

**MUDURNU-GÖYNÜK KARAYOLU'NUN BOZCAARMUT  
KESİMİNDEKİ DOLGU VE DOĞAL ŞEVLERİN  
DURAYLILIĞI**

**STABILITY OF EMBANKMENTS AND NATURAL  
SLOPES IN THE VICINITY OF BOZCAARMUT OF  
MUDURNU-GÖYNÜK HIGHWAY**

**BEGÜM ÇELİK**

**PROF. DR ERGÜN TUNCAY**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

olarak hazırlanmıştır.

2020

## ÖZET

# MUDURNU-GÖYNÜK KARAYOLU'NUN BOZCAARMUT KESİMİNDEKİ DOLGU VE DOĞAL ŞEVLERİN DURAYLILIĞI

**BEGÜM ÇELİK**

**Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ergün Tuncay**

**Haziran 2020, 86 sayfa**

Mudurnu-Göynük Devlet Karayolunun Bozcaarmut kesiminde yol dolgusu ile altındaki jeolojik birim içinde bir duraysızlık gerçekleşmiş ve yolun bir kısmında hasar oluşmuştur. Tez çalışması kapsamında, bu alan ve çevresindeki aynı dolgu malzemesinin kullanıldığı yaklaşık 200 m'lik yol güzergahı için doğal ve dolgu şevlerinin duraylılığının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, çalışma alanında önceden yapılmış sondaj verisi derlenmiş ve arazi çalışmaları gerçekleştirilerek dolgu malzemeleri ile yamaç molozu ve marn jeolojik birimlerinin sınırları belirlenmiş, yerinde gözlem ve ölçümler yapılmış ve örselenmiş ve örselenmemiş örnekler alınarak laboratuvara taşınmıştır. Jeomekanik parametrelerin belirlenmesi için ilgili standart ve öneriler dikkate alınarak laboratuvar deneyleri yapılmış, elde edilen sonuçlar ile teorik ve görgül yenilme ölçütlerinden yararlanılarak dolgu ve jeolojik birimlerin fiziksel ve dayanım özellikleri tayin edilmiştir. Sahadaki duraysızlığın geriye dönük analizi yapılarak, kayma anında malzeme parametreleri ile su koşullarına ilişkin değerlendirmelere gidilmiştir. Son aşamada, çalışma alanını temsil eden jeolojik kesitler için iki boyulu limit denge yöntemleriyle statik ve psödo-statik şev duraylılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, mevcut durum ve marn kırmataşı yerine kireçtaşı kırmataşının yerleştirilmesi durumları için ayrı ayrı yapılmıştır. Bu

Çalışmaların ışığında; mevcut durum için, inceleme alanındaki yol güzergahı boyunca marn kaya kütlesi içinde bir yenilme beklenmeyeceği, en kritik yenilme yuzyelerinin dairesel ya da dairesel olmayan modellerde dolgu ve yamaç molozu içinde gelişebileceği saptanmıştır. Mevcut şevlerin güneybatı ve kuzeybatı kesimlerinde drenaj önlemlerinin alınması durumunda duraysızlık beklenmeyeceği, ancak güzergahın orta kesimlerindeki şevlerin güvenli olmadığı belirlenmiştir. Marn kırmataşı dolgu malzemesinin kaldırılıp kireçtaşı kırmataşı serilmesi durumunda, inceleme alanının yaklaşık orta kesimleri haricinde diğer alanlarda statik koşulda ya da sismik etkinin varlığı halinde duraysızlık probleminin yaşanmayacağı anlaşılmıştır. İncelenen alanın orta kesimlerinde ise, sismik etkinin varlığı durumunda şevlerin güvenli sayılamayacağı, güçlendirmeye yönelik ek önlemlerin alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Geriye dönük analiz, Gynk, Karayolu, Mudurnu, şev duraylılığı, Limit denge analizi

## **ABSTRACT**

# **STABILITY OF EMBANKMENTS AND NATURAL SLOPES IN VICINITY OF BOZCAARMUT OF MUDURNU-GÖYNÜK HIGHWAY**

**BEGÜM ÇELİK**

**Master of Science, Department of Geological Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Ergün Tuncay**

**June 2020, 86 pages**

In the Bozcaarmut section of the Mudurnu-Göynük State Highway, an instability occurred in the road embankment and underlying geological unit, and a part of the road was damaged. In this thesis, it was aimed to investigate the stability of natural and embankment slopes in this area and its surrounding for a route of approximately 200 m where the same filling material was used. For this purpose, borehole data previously made in the study area was compiled, and in field studies, the borders of the filling materials, slope debris and marl geological units was determined, in-situ observations and measurements was made, and disturbed and undisturbed samples was taken and transported to the laboratory. In order to determine geomechanical parameters, laboratory experiments were carried out by considering the related standards and suggestions, and by using the obtained results and theoretical and empirical failure criteria the physical and strength properties of the embankment and geological units were determined. By applying back-analysis of the instability in the field, assessments were made for material parameters and water conditions during sliding. At the last stage, static and pseudo-static slope stability analyses were performed for the geological sections representing the study area by regarding two-dimensional limit equilibrium

methods. The analyses for both the current situation and in the case of placing limestone crushed stone instead of marl crushed stone were done. As a result of these studies; for the current situation, it was determined that any instability problem will not be expected in the marl rock mass along the road route in the study area and the most critical failure surfaces can develop in the fill material and slope debris in circular or non-circular models. If drainage measures are taken, it was determined that instability will not be expected in the southwest and northwest sections of the existing slopes but the slopes in the central sections of the route are not safe. In the case that the marl crushed stone filling material is removed and limestone crushed stone is laid, it was understood that there will not be instability problem in the areas except the middle parts of the study area under static conditions or in the presence of seismic effect. In the middle sections of the investigated area, it was concluded that slopes cannot be considered safe in the presence of seismic effect and additional measures for reinforcement should be taken.

**Anahtar Kelimeler:** Back-analysis, Göynük, Highway, Mudurnu, Slope stability, Limit equilibrium method

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının başından sonuna kadar her türlü bilgi birikimi ve deneyimleriyle yol gösteren ve tezin şekillenmesinde büyük emeği geçen tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Ergün TUNCAY'a,

Tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için gerekli izinlerin alınmasını sağlayan ve çalışma boyunca desteğini esirgemeyen İnşaat Yük. Müh. Onur BAŞER'e,

Tez savunması aşamasındaki katkıları ile jüri üyeleri; Prof. Dr. Harun SÖNMEZ, Prof. Dr. Adil BİNAL, Doç. Dr. Mustafa FENER ve Doç. Dr. Mehmet Celal Tunusluoğlu'na,

Laboratuvar çalışmalarında deneylerin yapılmasında kullanılan Geolab Jeoteknik Laboratuvarı'na,

Laboratuvar çalışmalarında doğrudan makaslama deneylerinin yapılmasında kullanılan Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'na ve bu çalışmalar esnasındaki yardımlarından dolayı Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı teknisyenleri Ahmet BAY ve Özgür EROL'a,

Tez çalışmasının tüm sürecinde verdikleri maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan canım eşim Mehmet Bersel ÇELİK, kızım Valen Nil, annem, babam ve anneanneme,

Çalışmalarım süresince yardım ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Mevlüt Deniz SONGUR ve Berkan ERÇİN'e,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1. 1. Amaç ve Kapsam.....	1
1. 2. Önceki Çalışmalar.....	2
1. 2. 1. Genel Jeoloji Çalışmaları.....	2
1. 2. 2. Yol dolgularındaki duraysızlıklara ilişkin bazı önceki çalışmalar.....	3
2. İNCELEME ALANININ TANITIMI.....	6
2. 1. Coğrafi Konum.....	6
2. 2. İklim ve Bitki Örtüsü.....	7
2. 3. Ulaşım ve Ekonomik Durum.....	8
3. JEOLJİ VE DEPREMSELLİK.....	9
3. 1. Jeoloji.....	9
3. 1. 1. Yenipazar Formasyonu (Kye).....	12
3. 2. Depremsellik.....	14
4. ARAZİ ÇALIŞMALARI.....	17
4. 1. Duraysızlığa İlişkin Değerlendirmeler.....	17
4. 2. Örnekleme Çalışmaları.....	23
4. 2. 1. Örselenmiş Örnek Alımı.....	23
4. 2. 2. Blok Numune Alımı.....	24

4. 2. 3. Örselenmemiş Örnek Alımı .....	25
4. 2. 4. Fotoanaliz İçin Görüntü Alımı.....	26
5. JEOMEKANİK ÖZELLİKLER .....	28
5. 1. Marn Kaya Malzemesi ve Kütlesi .....	28
5. 1. 1. Birim hacim ağırlık .....	28
5. 1. 2. Dayanım Özellikleri.....	28
5. 2. Yamaç Molozu.....	33
5. 2. 1. Fiziksel Özellikler ve Zemin Sınıflaması .....	33
5. 2. 2. Makaslama Dayanımı .....	35
5. 3. Eski Dolgu ve Yeni Dolgu Malzemeleri.....	39
5. 3. 1. Fiziksel Özellikler .....	39
5. 3. 2. Tek ve Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri .....	40
5. 3. 3. Makaslama Dayanımı Deneyleri .....	41
5. 3. 4. Hoek-Brown Ölçütüne Göre Belirlenen Makaslama Dayanımı .....	46
6. GERİYE DÖNÜK ANALİZLER.....	52
7. ŞEV DURAYLILIĞI DEĞERLENDİRMELERİ .....	57
7. 1. Mevcut Durum İçin Duraylılık Analizleri .....	61
7. 2. Yeni Dolgu Malzemesinin Kullanılması Durumundaki Analizler .....	73
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
9. KAYNAKLAR .....	81
ÖZGEÇMİŞ .....	86



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019 ve GoogleEarth, 2019'dan). .....	6
Şekil 2.2. Bolu İli ve yakın çevresinin aylara göre ortalama sıcaklık ve yağış miktarları (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2019'dan). .....	7
Şekil 3.1. Çalışma alanının MTA (2002) tarafından sunulan 1/100000 ölçekli genel jeoloji haritasındaki yeri. ....	10
Şekil 3.2. İnceleme sahasına ait jeoloji haritası (Zemka Proje, 2016'dan düzenlenmiştir). .....	11
Şekil 3.3. Yenipazar formasyonuna ait marnlardan genel görünüm. ....	13
Şekil 3.4. Yenipazar formasyonuna ait marn birimlerden (a) yüzeyde ve (b) bir miktar kazı yapıldıktan sonra görünümler. ....	13
Şekil 3.5. Yamaç molozundan genel görünüm. ....	14
Şekil 3.6. Çalışma alanı çevresinde bulunan diri faylar (Emre ve ark., 2013'ten). ....	15
Şekil 3.7. Çalışma alanından 100 km uzaklığa kadar bulunan alan içinde büyüklüğü 4 ve daha fazla olan depremlerin dağılımı (AFAD, 2019). ....	15
Şekil 3.8. a) Türkiye deprem bölgeleri haritası ve b) çalışma alanı için Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif uygulamasından belirlenen PGA-475 değeri (AFAD, 2019). ....	16
Şekil 4.1. (a) Duraysızlığın kayma yüzeyi ile yıkılan duvardan bir görünüm ve (b) vadi içerisine doğru hareket eden duraysızlık malzemesi. ....	18
Şekil 4.2. Çalışma alanında Zemka Proje (2016) tarafından gerçekleştirilen sondajların konumları. ....	20
Şekil 4.3. Zemka Proje (2016) tarafından yapılmış olan sondajların basitleştirilmiş logları. ....	21
Şekil 4.4. Duraysızlığa ilişkin kesitlerin plan üzerinde yerleri. ....	22
Şekil 4.5. Duraysızlık sonrası jeolojik birimlerin ve şev geometrisinin kesitlerdeki durumu. ....	23
Şekil 4.6. (a) Eski dolgu ve (b) yeni dolguda açılan çukurlardan görünüm. ....	24
Şekil 4.7. (a) Marn birimden ve (b) kireçtaşlarından alınan blok örnekler. ....	25
Şekil 4.8. İnceleme alanındaki yamaç molozundan kesici metal kalıpla örnek alımı. ....	26

Şekil 4.9. (a) İri taneli yeni dolgu malzemesinden boyut ölçümü ve (b) fotoanaliz için dik açıda çekilen fotoğraf örneği.....	27
Şekil 5.1. Marn birimlerin niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı'ndan (Sönmez ve Ulusay, 2002) yararlanılarak GSI'ların belirlenmesi. ....	31
Şekil 5.2. Marn kaya kütleli için Hoek-Brown yenilme ölçütünden yararlanılarak belirlenen yenilme zarfı. ....	33
Şekil 5.3. Yamaç molozundan alınmış örneklerin tane boyu dağılım eğrileri. ....	34
Şekil 5.4. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden bulunan (a) Set 1, (b) Set 2 ve (c) Set 3'e ait ileri makaslama dayanımı-yer değiştirme grafikleri. ....	36
Şekil 5.5. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden elde edilen (a) Set 1, (b) Set 2 ve (c) Set 3'e ait geri makaslama dayanımı-yer değiştirme grafikleri. ....	37
Şekil 5.6. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden elde edilen (a) Set 1, (b) Set 2 ve (c) Set 3'e ait doruk ve artık doğrusal yenilme zarfları. ...	38
Şekil 5.7. Yamaç molozu için deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden elde edilen genelleştirilmiş yenilme zarfları. ....	39
Şekil 5.8. Makaslama deney cihazından bir görünüm. ....	43
Şekil 5.9. Eski dolguya ait marn kırmataşı için makaslama deneylerinden elde edilen makaslama dayanımı-yer değiştirme grafiği.....	44
Şekil 5.10. Yeni dolguya ait kireçtaşı kırmataşı için makaslama deneylerinden elde edilen makaslama dayanımı-yer değiştirme grafiği. ....	44
Şekil 5.11. Eski dolgu için deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden (a) tüm veri ve (b) 21.8 kPa normal gerilme altındaki deney verisi çıkartılarak belirlenen doğrusal ve eğrisel yenilme zarfları.....	45
Şekil 5.12. Yeni dolgu için deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden belirlenen doğrusal ve eğrisel yenilme zarfları. ....	46
Şekil 5.13. Kireçtaşı kırmataşından oluşan yeni dolgu malzemesi için niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı'ndan (Sönmez ve Ulusay, 2002) GSI değişim aralıklarının belirlenmesi. ....	49
Şekil 5.14. Yeni dolgu malzemesi için (a) Hoek-Brown ölçütünden yararlanılarak belirlenen yenilme zarfı ve (b) doğrudan makaslama deney sonucundan	

belirlenenle Hoek-Brown ölçütünden belirlenen yenilme zarflarının karşılaştırmalı sunumu. ....	51
Şekil 6.1. Fookes, Reeves ve Dearmen (1977) tarafından önerilen geriye dönük analiz yöntemi. ....	53
Şekil 6.2. Sancio (1981) tarafından önerilen ve çoklu çözüm yöntemini esas alan geriye dönük analiz yaklaşımı. ....	53
Şekil 6.3. Duraysızlık öncesi ve sonrası şev profilleri ile kayma yüzeyleri.....	55
Şekil 6.4. Geriye dönük analizlerde gözenek suyu basıncı oranı ( $r_u$ ), (a) 0, (b) 0.1 ve (c) 0.15 için yamaç molozunun $F=1$ koşulunu sağlayan içsel sürtünme açısı kohezyon çiftleri değişim eğrileri ile laboratuvarında belirlenen artık ve doruk makaslama dayanımlarının değişim aralıkları. ....	56
Şekil 7.1. Plan görünümü ve kesitlerin plandaki yerleri. ....	59
Şekil 7.2. Şev duraylılığı analizlerinde kullanılması amacıyla alınmış jeolojik kesitler.	61
Şekil 7.3. Kesit 1’de $r_u=0$ (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi. ....	63
Şekil 7.4. Kesit 1’de $r_u=0.15$ için statik şev duraylılığı analizi. ....	64
Şekil 7.5. Kesit 1’de $r_u=0$ (kuru durum) için psöydo-statik şev duraylılığı analizi.....	64
Şekil 7.6. Kesit 1’de $r_u=0.15$ için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	64
Şekil 7.7. Kesit 2’de $r_u=0$ (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi. ....	65
Şekil 7.8. Kesit 2’de $r_u=0.15$ için statik şev duraylılığı analizi. ....	66
Şekil 7.9. Kesit 2’de $r_u=0$ (kuru durum) için psöydo-statik şev duraylılığı analizi.....	66
Şekil 7.10. Kesit 2’de $r_u=0.15$ için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	67
Şekil 7.11. Kesit 3’te $r_u=0$ (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi. ....	68
Şekil 7.12. Kesit 3’te $r_u=0.15$ için statik şev duraylılığı analizi. ....	68
Şekil 7.13. Kesit 3’te $r_u=0$ (kuru durum) için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	69
Şekil 7.14. Kesit 3’te $r_u=0.15$ için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	69
Şekil 7.15. Kesit 4’te $r_u=0$ (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi. ....	70
Şekil 7.16. Kesit 4’te $r_u=0.15$ için statik şev duraylılığı analizi. ....	70
Şekil 7.17. Kesit 4’te $r_u=0$ (kuru durum) için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	70
Şekil 7.18. Kesit 4’te $r_u=0.15$ için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	71
Şekil 7.19. Kesit 5’te $r_u=0$ (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi. ....	71
Şekil 7.20. Kesit 5’te $r_u=0.15$ için statik şev duraylılığı analizi. ....	71
Şekil 7.21. Kesit 5’te $r_u=0$ (kuru durum) için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	72
Şekil 7.22. Kesit 5’te $r_u=0.15$ için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	72

Şekil 7.23. Kesit 3'te yeni dolgu kullanılması durumunda ve $r_u=0$ (kuru koşul) için statik şev duraylılığı analizi. ....	75
Şekil 7.24. Kesit 3'te yeni dolgu kullanılması durumunda ve $r_u=0.15$ için statik şev duraylılığı analizi. ....	76
Şekil 7.25. Kesit 3'te yeni dolgu kullanılması durumunda ve $r_u=0$ (kuru koşul) için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	76
Şekil 7.26. Kesit 3'te yeni dolgu kullanılması durumunda ve $r_u=0.15$ için psöydo-statik şev duraylılığı analizi. ....	77

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1. Marn kaya kütlesi özellikleri ve RMR puanı (Zemka Proje, 2016).....	29
Çizelge 5.2. Her sondaj için ayrı ayrı belirlenen GSI değerleri. ....	32
Çizelge 5.3. Yamaç Molozu örneklerine ait kıvam limitleri ve elek analizi sonuçları. ...	34
Çizelge 5.4. Yamaç molozu için doğrudan makaslama deneylerinde belirlenen doruk ve artık kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) parametreleri. ....	39
Çizelge 5.5. Eski ve yeni dolguya ait fiziksel özellikler. ....	40
Çizelge 5.6. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen eksenel ve yanal gerilme veri çiftleri.....	41
Çizelge 5.7. Kireçtaşı kırmataşlarında $D_n$ değeri 3 ve 6 için fotoğraflardan ve direk ölçümlerden ve blok yüzey özelliklerinden yararlanılarak belirlenen GSI değerleri. ....	50
Çizelge 7.1. Şekil 7.2'deki kesitlerde sunulan jeolojik ve dolgu birimler için analizlerde kullanılan jeomekanik özellikler. ....	62
Çizelge 7.2. Yeni dolgu kullanılması durumunda farklı boşluk suyu basıncı oranlarında ( $r_u$ ) şev duraylılığı analiz sonuçları. ....	74
Çizelge 7.3. Yeni dolgu kullanılması durumunda ve yamaç molozunun artık dayanım parametreleri kullanılarak farklı boşluk suyu basıncı oranlarında ( $r_u$ ) şev duraylılığı analiz sonuçları.....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$c$	Kohezyon
$c_p$	Doruk kohezyon
$c_r$	Artık kohezyon
$D$	Örselenme faktörü
$F$	Güvenlik katsayısı
$I_{s(50)}$	Nokta yükü dayanım indeksi
$J_v$	Hacimsel eklem sayısı
$M$	Deprem büyüklüğü
$m_i$	Sağlam kayaya ait m sabiti
$r_u$	Boşluk suyu basıncı oranı
$R^2$	Korelasyon katsayısı
$S$	Süreksizlik aralığı
$\gamma$	Birim hacim ağırlık
$\phi$	İçsel sürtünme açısı
$\phi_p$	Doruk içsel sürtünme açısı
$\phi_r$	Artık içsel sürtünme açısı
$\delta$	Yer değiştirme
$\tau$	Makaslama dayanımı
$\sigma_1, \sigma_3$	En büyük ve en küçük asal gerilmeler
$\sigma$	Normal gerilme

### Kısaltmalar

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı
ASTM	Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği

KAFZ	Kuzey Anadolu Fay Zonu
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LL	Likit limit
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
PL	Plastik limit
PI	Plastisite indeksi
PGA	En büyük yatay yer ivmesi
RMR	Kaya kütle sınıflaması
RQD	Kaya kalite göstergesi
SC	Killi kumlar
SCR	Süreksizlik yüzey koşulu puanı
SK	Sondaj kuyusu
SR	Yapısal özellik puanı
UCS	Tek eksenli basınç dayanımı
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Amaç ve Kapsam

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde yer alan Mudurnu-Göynük Devlet Karayolunun Bozcaarmut kesiminde 2016 yılında karayolunun da bir miktar hasar gördüğü bir duraysızlık gerçekleşmiştir. Bu duraysızlık, yol dolgusu ve altındaki jeolojik birimler içinde gelişmiştir. Yol güzergahı boyunca kullanılan bu dolgu, yol yarmalarında da gözlenen marn birimlerden elde edilmiş kırmataş malzemeyle oluşturulmuştur. Zemka Proje (2016) tarafından, atmosferik koşullar etkisiyle marn kaya kütlelerinin bozunmasıyla oluşan kırıntılı malzemenin, dolgunun altında yer alan ve duraysızlığın hemen arkasındaki vadiden gelen suların akması amacıyla oluşturulan menfezin içine girerek ortamdaki suyun atılmasını zorlaştırdığı ve durumun duraysızlığa neden olduğu belirtilmiştir. Söz konusu sahada, tez çalışmasına başlanıldığı tarihte ilgili yükleniciler tarafından kireçtaşı kırmataşı serilerek ve ek destek yöntemleri kullanılarak iyileştirme çalışmaları başlatılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, uygulanan güçlendirme projesinden bağımsız olarak ve uygulanan projenin ayrıntısı bilinmeden, Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü'nden çalışma için izin de alınarak, bu alan ve aynı dolgu malzemesinin kullanıldığı yaklaşık 200 m'lik yol güzergahı için doğal ve dolgu şevlerinin duraylılığının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle inceleme alanı ve yakın çevresinde gerçekleştirilmiş jeoloji çalışmaları ile benzer yol dolgularında gözlenen duraysızlıkların değerlendirildiği çalışmalar incelenmiştir. İnceleme alanında Zemka (2016) tarafından yapılmış araştırma sondajları derlenmiş, gerek dolgu gerekse jeolojik birimlerin derinlikle değişimi hakkında bilgi toplanmış, söz konusu çalışmada jeolojik birimlerle ilgili jeoteknik değerlendirmeler incelenmiştir. Yapılan arazi çalışmalarında, duraysızlığa ilişkin yerinde değerlendirmeler yapılmış, jeolojik birim sınırları kontrol edilmiş ve jeolojik birimler ile eski dolgu (marn kırmataşı) ve güçlendirme çalışmalarında kullanılan yeni dolgu (kireçtaşı kırmataşı) malzemelerine ilişkin gözlemlerde bulunulmuştur. Ayrıca, yeni dolgu malzemesindeki blokların boyutları ölçülmüş ve yüzeylerinin özellikleri hakkında veri toplanmıştır. Son aşamada dolgu malzemelerinin yerinde yoğunluklarının belirlenmesi için çalışmalar yürütülmüş ve bu malzemeler ile jeolojik birimlerden örselenmiş ve örselenmemiş örnekler alınarak laboratuvara nakledilmiştir.



Alınan örneklerin fiziksel ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, kaya malzemeler için ISRM tarafından önerilmiş yöntemler (ISRM, 2007), zemin özelliğindeki malzemeler içinse ASTM (2000) standartları dikkate alınarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, birim hacim ağırlık, elek analizi, kıvam limitleri, piknometre deneyleri ile tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı, nokta yükü dayanım indeksi ve doğrudan makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yamaç molozundan alınan örnekler 6x6x2 boyutlarında doğrudan makaslama deneylerine, eski ve yeni dolgudan alınan kırmataş örnekleri ise 30x30x8 boyutlarındaki makaslama kutusunda ve yerindeki yoğunluk değerlerinde yeniden sıkıştırılarak deneylere tabi tutulmuştur. Marn kaya kütlelerinin makaslama dayanımı için laboratuvar deney sonuçları ve kaya kütlesi puanları dikkate alınarak Hoek ve Brown (1980) görgül yenilme ölçütünden yararlanılmıştır. Yeni dolgu malzemesinin makaslama dayanımı, laboratuvar deneylerinin yanı sıra, blok boyutu ve yüzey özellikleri dikkate alınarak söz konusu görgül ölçütle de tespit edilmiştir.

Sonraki aşamada, duraysızlık öncesi ve sonrası jeolojik kesitler birlikte değerlendirilmiş ve laboratuvar deneylerinden elde edilen parametreler kullanılarak geriye dönük analizler gerçekleştirilmiş ve şev duraylılığı analizlerinde jeolojik birimler ile dolgu malzemeleri için kullanılacak parametrelerin seçimine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Son aşamada inceleme alanından alınan beş kesitte uygun yöntemlerden yararlanılarak iki boyutlu statik ve psödo-statik limit denge analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

## **1. 2. Önceki Çalışmalar**

Bu bölümde, çalışma sahasını içine alan başlıca genel jeoloji çalışmaları ile yol güzergahlarında meydana gelen ve yol dolgu malzemesini de içine alan duraysızlıkların incelendiği literatürdeki bazı mühendislik jeolojisi ve jeoteknik çalışmalarına, dünyadan ve Türkiye’den bazı örnekler verilerek, kısaca değinilmiştir.

### **1. 2. 1. Genel Jeoloji Çalışmaları**

Abdüsselamoğlu (1956), Göynük–Mudurnu–Beydili bölgesinin jeolojisini çalışarak bu bölgenin 1:100.000 ölçekli jeolojik haritasını hazırlamıştır. Abdüsselamoğlu (1958) ise, Göynük-Gölpazar bölgesinde yer alan denizel Miyosen’in varlığını araştırmıştır.

Araştırmacı bu çalışmasında, bölgede denizel Miyosen'in olmadığı sonucuna ulaşmış, bununla birlikte bölgede Paleosen-Eosen'e ait bir denizin yer aldığını belirlemiştir. Bu denizin çekilmesi sırasında ise, Paleosen-Eosen'e ait filiş istifinin çökeldiğini stratigrafisiyle göstermiştir.

Saner (1980), Mudurnu-Göynük havzasının Jura ve sonrasındaki çökelim özellikleri ile paleocoğrafyasını yorumlamıştır. Araştırmacı, bölgede Jura sonrasındaki çökelimleri tanımlamış, çökellerin oluşum ortamları ile kalınlıklarını belirlemiştir.

Gedik ve Aksay (2002), MTA Genel Müdürlüğü 1:100.000 ölçekli Adapazarı-H25 Paftası'nı hazırlayarak, çalışmalarında Göynük, Yenipazar ve Sarıkaya ilçelerinin de olduğu inceleme alanının genel jeoloji özelliklerine yer vermişlerdir.

Akan (2010), Mudurnu-Göynük Havzası'nın Göynük ilçesi ile Himmetoğlu köyü arasında çalışmalar yapmış, stratigrafik kesitler almış ve bu kesitlerde yaşı Alt Kretase-Orta Eosen arasında bulunan Gölpazarı Grubuna ait Yenipazar, Seben ve Taraklı Formasyonları; Selvipınar Kireçtaşı; Kızılçay Formasyonu; Şehren Grubuna ait Halidiye Formasyonu ile Yenipazar Formasyonu içerisinde yer alan Hisarözü Üyesi'nin varlığını ortaya koymuştur. Ayrıca, Mudurnu-Göynük havzasının Üst Kretase-Paleojen Tortulları Stratigrafisi ve Paleo-Ortamsal özelliklerine değinmişlerdir.

### **1. 2. 2. Yol dolgularındaki duraysızlıklara ilişkin bazı önceki çalışmalar**

Ulusay ve Aydan (2002), Düzce depreminde tetiklenen Ankara-İstanbul Otoyolu üzerinde gerçekleşen Bakacak heyelanını geri analiz tekniği ile araştırmışlardır. Araştırmacılar, yol dolgusu ve altındaki birimlerin deprem etkisiyle makaslama parametrelerindeki düşüş nedeniyle duraysızlığın geliştiği sonucuna ulaşmışlardır.

Erginal ve Bayrakdar (2005), Tekirdağ-Malkara yolu üzerinde yer alan İncik heyelanını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, söz konusu güzergah üzerinde ayrılmış kıltaşı-marn birimlerin üzerine yerleştirilen yol dolgusunun mevsim normalleri üzerinde yağış alması ile birlikte heyelan oluştuğu belirtilmiştir.

Hadjigeorgiou, Kyriakou ve Papanastasiou (2006), Güneybatı Kıbrıs'ta yer alan Nata-Pentalia yolunda aşırı yağış sonrasında depremlerin de tetiklemiş olduğu zayıf-ayrışmış kayalar üzerine inşa edilmiş yol dolgusu duraysızlığını incelemişlerdir. Kayma

mekanizması geriye dönük analiz yöntemi ile çözülmüş ve kaymanın dairesel kayma türünde olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, duraysız kesimle ilgili kazıklı stabilizasyon veya yolun güzergahının değiştirilmesini önermişlerdir.

Taga, Turkmen ve Kacka (2013), Mersin-Tarsus otoyolunda meydana gelen bir dolgu heyelanını incelemişlerdir. Araştırmacılar, yol dolgusunun altında kalan zemin içerisindeki killi tabakaların imalat aşamasından itibaren kaymaya başladığını ortaya koymuş, geriye dönük analiz yöntemi ile duraysızlık mekanizmasını çözümlenmeye çalışmışlardır. Söz konusu çalışmada, duraysızlık mekanizmasının dairesel kayma türünde olduğu belirlenmiştir.

Jamaludin ve Jafaar (2013), Kuala Lumpur-Bentong yolunda meydana gelen duraysızlığı araştırmışlardır. Yapılan saha gözlemleri ve analizlere dayanarak; dolgunun alüvyon yelpazesi üzerine yapıldığı, 1995 yılında meydana gelen aşırı yağışlarla birlikte boşluk suyu basıncının yükselmesi ve ilgili birimin dayanım parametrelerinin düşmesiyle birlikte dairesel kayma modelinde bir duraysızlığın geliştiği sonucuna ulaşılmıştır. Oluşan bu duraysızlığa çözüm olarak araştırmacılar, geogrid uygulamasını önermişlerdir.

Heyerdahl ve ark. (2013), 2011 yılında aşırı yağışlar sonucunda meydana gelen eski bir demiryolundaki dolgu heyelanını incelemişlerdir. Araştırmacılar, yerinde yaptıkları incelemeler sırasında eski dolgunun kil içeriği yüksek malzemedan oluşturulduğunu saptamışlardır. Yağışlar sonucunda boşluk suyu basıncı artan dolgu malzemesinde dairesel kayma modelinde bir duraysızlığın gerçekleştiğini, limit denge analizi yönteminden yararlanarak ortaya koymuşlardır.

Zemka Proje (2016), Mudurnu-Dokurcun ayrımı Göynük Devlet Yolu'nun üç farklı kesiminde bulunan heyelanlı sahalarda araştırmalar yapmıştır. Söz konusu çalışmada, bu sahalardaki sondaj ve inklinometre uygulamalarından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve sayısal çözümleme yöntemlerinden yararlanılarak problemlerin çözümüne uygun destek ve drenaj önlemleriyle ilgili önerilere yer verilmiştir.

