

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**CANKURTARAN (HOPA-ARTVİN) TÜNEL GÜZERGAHININ
VE ÇEVRESİNİN JEOTEKNİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Jeoloji Yük. Müh. Ayberk KAYA

**MART 2012
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

CANKURTARAN (HOPA-ARTVİN) TÜNEL GÜZERGAHININ

VE ÇEVRESİNİN JEOTEKNİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Jeoloji Yük. Müh. Ayberk KAYA

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.02.2012

Tezin Savunma Tarihi : 16.03.2012

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fikri BULUT

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Ayberk KAYA Tarafından Hazırlanan

CANKURTARAN (HOPA-ARTVİN) TÜNEL GÜZERGAHININ
VE ÇEVRESİNİN JEOTEKNİK AÇIDAN İNCELENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14/02/2012 gün ve 1444 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Fikri BULUT

Üye : Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ

Üye : Prof. Dr. Şenol ÇAPKINOĞLU

Üye : Doç. Dr. Ali Osman YILMAZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan ERSOY



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez danışmanı olarak çalışmanın tüm aşamasında bilgi ve desteğini esirgemeyen, çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli ortamı hazırlayarak karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yol gösterici olan Prof. Dr. Fikri BULUT'a şükranlarımı sunarım.

Doktora tez izleme komitesinde yer alarak çalışmalarına destek veren Doç Dr. Ali Osman YILMAZ'a ve Yrd. Doç. Dr. Hakan ERSOY'a teşekkür ederim.

Tez çalışmasının değişik aşamalarında bilgi, eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan Prof. Dr. Şenol ÇAPKINOĞLU'na, Doç. Dr. Hakan KARSLI'ya, Doç. Dr. Orhan KARSLI'ya, Yrd. Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ'a, Yrd. Doç. Dr. Emel ABDİOĞLU'na, Yrd. Doç. Dr. Abdurrahman DOKUZ'a, Öğr. Gör. İbrahim AKPINAR'a, Uzman Dr. İrfan TEMİZEL'e, Arş. Gör. Emine TÜRK'e, Arş. Gör. Esra HATİPOĞLU'na, Arş. Gör. Tuba EROĞLU'na, Jeoloji Yük. Müh. Aytuna SAYIN'a ve Jeoloji Yük. Müh. Dilek SOFRACIOĞLU'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Arazi ve laboratuvar çalışmaları sırasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Mustafa ŞENKAYA'ya, Jeoloji Müh. Mustafa KARADAĞ'a, Jeoloji Müh. Mustafa KURUŞ'a, Jeoloji Müh. Yasin YURDUSEVEN'e, Jeoloji Müh. Okan USTA'ya, Maden Müh. Ata SUÇİN'e, İnşaat Yük. Müh. Mustafa KARSLI'ya, Mustafa TAŞTAN'a, Burak YILDIZ'a, Vural TOKMAK'a ve Veysel DÜNDAR'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü teknik elemanı Makine Müh. Murat KAYIKÇI'ya ve Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü teknik elemanı Hakkı YOKUŞ'a içtenlikle teşekkür ederim.

Arazi çalışmaları sırasında görüş ve önerileri ile destek olan Çelikler Holding çalışanı Jeoloji Yük. Müh. Yaşar GÜMRÜKÇÜOĞLU'na, Jeoloji Müh. Erdal TUNA'ya ve diğer mühendislere sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sırasında göstermiş olduğu maddi, manevi her türlü fedakârlığı için anneme ve aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayberk KAYA
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tünel Güzergahının ve Çevresinin Jeoteknik Açıdan İncelenmesi’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Fikri BULUT’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.
27/03/2012



Ayberk KAYA

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|------------------------|
| ÖNSÖZ..... | III |
| TEZ BEYANNAMESİ..... | IV |
| İÇİNDEKİLER..... | V |
| ÖZET | VIII |
| SUMMARY | IX |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | X |
| TABLolar DİZİNİ..... | XV |
| SEMBOLLER DİZİNİ | XIX |
| 1. GENEL BİLGİLER | 1 |
| 1.1. Çalışmanın Amacı..... | 1 |
| 1.2. Giriş..... | 2 |
| 1.3. Çalışma Alanının Genel Özellikleri..... | 3 |
| 1.3.1. Coğrafik Durum | 3 |
| 1.3.2. Yerleşim ve Ulaşım..... | 5 |
| 1.3.3. Akarsular | 6 |
| 1.3.4. İklim ve Bitki Örtüsü | 6 |
| 1.4. Literatür Çalışması..... | 7 |
| 1.4.1. Doğu Karadeniz Bölümü'nün Genel Jeolojisi | 8 |
| 1.4.2. Önceki Genel Jeoloji Çalışmaları | 10 |
| 1.4.3. Önceki Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları | 11 |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR..... | 13 |
| 3. BULGULAR..... | 15 |
| 3.1. Çalışma Alanı ve Çevresinin Genel Jeolojisi..... | 15 |
| 3.1.1. Subaşı Sırtı Formasyonu | 15 |
| 3.1.2. Cankurtaran Formasyonu..... | 23 |
| 3.1.3. Şenkaya Sırtı Formasyonu | 26 |
| 3.1.4. Kabaköy Formasyonu | 29 |
| 3.1.5. Alüvyonlar ve Yamaç Molozları | 32 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.2. | Jeoteknik Birimlerin Tanımlanması..... | 33 |
| 3.3. | Kaya Malzemelerinin Fiziko-mekanik Özellikleri | 36 |
| 3.3.1 | Birim Hacim Ağırlık..... | 36 |
| 3.3.2. | Schmidt Çekici Geri Tepme Sayısı..... | 37 |
| 3.3.3. | Nokta Yük Dayanım İndeksi | 37 |
| 3.4. | Süreksizliklerin Özellikleri | 39 |
| 3.4.1. | Süreksizlik Takımı | 40 |
| 3.4.2. | Süreksizlik Ara Uzaklığı..... | 43 |
| 3.4.3. | Süreksizlik Yüzeylerinin Açıklığı..... | 48 |
| 3.4.4. | Süreksizliklerin Devamlılığı | 51 |
| 3.4.5. | Süreksizlik Yüzeylerinin Pürüzlülüğü ve Dalgallılığı | 54 |
| 3.4.6. | Süreksizliklerdeki Dolgu Malzemesinin Özelliği..... | 55 |
| 3.4.7. | Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi | 57 |
| 3.4.8. | Süreksizlik Yüzeylerindeki Su Durumu | 57 |
| 3.4.9. | Süreksizlik Sıklığı..... | 59 |
| 3.4.10. | Hacimsel Eklem Sayısı | 60 |
| 3.4.11. | Kaya Kalite Göstergesi (RQD) | 61 |
| 3.4.12. | Süreksizlik Yüzeyinin Kayma Dayanımı..... | 64 |
| 3.5. | Jeoteknik Birimlerin Kaya Kütle Sınıflama Sistemlerine Göre Değerlendirilmesi..... | 72 |
| 3.5.1. | RMR (Kaya Kütle Puanlaması) Sınıflama Sistemi..... | 72 |
| 3.5.2. | Q (Kaya Kütle Kalitesi) Sınıflama Sistemi..... | 78 |
| 3.5.3. | RMi (Kaya Kütle İndeksi) Sınıflama Sistemi..... | 84 |
| 3.5.4. | NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) Sınıflama Sistemi | 87 |
| 3.5.5. | GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) Sistemi | 96 |
| 3.6. | Jeoteknik Birimlerin Kütle Özellikleri..... | 98 |
| 3.6.1. | Poisson Oranının Belirlenmesi | 98 |
| 3.6.2. | Deformasyon Modülünün Belirlenmesi..... | 99 |
| 3.6.3. | Tek Eksenli Basınç Dayanımının Belirlenmesi | 101 |
| 3.6.4. | Kaya Kütle Sabitlerinin Belirlenmesi | 103 |
| 3.7. | Cankurtaran Tünelinin Ön Destek Tasarımı | 107 |
| 3.7.1. | Ampirik Destek Tasarımı..... | 107 |
| 3.7.2. | Sayısal Destek Tasarımı..... | 120 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.8. | Cankurtaran Tüneli'nin Giriş ve Çıkış Bölümlerinde Açılacak Portal ve Yol Yarma Şevlerinin Duraylılık Analizleri | 143 |
| 3.9. | Subaşı Viyadüğü ve 7 Nolu Köprü'nün İnşaa Edileceği Jeoteknik Birimlerin Taşıma Gücünün Belirlenmesi..... | 156 |
| 3.10. | Jeoteknik Birimlerin Kazılabilirlik Sınıflama Sistemlerine Göre Değerlendirilmesi..... | 161 |
| 4. | SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 166 |
| 5. | KAYNAKLAR | 173 |
| 6. | EKLER..... | 186 |
| ÖZGEÇMİŞ | | |

Doktora Tezi

ÖZET

CANKURTARAN (HOPA-ARTVİN) TÜNEL GÜZERGAHININ
VE ÇEVRESİNİN JEOTEKNİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Ayberk KAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Fikri BULUT
2012, 185 Sayfa, 9 Ek Sayfa

Bu çalışmada, Hopa-Borçka karayolunun 7+980-13+208 kilometreleri arasında çift tüp olarak inşa edilmesi planlanan Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tüneli'nin proje güzergahında ve çevresinde yer alan birimler, jeoteknik açıdan incelenmiştir. Yapılan jeolojik çalışmalar sonucunda, Geç Kretase, Paleosen ve Eosen yaşlı sedimanter ve volkanik kayaların yörede yüzeylendiği belirlenmiştir. Proje güzergahında yer alan birimler altı jeoteknik birime ayrılmış ve mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerinin fiziko-mekanik özellikleri laboratuvar deneyleri yapılarak, kütle özellikleri ise ampirik eşitliklerden yararlanarak tespit edilmiştir. Fiziko-mekanik özelliklerden, sondaj ve hat etüdü çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak jeoteknik birimler RMR, Q, R_{Mi}, NATM ve GSI sistemlerine göre sınıflandırılmış ve tünel için ampirik ön destek elemanları belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, destek-kaya etkileşimleri ile ampirik destek elemanları üzerinde meydana gelecek deformasyonlar saptanmıştır. Tünelin giriş ve çıkış bölümlerinde açılacak portal ve yol yarma şevlerinde gelişebilecek duraysızlıklar kinematik, limit denge ve sayısal analizlerle araştırılmış ve duraysız olduğu belirlenen giriş portal şevi için ön destekleme elemanları önerilmiştir. Subaşı Viyadüğü ve 7 Nolu Köprü'nün inşaa edileceği jeoteknik birimlerin izin verilebilir taşıma gücü değerinin q_a : 8.37-11.20 MPa arasında değiştiği saptanmıştır. Jeoteknik birimlerin kazılabilirlik özellikleri ise kazılabilirlik sınıflama sistemleri kullanılarak belirlenmiş olup, "sökülebilir" ve "kazılabilir" kaya sınıflarında oldukları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya kütle sınıflama sistemleri, Kazılabilirlik, Sonlu elemanlar yöntemi, Şev duraylılık analizi, Taşıma gücü

PhD. Thesis

SUMMARY

THE GEOTECHNICAL INVESTIGATION OF THE CANKURTARAN
(HOPA-ARTVIN) TUNNEL ALIGNMENT AND SURROUNDING AREA

Ayberk KAYA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geological Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Fikri BULUT
2012, 185 Pages, 9 Pages Appendix

In this study, the geotechnical properties of rock units, located around and in project route of the Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tunnel, planned to be constructed as a double tube between 7+980-13+208 kilometers of the Hopa-Borçka highway, were investigated. As a result of the geological studies, it is determined that, Late Cretaceous, Paleocene and Eocene aged sedimentary and volcanic rocks were outcropped in the area. The rock units, located along the project route, were grouped into the six geotechnical units and their engineering properties were determined. The physico-mechanical properties of the intact rocks in each geotechnical units were found by performing the laboratory studies and the rock mass properties were determined by using the empirical equations. The geotechnical units were classified according to the RMR, Q, RMI, NATM and GSI classification systems by using data obtained from physico-mechanical properties, drilling studies and scan-line surveys and thus preliminary support design of the tunnel was designated. Using the finite elements method, support-rock interactions and deformations on the empirical support elements were determined. Stability of the tunnel portal and road cut slopes, planned to be excavated in the entrance and exit sections of the tunnel, were investigated by kinematical, limit equilibrium and numerical analyses and thus preliminary support elements were suggested for the unstable entrance portal slope. It was determined that, the allowable bearing capacity values of the geotechnical units, on which Subaşı Viaduct and Bridge No. 7 planned to be built, varies between q_a : 8.37-11.20 MPa. The excavatability properties of the geotechnical units were defined by using the excavatability classification systems and it is determined that they are in “digging” and “ripping” classes.

