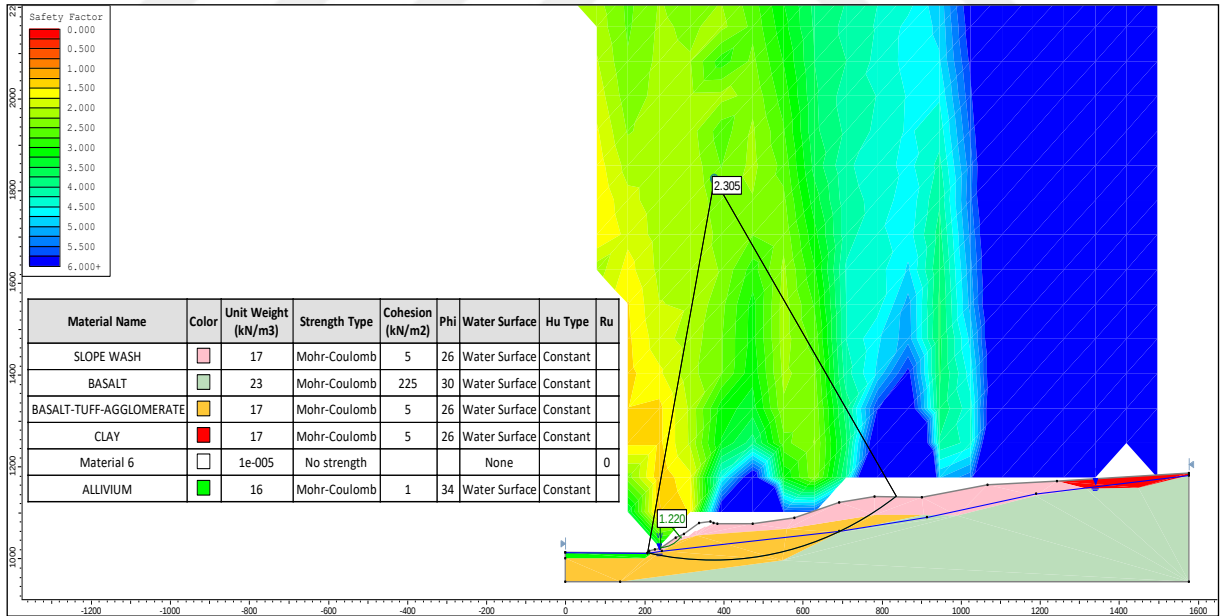


Şekil 3.9. Yapılan sınırlı miktardaki kazıların sonrası durumu

Kesit 3 – 3, Limit Denge Yöntemi



Şekil 3.10. Yapılan sınırlı miktardaki kazıların öncesi durumu



Şekil 3.11. Yapılan sınırlı miktardaki kazıların sonrası durumu

3.4. Analiz Sonuçları

İdealize zemin profilleri ve yapılan analizler için hazırlanan modeller oldukça sınırlı bir alanda yapılan en büyük kazı hacmini ve en büyük heyelan malzemesi kalınlığını teşkil eden kritik kesitler için hazırlanmış ve böylelikle güvenli tarafta kalınarak oluşabilecek en olumsuz koşullar için analizler yapılmıştır. Tariflenen sınırlı alan ve hacimdeki kazıların şev oranının arazi doğal eğiminden daha yatık olduğunu açık olarak göstermektedir.

Baraj sol sahilinde sınırlı alanda ve hacimde yapılan kazıların, fosil heyelana olan etkileri limit denge yöntemi ve yapım aşamalarının da modellenebildiği SLIDE paket bilgisayar programları kullanılarak yapılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre aktif heyelan oluşmadan önce sınırlı alanda ve mevcut arazi eğiminden daha yatık olarak yapılan kazıların sonrasında, toptan şev göçmesine karşı elde edilmesi istenen güvenlik sayısı $F.S > 1.50$, Kesit 3-3 ve Kesit 4-4 için net olarak sağlanmaktadır.

Kazıların öncesinde ve sonrasında kazı şevlerinde lokal ve toptan göçmelere karşı elde edilen güvenlik sayıları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 3.1. Edilen güvenlik sayıları

Kazı Şevi Kaymaya Karşı Lokal ve Toplam Göçme Güvenlik Sayıları	Kesit 3-3		Kesit 4-4	
	Limit Denge Yöntemi		Limit Denge Yöntemi	
	Kazı Öncesi	Kazı Sonrası	Kazı Öncesi	Kazı Sonrası
Lokal	1.07	1.22	0.91	1.16
Toplam	2.38	2.30	2.07	1.77

Analiz sonuçlarına göre heyelan hacmi ve alanına göre oldukça küçük bir alan ve hacimde yapılan kazıların etki bölgesinin kazılan şevlerin etrafında oldukça sınırlı ve küçük bir bölgede kaldığı açık olarak anlaşılmaktadır.

Yukarıda sunulan tabloda yer alan ve kaymaya karşı lokal güvenlik sayısı F.S. değeri, “1’e” oldukça yakın ancak küçük olan kesimler yüzeysel lokal yenilme zonlarını göstermektedir.

Bununla birlikte, mevcut arazi eğiminden daha yatık olarak yapılan kazılar neticesinde kazı şevleri bölgesindeki kaymaya karşı lokal güvenlik sayıları değerlerinde artış olduğu hesaplanmaktadır.

Yukarıda detaylı olarak açıklanan analiz sonuçları ve yapılan geoteknik – jeoteknik değerlendirmeler ışığında, sınırlı alanda ve hacimde yapılan baraj kazılarının fosil heyelanın aktif hale gelmesinde herhangi bir tetikleyici etkisi olmadığı net olarak anlaşılmaktadır.



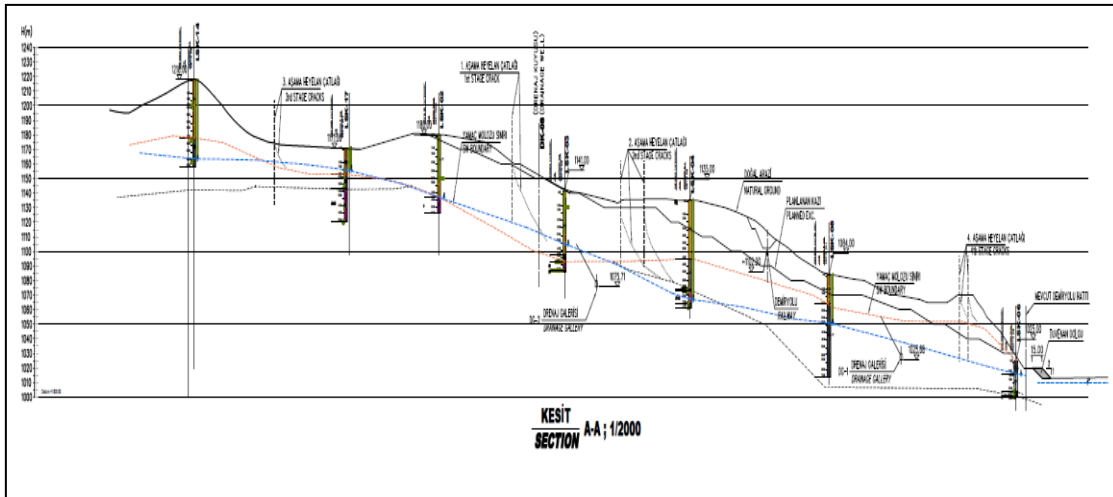
4. GERİ ANALİZLER VE REZİDÜEL ZEMİN PARAMETRELERİ

Yapılan stabilite analizlerinde, jeolojik ve geoteknik değerlendirmeler ışığında yamaç döküntüsü ve basalt – tuf – aglomera (BTA) karmaşığı rezidüel heyelan malzemesi olarak kabul edilmiştir. Rezidüel zemin kayma dayanımı parametreleri uluslararası olarak kabul gören konvansiyonel bir yaklaşımla,

- ❖ Heyelan kütlesi içerisinde önerilen ve açılan sondajlar sonuçları,
- ❖ Sondaj sonuçları esas alınarak hazırlanan jeolojik profiller,
- ❖ Presiyometre deneyi sonuçları,
- ❖ İnklinometre ölçümleri ile belirlenen hareket miktarları düzlemleri,
- ❖ Sahada belirlenen ölçüm noktalarında yapılan yüzey deplasmanı okumaları
- ❖ Saha gözlemleri ile belirlenen çatlak yerleri ve ölçümlerle izlenen çatlak açıklıkları,
- ❖ Jeofizik çalışmalar ile belirlenen jeolojik tabaka sınırları,

Esas alınarak yapılan jeolojik – geoteknik değerlendirmeler ışığında belirlenen olası toptan göçme yüzeyinden (slip surface) geçen ve toptan göçmeye karşı F.S.= 1 güvenlik sayısını veren kayma dairesi için yapılan geri analizler ile belirlenmiştir.

Gerçekleşen heyelan sonucunda ivedilikle önerilen ve yukarıda özetlenen ek araştırma programı kapsamında izlenen deplasmanların yönü ile miktarı değerlendirilerek ve takvimle değişimi esas alınarak belirlenen en kritik kesit üzerinde geri analizler yapılarak, olası kayma düzlemi ve zemin tabakalarının rezidüel kayma dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Geri analizi yapılan kritik heyelan kesiti ve idealize jeolojik profili Şekil 4.0’da sunulmuştur.