Alamanis (2017), dünyada ve Yunanistan'da yol yarmaları ve dolgularında meydana gelen duraysızlıkları sismik ve statik koşullarda değerlendirmiştir. Araştırmacı, elde ettiği veri tabanındaki karayolu duraysızlıklarını mekanizmalarına göre sınıflandırmış

ve bunlarla ilgili genellemelerde bulunmuştur. Bu duraysızlık sınıflandırmaları; şev erozyonu, yamaçların akarsu aşındırmasından dolayı erozyonu, çatlaklara su dolması, deprem kaynaklı, zayıf tabakalar kaynaklı ve dolgu üzerinin aşırı yüklenmesi başlıkları altında toplanmıştır.

Ertekin Yardımcı (2018), Ağrı-Kağızman yolu üzerinde ayrıışmış ofiyolitler içerisinde gerçekleşen heyelanın mekanizmasını incelemiştir. İnceleme alanını dört ayrı kesime ayıran araştırmacı, bu kesimlerde geriye dönük duraylılık analizleri yapmıştır. Söz konusu çalışmada ayrılan kesimlerin iki tanesinde kayma modelinin dairesel kayma şeklinde olduğu belirtilmiş ve çözüm olarak heyelan malzemelerinin sıyrılması ve yol geçişinin kaya dolgu üzerinde yapılması önerilmiştir.

Akpınar Erol (2018), Develi-Bakırdağ (Tufanbeyli-Saimbeyli) Ayrım İl Yolu üzerinde dolguda ve dolgu altında yer alan filiş birimlerdeki duraysızlığı incelemiştir. Araştırmacı, kaymayı tetikleyen faktörlerin aşırı yağışlar ve dolgu üzerine gelen yükler olduğunu belirterek, dolgu altına sıyırma kazısı yapılmasını ve şevlerin yatırılmasını önermiştir.

Görbil (2019), Bartın-Kirazlı Köprü Barajı Varyant Yolu üzerinde yapım sırasında tetiklenen paleo-heyelanları incelemiştir. Araştırmacı, yol kazıları sırasında aktif hale gelen ve yol dolgusu ile altındaki birimleri içeren heyelanın boyutlarını sondaj çalışmalarıyla ortaya koymaya çalışmıştır. Heyelanın kayma modelini oluşturarak, farklı kesitler üzerinde geriye dönük ve limit denge yöntemiyle statik ve dinamik analizler gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, iyileştirmeye yönelik çözüm önerileri olarak, pompaj ile yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, topuk bölgesinde yer değiştirme kazısı ile kaya dolgu yapılması ve uygun yeraltı ve yüzey drenajları ile suyun heyelanlı kütleden uzaklaştırılması gibi bir dizi önerilerde bulunmuştur.

## 2. İNCELEME ALANININ TANITIMI

### 2.1. Coğrafi Konum

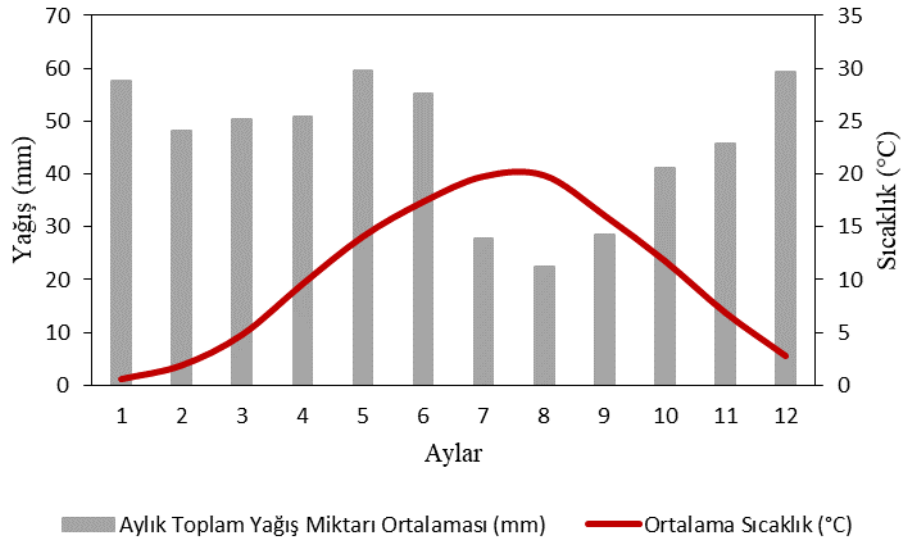
Çalışma alanı, Bolu İline 114 km uzaklıkta yer almakta olup, Göynük İlçesi sınırlarındaki D160 Karayolu üzerinde bulunmaktadır (Şekil 2.1). Çalışma alanına en yakın yerleşim yeri, Bozcaarmut köyüdür.



Şekil 2.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019 ve GoogleEarth, 2019'dan).

## 2. 2. İklim ve Bitki Örtüsü

Bolu İli'nde hem Karadeniz iklimi hem de İç Anadolu'nun karasal iklimi görülmektedir. Mudurnu İlçesi'nin batı kesimi ile Göynük İlçesi'nin büyük bir kesiminde ise, İç Anadolu iklimi hakimdir (<http://www.cografya.gen.tr/tr/bolu/iklim>). Bu bölgede, yaz ve kış arasındaki sıcaklık farkı oldukça fazla olup, gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farkıda fazladır. Bu yüzden bu kesimde kışlar soğuk ve kar yağışlıdır. Ortalama sıcaklık ve ortalama yağış miktarları, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1929-2018 yılları arasındaki verilerinden yararlanılarak belirlenmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2019). Bu verilere göre (Şekil 2.2), ortalama sıcaklığın en yüksek olduğu ay Ağustos olup, bu ay için ortalama sıcaklık 20°C'ye kadar yükselmektedir. Ortalama sıcaklığın en düşük olduğu ay ise Ocak ayı olup, sıcaklık ortalama 0°C'ye kadar düşmektedir. Aylık ortalama toplam yağış miktarları incelendiğinde, en yağışlı aylar Mayıs ve Aralık ayları iken, yağışın en az olduğu ay Ağustos ayı olarak göze çarpmaktadır. Bolu İli'nin bitki örtüsü genel olarak ormanlık olup bu ormanlarda kayın, gürgen, ıhlamur, dişbudak, meşe, kızılçam, karaçam, kavak, köknar ve sarıçam ağaçları bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Bolu İli ve yakın çevresinin aylara göre ortalama sıcaklık ve yağış miktarları (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2019'dan).

### **2. 3. Ulaşım ve Ekonomik Durum**

Çalışma alanı Mudurnu-Göynük karayolu üzerinde yer almakta olup, Göynük ilçesine 14 km ve Mudurnu ilçesine 42 km uzaklıkta bulunmaktadır. Yılın her zamanında çalışma alanına ulaşım sağlanabilmektedir. İlçede yaşayan halkın geçim kaynağının büyük bir bölümü tarım ve hayvancılıktan sağlanmaktadır. Bunun dışında orman işçiliği de bölgedeki halkın geçim kaynaklarından biridir.

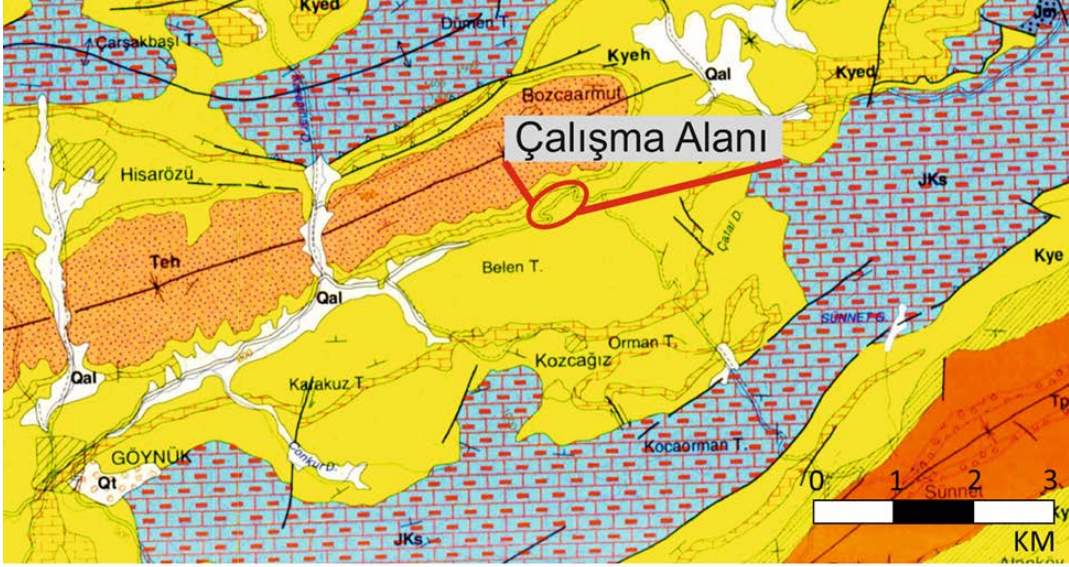
### **3. JEOLojİ VE DEPREMSELLİK**

Çalışma sahası küçük bir alanı kapsamakla birlikte yol dolgu malzemesi altındaki birimlerin ait oldukları jeolojik formasyonun genel özellikleri ile çalışma sahası ve yakın çevresindeki yapısal ve sismolojik özelliklerin bilinmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla, inceleme alanında yer alan jeolojik birimler ve sahanın sismotektoniği ile ilgili bilgilere ve bu kapsamda yerinde yapılan gözlemlere aşağıdaki alt bölümlerde değinilmiştir.

#### **3.1. Jeoloji**

Çalışma alanı ve çevresinin MTA (2002) tarafından hazırlanan genel jeoloji haritası Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu haritadan da görüldüğü gibi, inceleme alanında Albiyen-Üst Paleosen yaşlı Yenipazar Formasyonu bulunmaktadır. Yenipazar Formasyonu yarı pelajik, çörtlü kireçtaşı ve kalsitürbitid birimlerden oluşan Soğukçam Formasyonunun üzerine gelmektedir. İnceleme alanının jeolojisi ise, Zemka Proje (2016) tarafından hazırlanan daha ayrıntılı haritada (Şekil 3.1) görülmektedir. Bu harita incelendiğinde, inceleme alanında Yenipazar Formasyonuna ek olarak Kuvaterner yaşlı yamaç molozları da yüzeylemektedir. Çalışma alanında yer alan Yenipazar Formasyonu ve yamaç molozuna ilişkin tanım ve değerlendirmeler önceki çalışmalar ve yerinde yapılan gözlemlere dayanarak, ayrıntılı olarak aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.





Qal	Alüvyon (Kuvaterner yaşlı)
Teh	Halidiye formasyonu (Alt-Orta Eosen yaşlı): Türbiditik kumtaşı, kiltası, kireçtaşı
Kye	Yenişehir formasyonu (Albiyen-Üst Paleosen yaşlı): Kumtaşı, şeyl, kireçtaşı, tuf
Jks	Soğukçam formasyonu (Kalloviyen-Apsiyen yaşlı): Yarı pelajik çörtlü kireçtaşı, kalsitürbidit

Şekil 3.1. Çalışma alanının MTA (2002) tarafından sunulan 1/100000 ölçekli genel jeoloji haritasındaki yeri.



### 3. 1. 1. Yenipazar Formasyonu (Kye)

Formasyona Abdüselamoğlu (1956) tarafından Üst Kretase filiş adı verilmiş ve Saner (1977) tarafından Gölpazar grubunun filiş fasiyesi olarak tanımlanmıştır. Saner (1980) tarafından Yenipazar ilçesi civarında yüzeylenmesi sebebiyle Yenipazar formasyonu şeklinde adlandırılmıştır. Formasyondaki birimler Saner (1980) tarafından Yenipazar ilçesi (Adapazarı H25 d1) civarında yüzeylenmiş volkanitli, bloklu, kumtaşı-şeyl ardalanmasından oluşan filiş fasiyesindeki çökeller olarak tanımlanmıştır. Birimin kalınlığı 1000-2500 m arasındadır. Formasyonun yaşı Albiyen-Geç Paleosen'dir. Yenipazar Formasyonu genel olarak grimsi yeşil renkli, ince-orta tabakalı kumtaşı-şeyl ardalanması ile yeşil ve kahve renkli volkanit, yeşil renkli marn ve beyaz, bej, kırmızı, pembe renkli, ince tabakalı mikritik kireçtaşı ve az miktarda konglomeradan oluşmaktadır (Sevin ve Aksay, 2002).

Çalışma alanında Yenipazar Formasyonu marn kaya kütleleri ile temsil edilmektedir. (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4). Gözlenen bu kütleler gri - koyu gri yer yer grimsi yeşil renkli, orta derecede bozunmuş, orta-zayıf derecede dayanımlı, sık süreksizlikler içeren ve süreksizlikler arası açık, kil dolguludur. Çalışma alanındaki yol yarması açıldıktan sonraki zamanlarda marnlar suya hassas oldukları için, atmosferik koşullardan etkilenerek gelişen kırıklar nedeniyle parçalanmışlardır. Parçalanmış malzemelerin yamaç aşağı döküldüğü Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Yenipazar formasyonuna ait marnlardan genel görünüm.



Şekil 3.4. Yenipazar formasyonuna ait marn birimlerden (a) yüzeyde ve (b) bir miktar kazı yapıldıktan sonra görünüm.

### 3.1.2. Yamaç Molozu (Qym)

Birim; Yenipazar Formasyonu'nun yamaçlarında oluşmuş yer yer bu formasyona ait bloklar içeren ince taneli birimlerden oluşmaktadır. 4. Bölüm'de değinilen saha çalışmalarından topoğrafyanın dik olduğu kesimlerde yamaç molozu kalınlıklarının yaklaşık 0.5 ile 2.0 m olduğu, topoğrafyanın düzleştiği ve vadi tabanlarına doğru kalınlıklarının 10.0 m'ye ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 3.5).

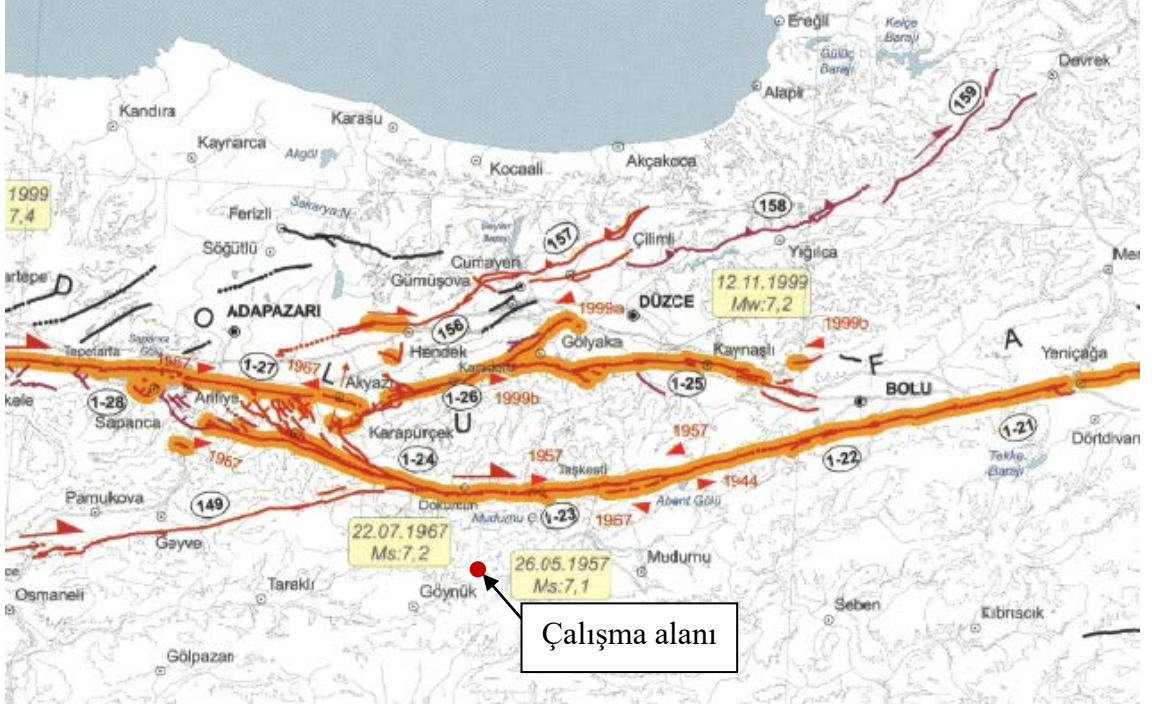


Şekil 3.5. Yamaç molozundan genel görünüm.

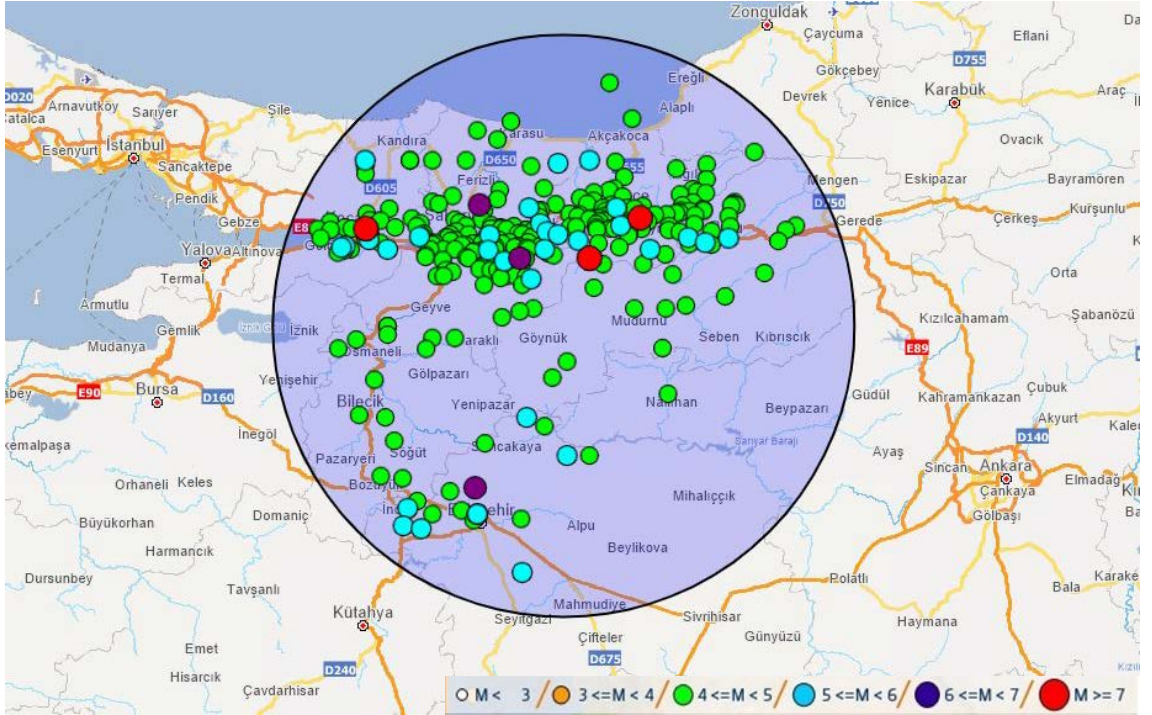
### 3. 2. Depremsellik

Çalışma alanı, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) güneyinde yer almaktadır. KAFZ'nin bu kesiminde 7'den büyük depremlerin meydana geldiği bilinmekte olup, inceleme sahasının KAFZ'nin en yakın segmentine uzaklığı 12 km'dir (Şekil 3.6).

Çalışma alanı merkez alınarak 100 km yarıçapında bir daire oluşturulmuş ve aletsel dönemde bu sınırlar içerisinde meydana gelen ve büyüklüğü (M) 4 ve daha fazla olan depremlerin dağılımları ve depremlere ait kayıt verileri "1900 - 20xx Deprem Kataloğu (M  $\geq$  4.0)" kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir (AFAD, 2019).



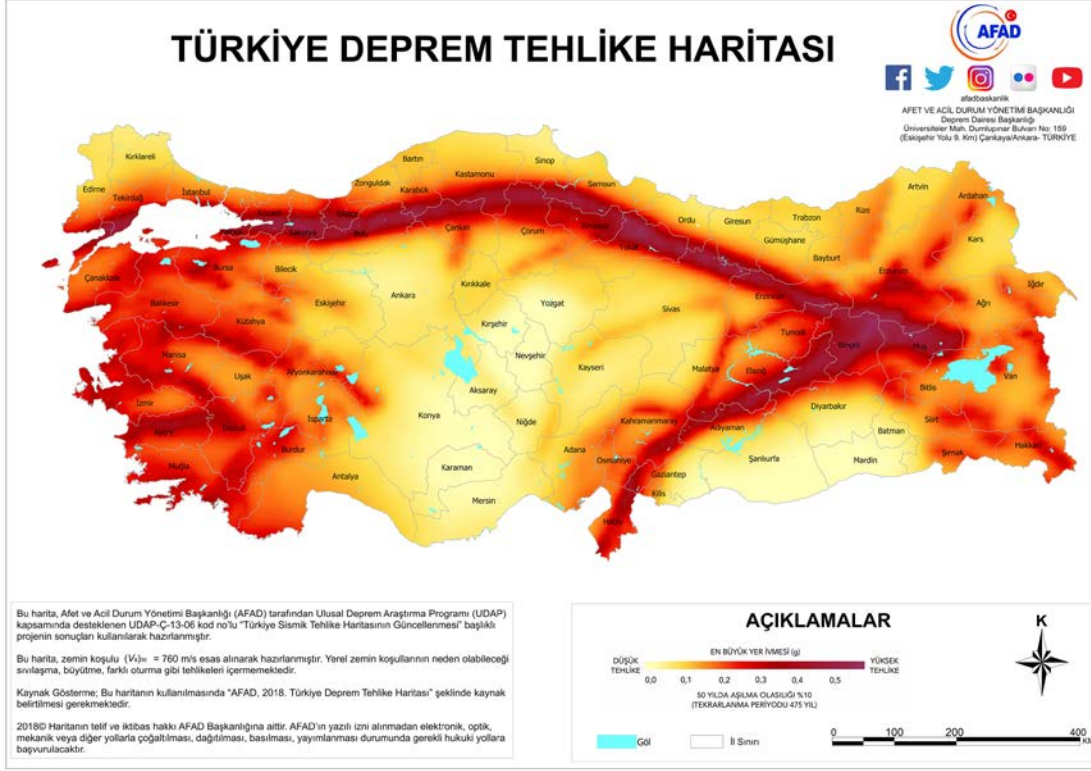
Şekil 3.6. Çalışma alanı çevresinde bulunan diri faylar (Emre ve ark., 2013'ten).



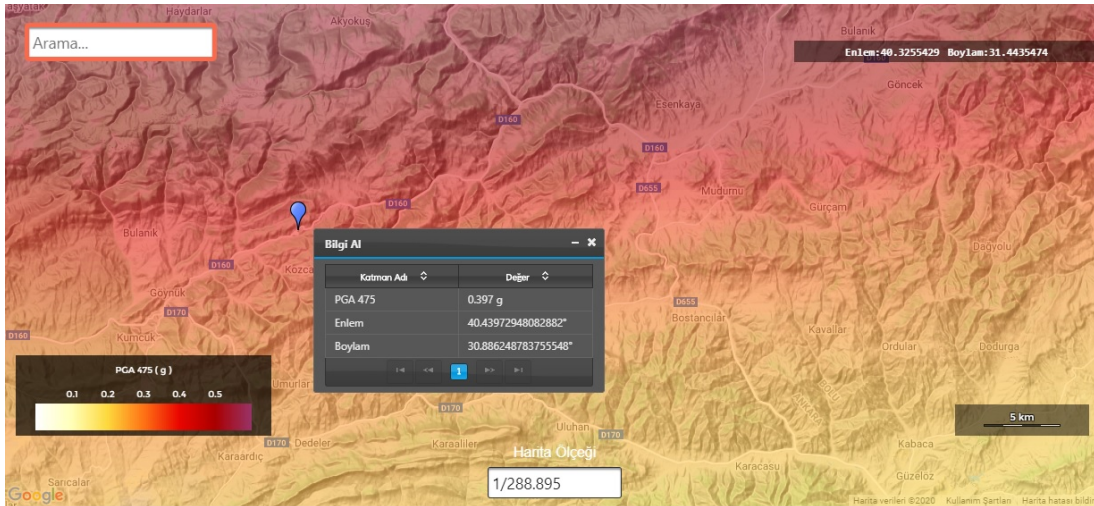
Şekil 3.7. Çalışma alanından 100 km uzaklığa kadar bulunan alan içinde büyüklüğü 4 ve daha fazla olan depremlerin dağılımı (AFAD, 2019).

AFAD (2019) tarafından yayınlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması'na göre, çalışma alanında spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve 475 yıl tekrarlanma aralığında %10 olasılıkla beklenen yatay deprem ivme katsayısının (PGA) 0.397g olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.8).

(a)



(b)



Şekil 3.8. a) Türkiye deprem bölgeleri haritası ve b) çalışma alanı için Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif uygulamasından belirlenen PGA-475 değeri (AFAD, 2019).

## 4. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Çalışma sahasındaki jeolojik birimlerin ve karayolu dolgu malzemelerinin jeomekanik özellikleri ve mevcut duraysızlığın mekanizmasını belirlemek amacıyla veri toplamaya yönelik arazi çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde, duraysızlığa ait değerlendirmeler ile dolgu ve jeolojik birimlerde gerçekleştirilen örnekleme çalışmalarına değinilmiştir.

### 4.1. Duraysızlığa İlişkin Değerlendirmeler

1. Bölüm’de de değinildiği gibi, çalışma alanındaki güzergah boyunca yamaç molozu üzerine serilen yol dolgusu, Yenipazar Formasyonuna ait marn birimlerden elde edilen malzemeye oluşturulmuştur. Bu formasyona ait birimler aynı zamanda çalışma alanı içinde yer alan yol güzergahındaki yarma şevlerinde de görülmektedir. Zemka Proje (2016) tarafından, atmosferik koşullar etkisiyle bozunan marnların, dolgunun altında yer alan ve duraysızlığın hemen arkasındaki vadiden gelen suların akması amacıyla oluşturulan menfezin içine girerek ortamdaki suyun atılmasını zorlaştırdığı belirtilmiştir. Çalışma alanındaki duraysızlık, bölgenin yoğun yağış aldığı kış mevsiminde gerçekleşmiştir. Bu durum ve menfezin nispeten işlevini yerine getirmediği dikkate alınarak; dolgunun ve altında yer alan yamaç molozunun aşırı suya maruz kaldığı ve bu nedenle boşluk suyu basınçlarının yükselmesi ve malzemelerin makaslama parametrelerinin düşmesi sonucunda söz konusu duraysızlığın tetiklendiği düşünülmüştür (Şekil 4.1).



(a)

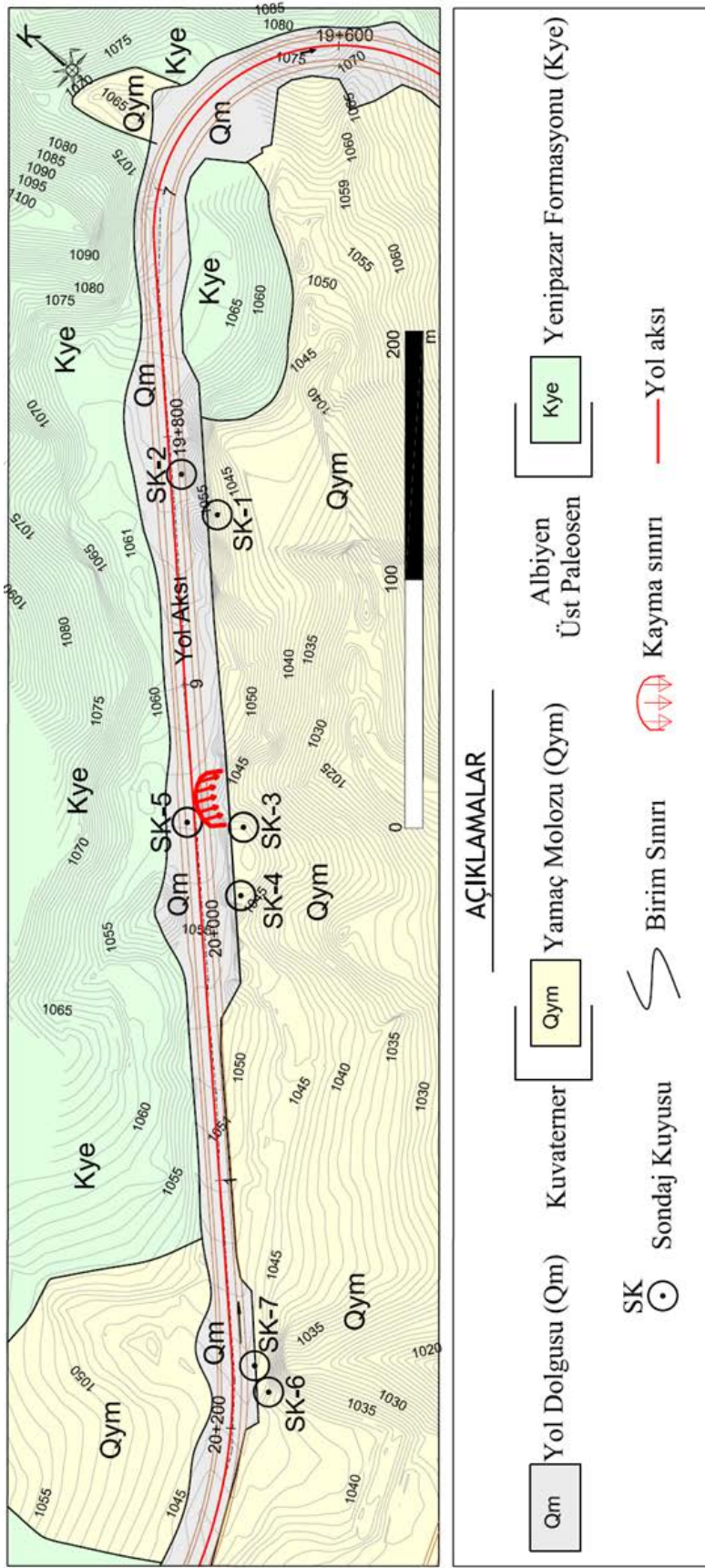


(b)

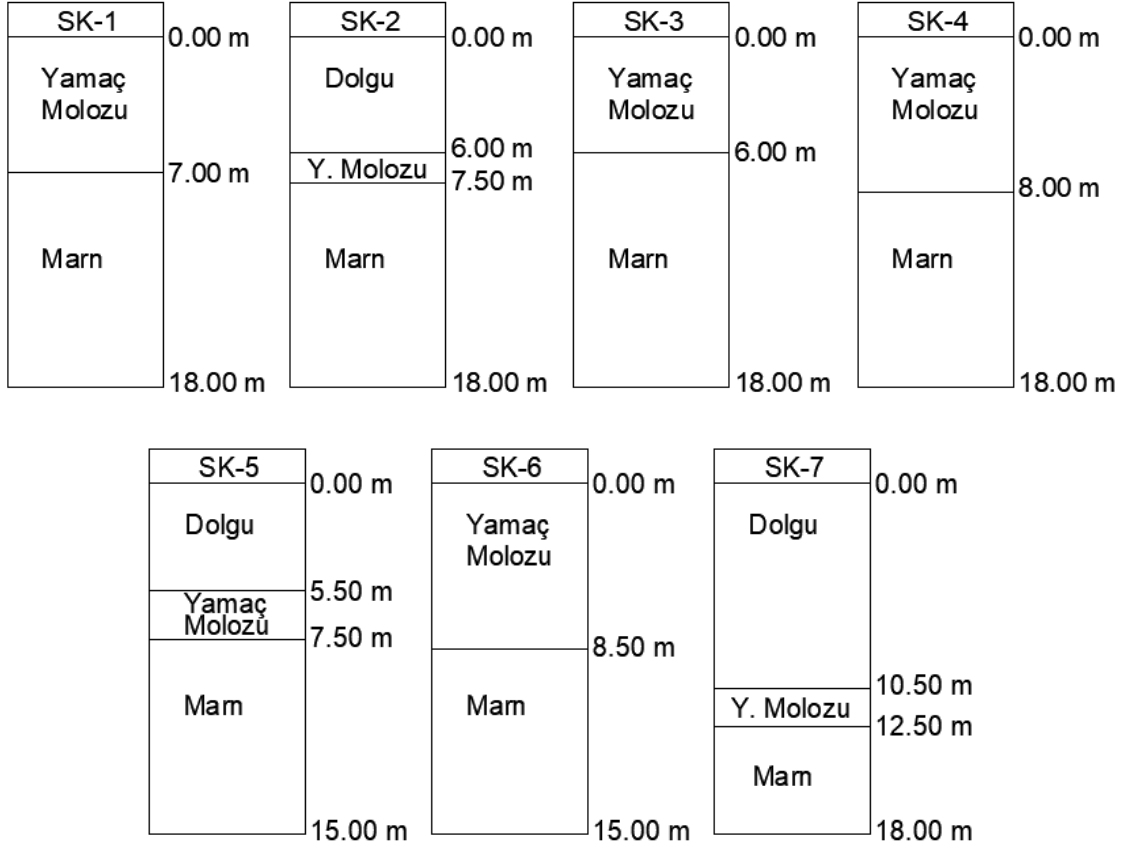


Şekil 4.1. (a) Duraysızlığın kayma yüzeyi ile yıkılan duvardan bir görünüm ve (b) vadi içerisine doğru hareket eden duraysızlık malzemesi.