Key Words: Bearing capacity, Excavatability, Finite elements method, Rock mass classification systems, Slope stability analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Şekil 1.1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası | 4 |
| Şekil 1.2. Cankurtaran Tüneli'nin giriş (a) ve çıkış (b) bölümleri..... | 5 |
| Şekil 1.3. Ortalama sıcaklık (a) ve yağış (b) değerlerinin yıllara göre değişimi | 7 |
| Şekil 3.1. Çalışma alanı ve çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit..... | 16 |
| Şekil 3.2. Çalışma alanı ve çevresine ait jeoloji haritası | 17 |
| Şekil 3.3. Çalışma alanı ve çevresine ait A-A', B-B' ve C-C' jeolojik kesitleri..... | 18 |
| Şekil 3.4. Subaşı Sırtı Formasyonu'na ait taban piroklastitlerinin Şubaşı Köy yolu ayrımındaki (a) ve köy yolundaki (b) görünümüleri, tortul araseviyenin Cankurtaran Tüneli giriş bölümündeki (c ve d) görünümü, tortul araseviye ve tavan piroklastitleri dokanağının (e) ve tavan piroklastitlerinin Cankurtaran Tüneli giriş bölümündeki (f) görünümüleri | 19 |
| Şekil 3.5. Subaşı Sırtı Formasyonu'na ait piroklastitlerin mikroskobik görünümüleri (Ç.N.; Kçp: kayaç parçası, Ol: olivin, Op: opak mineral, Pl: plajiyoklas)..... | 21 |
| Şekil 3.6. Subaşı Sırtı Formasyonu'ndaki tortul ara seviyeye ait kumtaşlarının (a ve b) ve kireçtaşlarının (c ve d) mikroskobik görünümüleri (Ç.N.; B: biyojen, Çm: çimento, M: mikrit, Mt: matriks, Op: opak mineral, Pl: plajiyoklas)..... | 22 |
| Şekil 3.7. Cankurtaran Formasyonu ve Subaşı Sırtı Formasyonu dokanağının (a), formasyon tabanındaki (b ve c) ve tavanındaki (e) ince tabakalı kireçtaşı-marn seviyesinin, orta seviyedeki kalın tabakalı kireçtaşlarının (d) Şubaşı Yöresi'ndeki görünümüleri, tabaka düzlemi boyunca yerleşmiş bazalt silinin (f) Cankurtaran Tepe civarındaki görünümü..... | 24 |
| Şekil 3.8. Cankurtaran Formasyonu'na ait kireçtaşları (a-d) ile kireçtaşlarının tabaka düzlemine yerleşmiş bazaltın (sil) (e) ve tabakaları kesen bazaltın (dayk) (f) mikroskobik görünümüleri (Ç.N.; B: biyojen, Bm: biyomorfa, M: mikrit, Op: opak mineral, Pl: plajiyoklas)..... | 25 |
| Şekil 3.9. Şenkaya Sırtı Formasyonu ve Cankurtaran Formasyonu dokanağı (a) ile marn tabaka düzlemi boyunca yerleşmiş diyabaz silinin Cankurtaran Tepe civarındaki görünümüleri (b), ince tabakalı marn seviyesinin Subaşı (c, d, e) ve Çiftköprü Yörelere'ndeki (f) görünümüleri | 28 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.10. Şenkaya Sırtı Formasyonu'na ait marnların (a ve b) ve tabaka düzlemi boyunca yerleşmiş diyabazın (c ve d) mikroskobik görünümleri (Ç.N.; Cpx: klinopiroksen, Kd: kalsit damarı, Ku: kuvars, Op: opak minerak, Pl: plajiyoklas) | 29 |
| Şekil 3.11. Kabaköy Formasyonu'na ait bazaltların Çifteköprü Yöresi'nde bulunan Cankurtaran Tüneli çıkış bölümündeki (a ve b) ve Balıklı Dere vadisindeki görünümleri (c ve d) | 30 |
| Şekil 3.12. Kabaköy Formasyonu'na ait bazaltların mikroskobik görünümleri (Ç.N.; Kpir: klinopiroksen, Op: opak minerak, Pl: plajiyoklas) | 31 |
| Şekil 3.13. Çalışma alanı çevresi için jeolojik ve jeoteknik birim ilişkisini gösteren stratigrafik kolon kesit | 34 |
| Şekil 3.14. Cankurtaran Tünel güzergahındaki jeoteknik birimlerin birleştirilmiş jeoloji kesiti üzerindeki görünümü | 35 |
| Şekil 3.15. A1 (a) ve A2 (b) jeoteknik birimlerine ait kontur diyagramları (alt yarı küre) | 41 |
| Şekil 3.16. B1 ve B2 jeoteknik birimlerine ait kontur diyagramı (alt yarı küre)..... | 42 |
| Şekil 3.17. C1 jeoteknik birimine ait kontur diyagramı (alt yarı küre) | 42 |
| Şekil 3.18. D1 jeoteknik birimine ait kontur diyagramı (alt yarı küre) | 43 |
| Şekil 3.19. Hat etüdü ile süreksizlik ara uzaklığı tayini | 44 |
| Şekil 3.20. A1 ve A2 jeoteknik birimlerindeki süreksizliklere ait ara uzaklık histogramları | 45 |
| Şekil 3.21. B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki süreksizliklere ait ara uzaklık histogramları | 45 |
| Şekil 3.22. C1 jeoteknik birimindeki süreksizliklere ait ara uzaklık histogramları | 46 |
| Şekil 3.23. D1 jeoteknik birimindeki süreksizliklere ait ara uzaklık histogramları | 46 |
| Şekil 3.24. Süreksizliklerin iki yüzeyi arasındaki açıklığı tanımlayan blok diyagramlar | 48 |
| Şekil 3.25. Jeoteknik birimlerdeki tabaka ve eklemlere ait süreksizlik açıklığı histogramları | 49 |
| Şekil 3.26. Jeoteknik birimlerdeki tabaka ve eklemlere ait devamlılık histogramları | 52 |
| Şekil 3.27. Pürüzlülüğün kantitatif olarak belirlenmesinde kullanılan pürüzlülük profilleri | 55 |
| Şekil 3.28. B1 jeoteknik birimindeki marn dolgularına ait yönlü XRD difraktogramı | 56 |
| Şekil 3.29. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik sıklığı histogramları | 59 |
| Şekil 3.30. Jeoteknik birimlere ait kaya kalite göstergesi (RQD) histogramları | 63 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 3.31. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerine ait ϕ_b değerinin belirlenmesi için deformasyon kontrollü makaslama deneylerine göre çizilen σ - τ grafikleri | 68 |
| Şekil 3.32. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerdeki süreksizlik yüzeylerine ait doruk ϕ_p ve c_p değerlerinin belirlenmesi için Barton yenilme ölçütüne göre çizilen σ - τ grafikleri | 68 |
| Şekil 3.33. RMR puanını hesaplama aşamalarını gösteren akış şeması | 73 |
| Şekil 3.34. RMR sisteminin son versiyonundaki tek eksenli basınç dayanımı, süreksizlik aralığı ve RQD parametrelerine ait puanlama grafikleri | 74 |
| Şekil 3.35. NATM, Q ve RMR kaya kütle sınıflarının eşleştirilmesi | 94 |
| Şekil 3.36. Jeoteknik birimlere ait GSI değerlerinin Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen modifiye edilmiş GSI abağında gösterimi | 97 |
| Şekil 3.37. Bieniawski (1989) tarafından önerilen desteksiz kalabilme süresini tahmin abağı | 108 |
| Şekil 3.38. Jeoteknik birimlerde açılacak tünelin tavanı için önerilen destek kategorilerinin Q sistemi tünel destek abağı üzerinde gösterimi | 110 |
| Şekil 3.39. Jeoteknik birimlerde açılacak tünelin duvarı için önerilen destek kategorilerinin Q sistemi tünel destek abağı üzerinde gösterimi | 111 |
| Şekil 3.40. Jeoteknik birimlerde açılacak tünelin tavanı için önerilen destek elemanlarının RMi sistemi tünel destek abağı üzerinde gösterimi | 115 |
| Şekil 3.41. Jeoteknik birimlerde açılacak tünelin duvarı için önerilen destek elemanlarının RMi sistemi tünel destek abağı üzerinde gösterimi | 116 |
| Şekil 3.42. A1, A2, B1 ve D1 jeoteknik birimlerinde (a) ve B1 ve C1 jeoteknik birimlerinde (b) uygulanacak tünel kazı kesitleri | 124 |
| Şekil 3.43. Giriş bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 127 |
| Şekil 3.44. Tünel güzergahının orta bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 128 |
| Şekil 3.45. Nogohe Tepe civarındaki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 129 |
| Şekil 3.46. Tünel güzergahının orta bölümündeki A2 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 130 |
| Şekil 3.47. Tünel güzergahının orta bölümündeki B1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 131 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 3.48. Tünel güzergahının orta bölümündeki B2 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 132 |
| Şekil 3.49. Tünel güzergahının orta bölümündeki C1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 133 |
| Şekil 3.50. Tünel güzergahının orta bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 134 |
| Şekil 3.51. Çıkış bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 135 |
| Şekil 3.52. Tünel güzergahının orta bölümündeki A1 ve B2 jeoteknik birimlerinde ve Nogohe Tepe civarındaki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait sayısal analizlerle belirlenmiş destekli durum için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği | 141 |
| Şekil 3.53. Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümündeki portal (a) ve yol yarma (b) şevlerinin kinematik analizleri | 145 |
| Şekil 3.54. Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümündeki portal (a) ve yol yarma (b) şevlerinin kinematik analizleri | 146 |
| Şekil 3.55. Giriş bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak portal şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b) | 149 |
| Şekil 3.56. Giriş bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak yarma şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b) | 150 |
| Şekil 3.57. Giriş bölümündeki A2 jeoteknik biriminde açılacak yol yarma şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b) | 151 |
| Şekil 3.58. Çıkış bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak portal şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b) | 152 |
| Şekil 3.59. Çıkış bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak yol yarma şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b) | 153 |
| Şekil 3.60. Giriş bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak portal şevine ait desteklenmiş durumuna göre sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b) | 155 |
| Şekil 3.61. İzin verilebilir taşıma gücü için DF ve RQD ilişkisi | 156 |
| Şekil 3.62. Süreksizlik içeren kaya kütleleri için taşıma gücü faktörü | 159 |
| Şekil 3.63. Jeoteknik birimlerin Pettifer ve Fookes (1994) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi | 163 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 3.64. A1, B1, B2, C1 ve D1 jeoteknik birimlerinin Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi ($I_{s(50)} < 3$ MPa)..... | 164 |
| Şekil 3.65. A2 jeoteknik biriminin Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi ($I_{s(50)} > 3$ MPa)..... | 165 |

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

| | |
|---|----|
| Tablo 3.1. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık değerleri..... | 36 |
| Tablo 3.2. Jeoteknik birimlerdeki taze kaya ve süreksizlik yüzeylerine ait ortalama Schmidt çekici geri tepme sayısı değerleri..... | 37 |
| Tablo 3.3. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerine ait nokta yük dayanım indeksi ve bu değerlere karşılık gelen tek eksenli basınç dayanımı değerleri..... | 39 |
| Tablo 3.4. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik takımlarının yönelimleri..... | 40 |
| Tablo 3.5. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik takımlarına ait ara uzaklık değerlerinin dağılımı ve bu değerlerin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi..... | 47 |
| Tablo 3.6. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik açıklığı değerlerinin dağılımı ve bu değerlerin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi..... | 50 |
| Tablo 3.7. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik devamlılığı değerlerinin dağılımı ve bu değerlerin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi..... | 53 |
| Tablo 3.8. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünün ve dalgallılığının ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi ve JRC değer aralıkları..... | 54 |
| Tablo 3.9. Jeoteknik birimlerdeki kaya kütlelerinin ve süreksizlik yüzeylerinin bozunma derecesinin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi..... | 58 |
| Tablo 3.10. Jeoteknik birimlerin Franklin vd. (1971) tarafından önerilen süreksizlik sıklığı tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi..... | 60 |
| Tablo 3.11. Jeoteknik birimlere ait J_v değerlerinin ISRM (1981) ve Palmström (1996) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi..... | 61 |
| Tablo 3.12. Jeoteknik birimlere ait RQD değerlerinin Deere (1964) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi..... | 63 |
| Tablo 3.13. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerine ait ϕ_b değerlerinin belirlenmesi için deformasyon kontrollü makaslama deneyiyle belirlenen σ - τ değişkenlerinin α : 0.05 anlamlılık düzeyine göre korelasyon ve varyans analizlerinin sonuçları..... | 67 |
| Tablo 3.14. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerdeki süreksizliklerin kayma dayanımını belirlemek için uygulanan Barton yenilme ölçütünde kullanılan değişkenler..... | 68 |

| | |
|---|-----|
| Tablo 3.15. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerindeki süreksizliklere ait Barton yenilme ölçütü kullanılarak belirlenen doruk ve artık kayma dayanımı parametreleri | 69 |
| Tablo 3.16. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik özelliklerinin literatürdeki tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi | 70 |
| Tablo 3.17. Jeoteknik birimlere ait λ , J_v ve RQD değerlerinin literatürdeki tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi ve süreksizlik yüzeylerine ait kayma dayanımı parametreleri..... | 71 |
| Tablo 3.18. RMR kaya kütle sınıflama sisteminin son versiyonu | 74 |
| Tablo 3.19. RMR sisteminde süreksizlik eğim ve doğrultusunun etkisi | 75 |
| Tablo 3.20. RMR sisteminde süreksizlik yönelimine göre düzeltme | 75 |
| Tablo 3.21. Patlatma ve başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme katsayıları..... | 76 |
| Tablo 3.22. RMR sınıflama sistemine göre kaya sınıfları ve puanları | 76 |
| Tablo 3.23. Jeoteknik birimlerin RMR kaya kütle sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi | 77 |
| Tablo 3.24. Kaya kalite göstergesi - % RQD | 79 |
| Tablo 3.25. Süreksizlik takım sayısı - J_n | 79 |
| Tablo 3.26. Süreksizlik pürüzlülük sayısı - J_r | 80 |
| Tablo 3.27. Süreksizlik yüzeyi bozunma sayısı - J_a | 80 |
| Tablo 3.28. Süreksizlik suyu azaltma faktörü - J_w | 81 |
| Tablo 3.29. Gerilme azaltma faktörü - SRF | 81 |
| Tablo 3.30. Q değerlerine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılması | 82 |
| Tablo 3.31. Jeoteknik birimlerin Q kaya kütle sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi | 83 |
| Tablo 3.32. Süreksizlik pürüzlülük faktörü – jR | 85 |
| Tablo 3.33. Süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü – jA | 85 |
| Tablo 3.34. Süreksizlik uzunluk faktörü – jL | 86 |
| Tablo 3.35. R _{Mi} değerlerinin tanımlamaları | 86 |
| Tablo 3.36. Jeoteknik birimlere ait R _{Mi} değerlerinin değerlendirilmesi..... | 87 |
| Tablo 3.37. NATM'a göre kaya kütlelerinin sınıflandırılması | 93 |
| Tablo 3.38. Jeoteknik birimlerin NATM kaya kütle sınıflamasına göre değerlendirilmesi | 95 |
| Tablo 3.39. Jeoteknik birimlerin GSI sistemine göre değerlendirilmesi | 96 |
| Tablo 3.40. Elastik ses dalgalarının jeoteknik birimler içerisindeki yayılma hızları ve dinamik Poisson oranı değerleri | 99 |
| Tablo 3.41. Kaya kütlelerinin deformasyon modülünü belirlemeye yönelik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler..... | 100 |