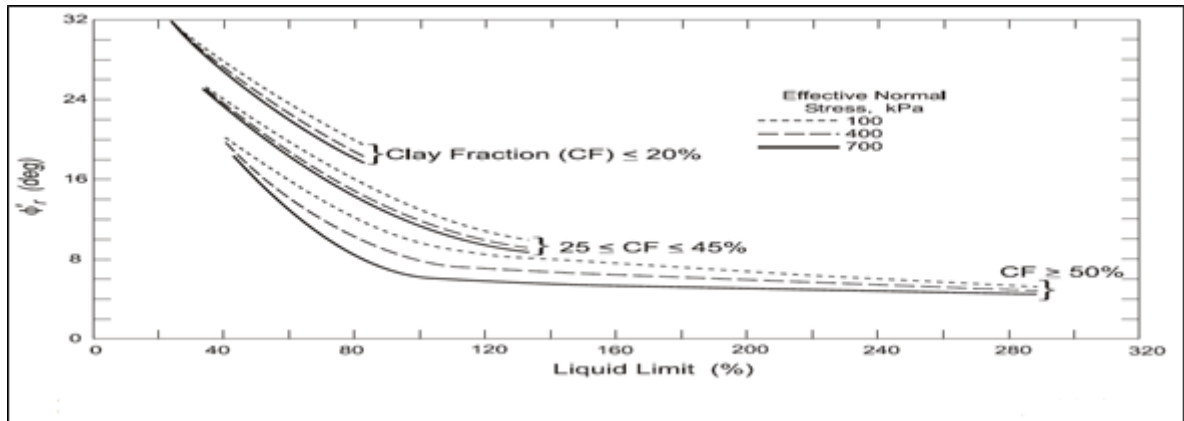
Şekil 4.1. Geri analizi yapılan kritik heyelan kesiti ve idealize jeolojik profili

4.1. Malzeme Parametreleri

Yapılan geri analizlerde heyelan malzemesini teşkil eden yamaç molozu ve bazalt – tuf – aglomera (BTA) karmaşığının rezidüel kayma dayanımı parametreleri, FHWA-IF-02-34, “Geotechnical Engineering Circular NO. 5, Evaluation of Soil and Rock Properties” kılavuz rehberi esas alınarak belirlenmiştir.

İlgili referansta drenajlı durumda yükleme durumuna bağlı olarak, zeminde oluşan gerilme artışına bağlı olarak, zemin kayma dayanımı ve kayma birim deformasyonu eğrisi aşağıda sunulduğu üzere gösterilmektedir. Aynı referansın ilgili bölümlerinde, heyelan vb. etkiler ile özellikle büyük kayma birim deformasyonları oluşan zeminlerde nihai dayanımın aşıldığı durumlarda, kayma dayanımının (4) nolu bölge ile gösterilen kesimde yer aldığı belirtilmektedir.

Yapılan saha jeolojik araştırmaları sonucunda heyelan malzemesinin kil, kum, çakıl, blok içeren kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminleri içeren karmaşık bir yapıda bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu kapsamda, yapılacak geri analizlerde gerek kohezyonlu kil ($CF \leq 20$ ve $LL=50$) gerek de kohezyonsuz kum ve çakıl (gevşek) zeminler için belirtilen referansta yer alan aşağıda sunulan eğri ve tablolarda belirtilen rezidüel kayma dayanımı parametrelerinin alınması uygun bulunmuştur.



Şekil 4.2. Kohezyonlu – Kohezyonsuz Zeminler İçin Rezidüel Kayma Dayanımı Parametreleri

Belirtilen yaklaşım ile heyelan malzemesinin teşkil eden yamaç döküntüsü ve basalt – tuf – aglomera (BTA) karmaşığı için rezidüel için drenajlı durumda kayma dayanımı

parametreleri güvenli tarafta alınarak $c = 5$ kPa kohezyon ve $\phi = 26^\circ$ içsel sürtünme açısı olarak belirlenmiştir.

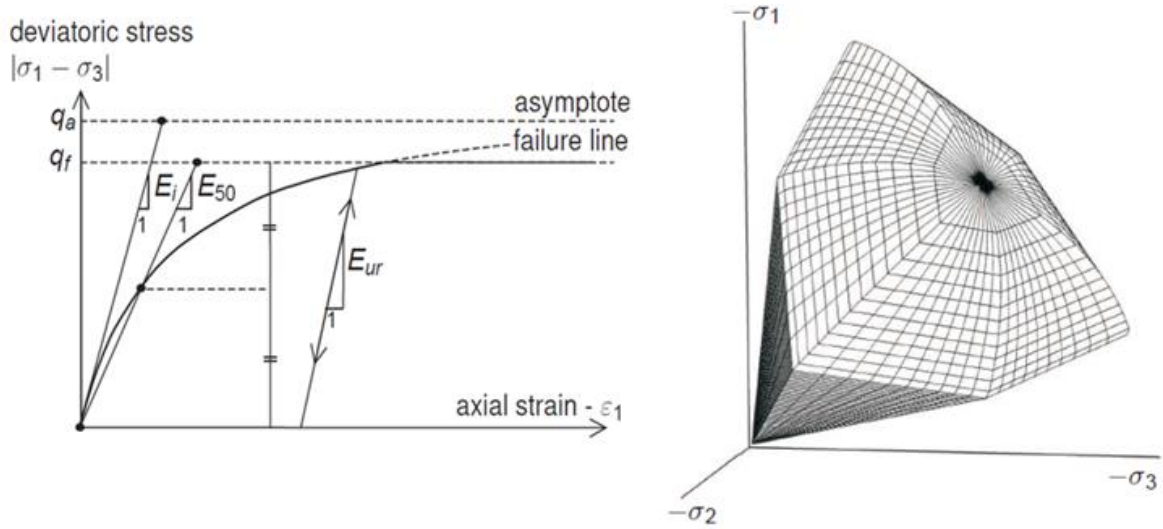
Dolgu malzemesi ve kil zemin tabakaları için doğal birim hacim ağırlık değeri ise aşağıda British Standard, BS 8002, Code of Practice for Earth retaining Structures, 1994 tarafından verilen ve “Embedded Retaining Walls- Guidance for Economic Design, Ciria C580, 2003” te sunulan değerler esas alınarak belirlenmiştir.

Yapılan jeolojik ve jeoteknik değerlendirmeler, hazırlanan idealize jeolojik profiller ve analizlerde kullanılan zemin tabakalarına ait kayma dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde; tezin 2.7 Bölümü’nde detaylı olarak anlatılan ve Temelsu tarafından önerilen araştırma programına uygun olarak sahada işveren tarafından ve denetiminde yapılan jeolojik - jeofizik araştırmalar (sondajlar, inklinometre ölçümleri, kontrol noktaları yüzey okumaları) esas alınmıştır.

Bununla birlikte tezin 2.6 Bölümü’nde anlatıldığı üzere heyelan alanındaki jeolojik birimler, bölgesel ölçekli tektonik devinimler nedeni ile çok karmaşık bir yapı sunduğundan; yapım sırasında idealize edilen jeolojik profillerden farklı birimlerle karşılaşılması durumunda; gerçekleştirilen analizler revize edilecektir.

4.2. Malzeme Modeli

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde, aşağıda gösterildiği üzere kazı ve yükleme (unloading – reloading) durumlarında özellikle zemin deformasyon davranışının ve dolayısı ile dayanımının diğer malzeme modellerine göre daha etkin olarak modellenbildiği elastoplastik Hardening Soil Malzeme Modeli kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Hardening soil malzeme modeli gerilme – deformasyon ilişkisi

4.3. Zemin Bağıl Kayma Gerilmeleri (Soil Relative Shear Stresses)

Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda çıktı olarak kullanıcılara sunulan zemin bağıl kayma gerilmeleri (soil relative shear stresses) taramaları, model yapım aşamaları (construction stages) sonucunda zeminde mobilize olan kayma gerilmeleri ile programa girdi olarak girilen kayma dayanımı parametreleri esas alınarak hesaplanan maksimum zemin kayma dayanımının bağıl oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\tau_{rel} = \frac{\tau_{mob}}{\tau_{max}}$$

Teorik olarak bu oranın “1” olması durumunda zeminin o elemanında lokal bir yenilme olduğu anlaşılmaktadır.

4.4. Heyelan Aşamaları

Oluşan heyelanın aşamaları, hazırlanan sonlu elemanlar modelinde yapım aşamaları (construction stages) yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Bu kapsamda heyelan oluşturulan sonlu elemanlar modellerinde 3 ana aşamada modellenmiş ve aşağıda sunulmuştur.

Tablo 4.1. Sonlu elemanlar modeli yapım aşamaları

Aşamalar	Açıklamalar
1	Başlangıç Aşaması (Geri Analiz)
2	Heyelan Hareketi (Başlangıcı ile 1 Aylık Süreç)
3	Güvenlik Analizleri (c - Azaltımı Yöntemi)

4.5. Olası Kayma Düzlemleri ve Ara Yüz Elemanları

Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde, olası kayma düzlemleri ara yüz elemanları (interface elements) kullanılarak modellenmiştir. Ara yüzey veya bir başka deyişle olası kayma düzlemlerinin kayma dayanımları, Rinter ve Rinter,residuel katsayıları kullanılarak azaltılarak komşu zemin tabakaları kayma dayanımlarının (içsel sürtünme açısı ve kohezyon) bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

4.6. Tanımlı Deplasmanlar

Sahada yapılan yüzey okumaları ile inklinometre okumaları esas alındığında ilk heyelan çatlakları ve deplasmanlarının gözlemlenmesinin ardında devam eden hareketler günlük olarak ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre heyelanın oluşmasının ardından devam eden deplasmanlar dikkate alındığında yaklaşık 1.1 m toplam deplasmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda ölçülen bu deplasmanlar, oluşturulan sonlu elemanlar modelinde heyelanın kinematik etkisini yansıtmak amacı ile tanımlı deplasmanlar olarak (prescribed displacements) modelde farklı bir aşamada tanımlanmıştır.

4.7. Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan geri analizlerin sonucunda, zeminde oluşan zemin bağıl kayma gerilmeleri, plastik noktalar, toplam deplasman taramaları yapım aşamalarına göre sunulmuştur. Bununla birlikte c - ϕ azaltımı yöntemi kullanılarak hesaplanan güvenlik sayısı da sunulmuştur.