Zemka Proje (2016) tarafından, duraysızlığın geliştiği lokasyon ve yakın çevresinde yol güzergahı boyunca yedi adet sondaj çalışması gerçekleştirilmiş (Şekil 4.2, SK-1-7) olup, bu sondajların basitleştirilmiş logları Şekil 4.3'te sunulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda SK-1 sondajında 0.0-7.00 m arasında açık gri–açık kahve renkli, sert, rezidüel marn blokları içeren, kumlu, siltli, yamaç molozu, 7.00-18.00 m arasında koyu gri renkli, zayıf dayanımlı, orta derecede ayrılmış, orta–kalın tabakalı orta derecede ayrılmış marn yer almaktadır. SK-2 sondajında 0.0-6.00 m arasında açık kahve-koyu kırmızı renkli, katı, marn bloklu, kumlu, killi dolgu, 6.00-7.50 m arasında açık gri–açık kahve renkli, çok katı-sert, rezidüel marn blokları içeren, kumlu, siltli, killi yamaç molozu ve bu birimin altında ise koyu gri renkli, zayıf dayanımlı, orta derecede ayrılmış, orta–kalın tabakalı marn yer almaktadır. SK-3 sondajında 0.00-6.00 m arasında açık gri–açık kahve renkli, çok katı, rezidüel marn blokları içeren, kumlu, siltli ve kil içerikli yamaç molozu ve 6.00-18.00 m arasında koyu gri renkli, zayıf dayanımlı, orta derecede ayrılmış, orta–kalın tabakalı marn gözlenmiştir. SK-4 sondajında 0.00-8.00 m arasında açık gri–açık kahve renkli, rezidüel marn blokları içeren, kumlu, siltli ve kil içerikli yamaç molozu, 8.00-18.00 m arasında koyu gri renkli, zayıf dayanımlı, orta derecede ayrılmış, orta-kalın tabakalı marn gözlenmiştir. SK-5 sondajında 0.00-7.50 m arasında açık gri–açık kahve renkli, rezidüel marn blokları içeren, kumlu, siltli ve kil içerikli yamaç molozu, 7.50-15.00 m arasında koyu gri renkli, zayıf dayanımlı, orta derecede ayrılmış, orta-kalın tabakalı marn gözlenmiştir. SK-6 sondajında 0.00-8.50 m arasında açık gri–açık kahve renkli, çok katı-sert, rezidüel marn blokları içeren, kumlu, siltli, yüksek plastisiteli killi yamaç molozu ve 8.50-15.00 m arasında koyu gri renkli, zayıf dayanımlı, orta derecede ayrılmış, orta–kalın tabakalı marn gözlenmiştir. SK-7 sondajında 0.00-10.50 m arasında açık kahve-koyu kırmızı renkli, katı, marn bloklu, kumlu, siltli, killi dolgu, 10.50-12.50 m arasında açık gri–açık kahve renkli, çok katı-sert, rezidüel marn blokları içeren, kumlu, siltli, killi yamaç molozu ve 12.50-18.00 m arasında koyu gri renkli, zayıf dayanımlı, orta derecede ayrılmış, orta – kalın tabakalı marn gözlenmiştir (Zemka Proje, 2016).

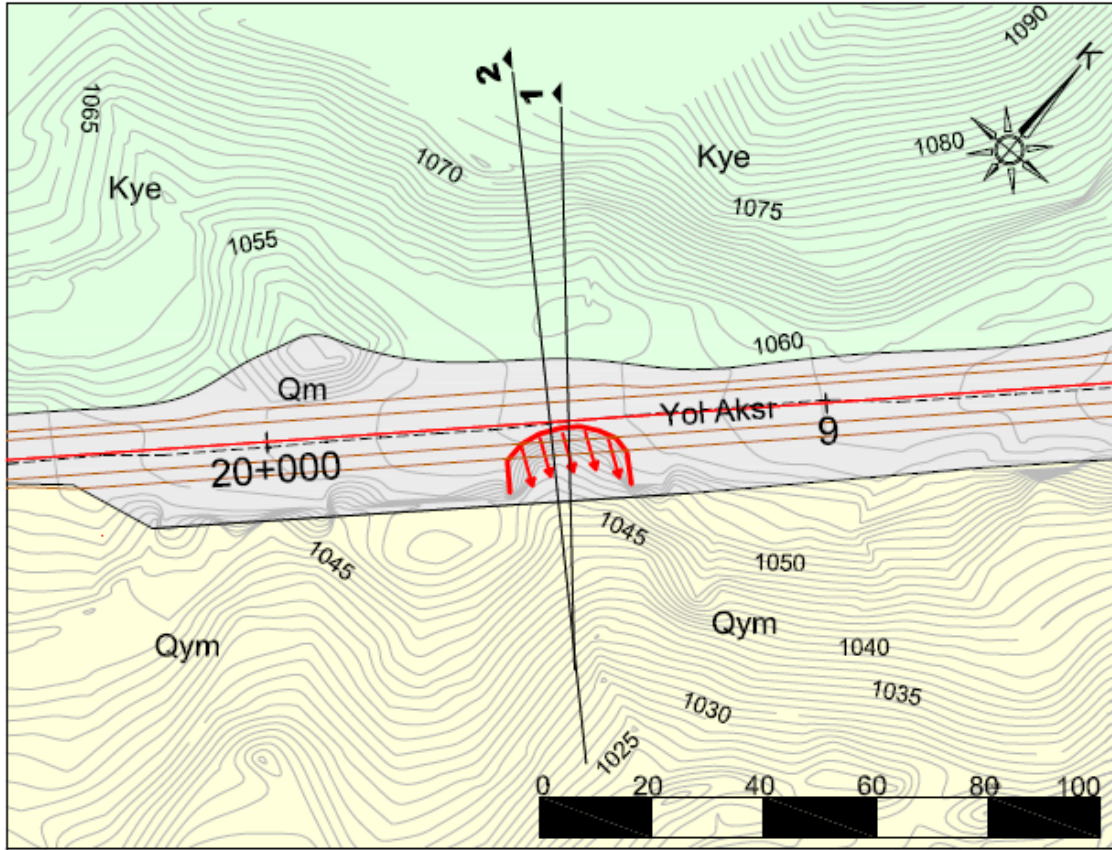


Şekil 4.2. Çalışma alanında Zemka Proje (2016) tarafından gerçekleştirilen sondajların konumları.


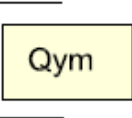
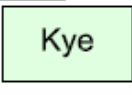






Şekil 4.3. Zemka Proje (2016) tarafından yapılmış olan sondajların basitleştirilmiş logları.

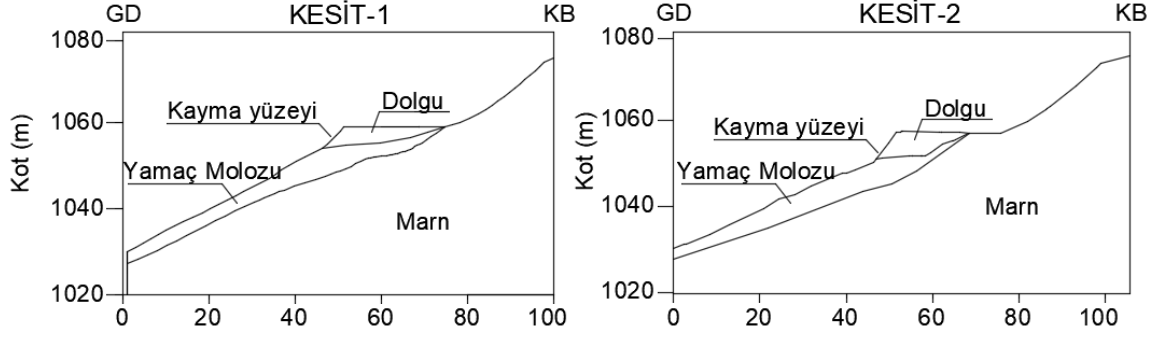
Yerinde yapılan gözlemsel incelemelerde, kayma aynasının bir miktar kavisli yapıda olması nedeniyle duraysızlığın dairesel kayma türünde ya da dairesel başlayıp dolgu-yamaç molozu veya yamaç molozu – marn dokanağı boyunca gelişmiş olabileceği sonucuna varılmıştır. Kayma aynasının ve duraysızlık sonrası şev geometrisinin belirlenmesi amacıyla Zemka (2016) tarafından topografik ölçümler alınmış olup, Şekil 4.4’te gösterilen kesit hatları boyunca elde edilen profiller Şekil 4.5’te verilmiştir. Kayma modeline ilişkin değerlendirmelere 6. Bölüm’de değinilmiştir.



### AÇIKLAMALAR

		Yol Dolgusu (Qm)
Kuvaterner		Yamaç Molozu (Qym)
Albiyen Üst Paleosen		Yenipazar Formasyonu (Marn)
	Kesit hatları	 Yol aksı
	Birim Sınırı	 Kayma sınırı

Şekil 4.4. Duraysızlığa ilişkin kesitlerin plan üzerinde yerleri.



Şekil 4.5. Duraysızlık sonrası jeolojik birimlerin ve şev geometrisinin kesitlerdeki durumu.

## 4. 2. Örneklemeye Çalışmaları

İnceleme alanında bulunan birimlerin şev duraylılığı analizlerinde kullanılacak jeomekanik parametrelerinin laboratuvar deneyleri ve görgül yaklaşımlarla belirlenmesi amacıyla örneklemeye çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların ayrıntısına aşağıdaki alt başlıklarda değinilmiştir.

### 4. 2. 1. Örselenmiş Örnek Alımı

Duraysızlık sahası içerisinde bulunan eski dolgunun ve duraysızlık sonrası güzergahta iyileştirme amacıyla imalatına başlanan yeni dolgunun ince taneli kesiminden (1-3 cm boyutlarında) birim hacim ağırlıklarının belirlenebilmesi için olabildiğince düzgün geometriye sahip çukurlar açılmıştır (Şekil 4.6). Açılan bu çukurlardan alınan malzemeler ağırlıkları ve nem içerikleri belirlenmek üzere laboratuvara nakledilmiştir.

(a)



(b)



Şekil 4.6. (a) Eski dolgu ve (b) yeni dolguda açılan çukurlardan görünüm.

#### 4. 2. 2. Blok Numune Alımı

Duraysızlık sahası içerisinde ana kayayı temsil eden marndan tek eksenli sıkışma dayanımının laboratuvarda karot örneklerden belirlenmesi amacıyla kullanılabilir yeterli boyutta blokların alınması mümkün olamamıştır. Bunun yerine, dayanımın dolaylı olarak belirlenebilmesi amacıyla indeks deneylerde kullanılmak üzere nispeten küçük bloklar alınmıştır (Şekil 4.7a). Marn örneklerinin nem içeriklerini kaybederek parçalanmamaları için yüzeyleri streç film ile kaplanmıştır. Buna ek olarak, yeni dolgu olarak kullanılan kireçtaşlarının çıkartıldığı taş ocağından sahaya getirilen büyük

bloklar alınarak, birim hacim ağırlık, tek eksenli sıkışma dayanımı ve Hoek-Brown  $m_i$  parametresinin (Hoek ve Brown, 1980) belirlenmesi için üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yapılması amacıyla laboratuvara getirilmiştir (Şekil 4.7b).

(a)



(b)



Şekil 4.7. (a) Marn birimden ve (b) kireçtaşlarından alınan blok örnekler.

#### 4. 2. 3. Örselenmemiş Örnek Alımı

Meydana gelen duraysızlık, eski yol dolgusu ile birlikte yamaç molozunun da içinden geçmektedir. Bu nedenle, yamaç molozunun fiziksel özellikleri ve makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, çakıl içermeyen ince taneli kesimlerinden 10x10x3 cm boyutlarında kesici metal kalıplar yardımıyla örselenmemiş örnekler alınmıştır (Şekil 4.8). Örnekler, tülbent ile sarılarak parafinlenmiş ve laboratuvara nakledilmiştir.





Şekil 4.8. İnceleme alanındaki yamaç molozundan kesici metal kalıpla örnek alımı.

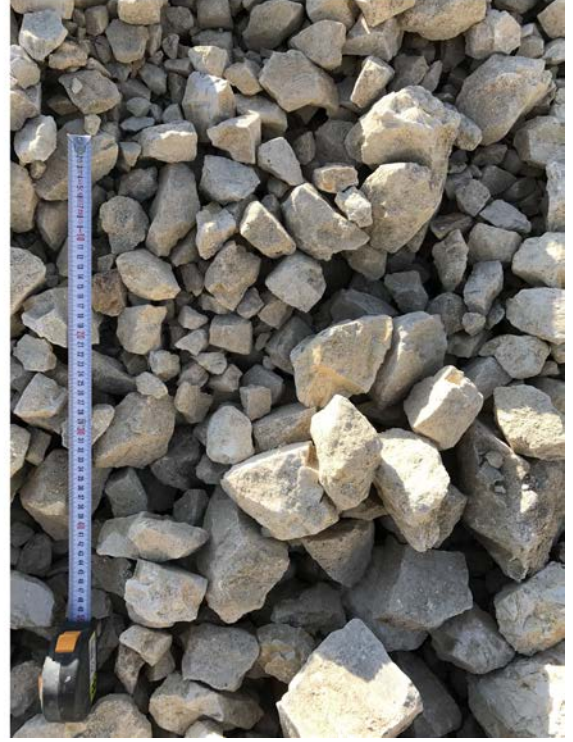
#### 4. 2. 4. Fotoanaliz İçin Görüntü Alımı

Dolgu malzemelerinin Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek ve Brown, 1980; Hoek, Caranza-Torres ve Corkum, 2002) yararlanarak dayanımının kestirimi için Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde dolguyu oluşturan kaya bloklarının boyutları ve yüzey özelliklerinden yararlanılarak dolgu malzemesinin Hoek-Brown ölçütünde girdi parametresi olan jeolojik dayanım indeksi (GSI) belirlenmektedir. İnceleme alanında bulunan nispeten iri taneli (2-10 cm boyutlarında) kireçtaşı dolgu malzemesini temsil edebilecek GSI değerinin belirlenmesi için blokların boyutlarının hem doğrudan ölçümle hem de fotoanaliz tekniğinden yararlanarak tespit edilmesi öngörülmüştür. Bu amaçla, sahada dolgu malzemesinin boyutları ölçülmüş (Şekil 4.9a) aynı zamanda ve dik açıda olacak şekilde fotoğraflar çekilmiştir (Şekil 4.9b). Bu fotoğraflardan 82 adet en-boy ölçümü alınmıştır. Aynı zamanda yerinde direk ölçümlerden de 104 adet parçadan ölçüm alınmıştır. Ayrıca, dolgu malzemesi olarak kullanılan kireçtaşı bloklarının yüzey özellikleri için görsel olarak az pürüzlü, taze-az-orta derecede bozunmuş, kireçtaşı bloklarının sıkıştırılması sırasında blokların arasında ince taneli malzemenin de varlığı nedeniyle (bkz. Şekil 4.6) 5 mm'den büyük yumuşak dolgu içerdikleri şeklinde tanımlamalar yapılmıştır.

(a)



(b)



Şekil 4.9. (a) İri taneli yeni dolgu malzemesinden boyut ölçümü ve (b) fotoanaliz için dik açıda çekilen fotoğraf örneği.

## 5. JEOMEKANİK ÖZELLİKLER

Duraylılık analizlerinde kullanılacak fiziksel ve mekanik parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla yapılan laboratuvar deneyleri ile görgül yaklaşımlarla kaya kütlesi dayanımının belirlenmesine yönelik değerlendirmeler, marn kaya malzemesi ve kütlesi, yamaç molozu, eski ve yeni dolgu malzemesi başlıkları altında aşağıda sunulmuştur. Laboratuvar deneyleri, kaya malzemeler için ISRM tarafından önerilmiş yöntemler (ISRM, 2007), zemin özelliğindeki malzemeler içinse ASTM (2000) standartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

### 5. 1. Marn Kaya Malzemesi ve Kütlesi

#### 5. 1. 1. Birim hacim ağırlık

Marn kaya malzemesinden arazide yeterli büyüklükte blokların alınamaması nedeniyle laboratuvar da karot alımı söz konusu olamamıştır. Ancak, Zemka Proje (2016) tarafından yapılan sondajlardan alınan karot numuneler üzerinde yapılmış olan laboratuvar deney sonuçları incelendiğinde, marnların doğal birim hacim ağırlıklarının 22.8 ile 23.8 kN/m<sup>3</sup> arasında değiştiği ve ortalama değerinin 23.4 kN/m<sup>3</sup> olduğu görülmüştür. Söz konusu çalışmada belirlenen birim hacim ağırlık değerinin, tez kapsamındaki analizlerde kullanılabileceği düşünülerek, düzensiz örnekler üzerinde civa taşıma deneyi ile ayrıca belirlenmesine gerek görülmemiştir.

#### 5. 1. 2. Dayanım Özellikleri

Düzensiz şekilli marn örnekleri üzerinde 10 adet nokta yükü dayanım indeksi ( $I_{s(50)}$ ) deneyi yapılmıştır. Bu deneylerden,  $I_{s(50)}$ 'nin 0.16–0.36 MPa arasında değiştiği ve ortalama değerinin 0.26 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu değer ve ISRM (2007) tarafından ortalama 22 olarak önerilen dönüşüm katsayısından yararlanılarak marn kaya malzemesi için tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) 5.7 MPa olarak hesaplanmıştır. Zemka Proje (2016) tarafından karot örneklerde yapılmış UCS deneylerinden belirlenen değerlerin ise, 9.0-15.6 MPa arasında değiştiği ve ortalama 11.8 MPa olduğu görülmüştür. Nokta yükü dayanımı indeksi deneyinin UCS'nin belirlenmesinde dolaylı bir yöntem olması ve ISRM (2007) tarafından UCS dönüşümünde kullanılan katsayının ortalama bir değer olduğu ve literatürde bu katsayının çok geniş bir aralıkta değiştiği belirtildiğinden, tez kapsamındaki analizlerde Zemka Proje (2016) tarafından

deneylerden elde edilen UCS değerinin kullanılmasının daha uygun olacağına karar verilmiştir.

Zemka Proje (2016) tarafından, çalışma alanındaki marn kaya kütlelerinin temel kaya kütleleri puanı (RMR) (Bieniawski, 1973) 37 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.1). Hoek (1994) tarafından önerilen Jeolojik Dayanım İndeksinin (GSI) tayini için RMR değeri kullanılarak Eşitlik 5.1'den yararlanılabilmektedir. Eşitlik 5.1'de RMR puanının Bieniawski (1989) tarafından önerildiği şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Ancak, Çizelge 5.1'den de görüleceği gibi Zemka Proje (2016) tarafından belirlenen puan Bieniawski (1973)'e göre belirlenmiştir. Ayrıca, bu eşitlikteki RMR puanı belirlenirken yeraltı suyu puanının 15 alınması gerekmektedir (Hoek, Kaiser ve Bawden, 1995). Bu hususlar dikkate alınarak, Çizelge 5.1'de sunulan RMR puanının GSI'ın belirlenmesinde kullanılması mümkün olmamıştır.

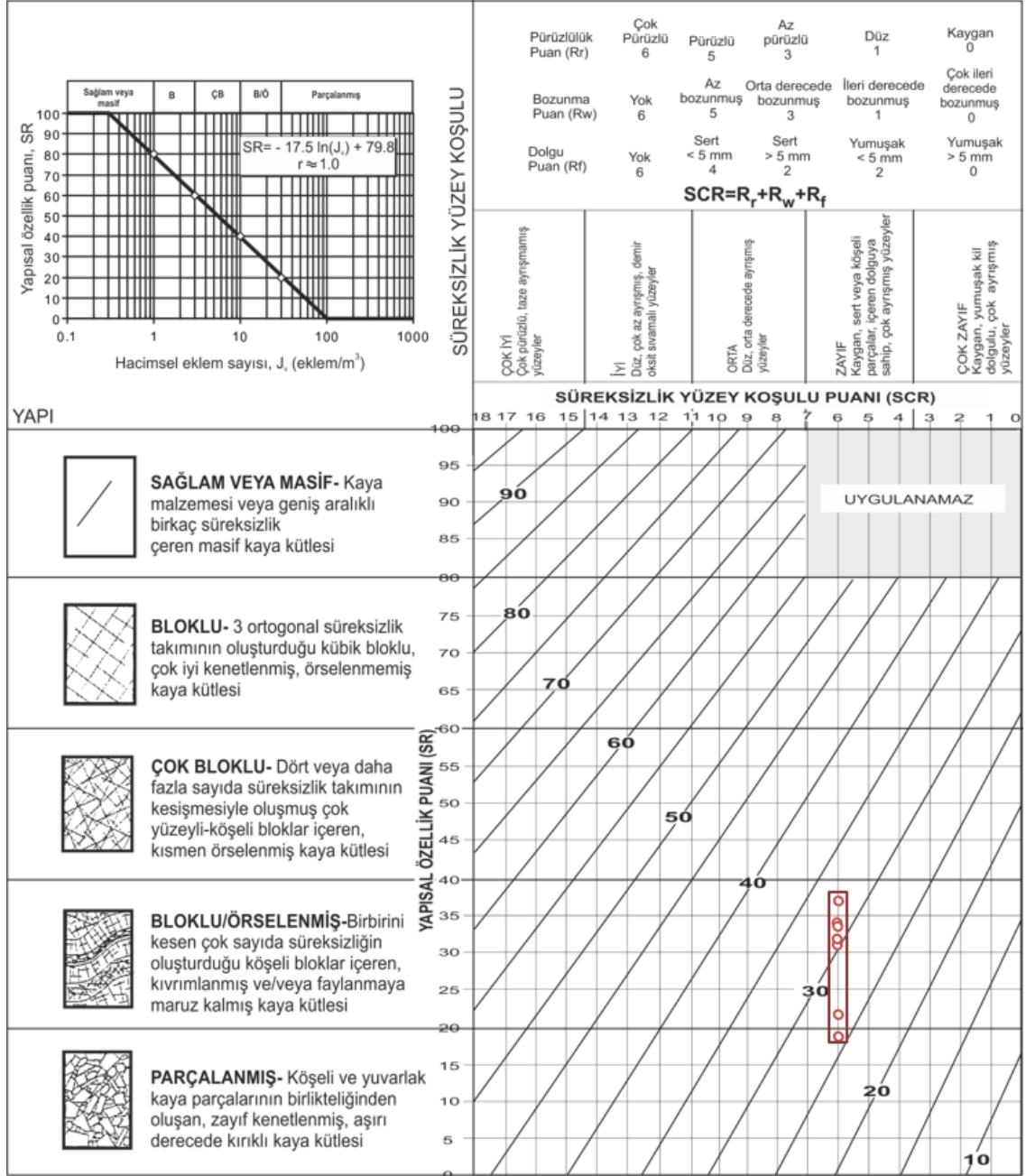
$$GSI=RMR_{89}-5 \quad (5.1)$$

Çizelge 5.1. Marn kaya kütleleri özellikleri ve RMR puanı (Zemka Proje, 2016).

Parametre	Değer/Tanım	Puan
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	12 MPa (ortalama)	2
Kaya kalite göstergesi RQD (%)	<25 (güvende kalınarak)	3
Süreksizlik aralığı (mm)	200 - 600 mm	10
Süreksizliklerin durumu		
Süreksizlik uzunluğu (devamlılık)	3 - 10 m	
Açıklık	0.1 – 1.0 mm	
Pürüzlülük	Az pürüzlü	12
Dolgu	Yumuşak dolgu < 5 mm	
Bozunma	Çok ayrılmış	
Yer altı suyu	Nemli	10
Temel RMR		37

Yapılan arazi çalışmalarında marn kaya kütesine ait döküntü malzemesiyle kaplı olmayan çok küçük mostralardaki marnlarda bulunan süreksizliklerin, düz-az pürüzlü, orta-ileri derecede bozunmuş ve 5 mm'den küçük kalınlıklara sahip yumuşak kil dolgulu oldukları gözlenmiştir. Hat etüdü yapılabilecek büyüklükte mostra gözlenemediği için ortalama süreksizlik yönelimleri ve süreksizlik aralıklarının doğru bir şekilde belirlenmesi için yeterli sayıda veri toplanamamıştır. Zemka Proje (2016) tarafından sondajlarda belirlenen RQD'ler incelenmiş ve sondajlardaki ilerlemeler için belirlenen değerlerin her bir sondaj için kendi içinde benzer oldukları, bu nedenle her bir sondaj lokasyonunun ortalama RQD ile temsil edilebileceği görülmüştür. Süreksizliklere ilişkin saha gözlemleri ile RQD verisi kullanılarak ve Eşitlik 5.2 ile Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen modifiye edilmiş GSI abağından yararlanılarak, süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR), yapısal özellik puanları (SR) ve GSI değerleri belirlenmiştir (Şekil 5.1 ve Çizelge 5.2). Bu değerlendirme ile süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR) 6 olarak belirlenmiştir. Yapısal özellik puanı (SR) değerleri her bir sondaj yeri için ayrı ayrı belirlenmiş olup (Çizelge 5.2), yaklaşık 19 ile 37 arasında değiştiği görülmüştür. GSI değerlerinin ise 26 ile 32 arasında değiştiği ve ortalama 30 olduğu tespit edilmiştir.

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \dots\dots\dots (5.2)$$

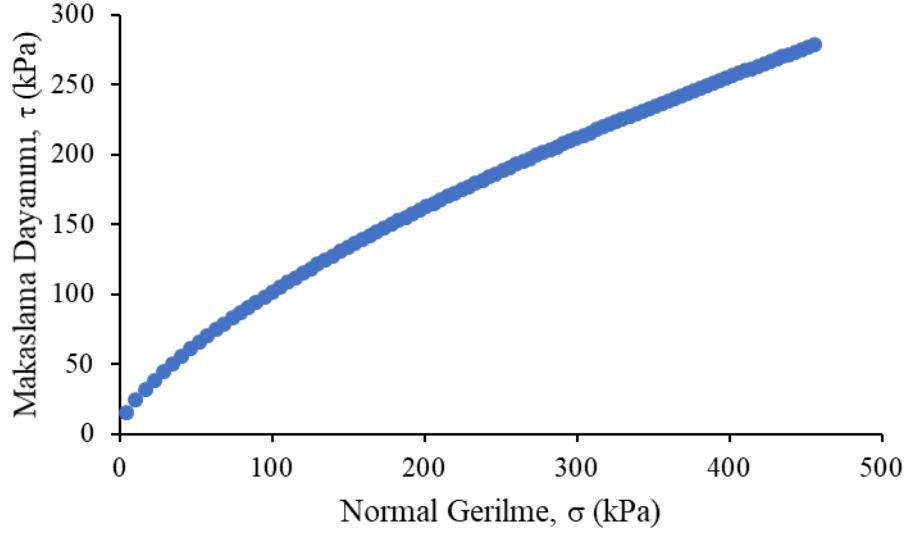


Şekil 5.1. Marn birimlerin niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı'ndan (Sönmez ve Ulusay, 2002) yararlanılarak GSI'ların belirlenmesi.

Çizelge 5.2. Her sondaj için ayrı ayrı belirlenen GSI değerleri.

Sondaj No	Ortalama RQD (%)	Jv (m <sup>-3</sup> )	SR	SCR	GSI
SK-1	7	32.7	18.8		26
SK-2	61	16.4	30.8		30
SK-3	35	26.7	22.3		27
SK-4	70	13.6	34.1	6	31
SK-5	69	13.9	33.7		31
SK-6	77	11.5	37.1		32
SK-7	64	15.5	31.8		31

Marn kaya kütesinin makaslama dayanımı yenilme zarfının belirlenmesi için, Hoek ve Brown (1980) yenilme ölçütünden yararlanılmıştır. Bu yenilme zarfı için Roclab 1.0 (Rocscience, 2002) bilgisayar programı kullanılmış olup, bu ölçütün girdi parametreleri olan UCS ve GSI değerleri, üstte yapılan değerlendirmelerle sırasıyla 11.8 MPa ve 30 olarak alınmıştır. Diğer bir girdi parametresi olan sağlam kaya malzemesi  $m_i$  sabiti ise, Marinos ve Hoek (2001) tarafından kaya türlerine bağlı olarak önerilen çizelgeden 7 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, marn kaya malzemesinin örselenme faktörü D, Hoek, Caranza-Torres ve Corkum (2002) tarafından tanımlanan mekanik kazı durumu için 0.7 olarak alınmıştır. Bu değerler kullanılarak, marn kaya kütesi için Hoek-Brown yenilme ölçütüne uygun olarak belirlenen yenilme zarfı Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.2. Marn kaya kütlesi için Hoek-Brown yenilme ölçütünden yararlanılarak belirlenen yenilme zarfı.

## 5. 2. Yamaç Molozu

### 5. 2. 1. Fiziksel Özellikler ve Zemin Sınıflaması

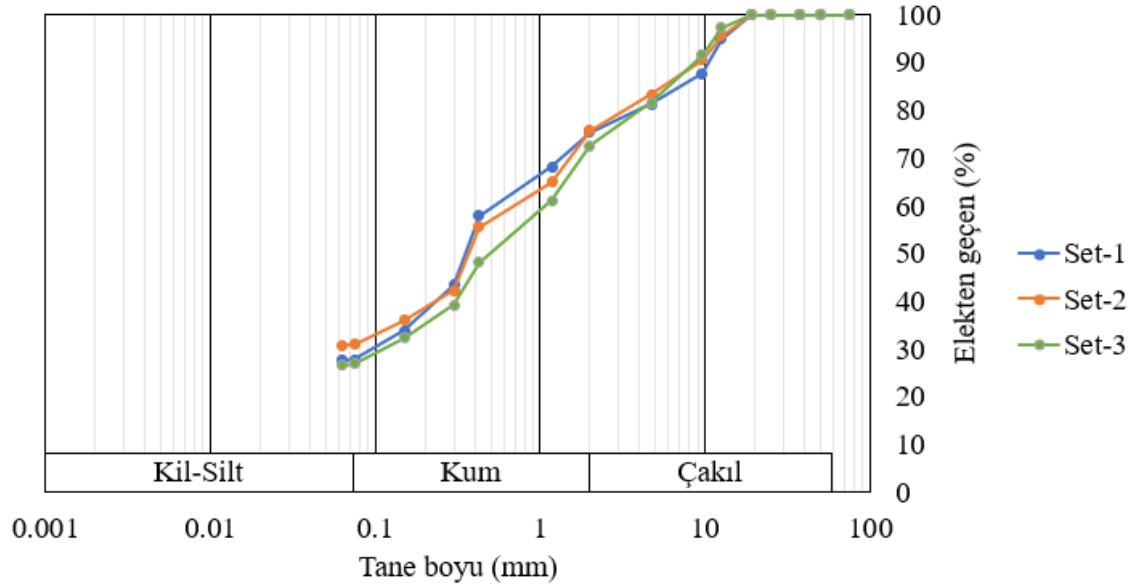
Arazi çalışması sırasında, yamaç molozundan alınan örnekler üzerinde 3'er set olmak üzere, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, elek analizi, kıvam limitleri ve su içeriği deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylerden, yamaç molozunun doğal birim hacim ağırlık değerlerinin 17.8-18.0 kN/m<sup>3</sup> arasında değiştiği ve ortalamasının ise 17.9 kN/m<sup>3</sup> olduğu, su içeriğinin %17.4 ile 18.7 arasında değiştiği ve ortalama %18.1 olduğu, özgül ağırlığın ise, 2.61– 2.65 aralığında ve ortalama 2.63 olduğu belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak, kuru birim hacim ağırlığı 15.2 kN/m<sup>3</sup>, doymun birim hacim ağırlığı 19.2 kN/m<sup>3</sup>, boşluk oranı ise 0.70 olarak hesaplanmıştır.