| | |
|---|-----|
| Tablo 3.42. Jeoteknik birimlere ait deformasyon modülü değerleri | 101 |
| Tablo 3.43. Kaya kütlelerinin dayanımını belirlemeye yönelik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler | 102 |
| Tablo 3.44. Jeoteknik birimlere ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri..... | 103 |
| Tablo 3.45. m_b , s ve a kaya kütle sabitlerini belirlemeye yönelik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler..... | 104 |
| Tablo 3.46. m_{br} , s_r ve a_r kaya kütle sabitlerini belirlemeye yönelik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler..... | 105 |
| Tablo 3.47. Jeoteknik birimlere ait kaya kütle sabiti değerleri..... | 106 |
| Tablo 3.48. Jeoteknik birimlere ait kaya kütle özellikleri..... | 108 |
| Tablo 3.49. RMR sistemine göre tünel kazıları ve destekleri için kılavuz..... | 108 |
| Tablo 3.50. Değişik yeraltı kazıları için güncelleştirilmiş ESR değerleri | 109 |
| Tablo 3.51. Q kaya kütle niteliğine göre duvar faktörünün (Q_w) belirlenmesi | 109 |
| Tablo 3.52. Süreksizlik yönelim faktörü - Co | 113 |
| Tablo 3.53. Süreksizlik takım sayısı faktörü - N_j | 113 |
| Tablo 3.54. Tavan/duvar faktörü - C | 113 |
| Tablo 3.55. Gerilme seviyesi - SL | 114 |
| Tablo 3.56. Yeraltı suyu durumu - G_w | 114 |
| Tablo 3.57. Kaya kütle yapısının kenetlenme durumu - IL | 114 |
| Tablo 3.58. Tünel tavan ve duvarlarının ön destek tasarımı için S_r ve G_c değerlerinin belirlenmesinde kullanılan jeoteknik birimlere ait RM_i destek tasarımı belirleme sistemi parametreleri..... | 117 |
| Tablo 3.59. Jeoteknik birimlere ait kazı bilgileri..... | 118 |
| Tablo 3.60. Jeoteknik birimler için Q ve RM_i sistemlerine göre ön destekleme elemanları | 119 |
| Tablo 3.61. Jeoteknik birimler için NATM kaya kütle sınıflamasına göre önerilen ön destek elemanları | 120 |
| Tablo 3.62. Sayısal analizlerde kullanılan jeoteknik birimlere ait özellikler..... | 125 |
| Tablo 3.63. Sayısal analizlerde kullanılan destek elemanlarına ait sınır karakteristik değerleri | 125 |
| Tablo 3.64. Tünel güzergahının giriş ve orta bölümlerindeki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünelde ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı..... | 136 |
| Tablo 3.65. Nogohe Tepe civarındaki A1 ve tünel güzergahının orta bölümündeki A2 jeoteknik birimlerinde açılacak tünelde ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı | 137 |

| | |
|---|-----|
| Tablo 3.66. Tünel güzergahının orta bölümündeki B1 ve B2 jeoteknik birimlerinde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı | 138 |
| Tablo 3.67. Tünel güzergahının orta bölümündeki C1 ve D1 jeoteknik birimlerinde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı | 139 |
| Tablo 3.68. Çıkış bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı | 140 |
| Tablo 3.69. Tünel güzergahının orta bölümündeki ve Nogohe Tepe civarındaki A1 jeoteknik biriminde ve tünel güzergahının orta bölümündeki B2 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait sayısal analizlerle belirlenen destekli durum için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı | 142 |
| Tablo 3.70. Tünel güzergahının orta bölümündeki ve Nogohe Tepe civarındaki A1 jeoteknik birimi ve tünel güzergahının orta bölümündeki B2 jeoteknik birimi için sayısal analizlere göre önerilen ön destekleme elemanları | 142 |
| Tablo 3.71. Kinematik analizlerde kullanılan girdi parametreleri ve analiz sonuçları..... | 144 |
| Tablo 3.72. Kama tipi kaymanın limit denge analizinde kullanılan girdi parametreleri ve analiz sonuçları | 144 |
| Tablo 3.73. Sayısal şev duraylılık analizlerinde kullanılan girdi parametreleri | 148 |
| Tablo 3.74. Şevlere ait kazı geometrisi bilgileri ve sayısal şev duraylılık analizi sonuçları | 148 |
| Tablo 3.75. Sayısal duraylılık analizlerinde kullanılan destek elemanlarına ait sınır karakteristik değerler ve ön destekleme elemanları | 154 |
| Tablo 3.76. Temel şekline bağlı düzeltme faktörü (C_{f1})..... | 157 |
| Tablo 3.77. Yapı türlerine ve zemin araştırmalarının niteliğine göre güvenlik sayıları (G_s) | 158 |
| Tablo 3.78. Kaya kütleleri için RMR puanına göre izin verilebilir taşıma gücü | 158 |
| Tablo 3.79. Taşıma gücü hesaplamalarında kullanılan parametreler ve A1 ve D1 jeoteknik birimleri için farklı yöntemlerle belirlenmiş taşıma gücü değerleri | 160 |

SEMBOLLER DİZİNİ

| | |
|-----------|--|
| a | : Kaya kütle sabiti |
| a_r | : Artık kaya kütle sabiti |
| A_B | : Patlatma düzeltmesi |
| A_S | : Gerilme düzeltmesi |
| A_W | : Başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme |
| B | : Yeraltı kazısının genişliği |
| B_{max} | : En büyük desteksiz açıklık |
| B_n | : Dayanım modülü |
| C | : Tavan/duvar faktörü |
| C_{f1} | : Düzeltme faktörü |
| C_o | : Süreksizlik yönelim faktörü |
| c_p | : Doruk kohezyon |
| D | : Örselenme faktörü |
| D_b | : Blok çapı |
| D_e | : Eş değer boyut |
| D_e | : En küçük kesit alanı |
| P | : Yenilme anında kaydedilen yük |
| DF | : İndirgenme katsayısı |
| D_t | : Yeraltı kazısının genişliği |
| E | : Elastisite modülü |
| E_m | : Kaya kütleinin deformasyon modülü |
| ESR | : Kazı destek oranı |
| F | : Boyut düzeltme faktörü |
| G | : Jeotermik gradyan |
| G_s | : Güvenlik sayısı |
| GSI | : Jeolojik dayanım indeksi |
| G_w | : Yeraltı suyu durumu |
| H | : Yeraltı kazısının derinliği |
| I_f | : Süreksizlik aralık indeksi |
| IL | : Kaya kütle yapısının kenetlenme durumu |

| | |
|-------------|---|
| $I_{s(50)}$ | : Düzeltilmiş nokta yük dayanım indeksi |
| I_s | : Düzeltilmemiş nokta yük dayanım indeksi |
| J_a | : Süreksizlik yüzeyi bozunma değeri |
| jA | : Süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü |
| jC | : Süreksizlik faktörü |
| JCS | : Süreksizlik yüzeyinin tek eksenli basınç dayanımı |
| jL | : Süreksizlik uzunluk faktörü |
| J_n | : Süreksizlik takımı sayısı |
| JP | : Süreksizlik dayanım azaltma faktörü |
| J_r | : Süreksizlik pürüzlülük değeri |
| jR | : Süreksizlik pürüzlülük faktörü |
| JRC | : Süreksizlik yüzeyi pürüzlülük katsayısı |
| Jsi | : Görünür ara uzaklık |
| J_v | : Hacimsel eklem sayısı |
| J_w | : Süreksizlik suyu azaltma faktörü |
| L | : Uzunluğu 10 cm ve daha büyük olan karot parçalarının boyu |
| L_b | : Bulon uzunluğu |
| m_b | : Kaya kütle sabiti |
| m_{br} | : Artık kaya kütle sabiti |
| m_i | : Kaya malzemesi sabiti |
| n | : İlerleme aralığındaki karot parçalarının sayısı; |
| NATM | : Yeni Avusturya tünel açma yöntemi |
| N_j | : Süreksizlik takım sayısı faktörü |
| N_β | : Normalleştirilmiş iç yüke bağlı bir fonksiyon |
| Q | : Kaya kütle kalitesi |
| Q' | : Modifiye Q |
| Q_C | : Normalize Q |
| Q_N | : SRF içermeyen Q |
| Q_w | : Duvar faktörü |
| q_a | : İzin verilebilir taşıma gücü |
| q_u | : Nihai taşıma gücü |
| R | : Taze yüzeyin Schmidt çekici geri tepme sayısı |
| r | : Süreksizlik yüzeyinin Schmidt çekici geri tepme sayısı |

| | |
|---------------|---|
| R_f | : Dolgu puanı |
| RM_i | : Kaya kütle indeksi |
| RMR | : Kaya kütle puanlaması |
| R_{pl} | : Plastik zonun yarıçapı |
| RQD | : Kaya kalite göstergesi |
| R_r | : Pürüzlülük puanı |
| R_w | : Bozunma puanı |
| s | : Kaya kütle sabiti |
| S_1 | : En büyük süreksizlik ara uzaklığı |
| S_3 | : En küçük süreksizlik ara uzaklığı |
| SCR | : Süreksizlik yüzey koşulu puanı |
| SL | : Gerilme seviyesi |
| S_n | : Gözlenen her bir süreksizlik takımı için bulunan ara uzaklık değeri |
| s_r | : Artık kaya kütle sabiti |
| SR | : Yapısal özellik puanı |
| SRF | : Gerilme azaltma faktörü |
| U_t | : Toplam yer değiştirme miktarı |
| V_b | : Blok hacmi |
| V_p | : Elastik ses dalgasının boyuna yayılma hızı |
| V_s | : Elastik ses dalgasının enine yayılma hızı |
| W_t | : Duvar yüksekliği |
| XRD | : X-ışını kırınımı |
| α | : Tilt deneyi sonucunda belirlenen kayma açısı |
| β | : Blok şekli faktörü |
| β_j | : Süreksizlik eğim açısı |
| δ_1 | : Süreksizlik doğrultusu ile ölçüm hattı arasındaki açı |
| ζ_n | : Kaya kütlelerinin sıklığı |
| ρ | : Kaya malzemesinin yoğunluğu |
| σ_1 | : En büyük asal gerilme |
| σ_3 | : En küçük asal gerilme |
| σ_{ci} | : Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı |
| σ_{cm} | : Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı |
| σ_{cp} | : Doruk tek eksenli basınç dayanımı |

| | |
|-----------------|--|
| σ_{cr} | : Artık tek eksenli basınç dayanımı |
| σ_h | : Yatay gerilme |
| σ_{tp} | : Doruk çekme dayanımı |
| σ_{tr} | : Artık çekme dayanımı |
| σ_v | : Düşey gerilme |
| σ_θ | : En büyük teğetsel gerilme |
| ν | : Poisson oranı |
| β | : Lineer ısı genleşme katsayısı |
| ϕ_b | : Temel sürtünme açısı |
| ϕ_p | : Doruk sürtünme açısı |
| ϕ_r | : Artık sürtünme açısı |
| σ_n | : Süreksizlik düzlemine etki eden normal gerilme |
| τ | : Kayma gerilmesi |
| γ | : Birim hacim ağırlık |
| λ | : Süreksizlik sıklığı |

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizdeki araç sayısı ve trafikteki araç kalitesi, büyüyen ve küreselleşen ekonomiye bağlı olarak artmakta ve gelişmektedir. Bu gelişme beraberinde yeni, geniş ve daha konforlu yolların yapımını gündeme getirmiştir. Ülkemizin dağlık coğrafyası düşünüldüğünde, inşa edilen yolların standartlarının yükseltilmesi için doğal engellerin çeşitli mühendislik yapıları aracılığı ile aşılması gerekmektedir. Bu mühendislik yapılarından biri de, son yıllarda yol ağında sayısı giderek artan karayolu tünelleridir. Günümüzde şehirlerin büyümesi yol standartlarının iyileştirilmesi, savunma ve sığınak ihtiyaçlarının giderek artması, arazinin engebeli veya değerli oluşu gibi nedenlerle bu yapıların inşasına daha fazla gereksinim duyulmaktadır. Özellikle dağlık bölgelerde planlanan çeşitli karayolu projelerinde, yüksek standartlı yolların yapılması için, tünellerin sıkça başvurulan mühendislik yapıları olduğu da bir gerçektir. Karayolu ve büyük demiryolu tünellerinin sayısı ve kalitesi dünyada da artmakta ve gelişmektedir. Ülkemiz, dünyadaki bu gelişmelere uzak kalmamakta ve bu konuyla ilgili gerekli yatırımları yapmaktadır. Ayrıca, teknik personelin yetişmesi ve uygulamaların kalitesinin artması için gerekli çalışmaları da gerçekleştirmektedir (Öztürk, 2007; Satıcı, 2007).

Tüneller, geometrilerinin ve üstlerine gelen yüklerin karmaşıklığı, kaya ve kaplama malzemelerinin özellikleri ve karşılıklı etkileşimleri nedeniyle projelendirmesi oldukça güç yapılardır. Bu nedenle tünel kazılarının, emniyeti sağlayacak en uygun tahkimat tasarımına ve en az maliyetli kazı dizaynına göre projelendirilmesi gerekmektedir. Ülkemizde tünelcilik uygulamalarının sayısının giderek artacağı ve gelişeceği düşüncesinden hareketle bir karayolu tüneline kazılacak kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerini belirleyerek tünelin sayısal modelini oluşturmak, bu alanda çalışanlara katkı sağlayacaktır. Bu amaçla, 5.288 m uzunluğu ile Türkiye'nin projelendirilen en uzun çift tüp tüneli olacak Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tüneli pilot çalışma alanı olarak seçilmiş, proje güzergahında ve çevresinde çalışmanın amacına uygun olarak mühendislik jeolojisi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bağlantı yolları ile birlikte toplam 7.288 m uzunluğunda olacak proje, Hopa-Borçka Devlet Yolu'nun 6.5. km'sinde başlamakta ve 14. km'sinde sona ermektedir. Ayrıca, proje kapsamında 2 adet hemzemin tünel giriş ve çıkış kavşağı, Subaşı Viyadüğü

ve 7 Nolu Köprü de inşa edilecektir. Cankurtaran Tüneli'nin tamamlanması ile birlikte Karadeniz Sahil Yolu Projesi kapsamında Bolaman-Perşembe arasında inşa edilen ve Türkiye'nin en uzun karayolu tüneli olan 3.775 m uzunluğundaki Nefise Akçelik Tüneli, bu unvanını kaybedecektir. Kış aylarında trafik güvenliği açısından sorun yaratan Hopa-Borçka karayolundaki Cankurtaran Tüneli'nin yapım çalışmalarının tamamlanmasıyla Artvin, Erzurum, Kars ve Ardahan yönüne gidecek yol mesafesinin kısılması ve ulaşım masraflarının azalmasının yanı sıra yol güzergahı daha güvenli bir konuma ulaşacaktır. Proje sayesinde, kış mevsiminde yoğun kar yağışı alan Cankurtaran Tepe Mevkii'ndeki kar mücadelesi giderlerinden tasarruf edileceği gibi mevcut yoldaki ortalama eğim de % 4'lere düşürülecektir. Cankurtaran Tüneli'nin yapımının gerçekleşmesiyle kar ve buzlanmanın sorun yarattığı 900 m kotlarındaki Cankurtaran Tepesi'nden uzaklaşılacak, bu şekilde Karadeniz Bölgesi ile Doğu Anadolu Bölgesi arasında önemli bir köprü görevi üstlenen bu güzergah, yaklaşık 12 km kısalarak, yol konforu ve trafik güvenliği açısından önemli ölçüde fayda sağlanacaktır. Projenin hizmete girmesi ile ağırlıklı olarak ağır vasıta trafiğine hizmet eden yolda trafik güvenliği, can ve mal emniyetinin tam olarak sağlanması, seyahat süresinin kısaltılması, yöredeki turizm ve sanayinin gelişmesine katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Otoyol tünelleri projelendirilirken ilk önce arazi çalışmaları ile uygun yol güzergahı tespit edilir, daha sonra bu güzergahtaki litolojik birimlerin neler olduğu ve bu birimlerin mühendislik özelliklerinin nasıl değiştiği karotlu sondajlar yapılarak belirlenmeye çalışılır. Karot örnekleri üzerinde yapılan deneyler ve ölçümlerle tünel kayasının mühendislik özellikleri tespit edilmeye çalışılır. Bu veriler yardımıyla tünel inşası sırasında uygulanacak en uygun destek elemanlarının neler olabileceğine karar verilir. Yapılan sondajlardan elde edilen veriler derlenerek bir jeolojik ve jeoteknik etüd raporu hazırlanır. Tünel inşası için bir yol gösterici olarak kullanılan bu rapor, yapım aşamasına geçildiğinde yeterli olmamaktadır. Tünelcilikte kazı öncesi hazırlanan jeolojik ve jeoteknik etüd raporlarının kazı aşamasına geçildiğinde uygulanabilir olması hem maliyet hem de güvenlik açısından oldukça önemlidir. Proje çalışmaları kapsamında yapılacak detay jeoteknik çalışmalarla tünelin projelendirilmesi için gerekli verileri toplamak ve doğru yorumlamak kazı aşamasında yaşanacak sorunları ortadan kaldıracaktır. Genellikle