5. HEYELAN EDEN KÜTLE İÇİN ÖNERİLEN DÜZENLEME KAZILARI ve TASARIM KRİTERLERİ

Heyelanların stabilitesinin yeniden sağlanmasında konvansiyonel anlamda kabul gören yaklaşımlar genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- ❖ Heyelan eden kütlenin üstünden uygun şev oranları ile kazı yapılarak ve kayma düzlemi üzerinde harekete neden olan kütlenin azaltılması,
- ❖ Uygun kazı şevlerinin teşkil edilerek heyelanların etkisinin azaltılması ve yönlendirilerek kontrol altına alınması,
- ❖ Olası kayma düzlemi içerisindeki veya heyelan eden kütle içerisindeki askıdaki suyun (ponded water) yarattığı boşluk suyu basıncının uygun drenaj tedbirleri alınarak deşarjının sağlanması ve zemin kayma dayanımının artırılması,
- ❖ Genel olarak K.G.M. uygulamalarında yaygın olarak görülen sınırlı alandaki yüzeysel (sığ) heyelanlar için, heyelan topuğunun uygun yöntemler (rijit-esnek yapısal elemanlar veya topuk dolgusu (butress) ile desteklenerek stabilitenin artırılması.

Heyelanın batı bölgesinde, topukta rijit yapılar yaparak (örnek fore kazık) teşkil edilecek herhangi bir önlem heyelan eden kütlenin hacmi, heyelanın hareket halinde oluşu ve etki alanı göz önüne alındığında bu tür önlemlerin genel ölçekte oldukça küçük ve etkisiz kalacağı açıktır. Ayrıca topukta dolgu yapılarak heyelanın durdurulması seçeneği de irdelendiğinde heyelan eden kütlenin büyüklüğü de göz önüne alınarak heyelana karşı koyacak büyük bir dolgu yapılması gerekecektir. Bu durumda ise heyelanın topuk bölgesinden geçen mevcut demiryolu hattı dolgu altında kalacak ve büyük ölçekte yapılacak dolgu Murat Nehri'nin içerisine girerek nehri kapatacaktır. Bahsedilen olumsuzluklar değerlendirildiğinde topukta alınacak önlemlerin heyelan çözümü için uygun olmayacağı değerlendirilmiştir.

Önceki bölümlerinde özetlenen jeolojik ve geoteknik değerlendirmeler ışığında heyelan eden kütlenin boyutları dikkate alınarak alınarak, heyelan eden kütlelerin düzenlenmesinde konvansiyonel olarak benimsenen;

- ❖ Heyelan eden kütlenin tacından kazı ile kütle alınması ve kaydıran kuvvetlerin azaltılması,
- ❖ Teşkil edilen drenaj ağları ile heyelan kütlesi ve kayma düzleminde yer alan boşluk suyu basıncının deşarj edilmesi,

İşletmeye esas tasarım depremi (OBE) altında heyelan düzenleme kazısı ile teşkil edilen kanalın solunda kalan heyelan kütlelerinde oluşacak deplasmanların kanal içerisine yönlendirilebilir ve kontrol edilebilir sınırlar içerisinde kalması

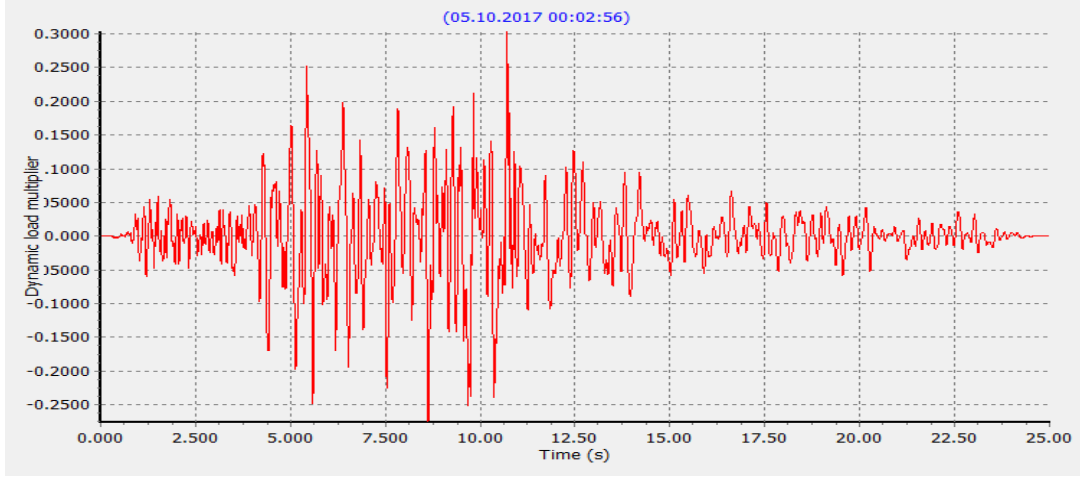
- ❖Olası kayma düzlemi içerisindeki veya heyelan eden kütle içerisindeki askıdaki suyun (ponded water) yarattığı boşluk suyu basıncının uygun drenaj tedbirleri alınarak deşarjının sağlanması ve zemin kayma dayanımının arttırılması prensipleri benimsenmiştir.

Bu kapsamda, aşağıda gösterilen kazı planı (Şekil 29) ile heyelan eden kütle içerisinde, oldukça geniş alanı kapsayan heyelan alanını kuzeybatı- güneydoğu yönünde iki parçaya ayıracak ve ayrılan heyelan kütleleri arasında taban genişliği 50 m olacak bir kanalın teşkil edilmesine olanak sağlayacak kazıların yapılması genel tasarım kriterlerine uygun bulunmuştur.

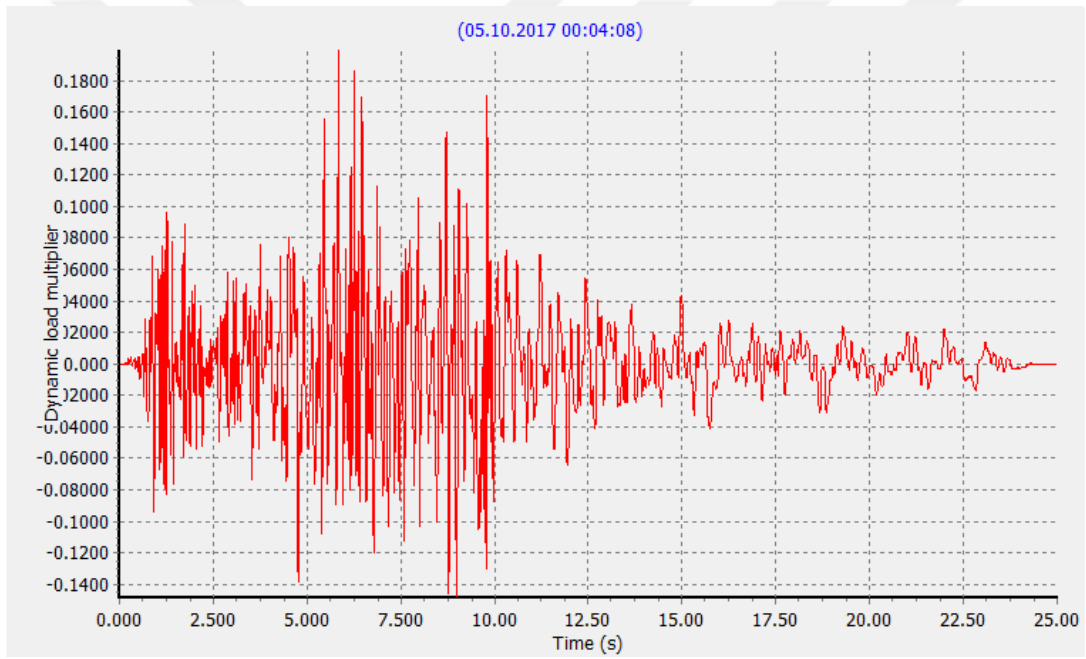
Planlanan bu kazılar ile nehir tarafında kalan ve baraj gövdesini etkileyen heyelan kütleleri çoğunluklu olarak temizlenmekte ve güneydoğu istikametinde kalan heyelan kütlelerinde de kütle alınarak bu kısımda heyelan eden kütlelerin kaydırma etkisi azaltılmakta ve meydana getirilen kanala yönlendirilmektedir. Böylelikle heyelan eden kütlelerin membaya doğru çevrilen baraj gövdesine etkisi ortadan kaldırılmaktadır.

Yapılan analizlerde, deprem durumu aşamasında baraj yeri için yapılan ve onaylı halde bulunan sahaya özel sismik tehlike analiz raporunda 100 yılda %50 aşılma olasılığı için OBE deprem durumunda belirlenen 0.21 g maksimum yatay yer ivmesi esas alınmıştır.

