

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜNEL GİRİŞ YAPILARINDA
ŞEV STABİLİTE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Müh. Erdem İLYASOĞLU**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Programı : ZEMİN MEKANİĞİ VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ**

OCAK 2008

**TÜNEL GİRİŞ YAPILARINDA
ŞEV STABİLİTE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Müh. Erdem İLYASOĞLU
501041327

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2008

TEZ DANIŞMANI : Y.Doç.Dr. Aykut ŞENOL

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Mahir VARDAR (İTÜ)

Prof.Dr. Mete İNCECİK (İTÜ)

OCAK 2008

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bana her türlü desteği veren, yardımlarını esirgemeyen ve birlikte çalışmaktan keyif aldığım sevgili hocam Sayın Y.Doç.Dr. Aykut ŞENOL'a çok teşekkür ederim.

Bana her türlü konuda yol gösteren, deneyimlerini paylaşan ve hayata bakış açısıyla bana çok şey katan, her zaman örnek aldığım değerli aile büyüğüm ve sevgili hocam Sayın Prof.Dr. Mahir VARDAR'a bana harcadığı emek için teşekkür ederim.

Tüm yaşamım boyunca bana doğru yolu gösteren, beni bu günlere getiren, bana güvenen ve desteklerini her zaman üzerimde hissettiğim babam Dr. Hüseyin İLYASOĞLU, annem Gülşah İLYASOĞLU, ablam Didem EGELİ ve tüm aileme minnettarım.

Çalışmam boyunca bana her türlü desteği sağlayan, bana çok yardımcı olan ve sorunları kendi sorunuymuş gibi çözmek için çaba sarf eden en başta sevgili ağabeyim Dr.Müh. Bülent KOÇAK olmak üzere tüm EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. Şti. yönetici ve çalışanlarına ve ismini burada saymadığım çalışmamda emeği geçen dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2008

Erdem İLYASOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

KISALTMALAR	V
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. PORTAL YAKLAŞIM KAZILARININ STABİLİTE ANALİZİ VE PROJELENDİRME İLKELERİ	2
2.1 Tünellerde Portal Kesimi	2
2.2 Kaya Şevi ve Stabilitesi	3
2.3 Kaya Şevlerinde Kayma Türü Stabilite Bozulmaları	4
2.4 Kayalarda Şev Stabilite Analizi	5
2.5 Kaya Şev Stabilitesini Etkileyen Faktörler	10
2.6 Kaya Şevleri Projelendirme İlkeleri	13
3. KAĞITHANE PORTALİ TASARIMI VE PROJELENDİRMESİ	18
4. KAĞITHANE PORTALİ YAKLAŞIM KAZILARI JEOLJİK, GEOMEKANİK VE MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ MODEL ÇALIŞMALARI	24
4.1 Bölgenin Genel Jeolojisi	24
4.1.1 Stratigrafi	26
4.1.2 Yapısal Jeoloji	29
4.1.3 Depremsellik	30
4.2 Saha Jeolojisi Çalışmaları	31
4.2.1 Mekanik Sondaj Çalışmaları ve Karot Alımı	35
4.3 Laboratuvar Çalışmaları	40
4.3.1 Fiziksel Deneyler	40
4.3.2 Mekanik Deneyler	43
4.4 Arazi ve Laboratuvardan Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi	52
5. GEOTEKNİK MODEL OLUŞTURULMASI	55
5.1 Şevlerin Boyutlandırılması ve Stabilite Analizi İlkeleri	57
5.2 GeoSlope ile Şev Stabilite Analizi	61
5.2.1 B-B' Boykesiti Desteksiz Olarak Statik ve Depremlı Durum Analizi	63
5.2.2 B-B' Boykesiti Destekli Olarak Statik ve Depremlı Durum Analizi	64
5.2.3 A-A' Enkesiti Desteksiz Olarak Statik ve Depremlı Durum Analizi	67
5.2.4 A-A' Enkesiti Destekli Olarak Statik ve Depremlı Durum Analizi	68
5.3 Plaxis ile Şev Stabilite Analizi	70
5.3.1 B-B' Boykesiti Desteksiz ve Statik Durumda Sonlu Elemanlar Analizi	70

5.3.2	B-B' Boykesiti Destekli ve Statik Durumda Sonlu Elemanlar Analizi	72
5.3.3	A-A' Enkesiti Desteksiz ve Statik Durumda Sonlu Elemanlar Analizi	75
5.3.4	A-A' Enkesiti Destekli ve Statik Durumda Sonlu Elemanlar Analizi	78
5.4	Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	82
6.	SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	83
	KAYNAKLAR	87
	EK-A	90
	EK-B	99
	EK-C	104
	EK-D	108
	ÖZGEÇMİŞ	109

KISALTMALAR

MJKM	: Mühendislik Jeolojisi Kaya Mekaniği
FEM	: Finite Element Method
SK	: Sondaj Kuyusu
ISRM	: International Society of Rock Mechanics
G_s	: Güvenlik Sayısı

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Kağıthane Portali SK-8 ve SK-9 Sondajlarından Elde Edilen Numunelerin Ortalama İndeks Özellikleri	43
Tablo 4.2: Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları	47
Tablo 4.3: Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları	49
Tablo 4.4: Nokta Yükleme Deneyi Sonuçları	50
Tablo 4.5: Endirek Çekme Deneyi Sonuçları	52
Tablo 4.6: Kağıthane Portali SK-8 ve SK-9 Numunelerinin Laboratuvar Deney Sonuçlarına Dayanarak Yapılan RocLab Analizi Sonuçları	54
Tablo 5.1: Hesaplamalarda Kullanılan Yerde Jeomekanik Parametreler	57
Tablo 5.2: GeoSlope Analiz Sonuçları Özeti	69
Tablo 5.3: Plaxis Analiz Sonuçları Özeti	80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Tünelde Portal Kesimi.....	2
Şekil 2.2: Şevlerde Yaygın Olarak Gözlenen Kaya Bloğu (a) ve Kama Kayması (b)	5
Şekil 2.3: Ülkemizde Bir Otoyol Yarmasında Meydana Gelmiş Kama Tipi Kayma (Alaşehir-Manisa)	7
Şekil 2.4: Süreksizlik Konumlarına Bağlı Olarak Şev Stabilitesi	7
Şekil 2.5: Düzlemsel Kaymada Kuvvetler Poligonu	8
Şekil 2.6: Arazide Kamanın Geometrisini Belirleyen Aktif Süreksizlik.....	9
Şekil 2.7: Kaya Şevlerinde Suyun Etkisiyle İçsel Parametrelerin (c, ϕ) Değişimi....	12
Şekil 2.8: i) Çekme Çatlağı Su ile Dolu Blok, ii) Tıkanmış Çatlaklı Blok iii) Şev Aynasından ve Şev Topuğundan Su Boşalımlı Blok	12
Şekil 3.1: Kağıthane-Piyalepaşa Tüneli Yerbulduru Haritası.....	19
Şekil 3.2: Kağıthane – Piyalepaşa Tüneli Giriş Portalı Uydu Fotoğrafı.....	20
Şekil 3.3: Kağıthane – Piyalepaşa Tüneli Giriş Portalı Güzargah Planı.....	20
Şekil 3.4: Kağıthane Portalı Kazıya Başlamadan Önce.....	21
Şekil 3.5: Kağıthane Portalı Yaklaşım Kazısı	21
Şekil 3.6: Kağıthane Portalı Şev Kazıları	22
Şekil 3.7: Portal Kazıları Sırasında İlk Şevin Oluşturulması	22
Şekil 3.8: Portal Kazı Aşaması ve Tüneler	23
Şekil 3.9: Kazının Tamamlanmasının Ardından Tünel Üzerinde Kalan Şevler.....	23
Şekil 4.1: İstanbul İli Deprem Bölgeleri Haritası	31
Şekil 4.2: Kağıthane Portalı Lokasyon 10	32
Şekil 4.3: Kağıthane Portalı Lokasyon 11	32
Şekil 4.4: Kağıthane Portalı Lokasyon 12	33
Şekil 4.5: Km 0+300.00’da Ezilme Zonu ve Aşırı Ayrışma	33
Şekil 4.6: Km 0+300.00’da Kuvarsit Damarı	34
Şekil 4.7: Kağıthane Portalı Lokasyon 13	34
Şekil 4.8: Kağıthane Portalı Lokasyon 14	35
Şekil 4.9: Kağıthane Portalı SK-8 Görünümü	35
Şekil 4.10: Kağıthane Portalı SK-8 3.00-10.00 m Karotları.....	36
Şekil 4.11: Kağıthane Portalı SK-8 18.10-23.50 m Karotları.....	36
Şekil 4.12: Kağıthane Portalı SK-8 43.00-47.10 m Karotları.....	37
Şekil 4.13: Kağıthane Portalı SK-8 59.80-64.60 m Karotları.....	37
Şekil 4.14: Kağıthane Portalı SK-9 Görünümü	38
Şekil 4.15: Kağıthane Portalı SK-9 6.40-11.00 m Karotları.....	39
Şekil 4.16: Kağıthane Portalı SK-9 21.50-27.00 m Karotları.....	39
Şekil 4.17: Kağıthane Portalı SK-9 27.00-32.00 m Karotları.....	40
Şekil 4.18: Laboratuvar Deney Numunelerinin Etüve Yerleştirilmesi.....	41
Şekil 4.19: Laboratuvar Deneyleri İçin Saf Suda Bekletilen Numuneler.....	42
Şekil 4.20: Deneylerde Kullanılabilecek Karotların Uzunluklarının Saptanması	44
Şekil 4.21: Laboratuvar Deneylerinde Kullanılacak Numunelerin Uygun Uzunluklarda Kesilmesi	44
Şekil 4.22: Laboratuvarda Karot İçinden Karot Alma İşlemi (başlangıç).....	45

Şekil 4.23: Laboratuvarda Karot İçinden Karot Alma İşlemi (bitiş).....	45
Şekil 4.24: Deney Numunelerinin Baş Kısımlarının Pürüzlerinin Giderilmesi	46
Şekil 4.25: Laboratuvar Deneylerinde Kullanılmak Üzere Hazırlanmış SK-8 53.60 – 55.80 m Derinliğe Ait Numune Grubu	46
Şekil 4.26: Tek Eksenli Basınç Deneyi Düzeneği.....	47
Şekil 4.27: Üç Eksenli Basınç Deneyi Düzeneği.....	48
Şekil 4.28: Nokta Yükleme Deneyi Düzeneği.....	50
Şekil 4.29: Endirek Çekme Deneyi Düzeneği.....	51
Şekil 4.30: Kağıthane Portalı SK-8 53.60-55.80 m Derinliğine Ait Numunelerin Laboratuvar Deney Sonuçlarının RocLab Analizi	53
Şekil 5.1: Janbu Yönteminde Gelişigüzel Seçilebilen Kayma Yüzeyi ve Kullanılan Geometrik ve Mekanik Parametreler	59
Şekil 5.2: Janbu Yönteminde Kullanılan Abaklar - f_0	60
Şekil 5.3: Janbu Yönteminde Kullanılan Abaklar - n_α	61
Şekil 5.4: Kağıthane Portal Planı ve Analizlerde Kullanılan A-A' Enkesiti ile B-B' Boykesiti	62
Şekil 5.5: B-B' Kesiti, Desteksiz - Statik Durum İçin GeoSlope Analizi.....	63
Şekil 5.6: B-B' Kesiti, Desteksiz - Depremlı Durum İçin GeoSlope Analizi	64
Şekil 5.7: B-B' Kesiti Desteklenmesi İçin Belirlenen Bulon Paterni.....	65
Şekil 5.8: B-B' Kesiti Bulon Destekli - Statik Durum İçin GeoSlope Analizi.....	66
Şekil 5.9: B-B' Kesiti Bulon Destekli - Depremlı Durum İçin GeoSlope Analizi....	66
Şekil 5.10: A-A' Kesiti, Desteksiz - Statik Durum İçin GeoSlope Analizi.....	67
Şekil 5.11: A-A' Kesiti, Desteksiz - Depremlı Durum İçin GeoSlope Analizi.....	68
Şekil 5.12: A-A' Kesiti Desteklenmesi İçin Belirlenen Bulon Paterni	68
Şekil 5.13: A-A' Kesiti Bulon Destekli - Depremlı Durum İçin GeoSlope Analizi .	69
Şekil 5.14: B-B' Kesiti Desteksiz Durum Plaxis Modeli	70
Şekil 5.15: B-B' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Deplasmanlar	71
Şekil 5.16: B-B' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Gerilmeler.....	71
Şekil 5.17: B-B' Kesiti Bulon Destekli Durum Plaxis Modeli.....	72
Şekil 5.18: Kesiti Bulon Destekli Durum Plaxis Modeli - Sonlu Elemanlar Ağı	73
Şekil 5.19: B-B' Kesiti Bulon Destekli Durum Deplasman Vektörlerinin Yönelimi	73
Şekil 5.20: B-B' Kesiti Bulon Destekli Durum Oluşan Gerilmeler	74
Şekil 5.21: B-B' Kesiti Bulon Destekli Durum En Kritik Kama Kayması Sınırı	74
Şekil 5.22: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Plaxis Modeli.....	75
Şekil 5.23: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Deplasmanlar	75
Şekil 5.24: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Deplasman Vektörleri Yönelimi	76
Şekil 5.25: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Gerilmeler	76
Şekil 5.26: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan En Kritik Kama Kayması Yüzeyi	77
Şekil 5.27: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Güvenlik Sayısı Grafiği.....	77
Şekil 5.28: A-A' Kesiti Bulon Destekli Plaxis Modeli	78
Şekil 5.29: A-A' Kesiti Bulon Destekli Plaxis Modeli - Sonlu Elemanlar Ağı	78
Şekil 5.30: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Deplasmanlar	79
Şekil 5.31: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Oluşan Deplasman Vektörlerinin Yönelimi.....	79
Şekil 5.32: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Oluşan Gerilmeler.....	80
Şekil 5.33: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Oluşan En Kritik Kama Kayması Yüzeyi	81
Şekil 5.34: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Güvenlik Sayısı Grafiği	81

SEMBOL LİSTESİ

c	: Kohezyon
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
$\alpha_s, \beta_s, \beta_{sev}$: Süreksizlik ve şev eğim açıları
A	: Kayan bloğun taban alanı
N	: Blok ağırlığından kaynaklanan normal kuvvet
γ_k, γ_d	: Kuru, suya doymun birim hacim ağırlığı
S_a	: Ağırlıkça su emme oranı
n	: Porozite
σ_ϕ	: Çekme direnci
p	: Kırılma anında ölçülen yük
d, l	: Numune çapı, boyu
S	: Tutucu sürtünme kuvveti
G_s	: Güvenlik sayısı
f_0	: Düzeltme faktörü
n_α	: Geometrik ilişkilendirme sayısı
p_u	: Dilim tabanında ortalama su basıncı
G, h, x	: Dilim ağırlığı, yüksekliği genişliği
Q_{H2O}	: Çatlak suyu itkisi

TÜNEL GİRİŞ YAPILARINDA ŞEV STABİLİTE ANALİZİ

ÖZET

Kaya yapıları mühendisliği, özellikle son yıllarda kaya mekaniğinde yapılan önemli araştırmaların geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımı ile büyük gelişme göstermiştir. Geoteknik mühendisliği projelerinde, şev tasarımları sıkça karşılaşılan teknik girişimlerdir. Bu tez çalışmasının amacı tünel yaklaşım kazıları sırasında oluşturulan portal şevlerinin planlama ve projelendirme yöntemlerinin ilke ve temellerinin açıklanması ve bu yöntemlerin güncel bir uygulama olan İstanbul Kağıthane - Piyalepaşa Tünelleri'nde Kağıthane Portali kazıları üzerinde uygulanmasıdır.

Portal bölgesinin kazı planının hazırlanması ve oluşturulacak şevlerde kullanılacak olan destekleme elemanlarının tespiti için saha çalışmaları yapılmıştır. Sondaj kuyularından alınan karotlar üzerinde İTÜ Maden Fakültesi Mühendislik Jeolojisi Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda çeşitli deneyler yapılmış ve deney sonuçları yerinde kaya büyüklüklerine indirgenmiştir.

Sahada ve laboratuarda yapılan detaylı araştırmalar neticesinde portal şevlerinin “herhangi bir önlem almadan stabilitesini karşılayabilir” olma durumları ile “ancak destekleme önlemleri ile stabilitesini sağlayabilir” seçeneklerinin değerlendirilmesine karar verilmiştir. Bu seçeneklerin değerlendirilmesi için sayısal analiz yöntemlerinin kullanılmıştır. Analizlerin gerçekçi sonuç vermesi için değerlendirmeler iki farklı program ile yapılmıştır. Bunlardan ilki kuvvetler dengesi esasına göre şev yüzeyinde oluşabilecek kama tipi kaymaları değerlendirebilen GeoSlope programıdır. Desteklemenin yapılmadığı ve yapıldığı durumlarda, statik ve deprem koşulları altında şevlerin güvenlik sayıları hesaplanmıştır. Tek bir yöntemle elde edilen sonuca bağlı kalınmaması için analizler sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme - deplasman hesabı yapan Plaxis adlı yazılım ile tekrarlanmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar GeoSlope sonuçları ile karşılaştırılmış, şevler için olması gereken minimum tasarım kriterleri belirlenmiştir.

Araştırma aşamasında yapılan geoteknik ölçüm ve gözlemlerle oluşturulan proje, yapım aşamasında ve işletim aşamasında yapılan ölçümlerle desteklendiğinde hedef olan “risksizlik” kanıtlanmış olacaktır. Bu değerlendirme ile Kağıthane portali şevleri boyutlandırılmış ve şevlerde belirlenen bulon destekleme paterni ile istenilen güvenlik sınırına erişilebileceği görülmüştür.

Sonuç olarak; bu tez çalışması kaya şevlerinin tasarımı ve projelendirilmesi için izlenecek olan yolun seçilmesinde önemli bir kaynak niteliğindedir. Benzer bir çalışmanın zemin şevleri için de yapılması, şev stabilitesi için planlama ve projelendirme eksikliğini giderecektir.

SLOPE STABILITY ANALYSIS ON A TUNNEL PORTAL

SUMMARY

Rock engineering is developed especially in last years by important researches in rock mechanics and their applications on geotechnical engineering areas. Slope designs are technical structures commonly used in geotechnical engineering projects. The aim of this thesis study is to explain the design principles of portal slopes constructed during tunnel face excavation and application of these procedures on a recent case study; Kağıthane portal of İstanbul Piyalepaşa – Kağıthane Tunnel.

Field applications were performed to design excavation phases and to determine the support elements applied on the portal slopes. Laboratory tests were performed on the samples taken from drilling holes at ITU MJKM Laboratory and results were reduced to the in-situ values.

According to the detailed researches performed both in field and in laboratories, it has been decided to evaluate two alternatives: “stability can be achieved without any precautions to be taken” and “stability can be achieved only by supporting”. Numerical analyses have been done to determine the alternatives. The analyses have been performed by using two different programs to have realistic results. GeoSlope determines wedge failures according to force equilibrium method. Factor of safeties have been calculated for static and dynamic conditions for supported and non-supported slopes. Not to be limited with one method, the re-calculations have also been done by Plaxis, using Finite Elements Method to calculate stress-strain relations. Both of the analysis results have been compared and minimum design criteria have been decided for a safe slope construction.

The design, formed according to the geotechnical measurements and investigations during surveying and engineering phases, will be the proof of the aim; safety, when the project is supported by measurement during construction phases. Kağıthane portal slopes have been designed and the aimed safety limits are obtained by the decided supporting elements after this evaluation.

As a result, this study is a valuable source, defining the methodology for rock slope design. A similar study for soil slopes would complete the lack of researches in the field of project design.

1. GİRİŞ

Kaya yapıları mühendisliği, özellikle son yıllarda kaya mekaniğinde (sürekli ortamlar ve süreksiz ortamlar mekaniği ile birlikte) yapılan önemli araştırmaların geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımı ile büyük gelişme göstermiştir. Baraj gibi büyük mühendislik yapılarında, tünel ve metro mühendisliği uygulamalarında, yol mühendisliğinde ve madencilik uygulamalarında kullanılan bu mühendislik disiplini geoteknik mühendisliği ile mühendislik jeolojisi birikimlerini bir arada değerlendirmektedir.

Geoteknik mühendisliği projelerinde, şev tasarımları sıkça karşılaşılan teknik girişimlerdir. Bu tez çalışmasının amacı tünel yaklaşım kazıları sırasında oluşturulan portal şevlerinin planlama ve projelendirme yöntemlerinin ilke ve temellerinin açıklanması ve bu yöntemlerin güncel bir uygulama olan İstanbul Kağıthane - Piyalepaşa Tünelleri'nde Kağıthane Portali kazıları üzerinde uygulanmasıdır.

Çalışma kapsamında detaylı bir literatür araştırması yapılmış, kaya şevleri için projelendirme ilkeleri incelenmiştir. Açıklanan yöntemlere sadık kalınarak Kağıthane - Piyalepaşa Tüneli Kağıthane Portali için saha çalışmaları yapılmış, portal kesiminde ayrıntılı jeolojik ve mühendislik jeolojisi incelemesi gerçekleştirilmiştir.

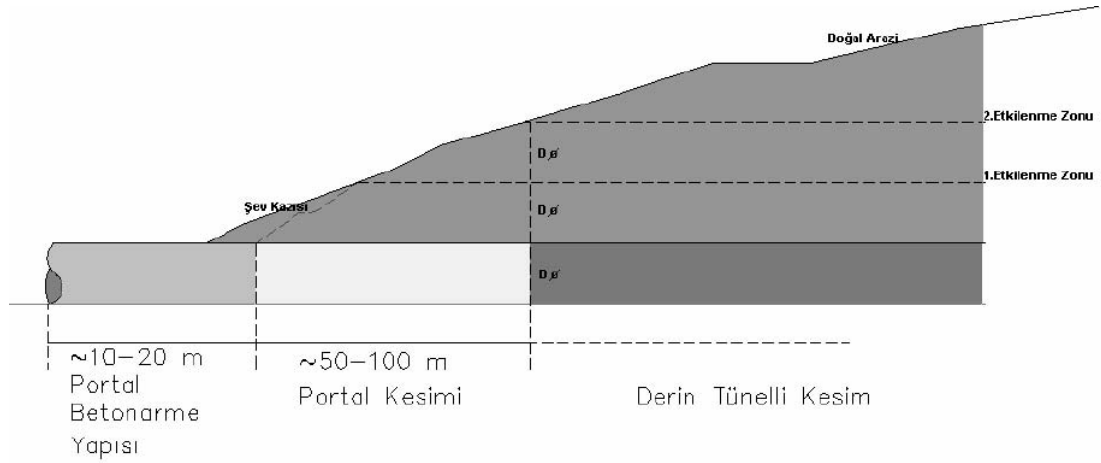
Sahada yapılan mekanik sondaj örneklerinden alınan karotlar üzerinde İTÜ MJKM Laboratuvarı'nda çeşitli deneyler yapılmıştır. Taş örnekleri için bulunan jeomekanik büyüklükler arazide kayacın sahip olduğu mekanik büyüklüklere indirgenmiş ve analizlerde kullanılmak üzere yorumlanmıştır.

Çalışmanın son aşamasında ise sayısal analizler yapılmış, şevlerin stabiliteyi incelenmiştir. Stabilite analizleri; limit denge eşitliklerine dayanan GeoSlope adlı yazılım ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme - deplasman analizlerine dayanan Plaxis adlı yazılım vasıtasıyla yapılmıştır. Hesaplamalar, şevlerin statik ve deprem koşulları altında sahip oldukları stabilitenin destekleme elemanlarının olmaması ve olması durumuna göre yinelenmiştir.

2. PORTAL YAKLAŞIM KAZILARININ STABİLİTE ANALİZİ VE PROJELENDİRME İLKELERİ

2.1 Tünellerde Portal Kesimi

Portaller tünel mühendisliğinde tüm tünel kazısından ayrı olarak incelenmek ve değerlendirilmek zorunda olan kesimlerdir. Tünellerde portal, tünel girişinin oluşturulabilmesi için yapılan açık kazı alanı ile tünel girişinden itibaren tünel üzerinde yaklaşık iki tünel çapı kadar mesafe kalıncaya kadar olan tünelli kesimi kapsamaktadır. Şekil 2.1’de görüleceği gibi portal kesimi, uygulamalarda genellikle tünel girişindeki ilk 50-100 metrelik kazı dilimi olarak kabul edilebilmektedir.



Şekil 2.1: Tünellerde Portal Kesimi

İmalatın ilk başlangıç noktasını olması nedeniyle portallerin oluşturulması sırasında birçok sorunla karşılaşmaktadır. Şantiyenin yeni kurulumu, çalışma ortamına ve koşullara yeni uyum sağlanması, jeolojik birimlerin davranışlarının öğreniliyor olunması, bazı tünellerde oluşturulması zorunlu olan yüksek yarma şevlerinin uzun dönem stabilite koşullarının sağlanmasının zorunluluğu ve kazı-destekleme sırasında karşılaşılan göçükler portal kesimlerini problemlili olarak görülmesine neden olmaktadır. Öte yandan yamaçlarda inşa edilen tünellerde, dik bir aynadan oluşan tünel ağzı, jeolojik birimlerin tabaka doğrultu ve eğimlerinin neden olduğu

olumsuzluklar, büyük süreksizlik düzlemleri ve düşük örtü kalınlığı nedeni ile tünel üzerinde oluşan büyük gerilmeler portal kesimlerinde daha fazla destekleme, sağlamlaştırma ve/veya iyileştirme önlemlerinin alınmasını gerekli kılmaktadır.

Tünel mühendisliği açısından tünel üzerinde en az iki çaplık “2D” bir örtü kalınlığının kalması arzu edilmektedir. Aksi halde tünel üzerinde kemerlenme zonu istenilen şekilde oluşmamakta, yeraltı yapısı tüm arazi basıncını taşımak zorunda kalmaktadır. Sığ tüneller olarak da adlandırılan bu tünellerde yapım maliyeti artan destekleme ihtiyacı nedeni ile artmakta, ilerleme mesafelerinin kısaltılması nedeniyle de zaman kayıpları oluşmaktadır. Metro tünellerinin diğer tünellerden daha fazla maliyet gerektirmesinin nedenlerinden biri de budur. Öte yandan 4D’lik bir derinlik, jeolojik birimlerin mühendislik özelliklerine de bağlı olarak, tünel mühendisliği açısından en uygun derinlik olarak kabul edilebilmektedir. Yeraltı kaya yapısının çevresindeki gerilmeleri karşılayabiliyor olması, tüneldeki deplasmanların azalması anlamına gelmekte ve böylece ekonomi sağlanmaktadır.

2.2 Kaya Şevi ve Stabilitesi

Yeryüzünün engebeli oluşu; yüksek noktalardaki kayaçların, değişik kuvvetlerin ve özellikle yerçekiminin etkisi ile alçak noktalara doğru yavaş, hızlı veya birdenbire harekete geçmesine neden olur. Zemin (yerinde oluşmuş ve/veya taşınmış malzeme), geçiş kayacı veya çok kırıklı kaya ortamlarda bir kayma yüzeyi boyunca oluşan, değişik hızlı ve ani kütleli hareketlere “heyelan” adı verilir. Bu harekette kütleli ağırlık merkezi aşağı ve dışarı doğru hareket eder.

Doğal oluşum ve şekilleriyle eğimli yüzeylere “yamaç”, teknik girişim sonucu yeryüzünde oluşturulan, genelde eğimli yüzeylere de “şev” adı verilir. Mühendislik amaçlı birçok teknik girişim projesinde kaya ortamda şevlendirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. İnşaat mühendisliği projeleri kapsamında inşa edilen otoyol, demiryolu, tünel ve baraj inşaatlarında, endüstriyel veya şehircilik amaçlı kazılarda şev tasarımları kullanılmaktadır. Oluşturulan bu şevler kötü kaya koşullarında 30 derecelik şev açılarında neredeyse dik kesilmiş kayalara kadar değişebilmektedir.

Şevler bir kazı veya dolgu işlemi sonrası ve/veya sonrasında meydana getirilmiş olabilirler. Yamaç ve şevler, geoteknik mühendisliğinde heyelan olaylarının

görüldüğü ve incelendiği alanlardır. Burada; yamaç veya şev yüzeyinin arkasında bulunan kütlede, değişik koşullar altında göçme, kayma ve yıkılma olasılığının bulunup bulunmadığı araştırılır.

Belirli özellik, nitelik ve davranıştaki kayaçlarda, bilinen veya olası iç ve dış etmen ve koşullara uygun ancak belirli bir eğim ve yükseklikte şev yapılabilir. Bu kritik yükseklik ve/veya eğim aşılabilecek olursa; şev gerisindeki kayacın bir bölümü stabilitesini kaybederek ana kayaçtan ayrılır ve çoğunlukla düzlem olmayan bir yüzey boyunca kayar. Kayalarda stabilite bozulmaları genel olarak;

- Kaya düşmesi,
- Kaya kayması,
- Kaya akması,
- Kaya devrilmesi

şeklinde meydana gelmektedir. Düzlemsel kaya kaymaları da kendi içinde blok kaymaları ve kama kaymaları olarak sınıflandırılabilir [1].

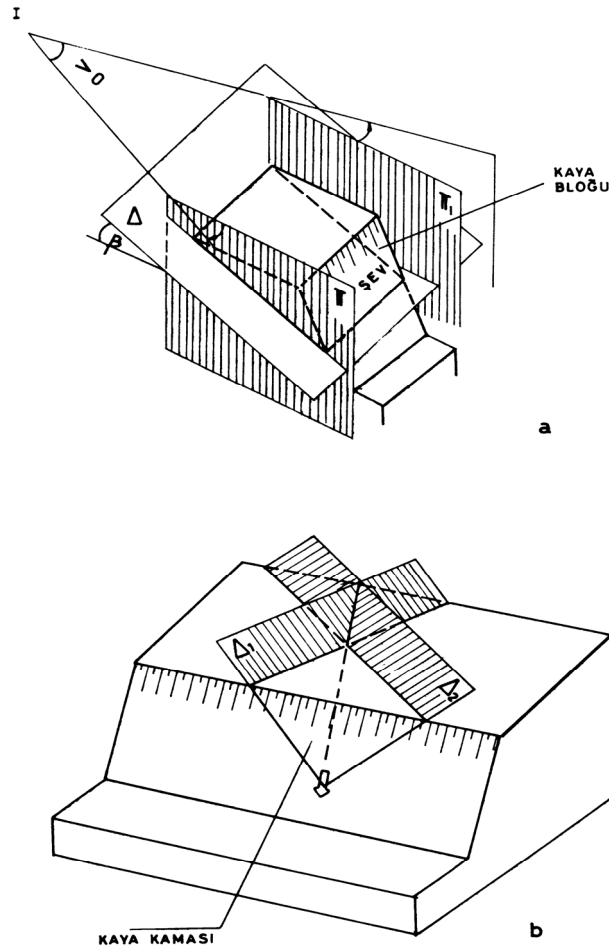
2.3 Kaya Şevlerinde Kayma Türü Stabilite Bozulmaları

Kaya şevlerinde doğal yollarla ve / veya insanoğlu tarafından gerçekleştirilen teknik girişimler sonucunda ortaya çıkan ve genellikle bir kayma yüzeyi üzerinde gelişen kütle hareketlerine “kaya kaymaları” denilmektedir. Kaya şevlerinde kayma türü kütle hareketleri fay, çatlak, tabakalanma yüzeyleri gibi süreksizlik düzlemleri üzerinde gelişebildiği gibi yoğun kırıklı ortamlarda dairesel yüzeyler üzerinde de gerçekleşebilmekte ve bu kez “kaya heyelanları” adını almaktadır. Kaya heyelanları denildiğinde ana malzemesi kaya olduğu halde gerilmelerin büyüklüğü ve süreksizliklerin parçalama etkisiyle, zemindekine benzer şekilde, yer yer kaşıkı yüzeyler üzerinde oluşan ve basamaklı kırılmalar ve doku gevşemesiyle gelişen yer kaymaları anlaşılmaktadır.

Rijit olduğu ve bir eğik süreksizlik düzlemi üzerinde hareket edeceği varsayılan bir kaya bloğunun birbirine paralel olan veya şev dışına doğru açılan iki düşey süreksizlik düzlemi ile kesilerek ana kayadan koparılmış olduğu durumlarda; iki

boyutlu (düzlemsel) analizler kullanılabilir. Bu şekilde genelde üstte doğal topoğrafik yüzey ve cephede kazı yüzeyi (şev yüzeyi) ile sınırlanan bu kaya cisimlerine “kaya blokları” adı verilmektedir.

Benzer şekilde, birbirleriyle şev yüzeyi içinde, şev dışına eğimli bir arakesit verecek şekilde kesişen düzlemler arasındaki rijit ve tek parça olarak hareket eden kaya cisimleri de “kaya kamaları” olarak adlandırılmaktadır. Şevlerde yaygın olarak gözlenen kaya bloğu ve kama kayması Şekil 2.2’de gösterilmiştir [2].



Şekil 2.2: Şevlerde Yaygın Olarak Gözlenen Kaya Bloğu (a) ve Kama Kayması (b)

2.4 Kayalarda Şev Stabilite Analizi

Kaya şevlerinin stabilite analizlerinde, üzerinde kaymanın gerçekleştiği düzlemin kohezyonu (c) ve içsel sürtünme açısının (ϕ) bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler arazi kesme deneyleri ile saptanabileceği gibi, laboratuvar örnekleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerden de elde edilebilmektedir.