projelendirme aşamasında tünel güzergâhı boyunca yapılan karotlu sondajlardan elde edilen veriler kullanılarak kaya kütlesinin kalitesi hakkında kabaca bir bilgiye ulaşılmaktadır. Ancak karışık jeolojik yapıya sahip örtülü sahalarda sadece geniş aralıklarla yapılan karotlu sondajlara göre değerlendirme yapmak kazı aşamasında beklenmedik sorunlarla karşılaşılmasına neden olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, yeraltı kazıları için projelendirme aşamasında hazırlanan jeolojik ve jeoteknik etüd raporlarının inşaat aşamasındaki durumu tam anlamıyla yansıtması ve projenin maliyet hesaplamaları açısından yeniden düzenlenmemesi için hangi jeoteknik çalışmaların nasıl yapılması gerektiği uygulama sırasına göre belirlenmiştir. Bu nedenle, pilot çalışma alanı olarak seçilen Cankurtaran Tünel Projesi güzergahında ve çevresinde kazı öncesi detay mühendislik jeolojisi çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu çalışmanın büyük yeraltı kazıları için hazırlanacak jeolojik ve jeoteknik etüd raporlarına yol gösterici bir kılavuz olması amaçlanmıştır.

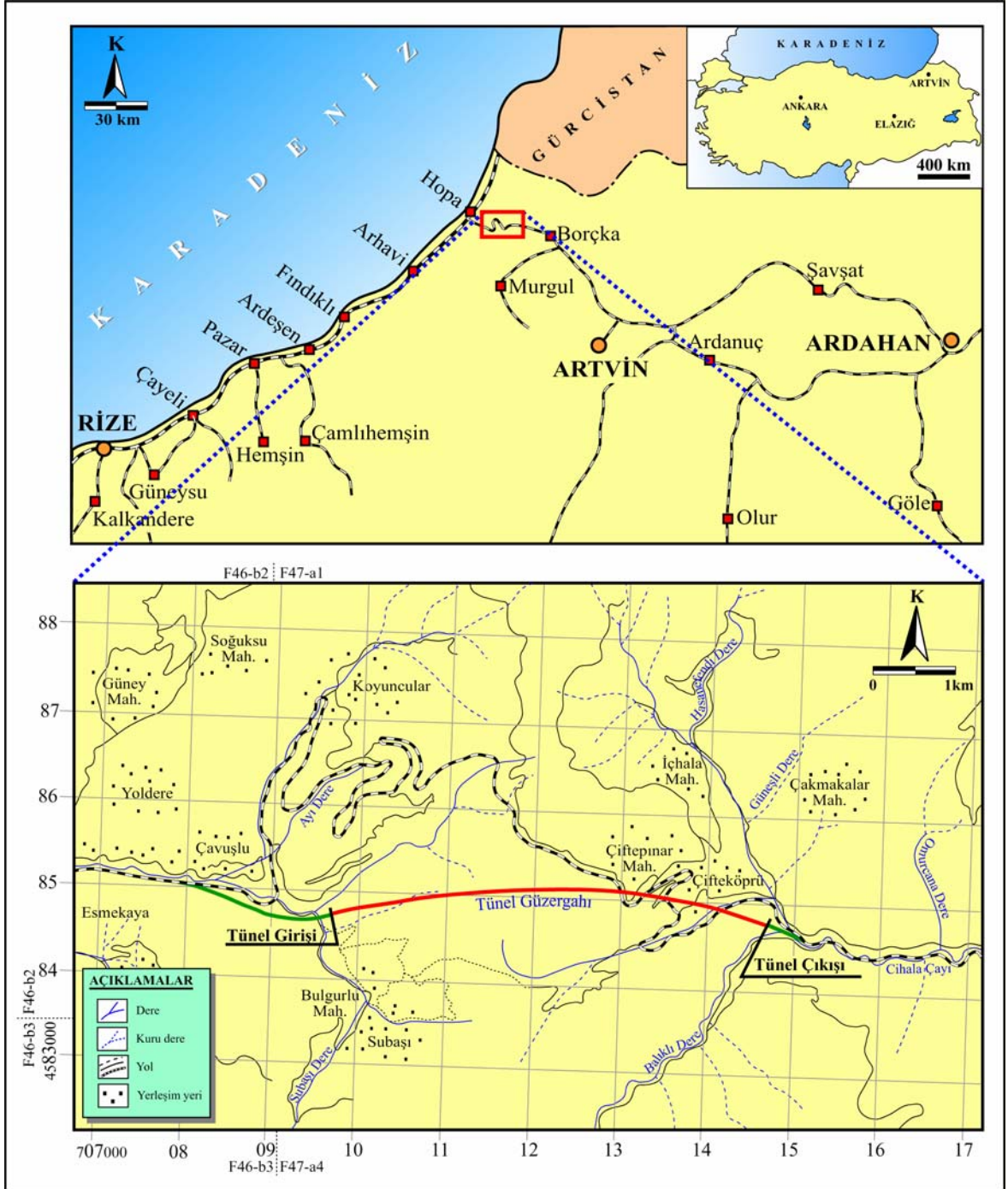
Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde bulunan jeoteknik birimlerin mühendislik özellikleri arazi çalışmalarıyla, kaya malzemelerine ait özellikler ise laboratuvar çalışmaları yapılarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla tünel güzergahında yer alan jeoteknik birimler tünelcililikte yaygın olarak kullanılan ampirik sınıflama sistemleri yardımıyla sınıflandırılmış ve her bir jeoteknik birim için uygun ön destekleme elemanları belirlenmiştir. Ampirik analizlerle belirlenen ön tahkimat tasarımı da sayısal analizlerle desteklenmiştir. Tünel dışında kazılacak portal ve yol yarma şevlerinin duraylılığı ile viyadük ve köprü ayaklarının inşa edileceği jeoteknik birimlerin taşıma gücü özellikleri de detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca, tünel güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimlerin kazılabilirlik özellikleri ve kazı sırasında uygulanabilecek en uygun kazı yöntemi ampirik sınıflama sistemleri yardımıyla belirlenmiştir.

1.3. Çalışma Alanının Genel Özellikleri

1.3.1. Coğrafik Durum

Çalışma alanı, Doğu Karadeniz Bölümü'nde 1/25.000 ölçekli Artvin F47-a1 paftasının sınırları içinde yer almaktadır. Hopa-Borçka karayolunun 7+980-13+208 km'leri arasında çift tüp olarak inşa edilmesi planlanan Cankurtaran Tüneli, Hopa İlçesi'nin

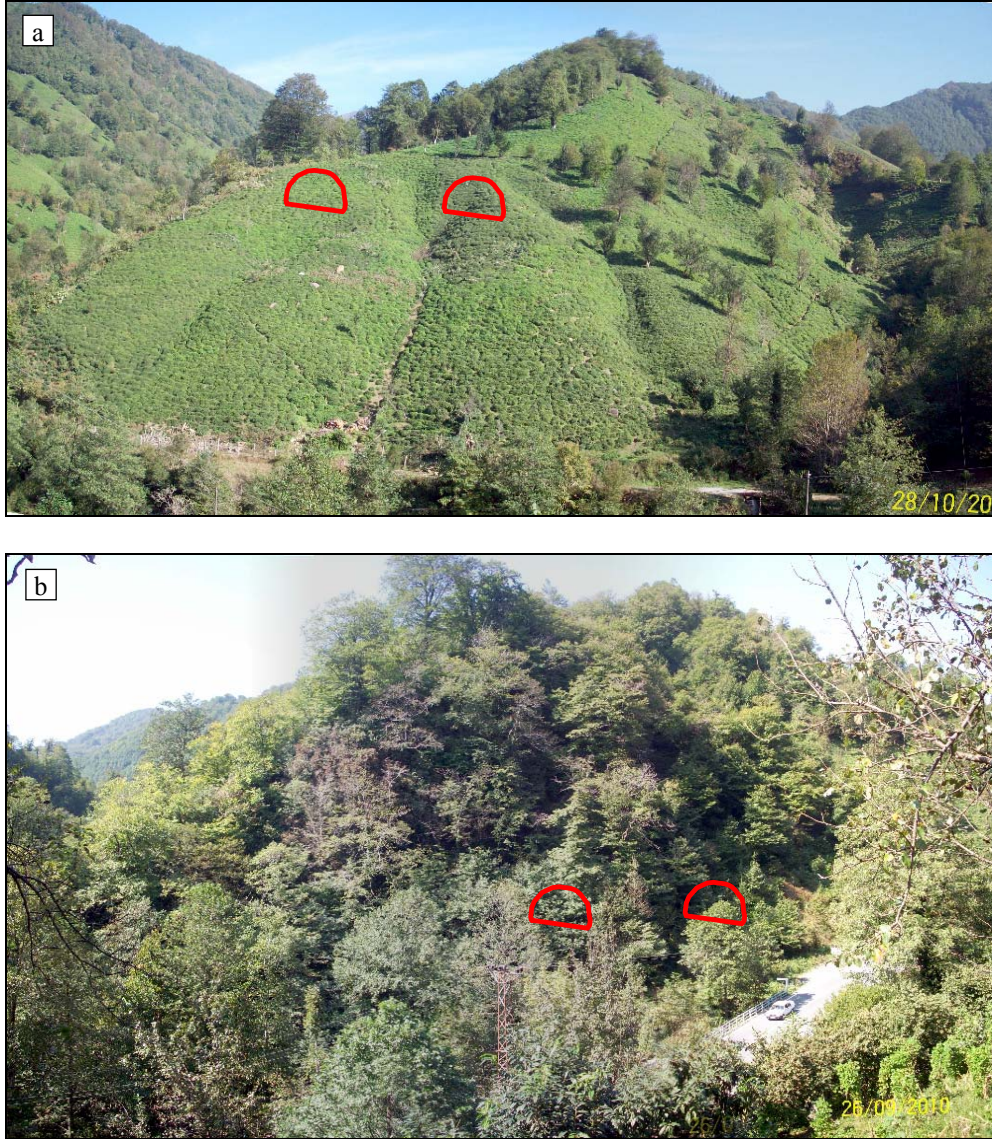
yaklaşık 6 km güneydoğusunda, Borçka İlçesi'nin ise yaklaşık 10 km kuzeybatısında yer almaktadır (Şekil 1.1). Dağların denize paralel olarak uzandığı kıyı şeridi üzerinde kurulan ilçede yüksek sıra dağlar ve derin vadiler hakimdir. Bu dağlar, Karadeniz kıyısının hemen gerisinde uzandığı için kıyı bölgelerde düz alanlar kısıtlıdır. Bölgede yükselti kuzey-güney yönünde artmaktadır.



Şekil 1.1. Çalışma alanına ait yer buldurular haritası

1.3.2. Yerleşim ve Ulaşım

Yörede, nüfusun çoğu dağlar ve kıyı şeridi arasında kalan dar ve düzlük alanlarda bulunmaktadır. Bununla birlikte, sahile dik vadiler boyunca da Karadeniz Bölgesi'nin tipik yerleşim özelliği olan dağınık yerleşim görülmektedir. İnceleme alanındaki en önemli yerleşim birimleri Hopa İlçesi'ne bağlı Çavuşlu, Esmekaya, Koyuncular ve Subaşı Köyleri ile Borçka İlçesi'ne bağlı Çifteköprü, Aydın, Düzköy ve Fındıklı Köyleri'dir. Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümü Subaşı Köyü Mevkii'nde (Şekil 1.2a), çıkış bölümü ise Çifteköprü Köyü Mevkii'nde bulunmaktadır (Şekil 1.2b).



Şekil 1.2. Cankurtaran Tüneli'nin giriş (a) ve çıkış (b) bölümleri

Hopa İlçesi'ne ulaşım Karadeniz Devlet Sahil Yolu ile sağlanmaktadır. Buradan itibaren Borçka İlçesi'ne giden oldukça virajlı ve tek şeritli karayolunun yaklaşık 6.5. km'sinden Subaşı Köyü'ne giden beton kaplamalı yol yardımıyla tünelin giriş bölümüne ulaşılmaktadır. Cankurtaran Geçidi'nden sonra Hopa-Borçka karayolunun 14. km'sinde ise tünelin çıkış bölümüne ulaşılmaktadır.