Yamaç molozu örneklerinde yapılan kıvam limitleri ve elek analizi deneylerinin sonuçları ise, Çizelge 5.3 ve Şekil 5.3'te verilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında, Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre yamaç molozunun ince taneli kısmından alınan örneğin zemin sınıfı killi kum (SC) olarak tayin edilmiştir.



Çizelge 5.3. Yamaç Molozu örneklerine ait kıvam limitleri ve elek analizi sonuçları.

	Değişim Aralığı (%)	Ortalama Değer (%)	Deney Sayısı (Set)
Likit Limit (LL)	36.2 - 37.9	36.9	3
Plastik Limit (PL)	21.9 - 22.7	22.3	3
Plastisite İndeksi (PI)	13.9 - 16.0	14.6	3
Çakıl Oranı	16.7 - 18.8	17.9	3
Kum Oranı	52.4 - 54.8	56.6	3
İnce Tane Oranı	26.9 - 30.9	28.5	3

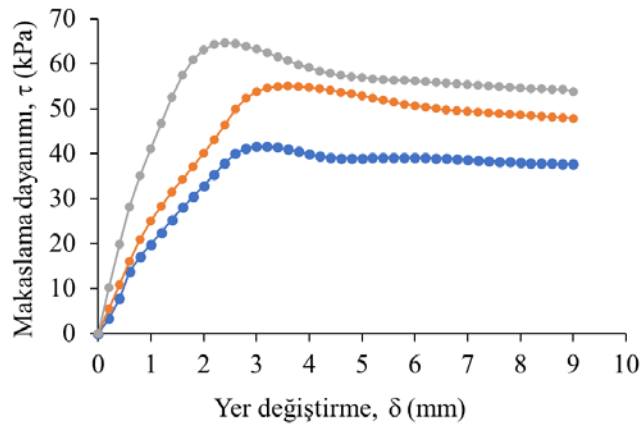


Şekil 5.3. Yamaç molozundan alınmış örneklerin tane boyu dağılım eğrileri.

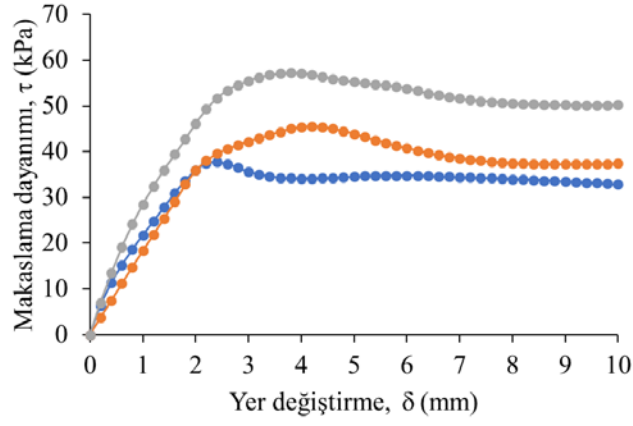
### 5. 2. 2. Makaslama Dayanımı

Arazide yamaç molozundan 10x10x2 cm boyutundaki kesici metal kalıplarla alınan örneklerden laboratuvarında 6x6x2 cm boyutunda örnekler hazırlanarak deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 0.05 mm/dak hızında ve ileri ve geri makaslama şeklinde üç set (3+3+3) gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). Doğrudan makaslama deneyi oldukça yavaş yapıldığından, suyun drene olduğu varsayılmış ve deneyin drenajlı deney olduğu kabul edilmiştir. Her bir set için doruk ve artık makaslama dayanımı doğrusal yenilme zarfları dikkate alındığında (Şekil 5.6), doruk kohezyon değerlerinin ( $c_p$ ) 23.9 – 32.2 kPa arasında, doruk içsel sürtünme açısı değerlerinin ( $\phi_p$ ) ise, 12.8°-16.0 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Artık kohezyon ( $c_r$ ) ve içsel sürtünme açılarının ( $\phi_r$ ) ise, sırasıyla 13.2-15.9 kPa ve 10.1°-13.6° arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu değerlendirmelere ek olarak, 9 adet örnek için elde edilen normal gerilme makaslama dayanımları dikkate alınarak genelleştirilmiş doruk ve artık doğrusal yenilme zarfları da çizilmiştir (Şekil 5.7). Her set için ve genelleştirilmiş yenilme zarfı için belirlenen makaslama dayanımı parametreleri Çizelge 5.4'te sunulmuştur.

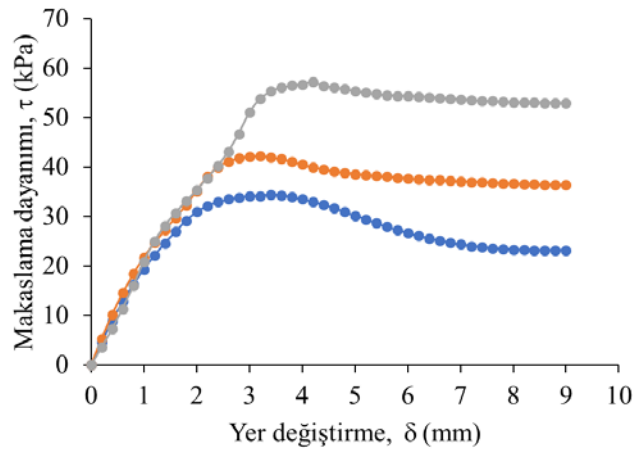
(a) Set-1



(b) Set-2

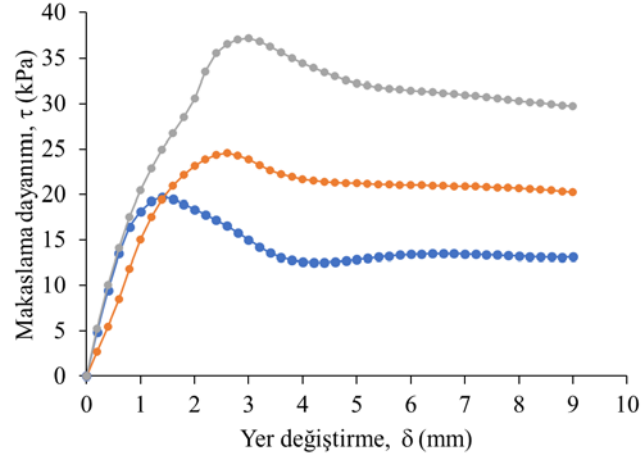


(c) Set-3

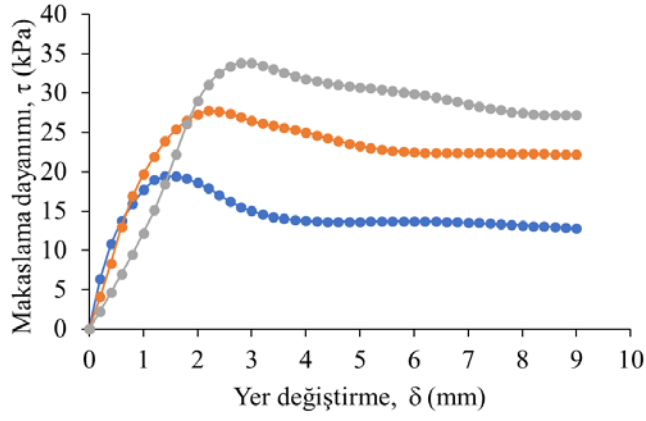


Şekil 5.4. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden bulunan (a) Set 1, (b) Set 2 ve (c) Set 3'e ait ileri makaslama dayanımı-yer değiştirme grafikleri.

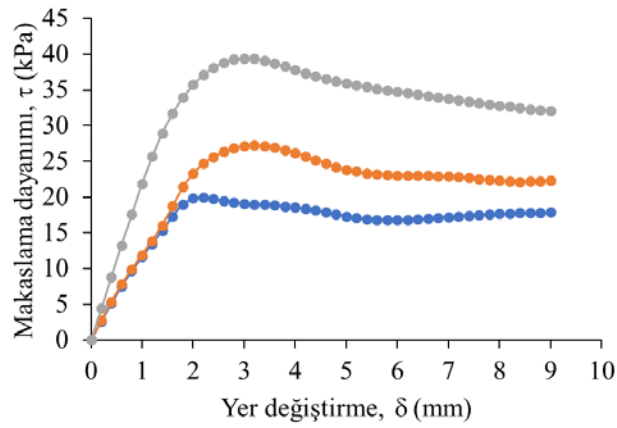
(a) Set-1



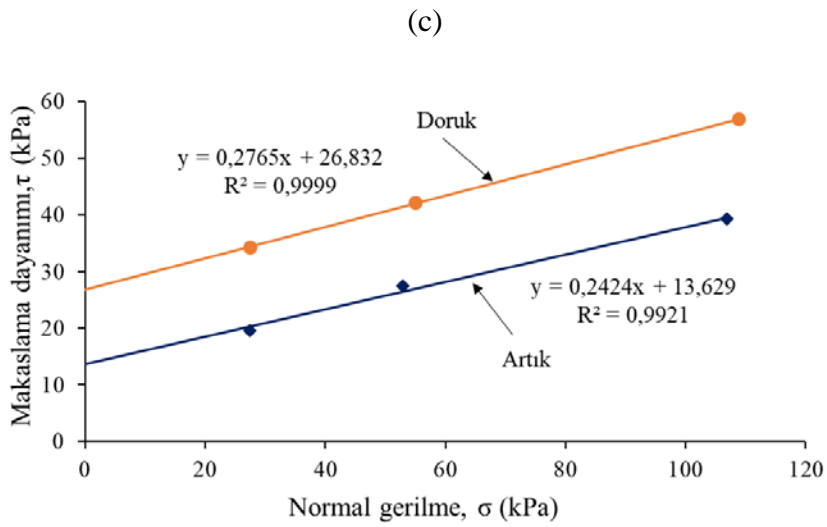
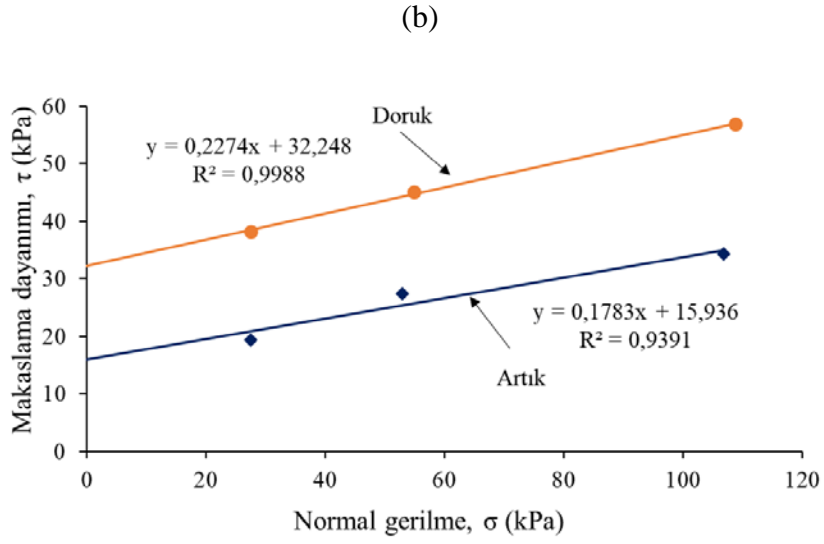
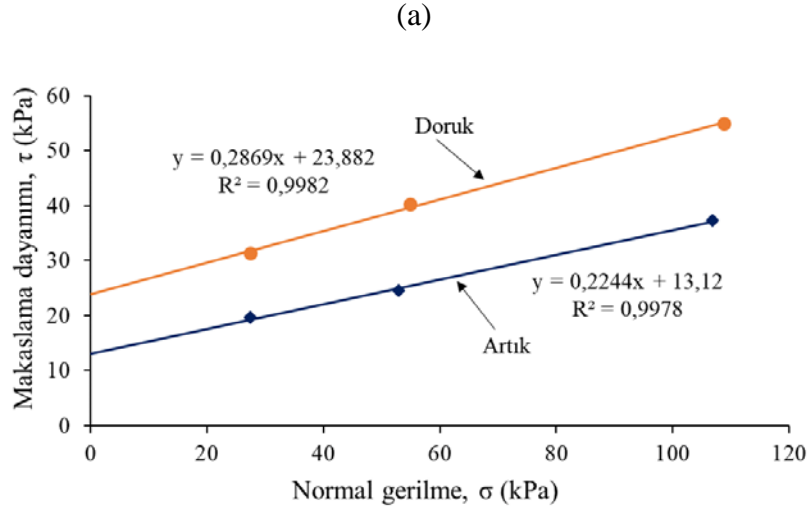
(b) Set-2



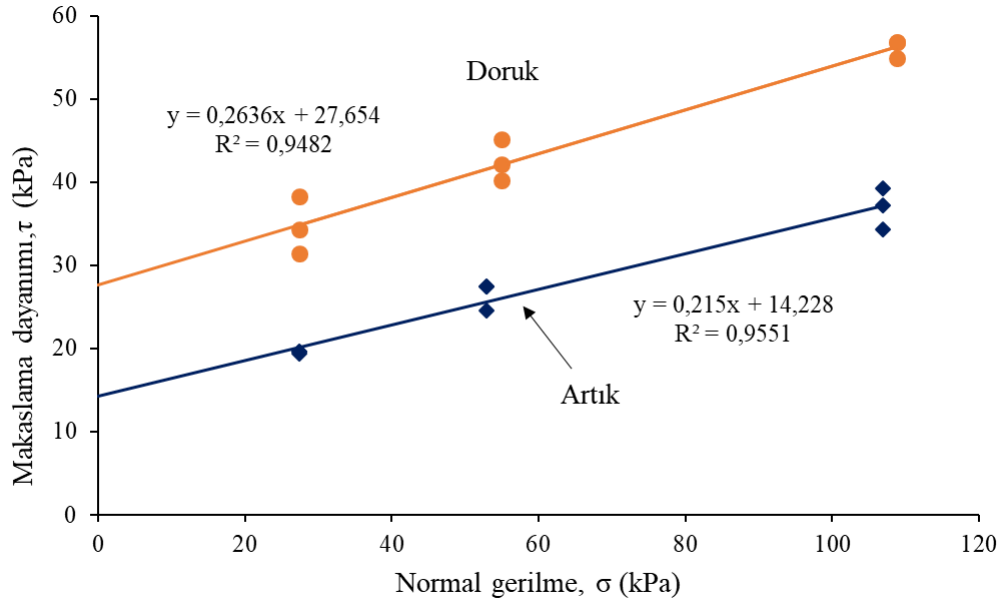
(c) Set-3



şekil 5.5. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden elde edilen (a) Set 1, (b) Set 2 ve (c) Set 3'e ait geri makaslama dayanımı-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 5.6. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden elde edilen (a) Set 1, (b) Set 2 ve (c) Set 3'e ait doruk ve artık doğrusal yenilme zarfları.



Şekil 5.7. Yamaç molozu için deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden elde edilen genelleştirilmiş yenilme zarfları.

Çizelge 5.4. Yamaç molozu için doğrudan makaslama deneylerinde belirlenen doruk ve artık kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (φ) parametreleri.

SET	Doruk		Artık	
	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)
1	23.9	16.0	13.1	12.6
2	32.2	12.8	15.9	10.1
3	26.8	15.5	13.6	13.6
Genelleştirilmiş	27.7	14.8	14.2	12.1

### 5. 3. Eski Dolgu ve Yeni Dolgu Malzemeleri

#### 5. 3. 1. Fiziksel Özellikler

Bölüm 4'te değinildiği gibi, eski dolgu (marn kırmataşları) ve yeni dolgu (ince taneli kireçtaşı kırmataşları) içinde olabildiğince düzenli geometriye sahip çukurlar açılmış ve çukurlardan alınan tüm örnekler, doğal su içeriklerini kaybetmeden laboratuvar ortamına getirilerek tartılmış ve çukur geometrileri de dikkate alınarak doğal birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca, örneklerin nem içerikleri ile öğütülmüş

örneklerde yapılan piknometre deneyleriyle özgül ağırlıkları belirlenmiştir (Çizelge 5.5). Elde edilen değerler kullanılarak eski ve yeni dolgunun doğal birim hacim ağırlıkları sırasıyla 19.5 kN/m<sup>3</sup> ve 16.5 kN/m<sup>3</sup>, kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 18.8 kN/m<sup>3</sup> ve 15.6 kN/m<sup>3</sup> ve doymuş birim hacim ağırlıkları sırasıyla 21.5 kN/m<sup>3</sup> ve 19.6 kN/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Yeni dolgunun birim hacim ağırlığının düşük olması, örnek alınan yerde bu dolgunun henüz yeterince sıkıştırılmamış olmasından kaynaklanabilir.

Çizelge 5.5. Eski ve yeni dolguya ait fiziksel özellikler.

Özellik	Eski Dolgu			Yeni Dolgu		
	Değişim Aralığı	Ortalama Değer	Deney Sayısı	Değişim Aralığı	Ortalama Değer	Deney Sayısı
Su İçeriği (%)	3.70-4.10	3.94	3	4.17-6.27	5.42	3
Özgül Ağırlık	2.65-2.67	2.66	3	2.66-2.69	2.68	3
Doğal birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	19.5			16.5		
Kuru birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	18.8			15.6		
Doymuş birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	21.5			19.6		

### 5. 3. 2. Tek ve Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri

İnceleme alanında bulunan yeni dolguya ait kireçtaşı dolgu malzemesinin UCS değerinin belirlenmesi için beş adet karot örnek üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş olup, UCS değerlerinin 41.6 – 56.4 MPa arasında değiştiği, ortalama değerinin ise 49.0 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu deneylerin yanı sıra, kireçtaşı karot örneklerinde üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri de yapılmıştır. Daha önceki bölümlerde de değinildiği gibi, yeni dolgunun makaslama dayanımının belirlenmesi için laboratuvarında makaslama deneylerinin yanı sıra, Hoek-Brown ölçütünden de yararlanılması planlanmıştır. Bu değerlendirmelerin ayrıntısı makaslama dayanımlarının değerlendirildiği sonraki alt bölümlerde sunulmuştur. Bu bölümde ise, Hoek-Brown girdi parametresi olan  $m_i$  sabitinin belirlenebilmesi için gerçekleştirilen üç eksenli

sıkışma deneyleri ve elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Dört adet karotta gerçekleştirilen deneylerden elde edilen aksenal ve yanal basınç çiftleri Çizelge 5.6’da verilmiştir. Bu veri çiftlerinden yararlanılarak  $m_i$  sabitinin belirlenmesi için Eşitlik 5.3’teki ilişkilerden yararlanılmış olup,  $m_i$  sabiti 8.1 olarak hesaplanmıştır. Marinos ve Hoek, (2001) tarafından önerilen  $m_i$  çizelgesinde kireçtaşı için  $m_i$  sabiti  $9 \pm 2$  olarak önerilmekte olup, bu değer üç eksenli deneylerden belirlenenle oldukça uyumludur.

Çizelge 5.6. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen aksenal ve yanal gerilme veri çiftleri.

Birim	Eksenel gerilme	Yanal gerilme
	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_3$ (MPa)
	45.5	1.0
Yeni dolgu malzemesi (kireçtaşı)	51.1	3.0
	58.5	5.0
	69.4	7.0

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left[ \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \right], \quad \begin{array}{l} x = \sigma_3 \\ y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \end{array} \quad \dots \dots \dots (5.3)$$

### 5. 3. 3. Makaslama Dayanımı Deneyleri

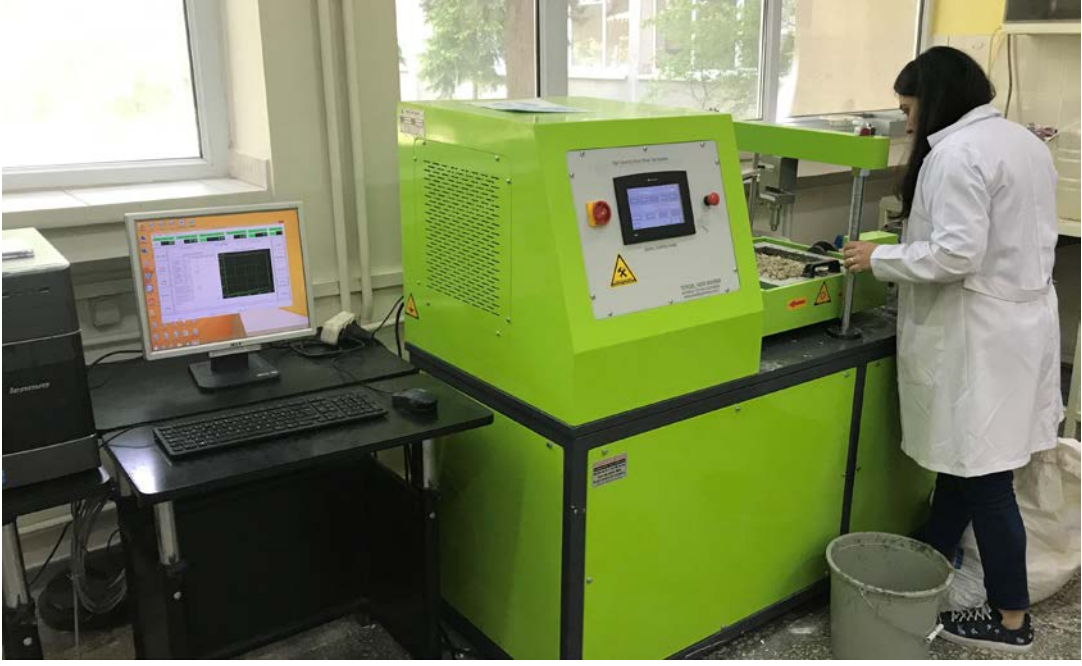
Eski dolgu (marn dolgu malzemesi) ve yeni dolgu (kireçtaşı dolgu malzemesi) malzemelerinin makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla araziden alınan örselenmiş örnekler, 30x30x8 cm boyutlarında yerindeki yoğunluk değerlerine uygun şekilde sıkıştırılıp ve özellikle kireçtaşı dolgu malzemesindeki 3 cm’den büyük taneler ayıklanarak Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı’nda doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır. Deneyler, 200 kg, 500 kg, 800 kg ve 1100 kg normal yük altında her bir dolgu malzemesi için dörder adet ve 0.5 mm/dak. hızda gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8). Makaslama gerilmesi – yer



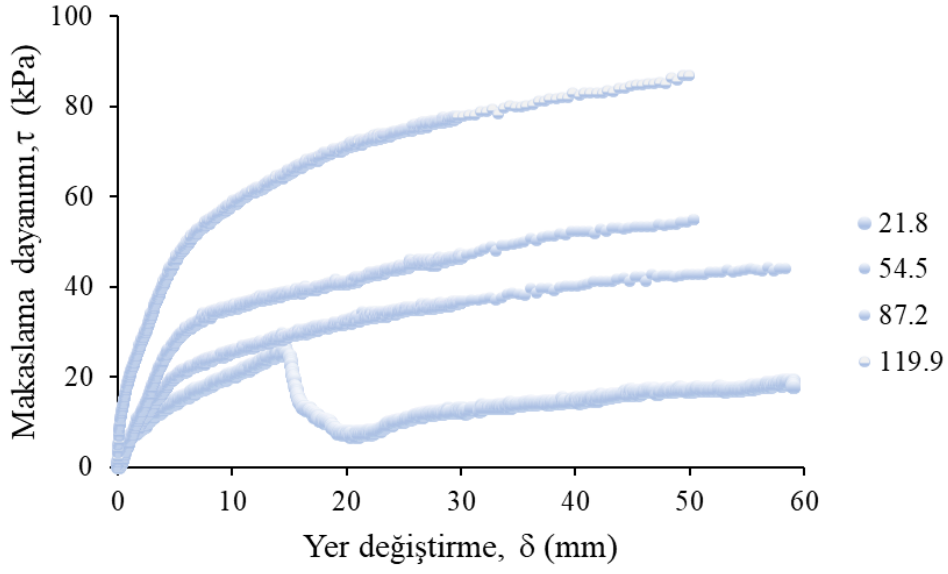
değiştirme grafikleri eski dolgu için Şekil 5.9'da, yeni dolgu içinse Şekil 5.10'da sunulmuştur.

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 incelendiğinde, makaslama gerilmelerinin, deney sonuna doğru yaklaşık olarak sabitlenmekle birlikte, bazı normal gerilmelerde çok az bir artış eğiliminde oldukları görülmüştür. Ayrıca, eski dolgu için (bkz. Şekil 5.9) 21.8 kPa normal gerilme altında yapılan deneyde makaslama gerilmesi – yer değiştirme grafiğinin diğerlerinden farklı olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 5.9). Bu deneyde, yaklaşık 15 mm'lik yerdeğiştirmeye kadar makaslama gerilmesi düzenli olarak artarken, bu yerdeğiştirmeden sonra hızla düşmüş ve tekrar yükselerek yaklaşık olarak sabitlenmiştir. Bu davranışın, düşük normal gerilme altında yenilme yüzeyi boyunca konumlanmış nispeten büyük bazı marn tanelerinin bir miktar direnç göstermesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmüştür.

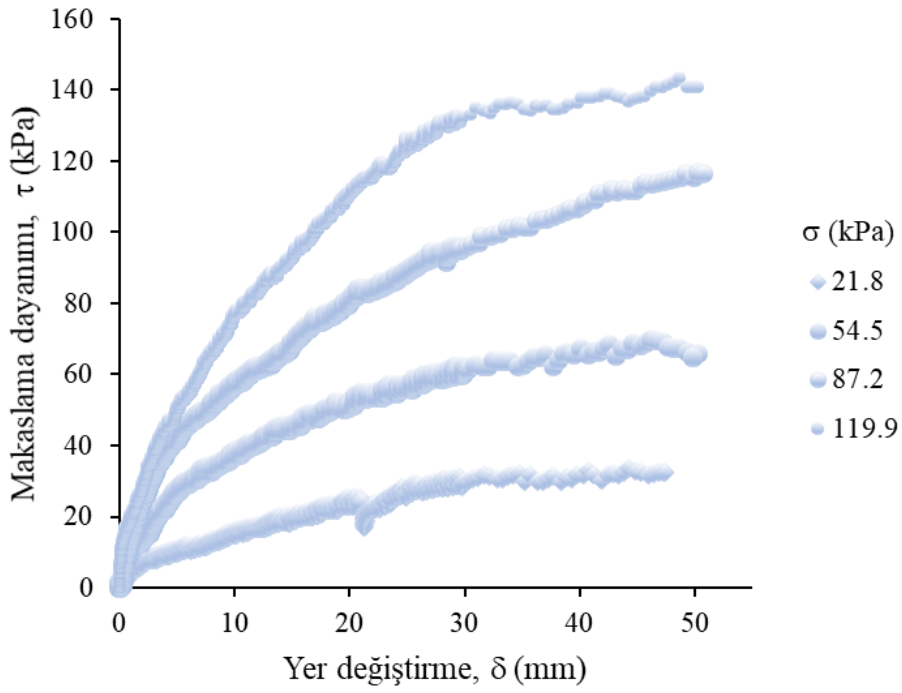
Eski dolgu malzemesi için yapılan deneylerdeki son yerdeğiştirmelere ait makaslama dayanımları kullanılarak çizilen yenilme zarfı, 21.8 kPa'lık normal gerilme altında deney verisi kullanılarak (Şekil 5.11a) ve kullanılmayarak (Şekil 5.11b) ayrı ayrı belirlenmiştir. Her iki durum için elde edilen doğrusal ve eğrisel yenilme zarflarının birbiriyle oldukça uyumlu ve regresyon katsayılarının ( $R^2$ ) birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durumdan yola çıkılarak, eski dolgu için tüm veri kullanılarak elde edilen doğrusal yenilme zarfının ve ilgili makaslama dayanımı parametrelerinin kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, eski dolgu için  $c=3.6$  kPa,  $\phi=33.6^\circ$  olarak belirlenmiştir. Yeni dolgu için elde edilen doğrusal ve eğrisel yenilme zarfları incelendiğinde (Şekil 5.12), benzer değerlendirmelerle bu malzeme için de doğrusal yenilme zarfının kullanılabilmesi ve şev duraylılığı hesaplamalarında makaslama dayanımı parametrelerinin  $c=21.4$  kPa ve  $\phi=45.8^\circ$  olarak alınabileceği anlaşılmıştır.



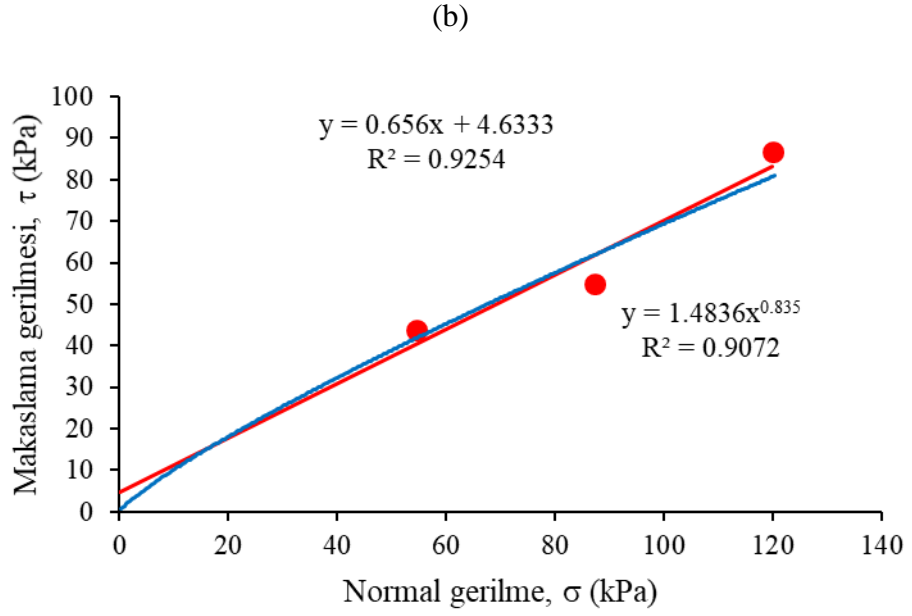
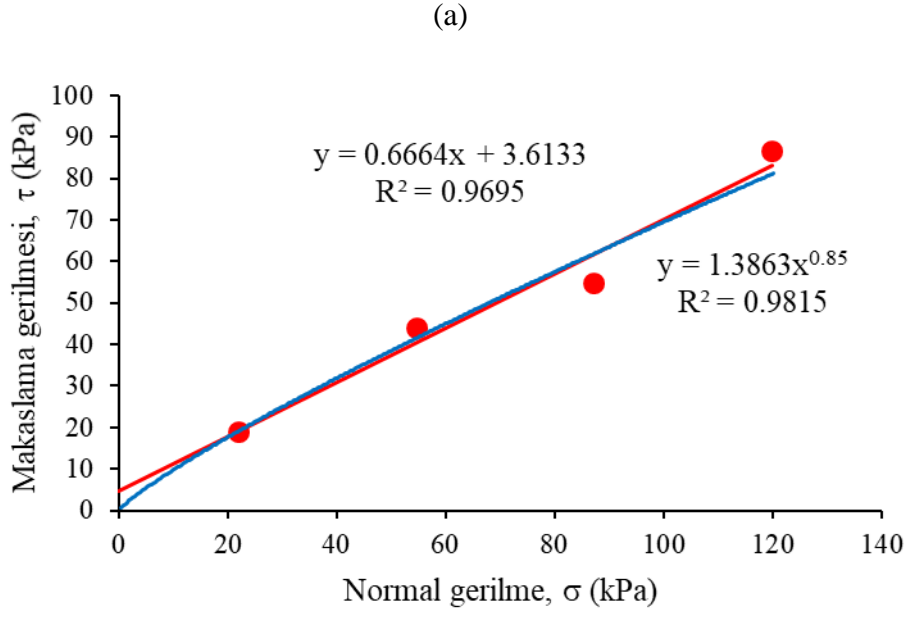
Şekil 5.8. Makaslama deney cihazından bir görünüm.