Yöntem uygulanırken; duran ve kayan blokların rijit cisimler olduğu, bunların deforme olmadıkları ve parçalanmaksızın bir arada hareket edebilen birim kaya elemanlarından meydana geldikleri (kırıklı, parçalı tek cisim), hareketin düzlemler üzerinde olduğu ve yüzeylerin basamaklar içermedikleri, etkiyen tüm kuvvetlerin, hareket eden bloğun ağırlık merkezinden geçtiği varsayımları yapılmaktadır.

Stabilitenin araştırılmasında, sistem basit mekanik modellere indirgenerek kuvvetler poligonunun çizilmesi sayesinde tutucu ve kaydırıcı kuvvetler karşılıklı etkileşimleri ile ayrı ayrı incelenebilmektedir. Kesişen iki süreksizlik düzlemi arasında kalan kaya kamalarının stabilite analizlerinde ise, blok kaymalarındakine benzer şekilde iki düzlemsel yüzey üzerindeki kaymanın analizi yapılmaktadır. Basitleştirilmiş varsayımlarda her iki süreksizliğe ait mekanik parametrelerin (c ve ϕ) aynı olduğu düşünülmektedir.

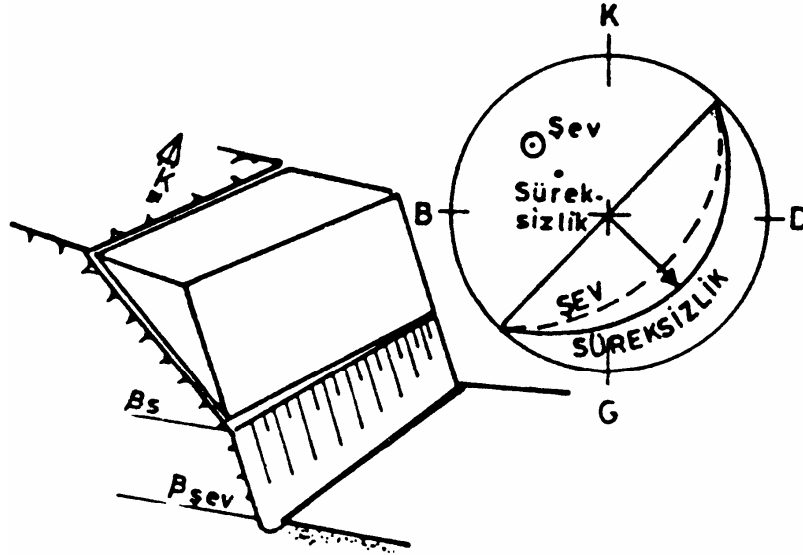
Kaya şevlerinde stabilite analizleri, stereografik izdüşüm yöntemiyle 3-boyutlu olarak incelenebilmektedir. Bu yolla şev stabilitesinde etkili olan kayaların içerdiği süreksizlik düzlemleri küresel projeksiyonlarda gösterilebilmekte, birbirinden farklı doğrultulu ve eğimlerdeki düzlemlerinin birbirleriyle ve şev düzlemi ile olan geometrik ilişkileri ortaya konulabilmekte böylece ayrıntılı analizlerinin yapılması gereken kritik şevler belirlenebilmektedir [3]. Aşağıda Şekil 2.3'de bir otoyol yarmasında süreksizlikler nedeniyle kayada oluşmuş kama kayması örneği gösterilmiştir [4].

Kaya bloğunun büyük bir süreksizlik yüzeyi üzerinde kayma olasılığının bulunabilmesi için, süreksizliğin eğim açısının, şevin eğim açısından daha küçük olması gerekir. Süreksizliğin arakesit doğrultusu boyunca uzanan eğim vektörünün, "şev büyük dairesi"nin dışına çıkması gerekir (Geometrik koşul). Bu koşul Şekil 2.4'de gösterilmektedir [5]. Eğer bu koşul sağlanmışsa, her düzlem üzerindeki sürtünme açıları ve kohezyon dikkate alınarak, kuvvetler dengesi (Fellenius koşulu) irdelenir.

Blok kaymalarında; iki boyutlu (düzlemsel) kayma durumu daha basit mekanik modellere indirgenerek kuvvetler poligonundan yararlanılır ve tutucu kuvvetler ile kaydırıcı kuvvetler ayrı ayrı incelenir.



Şekil 2.3: Ülkemizde Bir Otoyol Yarmasında Meydana Gelmiş Kama Tipi Kayma (Alaşehir-Manisa)

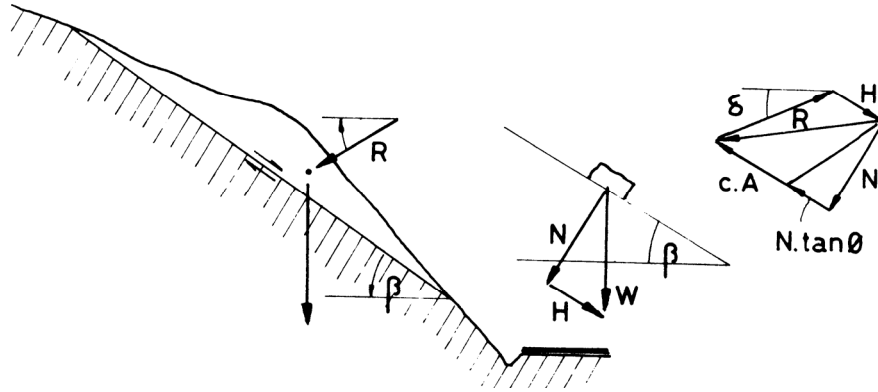


Şekil 2.4: Süreksizlik Konumlarına Bağlı Olarak Şev Stabilitesi

Kaydırıcı kuvvetlerin, istenen güvenlik sayısına göre ifade edilmiş olan (Σ tutucu kuvvetler / υ) tutucu kuvvetlerden daha büyük olması halinde, dengeyi sağlayacak

olan kuvvetlerin bileşkesi olan “R” kuvvetinin yönünün ve şiddetinin bilinmesi gerekir. Düzlemsel kayma durumunda kuvvetler poligonu Şekil 2.5’de gösterilmiştir.

Dengeleme kuvvetinin yönü, projeyi yapan tarafından farklı uygulama açlarına göre yapılan hesaplar sonucunda optimize edilir. Dengeleyici kuvvet bir kaya ankrajı ile iletilmek istendiğinde, süreksizlik düzlemi ile ankraj yönü arasındaki açının 30 dereceden daha büyük olması genel ilke olarak benimsenmiştir. Böylelikle delgi sırasında tijlerin süreksizlik içine sapması önlenmekte ve ankraj ucunun ana kaya içinde daha güvenli olarak bağlanması sağlanmaktadır [5].



Şekil 2.5: Düzlemsel Kaymada Kuvvetler Poligonu

Blok kaymalarında; süreksizlik yüzeyinin $\{Q_s, \beta_s, \phi_s, c_s\}$ (Arazide gözlemlenen süreksizlik) doğrultu ve eğim açıları (α_s ve β_s) veya eğim yönü vektörü $\{\psi_s / \beta_s\}$ ile tanımlanan düzlemsel süreksizlik yüzeyinin, mekanik parametreleri olan sürtünme açısı (ϕ_s) ve teknik kohezyonu (c_s) da bilinmelidir.

Arazi incelemeleri sırasında saptanan bu süreksizlik topoğrafik eğimin (β_{top}) süreksizliğin eğiminden daha küçük olması nedeniyle çoğu kazı ve yarma işlemleri öncesinde yamaçta izlenemez. Ancak, kazı sırasında oluşturulan şev açısının ($\beta_{şev}$), süreksizliğin eğiminden (β_s) daha büyük olduğu durumlarda şevin yüzeyinde görünür.

$$\beta_{şev} > \beta_s \quad (2.1)$$

Kaymanın gerçekleşebilmesi için ise;

$$S = c \cdot A + N \cdot \tan \phi \quad (2.2)$$

bağıntısında verilen “Mekanik Koşul”un da sağlanması zorunludur. Mühendislik amaçlı değerlendirmelerde bunlara ek olarak “Güvenlik Koşulu”;

$$G_s = \frac{c \cdot A + N \cdot \tan \phi}{\sum K} \quad (2.3)$$

güvenlik sayısı bağıntısı ile kontrol edilir.

Yukarıdaki bağıntılarda c ve ϕ ; kayma yüzeyini oluşturan süreksizlik düzleminin mekanik parametreleri;

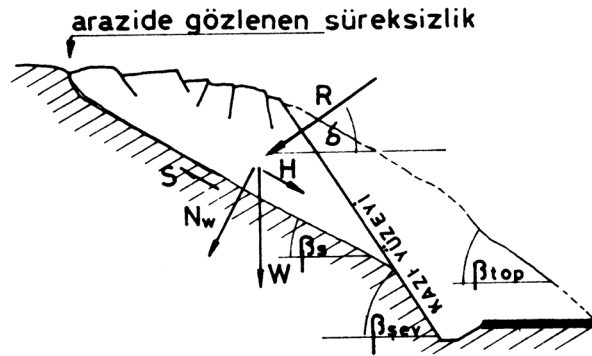
c : Kohezyon

ϕ : İçsel sürtünme açısı

A : Kayan bloğun taban alanı

N : Blok ağırlığından kaynaklanan normal kuvvettir [6, 7].

Arazide kamanın geometrisini belirleyen süreksizlik Şekil 2.6’da gösterilmiştir [5].



Şekil 2.6: Arazide Kamanın Geometrisini Belirleyen Aktif Süreksizlik

Kaya şevlerinin stabilite analizlerinde genelde zorlayıcı kuvvetlerin ya da bunların oluşturduğu momentlerin veya gerilmelerin dikkate alındığı değişik denge ve taşıma hipotezlerinden yararlanılmaktadır. Bunların bir bölümü Galilei (1600), Navier (1826), Lamé (1831), Tresca (1865), Rankine (1888), Mohr (1900), Léon (1933) ve Coulomb tarafından ortaya konan klasik dayanım ve taşıma hipotezleridir. Diğer bir bölümü ise Fellenius (1939) ve Brovicka (1959)’nın tanımladığı kuvvetler dengesine bağlı güvenlik sayısı kabulüdür. Ayrıca çok daha iyi geliştirilmiş reolojik davranış modellerinin de yenilme – kırılma - kayma koşulları için kullanıldığı örnekler

bulunmaktadır. Analizlerde Talobre (1957)'nin sürtünme konisi ve stereografik izdüşüm gibi grafik veya sonlu elemanlar (FEM) gibi nümerik analiz yöntemleriyle sonuca gitmek mümkündür. Ayrıca Muller (1963), Jennings (1969), John (1968), Taylor (1970), Goodman ve Bray (1976), Hoek (1974), Kovari (1976) ve Zambak (1978) tarafından yapılan değerlendirilmeler ve çözümler şevlerin projelendirilmesinde önemli yer teşkil etmektedir. Hızlı ve yüksek kapasiteli bilgisayarların devreye girmesiyle büyük bir hızla yeni hesaplama teknikleri ortaya çıkmaktadır [8-15].

2.5 Kaya Şev Stabilitesini Etkileyen Faktörler

Heyelanları, tür, hız, oluşum, gelişim ve sonuçlarıyla değerlendirebilmek için kayaçların dengesine etki eden, başlıca faktörlerin en önemlileri; ortamın geometrisi, yapısı, bileşimi, yeraltı suyu, gerilme durumu ve dış kuvvetlerdir. Dış kuvvetler ve gerilme durumu doğrudan doğruya, bileşim, dane çapı, biçimi, dizilişi, yeraltı suyu, geometrik durum ve yapı ise dolayısıyla etki eder. Bunların herhangi birindeki olumsuz değişme, dengenin bozulmasına neden olur.

Katı haldeki kayaçların davranışına doğrudan doğruya etki eden faktörlerin hepsine birden “davranış belirleyici özellikler” adı verilir. Bunlar; ayrık kayaç (zemin) niteliğindeki ortamlarda danelerin mineralojisi, boyutu, biçimi, dizilimi ve dağılımıdır. Benzer şekilde, kayalarda maddesel özellikler, süreksizlikler arasında kalan parçaların yani birim kaya elemanlarının boyutu, biçimi, dizilimi ve dağılımı da ortamın davranışını doğrudan yönlendirir. Maddesel (substanz) özellikler dışında kalan etmenler, “doku” adı altında toplanır [16].

Kayaçalarda, katmanların; gerek oluşumlarına bağlı, kökensele (jenetik) özellik ve nitelikleri (istiflenme, kalınlık, biçimlenme, yayılım ve yerleşim şekli ve miktarları) ile iç yapıları (dokuları), gerekse tektonik geçmişleri ve durumları (kıvrımlanma, kırılma, psödoplastikleşmeye bağlı gevşeme, faylanma ve bindirme gibi ötelenme) sonucu kazandıkları konum ve süreksizlikler, ortamın stabilitesini, mekanik ve kinematik açıdan doğrudan yönlendirir. Eğimli tabakalar ve/veya kırık, çatlak ve fay düzlemleri üzerindeki kaymalar, bunlara en iyi örnektir.

Yatay konumlu ve değişik litolojideki katmanlardan oluşmuş yamaç ve şevlerde, dış etkilerle, zayıf dirençli düzeyler aşınmakta, daha sert ve dirençli katmanlar ise konsol şeklindeki çıkıntılar oluşturarak askıda kalmakta ve belirli bir süre sonrasında da koparak dūřmektedir. Genelde kil ve silt boyutundaki danelerden oluşan bir kayaaç içinde kum-çakıl düzeyleri gibi geçirimli ara katmanların veya merceksi yapıların bulunması, dokanak yüzeylerinin yıkanmasına veya yeraltı suyunun durumuna göre, buralarda önemli hidrostatik basınçların oluşmasına neden olur. Sonuçta, ortam heyelana yatkın özellik ve nitelikler gösterir [17].

Kayaçların içinde çoğu zaman değişik büyüklükte ve şekilde süreksizlikler bulunur. Bunlar fissür, çatlak, kırık fay, şastiyet, foliasyon, tabakalaşma ve aykırı tabakalaşma yüzeyleridir. Bunların sıklığı, uzanış yönelimleri, genişlikleri kesme direncine ve şevlerin stabilitesine etki etmektedir.

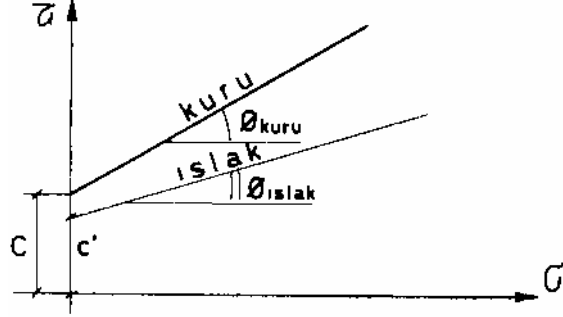
Yamaç ve şev içerisinden aktif bir fayın veya fay zonunun geçmesi, ortamın kısa mesafeler içinde çok sık nitelik değiştirmesi, katmanların ve öteki süreksizlik öğelerinin sayıca ve konum olarak birdenbire büyük farklılıklar göstermesi, yine stabil olmayışın ve belirsizliklerin başlıca nedenleri arasında sayılmalıdır.

Doğada süreksizlik yüzleri bazen dolgusuz ve temiz, bazen de çeşitli maddelerle dolmuş olarak bulunmaktadır. Dolgu maddeleri ya sonradan çökelmif ya da faylarda olduğu gibi oluşma sonucu meydana gelmiştir. şevlerin stabilitesine her birinin etkisi farklı olmaktadır. Dolgu kalınlığının pürüzlü şev yüzlerinin stabilitesine etki yaptığı, dolgu malzemesi direncinin önemli olduğu ve süreksizliklerin kesme direncinin, dolgu malzemesinin kesme direnci ile bağlantılı olduğu bilinmekte, ayrıca yapılan deneysel çalışmalar; dolgu malzemesi bileşiminin, tane büyüklüğünün ve su içeriğinin de şev stabilitesine etki yaptığını göstermiştir [1].

Yeraltı suyunun blok kaymalarında başlıca iki olumsuz etkisi vardır.

- i. Çatlak suyu basıncı oluşturarak, tanımlanan serbest dolaşım yüzeylerinde istenmeyen kuvvetler oluşturur.
- ii. Süreksizlik dolgusunun mekanik (içsel) parametre değerlerinin azalmasına neden olur.

Böylece, süreksizliklerle ilgili olarak; $c_s \rightarrow c_s^I$ ve $\phi_s \rightarrow \phi_s^I$ gibi daha düşük kesme dirençleri veren mekanik davranış modellerinin kullanılması zorunlu olur. Kaya şevlerinde suyun etkisiyle içsel parametrelerin değişimi Şekil 2.7'dedir [5].

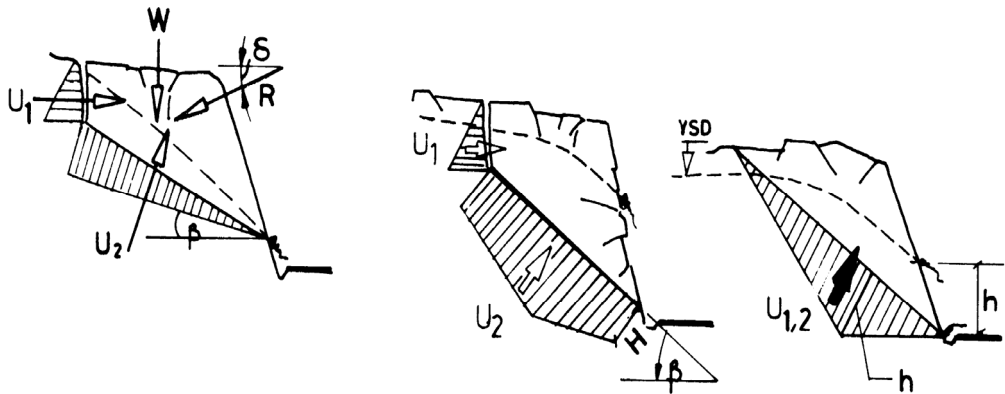


Şekil 2.7: Kaya Şevlerinde Suyun Etkisiyle İçsel Parametrelerin (c , ϕ) Değişimi

Suyun etkisini, yön ve şiddetleriyle belirleyebilmek için hesaplanacak olan kesitin geometrisi ve hidrojeolojik koşulları bulunmalıdır. Bu koşullar;

- i. Çekme çatlaklı su ile dolu blok,
- ii. Tıkanmış çatlaklı blok,
- iii. Şev aynasından ve şev topuğundan su boşalımı blok

olarak verilebilir. Problemin çözümü için; kuvvetler poligonundan yararlanılması ve su etkisinin destekleme doğrultusundaki bileşkesinin bulunması (U_r) hızlı ve pratik bir yoldur. Bu koşullar Şekil 2.8'de gösterilmektedir [5].



Şekil 2.8: i) Çekme Çatlaklı Su ile Dolu Blok, ii) Tıkanmış Çatlaklı Blok iii) Şev Aynasından ve Şev Topuğundan Su Boşalımı Blok

2.6 Kaya Şevleri Projelendirme İlkeleri

Yerüstü kaya yapılarının büyük çoğunluğu kalıcı karayolu-demiryolu şevleri, baraj dayanakları, yerleşim nişleri ve daha azı geçici temel kazıları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir kısmı ise, özellikle baraj mühendisliğinde, ileride göl alanı içinde kalmaktadır. Bu açıdan bakıldığında; işlevsel ve güvenli çözümlerin yanı sıra, estetik ve doğal görünümü koruma veya en azından çirkinleştirmeme gibi kavramların da projede üst düzeyde ele alınması kaçınılmaz olmaktadır.

Terk edilen taşocağı, mermer ocağı ve maden açık işletme sahaları ne yazık ki, bu güne değin ülkemizde bir kaya yapısı olarak düşünülmemekte olduğundan, göze hoş gelmeyen ve tehlikeli görünümleriyle giderek yaygınlaşmaktadırlar. Bu nedenle en azından, bunların kalıcı şevlerinin ayrıca projelendirilmesinde büyük yarar vardır.

Kalıcı kazı şevlerinde; kaya yapıları mekaniğinin başta gelen "İlk Sağlamlığın Korunması İlkesi" kazı ve imalat projelerini de yönlendirmelidir. Bunun sonucu olarak;

- Her kazı işleminde olabildiğince küçük bir alan etkilenmeli,
- Yeni çatlak, fisür, kırıklar oluşturulmamalı,
- Kaya gevşetilmemeli,
- Kazı geometrisi gerilme durumuna uygun seçilmelidir.

Yukarıdan aşağıya doğru anolar halinde yapılan kazı ve sağlamlaştırma imalatı bu amaca en iyi hizmet eden şekildir. Yamaca tabandan giderek ilerlemek ve belirli bir yükseklikten sonra basamaklar oluşturmak, pek çok koşullarda gevşemelere neden olacağından inşaat mühendisliği alanında olabildiğince az tercih edilmelidir. Oysa aynı yöntemin taşocağı ve maden işletmelerinde, kayacın kazılabilirliğini artırıcı bir etmen olarak seçilmesi yararlıdır.

Sağlamlaştırma ve bazı koruma yöntemlerinin uygulanması yukarıdan aşağıya doğru yapılan kazılarda daha kolay, hızlı ve emniyetlidir. Buna karşın destekleme duvarlarının imalatında aşağıdan yukarıya doğru veya yamaca paralel olarak ilerleyen bir kazı yöntemi daha uygun düşmektedir. Projelerde bu nedenle bölgesel

Çalışma koşullarını ve uygulayıcının teknolojik birikim ve olanaklarını da dikkate alan gerçekçi yaklaşımlarda bulunulmalıdır.

Kaya şevlerinin projelendirilmesi; çoğu zaman algılandığı gibi, yalnızca bir stabilite analizi hesabı değildir. Her kaya şevi yeni bir "Kaya Yapısı" olup, aynı diğer yapı projelerinde olduğu gibi, mimari ve fonksiyonel özellikler taşır. Kolay uygulanabilir, ekonomik, güvenli ve denetlenebilir olmalıdırlar. Bu yapıların ana malzemesini, doğal koşullardaki kaya oluşturur. Bu malzeme tarafımızdan seçilemez; ancak tanınabilir ve anlaşılabilir. Bu nedenle bir kaya yapısı ancak doğal koşulların en iyi korunduğu durumlarda en ucuz, en güzel ve en güvenilir olur. Kaya yapıları ile uğraşanların yapacağı en büyük hata çalışmalarında "Dağın rktlmesi" ne yol açacak işlem ve önlemlere yer vermeleridir [18].

Sayfa 14, 15 ve 16'da bir şev için planlama ve projelendirme çalışmalarında izlenmesi gereken yönteme ait algoritma verilmiştir.

Proje Kriterlerinin Belirlenmesi

- Standartlar, Şartnameler, Normlar
- Sözleşme Kriterleri
- Yapım Kriterleri / Sınırlamalar (teknik ve teknolojik yeterlilik, personel ve ekipman yeterliliği gibi)

Proje Verilerinin Temini ve Proje Altlıklarının Oluşturulması

- Sayısal Haritalar
- Enkesitler, Boykesitler
- Altyapı Tesislerinin Konumları

Literatür Araştırmaları

- Daha önce yapılmış çalışmalar
- Mekanik sondaj, jeofizik verileri
- Yapısal jeoloji, stratigrafi
- Depremsellik
- Su kaynakları

Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları

Laboratuvar Deneylei

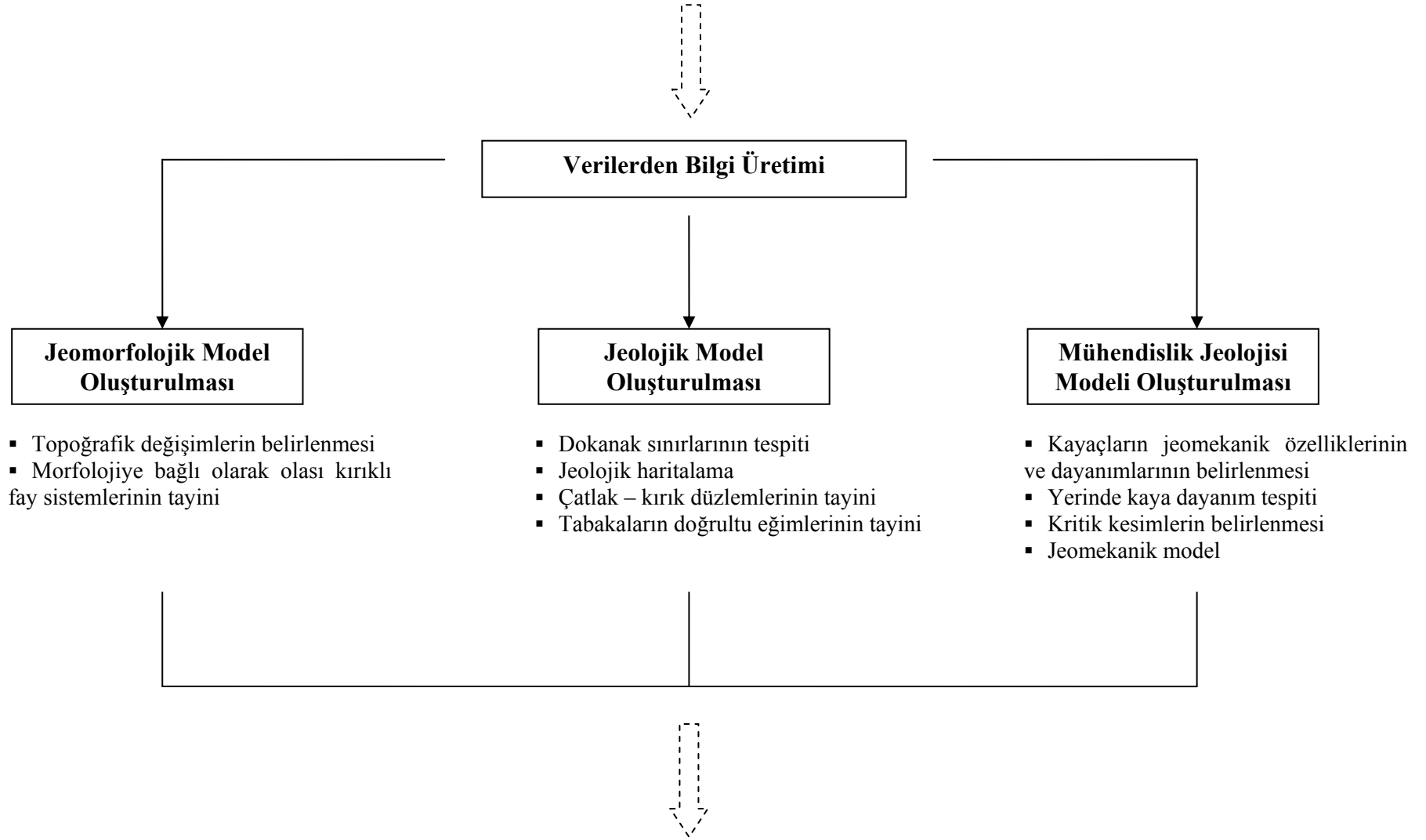
- Fiziksel deneyler
- Mekanik deneyler

- Mekanik sondajlar, karot alımı
- Jeofizik
- Hidrojeoloji
- Kayaçlar için süreksizlik ölçümleri
- Kaya kalite sınıflamaları
- Mühendislik jeolojisi haritaları
- Zemin sınıflamaları

Jeolojik Çalışmalar

- Saha jeolojisi
- Jeolojik haritalama





Mimari ve Teknik Resim Çalışmaları

- Portal mimarisi
- Detay paftalar

Geoteknik Model Oluşturulması

- Kazılabilirliğin değerlendirilmesi
- Risk değerlendirmeleri
- Yapım yöntemi tayini
- Çevre – Teknik girişim ilişkisi değerlendirmeleri
- Portal tipi seçimi
- Kısa – uzun dönem için Geoteknik sayısal Analizler (Portal şevleri stabilitesi)
- Betonarme yapılar sayısal analizler
- Tünel destek tiplerinin tayini
- Destekleme, sağlamlaştırma ve iyileştirme gereksinimi
- Drenaj sistemlerinin tayini
- Geoteknik ölçüm planlamaları

Yapım Kontrolü

- Geoteknik ölçüm değerlendirmesi ile yapım yönetimi
- Yapım sırasında stabilite sorunları ortaya çıkmadan önce gerekli önlemler alınması
- Yapım sonrası peyzaj çalışmaları
- As-Built proje oluşturulması ve arşivleme

3. KAĞITHANE PORTALI TASARIMI VE PROJELENDİRMESİ

Kağıthane Portalı İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından Kiska – Makyol Adi Ortaklığı'na (KİSMAK) inşa ettirilen, proje ve mühendislik hizmetleri EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. Şirketi tarafından sağlanan Kağıthane - Piyalepaşa Tüneli'nin Haliç tarafında yer almaktadır.

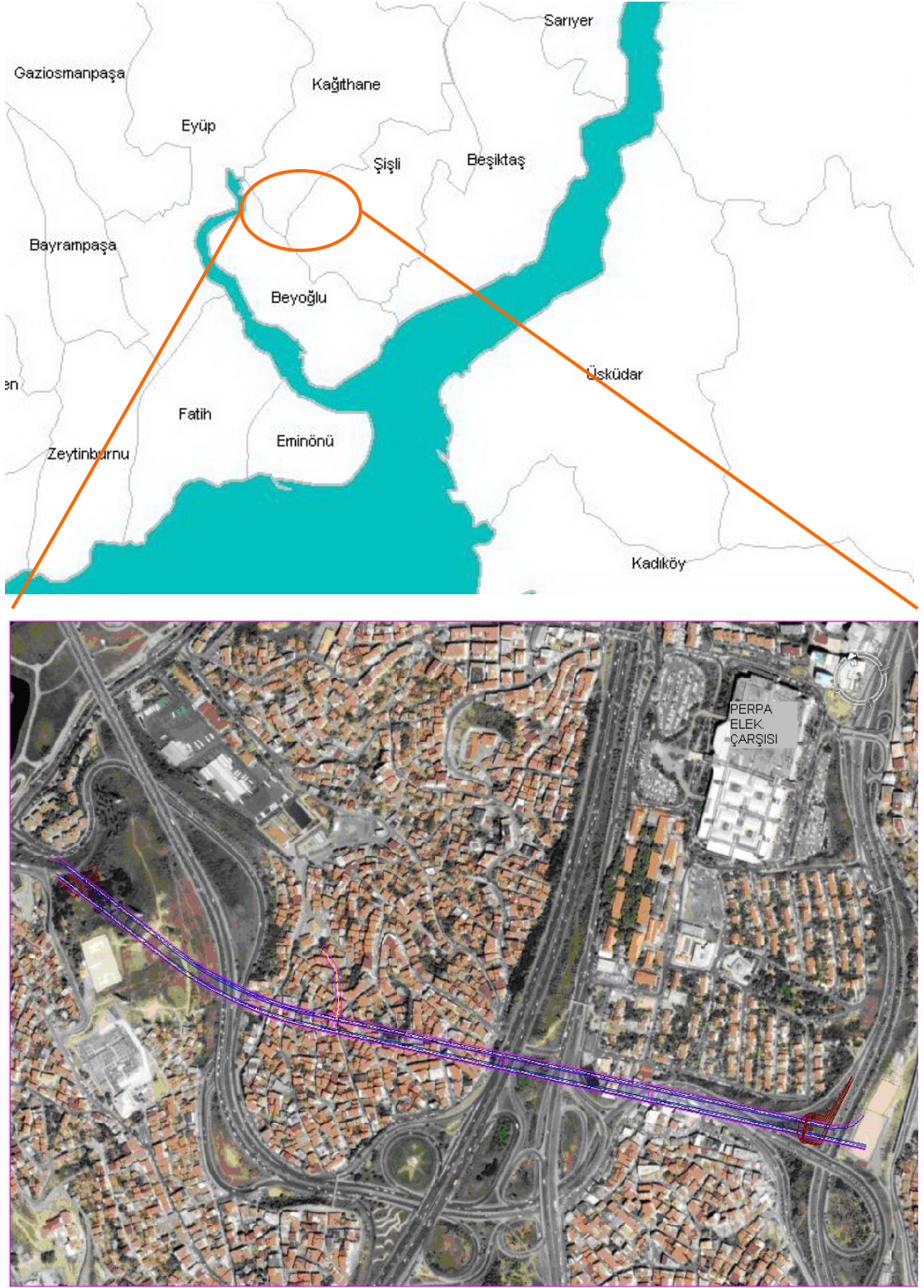
Çift tüplü karayolu tüneli olarak inşa edilen tünelde sağ tüp (1+744.563) gidiş, sol tüp (1+730.756) geliş yönü olmak üzere toplam tünel uzunluğu 3475.30 m'dir. Tüneller Kağıthane ilçesinden başlayarak Piyalepaşa Feriköy spor tesislerinde son bulmaktadır [19].