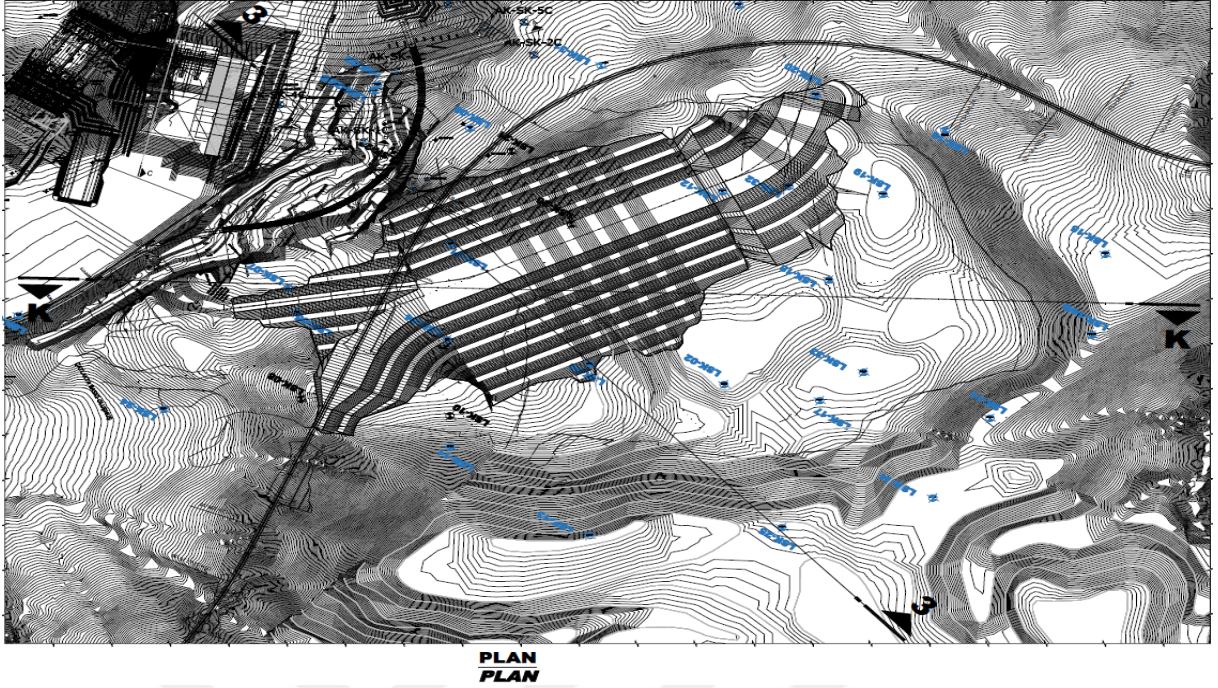
Belirtilen tepki spektrumuna (response spectrum) uygun Northridge deprem kaydı, hazırlanan sonlu elemanlar analizlerinde yer hareketi olarak tanımlanarak time – history analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları aşağıda sunulmuştur.



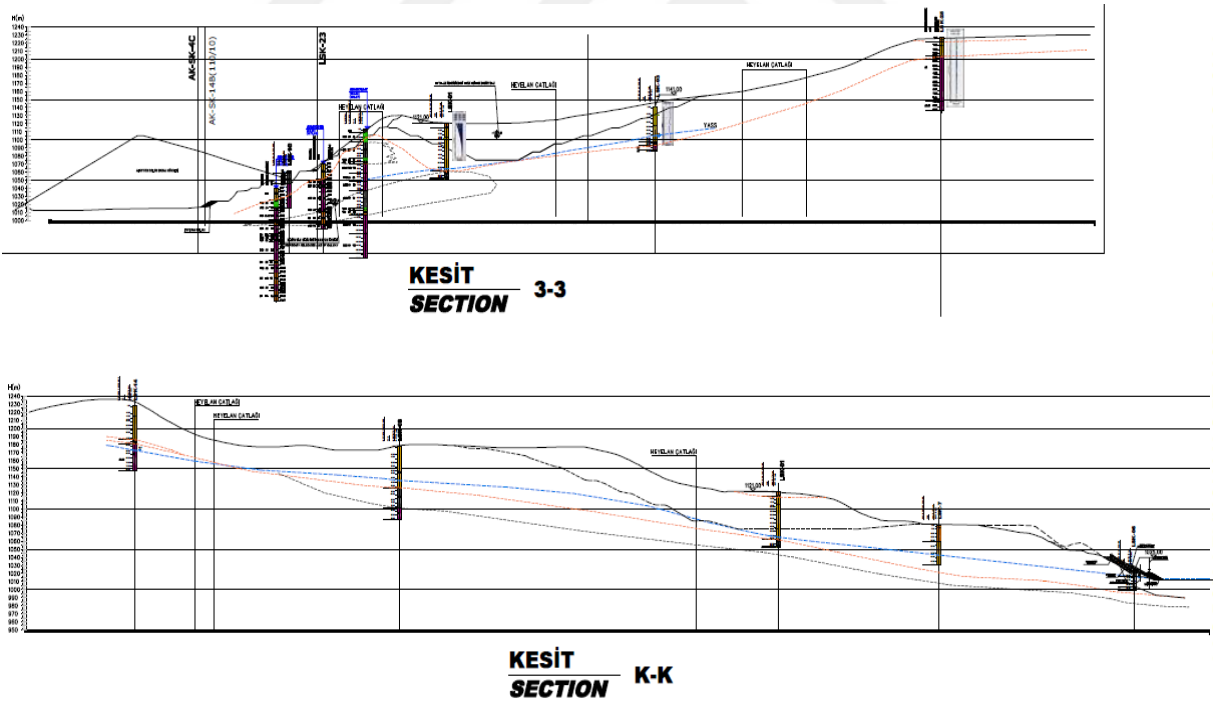
Şekil 5.1. Northridge depremi yatay ivme zaman grafiği



Şekil 5.2. Northridge depremi düşey ivme zaman grafiği



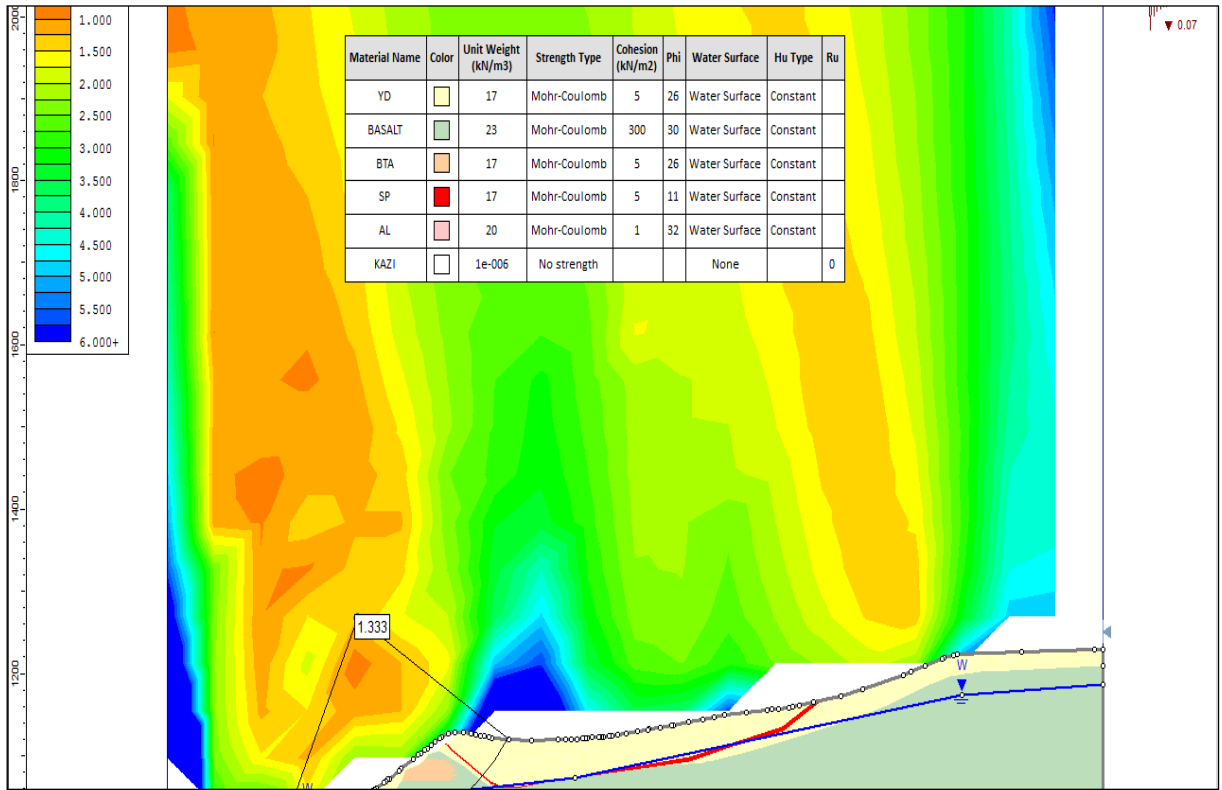
Şekil 5.3. Önerilen heyelan düzenleme kazıları ve analiz kesitleri