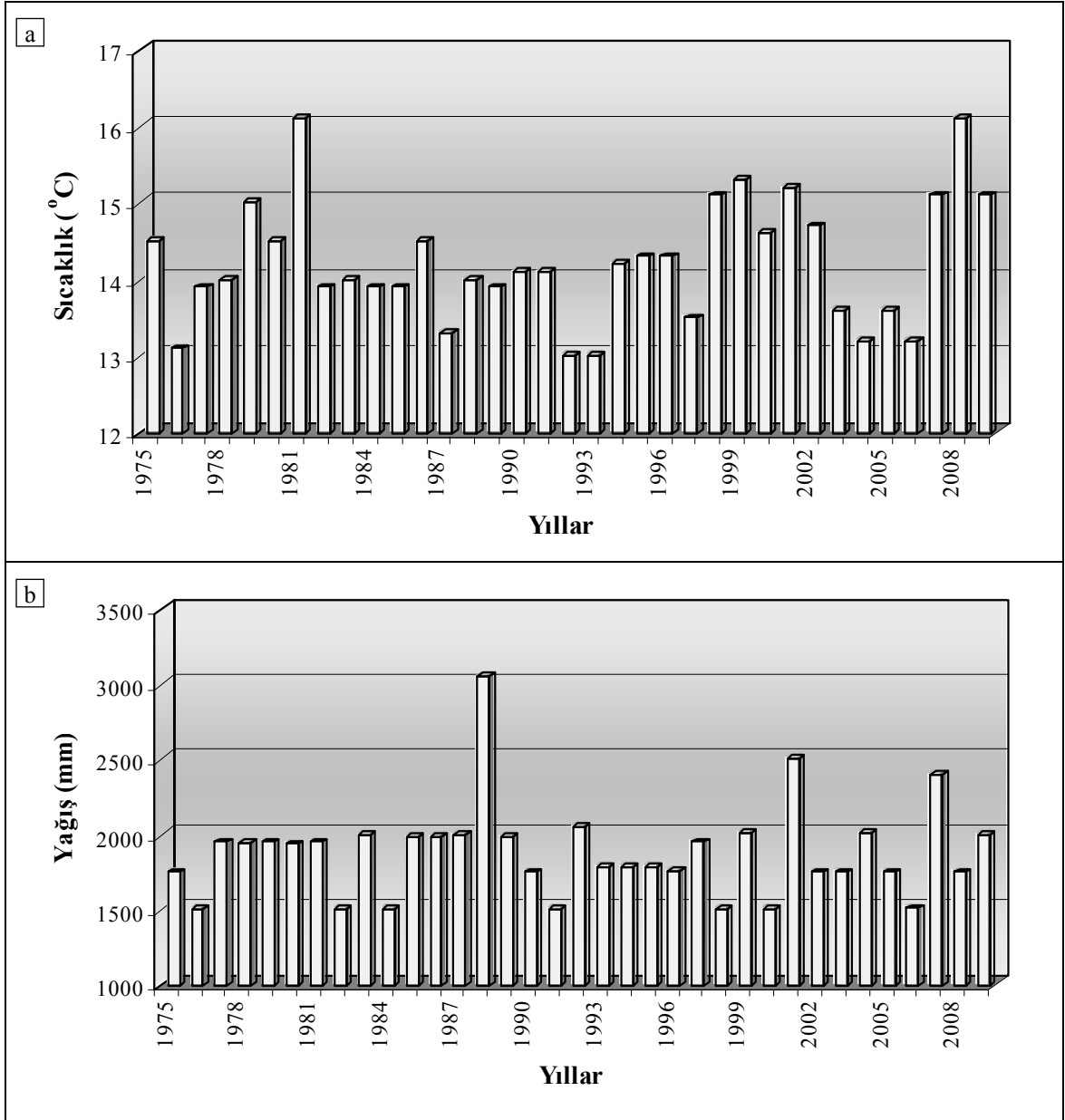
1.3.3. Akarsular

Çalışma alanı çevresinde KD-GB doğrultulu irili ufaklı çok sayıda akarsu yer almaktadır. Bu akarsuların içinde en yüksek debili olanları Hopa ve Cihala Çayları'dır. Diğerleri ise Ayı, Balıklı, Güneşli, Hasanefendi, Omurcana ve Subaşı Dereleri'dir. Bu dereler her mevsim yağan yağışlarla beslenmektedir.

1.3.4. İklim ve Bitki Örtüsü

Çalışma alanında Doğu Karadeniz'e özgü ılıman bir iklim hakimdir. Karadeniz'in yağış ve sıcaklık üzerindeki etkisi sahil şeridinde daha net, iç kesimlere gidildikçe etkisi biraz daha azalmış olarak hissedilir. Yazları serin, kışları ılık ve hemen hemen her mevsim yağışlı bir iklim tipinin hakim olduğu yörede, nem miktarı yüksektir. Kar yağışı genellikle Şubat aylarına rastlar. Rüzgârların hakim yönü kuzeybatı-güneydoğu doğrultusundadır. Hopa meteoroloji istasyonunun 1975-2009 yılları arasındaki ortalama sıcaklık değerlerine göre ortalama sıcaklık değeri 14.3°C, ortalama yıllık yağış değeri ise 1863.4 mm'dir (Şekil 1.3). Şekil 1.3b'de verilen yıllık ortalama yağış değerleri incelendiğinde son yıllarda artış yönünde bir değişim olduğu görülmektedir.

Yağış miktarının fazla oluşu çoğunlukla kayın, kestane ve kızılğaçtan oluşan yoğun orman örtüsünün gelişimini sağlamıştır. Tarıma elverişli alanların çok az olduğu yörede, orman ürünleri halkın temel geçim kaynağını oluşturmaktadır. Ayrıca, Hopa-Borçka karayolu çevresindeki uygun alanlarda çay tarımı yapılmaktadır.



Şekil 1.3. Ortalama sıcaklık (a) ve yağış (b) değerlerinin yıllara göre değişimi (Yılmaz vd., 2010)

1.4. Literatür Çalışması

İnceleme alanını da içine alan bölgede çeşitli amaçlara yönelik geniş ölçekli pek çok çalışma yapılmıştır. Çalışma alanı ve yakın civarında yapılan genel jeoloji ve mühendislik jeolojisi çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

1.4.1. Doğu Karadeniz Bölümü'nün Genel Jeolojisi

Ketin (1966), Türkiye'yi orojenik gelişimi esas alarak kuzeyden güneye doğru Karadeniz Dağları, Anatolidler, Toridler ve Kenar Kıvrımları Kuşağı şeklinde dört ana tektonik birliğe ayırmıştır. Ketin ve Canitez (1972) bu tektonik birlikleri yeniden düzenleyerek, Karadeniz Dağları'nı "Doğu Karadeniz Dağları" ve "Batı Karadeniz Dağları" şeklinde ikiye ayırmıştır. Doğu Karadeniz Dağları'ndaki Geç Kretase yaşlı kayaçlar, kuzey ve güney bölgelerinde farklılıklar gösterdikleri için güney (iç) ve kuzey (dış) bölümlere ayrılmıştır (Akın,1978; Gedikoğlu vd., 1979; Özsayar vd., 1981). Bektaş (1986), Doğu Karadeniz magmatik yayını farklı magmatik, tektonik ve sedimantolojik evrim aşamalarına göre kuzeyden güneye doğru kuzey zon, güney zon ve eksen zonu olmak üzere üç alt zona ayırmıştır.

Doğu Karadeniz Dağları'nda temeli oluşturdukları kabul edilen Paleozoyik yaşlı kayaçlar, kristalen şist ve granitlerden oluşmaktadır. Doğu Karadeniz Dağları Güney Zonu'nda egemen olan bu kayaçlar (Zankl, 1961, 1962; Açar, 1977; Gedikoğlu, 1978), Doğu Karadeniz Dağları Kuzey Zonu'nda seyrek olarak görülürler (Türk-Japon Ekibi, 1985; Boynukalın, 1990). Temeli oluşturan metamorfik kayaçlar, Paleozoyik yaşlı granitoidik kayaçlar tarafından kesilmişlerdir (Çoğulu, 1975). Granitoidik kayaçlar, büyük plütonik kütleler halinde Gümüşhane Yöresi'nde ve Gümüşhane-Köse arasında (Tokel, 1972; Çoğulu, 1975; Yılmaz, 1976; Özdoğan, 1992); küçük mostralalar halinde Giresun güneyinde, metamorfik kayaçlarla birlikte görülmektedir (Schultze-Westrum, 1961).

Gümüşhane Yöresi'nde Paleozoyik yaşlı Gümüşhane Granitoyidi üzerine aşınma uyumsuzluğu ile gelen Liyas yaşlı volkano-tortul kayaçlar konglomera, kumtaşı, kireçtaşı, marn ve volkanitlerden oluşmaktadır. Schultze-Westrum (1961), Giresun-Aksu civarında, Liyas'tan başlayarak Erken Kretase sonuna kadar devam eden bazik volkanizmayı, "Alt Bazik Seri" olarak isimlendirmiştir.

Malm-Erken Kretase yaşlı Berdiga Kireçtaşları, Liyas yaşlı volkano-tortul kayaçların üzerine uyumlu olarak gelir. Doğu Karadeniz Dağları Güney Zonu'nda geniş yayımlı olmalarına karşılık, Kuzey Zon'da mercekler ve olistrostromlar halinde bulunur. Plütonik kayaçlar, Permo-Karbonifer'den Eosen sonuna kadar geniş bir yaş aralığına sahiptir ve başlıca gabrodan granite kadar değişen türdeki bazik ve asidik bileşimli kayaçlardan oluşmuştur. Granitik plütonlar, Paleozoyik, Kretase ve Eosen olmak üzere başlıca 3

dönemde yerleşmiştir. Bunlardan Paleozoyik yaşlı Gümüşhane Granitoyidi, metamorfik kayaçları keserek yerleşmiştir (Yılmaz, 1972; Çoğulu, 1975).

Jura-Kretase-Paleosen granitoyidleri, yitimle ilişkili volkanik ve/veya volkanoklastik kayaçlarla dokanak ilişkisindedir (JICA, 1985; Gedik vd., 1992; Köprübaşı, 1993; Yılmaz ve Boztuğ, 1996; Güngör vd., 1997; Köprübaşı vd., 2000; Kaygusuz, 2000; Boztuğ vd., 2002; Şahin vd., 2004). Daha az sayıdaki Eosen ve sonrası granitler ise, dar alanlarda tüm birimleri kesmiş olarak görülürler (Gedik vd., 1992; Yılmaz ve Boztuğ, 1996; Aslan vd., 1999; Boztuğ vd., 2002; Topuz vd., 2002; Arslan ve Aslan, 2006).

Doğu Karadeniz Dağları'nda Geç Kretase, iki farklı özellikte görülmektedir. Doğu Karadeniz Dağları Kuzey Zonu'nda magmatik kayaçlar egemen iken, Doğu Karadeniz Dağları Güney Zonu'nda tortul kayaçlar yer alır. Doğu Karadeniz Dağları Güney Zonu'nda Geç Kretase, Berdiga Formasyonu üzerine açılmal uyumsuzlukla gelen kumlu kireçtaşları ile başlamaktadır. Bu birimi, bordo renkli kireçtaşları uyumlu olarak üstlemektedir (Tokel, 1972; Eren, 1983). Geç Kretase'de kılavuz seviye olarak kabul edilen kırmızı kireçtaşları, Güney Zon'da tek bir seviye halinde ve Geç Kretase'nin tabanında görülmekte, Kuzey Zon'da ise birkaç seviye halinde, volkaniklerle ara katkılı olarak bulunmaktadır (Bektaş, 1984). Doğu Karadeniz Dağları Kuzey Zonu'nda, Geç Kretase'nin tabanı tartışmalıdır.

Schultze-Westrum'a (1961) göre Erken Kretase'de başlayan Alt Bazik Seri, Geç Kretase'nin başında da devam etmiş, Geç Kretase'de Alt Bazik Seri'ye *Hippurites*'li kireçtaşları ve tüffitik kireçtaşı-marn birimi eşlik etmiştir. Bunun üzerinde dasit ve piroklastitleri ile *İnoceramus*'lu kırmızı kireçtaşları yer almakta ve bunların üzerine de bazik volkanikler gelmektedir. Bu bazik volkanik kayaçlar kısmen Eosen'de de devam ederek "Üst Bazik Seri"yi oluşturmuşlardır.

Geç Kretase-Paleosen geçişi, Doğu Karadeniz Dağları'nda yer yer gözlenmektedir. Şarman (1975), Tirebolu'nun güneydoğusunda Geç Kretase kireçtaşlarının devamı olarak Paleosen yaşlı birimleri tespit etmiştir. Hopa-Cankurtaran (Artvin) Yöresi'nde volkanotortul seri, Geç Kretase'den Eosen'e kadar kesintisiz geçmektedir (Özsayar vd., 1981). Kale (Gümüşhane) Yöresi'nde Geç Kretase yaşlı filişle başlayan istif, uyumsuz olarak konglomera ve mikritik kireçtaşlarından oluşan Paleosen yaşlı Kale Formasyonu'na geçmekte ve uyumsuz olarak Eosen yaşlı Kabaköy Formasyonu ile örtülmektedir (Aliyazıcıoğlu, 1999).

Eosen, Karadeniz Dağları'nda genellikle Kretase ve Paleosen yaşlı birimler üzerine taban konglomerası ile gelmekte ve bunları andezit-bazalt ve piroklastitleri ile filiş

çökellerinden oluşan birimler üstlenmektedir. Gedikoğlu (1970), Çambaşı ve Gölköy Yöreleri'nde Eosen'in taban konglomerası ile başladığını belirtmiştir.

Oligosen, Trabzon, Ünye ve Fatsa Yöreleri'ndeki sahil kesimlerinde görülmektedir (Schultze-Westrum, 1961; Özsayar, 1971).

Neojen'e ait tortullar Trabzon-Akçaabat ve Rize-Pazar sahillerine yakın yerlerde mevcuttur (Özsayar, 1971; Yalçınlar, 1981).

Kuvaterner yaşlı oluşuklar ise traverten, alüvyon ve yamaç molozlarından oluşmaktadır.

1.4.2. Önceki Genel Jeoloji Çalışmaları

Ketin (1961), Murgul (Artvin) çevresinde etken olan yoğun denizaltı volkanik faaliyetinden söz etmiştir.

Kraeff (1963), Hopa-Murgul Bölgesi'nin jeolojisini ve maden yataklarını incelemiştir.

Koprivica (1976), Hopa-Arhavi Bölgesi'nin jeolojisini, yapısal özelliklerini, sülfid ve manganez zuhurlarını araştırmıştır.

Eyüboğlu (1978), "Artvin, Arhavi ve Tepeköy Yöreleri'nin Ayrıntılı Jeoloji Raporu" isimli çalışmasında bölgenin jeolojik özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Çapkinoğlu (1981), "Borçka-Çavuşlu (Hopa) Arasının Jeolojisi" isimli yüksek lisans tez çalışmasında bölgenin stratigrafisini, tektoniğini ve paleocoğrafyasını aydınlatmaya yönelik çalışmalar yapmıştır.

Özsayar vd. (1981), Bilenler (Artvin) Yöresi'nde yüzeylenen Geç Kretase yaşlı dasitik serinin üzerine gelen yastık debili bazik volkanitlerin stratigrafik konumlarını belirlemeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Yalçınlar (1981), "İspir, Pazar, Arhavi ve Yusufeli Arasındaki Bölgenin Jeolojisi" isimli çalışmasında bölgenin jeolojik özelliklerini ve maden zuhurlarını araştırmıştır.

Özsayar vd. (1982), "Ardanuç (Artvin) Yöresi'nin Jeolojisi" adlı çalışmasında, bölgede Mesozoyik ve Tersiyer yaşlı kayaların yüzeylediğini belirtmiştir.