Tünellerin derinliği Okmeydanı Kavşağı'nda (KM 1+000–1+060) 67.00 m ile en derin, Öztoprak Mahallesi'nde (KM 1+580–1+600) ise 14.00 m ile projenin en sığ olmakta ve iki tüp arası mesafe 15.50 m'yi bulmaktadır. Tüneller, İstanbul geneline bakıldığında, en yoğun yerleşim yerlerinden olan Kağıthane İlçesi ve Şişli Okmeydanı mevkiinin altından geçmektedirler. Tünellerin giriş portalı Kağıthane Örnektepe Mevkii'nde Kağıthane Viyadüğünün 250.00 m güneybatısında Çamlık Sokak'ta bulunmaktadır. Çıkış Portalı ise Piyalepaşa Bulvarı üzerinde Feriköy Spor tesislerinin 5.00 m kuzeybatısındadır [19]. Aşağıda Şekil 3.1'de proje yer bulduru haritası gösterilmiştir [20, 21].

Kağıthane portaline ait Google Earth yazılımından sağlanan uydu fotoğrafı Şekil 3.2'de ve bu fotoğrafın ait olduğu, tünel güzergahının da üzerinde işlendiği plan Şekil 3.3'de gösterilmiştir [19, 20].

Kağıthane portalinde tünel kazısına başlayabilmek için portallerin yer alacağı kesimde tünel yaklaşım kazıları yapılmıştır. Çalışmalar saha çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve ofis çalışmaları olmak üzere üç bölümde gerçekleştirilmiştir. Saha ve laboratuvar çalışmaları kapsamında çalışma alanında ayrıntılı jeolojik-mühendislik jeolojisi araştırmaları yapılmıştır. Elde edilen veriler ofis ortamında değerlendirilerek portal kazıları için en güvenli ve en hesaplı kazı-destekleme yöntemi belirlenmiş,

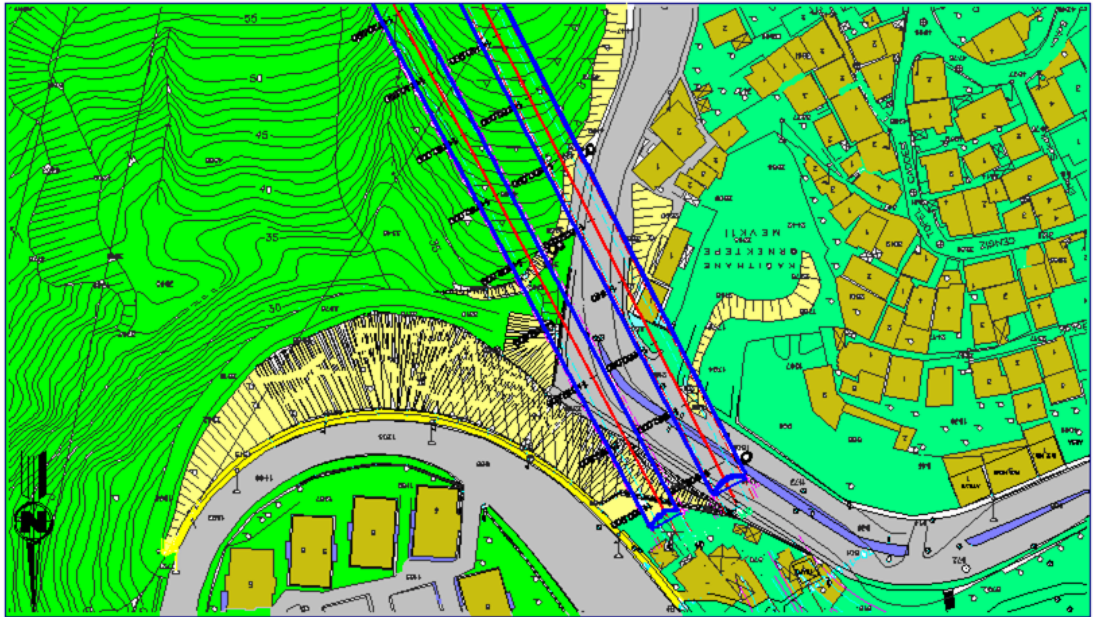
portal kazıları sırasında oluşturulan şevlerin güvenlikleri ise çeşitli nümerik yöntemlerle denenmiştir.



Şekil 3.1: Kağıthane-Piyalepaşa Tüneli Yerbulduru Haritası



Şekil 3.2: Kağıthane – Piyalepaşa Tüneli Giriş Portalı Uydu Fotoğrafı



Şekil 3.3: Kağıthane – Piyalepaşa Tüneli Giriş Portalı Güzargah Planı

Yapılan bu ayrıntılı çalışmalar neticesinde Kağıthane – Piyalepaşa Tüneli portal kazılarına başlanmış ve yapım herhangi bir stabilite sorunu ile karşılaşılmeden tamamlanmıştır. Kağıthane portalinin bu aşamalarına ait fotoğrafları Şekil 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Kağıthane Portali Kazıya Başlamadan Önce



Şekil 3.5: Kağıthane Portali Yaklaşım Kazısı



Şekil 3.6: Kağıthane Portali Şev Kazıları



Şekil 3.7: Portal Kazıları Sırasında İlk Şevin Oluşturulması



Şekil 3.8: Portal Kazı Aşaması ve Tüneller



Şekil 3.9: Kazının Tamamlanmasının Ardından Tünel Üzerinde Kalan Şevler

4. KAĞITHANE PORTALI YAKLAŞIM KAZILARI JEOLJİK, GEOMEKANİK VE MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ MODEL ÇALIŞMALARI

Kağıthane – Piyalepaşa Tüneli'nin Haliç-Kağıthane tarafında yer alan ve projede öncelikli olarak inşaatına başlanacak olan portal bölgesinin kazı planının hazırlanması ve oluşturulacak şevlerde kullanılacak olan destekleme elemanlarının tespiti için arazi üzerinde yüzey jeolojisi çalışmaları yapılmış ve hesaplamalarda kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için arazide iki noktada yapılan mekanik sondajlardan elde edilen karot numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar yorumlanarak hesaplamalarda kullanılmak üzere mekanik parametrelere ulaşılmıştır.

Aşağıdaki bölümlerde sırasıyla bölgenin genel jeolojisi, stratigrafisi, deprenselliği ile arazideki genel jeoloji çalışmaları anlatılmıştır. Saptanan lokasyonlardaki yüzey jeolojisi ve hidrojeoloji hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra mekanik sondaj çalışmaları anlatılmış ve alınan karotlardan elde edilen numuneler ile İTÜ Maden Fakültesi, Mühendislik Jeolojisi Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılan deneylere yer verilmiştir. Bu deney sonuçları yorumlanarak hesaplamalarda kullanılacak arazi değerlerine RocLab 1.0 bilgisayar yazılımı vasıtasıyla ulaşılmıştır.

4.1 Bölgenin Genel Jeolojisi

İstanbul bölgesinde altta yer alan birimler Paleozoik yaşlıdır. Bu birimler Silüryen'den Alt Karbonifer'e kadar uyumlu bir istif oluştururlar. Genellikle kırıntılı ve karbonatça zengin bu birimler, tektonizmayla karışık bir yapı kazanmışlardır. İnceleme alanındaki Paleozoik yaşlı birimler Dolayoba, Kartal, Tuzla, Baltıman ve Trakya formasyonudur. En altta yer alan Silüryen yaşlı Dolayoba formasyonu, sıkı tutturulmuş kireçtaşlarından, kuvars kırıntılı kumtaşlarından ve yumrulu – bantlı kireçtaşlarından oluşur. Kireçtaşları genellikle resifal özelliktedir. Dolayoba formasyonu üzerine, Devoniyen yaşlı Kartal ve Tuzla formasyonları gelir. Kartal

formasyonu; iri taneli kireçtaşı merceklerinden, yer yer karbonatlı şeylerden, grovaplardan ve bol fosilli killi kireçtaşlarından meydana gelmiştir. Tuzla formasyonu ise; yumrulu kireçtaşı, kalkerli şeyl ve tabakalı çörtlerden oluşmuştur. Alt Karbonifer yaşlı Baltalimanı formasyonu, Tuzla formasyonu üzerine gelir ve çok sınırlı yüzlekler halindedir. Bu birim siyah renkli laminalı çörtlerden ibarettir. Trakya formasyonu ise; başlıca kahverenkli kumtaşı (grovak), şeyl ve kireçtaşı merceklerinden oluşur.

Alt Karbonifer birimleri üzerine açısız uyumsuzlukla Eosen istif gelir. Killi kireçtaşı ve kireçtaşından oluşan Soğucak formasyonu, beyaz, sarımsı, beyaz veya grimsi, ince-orta katmanlı, sert, killi kireçtaşlarınca zengindir. Ara tabakalar halinde yumuşak marn katmanlarına da rastlanılır. Formasyon içinde sert, kalın katmanlı, masif kireçtaşı düzeyleri de yer alır. Bu düzeyler resifal özellik gösterirler. Soğucak kireçtaşları üzerine geçişli ve aşmalı olarak Ceylan formasyonu gelir. Marn ve kil ardışımı şeklinde çökelmiş olan Ceylan formasyonu üzerinde ise Oligosen'e ait bir istif yer alır.

İstanbul Yarımadasında Büyükçekmece – Hadımköy - Küçükçekmece arasındaki alanda karasal koşullarda gelişmiş, kırıntılı ve acısu karbonatlarından yapılmış bir istif izlenir. Gürpınar formasyonu olarak tanımlanan bu birim genellikle killerden, volkanik materyalden, kömürlü seviyelerden oluşur. Gürpınar formasyonu üzerine ise Çamurluhan formasyonu gelir. Bu birim; genellikle çakıtaşı, kumtaşı ve sarı, kahverenkli kumtaşı ara tabakalarını içeren, yeşil renkli kil ve marn ardışımından oluşur. Örgülü akarsu ürünü olan Çukurçeşme, gevşek tutturulmuş, blok, çakıl, kum ve siltten meydana gelir.

Üst Miyosen döneminde gelişen geçici göllerde kil çökelimleri olmuştur. Hakim olarak yeşil renkli, ince laminalı, plastik killerden meydana gelen birim Güngören formasyonu olarak tanımlanmıştır. Bu formasyon ayrıca kireçtaşı ara katkılı olup tedrici olarak, Bakırköy formasyonuna geçer. Genelde acı su koşullarının egemen olduğu bu denizel ortam içinde kireçtaşı-marn ardalanması çökelmiş ve Bakırköy formasyonu olarak adlanmıştır [22].

4.1.1 Stratigrafi

4.1.1.1 Dolayoba Formasyonu

Gri, mavi bazen açık kahverenkli ve sıkı tutturulmuş kireçtaşlarından ve grimsi, mavimsi ile bazen de pembe renkli, değişik oranda kuvars kırıntılarını kapsayan kumtaşı ve bozumsu kahve, mavimsi gri renkli, yumrulu ve bantlı kireçtaşından oluşur. Kireçtaşları bol fosillidir.

Dolayoba formasyonu, Gözdağ formasyonu ile geçişli yerlerde; mercan fosilleri, kronoid sapları ve brakyopod kavkı ve parçalarından oluşan taneli yüzlekleri ile başlar. Bu seviye gri, pembe renkli olup kalınlığı birkaç metre arasında değişir. Bu kesim üzerine tablalı mercanlardan oluşan ve kalınlığı bölgesel olarak farklılıklar gösteren resifler gelir. Organik resifler ile resif önü çökellerini içeren bu fasiyeste; mercan, bryozoa, kronoid sapları bulunur. Resifal bölgeler resif önü ve set resifi türündedir. Resif çekirdekleri masiftir. Resifal kireçtaşları üzerinde ince şeyl ara tabakalı koyu mavimsi, gri, pembemsi gri renklerde balıksırtı çapraz laminalı, dalgalı merceksi, flaser tabakalı kireçtaşı tabakaları gelir. Gelgit etkisindeki bir karbonat platform koşullarını yansıtan bu fasiyes içinde yoğunluklu olarak çeşitli organizma parçalarının karbonat çimento ile çimentolanmasından oluşmuş ara tabakalar da yaygındır.

Resifal kireçtaşları üzerine ince paralel laminalı, koyu mavimsi, gri mikrit ve ince pembemsi renkli laminalı çamurtaşı ardışımından oluşan, dalga taban altı ve düşük enerjili platform içi derin çukurluk koşullarını yansıtan bir fasiyes gelir. Bu fasiyes, Dolayoba formasyonu içinde mercekler halinde yer alır. Dolayoba Formasyonu litolojik olarak değişik kireçtaşlarından oluşur. İleri derecede diyajenez bu kireçtaşlarının yer yer tümüyle yeniden kristalleşmesine sebep olmuştur. Bu nedenle birincil dokusal özellikleri kaybolmuştur. Tekrar kristalleşme nedeniyle kayaçlarda basınç erimeleri sonucunda yaygın bir şekilde stilolitleşme ve ikincil dolomitleşme daha sonra da didolomitleşme meydana gelmiştir. Son evre karstlaşma nedeniyle formasyon içindeki yüzleklerde büyük boşluklar oluşmuştur.

Formasyonun sınırı alt ve üst birimlerle uyumludur. Alttaki Gözdağ formasyonu ile girik, üstteki Kartal formasyonu ile dikey geçişlidir [23].

4.1.1.2 Baltımanı Formasyonu

Baltımanı formasyonu yüzleklerinde gravite kaymalarının neden olduğu sık kayma kıvrımlı bir zon şeklinde izlenir. Siyah renkli, çok ince taneli, ince tabakalı, paralel laminalanmalı çörtlerden veya liditlerden oluşur. Bol radiolaria fosilleri içeren çok ince kristalli silis agregatları şeklindedir. Bunlar içinde yaygın olarak elipsoidal şekilli fosfat yumruları gözlenir. Diyajenez sonrasında yoğun bir şekilde kırıklandıkları hemen hemen her mostrada görülen bir özelliktir. Yumruların içi yoğun bir şekilde radiolaria kavkalarıyla kaplıdır.

Ayrışmış yüzeylerde laminalanma belirgindir. Lidit çökeltme birimleri içinde veya arasında daha koyu, organik maddece zengin, yüzeyde beyaz ayrışma renkli, yassı ince mercekler yer alır. Fosfatlı açık gri ile beyaz renkte ayrışan, küresel, diyajenetik orijinli siyah çört modülleri birim için ayırtmandır. Genel olarak çekirdeklerinde bir fosil (gastropod, lamellibrans, orthoceras) bulunan modüller, çevreleyen lidit tabakalarına göre çok iyi korunmuş, radyolaryaya kavkı ve kalıntılarını kapsar. Çörtler, fosfatça yerel zenginlik gösterir. Silisli şeyller; açık gri ayrışma renklidir. Şeyllerde genellikle tabakalanmaya paralel açık renkli çört mercekleri ve az miktarda bitkisel materyal bulunur. Silisli şeyller lidit seviyeleri ile değişik ölçekte ara tabakalanma gösterir.

Baltımanı formasyonunda yoğun izlenen kayma kıvrımları bu birimin eğimli bir yüzey üzerinde ve olasılıkla karbonat duyarlılık sınırını (yaklaşık 4000 m) altındaki düzlüklerde çökeldiğini vurgulamaktadır. Çok uzun mesafelerde değişmeden izlenen ince paralel laminasyon çökeltme ortamı enerjinin son derece düşük olduğunu belgelemektedir. Fosfat yumruları çökeltmenin son derece yavaş geliştiğini ve deniz tabanının zaman zaman çökeltmezlik yüzeyi haline dönüştüğünü ve bu yüzey üzerinde yumrular şeklinde fosfat gelişimini belgeler. Formasyonun yaygın olarak kayma kıvrımlanması, çökeltmeyi hemen izleyen evrede olasılıkla kara bölgesini de kapsayan şiddetli sismik aktivite ile okyanusun kapanma evresinin başladığını ifade eder [23].

4.1.1.3 Trakya Formasyonu

Trakya formasyonu, büyük kısmıyla şeyl ve az olarakta polijenik konglomera, kalkerli şeyl, kireçtaşı, kuvars konglomera ve kuvarslı kumtaşından yapılmıştır.

Formasyonun büyük kısmını oluşturan şeyller genellikle koyu gri ve yeşilimsi gri, sarımsı gri, yersel olarak soluk kırmızı pembe ayrışma renklidir. Şeyller içinde çok ince laminalı silttaşından çok kaba konglomeralara kadar türbidit oluşukları bulunur. Birim içinde orta-iyi arası boylanmış ve çok kötü boylanmış iki grovak çeşidi yer alır. En çok görülen birinci tip grovaklar; yeşilimsi gri, sıkı, yarı yuvarlaklaşmış kuvars, koyu renkli çört, taş kırıntıları, mika ve feldspattan yapıldır.

Taneler ikincil büyüme, silis çimento ve kil hamuru ile bağlanmıştır. Ayrışmış örnekleri grimsi sarı ile soluk kahve arasında gözenekli, demirle boyanmış, bol mikalı ve dirençsizdir. Grovaklar devamlı dereceli ve laminalı tabakalanma gösterirler. Şeyl ile nöbetleşmelerindeki grovaklar yatay ve düşey tane derecelenmesi, keskin alt sınır, taban yapıları, oluşuk arası şeyl parçaları, tane yönelimi, buruşma yapısı, yarıлма lineasyonu, küçük ölçekte çapraz ve stratigrafik özellikleriyle türbidit akıntı çökelleridir. Alttan üste doğru laminalı tabaklanma gösteren grovaklar, akıntı içyapılar bakımından fakirdir. Çok kötü boylanmış, grovaklar koyu yeşilimsi gri, zeytini yeşil, gri, sarımsı gri, ayrışma renkli ve düşük dokusal olgunluktadır: Bileşen taneler çoğunlukla kaya parçası, kuvars, mika, feldspat kırıntısıdır. Bu tip kayaçlar genellikle masif iç yapısız, 16 - 64 cm tabaka kalınlığı sınırları içinde ince şeyllerle ara katkılı olabilir. Litik grovaklar ve bunlarla ardışıklı şeyller iyi korunmuş bitki kalıntıları ve bitkisel yığılımları kapsarlar.

Konglomeralar kısmen kılavuz seviye özelliğindedir. Bunlar genellikle açık yeşilimsi, gri ve grimsi sarı ile soluk kahverengi arasında ayrışma renkli, polijenik çok kötü ile orta arası boylanmalıdır. Bileşen taneler çok ince çakılcıkla ufak blok arasında yarı yuvarlanmış, beyaz kuvarslı damarlar, koyu renkli çörtler, lidit, iyi yuvarlaklaşmış mikaşist, oluşuk arası şeyl, grovak ve kireçtaşıdır. Türbiditler morfolojik olarak kumtaşı, kesitlerinin altında ve içinde merceksel, kalın şeyl kesitlerinde çizgisel kanal dolgusu oluşuklar, bolluk ve kalınlıkları üste doğru azalıp kaba kumtaşı, laminalı kumtaşı ve silttaşı yoluyla şeyle geçer [23].

4.1.1.4 Çamurluhan Formasyonu

Genellikle merceksel çakıltaşı-çakıllı kumtaşı ve sarı-kahverenkli kum ara tabakalı yeşil-gri renkli, kil-marn ardışımından ibarettir. Bayrampaşa kuzeyinde, Atışalanköyü güneyinde ve Gaziosmanpaşa güneybatısında yüzlekleri bulunur. Trakya formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelen birimin görülebilen tabanında açık

kahverenkli karbonat konkresyonlu killer yer alır. Bu kesimin üzerine marn-kil ardışıklı bir seviye gelir. Üste doğru sarı, bej renkli, kum tabakaları bulunur. Genellikle kumlu seviyeler mercek sel halinde olup kalınlıkları değişir. Bu kumun üst kesimlerinde ise killi seviyeler görölür [23].

4.1.1.5 Güngören Formasyonu

Genellikle yeşil-mavi renkli üst seviyelerinde kirli beyaz renkli maktralı kireçtaşı ara seviyeli, kum cepli kil ve marnlardan oluşur. Güngören Formasyonu, Yedikule Kazlıçeşme Osmaniye, Rami, Atışalanı-Esenler arası ve Güngören doğusunda görölür. Ayrıca şirinevler-Yenibosna-Kocasinan-Mahmutbey sırtının doğu ve batı yamaçlarında şenlökköy-Sefaköy-Halkalı sırtının doğu ve batı yamaçlarında yüzeyler.

Sarımsı esmer-yeşil renkli kil, beyaz renkli marnlar ile bunlar arasında ince düzensiz tabakalı maktralı kalker, beyaz tebeşirimsi kalker seviyelerinden oluşur. Killer içinde marnlı kalker topakları vardır. Killer içinde ayrıca bitki sap ve yaprak izleri, silt ve kum mercekleri gözlenir. Killi kireçtaşı-kil ar dalanımı Bakırköy kireçtaşına geçişte çoğalır. Killer ince tabakalı olup laminalıdır. Ayrıca içlerinde kum mercekleri bulunur. Yüze ye yakın yerlerde organik madde zenginleşmesiyle kahverengiye dönüşmektedir [23].

4.1.1.6 Kuşdili Formasyonu

Birimin taban kesimi çakıllı ve yanal devamlılıkları değişen kumlar ile gri siyah renkli kil ve çamurlardan oluşur. Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri, Haliç civarı, Ayamama, Veliefendi, Aksaray vadilerinde tabanda çakıllı seviye ile başlayan birim üste doğru yanal devamlılığı fazla olmayan kum ve siltlere geçer. Üste doğru siyah renkli bol kavkılı kil ve çamurtaşları yer alır. Bu birimler arasındaki geçişler düzensiz olup sıklıkla değişir [23].

4.1.2 Yapısal Jeoloji

İstanbul'da jeolojik yapı oldukça karmaşıktır. Bunun başlıca sebebi stratigrafik istifte birbirine çok benzeyen birimlerin tekrarlanması, kılavuz düzeylerinin seyrek ve kolay tanınır olmaması, üstlenen orojenik hareketler, interferans kıvrımları, çok sayıda faylar ile andezit veya diyabaz dayklarının sokulması olarak sıralanabilir.

Ayrıca yerleşim bölgelerindeki örtü veya dolgular da yapısal unsurların izlenmesini güçleştirir. Farklı doğrultulardaki kıvrımlar veya interferans kıvrımlarıyla yatay ve düşey kesitte oluşan geometri oldukça karmaşıktır.

Konkordan bir istif oluşturan İstanbul Paleozoik çökelleri Hersiniyen orojenezi ile birlikte kıvrımlanmıştır. Hersiniyen kıvrımları esas itibariyle sıkışık, kapalı, asimetric ve konsantrik tipte görülürler. Yerel olarak diapirik olanları da vardır. İstanbul Paleozoik istifleri içerisinde relatif olarak daha dayanımlı birimlerin bulunduğu yerlerdeki kıvrımlar ise daha geniş ve konsantrik olarak görülmektedir. Tersine daha az dayanımlı düzeylerinde ise sıkışık kıvrımlar görülmektedir.

Bölge üzerinde etkili olan Alpin orojenezinde tüm yaşlı birimler Üst Kretase-Paleosen ve Alt Eosen yaşlı birimler üzerine itilmişlerdir. Bu hareketlerle Paleozoyik yaşlı birimler yeniden, Mesozoyik-Alt Tersiyer yaşlı birimler ise ilk kez kıvrımlanmışlardır. Alt Eosen sonrasında günümüze kadar gelişen sedimentler alttaki temelin kırılmalarına bağlı olarak açık kıvrımlar oluşturmuşlardır.

Paleozoik birimlerini açısız diskordansla örten Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri, çoğu yerde az eğik veya yataya yakındır. Soğucak, Ceylan, Karaburun, Gürpınar, Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy formasyonları olarak ayırtılan bu istiflerde genellikle epirogenik hareketler etkili olmuştur. Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri önemli ölçüde tabandaki Trakya formasyonunun paleojeolojik konumundan etkilenmiştir. Paleo yükselimden dolayı havza yönünde, 10-15 derecelik ilksel eğimler ve çökel istifinde kalınlaşma görülmektedir. Pliyosen'den itibaren bölgede izlenen sıyrılma tektoniğine bağlı olarak gelişen Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun neden olduğu deformasyonlarla İstanbul Yarımadası güneyindeki Neojen istifinde açık kıvrımlanmalar ve faylanmalar meydana gelmiştir [22].

4.1.3 Depremsellik

Çalışma alanı 1. dereceden deprem kuşağı içerisinde yer almaktadır. Türkiye deprem bölgeleri haritasına göre 1. derece deprem bölgesi için öngörülen etkin deprem ivme katsayısı 0,4g'dir. Bölge İstanbul ili içinde 2. bölgede yer almaktadır. Şekil 4.1'de İstanbul deprem bölgeleri haritası gösterilmektedir [19].



Şekil 4.1: İstanbul İli Deprem Bölgeleri Haritası

4.2 Saha Jeolojisi Çalışmaları

Kağıthane Tüneli güzergahı boyunca jeoloji çalışmaları için toplam 26 lokasyon saptanmıştır. Projedeki numaralandırmaya göre; Lokasyon 10-11-12-13 ve 14 Kağıthane Giriş Portalı bölgesinde yer almaktadır.

Lokasyon 10; Örnektepe Mahallesi'nde, Kağıthane Viyadüğü'nün sağ omzunda yer alan yol yarmalarında yer almakta ve burada yeşilimsi gri renkli silttaşı birimi gözlenmektedir. Birim kırıklı ve çatlaklı bir yapı sergilemektedir. Tabaka doğrultu ve eğimi K54D, 53KB dır. Şekil 4.2'de gösterilen lokasyonda gözlenen iki ana çatlak sisteminin doğrultu ve eğimi K55B, 41GB ve K20B 68KD dur.

Lokasyon 11; Lokasyon 10 a yakın olup burada ince taneli, altere rengi yeşilimsi gri, çok çatlaklı ve kırıklı, silttaşı birimi gözlenmektedir. Yapılan ölçümlerde tabakaların doğrultu ve eğimlerinin K50D, 68KB yöneliminde olduğu belirlenmiştir. Lokasyon 11 Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Kağıthane Portali Lokasyon 10



Şekil 4.3: Kağıthane Portali Lokasyon 11

Lokasyon 12; Örnektepe Spor tesislerinde bulunmakta ve burada masif, altere rengi yeşilimsi-kahverengi, grovak birimi gözlenmektedir. Tabakaların doğrultu ve eğimleri K48D, 77KB'dır. Şekil 4.4'de gösterilen lokasyonda gözlenen çatlak sistemlerinin doğrultu ve eğimleri K29B, 21KD ve K30D, 37KB dır.



Şekil 4.4: Kağıthane Portalı Lokasyon 12

Lokasyon 12 Km 0+300.00'de Örnektepe Spor tesisleri ile Çamlık Sokak arasında bulunan ve yol şevi aynasında yüzeylenen grovaklar ezilmiş ve ayrılmıştır (Şekil 4.5). Şekil 4.6'da görünen ezilme zonu, doğuya doğru devam etmekte, ezilme zonu içerisinde kuvarsit damarı mostra vermektedir.



Şekil 4.5: Km 0+300.00'da Ezilme Zonu ve Aşırı Ayrışma



Şekil 4.6: Km 0+300.00’da Kuvarsit Damarı

Lokasyon 13; Kağıthane portal sahası içinde bulunmakta ve burada kahve renkli kumtaşı-silttaşı ardalı gözlenmektedir. Bu birim K30D 45KB doğrultu ve eğimi ile kırıklı ve çatlaklı bir yapı sergilemektedir. Çatlak Sistemlerinin doğrultu ve eğimleri K25D, 66GD ve K60B, 70KD’dur (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Kağıthane Portali Lokasyon 13

Lokasyon 14; tünel güzergahının dışında, Kasımpaşa yolunun sağ yol yarmasında yer almakta ve burada çok altere olmuş, yeşilimsi kahve renkli, grovak birimi

bulunmaktadır. Birim K20B 65GB doğrultu ve eğim ile gözlenmiştir. Çatlak sisteminin doğrultu ve eğimi K83B, 45KD'dur (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Kağıthane Portali Lokasyon 14

4.2.1 Mekanik Sondaj Çalışmaları ve Karot Alımı

Kağıthane Tüneli giriş portali civarında iki sondaj kuyusu açılması uygun görülmüş, bunlar projeye uygun olarak SK-8 ve SK-9 numaraları ile adlandırılmıştır.

SK-8; Örnektepe Spor tesislerinin yanında, Km 0+307'de sağ tüp ekseninde yapılmıştır. Şekil 4.9'da SK-8 ve sondaj düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Kağıthane Portali SK-8 Görünümü

Ağız kotu 72.85 m olan sondajda ilk 3.00 m bitkisel toprak ve dolguyu takiben 29.50 m'ye kadar kahverengimsi gri renkli, çok kırık ve çatlaklı, ayrıışmış grovak birimi kesilmiştir. Çatlak dolgusu kalsit olan bu metreler arasında kalsit dolgusunun yer yer erimiş olduğu gözlemlenmiştir. Çatlak aralığı 0.5 – 1.0 cm arasında değişmekle birlikte çatlak yüzeyleri düz-lekeli-düzlemseldir. Çatlak sistemleri karot eksenine paralel yer yer karot ekseni ile 30° - 45° açılar yapmaktadır (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11).



Şekil 4.10: Kağıthane Portali SK-8 3.00-10.00 m Karotları



Şekil 4.11: Kağıthane Portali SK-8 18.10-23.50 m Karotları

SK-8'de 29.50 – 70.20 m arası siyahımsı gri renkli, az kırıklı ve çatlaklı, ayrışmamış silttaşı birimine rastlanmıştır. Silttaşı birimi, masif görünlü ve dayanımlıdır. Çatlak dolgusu kalsit olan 29.50 – 70.20m.'leri arası süreksizlikler 0.5 – 1.0 cm arasındadır. Çatlak yüzeyleri düz, yer yer kaygan, sondaj genelinde düzlemseldir. Karot eksenine paralel olan çatlaklar yanı sıra karot eksenini ile 30° - 45° açılar yapan çatlak sistemleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de gösterilmiştir. SK-8'e ait tüm karot sandıkları EK-A'da verilmiştir.



Şekil 4.12: Kağıthane Portalı SK-8 43.00-47.10 m Karotları



Şekil 4.13: Kağıthane Portalı SK-8 59.80-64.60 m Karotları

SK- 9, Km 0+177’de, sol tüpün 16.00 m kuzeyinde açılmıştır. SK-9 noktası ve sondaj düzeneği Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Kağıthane Portali SK-9 Görünümü

Ağız kotu 35.00 m olan sondajda ilk 1.50 m tamamen ayrıŐıŐ bitkisel toprağa rastlanmıŐ, 1.50 - 18.00 m leri arası kahverengimsi yeşilimsi gri renkli, çok çatlaklı ve kırıklı, orta derecede ayrıŐıŐ grovak kesilmiştir.

Çatlak dolgusu sondaj genelinde kalsit olmasına rağmen yer yer killi çatlak dolguları gözlenmiştir. Çatlak aralıkları 1 – 3 mm, çatlak yüzeyleri ise düzlemseldir. Şekil 4.15’ de gösterilen karot eksenine paralel olan çatlaklar yer yer karot ekseni ile 45° - 50° açılar yapmaktadırlar.

18.00 – 30.00 m’leri arasında, yeşilimsi gri renkli, çok çatlaklı ve kırıklı, az ayrıŐıŐ, kumtaşı-silttaşı ardalanması kesilmiştir. Bu derinliğe ait karot sandığı Şekil 4.16’da gösterilmiştir.

30.00 – 32.00 m’leri arası siyahımsı gri renkli çatlaklı ve kırıklı, az ayrıŐıŐ, silttaşı birimi kesilmiştir. Bu aralıklara ait karotlar Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Çatlak aralıkları 6 mm’den küçük, çatlak yüzeyleri kaygan ve düzlemsel, karot ekseni ile 35° - 40° yapan çatlak sistemleri gözlenmiştir. SK-9’a ait tüm karot sandıkları EK-A’da gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Kağıthane Portali SK-9 6.40-11.00 m Karotları



Şekil 4.16: Kağıthane Portali SK-9 21.50-27.00 m Karotları

Sondaj noktaları ve mostra lokasyonları EK-D'deki plan üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.17: Kağıthane Portali SK-9 27.00-32.00 m Karotları

4.3 Laboratuvar Çalışmaları

Sondaj noktaları SK-8 ve SK-9'dan alınan karot numuneleri, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmek üzere, sandıklar halinde İTÜ Maden Fakültesi Mühendislik Jeolojisi Kaya Mekaniği Laboratuvarı'na getirilmiş ve burada incelemeye alınmıştır. Deneyler için kullanılacak numuneler, ilgili sondaj kuyularında, tünel kırmızı kotu, birinci ve ikinci etkilenme bölgelerinin (zone) kesildiği kot aralıklarından seçilmiştir.

Aşağıda sondaj kuyusu SK-8 ve SK-9'da belirlenmiş derinlikten alınan numunelerin deneylere hazırlanışı anlatılmış ve bu numunelere ait fiziksel ve mekanik deneylerden elde edilen veriler tablolar halinde sunularak takip eden bölümde bunların sonuçları tartışılmıştır.