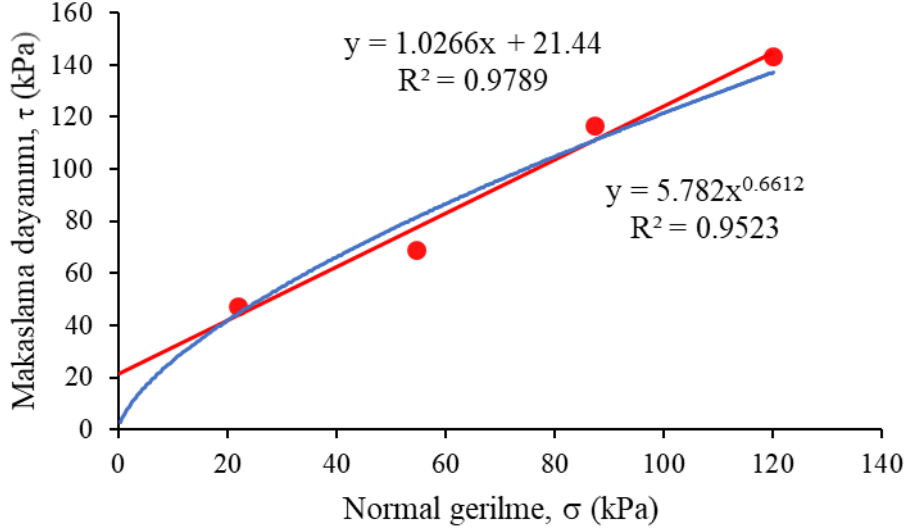
şekil 5.9. Eski dolguya ait marn kırmataşı için makaslama deneylerinden elde edilen makaslama dayanımı-yer değiştirme grafiği.



şekil 5.10. Yeni dolguya ait kireçtaşı kırmataşı için makaslama deneylerinden elde edilen makaslama dayanımı-yer değiştirme grafiği.



Şekil 5.11. Eski dolgu için deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden (a) tüm veri ve (b) 21.8 kPa normal gerilme altındaki deney verisi çıkartılarak belirlenen doğrusal ve eğrisel yenilme zarfları.



Şekil 5.12. Yeni dolgu için deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneylerinden belirlenen doğrusal ve eğrisel yenilme zarfları.

#### 5. 3. 4. Hoek-Brown Ölçütüne Göre Belirlenen Makaslama Dayanımı

Daha önce de değinildiği gibi, yeni dolgu malzemesinde yer yer 3 cm'den büyük (10-15 cm'ye varan) kireçtaşı blokları da bulunmaktadır. Bu nedenle, bu dolgunun iri taneli kısımlarının da dikkate alınarak makaslama dayanımlarının ayrıca Hoek-Brown yenilme ölçütünden yararlanılarak da belirlenmesi ve bir önceki alt bölümde verilen laboratuvar deneyinden elde edilen yenilme zarfıyla (bkz. Şekil 5.12) karşılaştırılması planlanmıştır.

Bu kapsamda, yeni dolgu malzemesine ait kırmataşların Jeolojik Dayanım İndeksi'nin (GSI) belirlenmesinde kullanılmak üzere, kireçtaşı parçalarının yerinde ölçülen en büyük ve en küçük boyutları dikkate alınmıştır. Bu boyutların belirlenmesi için ayrıca Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından önerilen fotoanaliz yönteminden de yararlanılmıştır. Kireçtaşı dolgu malzemesinden fotoanaliz yöntemine uygun dik açıda çekilen fotoğraflardan 82 adet en-boy ölçümü alınmıştır. Yerindeki direk ölçümlerde ise gelişçi güzel seçilmiş 104 adet parçanın en ve boyları belirlenmiştir. Bu ölçümlerle, kırmataşların kısa kenar - uzun kenar ortalamaları fotoğraflardan 0.048, direk ölçümlerden ise 0.074 m olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin ortalama süreksizlik aralığını (S) temsil ettiği varsayılmıştır. GSI'nın belirlenmesi için hacimsel eklem sayısından ( $J_v$ ) yapısal özellik puanının (SR) belirlenmesi ve süreksizlik yüzey koşulunun (SCR) bilinmesi gerekmektedir (Sönmez ve Ulusay, 2002).  $J_v$ 'nin

belirlenebilmesi için Ulusay ve Sönmez (2002 ve 2007) tarafından Eşitlik 5.4 ve 5.5 önerilmiştir. Eşitlik 5.5'te girdi parametresi olan kayanın yüzey sayısı (N), arazide yapılan gözlemlerden 6 ve 12 olarak tespit edilmiş olup  $D_n$  değeri 3 ve 6 olarak hesaplanmıştır.  $J_v$  değerleri ise,  $D_n$  değeri 3 için fotoğraflardan ve yerinde doğrudan alınan ölçümlere göre sırasıyla 63.1 ve 40.49  $m^{-3}$  olarak belirlenmiştir.  $D_n$  değeri 6 için ise fotoğraflardan ve yerinde doğrudan alınan ölçümlere göre sırasıyla 126.1 ve 81.0  $m^{-3}$  olarak belirlenmiştir

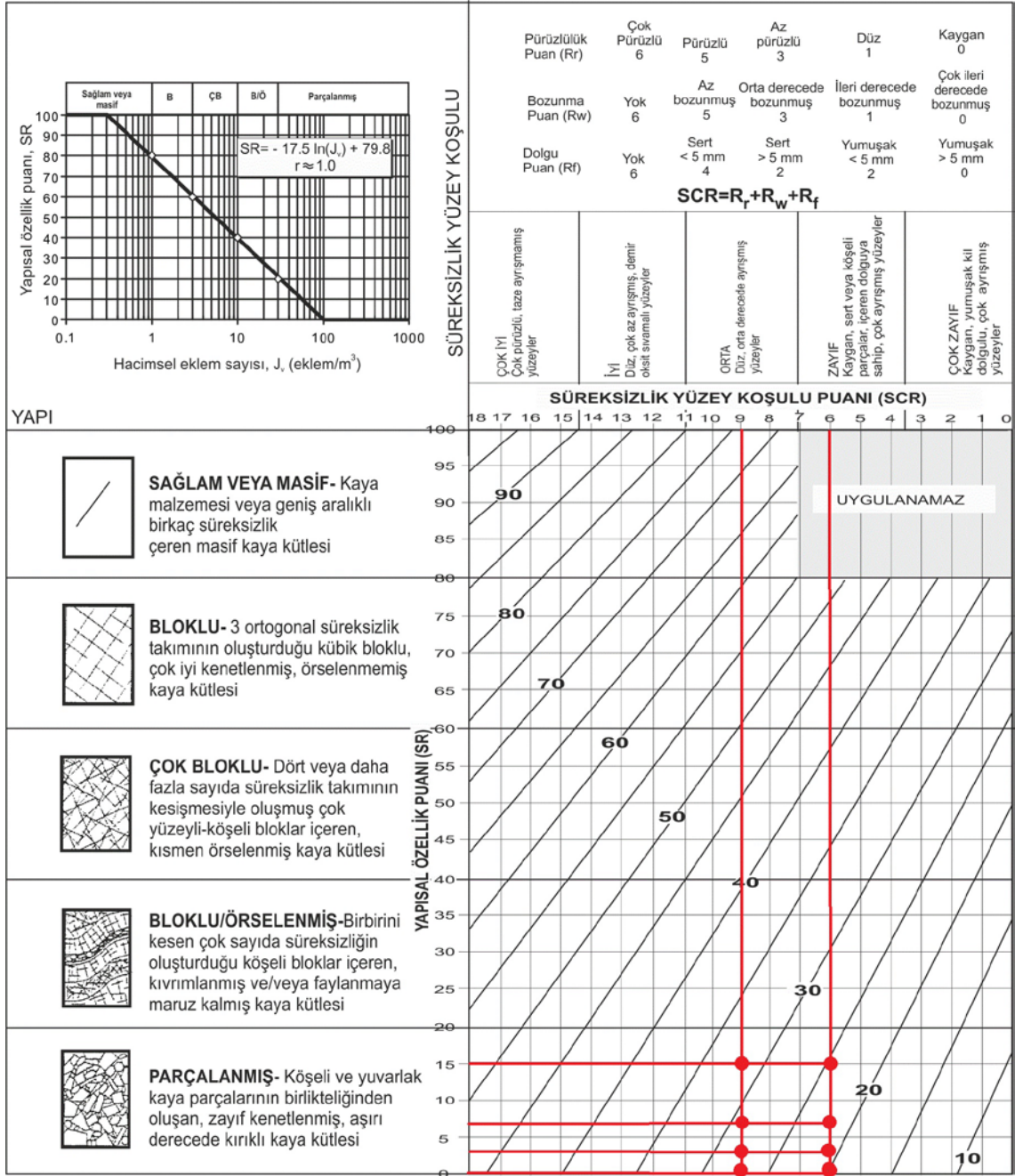
$$J_v = D_n(1/S) \quad (5.4)$$

$$D_n = N/2 \quad (5.5)$$

Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen GSI abağında ( Şekil 5.13) yer alan  $J_v$ -SR ilişkisinden SR değerleri  $D_n$  değeri 3 için fotoğraftan ölçümlerle 7.3, yerinde ölçümlerden 15 olarak hesaplanmıştır.  $D_n$  değeri 6 alındığında ise fotoğraftan ölçümlerle 0, yerinde ölçümlerden 2.9 olarak hesaplanmıştır. Arazide yapılan gözlemler sonucunda, kırmataş yüzeylerinin az pürüzlü, taze-az-orta derecede bozunmuş, 5 mm'den büyük yumuşak dolgu içerdikleri görülmüştür. Söz konusu GSI abağındaki puanlama dikkate alınarak SCR'nin 6 ile 9 arasında değiştiği ve  $D_n$  değeri 3 için fotoğraf ölçümlerinden belirlenen  $SR=7.3$  için GSI'nin 22 ile 29 değerleri arasında olabileceği belirlenmiştir. Yerinde yapılan blok boyutu ölçümleri baz alındığında ise,  $SCR=6$  için  $GSI=24$  ve  $SCR=9$  için  $GSI=32$  olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.13 ve Çizelge 5.7).  $D_n$  değeri 6 için ise SCR'nin 6 ile 9 arasında değiştiği fotoğraf ölçümlerinden belirlenen  $SR=0$  için GSI'nin 20 ile 27 değerleri arasında olabileceği belirlenmiştir. Yerinde yapılan blok boyutu ölçümleri baz alındığında ise,  $SCR=6$  için  $GSI=21$  ve  $SCR=9$  için  $GSI=28$  olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.13 ve Çizelge 5.7). Bu değerlendirmelerden, yeni dolgu malzemesi için GSI'nin 20 ile 32 değerleri arasında değiştiği ve ortalama değerinin ise 25.4 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kireçtaşı kırmataşlarından oluşan yeni dolgu için  $GSI=25.4$ ,  $UCS=49$  MPa ve  $m_i= 8.1$  değerleri kullanılarak Hoek-Brown yenilme ölçütüne uygun yenilme zarfı Roclab 1.0 (Rocsience, 2002) programı kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5.14a). Kırmataşlardan oluşan yeni dolgu, patlatılarak ve daha sonra kırıcıdan kırılarak elde edilmekte olup, buna göre hesaplamalarda Hoek, Caranza-Torres ve Corkum (2002) tarafından

önerilmiş olan kötü (zayıf) patlatma örselenme faktörü D için 1.0 değeri alınmıştır. 3cm'den küçük boyuttaki kireçtaşı kırmataşlarında yapılan doğrudan makaslama deneyleriyle belirlenen yenilme zarfı ile Hoek-Brown ölçütüne uygun belirlenen zarflar Şekil 5.14b'de birlikte sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde, her iki yöntemden belirlenen yenilme zarfları yaklaşık olarak birbirine paralel olmakla birlikte, Hoek – Brown yenilme ölçütünden elde edilen dayanımın deneyden elde edilenlere göre yüksek olduğu gözlenmiştir. 7. Bölüm'de verilen şev duraylılığı analizlerinde, kireçtaşı kırmataşları için laboratuvar deneylerinden belirlenen parametrelerin kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

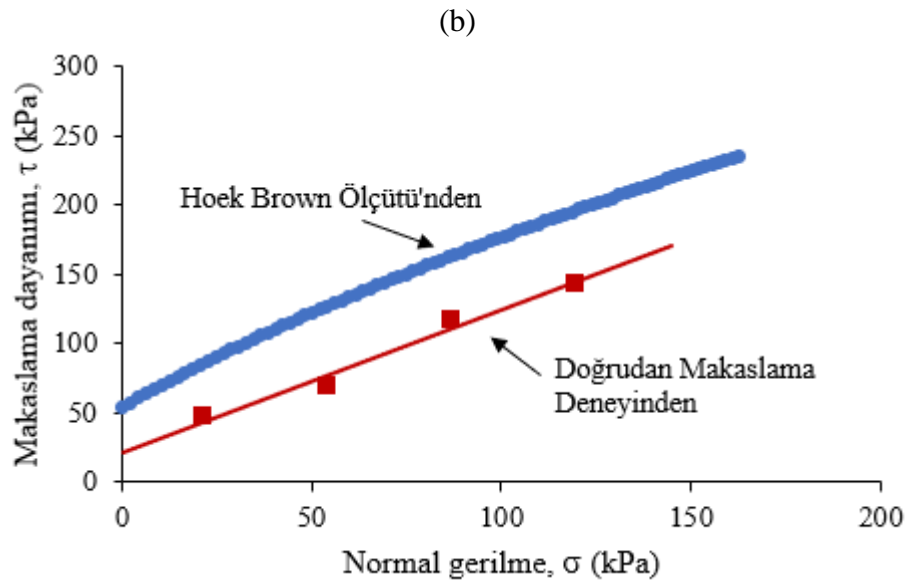
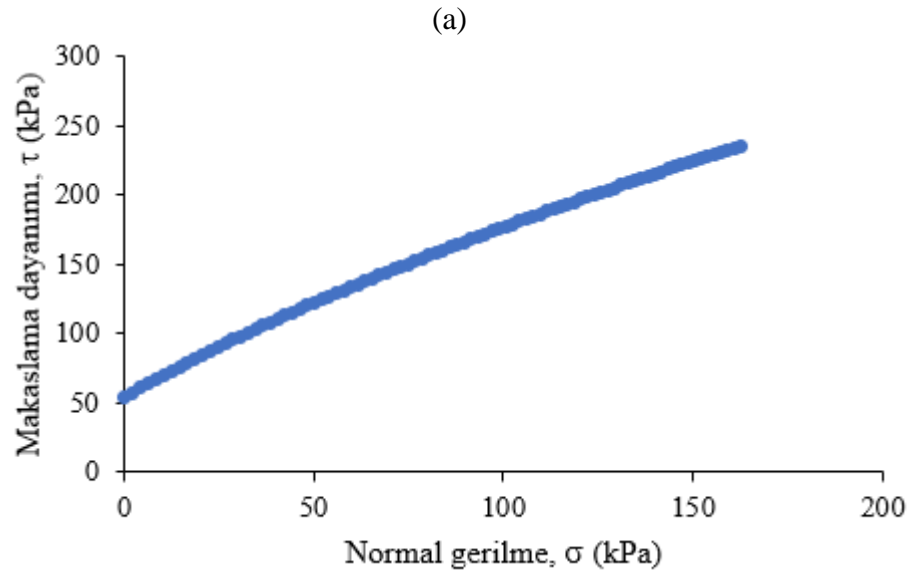


Şekil 5.13. Kireçtaşı kırmataşından oluşan yeni dolgu malzemesi için niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı'ndan (Sönmez ve Ulusay, 2002) GSI değişim aralıklarının belirlenmesi.



Çizelge 5.7. Kireçtaşı kırmataşlarında  $D_n$  değeri 3 ve 6 için fotoğraflardan ve direk ölçümlerden ve blok yüzey özelliklerinden yararlanılarak belirlenen GSI değerleri.

Süreksizlik Özellikleri									
Örnek		S (m)	Jv (m <sup>-3</sup> )	Pürüzlülük	Bozunma	Dolgu	SCR	SR	GSI
İri bloklü dolgu ( $D_n=3$ )	Fotoğraftan ölçüm	0.048	63.1	Az (3)	Taze-Az- Orta (6-5-3)	>5 mm yumuşak	6	7.3	22
	Direk ölçüm						9	15	29
İri bloklü dolgu ( $D_n=6$ )	Fotoğraftan ölçüm	0.048	126.1	Az (3)	Taze-Az- Orta (6-5-3)	>5 mm yumuşak	6	0	20
	Direk ölçüm						9	2.9	27
							6		21
							9		28

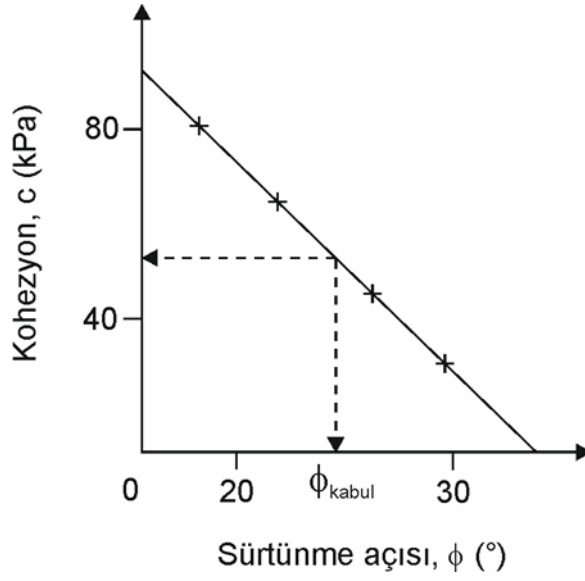


Şekil 5.14. Yeni dolgu malzemesi için (a) Hoek-Brown ölçütünden yararlanılarak belirlenen yenilme zarfı ve (b) doğrudan makaslama deney sonucundan belirlenenle Hoek-Brown ölçütünden belirlenen yenilme zarflarının karşılaştırmalı sunumu.

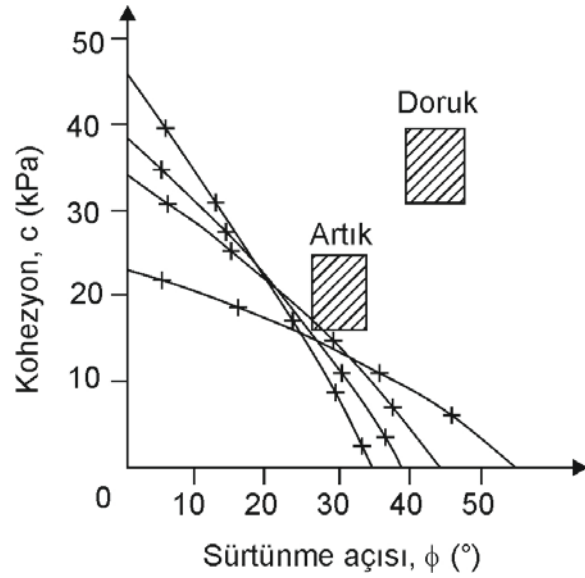
## 6. GERİYE DÖNÜK ANALİZLER

Çalışma alanındaki duraysızlığa neden olan jeolojik ve eski dolgu birimlerin yenilme anındaki jeomekanik özellikleri ve su koşullarının araştırılması amacıyla geriye dönük analizler gerçekleştirilmiştir. Geriye dönük analiz tekniğine ilişkin özet bilgiler ile tez sahasındaki duraysızlığın geriye dönük analizi kapsamında yapılan çalışmalara aşağıdaki paragraflarda değinilmiştir.

Şev duraylılığı analizlerinde belirlenen güvelik katsayısı (F), kaymaya karşı koyan kuvvetlerin, kaymaya neden olan kuvvetlere oranını ifade etmektedir. Bu değerin bire eşit olması (F=1) limit denge durumuna karşılık gelmekte ve bu durum analizi yapılan şevin kayma/yenilme sınırında olduğunu göstermektedir. Geriye dönük analiz yönteminde, duraysızlığın türüne uygun limit denge analiz yöntemi seçildikten sonra, makaslama dayanımı parametrelerinden ( $c - \phi$ ) biri sabit tutulurken, F=1 koşulunu sağlayan diğer parametre hesaplanabilmektedir. Fookes, Reeves ve Dearmen (1977), limit denge koşulunu sağlayan analizlerin birbirinden farklı  $c - \phi$  veri çiftleri elde edilecek şekilde tekrarlanmasıyla duraysızlığın geliştiği bölgeden alınan kesit için geriye dönük analizlerle F=1 koşulunu sağlayan  $c - \phi$  grafiklerinin hazırlanabileceğini göstermiştir (Şekil 6.1). Duraysızlığın geliştiği şevden iki veya daha fazla kesit alınabileceği durumlarda ise, çoklu çözüm adı verilen bir yöntem uygulanabilmektedir (Şekil 6.2). Sancio (1981) tarafından önerilen bu yöntemde, tasarımda kullanılacak makaslama dayanımı parametresinin seçiminde, geriye dönük analizlerden hesaplanan  $c - \phi$  değerleri ile laboratuvar deneylerinden belirlenen  $c - \phi$  değerleri karşılaştırılabilmekte ve tasarım için doğruya en yakın parametrelerin seçimi mümkün olabilmektedir.



Şekil 6.1. Fookes, Reeves ve Dearmen (1977) tarafından önerilen geriye dönük analiz yöntemi.



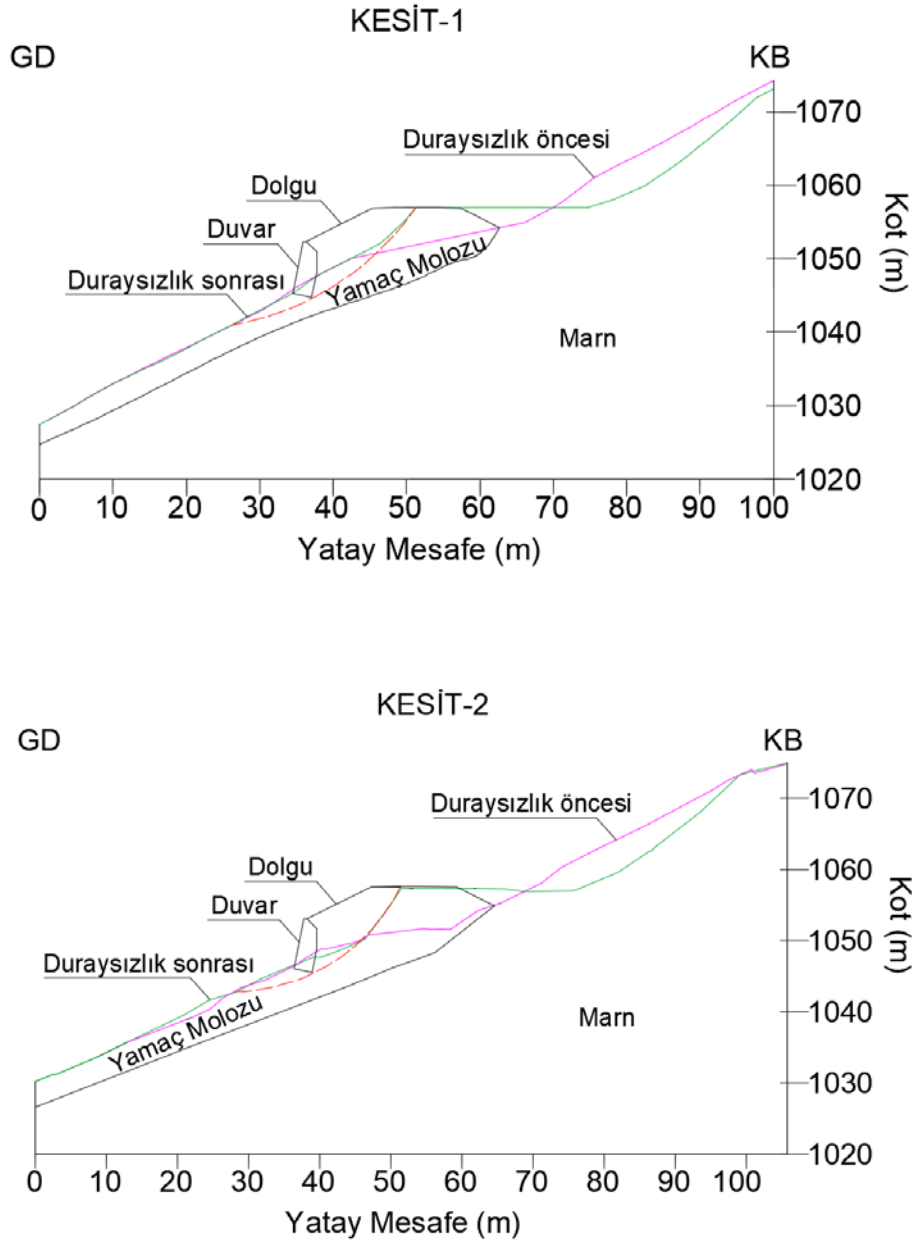
Şekil 6.2. Sancio (1981) tarafından önerilen ve çoklu çözüm yöntemini esas alan geriye dönük analiz yaklaşımı.

4. Bölüm’de de değinildiği gibi, çalışma alanındaki duraysızlığın kayma aynasının geometrisi, duraysızlık sonrası arazideki topografik ölçümlerle belirlenmiştir (bkz. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Bu bölümde ise, söz konusu kayma aynasına uygun olası kayma yüzeyleri araştırılmış ve en uygun kayma yüzeyinin dairesel kayma modelinde olabileceği tespit edilmiştir. Bu modele göre yenilme, eski dolgu malzemesi ile altında yer alan yamaç molozu içinden ve örme taş duvarın hemen altından geçen bir yüzey boyunca gerçekleşmiştir (Şekil 6.3). Kayma öncesi şev konumu, duraysızlığın her iki yanındaki duraylı yol dolguları ve doğal topoğrafya dikkate alınarak kestirilmiş ve Şekil 6.3’teki kesitlerde bu şev geometrileri de gösterilmiştir.

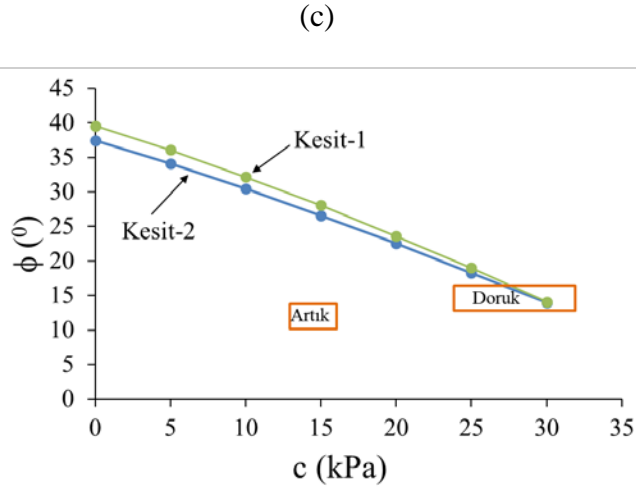
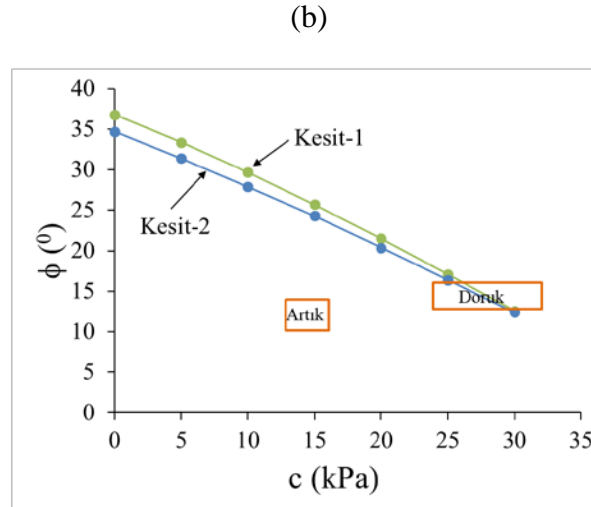
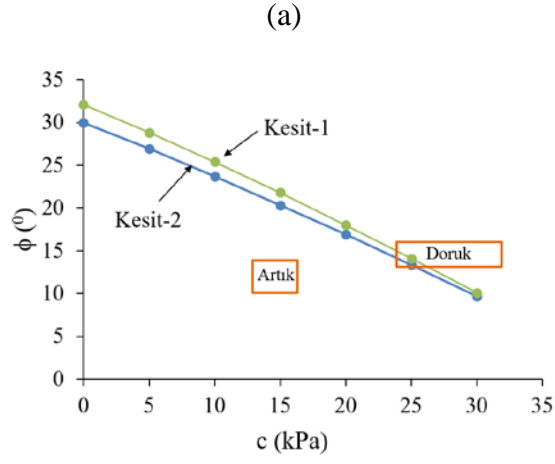
Şekil 6.3’te sunulan kesitler dikkate alınarak ve Slide v.6.0 (Rocscience, 2012) programından yararlanılarak Bishop (1955) iki boyutlu limit denge analiz yöntemi ile geriye dönük analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, eski dolgu malzemesi için laboratuvarında belirlenen  $c$  ve  $\phi$  değerleri (bkz. Bölüm 5.3.3) sabit tutulmuş ve limit denge ( $F=1$ ) durumunu sağlayan yamaç molozunun makaslama dayanımı parametrelerinin değişimi araştırılmıştır. Yamaç molozunun  $F=1$  koşulunu sağlayan  $c$ - $\phi$  değişimleri ile laboratuvar deneylerinden belirlenen doruk ve artık parametrelerin değişim aralıkları (bkz. Bölüm 5, Çizelge 5.5), kuru durum ve farklı su basıncı oranları ( $r_u$ ) için, Sancio (1981) tarafından önerilen yönteme uygun şekilde hazırlanarak Şekil 6.4’te sunulmuştur.

Geriye dönük analizlerden elde edilen sonuçlar dikkate alındığında; şevin su içermemesi durumunda (kuru durum,  $r_u=0$ ) yamaç molozu için laboratuvarında belirlenen doruk  $c - \phi$  değişimlerinin,  $F=1$  koşulunu sağlayan  $c$ - $\phi$  değişimleriyle nispeten uyumlu olmakla birlikte bir miktar yüksek kaldığı anlaşılmaktadır (Şekil 6.4a). Şekil 6.4b ve Şekil 6.4c’de sunulan  $r_u = 0.1$  ve  $0.15$  değerleri için yapılan analizlerde ise, yamaç molozunun doruk makaslama dayanımı değerleriyle geriye dönük analizlerden elde edilen eğrilerin kesiştiği noktanın daha uyumlu olduğu görülmektedir. Bu tespitler gözönünde bulundurularak, çalışma sahasındaki duraysızlığın gelişmesinde yamaç molozunun doruk makaslama dayanımı parametrelerinin etkin olduğunu ve kayma anında su basıncı oranlarının  $0.1$  ile  $0.15$  arasında bir değerde olabileceğini söylemek mümkündür. Bu tespitler, Zemka Proje (2016) tarafından yapılan ve “menfezin tıkanması nedeniyle su drenajının sağlanamaması ve muhtemelen dolgu içinde su basınçlarının yükselmesi nedeniyle duraysızlığın gerçekleştiği” tespitiyle de oldukça

uyumludur. Bu değerlendirmeler sonucunda; kuru koşulda dahi mevcut profillerin duraysız koşula çok yakın olduğu ve nispeten dūřuk basınçlar oluşturabilecek su girişiyle birlikte yamaç molozunun doruk makaslama dayanımı aşılarak duraysızlığın tetiklendiği sōylenebilir.



Őekil 6.3. Duraysızlık ncesi ve sonrası Őev profilleri ile kayma yūzeyleri.



Şekil 6.4. Geriye dönük analizlerde gözenek suyu basıncı oranı ( $r_u$ ), (a) 0, (b) 0.1 ve (c) 0.15 için yamaç molozunun  $F=1$  koşulunu sağlayan içsel sürtünme açısı kohezyon çiftleri değişim eğrileri ile laboratuvarında belirlenen artık ve doruk makaslama dayanımlarının değişim aralıkları.