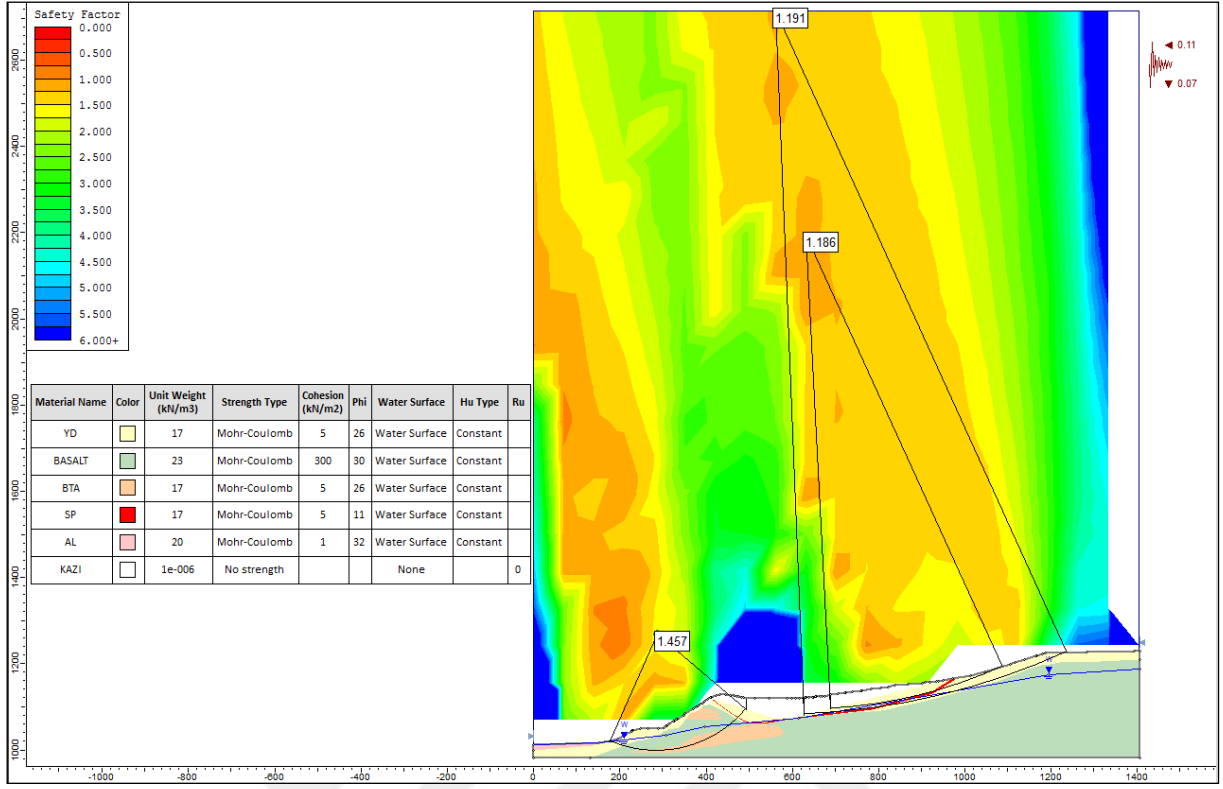
Şekil 5.4. Analiz kesitleri

Önerilen kazılar için kanal yukarısında yer alan kazı şevleri güneydoğu istikametinde ilk şev 2H/1V ve sonrası 3H/1V , kanal aşağısında kuzeybatı kısmında ise 2H/1V olacak şekilde yapılacaktır.

Aşağıda sunulan analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak, aynı model içerisinde aşamalı olarak modellenen başlangıç durumu heyelan eden kütle ve önerilen heyelan düzenleme kazıları sonucunda hesaplanan zemin bağıl kayma gerilmeleri (soil relative shear stresses), plastik noktalar, toplam deplasman taramaları yapım aşamalarına göre sunulmuştur.



Şekil 5.5. Önerilen kazı öncesi deprem (Obe) durumu



Şekil 5.6. Önerilen kazı sonrası deprem (Obe) durumu

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geri analiz ve önerilen düzenleme kazıları için hazırlanan analiz modelleri, ilave jeolojik ve jeofizik saha araştırmaları, saha gözlemleri, kontrol noktalarında yapılan yüzey ve inklinometre okumalarına uygun olarak teşkil edilmiştir.

Analizler limit denge yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Limit denge yöntemi kullanılarak yapılan stabilite analizlerinde SLIDE 2D paket bilgisayar yazılımı kullanılmıştır.

Geri analizler ile olası kayma düzlemlerindeki rezidüel kayma dayanımı parametreleri belirlenmiştir.

Önerilen düzenleme kazıları için en kritik kazı kesitini teşkil eden, heyelanın hareket yönünde en fazla heyelan kütlelerinin yer aldığı K-K ve baraj ekseninden geçen 3-3 kesitlerinde yapılan analiz sonuçlarına göre, her iki kesitte de düzenleme kazıları öncesinde zeminde oluşan bağıl kayma gerilmelerinin (relative shear stresses) önerilen kazılar ile birlikte rahatladığı ve lokal yenilme zonlarının azaldığı görülmüştür.

Bununla birlikte en kritik yükleme durumunu teşkil eden OBE depremi durumunda K-K kesitinde limit denge yöntemi kullanılarak SLIDE program ile yapılan analizlerde 2Y/1D şev oranı ile heyelan düzenleme kazılarının yapılması durumunda olası kayma düzleminde geçen kayma dairesinin toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı $F.S.=1.041$ olarak hesaplanırken, 3Y/1D şev oranı ile kazıların yapılması durumunda olası kayma düzleminde geçen aynı dairenin toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı $F.S.=1.349 > 1.1$ olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle heyelan düzenleme kazılarının 3Y/1D şev oranı ile teşkil edilmesi uygun bulunmuştur.

Baraj ekseninden geçen 3-3 kesitinde limit denge yöntemi kullanılarak SLIDE program ile yapılan analizlerde düzenleme kazısı öncesinde, mevcut baraj ekseninin sol sahili için toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı $F.S.=1.333$ olarak elde edilmiştir. Önerilen heyelan düzenleme kazılarının ardından aynı dairenin toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı $F.S.=1.457 > 1.1$ olarak hesaplanmaktadır. Önerilen heyelan düzenleme kazıları ile baraj sol sahilinde toptan göçmeye karşı güvenlik sayısında artış olduğu görülmektedir. Ayrıca heyelan düzenleme kazısı sonrasında, K-K kesiti analiz sonuçlarında gösterilerek belirlenen 3Y/1D şev oranı ile kazılan kanalın sol şevlerinde toptan göçmeye karşı güvenlik sayıları $F.S.=1.18 - 1.19 > 1.1$ olarak hesaplanmaktadır.

Sahada heyelan bölgesinde yapılan yüzey deplasmanı ölçümleri, K-K ve 3-3 kesitlerinde yapılan analizler için hazırlanan modellerde göz önüne alınmıştır.

Düzenleme kazılarının ardından statik ve deprem durumunda hesaplanan toplam deplasman değerleri de tez içerisinde ilgili bölümlerde sunulmuştur.

Tezin önceki bölümlerinde özetlenen ve tariflenen tasarım kriterlerine göre, önerilen kazılar ile toptan stabilitenin arttığı ve zemin içerisindeki lokal yenilme zonları ile bağlı kayma gerilmelerinin rahatladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bununla birlikte, olası kayma düzleminde yer alan boşluk suyu basıncının aşırı artışını önlemek için detayları sunulan ilgili çizimlerde gösterilen heyelan tacında yer alan kafa hendeklerinin ve heyelan kütlesi içerisindeki drenaj sisteminin teşkil edilmesi önem taşımaktadır.

Hazırlanan heyelan düzenleme kazısı ve drenaj projeleri ile heyelan kütlelerinin baraj gövdesinden hareket yönü olarak uzaklaştırılması ve membaya döndürülecek baraj gövdesi sol sahili güvenlik altına alınarak baraj inşaatına devam edilebilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla birlikte, baraj aksı sol sahilde jeolojik – jeofizik araştırmaların sonuçları ve sağ sahilde yapımı devam eden (derivasyon tünelleri, enerji su alma yapıları, santral binası, cebri borular, çıkış kondüvileri vb.) imalatlar da göz önünde bulundurularak barajın sağ sahilinde eksen sabit tutularak, sol sahilde eksen membaya doğru kaydırılacaktır. Ayrıca barajın nihai tasarımı sonrasında sol sahilde oluşacak kesitler için önerilen heyelan önleme kazılarına ilave olarak baraj gövde kazıları (temel / açık kazılar) için ilave analizler yapılarak ek bir çalışma ile sunulabilir.

Proje tamamlandığı zaman teşkil edilen kanal ile kütle olarak ikiye bölünen heyelanın, zaman içerisinde statik koşullarda dengeye ulaşacağı öngörülmektedir. Bu süreç içerisinde olabilecek lokal duraysızlıklar ve dökülmeler teşkil edilen kanal içerisinde kontrol edilebilecektir. Kanal içerisinde lokal duraysızlıklar sonucunda birikecek döküntü malzemeler temizlenmelidir.

Ancak, zaman içerisinde olabilecek depremler, aşırı yağmurlar, biriken karın erimesi ile oluşabilecek yeraltı suyu hareketleri, aşırı titreşime neden olabilecek patlatma ve benzeri doğal ve/veya yapay nedenler ile özellikle heyelan düzenleme kazısı ile teşkil edilen kanalın solunda kalan heyelan kütlelerinde, membaya kaydırılan baraj eksenini etkileyebilecek ve Murat Nehrine ulaşabilecek büyük bir toptan göçme hareketi beklenmemekle birlikte, lokal hareketler ve duraysızlıklar oluşabilir. Bu lokal duraysızlıklardan dolayı meydana gelebilecek zemin hareketleri, tasarlanan kanalın içerisine doğru olacak ve yapılacak şev

düzenleme kazıları ile temizlenecektir. Dolayısıyla söz konusu lokal hareketler barajın sol sahilinde nehir seviyesinden geçen bir toptan göçme yaratmayacağından kanalın sağ tarafında kalan membaya doğru kaydırılan baraj gövdesi üzerinde herhangi bir etki yapmayacağı görülmektedir.