4.3.1 Fiziksel Deneyler

Fiziksel deneyler SK-8 ve SK-9 sondajlarından alınan çeşitli boyuttaki karot parçacıkları üzerinde ISRM 1981 (International Society of Rock Mechanics) tanımlamalarında ön görülen koşullar altında; birim hacim ağırlığı, porozite ve

ağırlıkça su emme değerlerini saptamak üzere yapılmıştır. Deneyler her derinlik aralığına karşılık gelen birden fazla numune üzerinde tekrarlanmıştır.

Fiziksel deneylerde 0.01 gr hassasiyetindeki elektronik tartı aleti ile standardın ön gördüğü nitelikteki 500 °C kapasiteli etüv, su emme ve efektif porozitenin tespiti için saf su kullanılmıştır [24].

Deney numuneleri;

- i. 24 saat süreyle etüvde kurutulduktan sonra kuru ağırlığı (W_1) belirlenmiştir (Şekil 4.18).
- ii. Soğumaya terk edilen numuneler ertesi gün başlanmak üzere 24 saat süreyle saf su içerisinde bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda sudan çıkarılarak nemli bezle üzerlerindeki su alındıktan sonra tekrar tartılarak suya doymun ağırlıkları (W_2) bulunmuştur (Şekil 4.19).
- iii. Bu işlemin hemen ardından suya doymun numuneler saf suya daldırılarak hacimleri (V_f) ölçülmüştür.



Şekil 4.18: Laboratuvar Deney Numunelerinin Etüve Yerleştirilmesi



Şekil 4.19: Laboratuvar Deneyleri İçin Saf Suda Bekletilen Numuneler

Deneyle sonuçunda;

Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k);

$$\gamma_k = \frac{W_1}{V_t} \quad (4.1)$$

Suya doymun birim hacim ağırlığı (γ_d);

$$\gamma_d = \frac{W_2}{V_t} \quad (4.2)$$

Ağılıkça su emme (S_a);

$$S_a = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (4.3)$$

Porozite (n);

$$n = \frac{W_2 - W_1}{V_t} \quad (4.4)$$

olarak hesaplanmıştır [24].

SK-8 ve SK-9 sondaj kuyularından alınan numuneler makroskobik olarak incelenmiş, bu incelemeden hareketle belirlenen litolojik tanımlamalar ve deneylerden elde edilen kuru (γ_k) ve doygun birim hacim ağırlığı (γ_d), porozite (n) ve su emme değerleri (S_a) hesaplanarak sonuçların ortalamaları Tablo 4.1’de sunulmuştur. Fiziksel deney sonuçları daha detaylı olarak, tüm numunelere ait özellikler tablolularak EK-B’de verilmiştir [24].

Tablo 4.1: Kağıthane Portali SK-8 ve SK-9 Sondajlarından Elde Edilen Numunelerin Ortalama İndeks Özellikleri

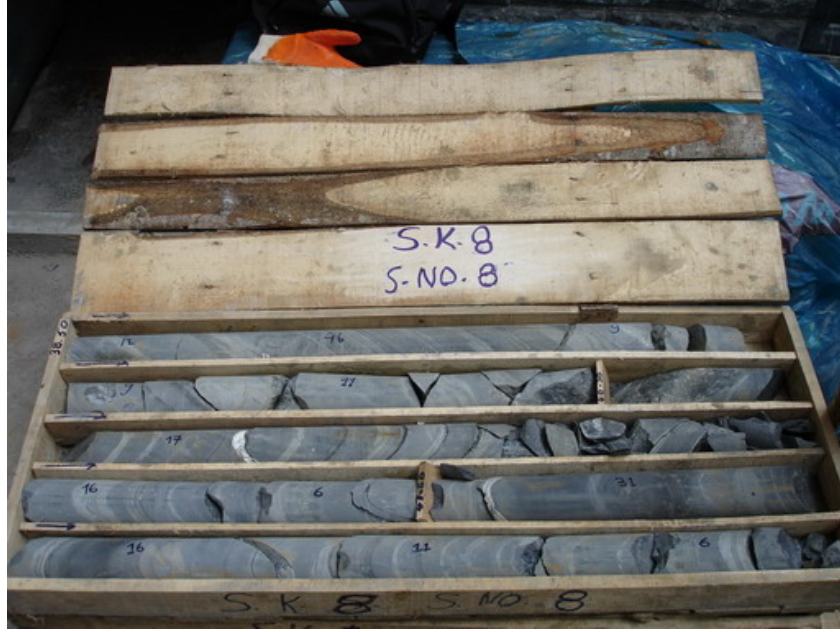
Sondaj No	γ_k (gr/cm ³)	γ_d (gr/cm ³)	n(%)	S_a (%)	Litoloji
SK-8	2.64	2.66	2.31	0.87	Kumtaşı
	2.75	2.77	1.34	0.48	Silttaşı
SK-9	2.62	2.68	5.22	1.99	Silttaşı
	2.66	2.67	1.81	0.68	Kumtaşı

4.3.2 Mekanik Deneyler

Kağıthane – Piyalepaşa Tüneli Kağıthane Portali’nde yapılan SK-8 ve SK-9 sondajlarından alınan 6 cm çapındaki numunelerin mekanik parametrelerini belirlemek üzere İTÜ MJKM laboratuvarında tek eksenli basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi, nokta yükleme deneyi ve dolaylı çekme (brezilyan) deneyi yapılmıştır. Aşağıda numunelerin deneylere hazırlanması ve deney sonuçları açıklanmıştır.

4.3.2.1 Numunelerin Deneylere Hazırlanması

SK-8 ve SK-9 sondajlarından alınan karotlar sandıklar halinde İTÜ MJKM Laboratuvarında incelenmiş ve deneylerde kullanılacak karotlar uzunlukları ölçülmek suretiyle saptanmıştır. Saptanan karotlar Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20: DeneYlerde Kullanılabilecek Karotların Uzunluklarının Saptanması

Daha sonra saptanan karot numuneleri tek eksenli ve üç eksenli basınç deneyleri ile nokta yükleme ve dolaylı çekme deneylerinde kullanılmak üzere; deney için gerekli uzunluklarda kesilmiştir. Uygun uzunluklarda kesme işlemi Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21: Laboratuvar DeneYlerinde Kullanılacak Numunelerin Uygun Uzunluklarda Kesilmesi

Tek ve üç eksenli basınç deneylerinde kullanılacak numunelerin boy / çap oranlarının “2” olmasına dikkat edilmiştir. Üç eksenli basınç deneyinde numuneler 3 cm çapında olması gerektiğinden 6 cm’lik karot numunelerinden laboratuvar ortamında 3 cm’lik karotlar alınmıştır. Karotlar içinden laboratuvarda karot alma işlemi Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22: Laboratuvarda Karot İçinden Karot Alma İşlemi (başlangıç)



Şekil 4.23: Laboratuvarda Karot İçinden Karot Alma İşlemi (bitiş)

Son olarak boyutları ayarlanan numunelerin baş kısımları korund tozu ile aşındırılarak deneylerde olası yüzey kayıplarını minimuma indirmek için parlatılmıştır. Korund tozu ile aşındırma işlemi Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



Şekil 4.24: Deney Numunelerinin Baş Kısımlarının Pürüzlerinin Giderilmesi

Boyutları ayarlanan ve baş kısımlarının pürüzleri giderilen numuneler, sondaj noktalarına ve derinliklerine göre gruplanarak deneylere hazır hale getirilmiştir. Aşağıda Şekil 4.25’de örnek olarak SK-8 sondajı 53.60 - 55.80 m’leri arasındaki karotlardan hazırlanan deney numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 4.25: Laboratuvar Deneylerinde Kullanılmak Üzere Hazırlanmış SK-8 53.60 – 55.80 m Derinliğe Ait Numune Grubu

4.3.2.2 Tek Eksenli Basınç Deneyleri

Tek eksenli deneylerde belirli yükleme düzeylerine karşılık gelen boyuna ve enine deformasyonlar Şekil 4.26'da gösterilen 0.01 mm hassasiyetindeki mekanik ve elektronik sayaçlar yardımıyla okunmuştur.



Şekil 4.26: Tek Eksenli Basınç Deneyi Düzenegi

Deney numunelerinin çoğunun fissürlü ve/veya çatlaklı yapıda olması nedeniyle özellikle deneyler süresince ölçülen enine deformasyonlar düzensizlik göstermiştir. Bu nedenle bu tür numuneler için poisson oranı değerleri hesaplanamamıştır. Tablo 4.2'de deneylerde kullanılan numunelerin basınç direnci ve elastisite modülü değerlerinin farklı derinliklere göre sonuçları verilmiştir. Mekanik deneylerde kullanılan karot örneklerinin çoğu primer veya sekonder özür içermektedir. Çoğu deneyde yenilme numunedeki mevcut süreksizlikler boyunca oluşmuştur [24].

Tablo 4.2: Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik(m)	Basınç Direnci (kg/cm ²)	Elastisite modülü (kg/cm ²)	Litoloji
SK-8	36.00-38.50	449*	60954	Silttaşı
		690	12852	Silttaşı
		578	87007	Silttaşı
		218*	60383	Silttaşı
		523	68120	Silttaşı

Tablo 4.2... devamı

SK-8	45.00-47.00	356	70574	Silttaşı
		337	80817	Silttaşı
		138*	55650	Silttaşı
		305	64496	Silttaşı
		80*	83048	Silttaşı
	53.60-55.80	449	62409	Silttaşı
		449	43275	Silttaşı
		536	69072	Silttaşı
		613	95939	Silttaşı
		401	92944	Silttaşı
	63.00-68.00	99*	58419	Silttaşı
		514	74855	Silttaşı
		103*	91042	Silttaşı
		518	71187	Silttaşı
SK-9	7.50-10.50	128*	45695	Silttaşı
	17.00-21.50	169*	25954	Silttaşı
		236*	43403	Silttaşı
		336*	41011	Kumtaşı
		325*	65139	Kumtaşı
	27.00-32.00	257*	80352	Silttaşı

*: Kırılma tabakalaşma düzlemi, çatlak veya fissür boyunca oluşmuştur.

4.3.2.3 Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Üç eksenli basınç deneyleri 3 cm çapındaki ve boy/çap oranı yaklaşık "2" olan silindirik numuneler üzerinde standart çelik hücre kullanılarak yapılmıştır. Üç eksenli basınç deney düzeneği Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27: Üç Eksenli Basınç Deneyi Düzeneği

Çatlaklı karotlardan laboratuarda numune hazırlanamadığından, yalnızca özürsüz karotlardan deney numuneleri hazırlanabilmiştir. Bu nedenle üç eksenli deneyler tek eksenli deneylere göre daha az sayıda numune üzerinde uygulanabilmiştir. Yalnızca SK-8 sondajına ait numuneler üzerinde uygulanabilen üç eksenli basınç deneylerinde 10 – 50 kg/cm² arasında değişen çevre basınçları uygulanmıştır. Üç eksenli basınç deneyleri sonuçları Tablo 4.3’de gösterilmiştir [24].

Tablo 4.3: Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik(m)	Boy(cm)	Çap(cm)	σ_3 (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	Litoloji
SK-8	36.00-38.50	6.55	3	10	807	Silttaşı
		6.5	3	20	821	Silttaşı
		6.55	3	30	934	Silttaşı
		6.5	3	40	1019	Silttaşı
		6.55	3	50	1132	Silttaşı
	45.00-47.10	6.55	3	10	835	Silttaşı
		6.6	3	20	1005	Silttaşı
		5.65	3	30	750	Silttaşı
		6.65	3	40	1118	Silttaşı
		6.6	3	50	1189	Silttaşı
	53.60-55.80	6.45	3	10	686	Silttaşı
		6.1	3	20	800	Silttaşı
		6.5	3	30	870	Silttaşı
		6.4	3	40	1040	Silttaşı
		6.55	3	50	1069	Silttaşı
	63.00-68.00	5.2	3	10	708	Silttaşı
		6.38	3	20	1040	Silttaşı
		6.55	3	30	616	Silttaşı

4.3.2.4 Nokta Yükleme Deneyleri

Boyları kısa olan ve tek eksenli basınç deneyi için uygun olmayan karot numuneleri üzerinde uygulanan deneylerde standart nokta yükleme aleti kullanılmıştır. Nokta yükleme deneyi düzeneği Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

Deney numuneleri çapsal olarak yüklenmiş ve elde edilen nokta yükleme indeksi değerleri boyut etkisi dikkate alınarak ISRM 1981’e göre düzeltilmiştir. Deney sonuçları Tablo 4.4’de gösterilmiştir [24].



Şekil 4.28: Nokta Yükleme Deneyi Düzenneği

Tablo 4.4: Nokta Yükleme Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik (m)	Nokta yükleme indeksi (kg/cm ²)	Düzeltilmiş nokta yükleme indeksi (kg/cm ²)	Litoloji
SK 8	45.0-47.1	13,4	52,7	Silttaşı
		47,9	52,7	Silttaşı
		47,9	52,7	Silttaşı
	53.6-55.8	35,3	38,8	Silttaşı
		49,1	54	Silttaşı
		63	69,3	Silttaşı
	63.0-68.0	68	74,8	Silttaşı
		60,5	66,5	Silttaşı
		68	74,8	Silttaşı
SK 9	7.5-10.5	50,4	55,4	Silttaşı
	17.0-21.5	34,4	37,8	Silttaşı
		88,2	97	Kumtaşı
		35,3	38,8	Kumtaşı
		37	40,7	Silttaşı
		5,3	5,8	Kiltaşı
	27.0-32.0	5,3	5,8	Kumtaşı

4.3.2.5 Endirek Çekme Deneyleri

Endirek çekme deneyleri silindirik numuneler üzerinde uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda elde edilen kırılma yükleri yardımıyla çekme dirençleri (σ_c);

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (4.5)$$

Eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır. Burada;

p : Kırılma anında ölçülen yük

d : Numune çapı

l : Numune boyu

olarak tanımlanmıştır.

Endirek çekme deneyi düzeneği Şekil 4.29'da, SK-8 ve SK-9 sondajlarından alınan numuneler için elde edilen endirek çekme direnci değerleri Tablo 4.5'de gösterilmiştir [24].



Şekil 4.29: Endirek Çekme Deneyi Düzeneği

Tablo 4.5: Endirek Çekme Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik(m)	Endirekt Çekme Direnci (kg/cm ²)	Litoloji
SK-8	23.50-28.00	27	Kumtaşı
	36.00-38.50	48	Silttaşı
		77	
	45.00-47.00	81	Silttaşı
		74	
	53.60-55.80	72	Silttaşı
107			
63.00-68.00	71	Silttaşı	
	79		
SK-9	7.50-10.50	38	Silttaşı
	17.00-21.50	31	Silttaşı
		70	Silttaşı
		21	
27.00-32.00	102	Kumtaşı	

4.4 Arazi ve Laboratuvardan Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi

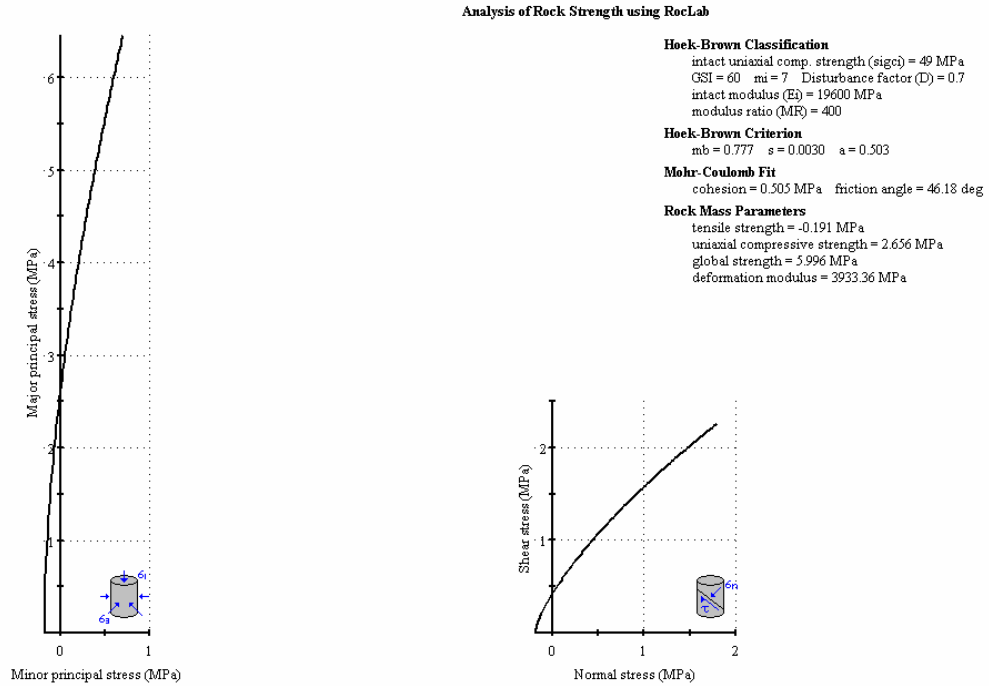
Polilit olarak adlandırılan çok parçalı, çatlaklı ortamlar monolit yani tek parçalı, çatlaksız kayaç ortamlara göre daha düşük direnç gösterir ve kolayca şekil değiştirerek plastikleşebilir. Bunun nedeni, bir gerilme durumunda kayaya aktarılan kuvvetlerin süreksizliklerden ötürü farklı noktalarda farklı büyüklüklere ulaşmasıdır. Parçadan parçaya kuvvet aktarımları sırasında pürüzlü çatlak yüzeylerinde gerilme yığılmaları oluşur. İkincil etmenler arasında ise süreksizlik yüzeylerinin geçmişteki oluşumları sırasında geçirdikleri örselenmeler ve buna bağlı olarak gelişen ayrışma olayları gösterilebilir. Sonuç olarak süreksizliklere yakın kesimlerde yer alan parçacık, iç kesimlere göre önceden daha fazla zorlanmış ve örselenmiştir. Parçacık küçüldükçe bu zayıf kesimlerin hacim içerisindeki payı artar, sonuçta çok parçalılık arttıkça kayanın dayanım parametreleri laboratuvarında incelenen taş örneklerinde bulunan değerlere kıyasla çok belirgin azalmalar gösterir [16].

Kaya mekaniğinde (diskontinuum mekaniğinde) kayaçların arazide sahip oldukları jeomekanik büyüklükleri belirlemek için Hoek & Brown, Lama, Denkhous & Bieniwaski, Protodjakonov gibi çok sayıda yöntem geliştirilmiştir [25].

Hoek & Brown tarafından geliştirilen ve laboratuvar taş örneğinin tek eksenli basınç dayanımı değeri ile birlikte kayacın arazide sahip olduğu süreksizlik miktarını ve örselenme durumunu kullanarak hesaplama yöntemi (Hoek), internetten sağlanabilen yazılımı (RocLab) nedeni ile uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

Modern kaya mekaniğinin kurucularından Müller L. tarafından temeli atılan ve Vardar tarafından geliştirilen bir başka yöntem ile kayacın sahip olduğu dokusal özellikler, süreksizlik özellikleri, kayaç tek eksenli basınç dayanımı, sistem büyüklüğü kullanarak kayaç için yerinde jeomekanik büyüklükler hesaplanabilmektedir [16, 26].

Bu amaçla RocLab 1.0 programı ile laboratuvar deneyleri ve arazideki gözlemler sonucunda elde edilen bilgiler yorumlanarak laboratuvar değerleri in-situ değerlerine indirgenmiştir. RocLab 1.0 programı kaya kütle dayanım parametrelerini Hoek - Brown yenilme kriterlerini temel alarak hesaplamaktadır. RocLab 1.0 ile çok zayıf kaya kütleleri için Hoek-Brown yenilme kriterlerini uygulayabilir ve Hoek-Brown yenilme zarfından eşdeğer Mohr-Coulomb parametreleri hesaplanabilmektedir. Aşağıda SK-8 sondajının 53.60 - 55.80 m'leri arasından alınan sondaj numunelerinin RocLab 1.0 ile ulaşılan arazi değerleri Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30: Kağıthane Portali SK-8 53.60-55.80 m Derinliğine Ait Numunelerin Laboratuvar Deneysel Sonuçlarının RocLab Analizi

Kağıthane Portali SK-8 ve SK-9 sondajlarının farklı derinliklerinden alınan numunelerinin üzerinde RocLab 1.0 programı ile yapılan analiz ile ulaşılan in-situ değerleri Tablo 4.6’da gösterilmiştir. Ayrıca program analizleri EK-C’de ayrıntılı olarak verilmiştir [27].

Tablo 4.6: Kağıthane Portali SK-8 ve SK-9 Numunelerinin Laboratuvar Deney Sonuçlarına Dayanarak Yapılan RocLab Analizi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik (m)	γ_d (gr/cm ³)	Basınç Direnci (kg/cm ²)	Elastisite Modülü (kg/cm ²)	Litoloji	ϕ (°)	c (kg/cm ²)
SK-8	36.00-38.50	2.77	492	39494.1	Silttaşı	46	5.03
	45.00-47.00	2.77	243	19506.2	Silttaşı	42	3.02
	53.60-55,80	2.77	490	39333.6	Silttaşı	46	5.05
	63.00-68.00	2.77	247	19827.3	Silttaşı	42	3.09
SK-9	7.50-10.50	2.68	128	4006.8	Silttaşı	31	1.19
	17.00-21.50	2.68	267	8358	Silttaşı	36	1.73
	27.00-32.00	2.67	257	8045	Kumtaşı	44	2.10

5. GEOTEKNİK MODEL OLUŞTURULMASI

Kağıthane - Piyalepaşa Tüneli, Kağıthane portalı yaklaşım kazıları sırasında oluşturulan şevler ömürleri açısından değerlendirildiğinde, hizmet sürelerinin tünel açım süresi ile orantılı olduğu görülmektedir. Tünel açımının tamamlanmasının ardından inşa edilecek olan betonarme portal yapıları ile birlikte yaklaşım kazı çukuru dolgu malzemesi ile kapatılacağı için şevler de ömürlerini tamamlamış olacaktır. Tünel imalat süresi yaklaşık 2 yıl olarak düşünüldüğünde, Kağıthane portalinde oluşturulan şevlerin de 2 yıl süresince statik ve dinamik koşullar altında stabilitelelerini korumaları hedeflenmektedir.

Şev stabiliteleleri ya da şevler için güvenlik sayıları genellikle ilgili projeler için hazırlanan şartnameler ile idare tarafından belirlenmektedir. İstanbul Büyükşehir Belediyesinin İBB Tünellerindeki şevler için dikkate aldığı şev güvenlik sayıları, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesinde belirtilen güvenlik sayıları ile aynıdır. Buna göre uzun ve kısa dönem koşullarında ve statik durumda bir şevin efektif jeomekanik parametreler ile sağlaması gereken güvenlik sayısı 1.50 iken, uzun dönem depremlilik durumda şevin sahip olması gereken güvenlik sayısı 1.10'dir [28].

Bilindiği gibi “yerüstü kaya yapıları” açık ocak, şev, yarma, temel çukuru ve benzerleri gibi topoğrafik yüzeylerin doğrudan işlenmesi ve kullanılması sırasında etkilenen kaya ortamının adıdır [6].

Kaya şevleri gibi yerüstü kaya yapılarının projelendirilmeleri sırasında yapılacak olan jeolojik, mühendislik jeolojisi ve jeomekanik çalışmalarından sağlanan veriler bir arada değerlendirilerek bir geoteknik model oluşturulur. Geoteknik model çalışmaları sırasında kaya yapısını oluşturan malzeme litolojisi ve mühendislik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve değerlendirilmiş olmalıdır. Buna göre kuru, ıslak ve suya doygun koşullarda süreksizlik yüzeylerinde beklenen kaya dayanım parametreleri sağlanmış olmalıdır. Bu süreksizlik yüzeyleri boyunca kaya

malzemesinde hareket bekleneceği için, sayısal analizlere geçilmeden önce ortam davranışı değişken koşullar için biliniyor olmak zorundadır. Sağlanan verilere dayanarak kaya şevi için geçici ve kalıcı kendini tutabilme süresi belirlenmeli, koşulları tariflenmelidir [29]. Şev yüzeyinde olabilecek kama ve blok kaymaları, bunların derinlikleri Markland, Fellenius, Janbu gibi yöntemlerle analiz edilmelidir. Şev yüzeylerinde doku hareketliliği yönünden stabilite koşulları araştırılmalı, kayanın enjeksiyon kabul etme özellikleri, ön sağlama veya destekleme gerekliliği bilinmelidir. Şevlerin uzun dönem stabilitelerinde önemli bir etkisi olan su etkisinin önlenmesi için yüzey ve/veya daha farklı drenaj yöntemlerinin gereklilikleri incelenmelidir. Yapılan tüm bu araştırmalar neticesinde kazı, drenaj, sağlama, iyileştirme ve destekleme konularında yeterince seçenek oluşturulmuş; önlem, işlem ve yöntemler karşılaştırmalı olarak belirlenmiş olmalıdır. Ancak bu çalışmalar tam anlamı ile tamamlandığında planlanan ve projelendirilen teknik yapının ikincil durum aşamasına ait hesap ve değerlendirmeler yapılabilir. Bu şekilde titiz ve güvenilir çalışmalara dayandırılan plan ve projeler, yine yeterli özen ve denetim altında uygulandığı takdirde çok özel haller dışında sorunlarla karşılaşılmamaktadır.

Mühendislik projelerinin çözümlerinin çok seçenekli oluşu, daha kullanışlı ve uygun seçeneğin belirlenmesine yönelik tasarım ve boyutlandırma kararlarını alırken; ortamın ikincil zorlanmalara, gerilmeler ve deformasyonlar açısından nasıl karşı koyabileceğinin bilinmesini gerektirir. Bu nedenle ortamların “hiçbir önlem alınmaksızın karşılayabilir”, “ancak sağlama ve destekleme önlemlerinin alınması halinde karşılayabilir” veya “ön sağlama ve/veya iyileştirme olmaksızın karşılayamaz” olma durumlarına göre hareket etmek, seçeneklerin değerlendirilmesinde en belirleyici etmendir [30].

Kağıthane portalı şevlerinin projelendirilmesi sırasında yukarıda belirtilen aşamalara uyulmaya çalışılmıştır. Sahada ve laboratuarda yapılan detaylı araştırmalar neticesinde portal şevlerinin “herhangi bir önlem almadan stabilitelerini karşılayabilir” olma durumları ile “ancak destekleme önlemleri ile stabilitesini sağlayabilir” seçeneklerinin değerlendirilmesine karar verilmiştir.

Yukarıdaki paragrafta anlatılan seçeneklerin değerlendirilmesi için sayısal analiz yöntemlerinin kullanılmıştır. Analizlerin gerçekçi sonuç vermesi için değerlendirmeler iki farklı program ile yapılmıştır. Bunlardan ilki kuvvetler dengesi

esasına göre şev yüzeyinde oluşabilecek kama tipi kaymaları değerlendirebilen GeoSlope programıdır. Bu analizler statik ve depremler için yinelenmiştir. Desteklemenin yapılmadığı ve yapıldığı durumlarda, statik ve deprem koşulları altında şevlerin güvenlik sayıları hesaplanmıştır. Tek bir yöntemle elde edilen sonuçla ilgili kalınmaması için analizler sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme - deplasman hesabı yapan Plaxis adlı yazılım ile tekrarlanmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar GeoSlope sonuçları ile karşılaştırılmış, şevler için olması gereken minimum tasarım kriterleri belirlenmiştir. Her iki yazılımda da kayalarındaki kırık ve çatlaklara bağlı kaya dayanımının azalması ve zamana bağlı etkisinin olduğu gibi modellenmesi imkanı bulunmadığı için bu eksiklik jeomekanik parametrelerin belirlenmesi aşamasında giderilmeye çalışılmıştır. Laboratuvar deneylerinden sağlanan veriler Bölüm 4.4'te anlatılan yöntemle arazi verilerine (in-situ kaya dayanımı) indirgenmiştir. Analizlerde kullanılan jeomekanik parametreler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Hesaplamalarda Kullanılan Yerde Jeomekanik Parametreler

Litoloji	γ_d (kN/m ³)	Poisson Oranı ν	Elastisite Modülü (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)
Grovak	27.3	0,2	1.979E+06	41	30

Yapılan SK-8 ve SK-9 sondajlarında yeraltı suyuna rastlanılmamıştır. Dolayısıyla hesaplamalarda yer altı suyunun etkisi dikkate alınmamıştır.

5.1 Şevlerin Boyutlandırılması ve Stabilite Analizi İlkeleri

Kaya şevlerinde doğal yollarla ve/veya insanoğlu tarafından gerçekleştirilen teknik girişimler sonucunda ortaya çıkan ve genellikle bir kayma yüzeyi üzerinde gelişen kütle hareketlerine “kaya kaymaları” denilmektedir. Kaya şevlerinde kayma türü kütle hareketleri fay, çatlak, tabakalanma yüzeyleri gibi süreksizlik düzlemleri üzerinde gelişebildiği gibi yoğun kırıklı ortamlarda dairesel yüzeyler üzerinde de gerçekleşebilmekte ve bu kez “kaya heyelanları” adını almaktadır. Kaya heyelanları denildiğinde ana malzemesi kaya olduğu halde gerilmelerin büyüklüğü ve

süreksizliklerin parçalama etkisiyle, zemindekine benzer şekilde, yer yer kaşıkı yüzeyler üzerinde oluşan ve basamaklı kırılmalar ve doku gevşemesiyle gelişen yer kaymaları anlaşılmaktadır.

Düzlemsel kayma hareketi şev dışına eğimli tek bir süreksizlik düzlemi boyunca gerçekleştiğinde “blok”, birbirleriyle kesişen süreksizlik düzlemlerinin arakesit doğrusu boyunca gerçekleştiğinde ise “kama tipi” kayma hareketleri söz konusu olmaktadır [2].

Limit denge yöntemi olarak da bilinen analitik yolla blok ve kamaların stabilite analizi yapılabilmekte ve kayma sırasında momentlerin oluşmadığı ve kaymanın Coulomb yenilme kriterine uygun olarak gerçekleştiği varsayılmaktadır. Bir kaya şevinde, şev dışına doğru eğimli büyük bir süreksizlik düzlemi üzerinde bulunan bir kaya bloğuna etkiyen kuvvetlerin denge denklemleri yazılarak, kaydırıcı ve tutucu kuvvetler saptanmaktadır. Böylece Coulomb yenilme kriterine uygun olarak,

$$S = c \cdot A + N \cdot \tan \phi \quad (5.1)$$

bağıntısı ile verilen tutucu sürtünme kuvveti (S),

$$G_s = \frac{c \cdot A + N \cdot \tan \phi}{\sum K} \quad (5.2)$$

oranı ile tanımlanan Fellenius güvenlik sayısını (G_s) verecek şekilde, harekete geçirici toplam kuvvetlere ($\sum K$) karşılaştırılmaktadır. $G_s=1$ yani $S=\sum K$ olması durumunda limit denge hali söz konusu olmakta, $G_s<1$ olması durumunda kayma hareketi gerçekleşmektedir. Sistemin stabil ve güvenli olabilmesi için $G_s>1$ koşulu sağlanmış olmalıdır. Yukarıdaki bağıntılarda c ve ϕ ; kayma yüzeyini oluşturan süreksizlik düzleminin mekanik parametreleri;

c : Kohezyon

ϕ : İçsel sürtünme açısı

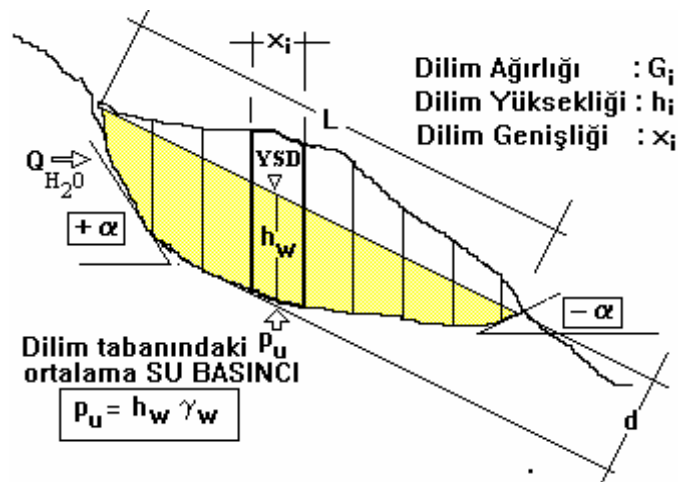
A : Kayan bloğun taban alanı

N : Blok ağırlığından kaynaklanan normal kuvvettir.

Kayma yüzeyinin her zaman dairesel olması beklenemez. Ortamın yer yer niteliğini değiştiren ve homojenliğini bozan, dokusal veya yapısal etmenler bu kesilme - kayma yüzeylerinin çoğu kez karmaşık şekiller almasına neden olurlar. Tabakalı yapılar, değişik konumlu anakaya ile zemin dokanakları, ayrışma zonları, farklı bileşimli ve nitelikli merceksi oluşumlar, ardalı veya çapraz geçişli birikimler ve benzerleri, dairesel olmayan birleşik kayma yüzeyleri oluştururlar. Bu gibi durumlarda dairesel veya sürekli fonksiyonlarla ifade edilebilen eğrisel yüzeylerin kullanıldığı hesaplama ve analiz yöntemlerinden yararlanılamaz. FEM dışındaki konvansiyonel hesaplama yöntemleri arasında, gerçekte İsveç Dilim Yöntemi'nin ana ilkelerini kullanan, ancak hazırlanmış abaklardan da yararlanarak aşamalı şekilde güvenlik sayısını irdelleyen Janbu Yöntemi de bulunmaktadır.