## 7. ŞEV DURAYLILIĞI DEĞERLENDİRMELERİ

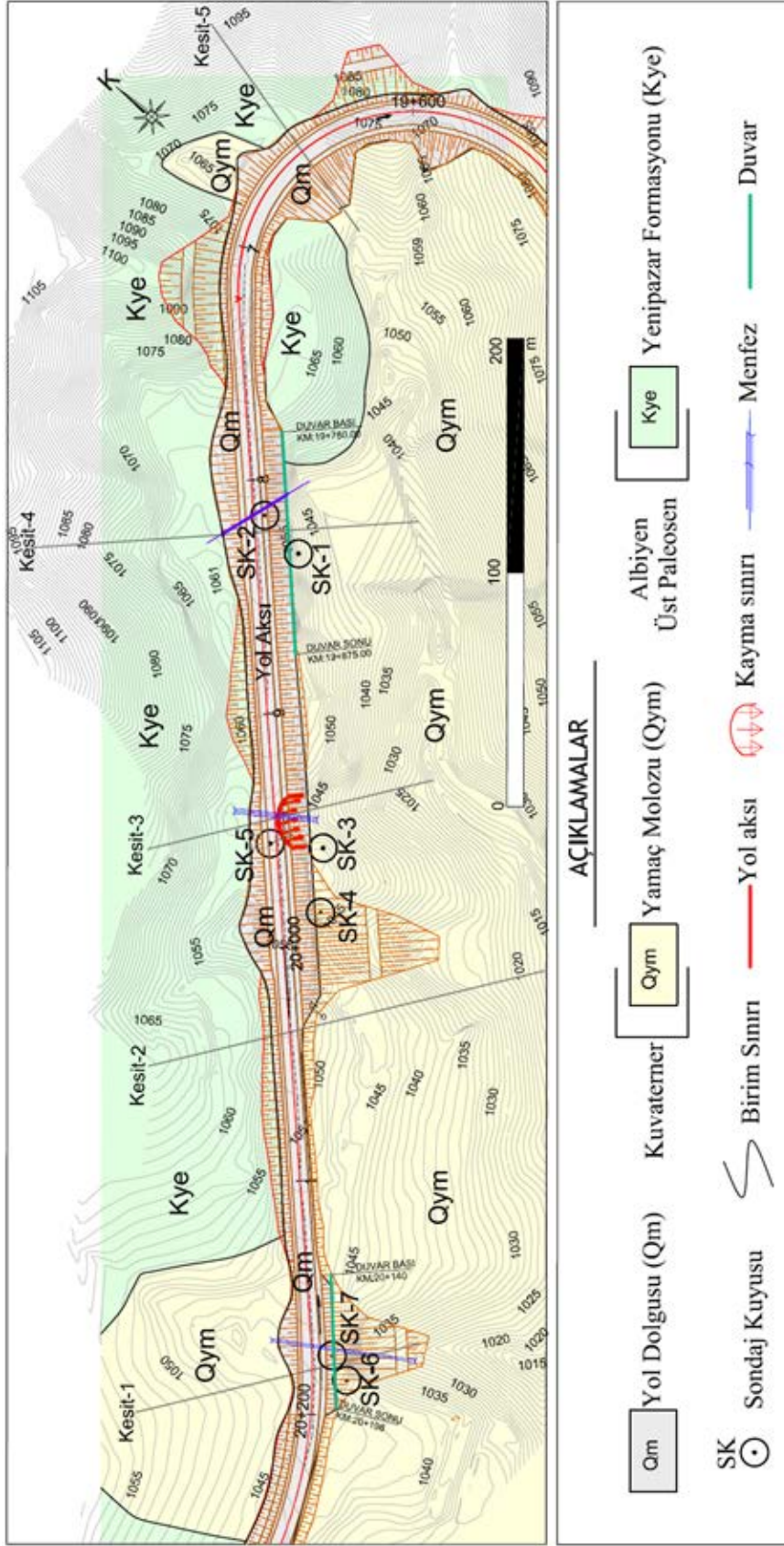
Çalışma alanındaki duraysızlık ve yakın civarı için şev duraylılığı analizlerinde kullanılmak üzere 5 adet kesit hattı belirlenmiş (Şekil 7.1) olup, Zemka Proje (2016) tarafından yapılmış sondajların verisinden ve arazi çalışmaları sırasında revize edilen jeolojik birim sınırları dikkate alınarak bu hatlar için jeolojik kesitler hazırlanmıştır (Şekil 7.2). Sondaj sayısı ve dizilimi, tüm kesitlerdeki yamaç molozu kalınlıklarını belirleyebilmek için yeterli olmadığından, özellikle yol dolgusu altındaki yamaçlarda yüzeylenen yamaç molozunun kalınlıkları, yukarı kotlardaki sondajlardan belirlenen kalınlıklara eşit varsayılarak olası çizilmiştir.

4. Bölüm'de değinildiği gibi, marn kaya kütledeki süreksizlik yönelimlerini ölçmek için uygun konumda ve büyüklükte mostra olmaması nedeniyle hakim süreksizlik setlerinin belirlenmesi mümkün olamamıştır. Bu nedenle, tez kapsamında kinematik analizler yapılarak olası süreksizlik denetimli duraysızlıklar saptanamamıştır. Bununla birlikte, marn kaya kütleinin bol kırıklı çatlaklı olması, GSI değerinin düşük olması ve çalışma alanı ve yakın civarında süreksizlik denetimli bir duraysızlığın gözlenmemesi nedenleriyle, bu birim içinde kaya kütle yenilmesinin daha kritik olacağı düşünülmüştür. Bu nedenle, aşağıdaki bölümlerde değinilen limit denge analizlerinde marn kaya kütle dayanımı için Hoek-Brown yenilme ölçütünden yararlanılmıştır. Eski ve yeni dolgu malzemesi ile yamaç molozu içinse Mohr-Coulomb yenilme kriteri dikkate alınmış olup, analizler dairesel kayma modelleri için Bishop (1955), dairesel olmayan modeller içinse Janbu (1973) iki boyutlu limit denge yöntemleri ve Slide v6.0 (Rocscience, 2010) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

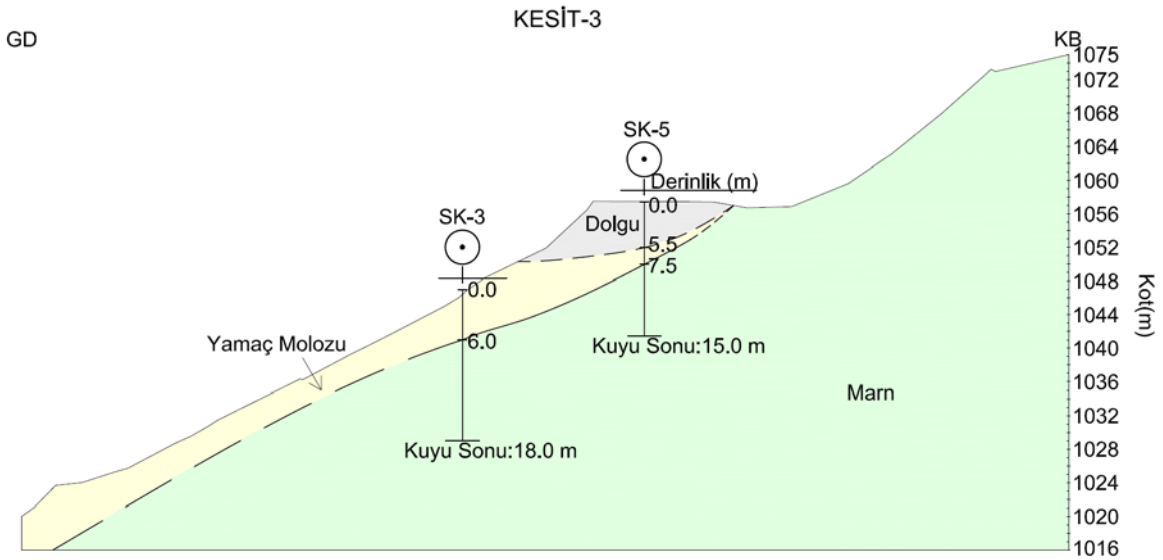
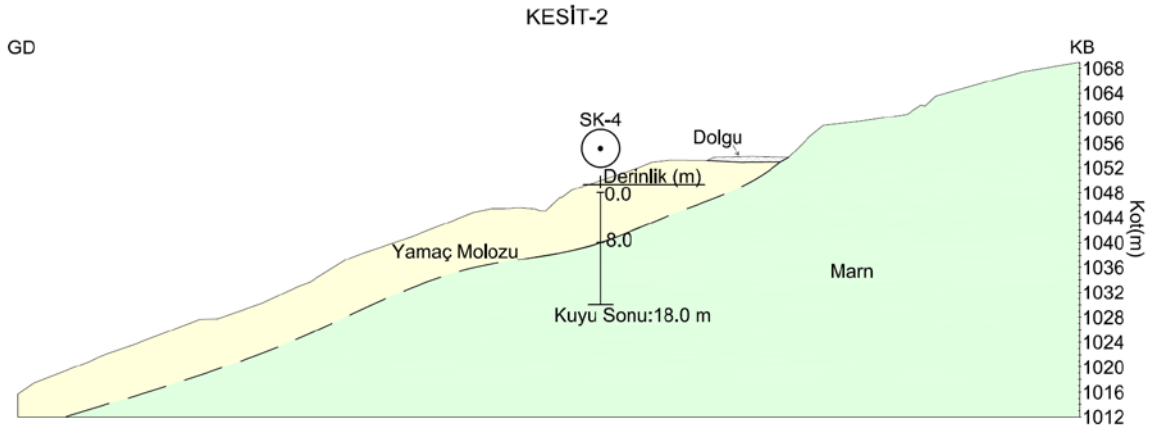
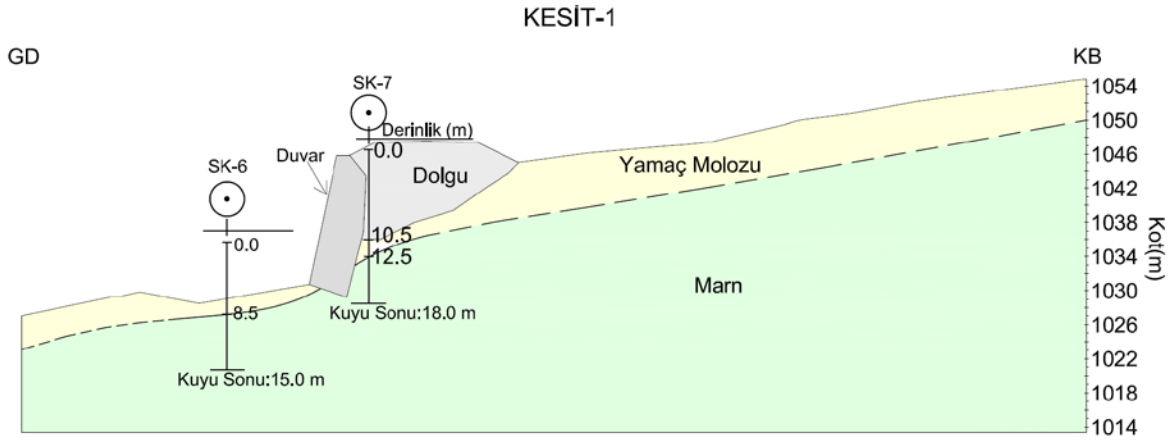
Tasarımda kullanılacak güvenlik katsayılarının belirlenmesinde insan yaşamı, çevre, yerleşim ve tesisler açısından taşıdığı tehlikenin boyutları, analizlerde esas alınan parametreler, sismik risk vb. gibi faktörlere bağlı olarak ABD, İngiltere ve Kanada gibi ülkelerdeki farklı kuruluşlar tarafından farklı güvenlik katsayıları önerilmiştir. Statik analizlerde, Schuster ve Krizek (1981) tarafından otoyol kazıları için  $F=1.25-1.5$  arasında, Feld (1965) tarafından ise, kazı ve dolgular için en az  $F=1.3$  alınması önerilmiştir. Bu bilgilere dayanarak, tez çalışması kapsamında statik koşullar için güvenli değer olarak en az  $F=1.3$  alınması uygun görülmüştür.

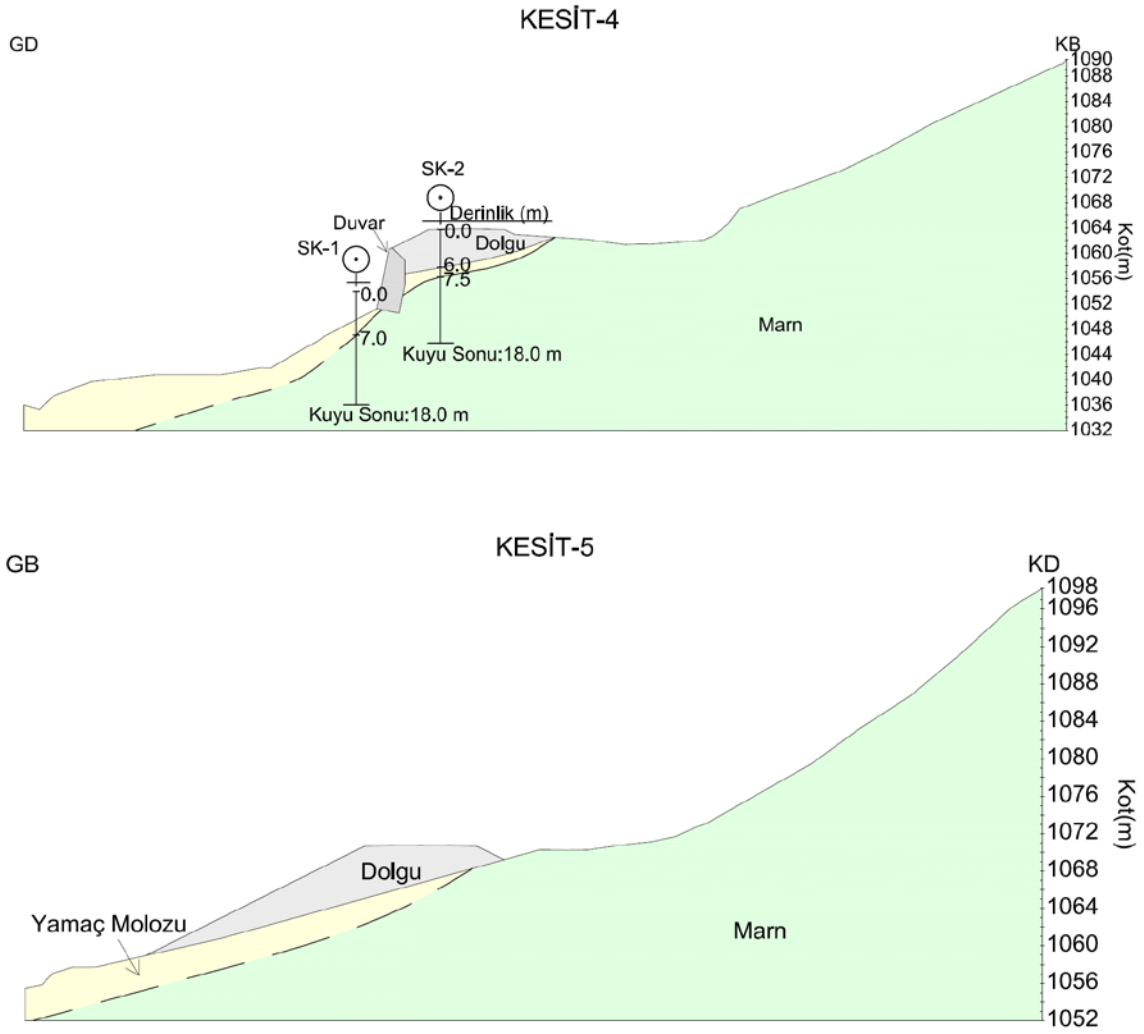


Sismik katsayı da katılarak yapılacak şev duraylılığı analizlerinde ise, Huang (1983) ve D'appolonia Cons. Engrs. Inc. (1975) tarafından  $F=1.0-1.2$  arasında alınması önerilmektedir.  $F=1$  değerinin limit denge durumunu temsil etmesi nedeniyle, tez kapsamında yapılan psödo-statik analizlerde tasarım için önerilebilecek en düşük güvenlik katsayısı değerinin 1.1 olarak alınmasının uygun olacağı düşünülmüştür.



Şekil 7.1. Plan görünümü ve kesitlerin plandaki yerleri.





Şekil 7.2. Şev duraylılığı analizlerinde kullanılması amacıyla alınmış jeolojik kesitler.

### 7. 1. Mevcut Durum İçin Duraylılık Analizleri

İnceleme alanında öncelikle mevcut şev geometrilerinin duraylılık koşulları araştırılmıştır. Bu kapsamda, Şekil 7.2’de sunulan kesitler için statik ve psödo-statik analizler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5 ve 6’da yapılan değerlendirmeler sonucunda analizlerde kullanılacak malzeme parametreleri belirlenmiş olup, bu parametreler Çizelge 7.1’de bir arada gösterilmiştir. Örme taş duvarın makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi için tez kapsamında bir çalışma yürütülmemiştir. Buna yönelik bir literatür taraması yapılmış ve özetle; Poulay ve Priesley (1992) tarafından, örme taş duvarlar için  $c=0.1-1.5$  MPa ve  $\phi=17-50^\circ$  arasında değerlerin kullanıldığı belirtilmiş Miranda Dias (2007) tarafından ise, Eurocode 6 (2005)’nın önerdiği

değerlerin ( $c=100\text{kPa}$ ,  $\phi=22^\circ$ ) çok muhafazakar olduğu ve yaptığı çalışmalar sonucunda  $c=0.2-0.92$  ve  $\phi=37-50^\circ$  arasında değerlerin alınabileceğini önermiştir. Bu bilgilerin ışığında; tez sahasında bulunan ve analiz kesitlerinde de sunulan taş örme duvarların makaslama dayanımı parametreleri, en geniş aralığın sunulduğu Poulay ve Priesley (1992)'nin verdiği değerlerin ortalaması alınarak,  $c=0.8\text{ MPa}$  ve  $\phi=33^\circ$  olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 7.1. Şekil 7.2'deki kesitlerde sunulan jeolojik ve dolgu birimler için analizlerde kullanılan jeomekanik özellikler.

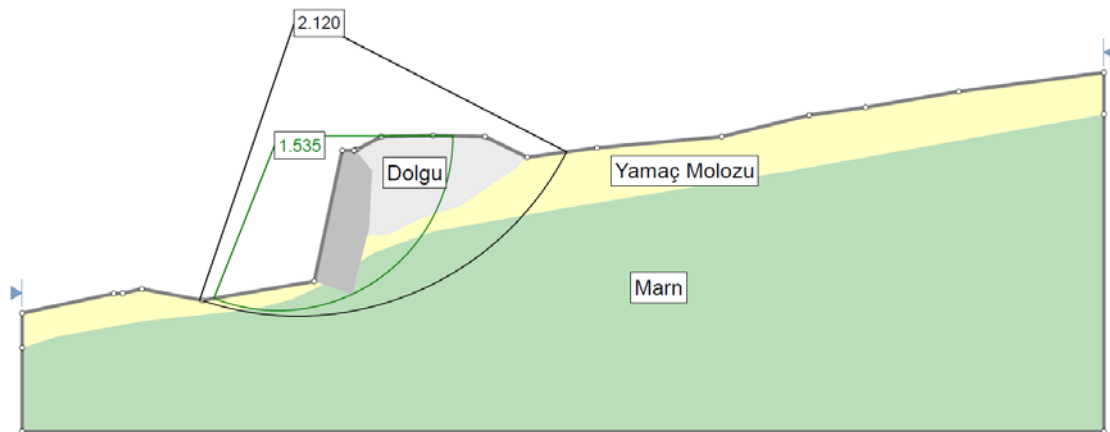
Birim	$\gamma_{\text{doğal}}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_{\text{doygun}}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	c (kPa)	$\phi$ ( $^\circ$ )	UCS (MPa)	GSI	$m_i$
Marn kaya kütlesi	23.4	-	-	-	11.8	30	7
Yamaç molozu	17.9	19.2	27.7	14.8	-	-	-
Eski dolgu	19.5	21.5	3.6	33.6	-	-	-

Psöydo-statik analizlerde bir girdi olan sismik katsayılar için farklı öneriler bulunmaktadır. Bu konuda nispeten ayrıntılı bir değerlendirme Melo ve Sharma (2004) tarafından yapılmıştır. Bu değerlendirmeye göre, örneğin Amerika Birleşik Devletleri'nde sismik katsayının 0.05 -0.1 arasında alınması önerilirken Japonya'da bu aralık 0.12 – 0.25 şeklinde tanımlanmıştır. Marcuson ve Franklin (1983), çalışılan alanda beklenen en büyük yatay yer ivmesinin (PGA) yarısı ile üçte biri arasında bir değer alınmasını, Hynes-Griffin ve Franklin (1984) ise PGA'nın yarısının analizlerde kullanılmasını önermektedirler. Melo ve Sharma (2004), yaptıkları değerlendirmeler sonucunda, analizlerde PGA'nın 0.42'si ile 0.46'sı arasında bir değer kullanılması durumunda iyi sonuçlar alındığını belirtmiştir. Bu değerlendirmeler dikkate alındığında, analizlerde PGA'nın 0.42'si ile 0.5'i arasında bir değer alınabileceği ortaya çıkmaktadır. 3. Bölüm'de değinildiği gibi, AFAD (2019) tarafından yayınlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak, çalışma alanında spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve 475 yıl tekrarlanma aralığında %10 olasılıkla beklenen yatay deprem ivme katsayısının (PGA) 0.4g olduğu belirlenmiştir. Yukarıda sunulan değerlendirmeler dikkate alınarak, bu değer yarısı kadar bir sismik katsayının (0.2g) Psöydo-statik analizlerde kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.

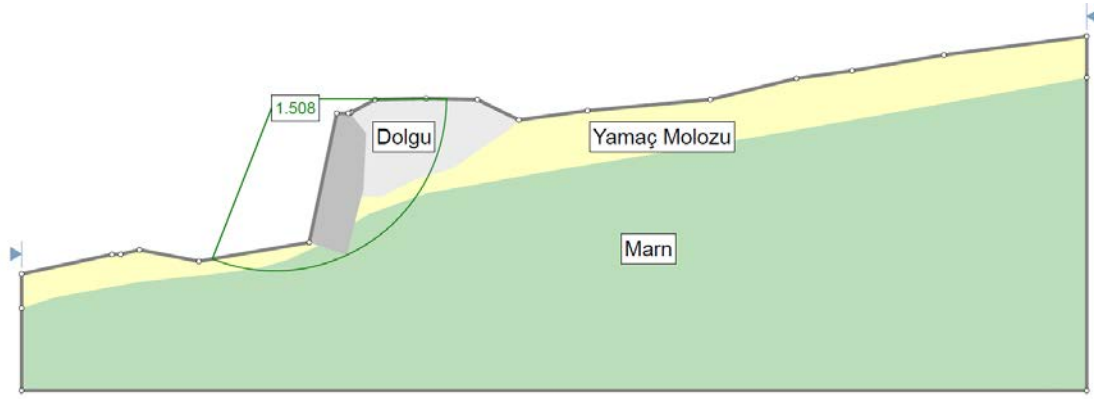
Aşağıdaki paragraflarda, her bir jeolojik kesit (Kesit 1-5) için üstte değinilen hususlar dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler ve sonuçlarına ilişkin ayrıntılı değerlendirmeler sunulmuştur. Tüm kesitlerdeki analizlerde, dairesel ve dairesel olmayan (dairesele başlayıp, yamaç molozu ile marn sınırı boyunca devam eden ve yamaç molozu içinden şev aynasını kesen) yenilme modelleri 4500 farklı yenilme yüzeyi için araştırılmış ve en kritik olan yüzeylerden elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

### **Kesit-1 için yapılan analizler**

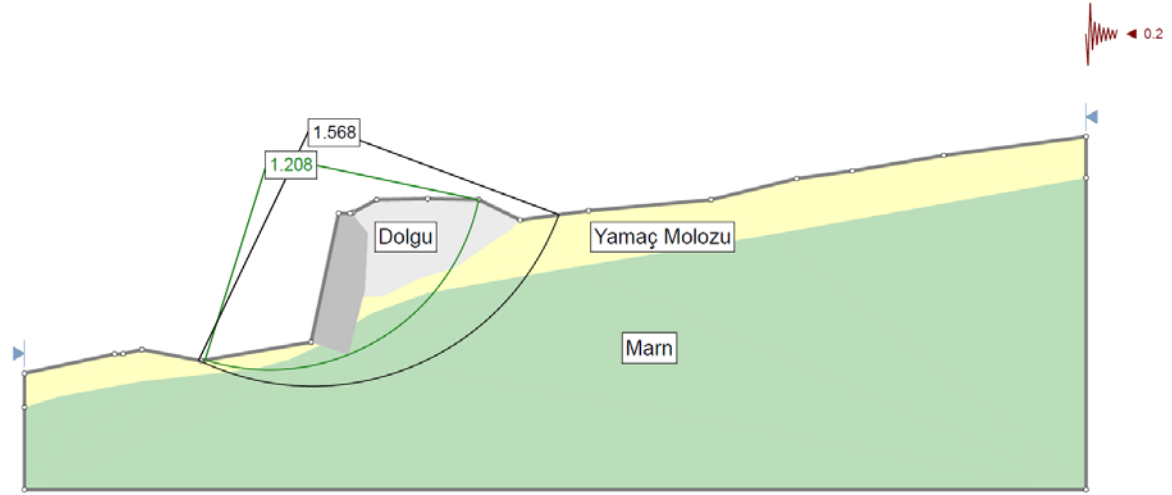
Statik durumda yapılan analizlerde en kritik kayma yüzeyleri için  $r_u=0$  durumunda  $F=1.535$  (Şekil 7.3),  $r_u=0.15$  durumunda  $F=1.508$  (Şekil 7.4) olarak hesaplanmıştır. Sismik etki dikkate alınarak yapılan analizlerde ise gözönünde bulundurulması durumunda ise,  $r_u=0$  için  $F=1.208$  (Şekil 7.5),  $r_u=0.15$  içinse  $F=1.187$  (Şekil 7.6) olarak belirlenmiştir. Bu kesit için belirlenen en kritik modelde, kayma yüzeyinin büyük kısmı yamaç molozu ve dolgunun içerisinde, az bir bölümü ise marn kaya kütlesi içerisinde geçmektedir. Yenilme yüzeyinin kaya kütlesi içinden daha fazla geçtiği kayma yüzeylerinde ise  $F$ 'in önemli düzeyde arttığı görülmüştür. Analizlerden elde edilen değerler, statik durumda ve sismik etkinin dikkate alınması durumunda önerilen güvenlik katsayılarının (sırasıyla  $F=1.3$  ve  $1.1$ ) üzerinde olduğu görülmektedir. Bu değerlendirmelerin ışığında, statik durumda ve deprem etkisi altında bu kesitin temsil ettiği alanda duraysızlık probleminin olmayacağı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, boşluk suyu basınçlarının analizlerde temsil edilen değerinden daha fazla artmaması için gerekli drenaj önlemlerinin alınması önem arz etmektedir.



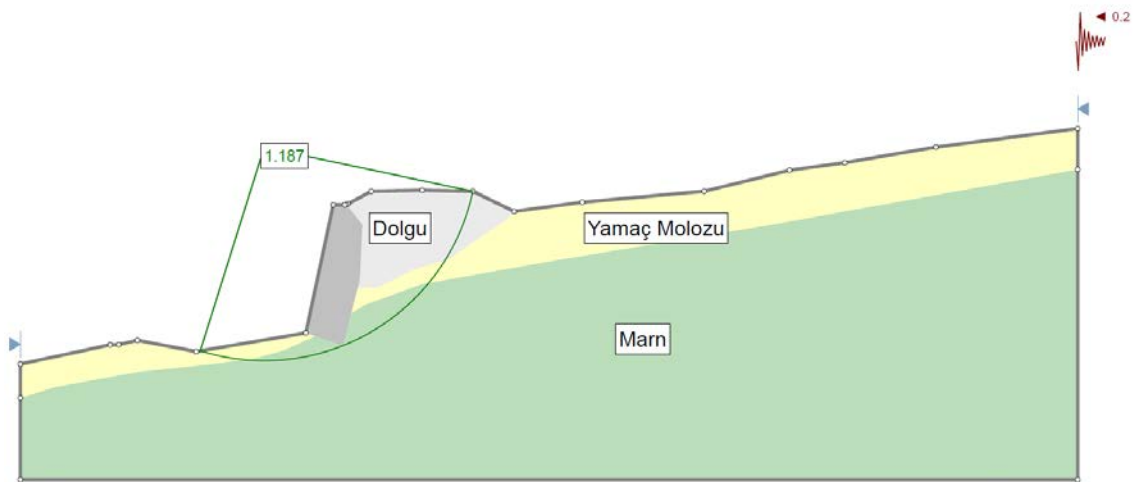
Şekil 7.3. Kesit 1'de  $r_u=0$  (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.4. Kesit 1'de  $r_u=0.15$  için statik şev duraylılığı analizi.



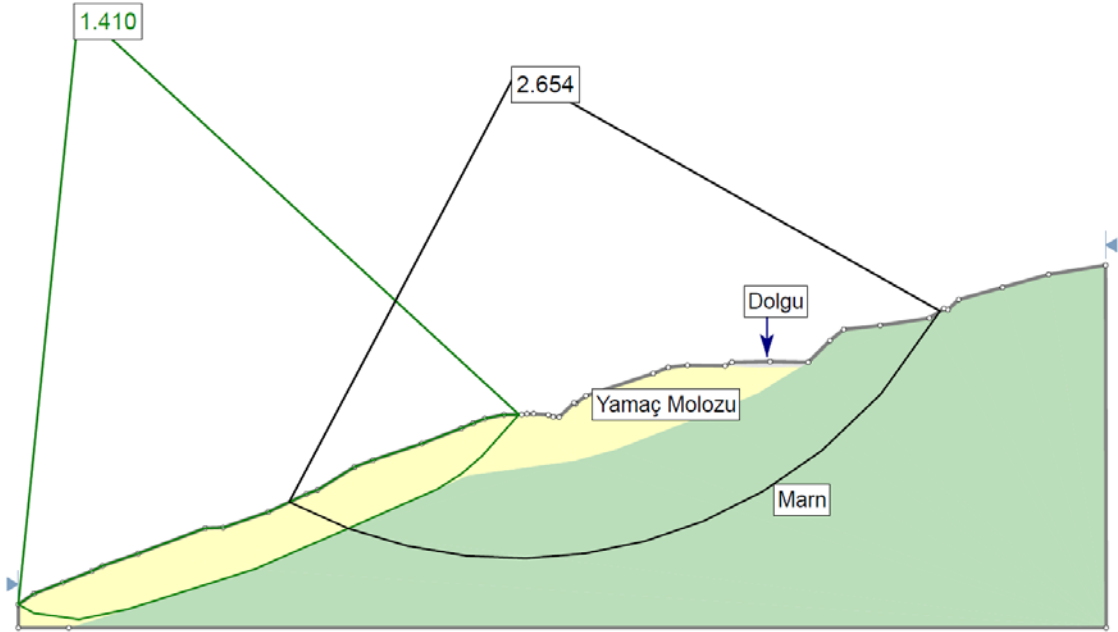
Şekil 7.5. Kesit 1'de  $r_u=0$  (kuru durum) için psödo-statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.6. Kesit 1'de  $r_u=0.15$  için psödo-statik şev duraylılığı analizi.