7. KAYNAKLAR

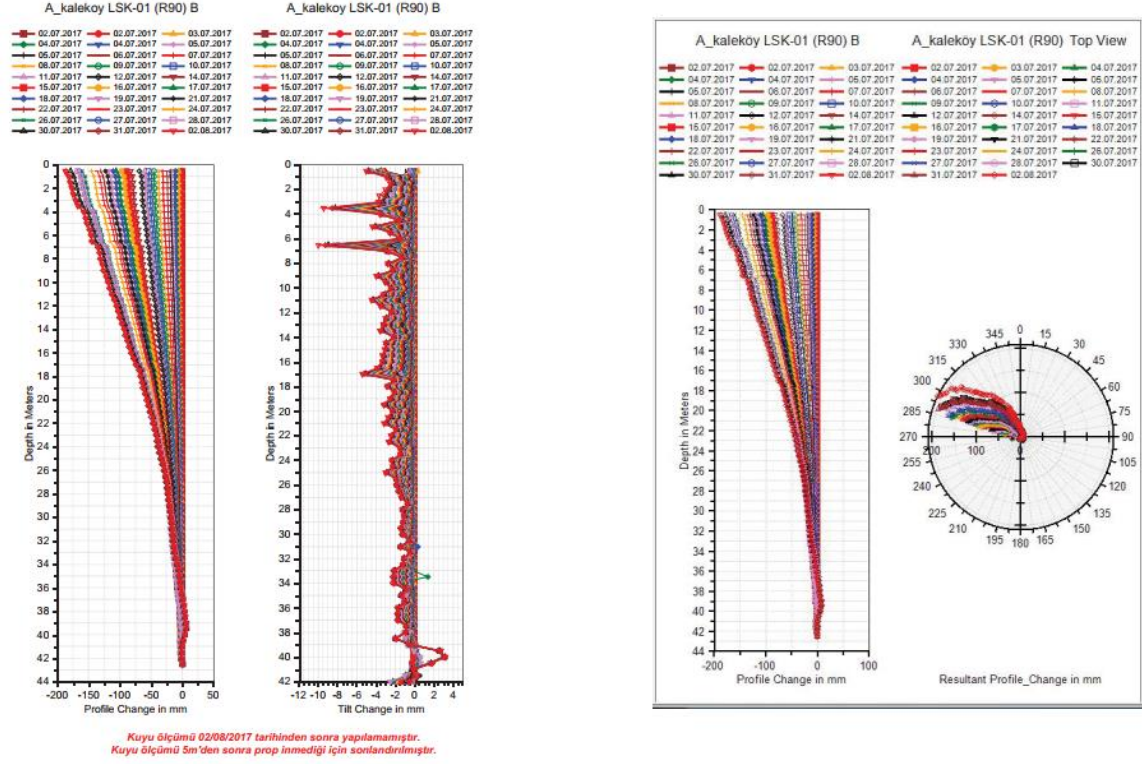
- Akdoğan, N., Burçak, M., Yıldırım, T.,** 2002. Orta Anadolu Hasandağı volkanizması kuzeyinin jeoloji, jeofizik verilerin korelasyonu ile jeotermal olanaklarına yeni bir bakı. *Orta Anadolu Jeotermal Enerji ve Çevre Sempozyumu, Aksaray, Bildiriler Kitabı*, (1), 45-57.
- Al Garni, H. Z. Awasthi, A.,** 2017. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia, *Applied Energy*, 206, 1225-1240.
- Anaçali, İ., Şirin, A.,** 2015. Heyelan tanımlama ve veri oluşturma kılavuzu. TC Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Jeolojik Hizmetler Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 42.
- Aydın, S., Özer M.,** 2023. Heyelan Meydana Gelmiş Bir Parkta Göçme Mekanizmasının Araştırılması ve Heyelan Önleme Tedbirleri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(1), 319-341.
- Aytekin, M.,** 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, 624-625, Ankara.
- Biricik İ., Karakaş A.,** 2019. Derinde meydana gelen bir heyelanın önleminde kullanılan baret kazık yöntemi uygulaması, *Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu*, Bildiriler Kitabı, 203-210.
- Coduto, D. P.,** 2006. Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar, Gazi Kitabevi, Ankara.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J.,** 1996. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3- Landslide types and processes. *Transportation research board special report*, (247).
- Çavumirza, L.,** 2018. Şev stabilitesi analizi ve Kartepe-Uzuntarla (Kocaeli) örneği, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi , Kocaeli, 90 s.
- Das, S.,** 2020. Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20s.
- Doğruyol, M.,** 2020. Bingöl İli Deprem Risk Analizi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13(2), 568-579.
- Erguvanlı, K.,** 1994. Mühendislik Jeolojisi, 4, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Fawaz, A., Farah, E., Hagechegade, F.,** 2014. Slope stability analysis using numerical modelling. *American Journal of Civil Engineering*, 2(3), 60-67.

- Gurpersaud, N., Vanapalli, S. K., Sivathayalan, S.** (2011, October). *Pull-out capacity of soil nails in unsaturated soils*. In 64th Canadian Geotechnical Conference and 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (pp. 218-225).
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L.** 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167-194.
- Lentswe, G.B., Molwalefhe, L.,** 2020. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100674.
- McCharty, D.F.,** 2010. Zemin Mekanikinin Esasları ve Temelleri Temel Geoteknik, OYTEV Yayınevi, İstanbul, 850s.
- Mital, M., Del Giudice, M., Papa, A.,** 2018. comparing supply chain risks for multiple product categories with cognitive mapping and analytic hierarchy process, *Technological Forecasting and Social Change*, 131, 159-170.
- Myronidis, D., Papageorgiou, C., Theophanous, S.,** 2016. Landslide susceptibility mapping based on landslide history and analytic hierarchy process (AHP), *Natural Hazards*, 81 (1), 245-263.
- Neves M., Cavaleiro V., Pinto A.,** 2016. Slope Stability Assessment and Evaluation of Remedial Measures Using Limit Equilibrium and Finite Element Approaches, *Procedia engineering*, Braga, 143,717-725.
- Öz, D.,** 2009. Avcılar heyelan bölgesindeki deformasyonların kinematik modellerle araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 82s.
- Panahi, M., Rezaie, F. Meshkani, S. A.,** 2013. Seismic vulnerability assessment of school buildings in Tehran city based on AHP and GIS, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 1, 4511-4538.
- Panchal, S. Shrivastava, A. K.,** 2022. Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India, *Ain Shams Engineering Journal*, 13 (3), 101626.
- Poşluk, E., Dalğıç, S., Kuşku, İ., Poşluk, E. A.** 2018. Heyelan ıslahında gereken dayanma kuvvetinin limit denge yöntemi ile belirlenmesi. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 27.2: 77-88.
- Sönmez, M.,** 2011. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı deprem hasar riski analizi: Zeytinburnu (İstanbul) örneği, *Türk Coğrafya Dergisi*, (56), 11-22.
- Taner, G.,** 2001. Denizli bölgesi Neojenine ait katların stratigrafik konumlarında yeni düzenleme, 54. *Jeoloji Kurultayı*, 54-79

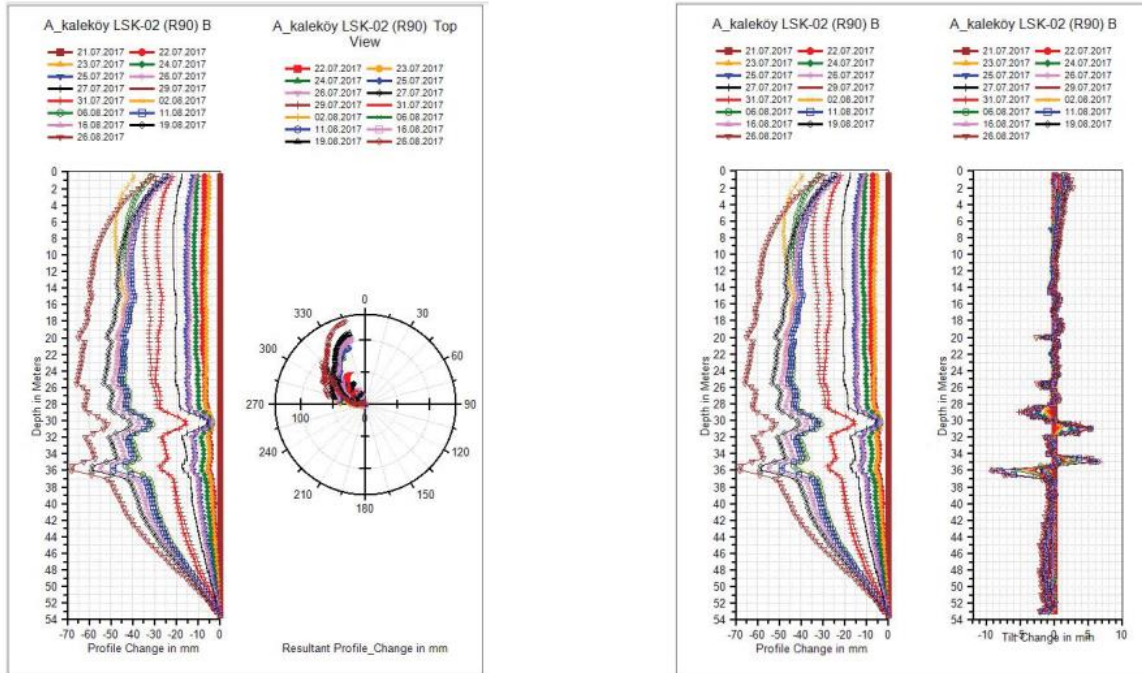
- Tarhan, F.**, 2002. Mühendislik Jeolojisi Prensipleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları, Trabzon. 267s.
- Tekin, A.**, 2011. Sonlu Elemanlar ve Limit Denge Yöntemleri ile Şev Stabilite Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul. 154s.
- Uluyol, Ç., Pehlivan, K.**, 2019. Stem ve Eğitimde Uygulama Örneklerinin İncelenmesi, *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 23(3), 848-861.
- Ünsal, N.**, 2010. Heyelan ve Kitle Hareketleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Ders Notları, Ankara.
- Varnes, D. J.**, 1978. Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- Yasser, M., Jahangir, K. Mohmmad, A.**, 2013. Earth dam site selection using the analytic hierarchy process (AHP): a case study in the west of Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 6 (9), 3417-3426.
- Yıldız, F. E., Unsal, N., Gurer, I., Turkileri, S.**, 2011. *Hydrogeochemical Characteristics of Develi Closed Basin (Kayseri-Turkey)*. *AQUA mundi: Am04032*, 103-116.
- URL-1**, 2013. https://eskibursa.imo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=5217&tipi=2&sube=7 bitmeyen yol Mezitler’de çin seddi gibi duvarlar. 15 Haziran 2024.
- URL-2**, 2021. <https://www.civilclick.com/cofferdam/> cofferdam its 6 types and construction sequence. 15 Haziran 2024.
- URL-3**, 2022. <https://skyciv.com/docs/tutorials/foundation-design-tutorials/designing-single-pile-foundation/> a brief guide on pile foundation design. 18 Haziran 2024.
- URL-4**, 2018. <https://www.britannica.com/place/Turkey> | *Location, Geography, People, Economy, Culture, and History* 12 Haziran 2024.