Janbu'nun geliştirdiği Güvenlik Sayısı bağıntıları içinde biri f_0 , diğeri n_α olmak üzere, abaklardan okunması gereken kendine özgü katsayılar vardır. Yöntemdeki bu abakların birinci grubunda, kayma yüzeyinin artı ve eksi değerler alabilen eğim açıları için geometrik ilişkilendirme sayısı " n_α " değerleri verilmektedir. Diğer grupta ise bağıl (rölatif) kayma derinliği (d/L) ile içsel parametrelere bağlı olarak düzeltme faktörünün " f_0 " değişimi yer almaktadır. Abaklardan okunan bu değerler, daha sonra formüllerde yerlerine konularak her dilimin Güvenlik Sayısı hesaplanmaktadır [3, 7].

Janbu yönteminde gelişigüzel seçilebilen kayma yüzeyi ve kullanılan geometrik ve mekanik parametreler Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Ayrıca Janbu yönteminde kullanılan abakların basitleştirilmiş halleri Şekil 5.2 ve 5.3'de verilmiştir [5].



Şekil 5.1: Janbu Yönteminde Gelişigüzel Seçilebilen Kayma Yüzeyi ve Kullanılan Geometrik ve Mekanik Parametreler

Güvenlik Sayısının hesaplanmasında genel durum için aşağıdaki bağıntı geçerlidir;

$$G_s = f_0 \frac{\sum [(c + \sigma_i - p_{ui}) \tan \phi] x_i / n_\alpha}{\sum G_i \tan \alpha - Q} \quad (5.3)$$

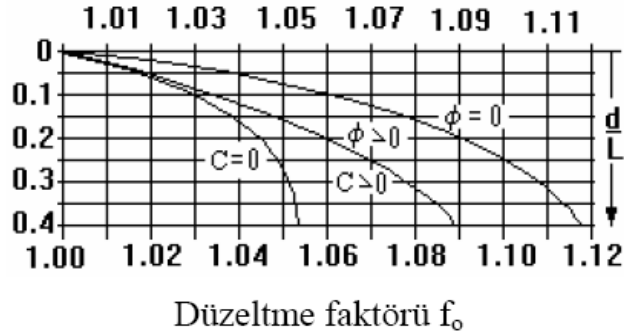
Düşey çekme çatlığında su bulunmaması ($Q = 0$) ve dilim genişliklerinin eşit olması ($x_i = \text{sabit}$) koşullarında, özel durum denklemi olan:

$$G_s = f_0 \frac{\sum [(c + \sigma_i - p_{ui}) \tan \phi] / n_\alpha}{\sum \sigma_i \tan \alpha} \quad (5.4)$$

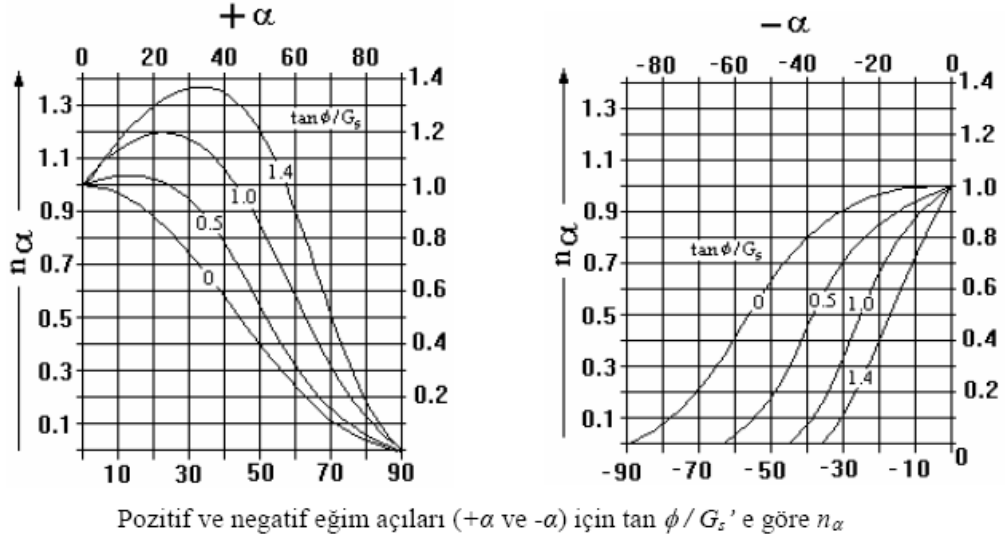
Hesaplarda kolaylık sağlamak amacıyla her dilim için:

- Kayma olasılıklı kütlelerin ve dilimlerin geometrisine ($L, d, x_i, h_i, h_w, \alpha_i$),
- Dilimlerin içsel parametrelerine (c_i, ϕ_i),
- Dilimlerin ağırlıklarına ($G_i, \sigma_i = \gamma \cdot h_i$)
- Boşluksuyu basıncı ve çatlak suyu itkisine (p_{ui}, Q_{H2O})

ilişkin değerler bir çizelge halinde derlenir. Aynı şekilde, pay ve paydada yer alan ara sonuçlar da bu çizelgede ayrılan sütunlara yazılır. Her dilim için hesaplanan pay ve payda değerlerinin toplanarak oranlanması sonucunda da Güvenlik Sayısı G_s hesaplanmış olur. Ancak; en olası güvenlik sayısının ve en olumsuz kayma geometrisinin saptanmasında, geometrik ilişkilendirme katsayısı olan n_α 'nın değiştirilmesi ve aşamalı olarak, kabul edilenler ile hesaplanmış olan güvenlik sayıları birbirleriyle çakışmaya kadar, hesapların yinelenmesi gerekir [5].



Şekil 5.2: Janbu Yönteminde Kullanılan Abaklar - f_0



Şekil 5.3: Janbu Yönteminde Kullanılan Abaklar - n_α

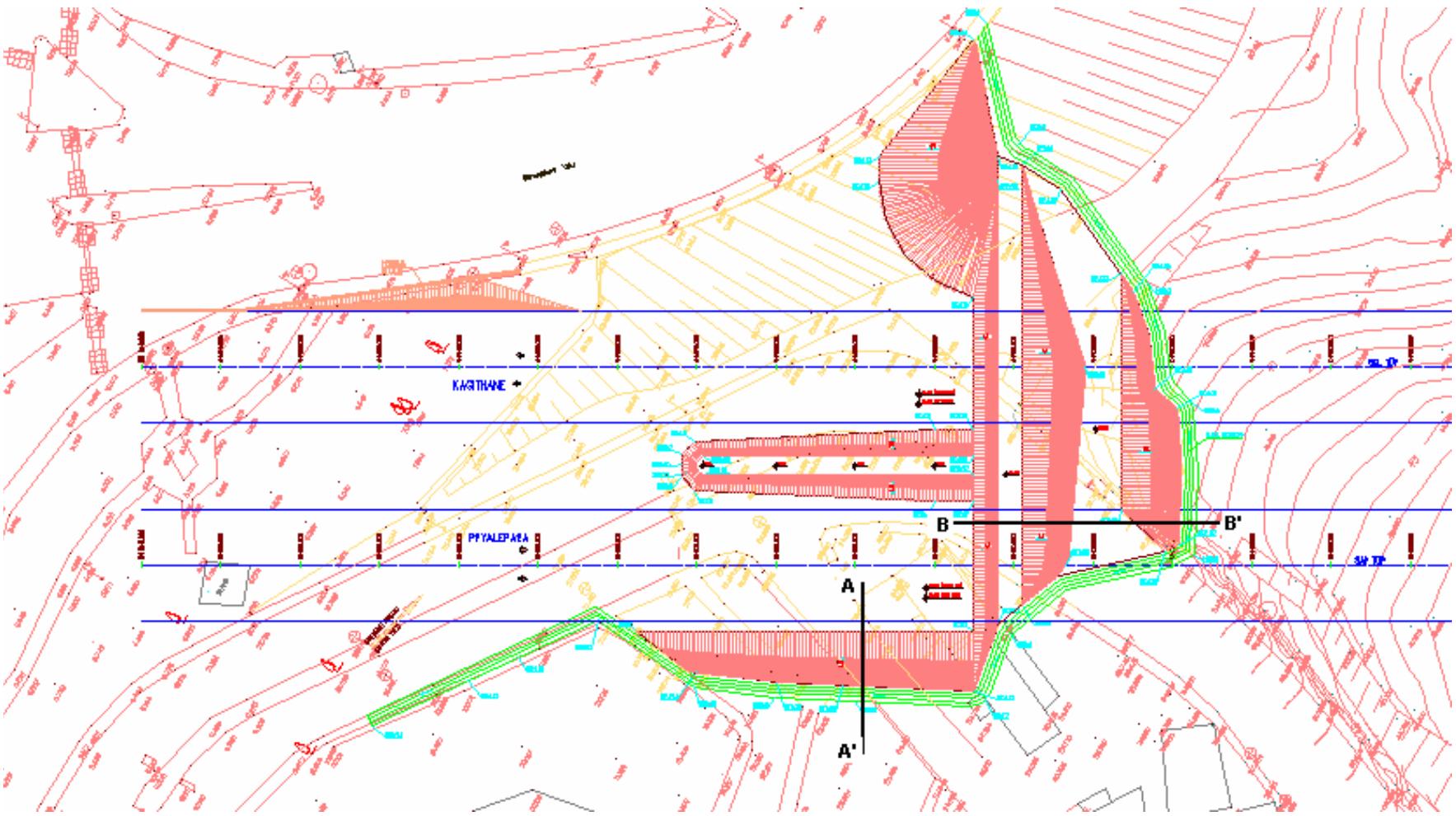
5.2 GeoSlope ile Şev Stabilite Analizi

GeoSlope ya da diğer adıyla Slope/W zemin ve kaya şevleri için güvenlik sayılarının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan bir bilgisayar yazılımıdır. Program ile değişken özellikler gösteren, farklı geometrilerdeki yüzeyler gibi basit ve karmaşık problemler modellenenilmekte, boşluk suyu basıncı etkisi, zemin özellikleri ve çeşitli analiz yöntemleri ile yükleme koşulları belirlenebilmektedir [31].

Limit denge koşulu kullanarak analiz yapan Slope/W heterojen zemin tiplerini, karmaşık stratigrafik durumları dikkate alabilmektedir. Analizler deterministik ve olasılık yöntemlerine göre yapılabildiği gibi limit denge analizlerine ek olarak sonlu elemanlar analizi de ilave edilebilmektedir.

Kağıthane portalı için yapılan GeoSlope analizleri destekleme elemanlarının kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için statik ve dinamik koşullar altında yinelenmiştir. Şev stabilite analizi, tünelin de içerisinde oluşturulduğu şev için (boykesit) ve tünelin yanında kalan kesimde yer alan en yüksek şev için (enkesit) yapılmıştır. Şekil 5.4'de Kağıthane portalı plan görünüşü ve analizlerde kullanılan şevler gösterilmiştir.

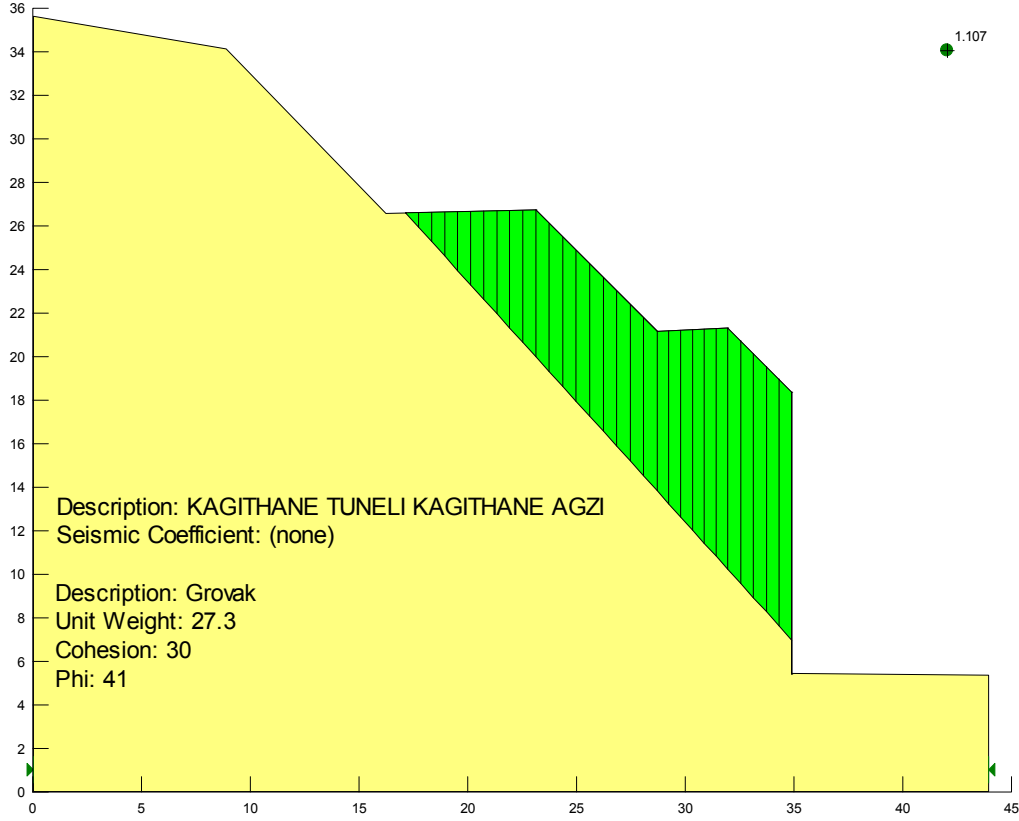
Ayrıca analizlerde kullanılan şevlerin yer aldığı Kağıthane Portalı planı EK-D üzerinde görülebilmektedir.



Şekil 5.4: Kağıthane Portal Planı ve Analizlerde Kullanılan A-A' Enkesiti ile B-B' Boykesiti)

5.2.1 B-B' Boykesiti Desteksiz Olarak Statik ve Depremlı Durum Analizi

Şekil 5.4'de gösterilen planda yer alan ve tünelin de içerisinde yer aldığı B-B' kesitinde yapılan desteksiz-statik durum analizinde elde edilen sonuç Janbu yöntemine göre Şekil 5.5'deki gibidir.



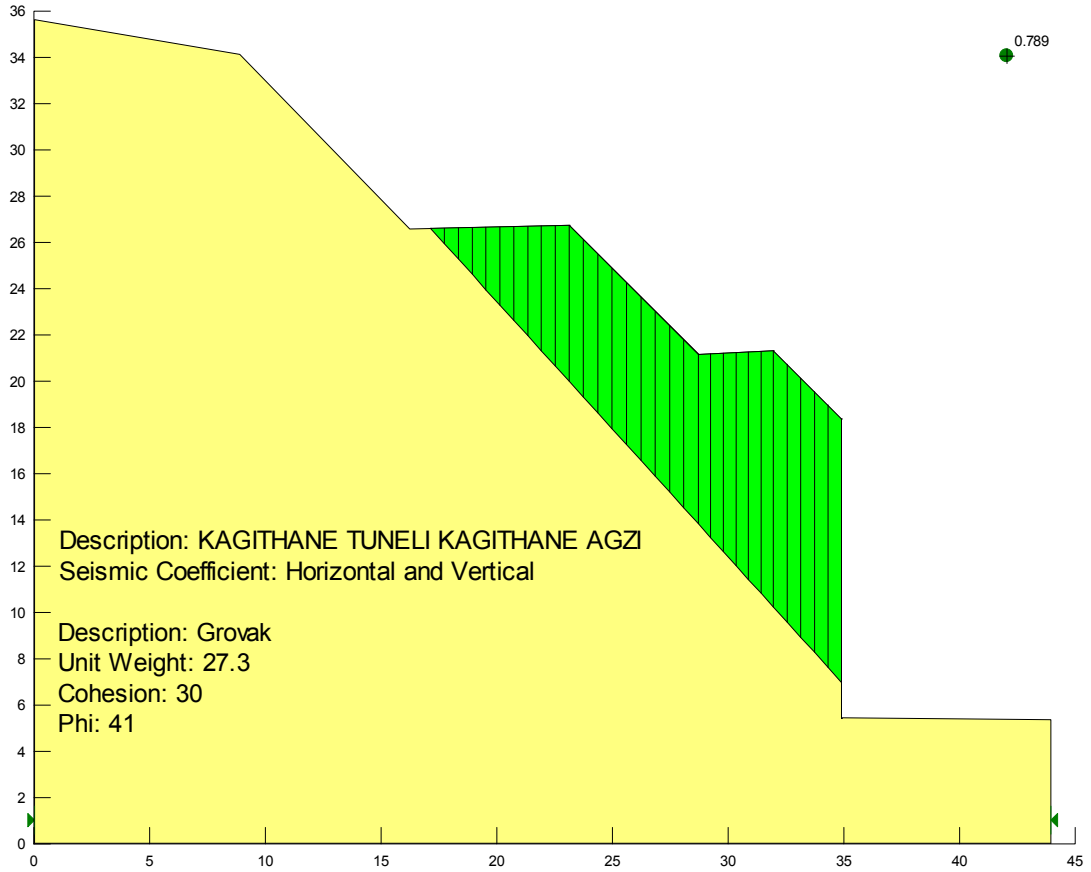
Şekil 5.5: B-B' Kesiti, Desteksiz - Statik Durum İçin GeoSlope Analizi

Yapılan hesaplamalar şevin hiçbir destekleme kullanılmadan stabilitesini statik durumda koruyamadığını ve güvenlik sayısının;

$$G_s = 1.10 < 1.50 \rightarrow \text{Güvensiz Şev}$$

olduğunu göstermiştir. Şekilde görülen yeşil alan şev için olabilecek en kritik kayan kütle göstermektedir.

Destekleme yapılmaması halinde B-B' kesitinin güvenliği depremlı durumda Şekil 5.6'daki gibi bulunmuştur.



Şekil 5.6: B-B' Kesiti, Desteksiz - Depremlı Durum İçin GeoSlope Analizi

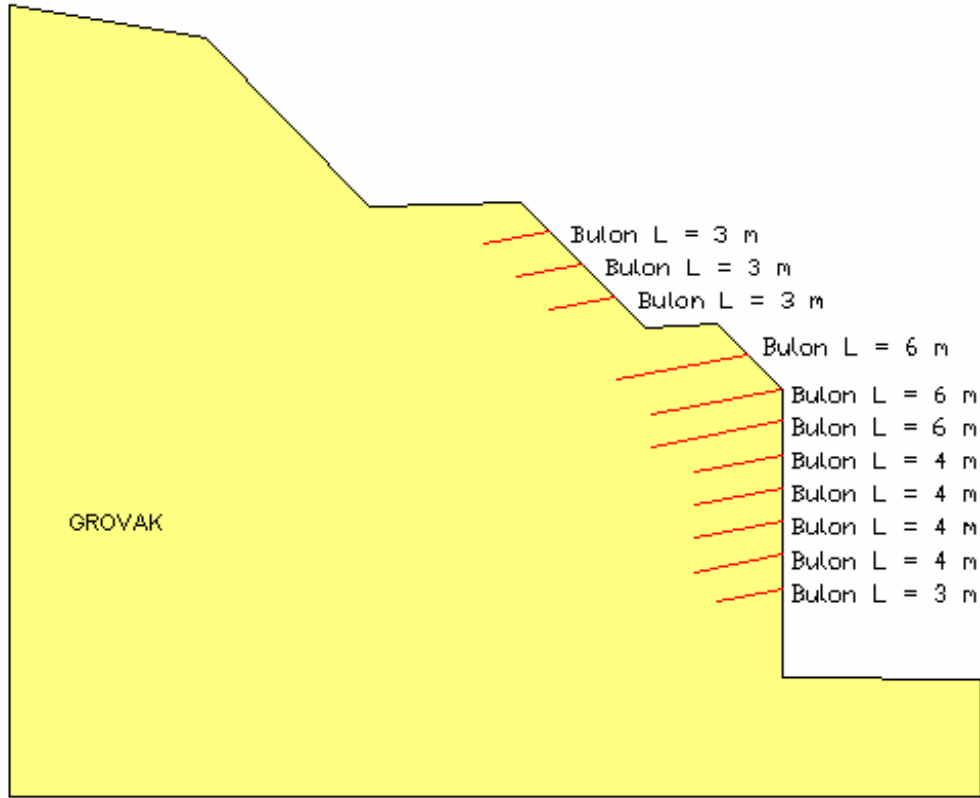
Depremlı durum analizlerinde yatay deprem ivmesi 0,2g ve düşey deprem ivmesi 0,4g olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçta güvenlik sayısının;

$$G_s = 0.79 < 1.10 \rightarrow \text{Güvensiz Şev}$$

olduğunu göstermiştir. Şevin en kritik durumda Şekilde gösterildiği yeşil yüzey boyunca yenileceğini tespit edilmiştir.

5.2.2 B-B' Boykesiti Destekli Olarak Statik ve Depremlı Durum Analizi

Şevde bulonlar ile destekleme yapılması durumunda oluşacak güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Bulon boyları belirlenirken değişik bulon uzunlukları için denemeler yapılmış, istenilen güvenlik sayısı sınırı değerinin üzerine çıkılmaya çalışılmıştır. Buna göre Şevde uzunlukları 3 – 6 metre arasında değişen bulonların kullanılması uygun grlmştir. Şekil 5.7'de Şevde kullanılan bulon paterni gösterilmiştir.



Şekil 5.7: B-B' Kesiti Desteklenmesi İçin Belirlenen Bulon Paterni

Şevde bulonlar ile destekleme yapıldığında statik durumda güvenlik sayısı;

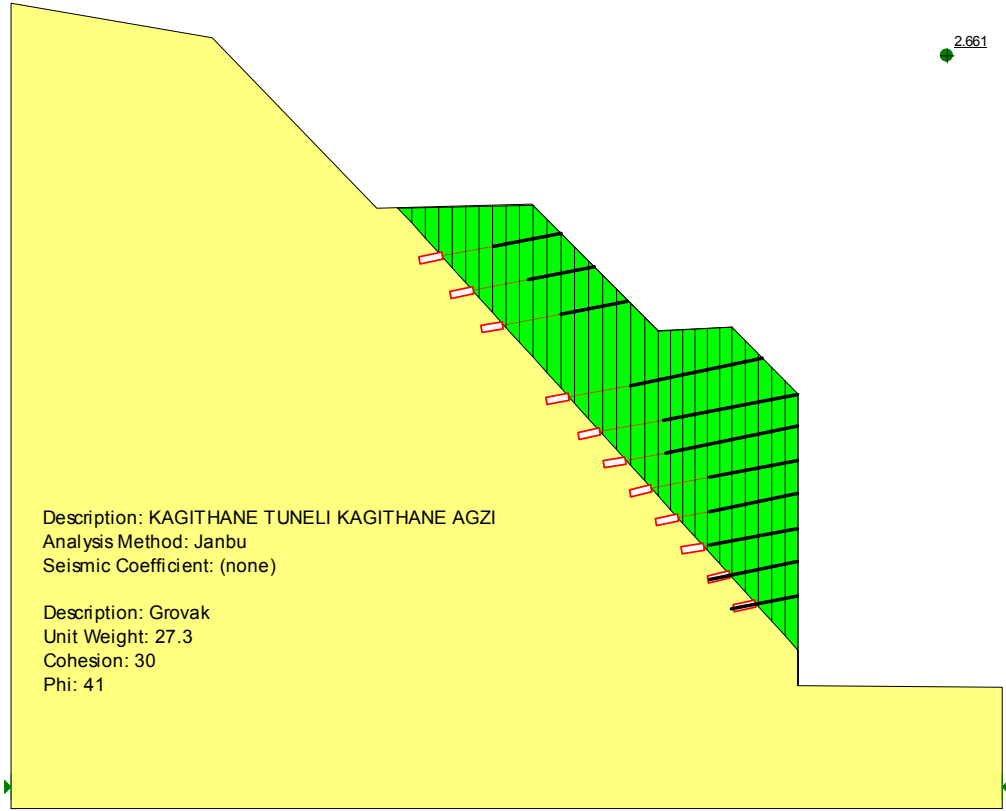
$$G_s = 2.66 > 1.50 \rightarrow \text{Güvenli Şev}$$

olduğu görülmüştür. Bu güvenlik sayısı limit değerlerin üzerinde kaldığı için güvenlik açısından yeterli olmaktadır. Bulonlu durum ile yapılan GeoSlope analizi Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

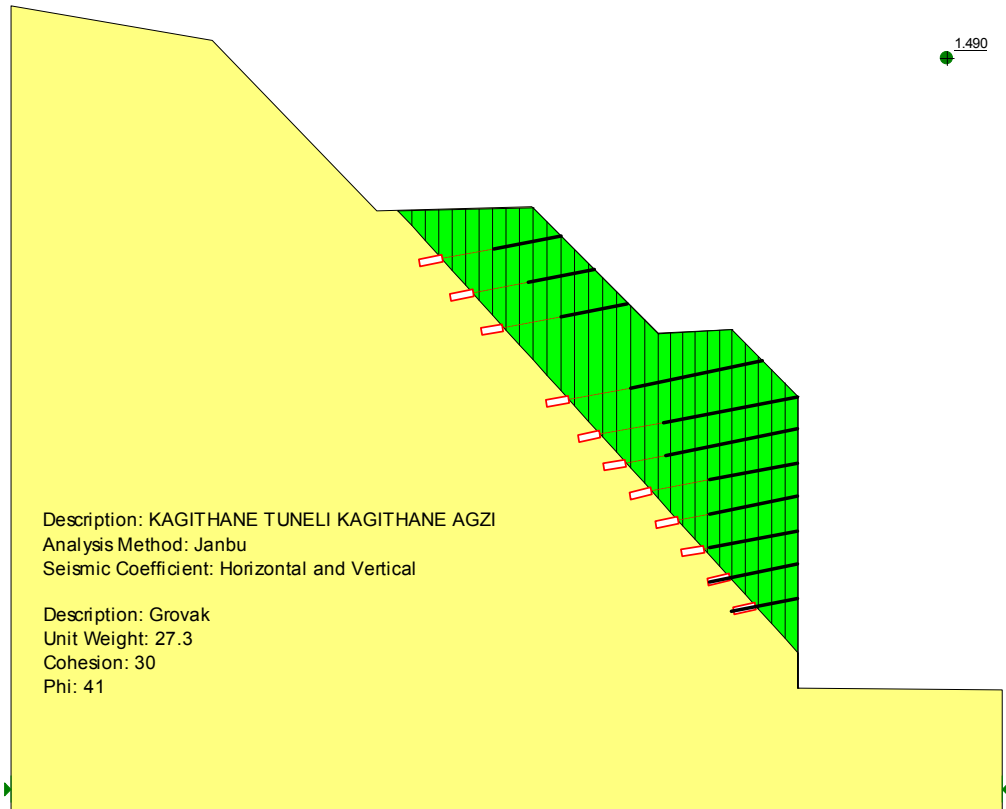
Aynı destekleme elemanlarının kullanıldığı şeve deprem ivmesi verildiğinde güvenlik sayısı;

$$G_s = 1.49 > 1.10 \rightarrow \text{Güvenli Şev}$$

olduğu görülmektedir. Şekil 5.9'da bulon destekli şevde depremlilikte oluşan kama kayması gösterilmiştir.



Şekil 5.8: B-B' Kesiti Bulon Destekli - Statik Durum İçin GeoSlope Analizi



Şekil 5.9: B-B' Kesiti Bulon Destekli - Depremlı Durum İçin GeoSlope Analizi

5.2.3 A-A' Enkesiti Desteksiz Olarak Statik ve Depremlı Durum Analizi

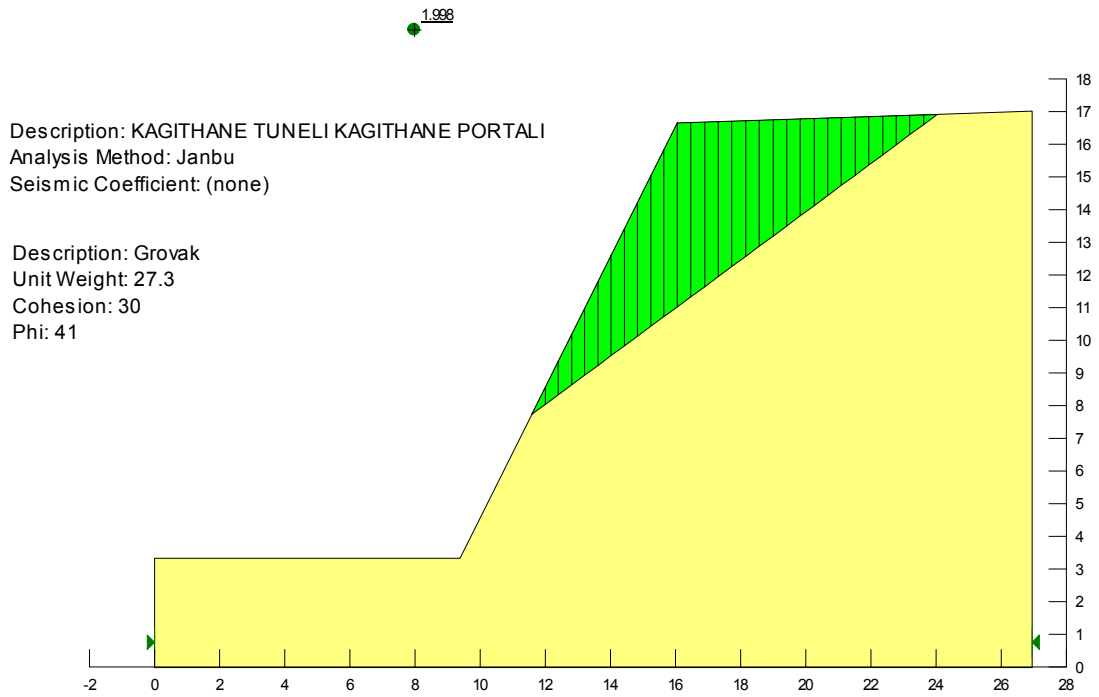
Şekil 5.4'de verilmiş olan planda gösterilen A-A' enkesiti üzerinde herhangi bir destekleme elemanı kullanılmaması halinde, statik ve depremlı durum için GeoSlope'da Janbu yöntemi ile analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçların şevın desteksiz - statik durumda;

$$G_s = 1.99 > 1.50 \rightarrow \text{Güvenli Şev}$$

olduğu; desteksiz - depremlı durumda ise;

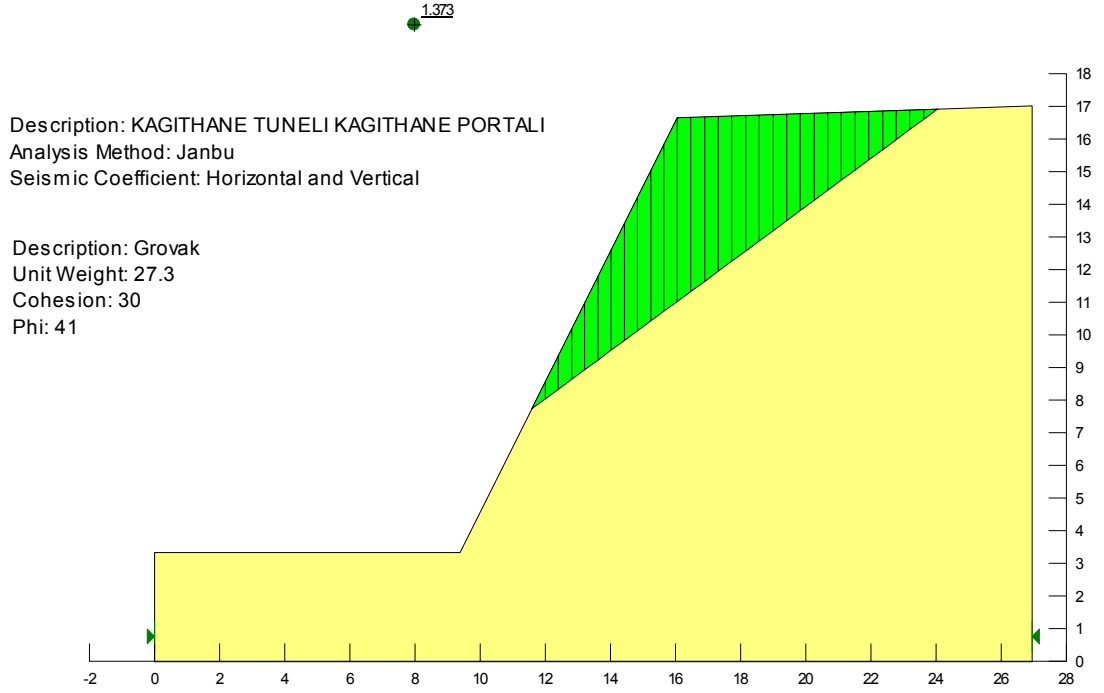
$$G_s = 1.37 > 1.10 \rightarrow \text{Güvenli Şev}$$

olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları desteksiz – statik durum için Şekil 5.10'da ve desteksiz – depremlı durum için Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10: A-A' Kesiti, Desteksiz - Statik Durum İçin GeoSlope Analizi

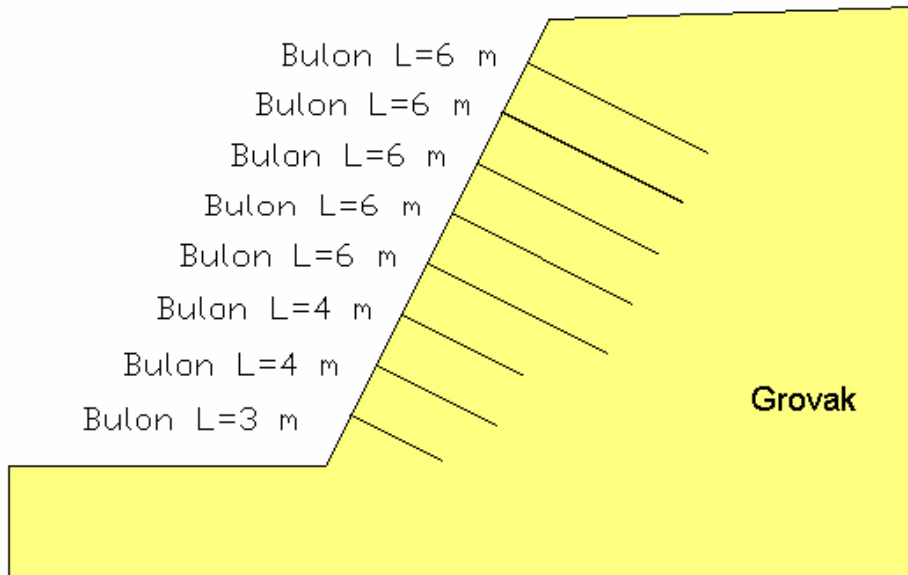
İnşa edilen tünellerde güvenlik her zaman ön planda olduğu için projede müşavirin ve idarenin de görüşleri doğrultusunda destekleme yapılmasına karar verilmiştir. GeoSlope analizleri A-A' enkesiti için destekleme elemanları kullanılarak depremlı durum için tekrarlanmıştır.