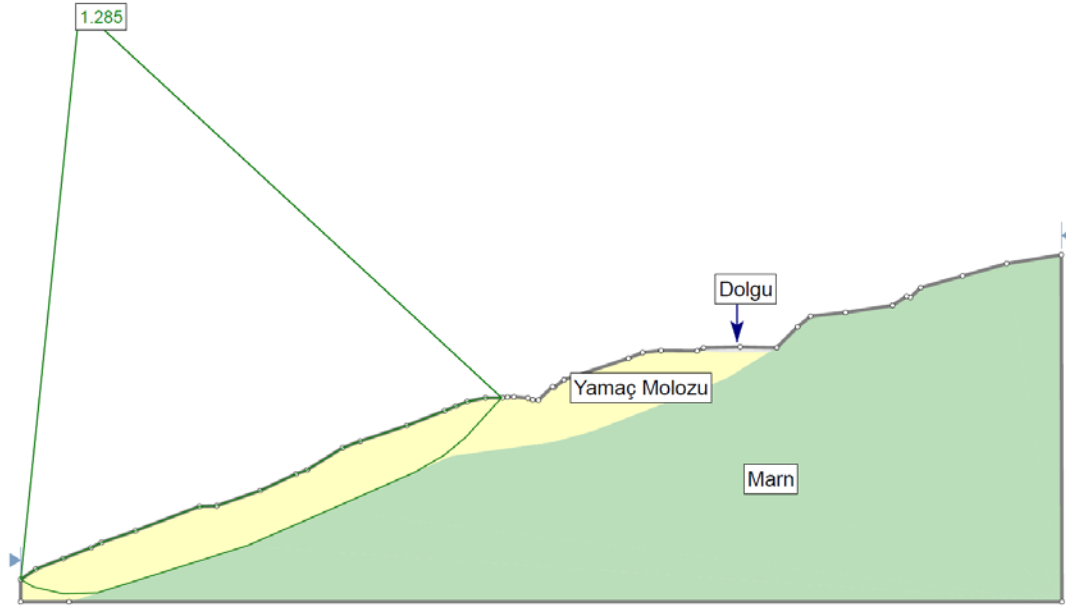
### Kesit-2 için yapılan analizler

Kesit-2 için gerçekleştirilen analizlerde statik durumda  $r_u=0$  için  $F=1.410$ ,  $r_u=0.15$  için  $F=1.285$ , sismik etki dikkate alındığında ise  $r_u=0$  için  $F=0.891$ ,  $r_u=0.15$  için  $F=0.810$  değerleri elde edilmiştir (Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10). Bu alanda yol dolgusunun kalınlığı oldukça az olup, en kritik kayma yüzeyi yolun alt kesimlerindeki yamaç molozunun içerisinden geçmekte, ancak statik koşulda tasarım için istenilen güvenlik katsayısına yaklaşık eşit ya da daha yüksek  $F$  değerleri sağlanmaktadır (Şekil 7.7 ve 7.8). Sismik etki altında ise, aynı kesimde 1'in altında  $F$  değerleri hesaplanmıştır (Şekil 7.9 ve 7.10). Marn kaya kütlelerini kapsayacak büyük bir duraysızlık problemi bulunmamaktadır. Deprem sırasında alt yamaçlardaki bir kayma, daha üst seviyelerdeki yolu da kapsayan bir duraysızlığın tetiklenmesine neden olabilir. Ancak, daha önce de değinildiği gibi, söz konusu alandaki yamaç molozunun kalınlığı daha yukarı kotlarda açılmış sondajlardaki yamaç molozu kalınlığına eşit varsayılarak olasılı verilmiştir (bkz. Şekil 7.2, Kesit-2). Bu yüzden, bu kesimde yamaç molozunun kalınlığının çok daha az olması ve yüzeye yakın derinliklerde sonlanması durumunda, deprem sırasında bir kaymanın gerçekleşmesi halinde bu kaymanın yol için bir tehlike yaratmayacağı söylenebilir. Bu nedenle, çalışma alanında yol dolgusu altındaki şevlerde yüzeylenen bu birimin kalınlığının belirlenerek yeniden analiz yapılması ve kalınlığına bağlı olarak yol güzergahına ne denli tehlike yaratabileceğinin yorumlanması uygun olacaktır.

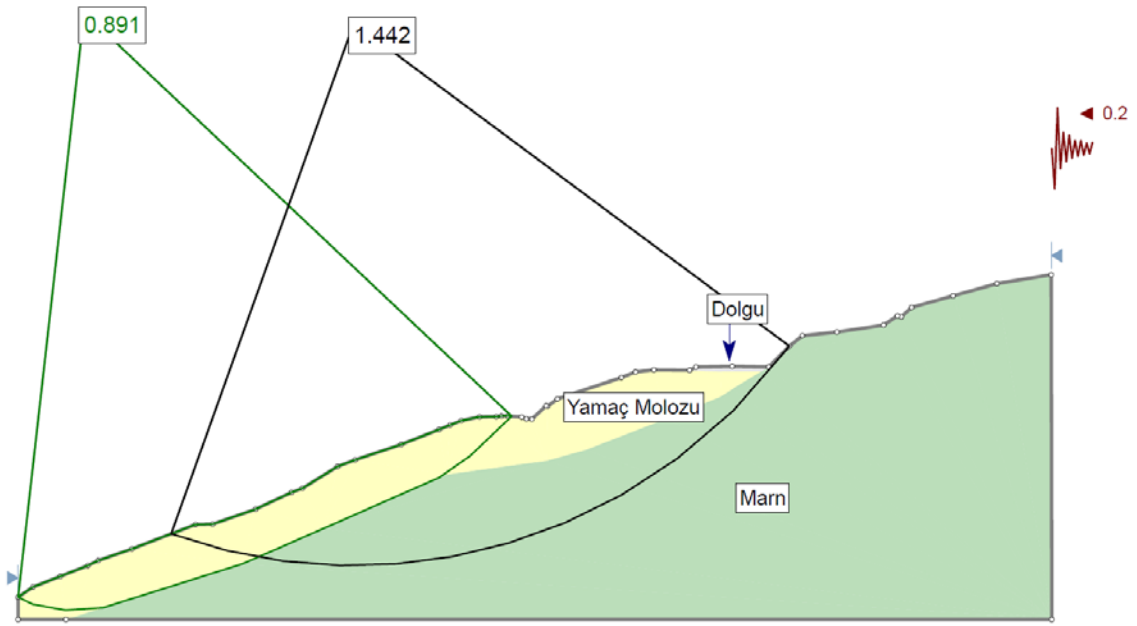


Şekil 7.7. Kesit 2'de  $r_u=0$  (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi.

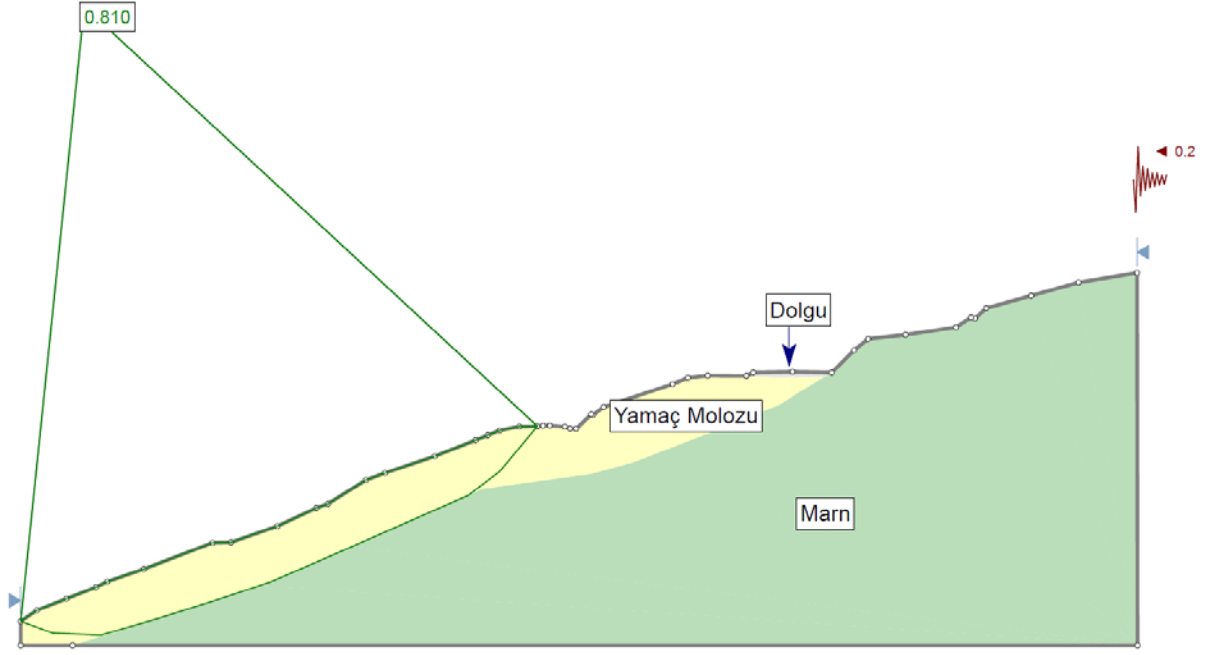




Şekil 7.8. Kesit 2'de  $r_u=0.15$  için statik şev duraylılığı analizi.



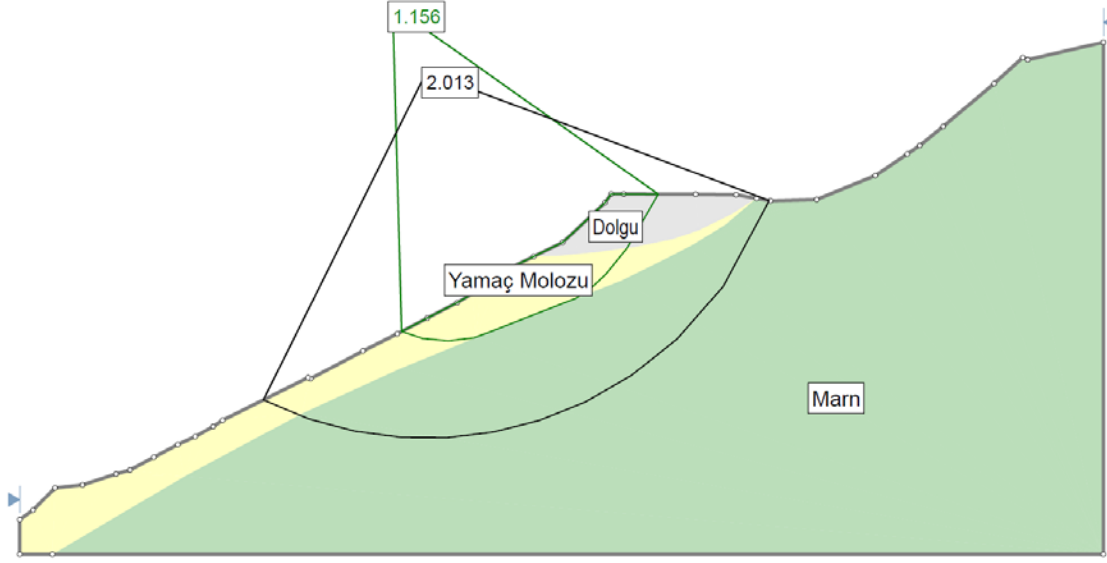
Şekil 7.9. Kesit 2'de  $r_u=0$  (kuru durum) için psöyo-statik şev duraylılığı analizi.



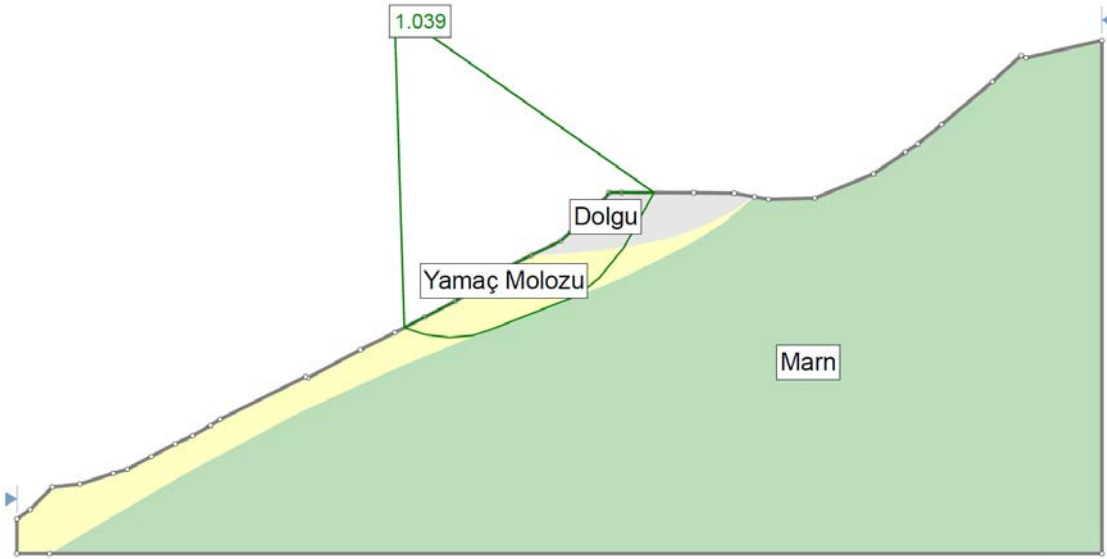
Şekil 7.10. Kesit 2'de  $r_u=0.15$  için psödo-statik şev duraylılığı analizi.

### **Kesit-3 için yapılan analizler**

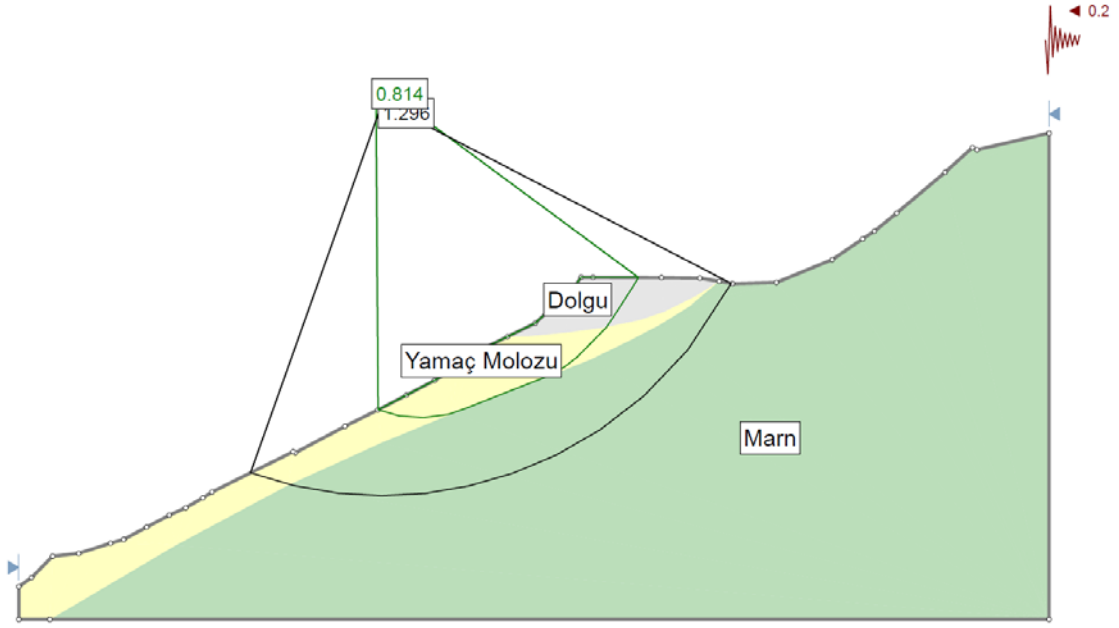
Bu kesit çalışma alanında gerçekleşen duraysızlığın gerçekleştiği yerden alınmış olup, statik koşulda  $r_u=0$  için  $F=1.156$ ,  $r_u=0.15$  için  $F=1.039$  ve sismik etki dikkate alındığında  $r_u=0$  için  $F=0.814$ ,  $r_u=0.15$  için  $F=0.731$  değerleri hesaplanmıştır (Şekil 7.11, Şekil 7.12, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14). Analiz sonuçları; bu alanda duraysızlık gerçekleştikten sonra oluşan şev geometrisi için de dolgu malzemesi ve yamaç molozu boyunca gelişmesi olası en kritik kayma yüzeyinin statik halde dahi istenilen güvenlik katsayısına sahip olmadığı ve özellikle bir miktar boşluk suyu basıncının etkili olması durumunda limit denge sınırına çok yakın  $F$  değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu kesimde de marn kaya kütlesi içinde bir duraysızlık problemi bulunmamaktadır.



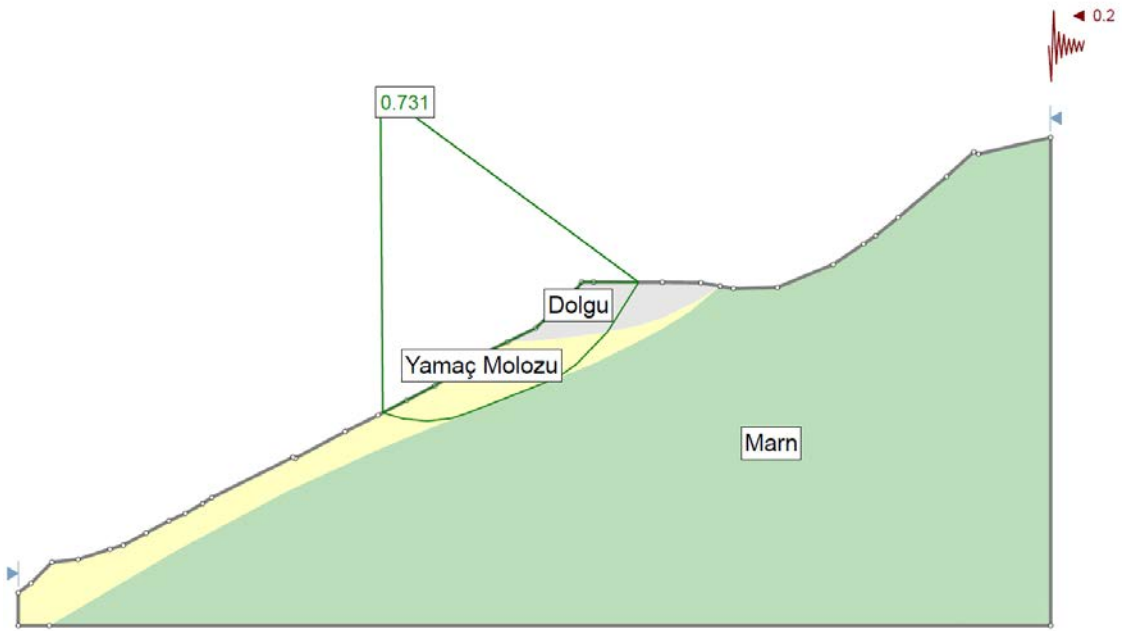
Şekil 7.11. Kesit 3'te  $r_u=0$  (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.12. Kesit 3'te  $r_u=0.15$  için statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.13. Kesit 3'te  $r_u=0$  (kuru durum) için psödo-statik şev duraylılığı analizi.

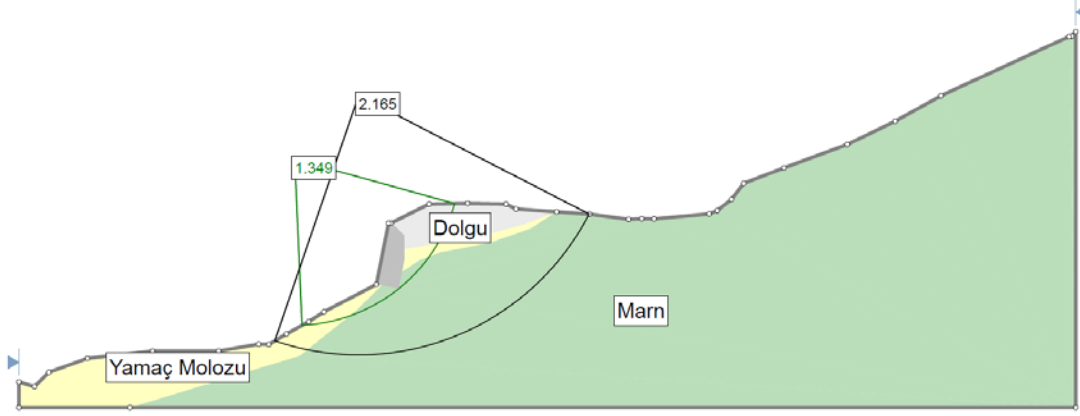


Şekil 7.14. Kesit 3'te  $r_u=0.15$  için psödo-statik şev duraylılığı analizi.

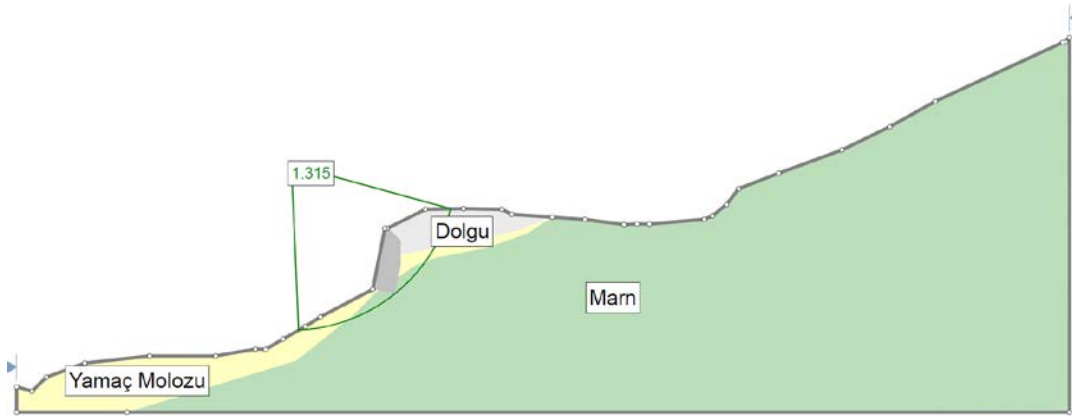
#### **Kesit-4 ve 5 için yapılan analizler**

Üstteki kesitler için yapılan değerlendirmelere benzer şekilde Kesit-4 için yapılan analizler Şekil 7.15 - Şekil 7.18'de, Kesit-5 için yapılanlar ise, Şekil 7.19 - Şekil 7.20'de sunulmuştur. Genel olarak, bu alanlarda en kritik kayma yüzeyinin dolgu ve

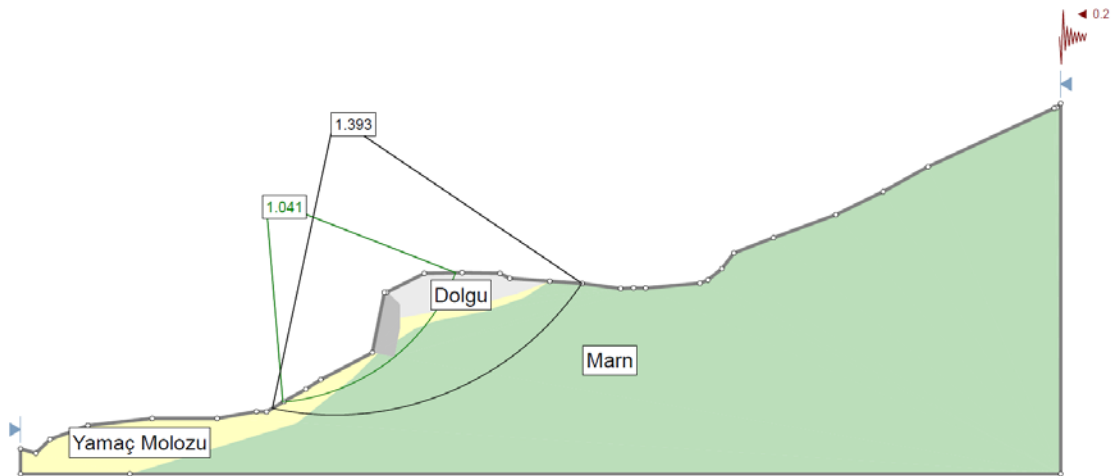
yamaç molozu boyunca geliştiği, ancak statik analizlerde yüksek güvenlik katsayılarının elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, sismik etkinin dikkate alınması ve özellikle boşluk suyu basıncının da artması durumunda güvenlik katsayılarının 1.1'in hatta 1 değerinin altına düştüğü tespit edilmiştir.



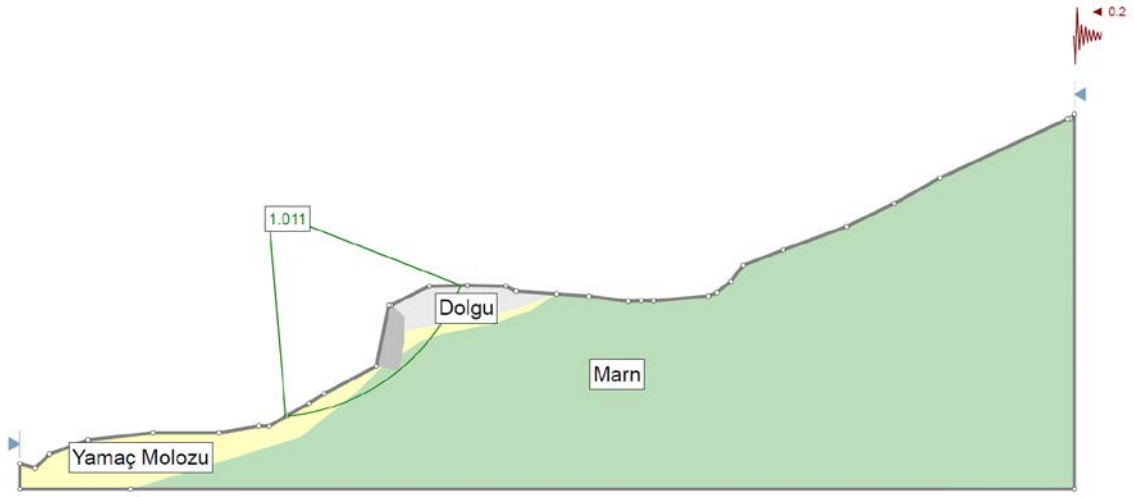
Şekil 7.15. Kesit 4'te  $r_u=0$  (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi.



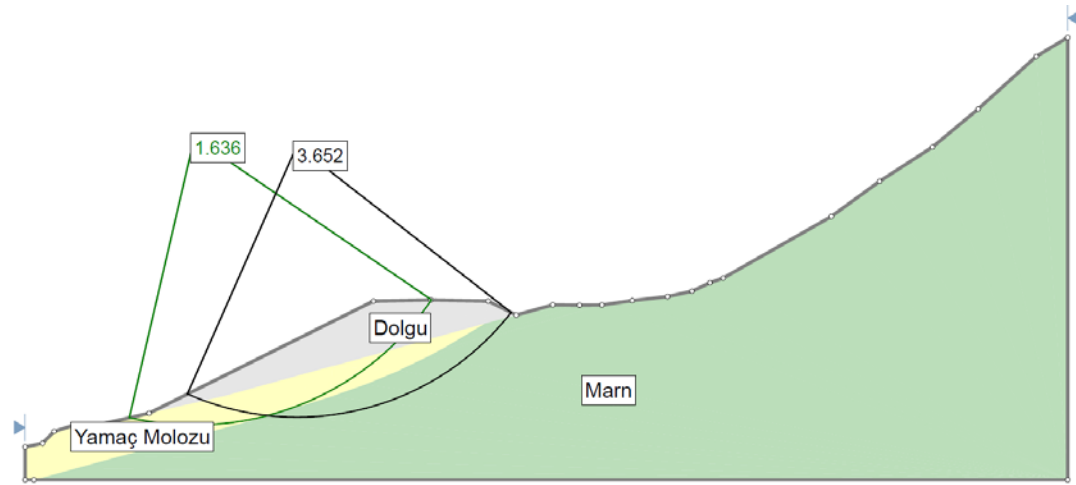
Şekil 7.16. Kesit 4'te  $r_u=0.15$  için statik şev duraylılığı analizi.



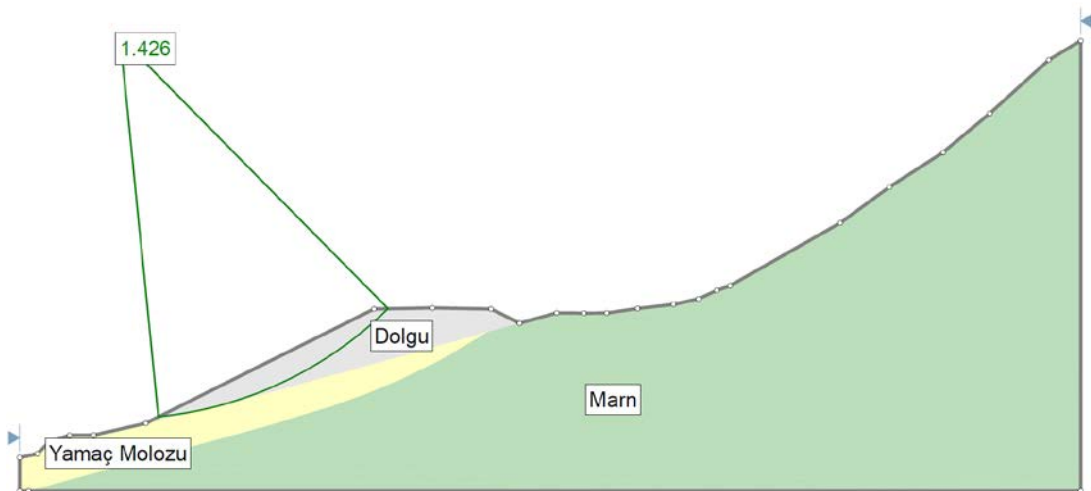
Şekil 7.17. Kesit 4'te  $r_u=0$  (kuru durum) için psödo-statik şev duraylılığı analizi.



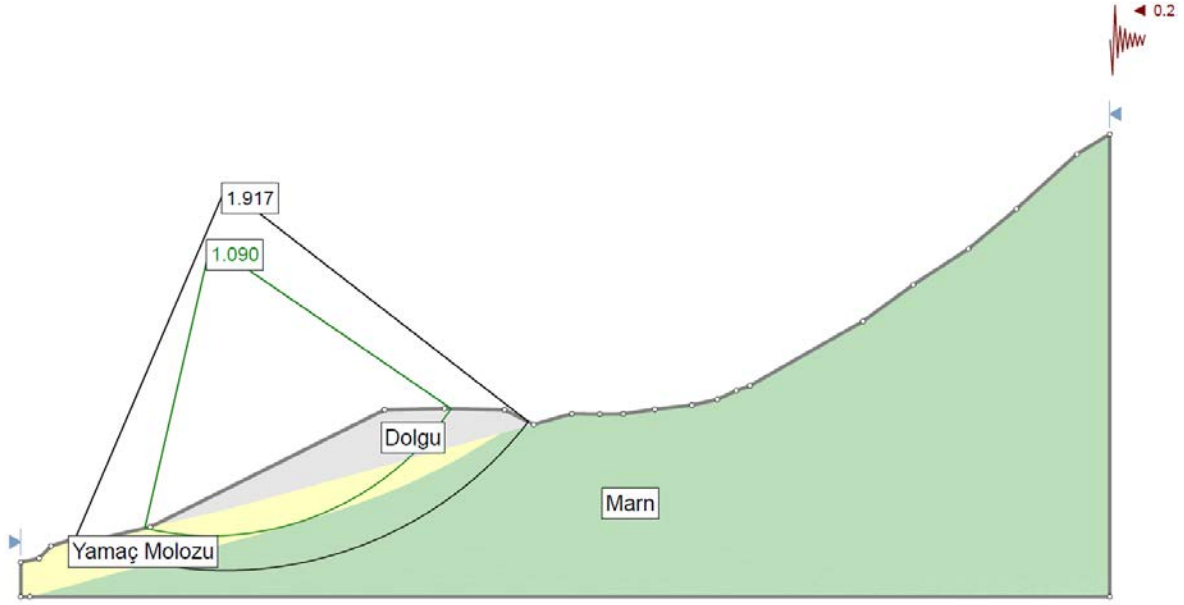
Şekil 7.18. Kesit 4'te  $r_u=0.15$  için psödo-statik şev duraylılığı analizi.