EKLER

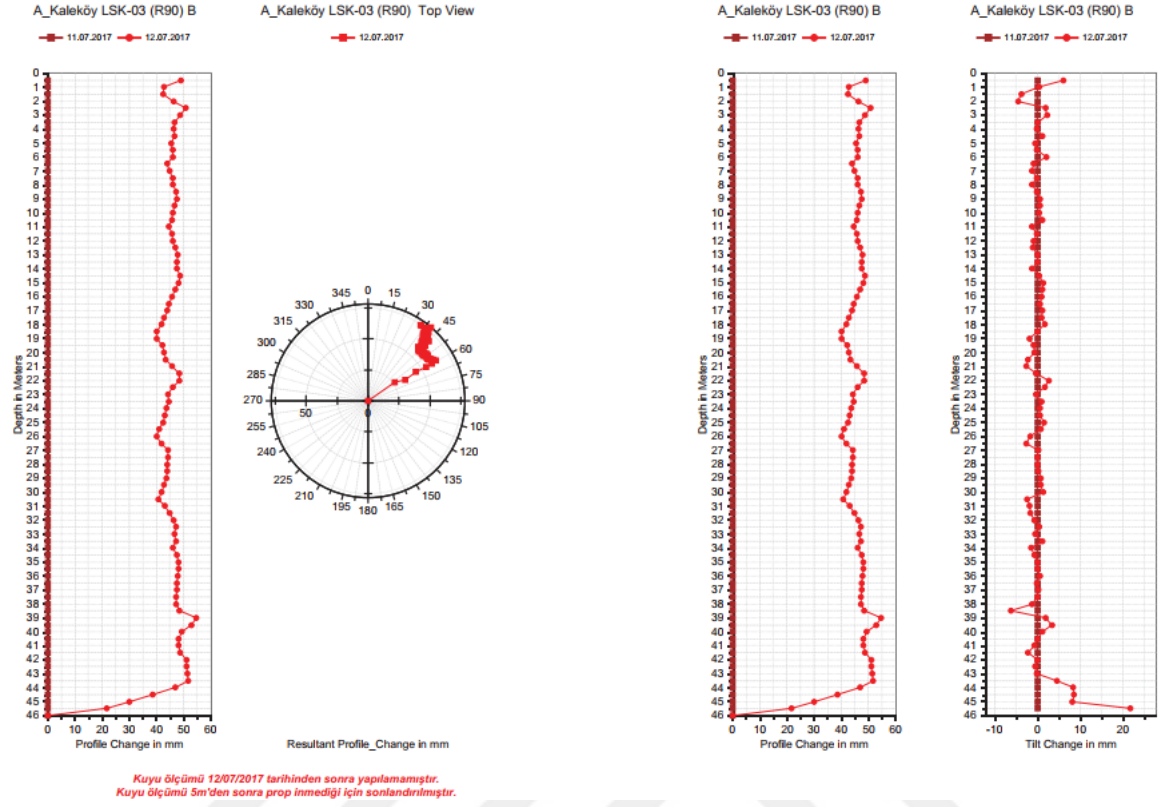
Ek Şekil 1.



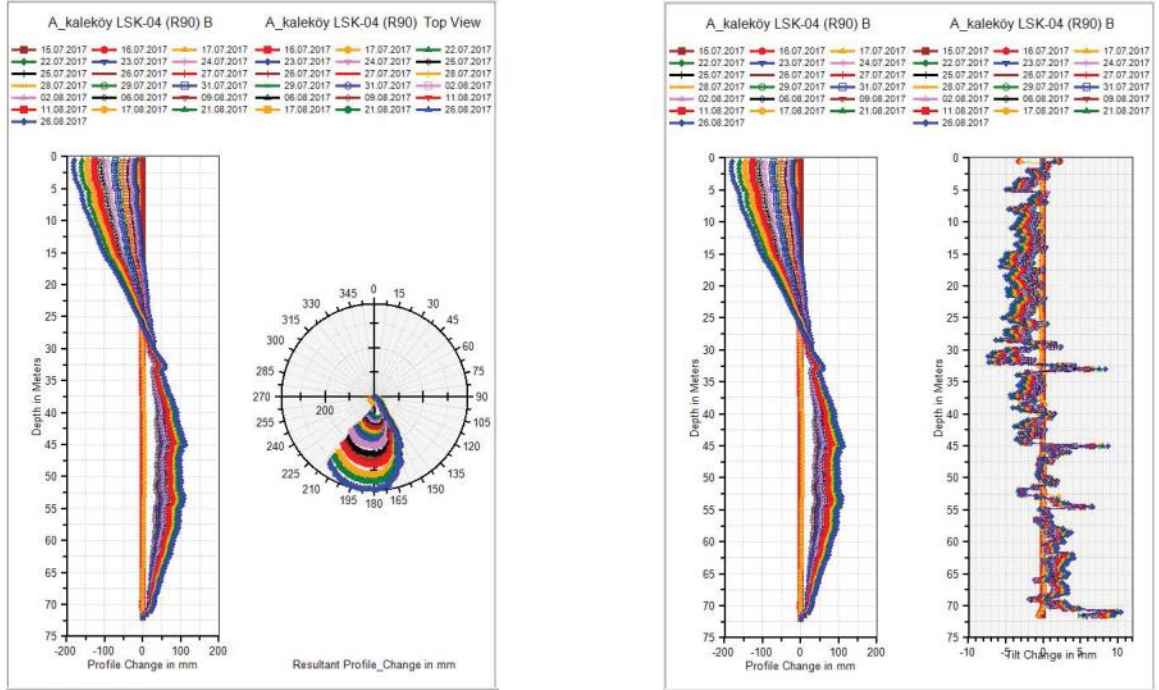
Ek Şekil 2.



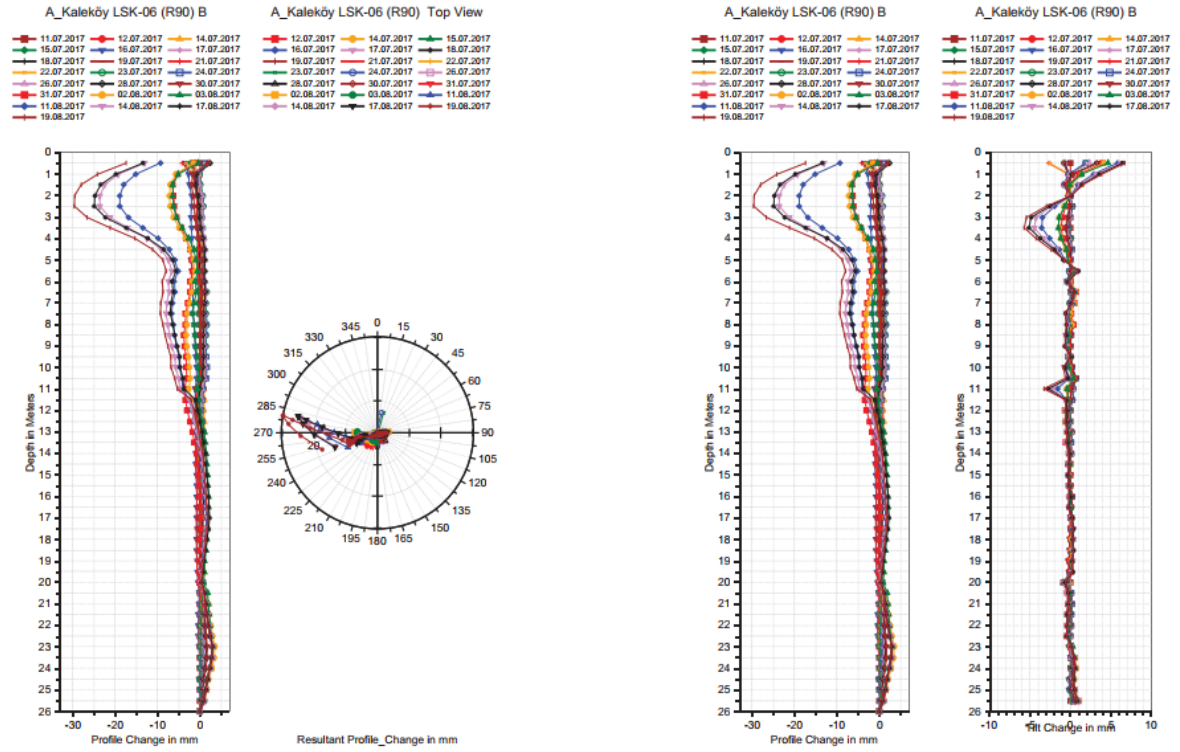
Ek Şekil 3.