Şekil 5.11: A-A' Kesiti, Desteksiz - Depremlı Durum İçin GeoSlope Analizi

5.2.4 A-A' Enkesiti Destekli Olarak Statik ve Depremlı Durum Analizi

Kağıthane portalı A-A' enkesiti üzerine uygulanmasına karar verilen bulon paterni Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12: A-A' Kesiti Desteklenmesi İçin Belirlenen Bulon Paterni

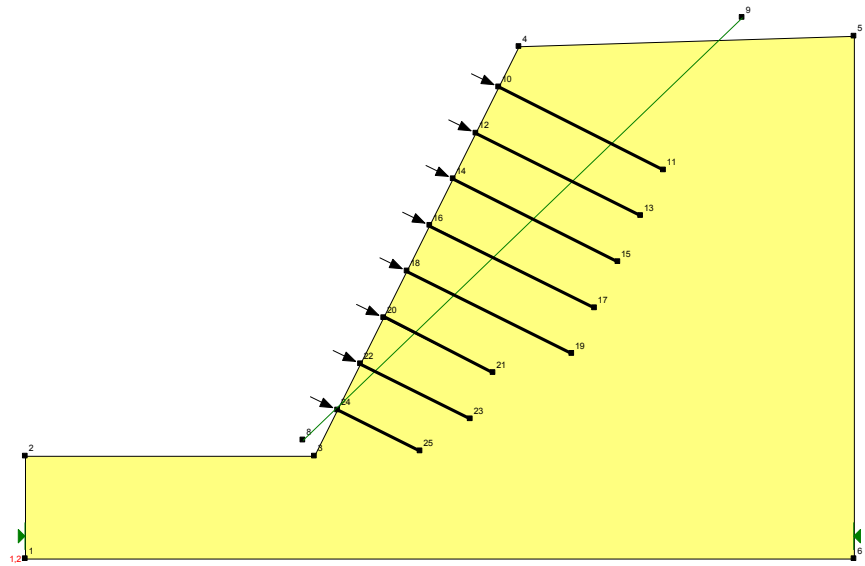
Destekleme olmaması halinde şevlerde yeterli güvenlik sağlanabildiği için, destekleme elemanlarının kullanılması halinde şevde kritik kayma olmamış;

$$G_s = > 1.10 \rightarrow \text{Kritik kayma yok}$$

bu nedenle Güvenlik Sayısı hesaplanamamıştır. Depremlı durumda elde edilen GeoSlope analizi sonucu Şekil 5.13’de gösterilmiştir.

Description: KAGITHANE TUNELI KAGITHANE PORTALI
 Analysis Method: Morgenstern-Price
 Seismic Coefficient: Horizontal and Vertical

Description: Grovak
 Unit Weight: 27.3
 Cohesion: 30
 Phi: 41



Şekil 5.13: A-A’ Kesiti Bulon Destekli - Depremlı Durum İçin GeoSlope Analizi

GeoSlope ile yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar Tablo 5.2’de özetlenmiştir.

Tablo 5.2: GeoSlope Analiz Sonuçları Özeti

Kesit	Destekleme yok		Bulon ile destekli	
	Statik durum	Depremlı durum	Statik durum	Depremlı durum
B-B’ boykesiti	1.10	0.79	2.66	1.49
A-A’ enkesiti	1.99	1.37	Kritik kayma yok	

5.3 Plaxis ile Şev Stabilite Analizi

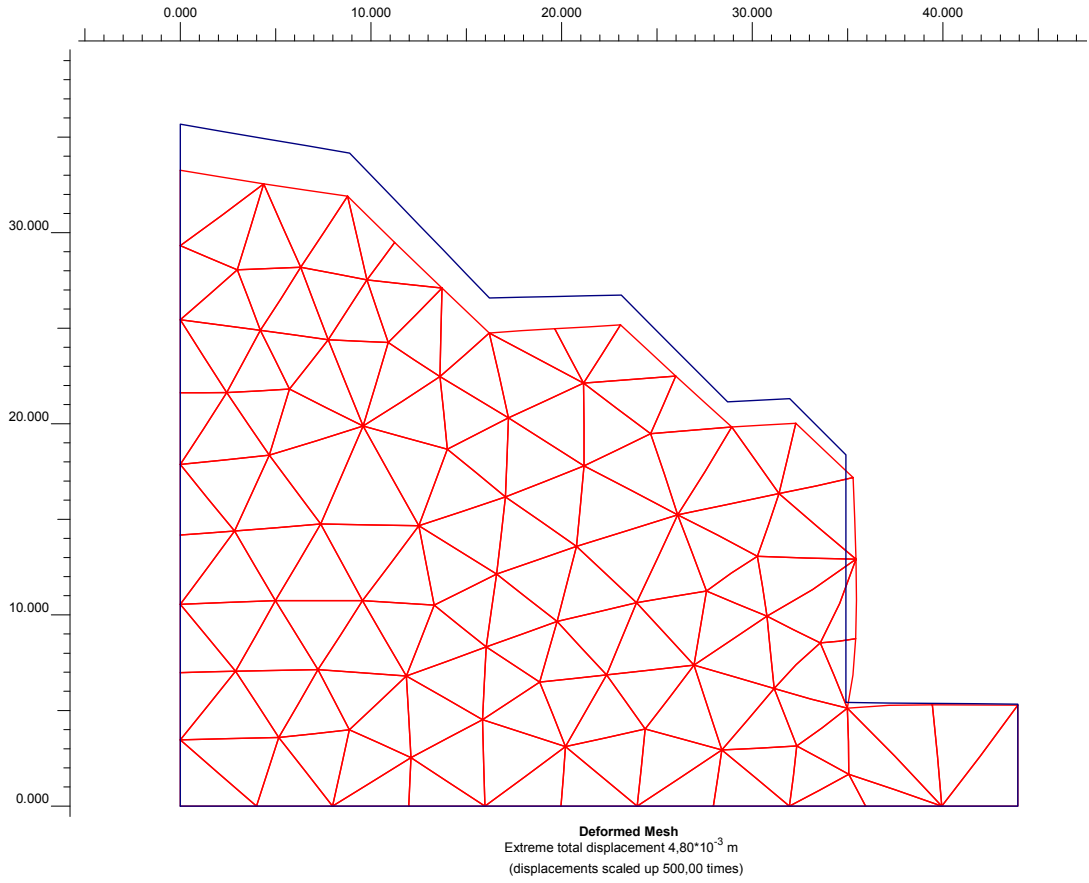
Plaxis Hollanda'da Delft Teknoloji Üniversitesi öğretim üyelerinin çalışmaları ile Plaxis BV adlı şirket tarafından geliştirilmiş olan bir yazılımdır. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme - deplasman analizi yapan yazılım dünyada birçok geoteknik projede başarı ile kullanılmıştır. Birincil gerilme durumu ile yeraltı veya yüzey sularının etkisinin modellenilebildiği ve ortama ait kazı-destekleme aşamaları ayrı ayrı tariflenerek her bir aşama için gerilme - deplasman durumunun yeniden hesaplandığı yazılımda şevler için kritik kayma derinlikleri, deplasmanlar, gerilme dağılımları ve destekleme elemanlarına gelen kuvvetler bulunabilmektedir [32]. Plaxis ile yapılan şev analizlerinde Mohr-Coulomb yenilme modeli kullanılmış ve plastik analiz yapılmıştır.

5.3.1 B-B' Boykesiti Desteksiz ve Statik Durumda Sonlu Elemanlar Analizi

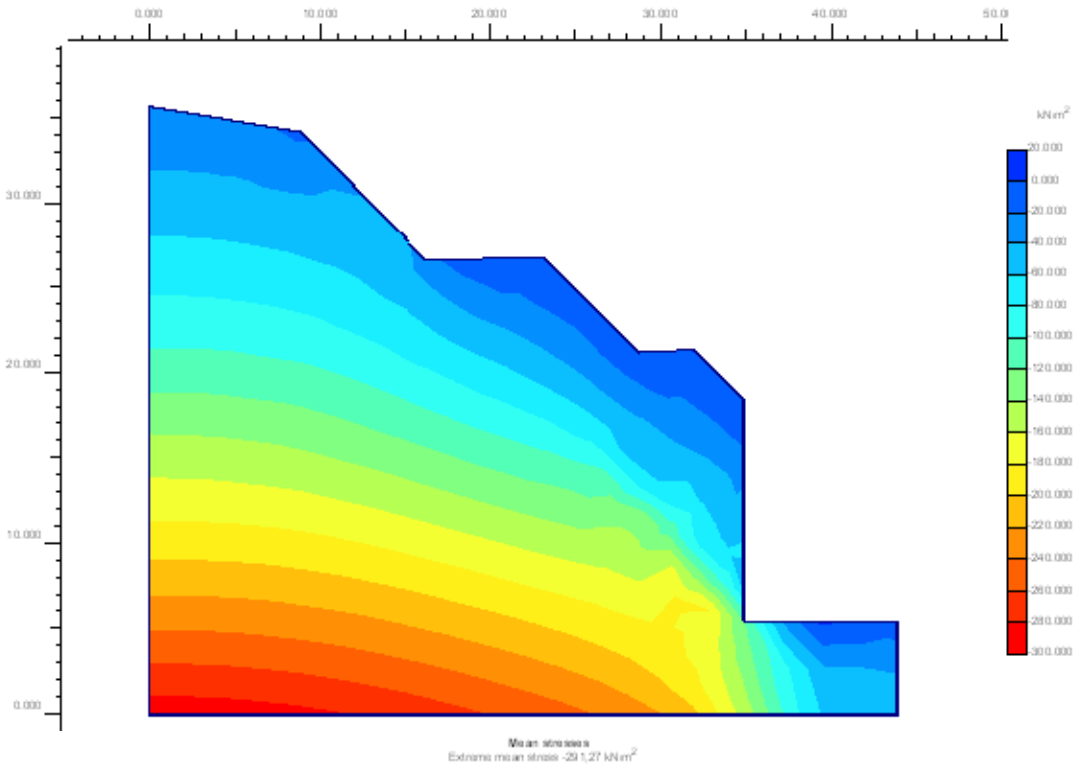
Plaxis'de oluşturulan hesap modeli Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Yapılan analizde herhangi bir destekleme kullanılmaması durumunda şevin yenildiği görülmüştür. Gerilmeler kayanın dayanımını aştığı için hesaplamalar tamamlanamamış, yazılım tarafından “zemin yeniliyor” (soil body collapses) uyarısı verilmiştir. Şekil 5.15'de sistemde oluşan deplasmanlar ve Şekil 5.16'da oluşan gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 5.14: B-B' Kesiti Desteksiz Durum Plaxis Modeli



Şekil 5.15: B-B' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Deplasmanlar

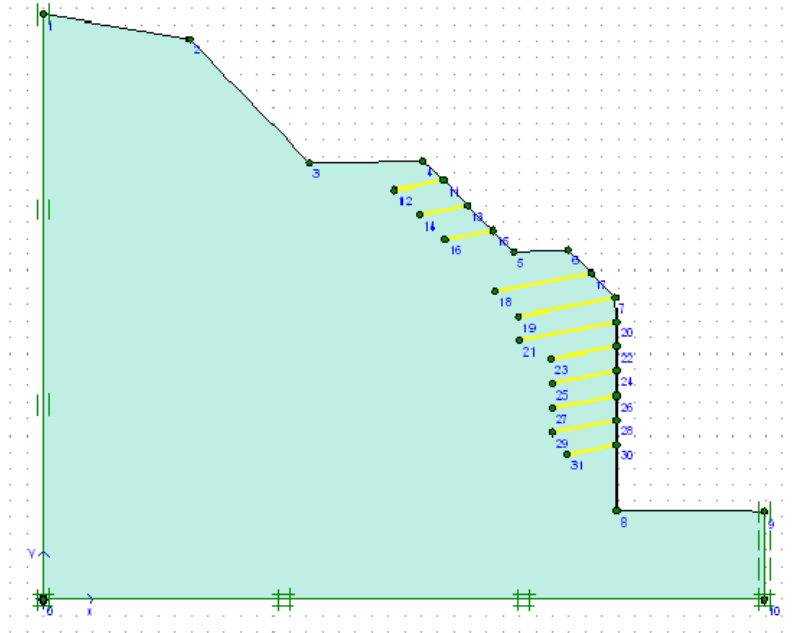


Şekil 5.16: B-B' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Gerilmeler

Şekil 5.16’da gösterilen gerilme dağılımından da görülebileceği gibi, şevde açık mavi ile gösterilen bölüme kadar 60 kPa basınç gerilmesi etki etmektedir. Şevin birinci ve ikinci palyesinde ise -20 kPa büyüklüğünde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Hesaplamalar tamamlanamadığı için şevde güvenlik sayısı bulunamamıştır.

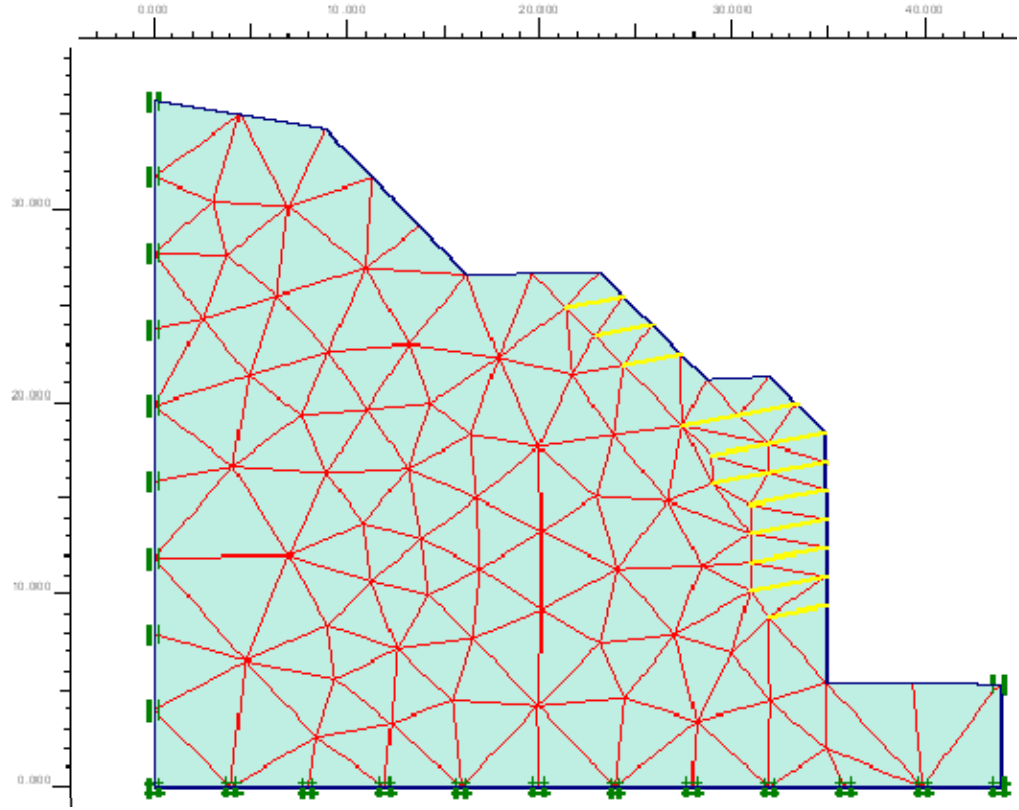
5.3.2 B-B’ Boykesiti Destekli ve Statik Durumda Sonlu Elemanlar Analizi

Belirlenen destekleme elemanlarının kullanılması durumu için oluşturulan Plaxis modeli Şekil 5.17’de ve sonlu elemanlar ağı Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Sistemde oluşan deplasman vektörlerinin yönelimi Şekil 5.19’da ve oluşan gerilmeler Şekil 5.20’de verilmiştir.

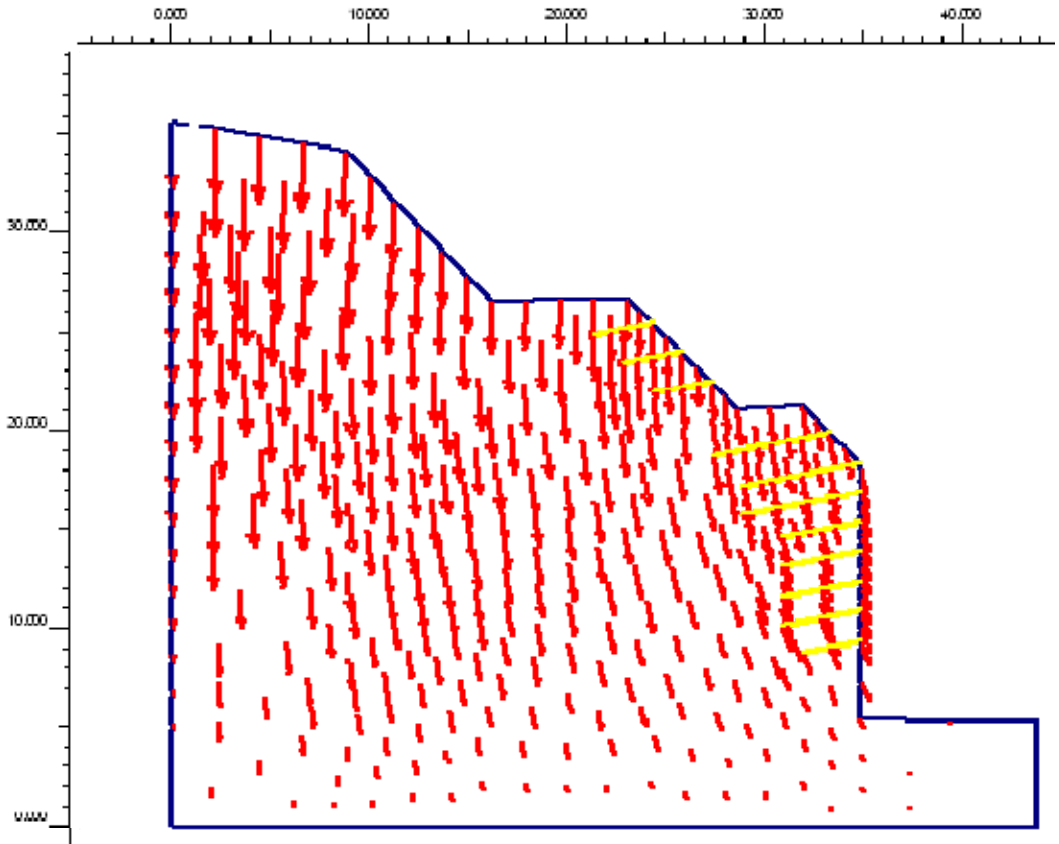


Şekil 5.17: B-B’ Kesiti Bulon Destekli Durum Plaxis Modeli

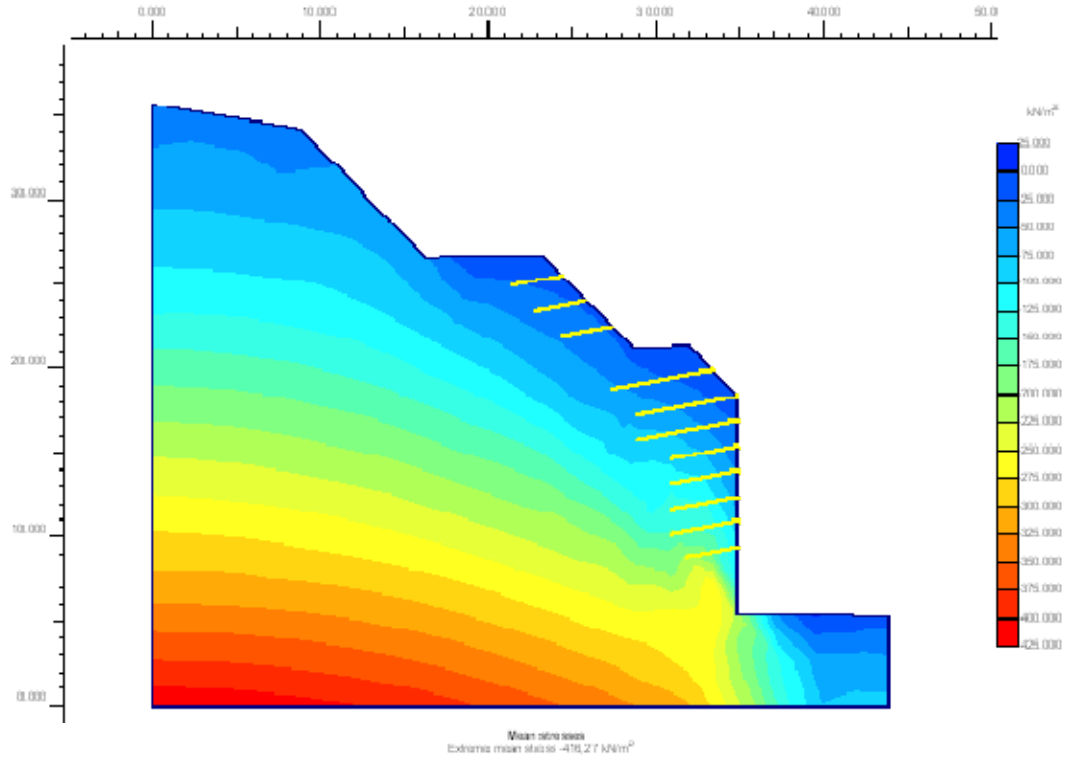
Deplasman-Gerilme sonuçlarından da görülebildiği gibi sistemde destekleme yapılması halinde deplasman vektörleri şev yüzeyine doğru değil, bulonların uyguladığı kuvvetlerin etkisi ile tabana doğru yönelmeye başlamaktadır. Bu ise şev yüzeyinde stabiliteyi sağlamakta, şevde yenilme olmamaktadır. Şevde oluşabilecek en kritik kama kayması Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Sistemde kama kayma düzlemi sınırı sarı-yeşil ve açık mavi renklerle gösterilen alandır. Bulonlar bu sınıra kadar uzandıkları için yeterli güvenlik en olumsuz koşul altında dahi sağlanabilmektedir. Plaxis kritik güvenlik sayısı değeri bulunmamıştır.



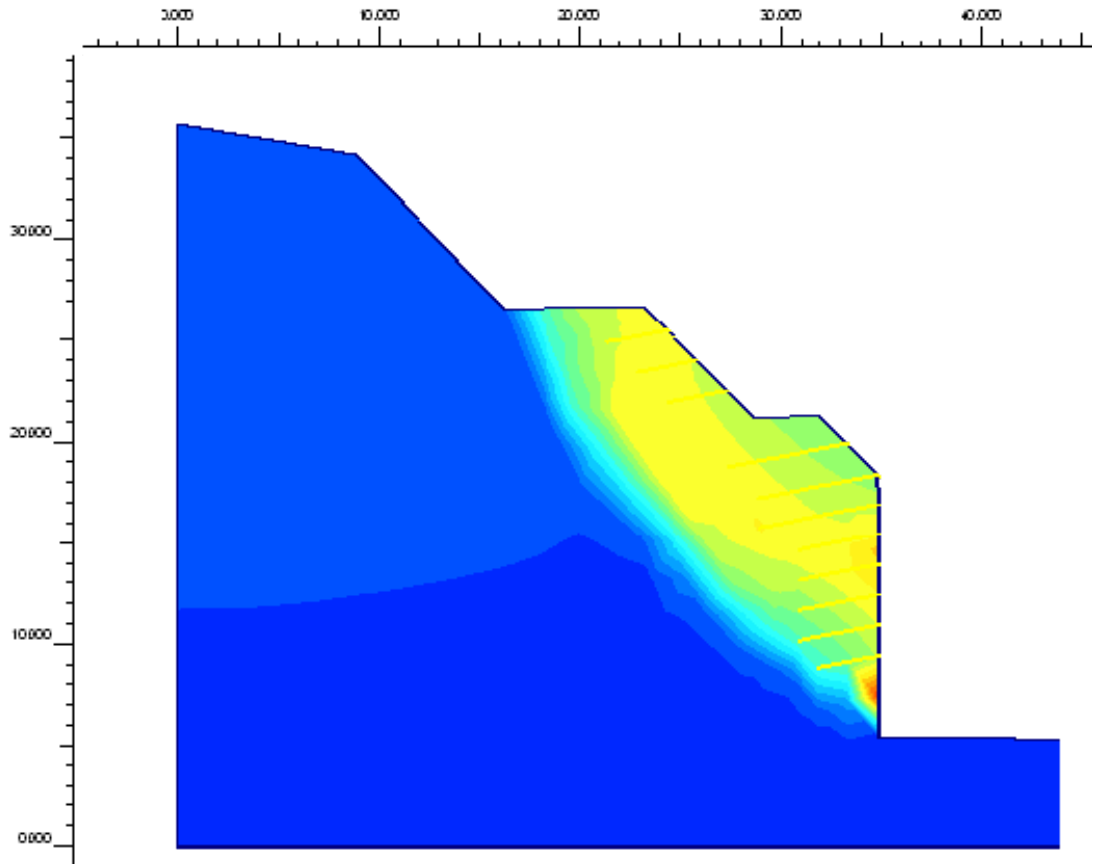
Şekil 5.18: Kesiti Bulon Destekli Durum Plaxis Modeli - Sonlu Elemanlar Ağı



Şekil 5.19: B-B' Kesiti Bulon Destekli Durum Deplasman Vektörlerinin Yönelimi



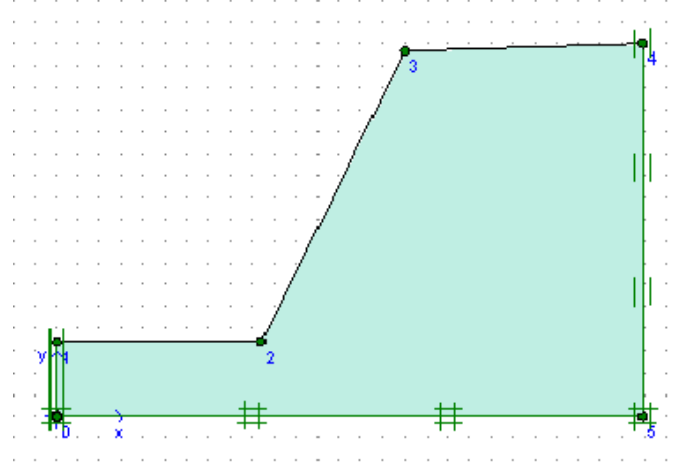
Şekil 5.20: B-B' Kesiti Bulon Destekli Durum Oluşan Gerilmeler



Şekil 5.21: B-B' Kesiti Bulon Destekli Durum En Kritik Kama Kayması Sınırı

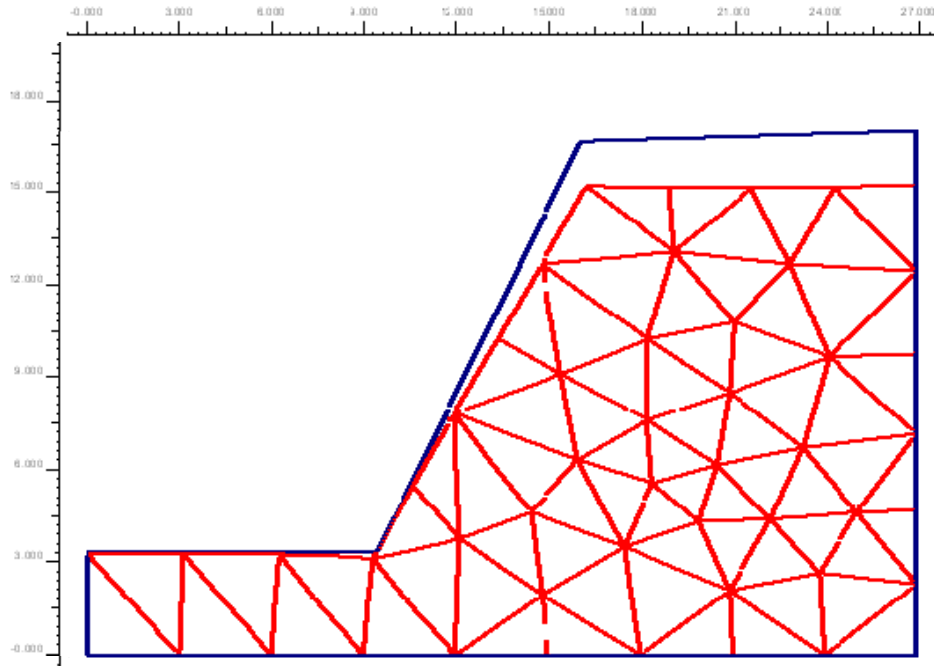
5.3.3 A-A' Enkesiti Desteksiz ve Statik Durumda Sonlu Elemanlar Analizi

A-A' enkesiti için yapılan GeoSlope analizleri sistemin statik ve depremlı durumda herhangi bir destekleme elemanı kullanılmaması durumunda stabilitesini koruyabildiğini göstermiştir. Plaxis ile bu analizler yinelenmiş ve durum yeniden değerlendirilmiştir. Şekil 5.22'de Plaxis'de oluşturulan model gösterilmiştir.