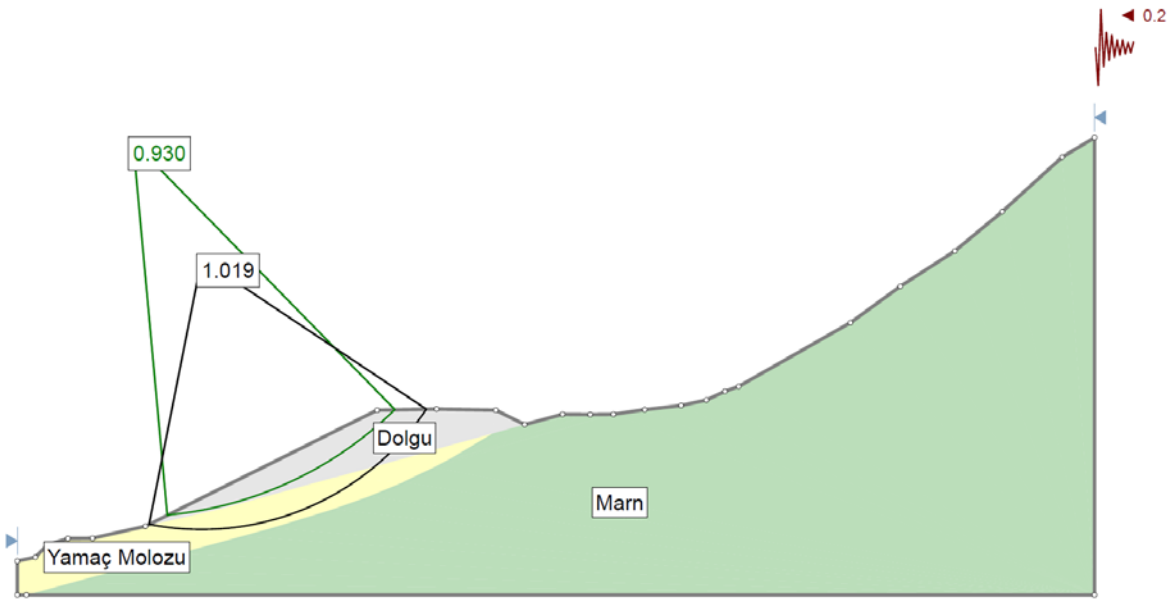
Şekil 7.19. Kesit 5'te  $r_u=0$  (kuru durum) için statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.20. Kesit 5'te  $r_u=0.15$  için statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.21. Kesit 5'te  $r_u=0$  (kuru durum) için psöydo-statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.22. Kesit 5'te  $r_u=0.15$  için psöydo-statik şev duraylılığı analizi.

Bu değerlendirmeler sonucunda, inceleme alanındaki yol güzergahı boyunca, marn kaya kütlesi içinde bir yenilme beklenmeyeceği, kritik yenilme yüzeylerinin dairesel ya da dairesel olmayan modellerde dolgu ve yamaç molozu içinde gelişebileceği saptanmıştır. Duraysızlığın gerçekleştiği lokasyonda (bkz. Şekil 7.1, incelenen yol güzergahının yaklaşık orta kesimi), statik ve kuru koşulda dahi 1.3'ten oldukça düşük F değerlerinin hesaplanması nedeniyle, duraysızlık sonrası şev geometrisinin güvenli olmadığı anlaşılmaktadır. İncelenen yol güzergahının güneybatı kesiminde drenaj önlemlerinin

alınması durumunda, yol güzergahı üzerinde duraysızlık probleminin olmadığı, ancak özellikle Kesit-2'nin temsil ettiği kesimde yolun aşağısındaki kotlarda yer alan yamaç molozunun yüzeylendiği şevlerde sismik etkinin varlığı durumunda problem olabileceği görülmüştür. Bununla birlikte, bu alandaki yamaç molozunun kalınlığının kesin olmayıp, tahmini olarak belirlenmesi nedeniyle, bu olası duraysızlığın yol üzerinde yaratacağı problemin, yamaç molozunun tahmin edilenden çok daha az olması durumunda önemsiz olabileceği düşünülmektedir. Güzergahın kuzeybatı kesiminde ise, statik koşulda herhangi bir problem beklenmezken sismik etkinin ve su basınçlarının varlığı durumunda şevlerin güvenli olarak kabul edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, drenaj önlemlerinin alınması durumunda, psödo-statik analizlerde 1.1'e yakın F değerlerinin belirlenmesi nedeniyle, şevlerin güvenli sayılabileceği düşünülmüştür. Bunlara rağmen, mevcut durumdaki dolgu malzemesi (eski dolgu) bozunmaya oldukça duyarlı ve zamanla tamamen artık toprağa dönüşebilecek özellikteki marnlardan hazırlanmış kırmataşlardan oluşmaktadır. Zaman içinde bu dolgu malzemesinin dayanımının azalması halinde, üstte yapılan değerlendirmeler sonrasında güvenli sayılabilecek alanların da ileride problem yaratabileceği ortaya çıkmaktadır.

## **7. 2. Yeni Dolgu Malzemesinin Kullanılması Durumundaki Analizler**

Bölüm 1'de, sahada yapılan iyileştirme çalışmaları kapsamında, yeni dolgu malzemesi olarak tanımlanan kireçtaşı kırmataşlarının dolgu malzemesi olarak serildiğine değinilmişti. Tez çalışması kapsamında, uygulanan iyileştirme çalışmasının ayrıntısı bilinmediğinden bu iyileştirme projesine yönelik bir değerlendirme yerine, bu kırmataşların kullanılması ancak teze özgün değerlendirmelerin yapılması amaçlanmıştı. Bu kapsamda, eski dolgunun kaldırılıp yerine yeni dolgunun serilmesi durumunda yukarıda şev duraylılığı analizleri tekrarlanmıştır. Analizlerde yeni dolgu malzemesinin doğal ve doygun birim hacim ağırlıkları sırasıyla 16.5 ve 19.6 kN/m<sup>3</sup>, makaslama dayanımı parametreleri ise  $c=21.4$  kPa ve  $\phi=45.8^{\circ}$  olarak alınmıştır (bkz. Bölüm 5). Kesit-2'de dolgu kalınlığının çok az olması ve mevcut haldeki durumdan elde edilen sonuçları neredeyse hiç değiştirmeyeceği nedeniyle, bu kesitte yeni dolgu için analiz tekrarlanmamıştır. Diğer kesitlerde analizler gerçekleştirilmiş olup, elde edilen güvenlik katsayıları Çizelge 7.2'de sunulmuştur. Kesit-3'te yeni dolgu kullanılması durumunda yapılan analizler, örnek olarak Şekil 7.23 - Şekil 7.26'da gösterilmiştir. Diğer kesitlerdeki analizlerde Bölüm 7.1'deki en kritik kayma



modellerine benzer sonuçların alınması ve sadece F değerlerinin farklı olması nedeniyle, analiz görüntülerinin verilmesine gerek duyulmamıştır.

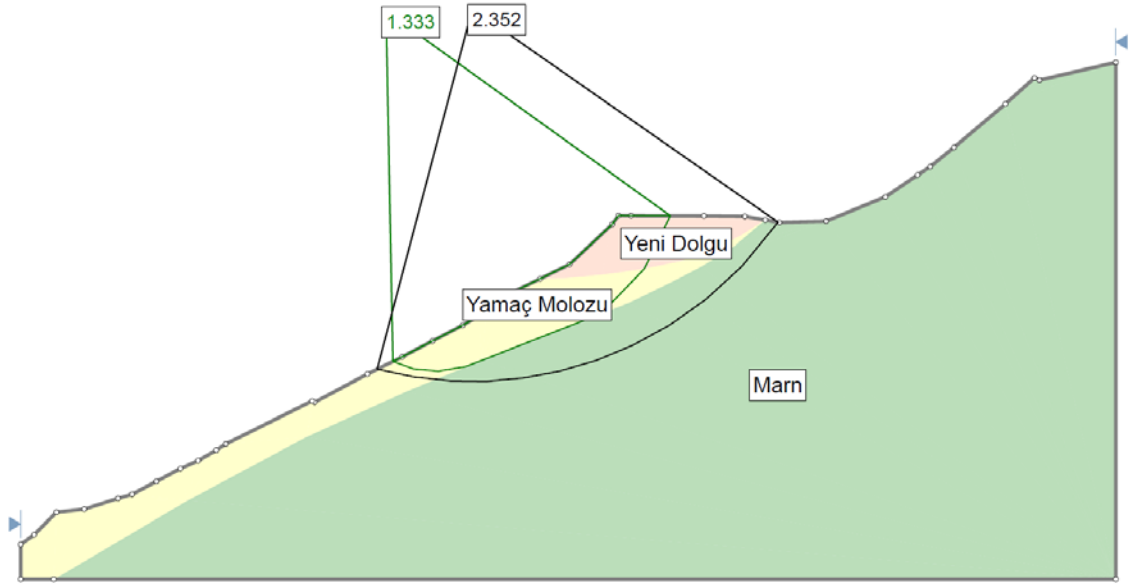
Çizelge 7.2’de verilen analiz sonuçları incelendiğinde; yeni dolgunun eski dolgu ile yer değiştirilmesi halinde, 1, 4 ve 5 no’lu kesit hatları boyunca gerek statik gerekse sismik etki dikkate alınarak yapılan analizlerde şevlerde duraysızlık probleminin olmayacağı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, bu tasarımda da özellikle 4 ve 5 no’lu kesit hatlarının temsil ettiği kesimlerde drenaj önlemlerinin alınarak boşluk suyu basınçlarının analizlerde öngörülen değerlerin üstüne çıkmamasının sağlanması gerekmektedir. Kesit-3’ün temsil ettiği yol güzergahı için ise, gerekli drenaj önlemlerinin alınması şartıyla statik koşullarda duraysızlık probleminin beklenmeyeceği görülmektedir. Ancak, sismik etkinin varlığı durumunda, bu alandaki şevlerin güvenli sayılamayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu analizlerde, yamaç molozu için geriye dönük analizlerde kritik olarak belirlenen doruk dayanım parametreleri kullanılmıştır. Ancak, kısa sürede gerçekleşme dahi uzun sürede, yamaç molozunun doruk dayanımı aşılp artık dayanım parametreleri kritik hale gelebileceğinden, analizler bu birimin artık dayanım parametreleri dikkate alınarak tekrarlanmıştır (Çizelge 7.3). Bu çizelge incelendiğinde, drenaj önlemlerinin alınması durumunda statik koşullarda şevlerde problem yaşanmayacağı, ancak sismik etki dikkate alındığında Kesit 3’ün yanı sıra Kesit 4 ve 5’in temsil ettiği alanlarda da istenilen güvenlik katsayılarının elde edilemediği görülmektedir. Bu nedenlerle, yeni dolgunun eski dolgu yerine kullanılması halinde dahi, inceleme alanının orta ve kuzeydoğu kesimlerinde güçlendirmeye yönelik ek önlemlerin optimum düzeyde projelendirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 7.2. Yeni dolgu kullanılması durumunda farklı boşluk suyu basıncı oranlarında ( $r_u$ ) şev duraylılığı analiz sonuçları.

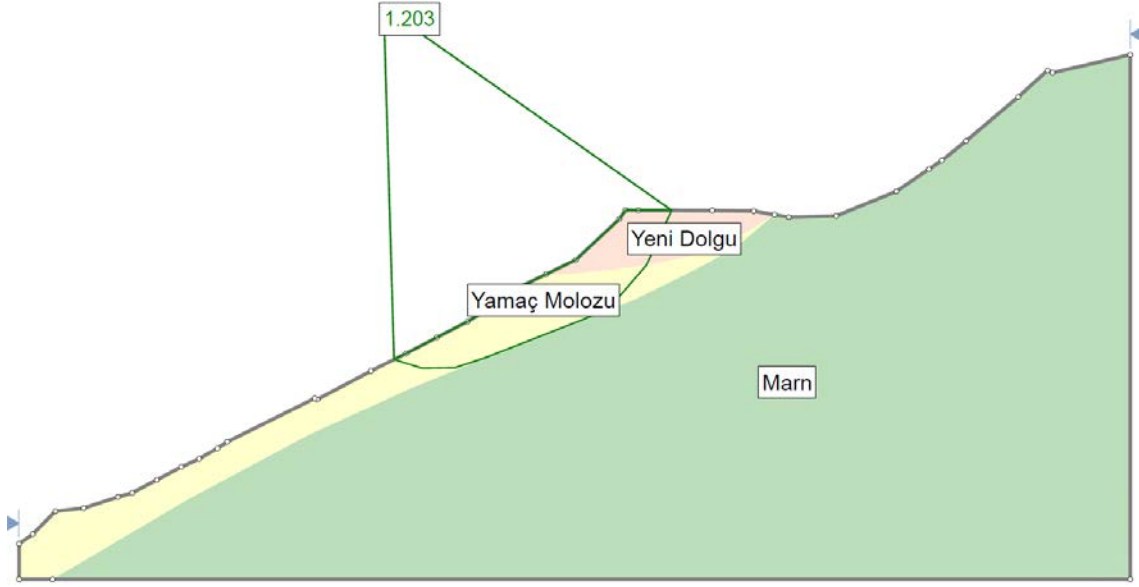
Güvenlik Katsayısı (F)				
Kesit No	Statik Durum		Sismik Durum	
	$r_u=0$	$r_u=0.15$	$r_u=0$	$r_u=0.15$
1	1.655	1.626	1.289	1.270
3	1.333	1.203	0.910	0.822
4	1.458	1.423	1.120	1.089
5	2.515	1.752	1.240	1.136

Çizelge 7.3. Yeni dolgu kullanılması durumunda ve yamaç molozunun artık dayanım parametreleri kullanılarak farklı boşluk suyu basıncı oranlarında ( $r_u$ ) şev duraylılığı analiz sonuçları.

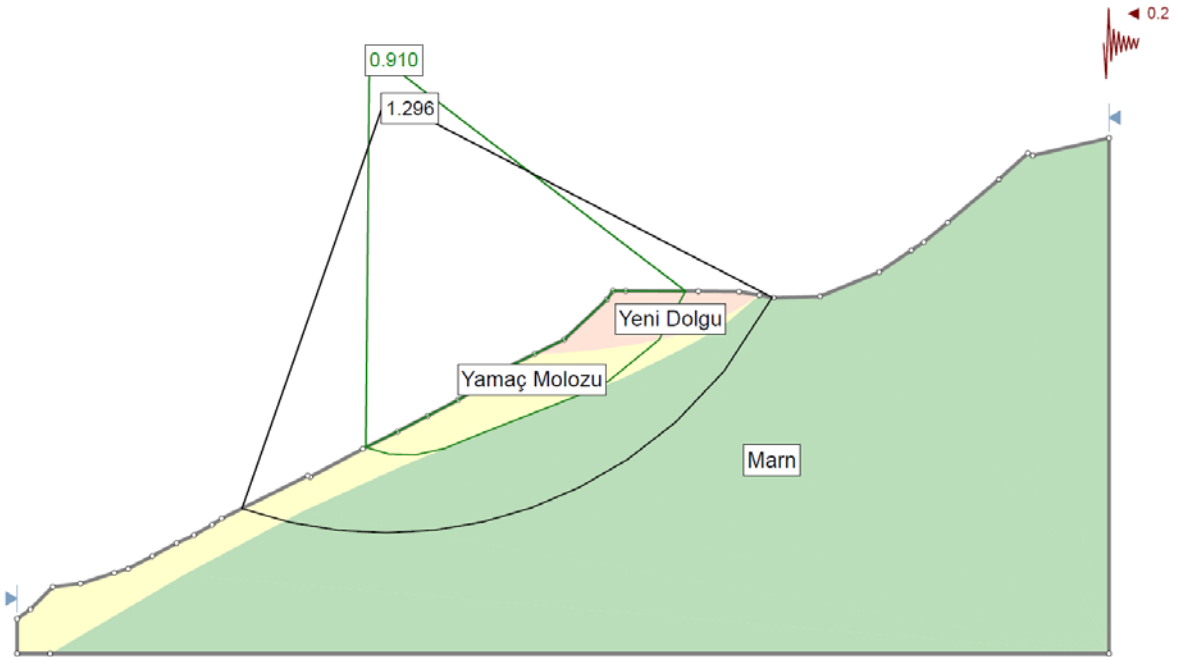
Güvenlik Katsayısı (F)				
Kesit No	Statik Durum		Sismik Durum	
	$r_u=0$	$r_u=0.15$	$r_u=0$	$r_u=0.15$
1	1.588	1.562	1.225	1.163
3	0.884	0.781	0.595	0.522
4	1.326	1.291	0.991	0.962
5	1.298	1.164	0.816	0.734



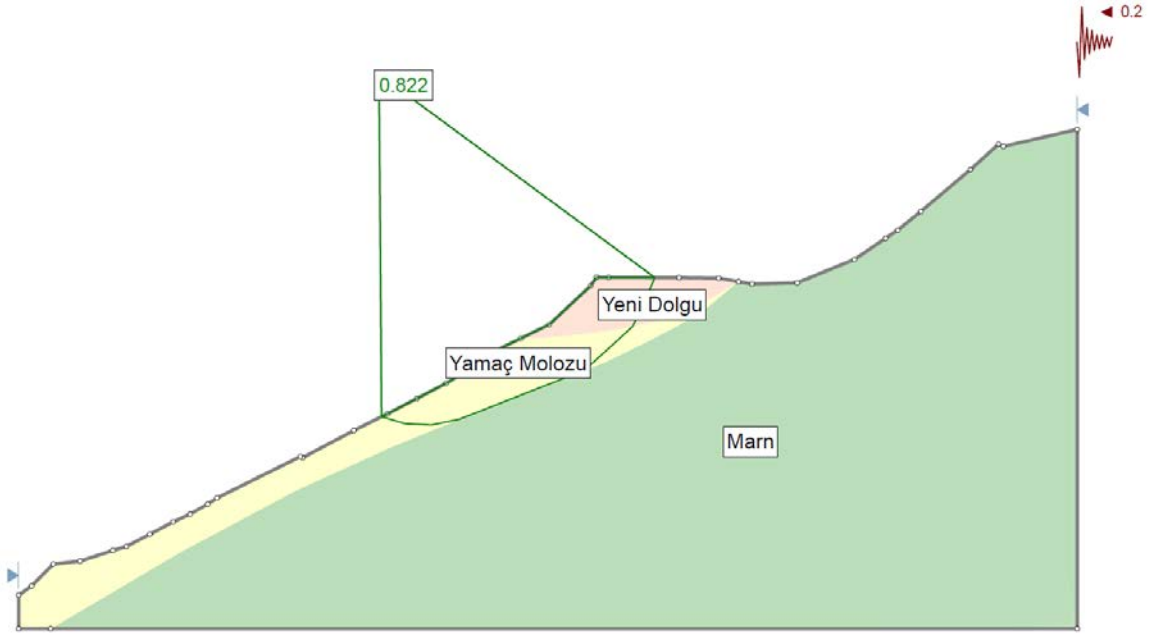
Şekil 7.23. Kesit 3'te yeni dolgu kullanılması durumunda ve  $r_u=0$  (kuru koşul) için statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.24. Kesit 3'te yeni dolgu kullanılması durumunda ve  $r_u=0.15$  için statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.25. Kesit 3'te yeni dolgu kullanılması durumunda ve  $r_u=0$  (kuru koşul) için psöydo-statik şev duraylılığı analizi.



Şekil 7.26. Kesit 3'te yeni dolgu kullanılması durumunda ve  $r_u=0.15$  için psödo-statik şev duraylılığı analizi.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mudurnu-Göynük Devlet Karayolunun Bozcaarmut kesimindeki yaklaşık 200 metrelik güzergah boyunca gözlenen duraysızlıklara ilişkin değerlendirmeler ve gerek dolgu gerekse jeolojik birimlerdeki doğal ve yapay şevlerin duraylılığına yönelik elde edilen başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

1. Çalışma alanında, Yenipazar Formasyonuna ait jeolojik birimlerden marn kaya kütlesi ve yamaç molozunun yüzeylendiği belirlenmiştir.
2. İnceleme alanında 475 yıllık tekrarlanma periyodunda %10 olasılıkla etkimesi beklenen en büyük yatay yer ivmesi değeri (PGA) 0.4g olduğu tespit edilmiş, şev duraylılığı analizlerinde esas alınabilecek sismik katsayının ise 0.2g olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
3. Yerinde yapılan gözlemsel değerlendirmelerde marn kaya kütlesinin çok kırıklı yapıda ve bozunmaya karşı oldukça duyarlı olduğu, ayrıca inceleme alanı ve yakın civarında bu kaya kütlesi içinde süreksizlik denetimli bir duraysızlığın gözlenmemesi nedeniyle bu birimde kaya kütlesi yenilme modelinin geçerli olacağı sonucuna varılmıştır.
4. Marn kaya malzemesi doğal birim hacim ağırlığının  $23.4 \text{ kN/m}^3$  olduğu belirlenmiştir. Bu birim için nokta yükleme deneylerinden dolayı olarak belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değerlerinin nispeten düşük olduğu ve yüzeyden alınan deney örneklerinin nispeten dayanım kaybına uğramış olabileceği nedeniyle, daha önceki çalışmalarda sondaj karotları üzerindeki doğrudan deneylerden  $11.8 \text{ MPa}$  olarak belirlenen UCS değerinin marn kaya kütlesi sağlam kaya malzemesi dayanımı için kullanılabileceği anlaşılmıştır. Marn kaya kütlesi jeolojik dayanım indeksi (GSI) ortalama değeri 30, bu birimin Hoek-Brown sağlam kaya malzemesi  $m_i$  sabiti ise 7 olarak belirlenmiştir.
5. Bölgede gözlenen yamaç molozu biriminin doğal ve doymuş birim hacim ağırlıklarının sırasıyla  $17.9 \text{ kN/m}^3$  ve  $19.2 \text{ kN/m}^3$  olduğu, doruk kohezyon değerlerinin ( $c_p$ )  $23.9 - 32.2 \text{ kPa}$  arasında, doruk içsel sürtünme açısı değerlerinin ( $\phi_p$ )  $12.8^\circ - 16.0^\circ$  arasında değiştiği, artık kohezyon ( $c_r$ ) ve içsel

sürtünme açılarının ( $\phi_r$ ) ise, sırasıyla 13.2 - 15.9 kPa ve 10.1°-13.6° arasında değiştiği tespit edilmiştir.

6. Eski dolguya ait marn kırmataşları ile yeni dolgu olarak tanımlanan kireçtaşı kırmataşlarının doğal birim hacim ağırlıkları, sırasıyla 19.5 kN/m<sup>3</sup> ve 16.5 kN/m<sup>3</sup>, kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 18.8 kN/m<sup>3</sup> ve 15.6 kN/m<sup>3</sup>, doymuş birim hacim ağırlıkları ise sırasıyla 21.5 kN/m<sup>3</sup> ve 19.6 kN/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, eski ve yeni dolgunun özgül ağırlıklarının sırasıyla 2.65-2.67 ve 2.66-2.69 arasında değiştiği belirlenmiştir.
7. İnceleme alanında gerçekleşen duraysızlığın marn kırmataşından oluşan eski yol dolgusu ve altında yüzeyleyen yamaç molozu içinde dairesel kayma modelinde gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu duraysızlık için yapılan geriye dönük analizlerde, dolgu malzemesi ile yamaç molozunun doruk makaslama dayanımı parametrelerinin ve yaklaşık 0.15 oranında bir boşluk suyu basıncının duraysızlığın gelişmesinde etkin olduğu saptanmıştır.
8. İnceleme alanındaki yol güzergahı boyunca, marn kaya kütlesi içinde bir yenilme beklenmeyeceği, kritik yenilme yüzeylerinin dairesel ya da dairesel olmayan modellerde dolgu ve yamaç molozu içinde gelişebileceği saptanmıştır. Özellikle duraysızlığın gerçekleştiği lokasyon ve yakın çevresinde statik ve kuru koşulda dahi 1.3'ten oldukça düşük F değerlerinin hesaplanması nedeniyle, bu kesimde duraysızlık sonrası şev geometrisinin güvenli olmadığı anlaşılmıştır.
9. İncelenen yol güzergahının güneybatı kesiminde drenaj önlemlerinin alınması durumunda duraysızlık probleminin olmayacağı, ancak bu alanda özellikle Kesit-2'nin temsil ettiği kesimde, yolun aşağısındaki kotlarda yer alan yamaç molozunun yüzeylendiği şevlerde sismik etkinin varlığı durumunda problem olabileceği görülmüştür. Bununla birlikte, bu alandaki yamaç molozunun kalınlığının kesin olarak belirlenmesi ve olası duraysızlıklara ilişkin kesin değerlendirmelerin yapılabilmesi için ek çalışmaların yapılması gerekmektedir.
10. Güzergahın kuzeybatı kesiminde, statik koşulda herhangi bir problem beklenmezken sismik etkinin ve su basınçlarının varlığı durumunda şevlerin güvenli olarak kabul edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Drenaj önlemlerinin

alınması durumunda ise, psödo-statik analizlerde 1.1'e yakın F değerlerinin belirlenmesi nedeniyle, şevlerin güvenli sayılabileceği düşünülmüştür.

11. Elde edilen bu sonuçlara rağmen; mevcut durumdaki dolgu malzemesi bozunmaya oldukça duyarlı ve zamanla tamamen artık toprağa dönüşebilecek özellikteki marnlardan hazırlanmış kırmataşlar olduğundan, zaman içinde bu dolgu malzemesinin dayanımında azalma söz konusu olabilecektir. Bu durum nedeniyle, analizlerde güvenli sayılabilecek alanlarda dahi ileride duraysızlık problemi yaşanabileceği gözardı edilmemelidir.

12. Eski dolgunun (marn kırmataşı) kaldırılıp yerine yeni dolgunun (kireçtaşı kırmataşı) serilmesi durumunda ve drenaj önlemlerinin alınması koşuluyla, Kesit-3'ün temsil ettiği saha (inceleme alanının yaklaşık orta kesimleri) haricinde diğer alanlarda statik koşulda ya da sismik etkinin varlığı halinde duraysızlık probleminin yaşanmayacağı sonucuna varılmıştır. Bu sahada ise, sismik etkinin varlığı durumunda şevlerin güvenli sayılamayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, uzun süreli duraylılık koşulları dikkate alındığında 4 ve 5 no'lu kesitlerin temsil ettiği alanın da kritik olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenlerle, yeni dolgunun eski dolgu yerine serilmesi halinde dahi, inceleme alanının orta ve kuzeybatı kesimlerinde güçlendirmeye yönelik ek önlemlerin ek analizlerle optimum düzeyde projelendirilmesi gerekmektedir.

## 9. KAYNAKLAR

- Abdüsselamoğlu, M. Ş., Göynük-Mudurnu-Beydili Bölgesinin Jeolojisi, Maden Tetkik ve Arama Derleme Rapor, No:2391, Ankara, **1956**.
- Abdüsselamoğlu, M. Ş., Almacık Dağı ile Mudurnu ve Göynük Civarının Jeolojisi, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Monografileri, 14, 14-94, **1959**.
- AFAD, T.C. İç İşleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, <http://deprem.afad.gov.tr> (Erişim tarihi: **8 Kasım 2019**).
- Akan S., Mudurnu-Göynük Havzası'nın Üst Kretase-Paleojen Tortulları Stratigrafisi ve Paleo-Ortamsal Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, **2010**.
- Akpınar Erol G., Şev Stabilitesi Probleminin Teorik ve Uygulamalı Olarak Araştırılması: Bakırdağ Heyelanı Vaka Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, **2018**.
- Alamanis N., Failure of Slopes and Embankments Under Static and Seismic Loading, American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS), Volume 35, No 1, 95-126, **2017**.
- Aksay, A. ve Duru, M., 1:100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Adapazarı H24 Paftası. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, No: 37, **2002**.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), Annual Book of ASTM Standards, Soil and Rock: Part:19, ASTM Publication, Philadelphia, USA, **2000**.
- Aydan, Ö., Ulusay, R. Back-analysis of a Seismically Induced Highway Embankment Failure During the 1999 Düzce Earthquake, Env. Geol., 42, 621-631, **2002**.
- Bieniawski, Z. T., Engineering classification of jointed rock masses, Transaction of South African Institution of Civil Engineering, 15 (12), 335-344, **1973**.
- Bieniawski, Z.T., Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley and Sons, 237 pp., **1989**.
- Bishop, A. W., The use of slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique, 5, 7 – 17, **1955**.
- D'Applonia Consulting Engineers, Engineering and Design Manual-Coal Refuse Disposal Facilities. Mining Enforcement and Safety Administration, U.S. Department of Interior, **1975**.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, S., Şaroğlu, F., Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara, **2013**.
- Erginal A. E., Bayrakdar C., Karayolu Heyelanlarına Bir Örnek: İncecik Heyelanı, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi, 14, 43-53, **2005**.
- Ertekin Yardımcı E., Ağrı-Kağızman Yolu Boyunca Meydana Gelen Heyelanların Anatomisi ve Uygulanabilir Çözüm Önerileri, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2018**.



- Eurocode 6, Design of masonry structures - Part 1-1:General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, EN 1996-1-1, **2005**.
- Feld, J., The factor of safety in soil and rock mechanics. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 185-197. **1965**.
- Fookes, P.G., Reeves, B.J., Dearmen, W.R., The Design and Construction of a Rock Slope in Weathered Slate at Fowey, Southwest England, *Geotechnique*, 27, 533 – 556, **1977**.
- Gedik, İ. ve Aksay, A., 1:100000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Adapazarı H25 Paftası, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, No:38, **2002**.
- Google Earth, <https://www.google.com/earth/> (Erişim tarihi: **1 Kasım 2019**).
- Görbil B., Stability Assessment of The Landslide in Bartın Kirazlı Bridge Dam Diversion Km:18+325-18+421 Segment, A Thesis Submitted to the Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, **2019**.
- Hadjigeorgiou J., Kyriakou E., Papanastasiou P., A Road Embankment Failure Near Pentalia in Southwest Cyprus, The South African Institute of Mining and Metallurgy International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, 343-352, **2006**.
- Heyerdahl H., Høydal Ø., Nadim F., Kalsnes B.G. (2013), Rainfall-induced Collapse of Old Railway Embankments in Norway, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 1121-1124, **2013**.
- Hoek, E., Caranza-Torres, C.T., Corkum, B., Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, Proc. Of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, Vol. 1, 267-273, **2002**.
- Hoek, E., Strength of Rock and Rock Masses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16, **1994**.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., Support of underground excavations in hard rock, Balkema, Rotterdam, 214, **1995**.
- Huang, Y. H., Stability Analysis of Earth Slopes, Van Nostrand Reinhold Comp., New York, 305 p, **1983**.
- Hynes-Griffin, M.E., Franklin, A.G., Rationalizing the seismic coefficient method. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 37pp., **1984**.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, 628 p, **2007**.
- Jamaludin S., Jafaar K. M., Reconstruction of Road Embankment Failure Using Reinforced Geogrid: Revisiting the Site After 15 Years, Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, April 29-May 4 2013, Chicago, p.9, **2013**.

- Janbu, N., Slope stability computations in: Embankment Dam Eneineering, Cassagrande Volume, R. C. Hirshfelds and S. J. Poulos (eds.), Wiley, New York, 47-86, **1973**.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), Türkiye Karayolları Haritası, Ankara, **2019**.
- Marcuson, W.F., Franklin, A.G., Seismic Design, Analysis, and Remedial Measures to Improve the Stability of Existing Earth Dams - Corps of Engineers Approach. Seismic Design of Embankments and Caverns, T.R. Howard (eds.), New York, ASCE, **1983**.
- Marinos, P., Hoek, E., Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 60, 85-92, **2001**.
- Melo, C. and Sharma, S., Seismic Coefficients for Pseudostatic Slope Analysis. World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, **2004**.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <http://www.mgm.gov.tr/veri-degerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.html> (Erişim tarihi: **1 Kasım 2019**)
- Miranda Dias, J.L., Cracking due to shear in masonry mortar joints and around the interface between masonry walls and reinforced concrete beams, Construction and Building Materials, 21, 446–457, **2007**.
- Paulay, T., Priestly M. J. N., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley and Sons, New York, **1992**.
- Rocscience, Roclab v1.0 Rock Mass Strength Analysis Using The Generalized Hoek-Brown Failure Criterion, Rocscience Inc, Toronto, Ontario, Canada, **2002**.
- Rocscience, Slide v6.0-2D limit equilibrium analysis, Rocscience Inc, Toronto, Ontario, Canada, **2010**.
- Sancio, R. T., The use of back-calculations to obtain the shear and tensile strength of weathered rocks, Proc. Of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo, 647 – 658, **1981**.
- Saner, S., Gevye-Osmaneli Gölpazarı-Taraklı Alanının Jeolojisi, Eski Çökme Ortamları ve Çökmenin Evrimi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi, İstanbul, **1977**.
- Saner, S., Mudurnu-Göynük havzasının Jura ve sonrası çökme nitelikleriyle paleocoğrafya yorumlanması, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni. 23,39-52, **1980**.
- Schuster, R., Krizek, R., Landslides. Analysis and Control. (A. A. Varga, R. R. Tizdel, Trans.). Moscow: Mir., **1981**.
- Sevin, M., Aksay, A., Türkiye Jeoloji Haritaları, Bolu G28 Paftası, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, No: 35, **2002**.
- Sönmez, H., Ulusay, R., Modification to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36 (6), 743 – 760, **1999**.
- Sönmez, H., Ulusay, R., A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the verified by slope stability case studies, Yerbilimleri, 26, 77 – 90, **2002**.