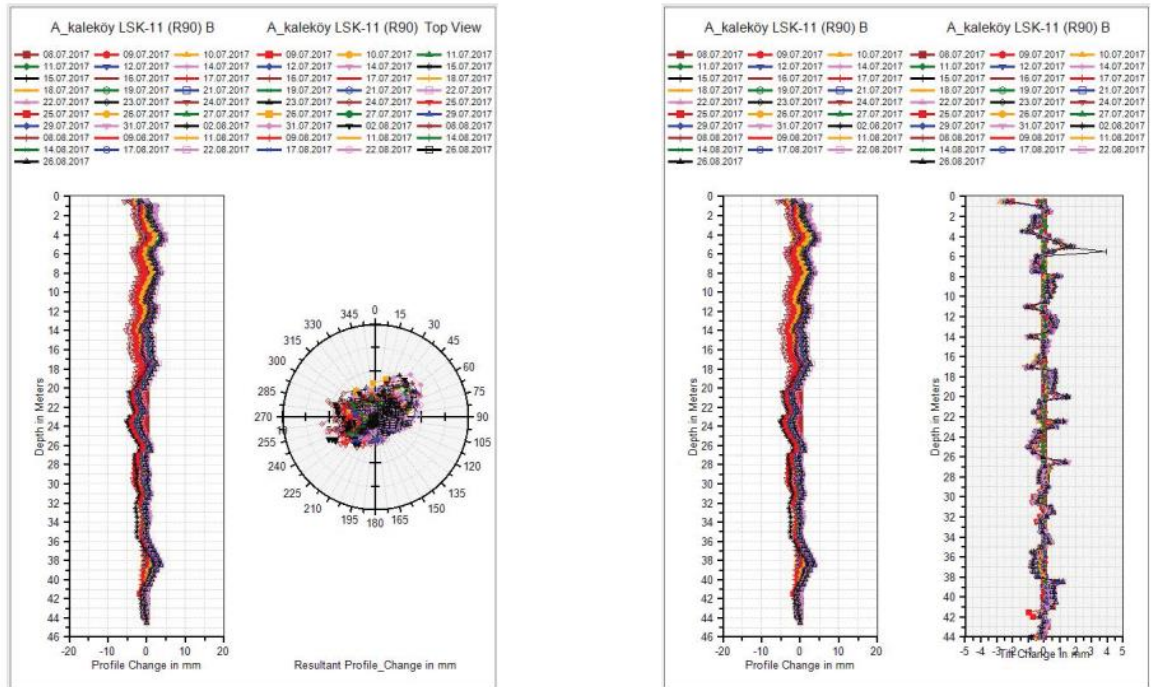
Ek Şekil 4.



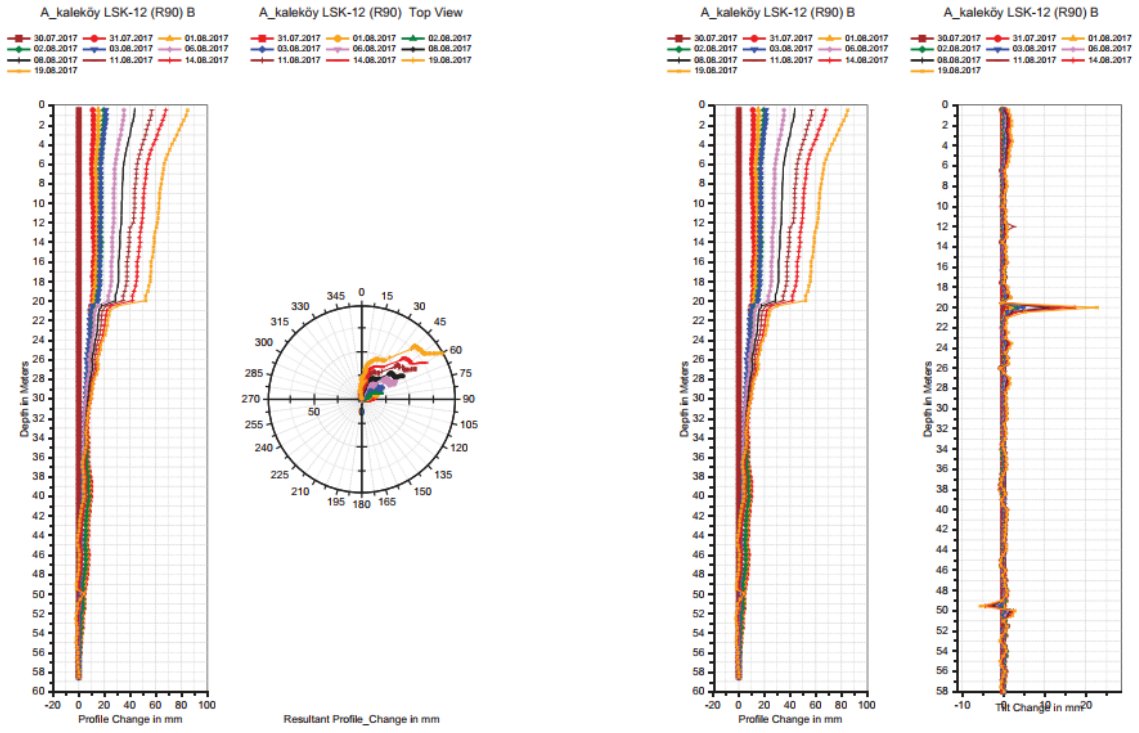
Ek Şekil 5.



Ek Şekil 6.

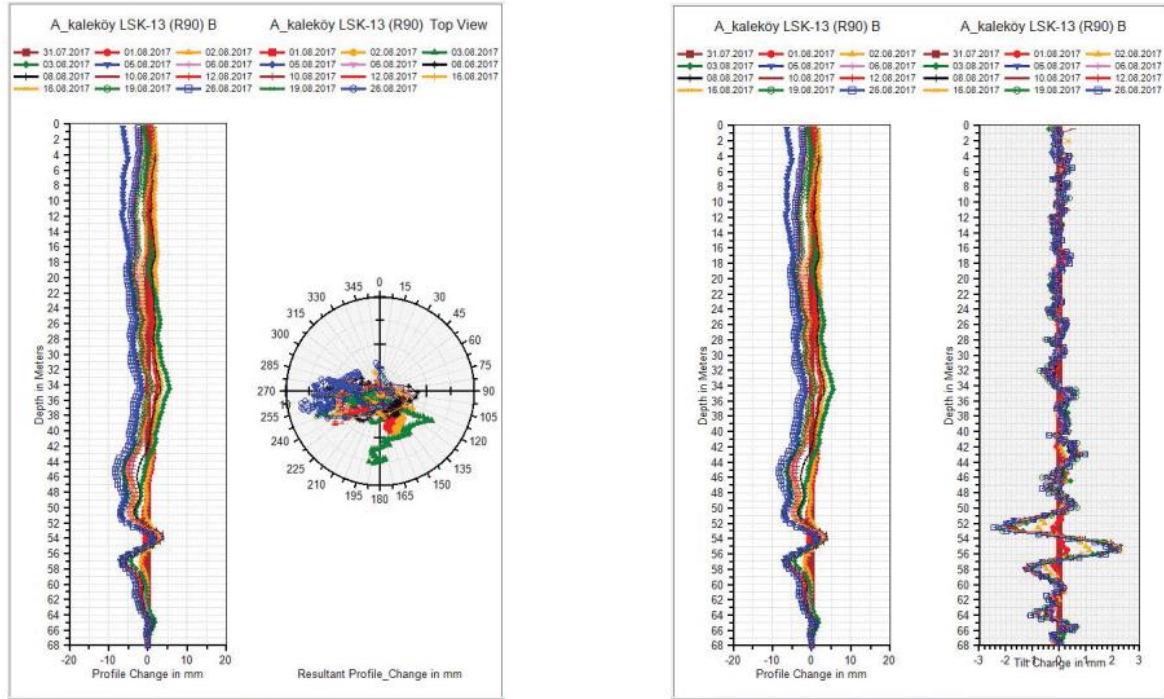


Ek Şekil 7.

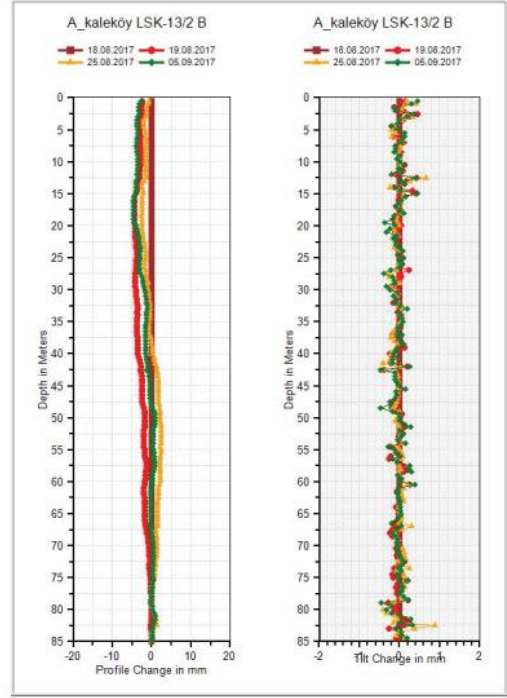
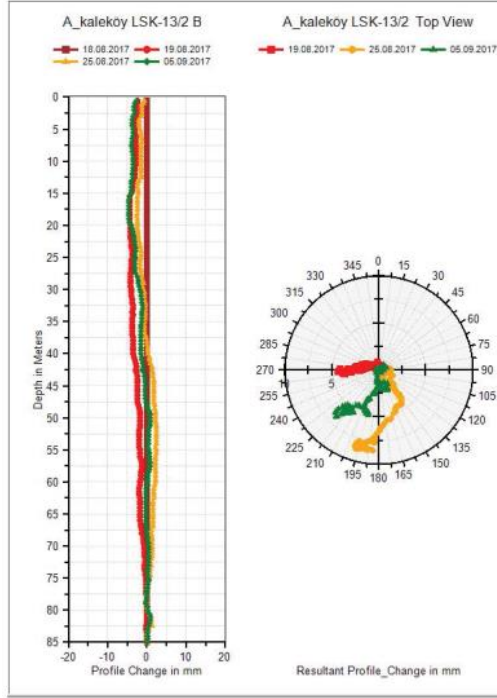


Kuyu ölçümü 19/08/2017 tarihinden sonra yapılamamıştır.
Kuyu ölçümü 20m'den sonra prop immedeği için sonlandırılmıştır.

Ek Şekil 8.



Ek Şekil 9.



Ek Şekil 10.