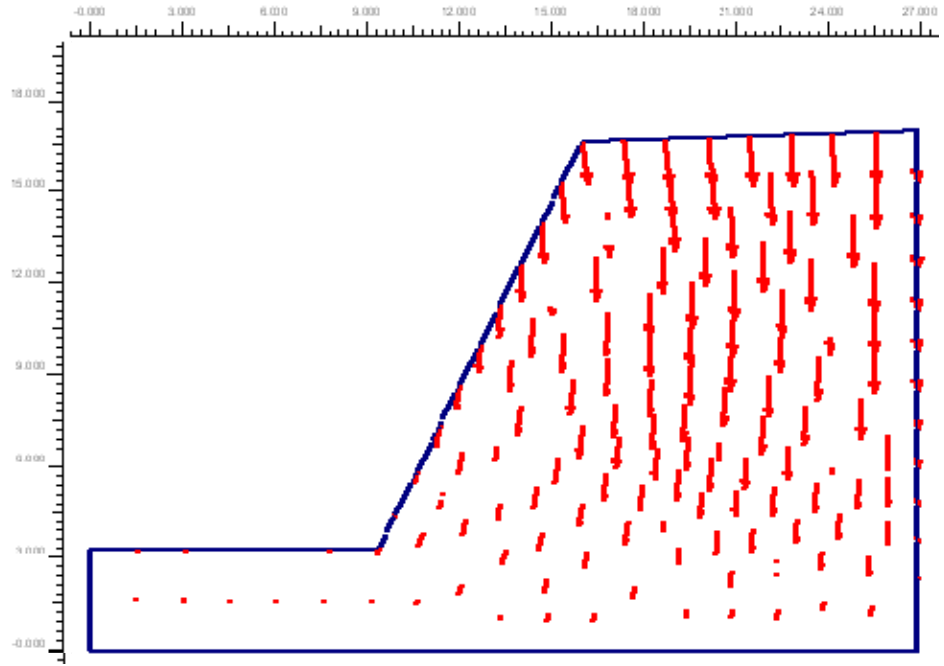


Şekil 5.22: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Plaxis Modeli

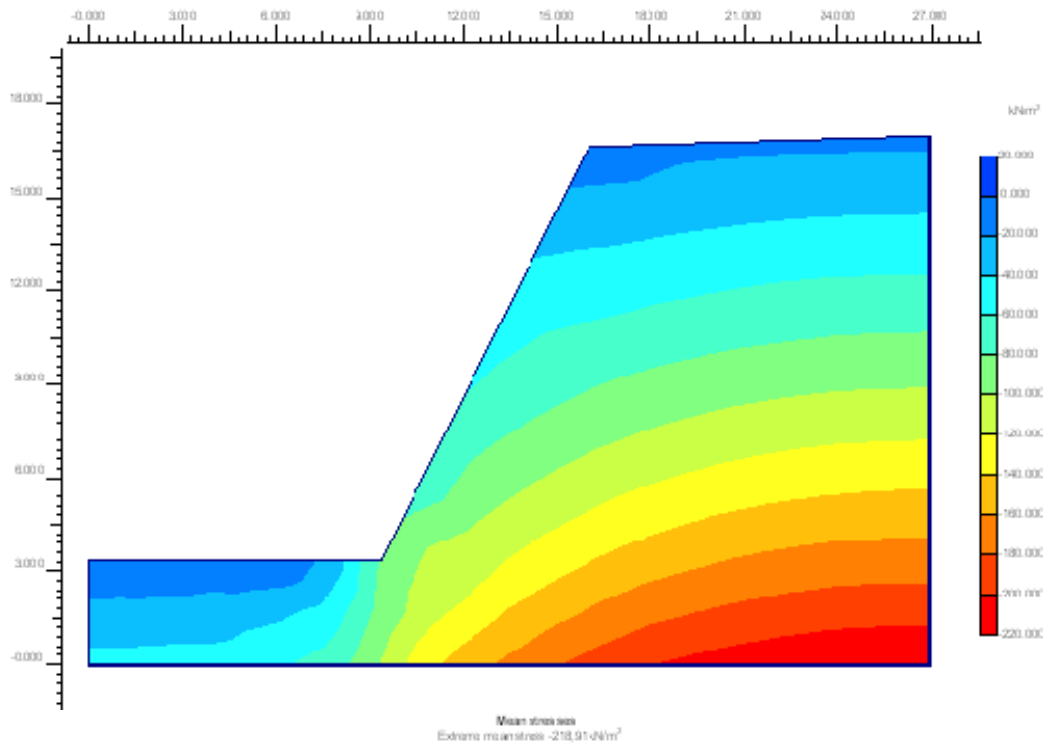
Yapılan hesaplamalar deplasmanların durmadığını, sistemin gerilmeler altında yenildiğini göstermiştir. Şekiller 5.23'de sistemde oluşan deplasmanlar, 5.24'de deplasman vektörlerinin yönelimi ve 5.25'de oluşan gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 5.23: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Deplasmanlar

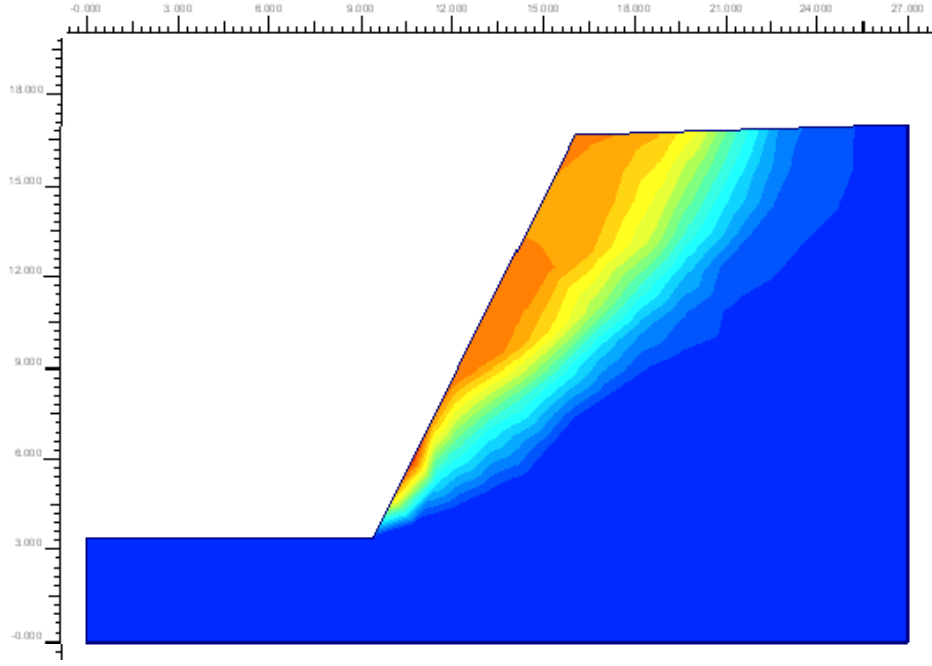


Şekil 5.24: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Deplasman Vektörleri Yönelimi



Şekil 5.25: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan Gerilmeler

Şev yüzeyinde etkili olan maksimum gerilme, şekilde de görüldüğü gibi yeşil ile tanımlanmış alandır. Bu kesimde gerilmeler 80-100 kPa mertebesine çıkmaktadır. Sistemde oluşan kritik kama kayma düzlemi ise Şekil 5.26'daki gibidir:

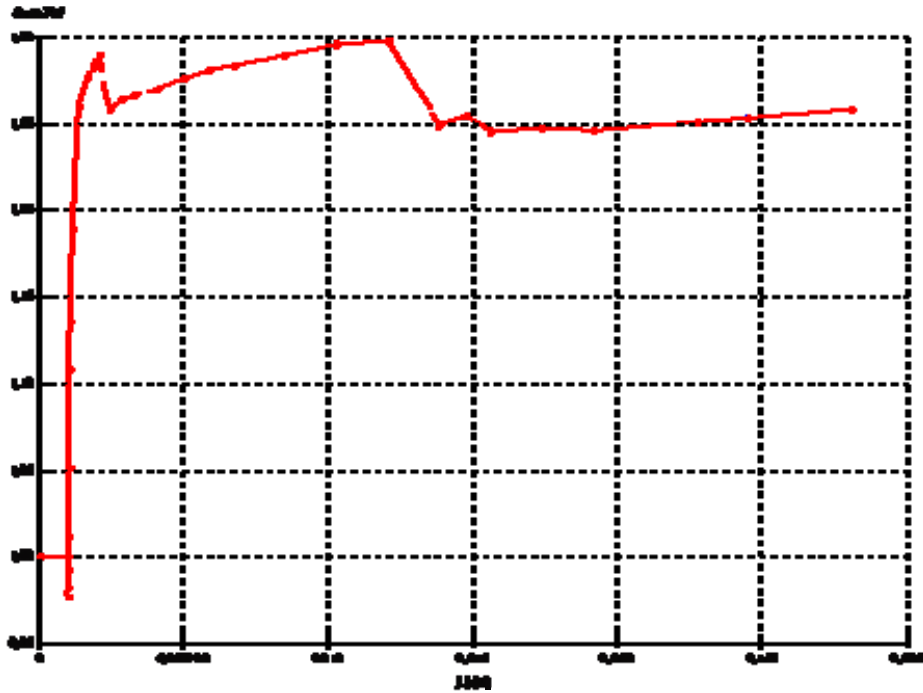


Şekil 5.26: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Oluşan En Kritik Kama Kayması Yüzeyi

A-A' kesiti için statik - desteksiz duruda Plaxis'in hesapladığı güvenlik sayısı;

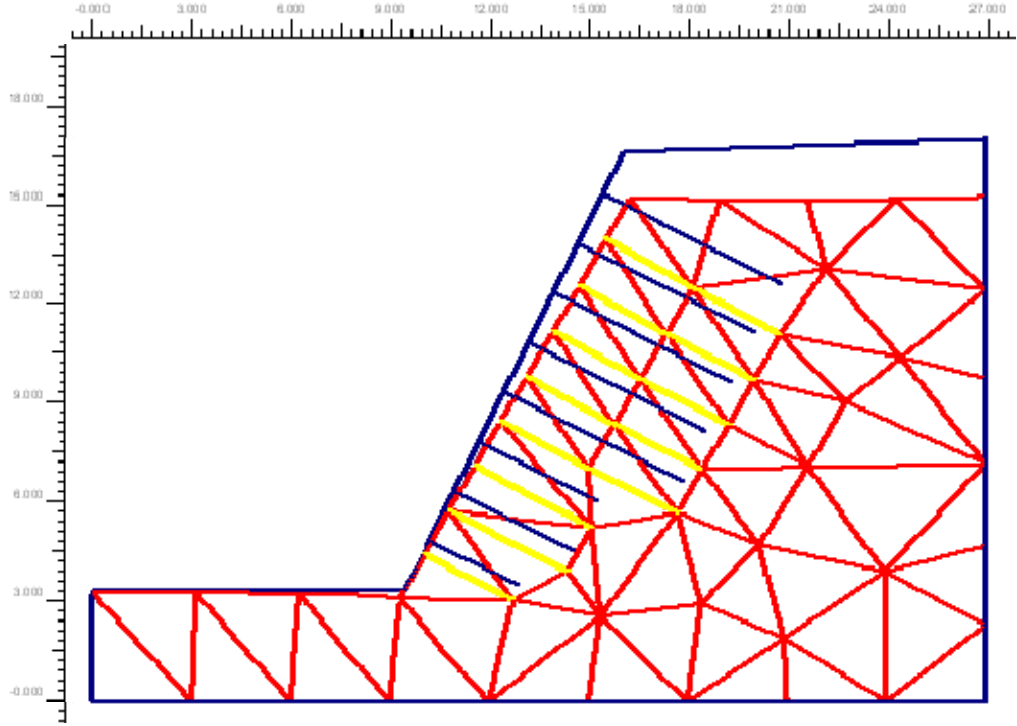
$$G_s = 1.24 < 1.50 \rightarrow \text{Güvensiz Şev}$$

olduğu için şevde desteklemenin yapılması gerekli görülmüştür. Şekil 5.27'de hesaplanmış olan Güvenlik Sayısı grafiği gösterilmiştir.

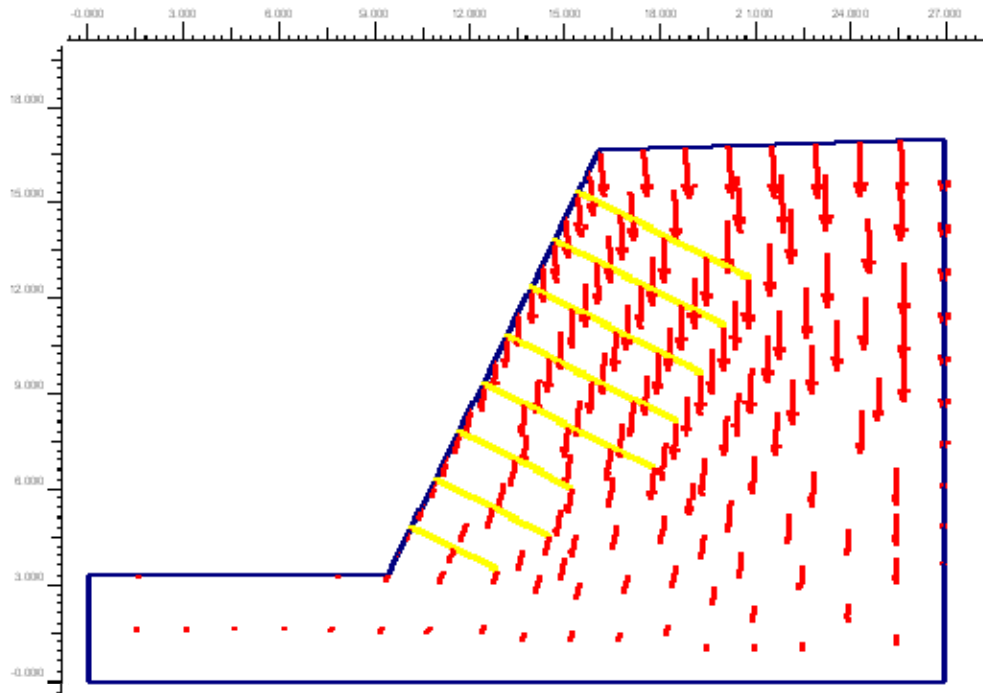


Şekil 5.27: A-A' Kesiti Desteksiz Durum Güvenlik Sayısı Grafiği

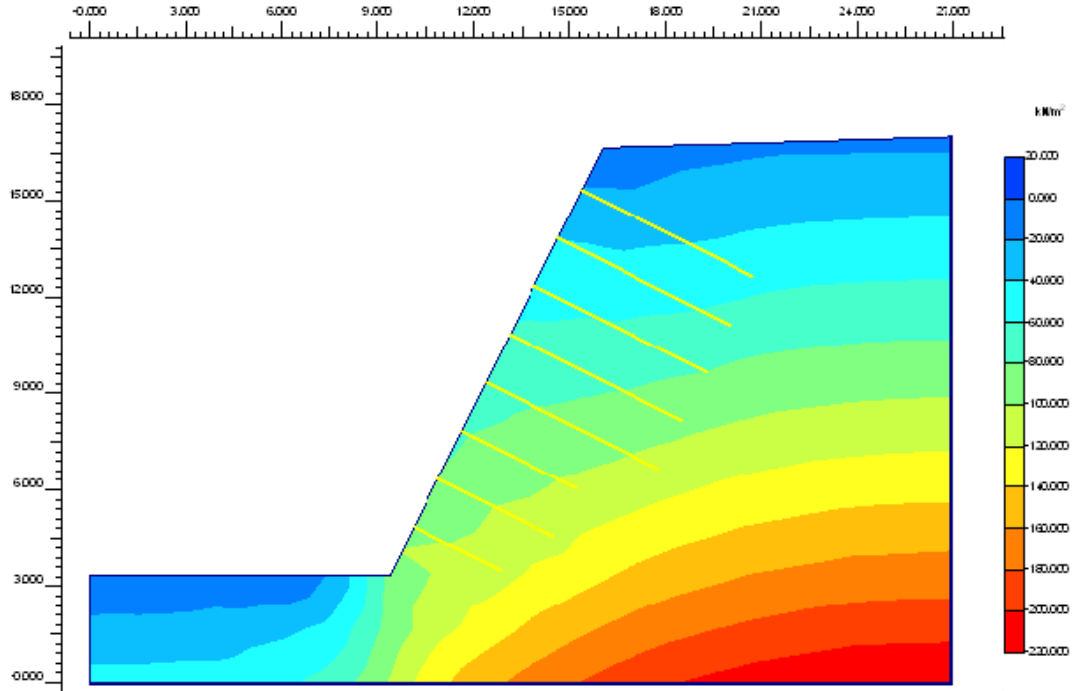
Hesaplamaların tamamlanmasının ardından sistemde oluşan deplasmanlar Şekil 5.30'da, deplasman vektörlerinin yönelimi Şekil 5.31'de ve oluşan gerilmeler Şekil 5.32'de gösterilmiştir.



Şekil 5.30: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Deplasmanlar



Şekil 5.31: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Oluşan Deplasman Vektörlerinin Yönelimi



Şekil 5.32: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Oluşan Gerilmeler

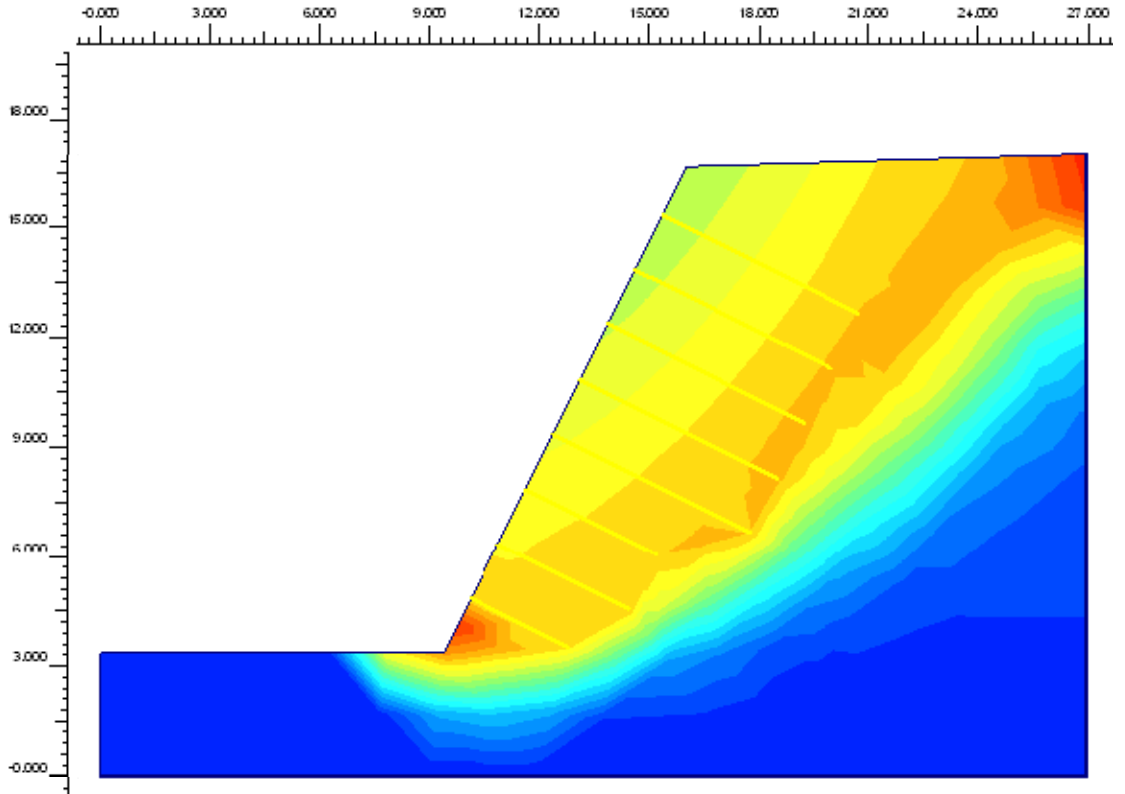
Sistemde oluşan en kritik kama kayma yüzeyi aşağıdaki Şekil 5.33'de sarı-turuncu ile gösterilen kısımdır. Bulon uzunlukları bu derinliğe kadar indiği için sistemde istenilen güvenlik değeri elde edilebilmiştir. Hesaplanan güvenlik sayısı desteklemenin yapılmasının ardından;

$$G_s = 2.06 > 1.50 \rightarrow \text{Güvenli Şev}$$

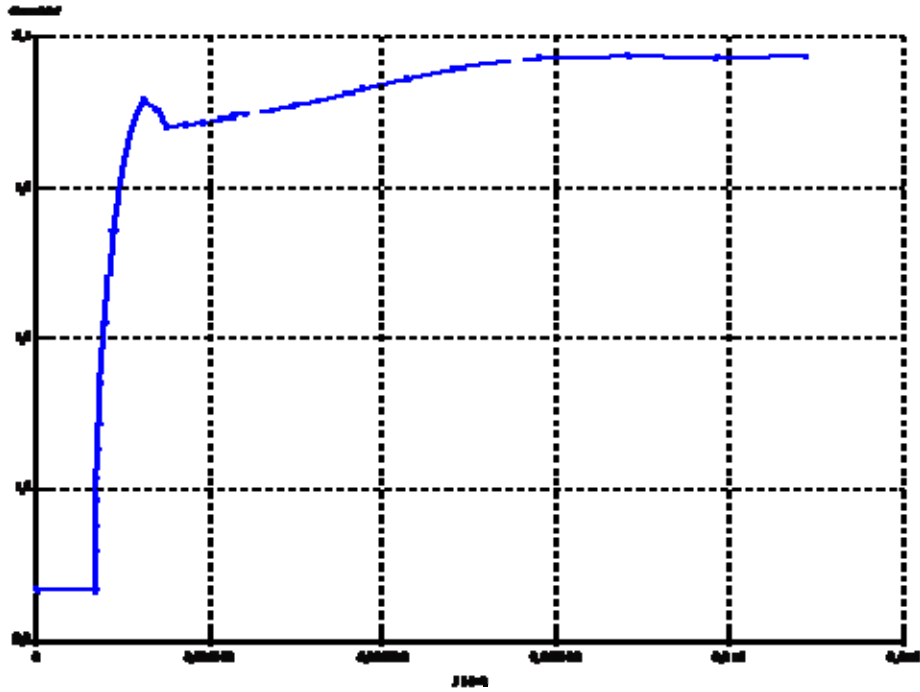
olduğu görülmüştür. Şekil 5.34'de hesaplanmış olan Güvenlik Sayısı grafiği gösterilmiştir. Tablo 5.3'de Plaxis ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Tablo 5.3: Plaxis Analiz Sonuçları Özeti

Kesit	Destekleme yok	Bulon ile destekli
	Statik durum	Statik durum
B-B' boykesiti	Şev yenildi – göçük oldu	Sistem güvenli, büyük güvenlik sayısı, deplasmanlar mm mertebesinde, gerilmeler kaya dayanımını aşmıyor
A-A' enkesiti	$G_s = 1.24 < 1.50$ şevde istenilen güvenlik sağlanamadı	$G_s = 2.06 > 1.50$ sistem güvenli



Şekil 5.33: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Oluşan En Kritik Kama Kayması Yüzeyi



Şekil 5.34: A-A' Kesiti Bulon Destekli Durum Güvenlik Sayısı Grafiği

5.4 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

GeoSlope ve Plaxis ile yapılan şev stabilite analizleri mühendislik projelerinin çözümlerinin çok seçenekli olduğunu, daha kullanışlı ve uygun seçeneğin belirlenmesine yönelik tasarım ve boyutlandırma kararlarını alırken; ortamın ikincil zorlanmalara, gerilmeler ve deformasyonlar açısından nasıl karşı koyabileceğinin bilinmesinin zorunluluğunu göstermiştir.

Bundan önceki bölümlerde açıklandığı gibi ortamlar:

- Hiçbir önlem alınmaksızın karşılayabilir,
- Ancak sağlamlaştırma ve destekleme önlemlerinin alınması halinde karşılayabilir,
- Ön sağlamlaştırma ve/veya iyileştirme olmaksızın karşılayamaz

olma durumlarına göre değerlendirilmektedir [30]. Nümerik analizler yapılmadan önce gerçekleştirilen ayrıntılı topoğrafik, jeolojik, mühendislik jeolojisi, jeomekanik ve geoteknik modellemeler, nümerik analizler sonrasında elde edilen verilerin değerlendirilmesinde temel oluşturmaktadır.

Kağıthane portalı için yapılan ayrıntılı çalışmalar, nümerik analiz sonuçlarını oldukları gibi kabul etmememiz gerektiğini göstermiştir. Bu analizler öncesinde yapılan çalışmalar kullanılarak analiz sonuçları yorumlandığında çok daha gerçekçi tasarımlar yapılabilmektedir. Nitekim GeoSlope ile yapılan analiz sonucuna güvenli olarak görülen bir ortam, Plaxis ile güvensiz olarak değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle yapım sırasında herhangi bir problemle karşılaşılması için planlama ve projelendirme çalışmaları sırasında amaç ve hedeflerin belirlenmesinden sonra ortam ve koşullar ayrıntılı olarak tanımlanmalı ve ayrıntılı olarak çalışılan alandan veri üretilmelidir. Sağlanan bu veriler projeyi yapana yapım sırasında karşılaşılabilecek sorunlar hakkında bilgi verecektir. Eldeki olanaklar, birikimler, koşullar ve beklentiler bir arada değerlendirilerek proje için en uygun önlem, işlem, yöntem ve yönetim şekilleri tariflenmelidir. Araştırma aşamasında yapılan geoteknik ölçüm ve gözlemlerle yapılan proje, yapım aşamasında ve işletim aşamasında yapılan ölçümlerle desteklendiğinde hedef olan “risksizlik” kanıtlanmış olacaktır.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Tünel yaklaşım kazıları sırasında oluşturulan portal şevlerinin planlama ve projelendirme yöntemlerinin ilke ve temellerinin açıklanması ve güncel bir uygulama olan İstanbul Kağıthane - Piyalepaşa tünellerinde, Kağıthane portal kazıları üzerinde uygulanması amacıyla gerçekleştirilen tez çalışması, geoteknik mühendisliği ile kaya yapıları mühendisliği projelerinin planlamasında ve hazırlanmasında izlenmesi gereken yöntemin ne kadar titizlikle yürütülmesi gerektiğini göstermiştir.

Kaya şevleri gibi yerüstü kaya yapılarının projelendirilmeleri sırasında uygulanacak olan jeolojik, mühendislik jeolojisi ve jeomekanik çalışmalarından sağlanan veriler bir arada değerlendirilerek oluşturulacak geoteknik modelin doğruluğu; teknik girişimin ömrünü, ekonomisini, yapım süresini, yapım kolaylığını ve güvenliğini etkilemektedir. Yapılan tüm bu araştırmalar neticesinde kazı, drenaj, sağlamlaştırma, iyileştirme ve destekleme konularında yeterince seçenek oluşturulmuş; önlem, işlem ve yöntemler karşılaştırmalı olarak belirlenmiş ise bir projede teknik yapının ikincil durum aşamasına ait hesap ve değerlendirmeler yapılabilir. Ancak bu şekilde titiz ve güvenilir çalışmalara dayandırılan plan ve projeler, yine yeterli özen ve denetim altında uygulandığı takdirde çok özel haller dışında sorun doğurmamaktadır.

- Mühendislik projelerinin çözümlerinin çok seçenekli oluşu, daha kullanışlı ve uygun seçeneğin belirlenmesine yönelik tasarım ve boyutlandırma kararlarını alırken; ortamın ikincil zorlanmalara, gerilmeler ve deformasyonlar açısından nasıl karşı koyabileceğinin bilinmesini gerektirir. Bu nedenle ortamların;

“Hiçbir önlem alınmaksızın karşılayabilir”,

“Ancak sağlamlaştırma ve destekleme önlemlerinin alınması halinde karşılayabilir” veya

“Ön sağlamlaştırma ve/veya iyileştirme olmaksızın karşılayamaz”

olma durumlarına göre hareket etmek, seçeneklerin değerlendirilmesinde en belirleyici etmendir.

- Kağıthane portali kazısı sırasında oluşturulan şevlerin bu seçeneklerden hangisi ile projelendirilmesi gerektiğinin anlaşılması için saha çalışmaları ve ofis çalışmaları olmak üzere iki farklı alanda kapsamlı araştırma yapılmıştır.

- Kağıthane Portali İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından inşa ettirilen Kağıthane - Piyalepaşa tünelinin Haliç tarafında yer almaktadır. Çift tüplü Karayolu tüneli olarak inşa edilen tünelde sağ tüp (1+744.563) gidiş, sol tüp (1+730.756) geliş yönü olmak üzere toplam tünel uzunluğu 3475.3 m'dir.

- Tüneller Kağıthane ilçesinden başlayarak Piyalepaşa Feriköy spor tesislerinde son bulmaktadır. Tüneller, İstanbul geneline bakıldığında, en yoğun yerleşim yerlerinden olan Kağıthane İlçesi ve Şişli Okmeydanı mevkiinin altından geçmektedirler. Tünellerin Kağıthane portali Örnektepe Mevkii'nde Kağıthane Viyadüğünün 250 m güneybatısında Çamlık Sokak'ta bulunmaktadır.

- Kağıthane Tüneli güzergahı boyunca jeoloji çalışmaları için toplam 26 lokasyon saptanmıştır. Projedeki numaralandırmaya göre; Lokasyon 10-11-12-13 ve 14 Kağıthane Giriş Portali bölgesinde yer almaktadır. Kağıthane Viyadüğü'nün sağ omzunda yer alan yol yarmalarında yeşilimsi gri renkli silttaşı birimi gözlenmiştir. Örnektepe Spor tesisleri civarında yapılan incelemeler burada masif, altere rengi yeşilimsi-kahverengi, grovak birimlerinin bulunduğunu göstermiştir. Kağıthane portal sahası içinde ise kahve renkli kumtaşı-silttaşı ardalanması gözlenmektedir. Kasımpaşa yolunun sağ yol yarmasında çok altere olmuş, yeşilimsi kahve renkli, grovak birimi bulunmaktadır.

- Kağıthane Tüneli giriş portali civarında iki sondaj kuyusu açılması uygun görülmüş, bunlar projeye uygun olarak SK-8 ve SK-9 numaraları ile adlandırılmıştır. SK-8 Örnektepe Spor tesislerinin yanında, sağ tüp ekseninde Km 0+307'de, SK-9 sol tüpün 16.00 m kuzeyinde Km 0+177'de açılmıştır.

- Mekanik sondajlardan sağlanan karot örnekleri üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik deneyler sonrasında taş örneklerine ait jeomekanik büyüklükler bulunmuştur. Bilindiği gibi polilit olarak adlandırılan çok parçalı, çatlaklı ortamlar

monolit (tek, çatlaksız kayaç) ortamlara göre daha düşük direnç gösterir ve kolayca şekil değiştirerek plastikleşebilir. Bunun nedeni, bir gerilme durumunda kayaya aktarılan kuvvetlerin süreksizliklerden ötürü farklı noktalarda farklı büyüklüklere ulaşmasıdır. Parçadan parçaya kuvvet aktarımları sırasında pürüzlü çatlak yüzeylerinde gerilme yığılmaları oluşur. İkincil etmenler arasında ise süreksizlik yüzeylerinin geçmişteki oluşumları sırasında geçirdikleri örselenmeler ve buna bağlı olarak gelişen ayrışma olayları gösterilebilir.

- Süreksizliklere yakın kesimlerde yer alan parçacık, iç kesimlere göre önceden daha fazla zorlanmış ve örselenmiştir. Parçacık küçüldükçe bu zayıf kesimlerin hacim içerisindeki payı artar, sonuçta çok parçalılık arttıkça kayanın dayanım parametreleri laboratuvarında incelenen taş örneklerinde bulunan değerlere kıyasla çok belirgin azalmalar gösterir. Bu nedenle laboratuvar örnekleri RocLab adlı yazılım yardımı ile arazi kaya dayanım büyüklüklerine indirgenmiştir. RocLab ile hesaplanan yerinde kaya dayanımları Tablo 4.6’da verilmiştir. Bu veriler ortalamaları alınarak sayısal analizlerde kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan büyüklükler Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

- GeoSlope ve Plaxis ile yapılan şev stabilite analizleri mühendislik projelerinin çözümlerinin çok seçenekli olduğunu, daha kullanışlı ve uygun seçeneğin belirlenmesine yönelik tasarım ve boyutlandırma kararlarını alırken; ortamın ikincil zorlanmalara, gerilmeler ve deformasyonlar açısından nasıl karşı koyabileceğinin bilinmesinin zorunluluğunu göstermiştir.

- GeoSlope ile yapılan analiz sonucuna güvenli olarak görülen bir ortam, Plaxis ile güvensiz olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle yapım sırasında herhangi bir problemle karşılaşılması için planlama ve projelendirme çalışmaları sırasında amaç ve hedeflerin belirlenmesinden sonra ortam ve koşullar ayrıntılı olarak tanımlanmalı ve ayrıntılı olarak çalışılan alandan veri üretilmelidir. Sağlanan bu veriler projeyi yapana yapım sırasında karşılaşılabilecek sorunlar hakkında bilgi verecektir. Eldeki olanaklar, birikimler, koşullar ve beklentiler bir arada değerlendirilerek proje için en uygun önlem, işlem, yöntem ile yönetim şekilleri tariflenmelidir. Araştırma aşamasında yapılan geoteknik ölçüm ve gözlemlerle oluşturulan proje, yapım aşamasında ve işletim aşamasında yapılan ölçümlerle

desteklendiğinde hedef olan “risksizlik” kanıtlanmış olacaktır. Bu değerlendirme ile Kağıthane portali şevleri boyutlandırılmış ve şevlerde belirlenen bulon destekleme paterni ile istenilen güvenlik sınırına erişilebileceği görülmüştür.

Sonuç olarak; bu tez çalışması kaya şevlerinin tasarımı ve projelendirilmesi için izlenecek olan yolun seçilmesinde önemli bir kaynak niteliğindedir. Benzer bir çalışmanın zemin şevleri için de yapılması, şev stabilitesi için planlama ve projelendirme eksikliğini giderecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Erguvanlı, K.**, 1995. Mühendislik Jeolojisi, s. 150-219, Seç Yayınevi, İstanbul.
- [2] **Vardar, M.**, 1987. Heyelanların Önceden Kestirilmesi. Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni 9, s. 25-28.
- [3] **Wyllie, D.C. and Mah, C.W.**, 2006. Rock Slope Engineering Civil and Mining, pp. 4-21, pp. 153-175, Spon Pres, New York.
- [4] **Teknik Rapor**, 2007. Salihli Ayrımı - Alaşehir - Buldan (Aydın - Denizli) Ayrımı Yolu Km 22+140 - 80+320 Etüd, Proje Mühendislik Hizmetleri. EMAY Uluslararası Müh. Müş. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- [5] **Vardar, M.**, 1987. Kaya Şevlerinin Hesaplanmasında Başlıca Yöntemler. *Dayanma Yapıları Semineri*, Samsun, Cilt I.
- [6] **Vardar, M. ve Yüzer, E.**, 1986. Kaya Mekaniği, s.106-128, İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı Kitap Yayınları No 11, İstanbul.
- [7] **Arioğlu, E. ve Tokgöz, N.**, 2005. Çözümlü Problemlerle Şev Stabilite Analizi, s. 128-184, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- [8] **Fellenius, W.**, 1939. Erdstatische Berechnungen, Ernst und Sohn, Berlin.
- [9] **Browicka, H.**, 1959, Ober die Sicherheit im Grundbau. Mitl. Inst. Für Grundbau u. Bodenmechanik, H. 2, TH-Wien.
- [10] **Talobre, J.**, 1957. La Mécanique des Roches. Dunod, Paris. (Çev. Tanrıverdi İ. (1970), "Kaya Mekaniği ve İnşaat İşlerinde Tatbikatı", Mars Matbaası).
- [11] **Müller, L.**, 1963. Felsbau. Band I, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- [12] **Jennings, J.E., Robertson, A. and Mac, G.**, 1969. The Stability of Slopes Cut into Natural Rock. *In Prac. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 2*, Mexico, pp. 585-590.