Güven (1990), "Artvin-Borçka Arasında Kalan Bölgenin Jeolojisi ve Prospeksiyonu" adlı çalışmasında, stratigrafik istif ortaya koymuş ve bu istif içinde özellikle masif stratiform sülfid cevherleşmelerinin bulunduğunu tespit etmiştir.

Van (1990), “Pontid Kuşağında Artvin Bölgesi’nin Jeokimyası, Petrojenezi ve Masif Sülfid Mineralizasyonları” adlı doktora çalışmasında, yöreyi magmatik petroloji ve bununla ilgili masif sülfid birikimleri açısından incelemiştir.

Güven (1993), Karadeniz Bölgesi’nin 1/250.000 ölçekli metalojeni haritasını hazırlamış ve önceki çalışmaları yeniden derleyerek Doğu Karadeniz Dağları’nın (Pontidler) kuzey ve güney zonlarına ait iki farklı stratigrafik kolon kesit önermiştir.

Yılmaz vd. (1997), Türkiye-Gürcistan sınırı boyunca yapmış olduğu geniş ölçekli çalışmada, bölgede Geç Kretase’den Kuvaterner’e kadar değişik yaşta ve litolojide birimlerin yüzeyleme verdiğini belirtmiştir.

MTA (1998), “Artvin İli’nin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynakları” isimli çalışmasında yörenin jeolojisi, jeomorfolojisi, hidrojeolojisi, su ve toprak kirliliği hakkında bilgiler vermiştir.

Gündüz (1999), Gümüşhane Köyü (Ardanuç-Artvin) Yöresi’nde gözlenen cevherleşmelerin türünü belirlemeye yönelik çalışmalar yapmıştır.

Tüysüz (2000), Murgul masif sülfid yatağının jeolojisi, jeokimyası ve oluşumunu araştırmıştır.

Gökçe (2001), Çakmakkaya ve Damarköy sahalarında sıvı kapanımı, oksijen ve hidrojen izotopları jeokimyası uygulayarak yatakların oluşumunu incelemiştir.

1.4.3. Önceki Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları

Ertunç (1980), “Çoruh Havzası Olası Baraj Yerleri, Göl Alanları ve Tünel Güzergahlarının Mühendislik Jeolojisi” isimli çalışmasında, bölgede Liyas ve Geç Kretase yaşlı kayaçların yer aldığından bahsetmiş ve bu birimlerin mühendislik özelliklerini araştırmıştır.

Tarhan (1982), Artvin Graniti’ni baraj yeri olması açısından incelemiş, kaya malzemelerinin fiziko-mekanik ve süreksizliklerin özelliklerini belirlemeye yönelik mühendislik jeolojisi çalışmaları gerçekleştirmiştir.

Temelsu Mühendislik (1990), Cankurtaran Tüneli etüd proje ve mühendislik hizmetleri işi kapsamında kesin proje çalışmalarını yürütmüştür.

Çakıcı (2005), “Deriner (Artvin) Baraj Yeri Kaya Kütleli Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması” isimli çalışmasında, Deriner baraj yerinde yer alan granodiyorit kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerini incelemiştir.

Yüksel Proje (2007), Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yapılan proje çalışmaları kapsamında mühendislik jeolojisi çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu amaçla tünelin güzergahında ve çevresinde yer alan birimlerin jeolojik ve jeoteknik özelliklerini belirlemek için giriş bölümünde 3 (YSK2, YSK3, YSK4), çıkış bölümünde 1 (YSK8), tünel ekseninde de 3 (YSK1, YSK6, YSK7) adet olmak üzere topografik şartlardan dolayı toplam 7 adet temel sondaj kuyusu açabilmiştir. Açılan temel sondaj kuyularında yeraltı suyu gözlemleri yapmış ve kaya destekleme sınıflarını NATM'a göre belirlemiştir. Ayrıca, proje çalışmalarından sonra giriş bölümünde yapılacak tünel ve şev kazısı tasarımlarını yeniden düzenlemek amacıyla 6 (CGP1-6) adet sıg derinlikli ek temel sondaj kuyusu daha açmıştır.

Karslı (2009), Arhavi-Hopa (Artvin) arasındaki Geç Kretase yaşlı volkanik kayalarda açılan karayolu şevlerini, duraylılık açısından incelemiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Türkiye'nin projelendirilen en uzun çift tüp tüneli olan Cankurtaran Tünel Projesi güzergahında ve çevresi mühendislik jeolojisi açısından incelenmiştir. Çalışma alanı ve çevresinin jeolojisini tanımlamak amacıyla 1/25.000 ölçekli genel jeoloji haritası hazırlanmış ve yüzeylenen kayaçların stratigrafisi ortaya konmuştur. Genel jeoloji çalışmalarıyla elde edilen sonuçlar, inceleme alanı ve çevresinde önceden yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırılarak düzenlenmiştir.

Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İnce Kesit Hazırlama Laboratuvarı'nda yaptırılan ince kesitler, LEITZ marka polarizan mikroskopta incelenerek kayaçların mineralojik ve petrografik özellikleri belirlenmiş ve kayaç adlamaları yapılmıştır.

Proje güzergahında açılan 13 adet temel sondaj kuyusundan ve mostralardan alınan ölçümlerden ve örneklerden yararlanılarak jeoteknik çalışmalar için gerekli veriler elde edilmiştir. Yapılan detay jeolojik ve jeoteknik çalışmalar neticesinde, süreksizlik sıklığı ve litolojik özelliklerden yararlanarak jeoteknik birimler tanımlanmıştır. Her bir jeoteknik birim için belirlenen uygun lokasyonlarda hat etüdü yöntemi uygulanarak ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre süreksizliklerin özellikleri tanımlanmıştır. Hat etüdü çalışmaları ile süreksizliklere ait yönelim, ara uzaklık, açıklık, devamlılık, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığı, bozunma derecesi, dolgu malzemesinin özelliği ve yüzeylerindeki su durumu gibi özellikler tespit edilmiştir. Elde edilen bu veriler yardımıyla her bir jeoteknik birime ait Süreksizlik sıklığı (λ), RQD (Kaya kalite göstergesi) ve Hacimsel eklem sayısı (J_v) değerleri belirlenmiştir. Süreksizlik yüzeylerinin kayma dayanımı parametreleri ise Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen yenilme ölçütü kullanılarak saptanmıştır.

Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'nda her bir jeoteknik birimden alınan kaya malzemeleri üzerinde çalışmanın amacına uygun olan fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Bu amaçla birim hacim ağırlık, Schmidt çekici ve nokta yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen veriler yardımıyla Cankurtaran Tünel Projesi güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimler, Kaya kütle kalitesi (Q), Kaya kütle puanlaması

(RMR), Kaya kütle indeksi (RMi), Yeni Avusturya tünel açma yöntemi (NATM) ve Jeolojik dayanım indeksi (GSI) sınıflama sistemleri kullanılarak sınıflandırılmıştır.

Her bir jeoteknik birimi temsil etmesi amacıyla toplam 6 profilde, 12 kanallı Geometrics marka ve ES3000 model araştırma sismografi kullanılarak sismik kırılma ölçümleri alınmıştır. Elastik ses dalgasının boyuna (V_p) ve enine (V_s) yayılma hızları yardımıyla dinamik Poisson oranı (ν) değerleri belirlenmiştir.

Jeoteknik birimlere ait deformasyon modülü (E_m), tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}), kaya kütle sabitleri (m_b , s , a) ve artık kaya kütle sabitleri (m_{br} , s_r , a_r) ise araştırmacılar tarafından önerilmiş ampirik eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir.

Cankurtaran Tüneli'nde uygulanacak ön destek tasarımı ilk önce Q ve RMi kaya kütle sınıflama sistemleri ile belirlenmiş, daha sonra ampirik yöntemlerle belirlenen ön destek tasarımının uygulanabilirliği, sayısal analizler ile araştırılmıştır. Duraysızlık sorunu beklenen bölümler için yeniden destek tasarımı yapılmıştır. Sayısal analizler yapılırken sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Phase² v7.0 (Rocscience, 2008) programından yararlanılmıştır.

Tünelin giriş ve çıkış bölümlerinde açılacak portal ve yol yarma şevlerinde gelişebilecek süreksizlik kontrollü duraysızlıklar ilk önce Wyllie ve Mah (2004) tarafından önerilen birleşik kinematik analiz yöntemi ile incelenmiş, daha sonra şevlerde gelişmesi beklenen duraysızlıklar limit denge analizi yapan Swedge v5.0 (Rocscience, 2006) programı ile araştırılarak güvenlik sayısı değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, Phase² v7.0 (Rocscience, 2008) programı yardımıyla sayısal analizler yapılarak dairesel kayma türü duraysızlıklar araştırılmış ve duraysız şevler için destekleme önerileri yapılmıştır.

Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümüne Subaşı Viyadüğü, çıkış bölümüne de 7 Nolu Köprü inşa edileceğinden dolayı buradaki jeoteknik birimlerin taşıma gücü, kırıklı kaya kütleleri için Peck vd. (1974), Imai vd. (1976), Wyllie (1992), Kulhawy ve Carter (1992), Mehrotra (1992), Serrano vd. (2000) tarafından önerilmiş ampirik eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir.

Ayrıca, Cankurtaran Tüneli'nin güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimlerin kazılabilirlik özelliklerini belirlemek için, Pettifer ve Fookes (1994) ve Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemlerinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar yardımıyla kazı sırasında uygulanacak en uygun kazı yönetimleri belirlenmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Çalışma Alanı ve Çevresinin Genel Jeolojisi

Çalışma alanı ve çevresinde bulunan kayaçlar, litostratigrafik sınıflama ve adlama kuralları (NACS, 1983) esas alınarak tanımlanmıştır. İnceleme alanı ve çevresinde yaşlıdan gence doğru Geç Kretase yaşlı Subaşı Sırtı Formasyonu, Geç Maastrichtiyen-Paleosen yaşlı Cankurtaran Formasyonu, Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı Formasyonu, Eosen yaşlı Kabaköy Formasyonu ile Kuvaterner yaşlı alüvyonların ve yamaç molozlarının yüzeyleme verdiği belirlenmiştir. Çalışma alanı ve çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit Şekil 3.1’de, jeoloji haritası Şekil 3.2’de, jeolojik kesitler ise Şekil 3.3’de verilmiştir.

3.1.1. Subaşı Sırtı Formasyonu

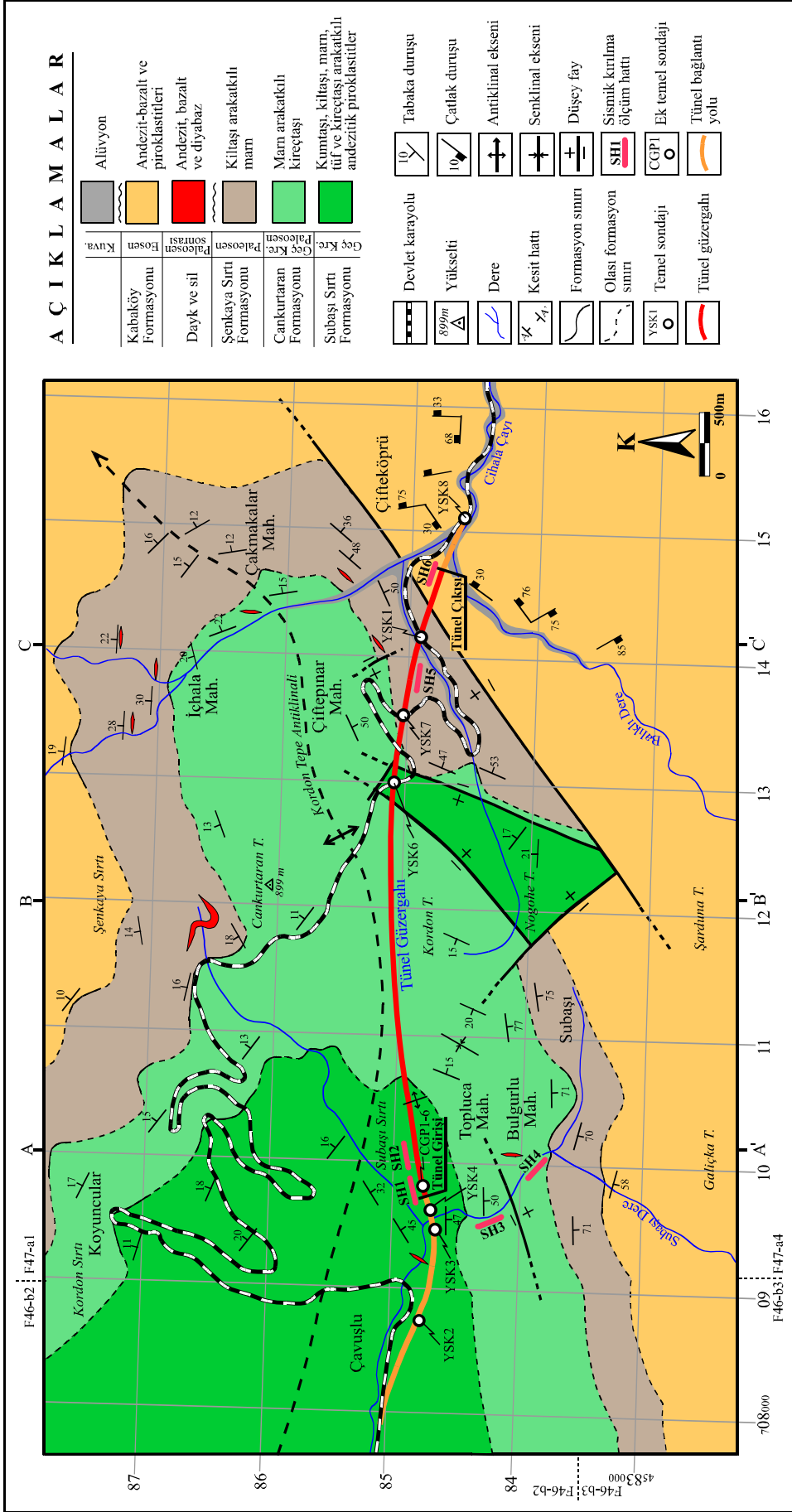
Formasyon adı Çapkınoğlu (1981) tarafından tipik yüzeylemelerinin görüldüğü Subaşı Sırtı’ndan türetilmiştir. Birim, Cankurtaran Tüneli’nin giriş bölümünün yer aldığı Subaşı Köyü civarında genişçe yüzeyleme vermektedir (Şekil 3.2). Formasyon, adını aldığı Subaşı Sırtı’ndan başka, Nogohe Tepe civarında da faylı olarak yüzeye çıkmaktadır. Formasyon, tabanda piroklastitlerle başlayıp kireçtaşı, marn, kumtaşı, tuf, silttaşı arakatkıları içeren ve tavana doğru tekrar piroklastit seviyesi ile son bulan bir volkano-tortul istif özelliğindedir (Şekil 3.4). Kalınlığı 600 m’ye varan bu birim, alttan Çağlayan Formasyonu (Güven, 1993), üstten Cankurtaran Formasyonu (Çapkınoğlu, 1981) ile sınırlandırılmıştır. Her iki sınır da uyumlu olup, alt sınır bariz renk ve litoloji farklılığı nedeniyle gayet belirgin, üst sınır ise tedrici geçişlidir.