- [13] **John, K.W.**, 1968. Graphical Stability Analysis of Slopes in Jointed Rock. Journal Soil Mech. and Foundation Div., ASCE, 94, No. SM2, pp.497-526.
- [14] **Hoek, E., Bray, J.W.**, 1976. Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [15] **Zanbak, C.**,1973. Kaya Şev Stabilitesi ve Stereografik İzdüşüm Yöntemi ile Stabilité Analizi. Madencilik, Cilt XII, S. 3, Mayıs.
- [16] **Vardar, M.**, 1977. Zeiteinfluss auf das Bruchverhalten des Gebirges in der Umgebung von Tunneln, *Fakultät für Bauingenieur und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe (TH)*, pp.1-26
- [17] **Vardar, M.**, 2005. Time Dependent Stability Problems in Tunnels and Time-Dependent Behavior of the Rock Mass, *ITA / AITES Training Course Tunnel Engineering*, İstanbul, pp.12-13
- [18] **Vardar, M.**, 1987. Kaya Şevlerinin Projelendirme Esasları. *Dayanma Yapıları Semineri*, Samsun, Cilt II.
- [19] **Teknik Rapor**, 2006. Dolmabahçe – Dolapdere – Piyalepaşa - Kağıthane Tünelleri İnşaatı, Piyalepaşa - Kağıthane Tüneli Giriş Portalı Portal Kazısı ve Şev Destekleme Jeoteknik Raporu. EMAY Uluslararası Müh. Müş. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- [20] **Türkiye Deprem Haritası**, 1997. 16 July 2006
<http://www.sayisalgrafik.com.tr/deprem/tr_frames.htm>
- [21] **Google Earth**, 2006. Google Earth Ver. 4.2. 28 June 2006
<<http://earth.google.com/index.html>>
- [22] **Teknik Rapor**, 2006. Kağıthane - Piyalepaşa Tüneli Mühendislik Jeolojisi Değerlendirme Raporu. EMAY Uluslararası Müh. Müş. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- [23] **Karagöz, S.D.**, 2007. Kağıthane Piyalepaşa Tünelleri Mühendislik Jeolojisi Çalışması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [24] **Teknik Rapor**, 2006. Kağıthane - Piyelepaşa Tüneli Güzergahında Yapılan Araştırma Sondajlarından Alınan Örneklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Raporu. İTÜ Maden Fakültesi Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, İstanbul.
- [25] **Koçak, B.**, 2006. Yer altı Kaya Yapılarının Denetimi ve Yönlendirilmesinde Uzaman Sistem Oluşturulması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] **Hoek, E.**, 1991. Müller Lecture, When is a design in rock engineering acceptable?, *Proceedings of The 7th International Congress on Rock Mechanics*, Aachen, Germany, September, pp. 1-20.
- [27] **User's Guide**, 2002. RocLab User's Guide, Rocscience Inc., 16 July 2006 <<http://www.rocscience.com/downloads/Downloads.asp#freeware>>
- [28] **Teknik Şartname**, 2005. Araştırma Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesi. Karayolları Genel Müdürlüğü, TADB, Ankara, s. 74-76.
- [29] **Hoek, E. and Londe P.**, 1974. The Design of Rock Slopes and Foundations, *General Report for Third Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Denver, USA, September, pp. 37-49.
- [30] **Vardar, M.**, 1994. Metro Tünellerinde Duraylılığın Korunması ve Sağlanması, Sağlama - Destekleme - İyileştirme, *T.M.M.O.B. Maden Mühendisleri Odası Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu*, İstanbul, Aralık 1-3, s. 41-51.
- [31] **User's Guide**, 2002. Slope/W Ver. 5, Geo-Slope International Ltd., Calgary, Alberta, Canada (EMAY Ltd. Şti. lisanslı).
- [32] **User's Guide**, 1998. Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses Ver. 7, Plaxis B.V., A. A. Balkema, Rotterdam (EMAY Ltd. Şti. lisanslı).

EK-A



Şekil A.1: SK-8 – Sandık No: 5



Şekil A.2: SK-8 – Sandık No: 6



Şekil A.3: SK-8 – Sandık No: 7



Şekil A.4: SK-8 – Sandık No: 8



Şekil A.5: SK-8 – Sandık No: 9



Şekil A.6: SK-8 – Sandık No: 10



Şekil A.7: SK-8 – Sandık No: 11



Şekil A.8: SK-8 – Sandık No: 12



Şekil A.9: SK-8 – Sandık No: 13



Şekil A.10: SK-8 – Sandık No: 14



Şekil A.11: SK-8 – Sandık No: 15



Şekil A.12: SK-9 – Sandık No: 1



Şekil A.13: SK-9 – Sandık No: 2



Şekil A.14: SK-9 – Sandık No: 3



Şekil A.15: SK-9 – Sandık No: 4



Şekil A.16: SK-9 – Sandık No: 5



Şekil A.17: SK-9 – Sandık No: 6

EK-B**Tablo B.1:** Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik(m)	Basınç Direnci (kg/cm ²)	Elastisite modülü (kg/cm ²)	Litoloji
SK-8	36.0-38.5	449*	60954	Silttaşı
		690	12852	Silttaşı
		578	87007	Silttaşı
		218*	60383	Silttaşı
		523	68120	Silttaşı
	45.0-47.0	356	70574	Silttaşı
		337	80817	Silttaşı
		138*	55650	Silttaşı
		305	64496	Silttaşı
		80*	83048	Silttaşı
	53.6-55.8	449	62409	Silttaşı
		449	43275	Silttaşı
		536	69072	Silttaşı
		613	95939	Silttaşı
		401	92944	Silttaşı
	63.0-68.0	99*	58419	Silttaşı
		514	74855	Silttaşı
		103*	91042	Silttaşı
518		71187	Silttaşı	
SK-9	7.5-10.5	128*	45695	Silttaşı
	17.0-21.5	169*	25954	Silttaşı
		236*	43403	Silttaşı
		336*	41011	Kumtaşı
		325*	65139	Kumtaşı
	27.0-32.0	257*	80352	Silttaşı

*: Kırılma tabakalaşma düzlemi, çatlak veya fissür boyunca oluşmuştur.

Tablo B.2: Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik(m)	Boy(cm)	Çap(cm)	σ_3 (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	Litoloji
SK-8	36.00-38.50	6.55	3	10	807	Silttaşı
		6.5	3	20	821	Silttaşı
		6.55	3	30	934	Silttaşı
		6.5	3	40	1019	Silttaşı
		6.55	3	50	1132	Silttaşı
	45.00-47.10	6.55	3	10	835	Silttaşı
		6.6	3	20	1005	Silttaşı
		5.65	3	30	750	Silttaşı
		6.65	3	40	1118	Silttaşı
		6.6	3	50	1189	Silttaşı
	53.60-55.80	6.45	3	10	686	Silttaşı
		6.1	3	20	800	Silttaşı
		6.5	3	30	870	Silttaşı
		6.4	3	40	1040	Silttaşı
		6.55	3	50	1069	Silttaşı
	63.00-68.00	5.2	3	10	708	Silttaşı
		6.38	3	20	1040	Silttaşı
		6.55	3	30	616	Silttaşı

Tablo B.3: Nokta Yükleme Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik (m)	Nokta yükleme indeksi (kg/cm ²)	Düzeltilmiş nokta yükleme indeksi (kg/cm ²)	Litoloji
SK 8	45.0-47.1	13,4	52,7	Silttaşı
		47,9	52,7	Silttaşı
		47,9	52,7	Silttaşı
	53.6-55.8	35,3	38,8	Silttaşı
		49,1	54	Silttaşı
		63	69,3	Silttaşı
	63.0-68.0	68	74,8	Silttaşı
		60,5	66,5	Silttaşı
		68	74,8	Silttaşı
SK 9	7.5-10.5	50,4	55,4	Silttaşı
	17.0-21.5	34,4	37,8	Silttaşı
		88,2	97	Kumtaşı
		35,3	38,8	Kumtaşı
		37	40,7	Silttaşı
		5,3	5,8	Kiltaşı
	27.0-32.0	5,3	5,8	Kumtaşı

Tablo B.4: Endirek Çekme Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Derinlik(m)	Endirekt Çekme Direnci (kg/cm ²)	Litoloji
SK 8	23.5-28.0	27	Kumtaşı
	36.0-38.5	48	Silttaşı
		77	
	45.0-47.0	81	Silttaşı
		74	
	53.6-55.8	72	Silttaşı
		107	
	63.0-68.0	71	Silttaşı
79			
SK 9	7.5-10.5	38	Silttaşı
	17.0-21.5	31	Silttaşı
		70	Silttaşı
		21	
	27.0-32.0	102	Kumtaşı

Tablo B.5: SK-8 İndeks Özellikleri

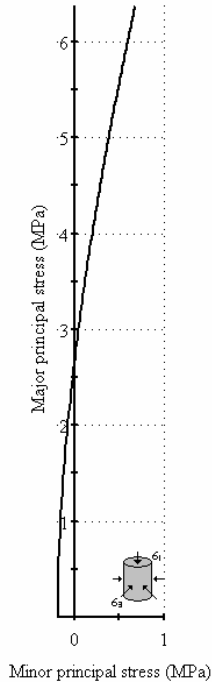
Sondaj No	Derinlik (m)	Kuru Ağırlık (gr)	Doygun Ağırlık (gr)	Hacim (cm³)	γ_k (gr/cm³)	γ_d (gr/cm³)	n(%)	Sa(%)	Litoloji
SK 8	23.5-28.0	167,21	168,81	63,46	2,63	2,66	2,52	0,96	Kumtaşı
		149,93	151,58	57,02	2,63	2,66	2,89	1,1	Kumtaşı
		209,67	211,61	79,44	2,64	2,66	2,44	0,93	Kumtaşı
		441,85	443,86	164,68	2,68	2,7	1,22	0,45	Kumtaşı
		376,6	380,16	142,88	2,64	2,66	2,49	0,95	Kumtaşı
	53.6-55.8	263,2	264,45	95,47	2,76	2,77	1,31	0,47	Silttaşı
		280,11	281,49	101,73	2,75	2,77	1,36	0,49	Silttaşı
		266,28	267,62	96,76	2,75	2,77	1,38	0,5	Silttaşı
		357,06	358,71	129,41	2,76	2,77	1,28	0,46	Silttaşı
		276,7	278,09	100,38	2,76	2,77	1,38	0,5	Silttaşı

Tablo B.6: SK-9 İndeks Özellikleri

Sondaj No	Derinlik (m)	Kuru Ağırlık (gr)	Doygun Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	γ_k (gr/cm ³)	γ_d (gr/cm ³)	n(%)	Sa(%)	Litoloji
SK 9	7.5-10.5	279,79	286,03	106,92	2,62	2,68	5,84	2,23	Silttaşı
		218,01	223,55	84,12	2,59	2,66	6,59	2,54	Silttaşı
		242,49	248,5	93,23	2,6	2,67	6,45	2,48	Silttaşı
		212,43	217,34	81,64	2,6	2,66	6,01	2,31	Silttaşı
		151,87	155,53	58,21	2,6	2,67	6,29	2,41	Silttaşı
	17.0-21.5	148,25	149,71	56,12	2,61	2,67	2,6	0,98	Silttaşı
		178,36	180,97	66,53	2,64	2,72	3,92	1,46	Silttaşı
		66,93	68011	25,08	2,68	2,72	4,7	1,76	Silttaşı
		121,06	123,57	46,29	2,67	2,67	5,42	2,07	Silttaşı
		267,52	271,96	100,21	2,62	2,71	4,43	1,66	Silttaşı
	17.0-21.5	261,75	264,71	99,96	2,67	2,65	2,96	1,13	Kumtaşı
		411,47	413,06	153,03	2,62	2,7	1,04	0,39	Kumtaşı
		362,29	366,11	138,32	2,69	2,65	2,76	1,05	Kumtaşı
		335,1	337,18	1254,92	2,62	2,68	1,65	0,62	Kumtaşı
		181,85	184,25	69,98	2,66	2,63	3,43	1,32	Kumtaşı
	27.0-32.0	340,33	341,82	126,92	2,6	2,69	1,17	0,44	Kumtaşı
		91,56	91,98	34,16	2,68	2,69	1,23	0,46	Kumtaşı
		210,87	212,22	78,76	2,68	2,69	1,71	0,64	Silttaşı
		236,44	237,3	87,66	2,7	2,71	0,98	0,36	Silttaşı
		95,48	95,93	35,66	2,68	2,69	1,26	0,47	Kumtaşı

EK-C

Analysis of Rock Strength using RocLab SK-8 36.0-38.5 m



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 49.2 MPa
 GSI = 60 $m_i = 7$ Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (E_i) = 19680 MPa
 modulus ratio (MR) = 400

Hoek-Brown Criterion

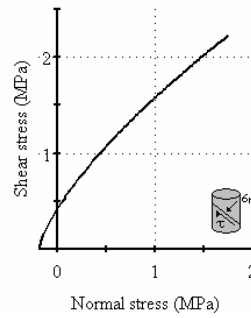
$m_b = 0.777$ $s = 0.0030$ $a = 0.503$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.503 MPa friction angle = 46.41 deg

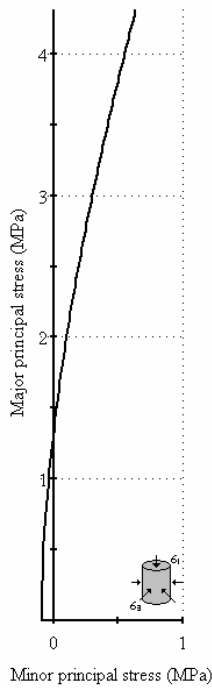
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.192 MPa
 uniaxial compressive strength = 2.667 MPa
 global strength = 6.020 MPa
 deformation modulus = 3949.41 MPa



Şekil C.1: SK-8 36.0-38.5 m RocLab Analizi

Analysis of Rock Strength using RocLab SK-8 45.0-47.0 m



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 24.3 MPa
 GSI = 60 $m_i = 7$ Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (E_i) = 9720 MPa
 modulus ratio (MR) = 400

Hoek-Brown Criterion

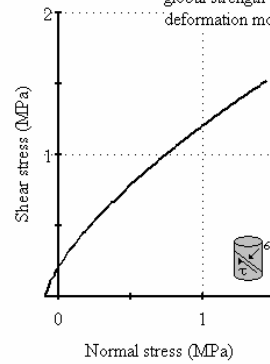
$m_b = 0.777$ $s = 0.0030$ $a = 0.503$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.302 MPa friction angle = 41.96 deg

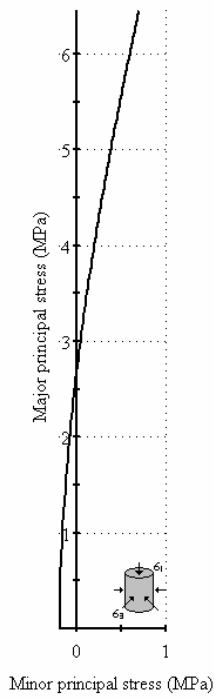
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.095 MPa
 uniaxial compressive strength = 1.317 MPa
 global strength = 2.973 MPa
 deformation modulus = 1950.62 MPa



Şekil C.2: SK-8 45.0-47.0 m RocLab Analizi

Analysis of Rock Strength using RocLab SK-8 53.6-55.8 m



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 49 MPa
 GSI = 60 $m_i = 7$ Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (E_i) = 19600 MPa
 modulus ratio (MR) = 400

Hoek-Brown Criterion

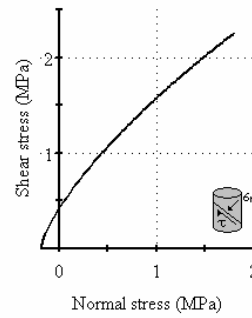
$m_b = 0.777$ $s = 0.0030$ $a = 0.503$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.505 MPa friction angle = 46.18 deg

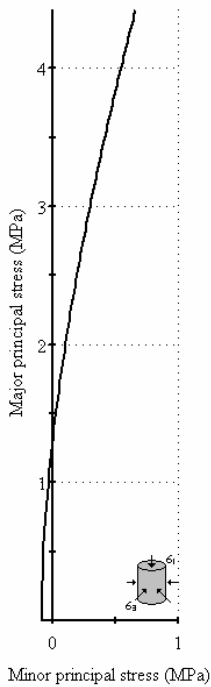
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.191 MPa
 uniaxial compressive strength = 2.656 MPa
 global strength = 5.996 MPa
 deformation modulus = 3933.36 MPa



Şekil C.3: SK-8 53.6-55.8 m RocLab Analizi

Analysis of Rock Strength using RocLab SK-8 63.0-68.0 m



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 24.7 MPa
 GSI = 60 $m_i = 7$ Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (E_i) = 9880 MPa
 modulus ratio (MR) = 400

Hoek-Brown Criterion

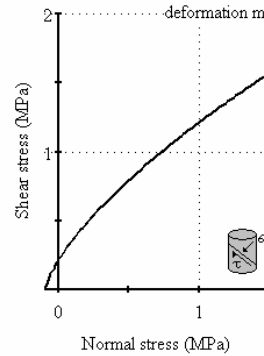
$m_b = 0.777$ $s = 0.0030$ $a = 0.503$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.309 MPa friction angle = 41.83 deg

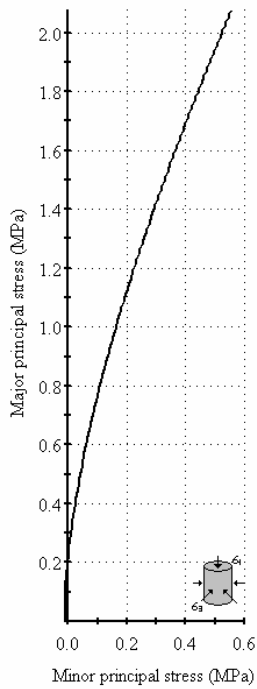
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.096 MPa
 uniaxial compressive strength = 1.339 MPa
 global strength = 3.022 MPa
 deformation modulus = 1982.73 MPa



Şekil C.4: SK-8 63.0-68.0 m RocLab Analizi

Analysis of Rock Strength using RocLab SK-9 7.5-10.5 m



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 12.8 MPa
 GSI = 45 $m_i = 7$ Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (E_i) = 5120 MPa
 modulus ratio (MR) = 400

Hoek-Brown Criterion

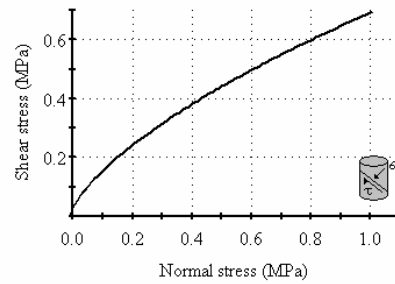
$m_b = 0.341$ $s = 0.0003$ $a = 0.508$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.119 MPa friction angle = 31.28 deg

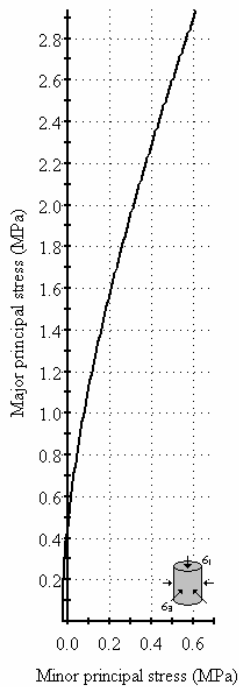
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.013 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.223 MPa
 global strength = 0.967 MPa
 deformation modulus = 400.68 MPa



Şekil C.5: SK-9 7.5-10.5 m RocLab Analizi

Analysis of Rock Strength using RocLab SK-9 17.0-21.5 m



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 26.7 MPa
 GSI = 45 $m_i = 7$ Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (E_i) = 10680 MPa
 modulus ratio (MR) = 400

Hoek-Brown Criterion

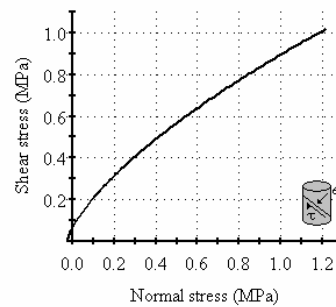
$m_b = 0.341$ $s = 0.0003$ $a = 0.508$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.173 MPa friction angle = 36.42 deg

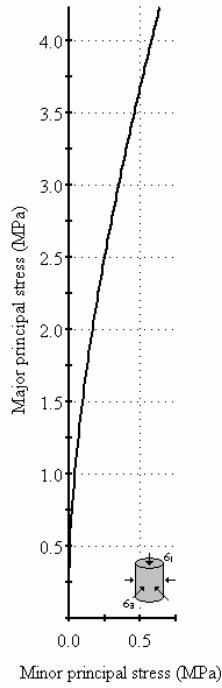
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.027 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.465 MPa
 global strength = 2.017 MPa
 deformation modulus = 835.80 MPa



Şekil C.6: SK-9 17.0-21.5 m RocLab Analizi

Analysis of Rock Strength using RocLab SK-9 27.0-32.0 m



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 25.7 MPa
 GSI = 45 m_i = 17 Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (E_i) = 10280 MPa
 modulus ratio (MR) = 400

Hoek-Brown Criterion

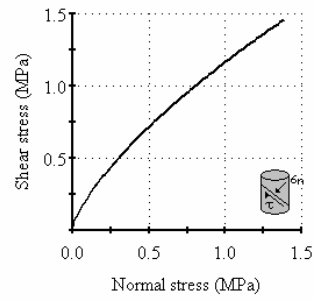
m_b = 0.828 s = 0.0003 a = 0.508

Mohr-Coulomb Fit

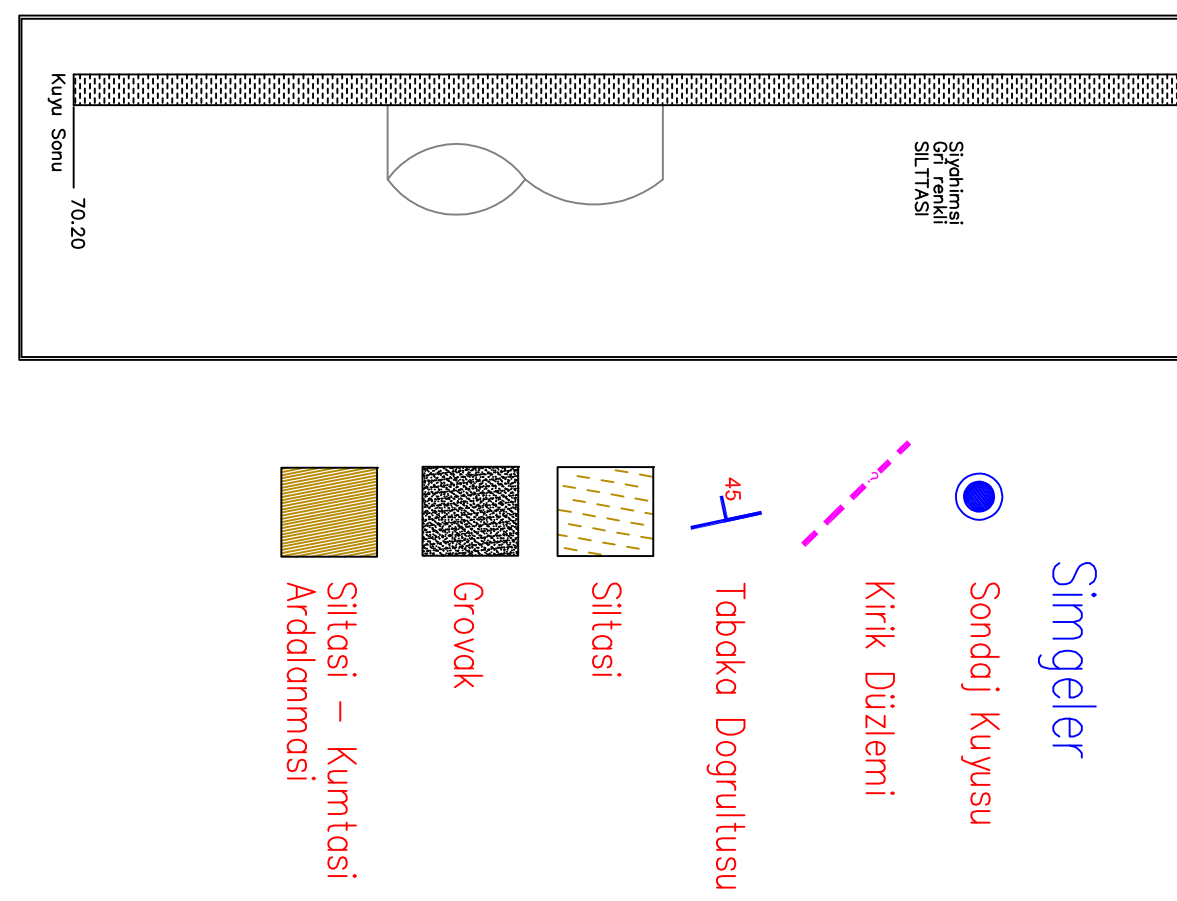
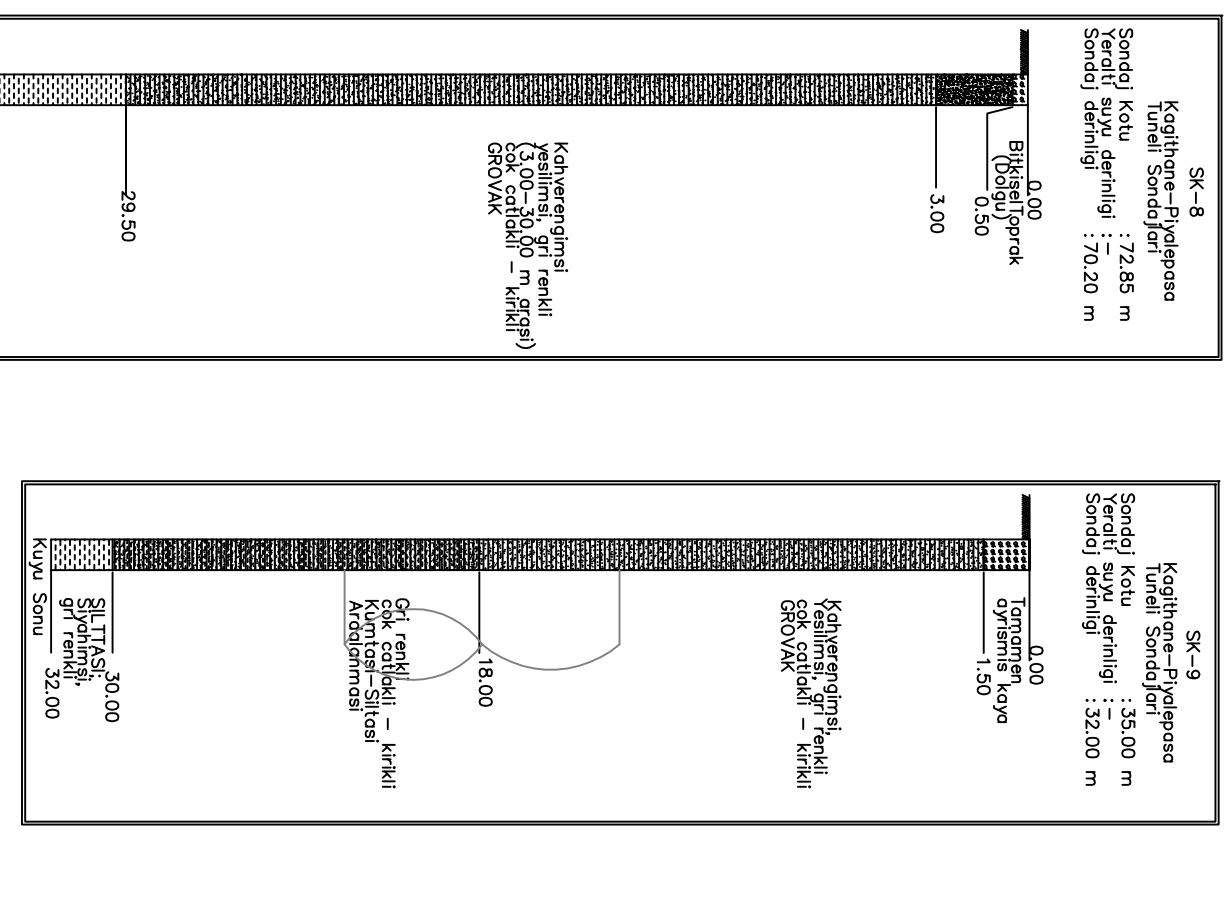
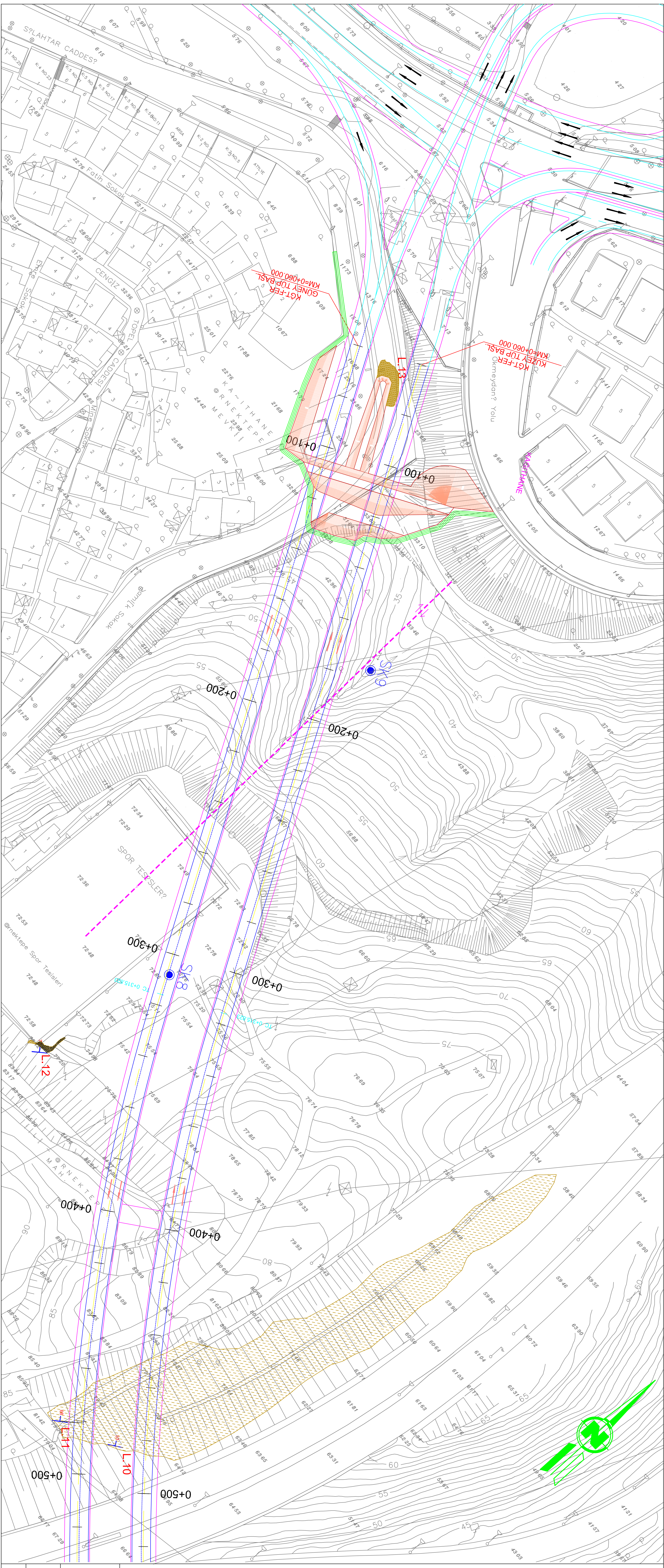
cohesion = 0.210 MPa friction angle = 43.73 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.011 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.448 MPa
 global strength = 3.021 MPa
 deformation modulus = 804.50 MPa



Şekil C.7: SK-9 27.0-32.0 m RocLab Analizi



KAĞITHANE-PIYALEPAŞA TUNELİ
KAĞITHANE PORTAL PLANI
 Sondaj ve Mostra Lokasyonları

EMAY Uluslararası Müh. Mimarlık ve Tic. Ltd. Şti.
 İnş. Müh. Erdem İLYASOĞLU
 Ölçek: 1:1000

ÖZGEÇMİŞ

08.03.1981'de İzmir'de doğdu. 1999 yılında Manisa Fatih Anadolu Lisesi'nden, 2000 yılında değişim öğrencisi olarak gittiği Michigan, A.B.D.'de Imlay City High School'dan mezun oldu. Eylül 2000'de İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde eğitimine devam ederek Ocak 2005'de buradan mezun oldu. Ocak 2005'de İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği yüksek lisans programına başladı. Halen bu bölümde eğitimini sürdürmektedir.