Taban ve tavan seviyesinde bulunan aglomera ve volkanik breşler genellikle yeşil, mavimsi yeşil ve koyu yeşil renkli olup, bordo ve yeşil renkli andezit ve bazalt çakıl ve blokları içeren sıkı matriksli piroklastitlerdir. Tabakalanması masif olup, tedrici olarak tüfe geçerler. Bu özellik, büyük ölçekli bir dereceli tabakalanmaya karşılık gelmektedir.

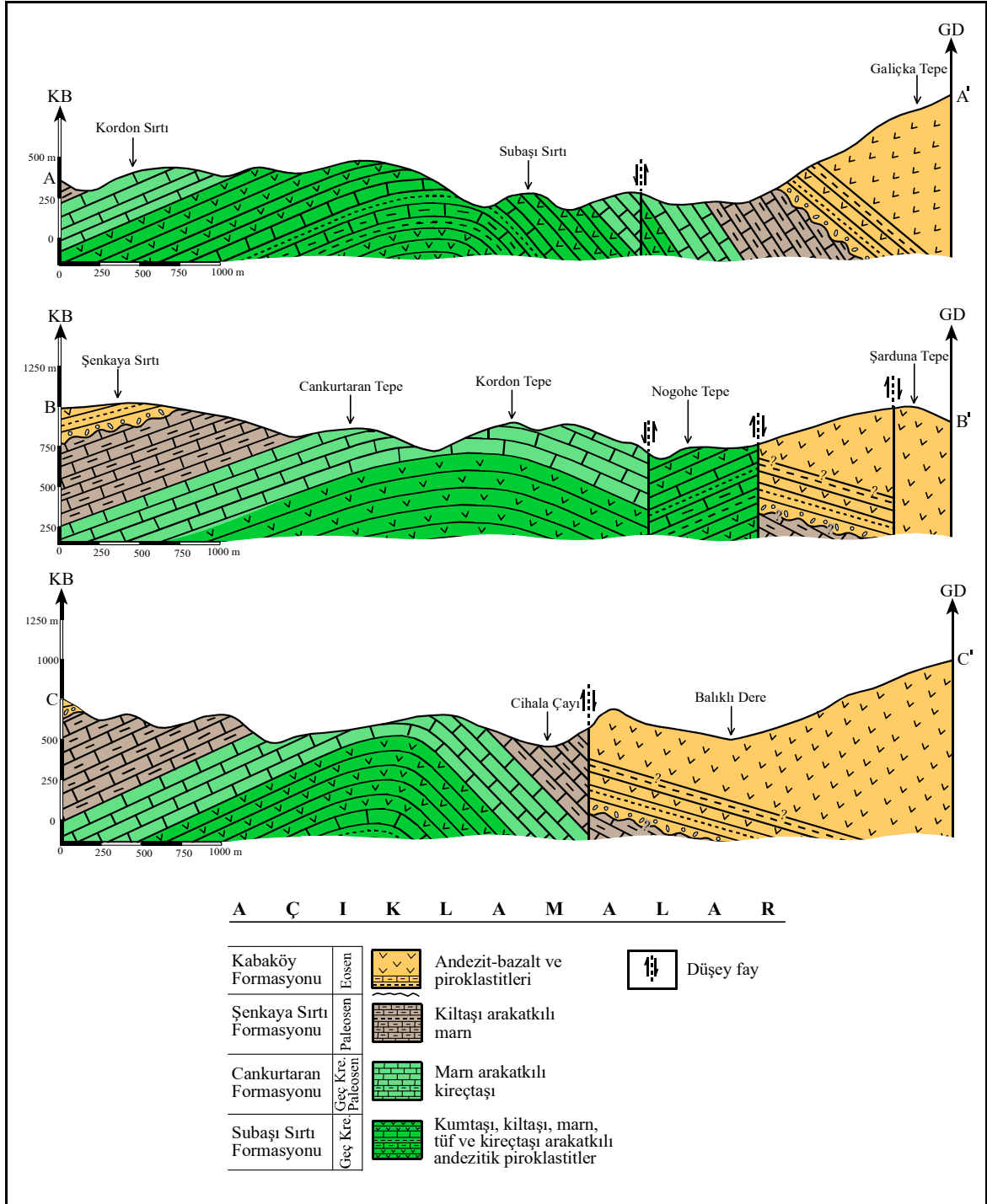
| Zaman | | M E S O Z O Y İ K S E N O Z O Y İ K | K | LİTOLOJİ | AÇIKLAMALAR | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------------------------------|---------------|----------|-------------|--|-----------------------------------|------------------------|--------------------|
| Devir | K. | | | | | Alüvyon / Yamaç molozu | | | |
| Devre | E R | | | | | | Andezit-bazalt ve piroklastitleri | | |
| Çağ | E O S E N | | | | | | | Kumtaşı, tüfit ve marn | |
| Formasyon | | | | | | | | | Taban konglomerası |
| Kalınlık | | | | | | | | | |
| | | Bazalt, diyabaz dayk ve sili | | | | | | | |
| Erken Santoni. - Erken Maast. | Geç Maast. | | Şenkaya Sirtı | 450 m | | | | | |
| Subaşı Sirtı | Cankurtaran | | | 350 m | | Tabanda ve tavanda ince marn araseviyeleri içeren ince-orta tabakalanmalı, orta kısımda kalın tabakalanmalı olan yeşilimsi gri-gri-bej renkli kireçtaşı | | | |
| | | | | 600 m | | Tabanda ve tavanda masif görümlü aglomera, volkanik breş ve tüfden oluşan andezitik piroklastitler, orta kısımda kumtaşı, kilaşı, marn, tüf ve kireçtaşı | | | |
| | | | Kabaköy | > 1000 m | | | | | |

Ölçeksizdir

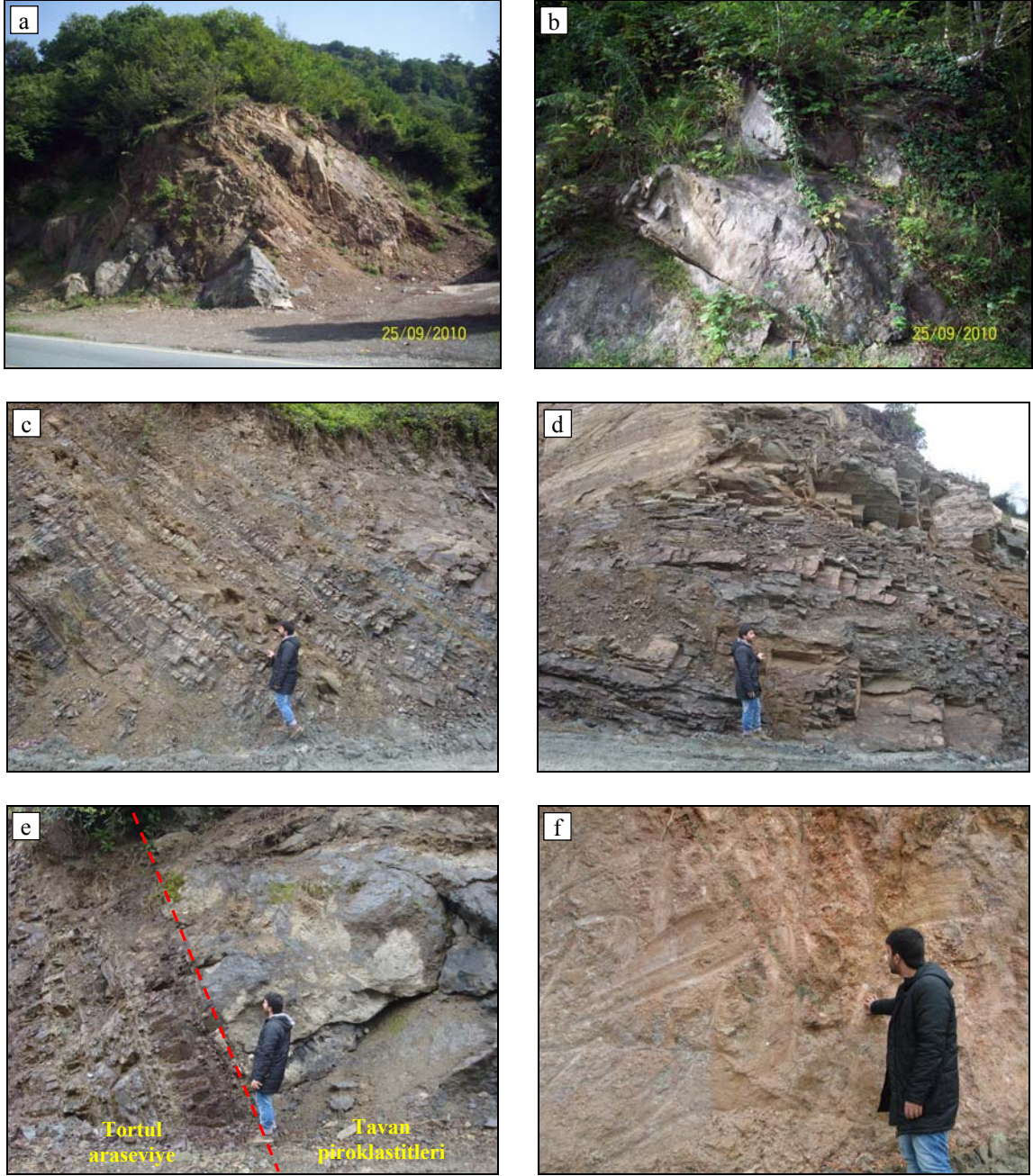
Şekil 3.1. Çalışma alanı ve çevresine ait genişletilmiş stratigrafik kolon kesit (Çapkınoğlu'ndan (1981) değiştirilerek)



Şekil 3.2. Çalışma alanı ve çevresine ait jeoloji haritası (Çapkınoğlu'ndan (1981) çok az değiştirilerek)



Şekil 3.3. Çalışma alanı ve çevresine ait A-A', B-B' ve C-C' jeolojik kesitleri



Şekil 3.4. Subaşı Sırtı Formasyonu'na ait taban piroklastitlerinin Şubaşı Köy yolu ayırımındaki (a) ve köy yolundaki (b) görünüşleri, tortul araseviyenin Cankurtaran Tüneli giriş bölümündeki (c ve d) görünüşü, tortul araseviye ve tavan piroklastitleri dokanağının (e) ve tavan piroklastitlerinin Cankurtaran Tüneli giriş bölümündeki (f) görünüşleri

Tüfler yeşil, mavimsi yeşil, sarımsı yeşil, açık yeşilimsi gri, mavimsi gri, koyu gri, bordo, açık pembe, kirli sarı ve turuncu renk tonlarında izlenir. Tabaka kalınlıkları inceden masife kadar değişir. Yaygın olarak laminalı yapıdadır. Çoklukla dağılgan olup, genellikle marn, seyrek olarak da kireçtaşları ile ardışıklı olarak bulunur. Tüf-marn geçişi tedrici olup,

geçiş seviyesi tüflü marn özelliğindedir. Yaygın olarak dereceli tabakalanma gösterir.

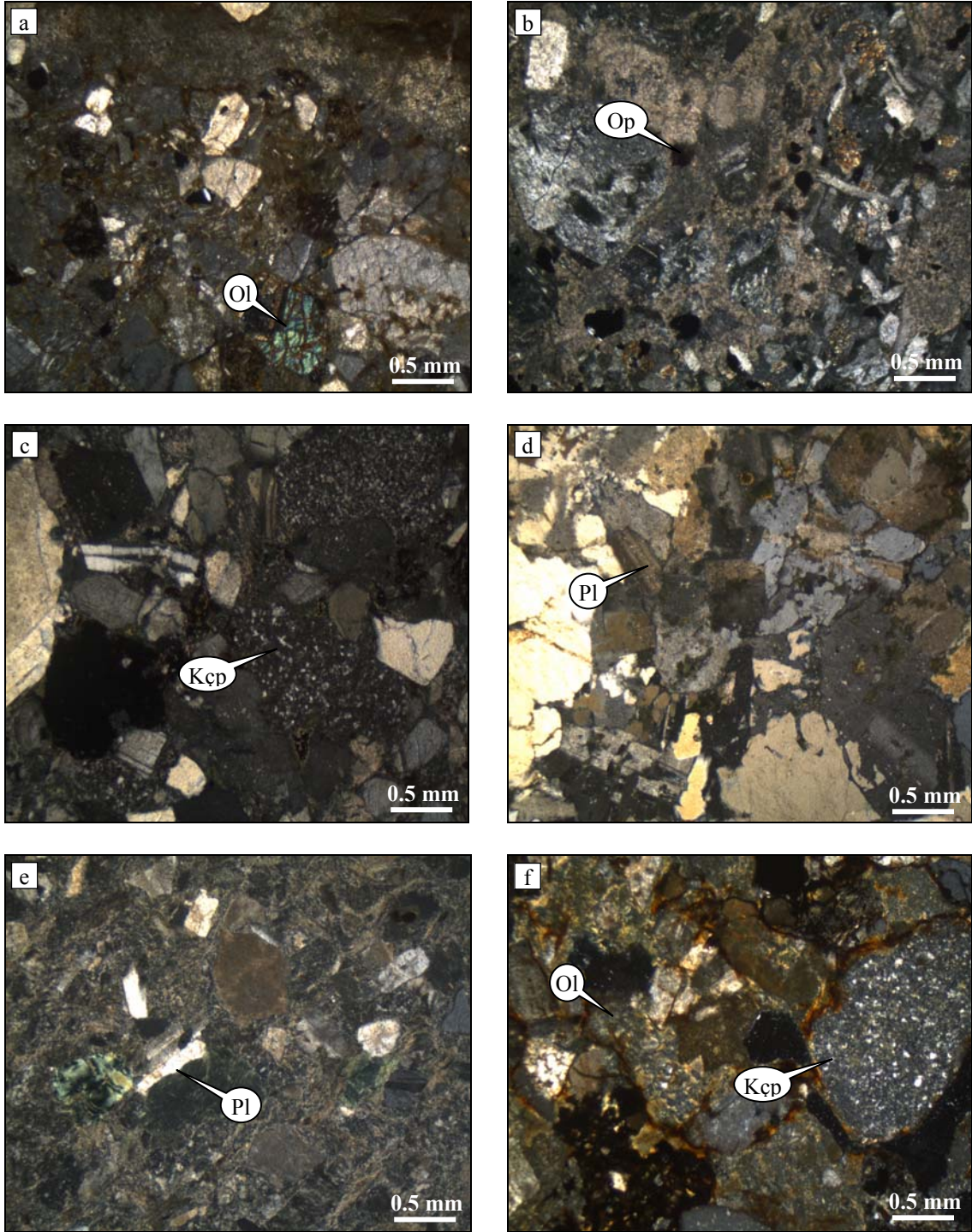
Marnlar yeşil, kırmızı, yeşilimsi mavi renkli, genellikle ince yer yer orta ya da kalın tabakalanmalıdır. Çok dağınık olup, bazen piroklastik malzeme içeriğinin artmasıyla tüfe yakın bir görünüm kazanırlar. Tüflerle tedrici bir geçiş oluştururlar. Kırmızı ve gri renkli marnlar, yoğun silisleşmeden dolayı genellikle oldukça sert bir yapı kazanmıştır.

Kireçtaşları formasyon içinde çoğunlukla ara seviyeler halinde, bazen de 1-2 m kalınlığa varan bantlar şeklindedir ve yer yer silisleşmişlerdir. Genel olarak ince tabakalanmalı olup, gri-bej, açık kırmızı, kırmızı, sarımsı koyu gri, yeşilimsi gri ve açık turuncu renklerde izlenir.

Kumtaşları ise yeşilimsi pembe renkli ve orta tabakalanmalıdır. Makroskobik olarak bol miktarda pembe renkli ortoklas ile daha az miktarda kuvars, feldispat ve yeşil renkli mineraller ayrılabilir. Kumtaşları iri taneli, dereceli tabakalanmalı ve oldukça ayrılmış olarak izlenmektedir.

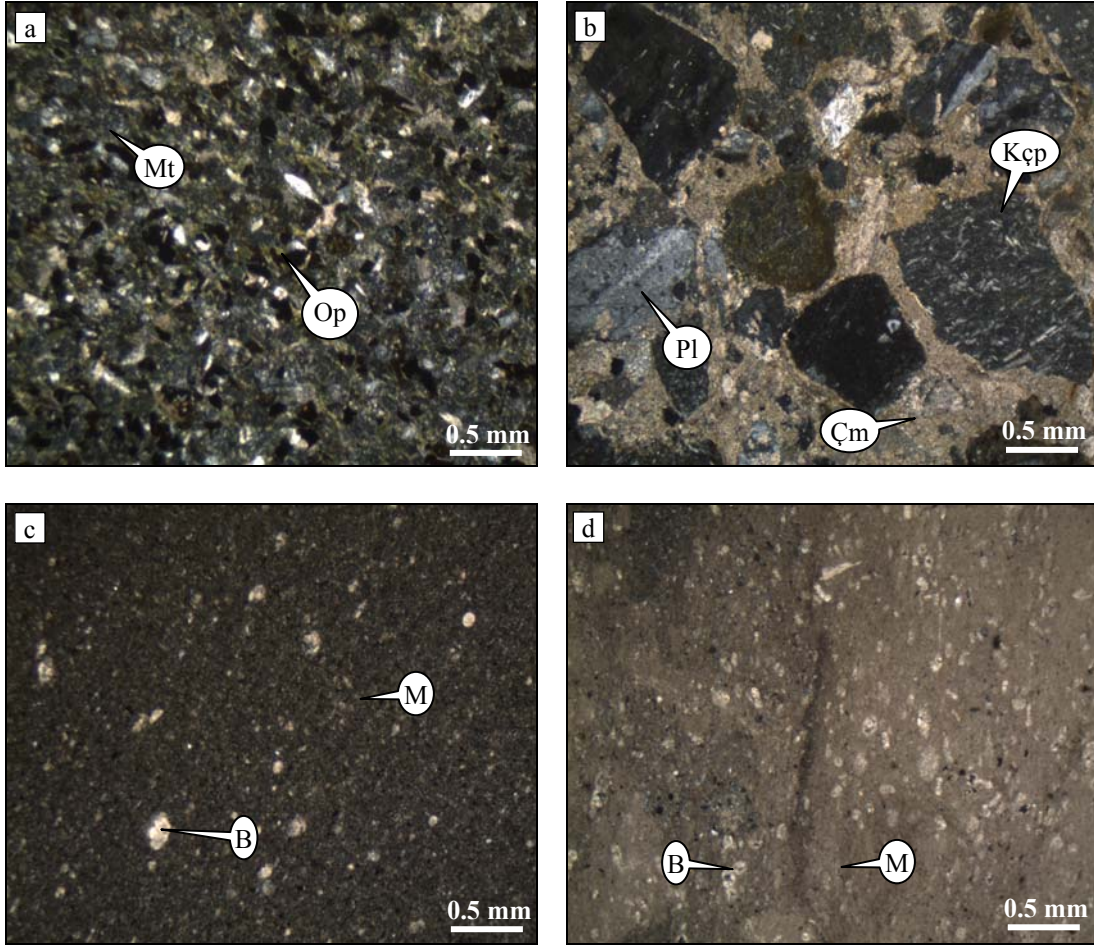
Taban ve tavan seviyesinde bulunan piroklastitlerde yapılan mikroskobik incelemelerde, aglomera ve volkanik breş çakıllarını bir arada tutan bağlayıcı bileşiminin litik kristal andezitik tuf ve kristal litik andezitik tuf olduğu belirlenmiştir. Matriks, bol olarak kayaç parçası ve kristal içermektedir. Kayaç parçaları, çoğunlukla andezitik bileşimlidir ve içinde açık renkli mineral olarak plajiyoklas bulunmaktadır. Kristaller daha çok yarı özşekilli ve özşekilli plajiyoklas fenokristallerinden, az oranda ise oldukça kloritlemiş klinopiroksen minerallerinden oluşmaktadır. Yoğun olarak demiroksit boyamalarına rastlanmaktadır. Yer yer mikrofenokristaller halinde ortoklas, mafik mineral olarak da çok az miktarda biyotit minerali gözlenmektedir (Şekil 3.5).

Kumtaşları, feldispatik litarenit olarak tanımlanmıştır. Kayaç parçaları mikrolitik-porfirik dokuda olan volkanik kayaçlardan oluşmaktadır. Genellikle ayrılmış olup, tamamen opak mineral, klorit ve kısmen de kalsite dönüşmüşlerdir. Kuvars mineralleri genellikle özşekilli taneler halinde olup, köşeliden yuvarlağa kadar değişen şekiller halinde gözlenmektedir. Kuvars miktarı diğer bileşenlere göre oldukça azdır. Ortoklaslar bol miktarda olup, genellikle sivri köşeli bazen az köşeli taneler şeklindedir. Plajiyoklaslar genellikle albit nadiren kalsbad ikizi göstermektedir. Az köşeli ve sivri köşeli taneler şeklindedir. Opak mineraller az miktarda, köşeli ve oldukça iri taneler şeklinde gözlenmektedir. Klorit ise mafik minerallerin ayrışması sonucu gelişmiş olup, oldukça bol miktardadır (Şekil 3.6a ve b).



Şekil 3.5. Subaşı Sırtı Formasyonu'na ait piroklastitlerin mikroskobik görünüşleri (Ç.N.; Kçp: kayaç parçası, Ol: olivin, Op: opak mineral, Pl: plajiyoklas)

Biyomikrit olarak tanımlanan kireçtaşlarının mikritik matriksi içinde, % 10-15 civarında pelajik foraminiferler ile % 2-3 oranında opak mineraller, kuvars ve feldispat mineralleri gözlenmektedir (Şekil 3.6c ve d). Pelajik foraminiferlerin içi genellikle spartik kalsit, yer yer de demiroksit tarafından doldurulmuştur.



Şekil 3.6. Subaşı Sırtı Formasyonu'ndaki tortul ara seviyeye ait kumtaşlarının (a ve b) ve kireçtaşlarının (c ve d) mikroskopik görünüşleri (Ç.N.; B: biyojen, Çm: çimento, M: mikrit, Mt: matriks, Op: opak mineral, Pl: plajiyoklas)

Marlarda yapılan mikroskopik incelemelerde çimentonun karbonat ve kilden oluştuğu, yoğun olarak köşeli kuvars ve feldispat mineralleri ile ince-uzun latalar halinde hornblend kristalleri, az oranda ise biyotit pulcukları içerdiği belirlenmiştir.

Yoğun olarak piroklastik malzemenin bulunduğu bu istif genel özellikleriyle derin deniz ortamının ürünüdür. Volkanik etkinliğin durduğu ya da azaldığı sırada çökelen pelajik ara katkılar, derin ortamın kanıtıdır. Ancak formasyonun tavanına doğru yer alan, bentik foraminiferli kumtaşı ara seviyeleri, ortamın giderek sığlaştığını ve çökelpmenin regresif sonuçlandığını işaret etmektedir (Çapkinoğlu, 1981). Çapkinoğlu (1981), bu formasyona ilişkin pelajik arakatıklar içinde *Globotruncana* sp. (grup *lapparenti*), *Globotruncana* sp. (grup *arca*), *Globotruncana* sp., *Heterohelix* sp. ve *Pseudotextularia* sp. mikro fosillerini saptayarak formasyonun yaşını Geç Maastrichtiyen olarak belirlemiştir.

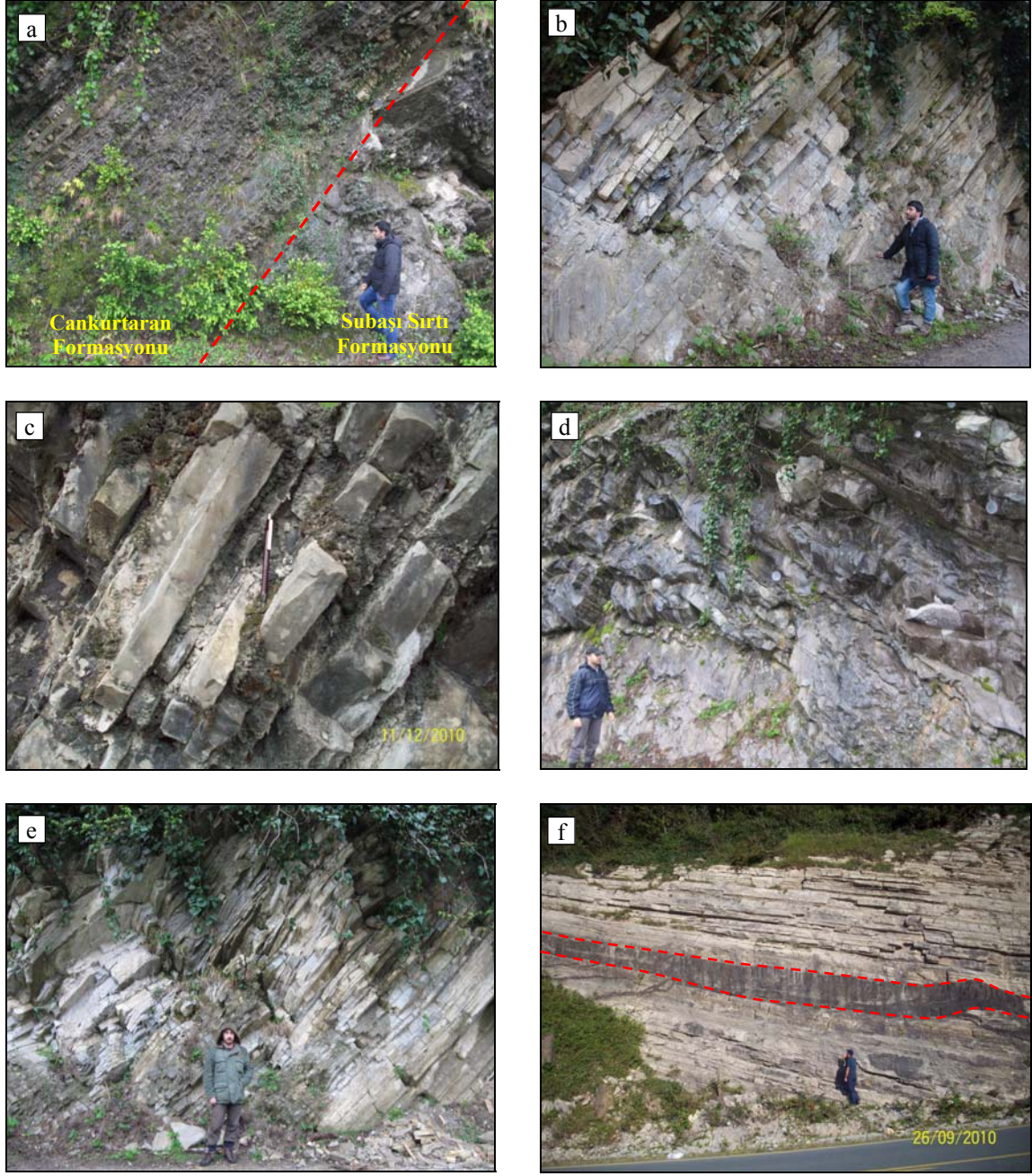
3.1.2. Cankurtaran Formasyonu

Cankurtaran Formasyonu ilk kez Çapkınoğlu (1981) tarafından tipik yüzeylemelerinin izlenebildiği Cankurtaran Yöresi'ne izafeten adlandırılmış ve tanımlanmıştır. Tabanda ve tavanda ince tabakalanmalı marn ara seviyeleri içeren formasyon, orta kısmında ise tamamen kireçtaşı fasiyesinde gelişme gösterir (Şekil 3.7). Formasyonun yayılımı Subaşı, Koyuncular, Cankurtaran Tepe, İçhala, Çiftepınar, Bulgurlu ve Topluca Yöreleri'nin sınırladığı alan içindedir. Birim alttan Subaşı Sırtı Formasyonu, üstten ise Şenkaya Sırtı Formasyonu ile uyumlu olarak sınırlandırılmıştır. Alt sınırı tedrici geçişli, üst sınırı ise bariz renk ve litoloji farklılığı nedeniyle gayet belirgindir. 350 m kalınlık sunan istif içinde, çapı 30 cm'ye varan çok bol *Inoceramus* kavkıları ile yoğun organik faaliyet izleri saptanmıştır. Yer yer kırıklı ve basit kıvrımlı yapılar gözlenmektedir. Kireçtaşları yeşilimsi gri, gri-bej ve kirli sarı renkli, çok sert ve konkoidal kırılmalıdır. İnce-orta tabakalanmalı olan kireçtaşları yer yer koyu gri, sarımsı yeşil ve gri renklidir. Genellikle çatlaklı olup, çatlaklar ikincil kalsitle ve kille dolguludur.

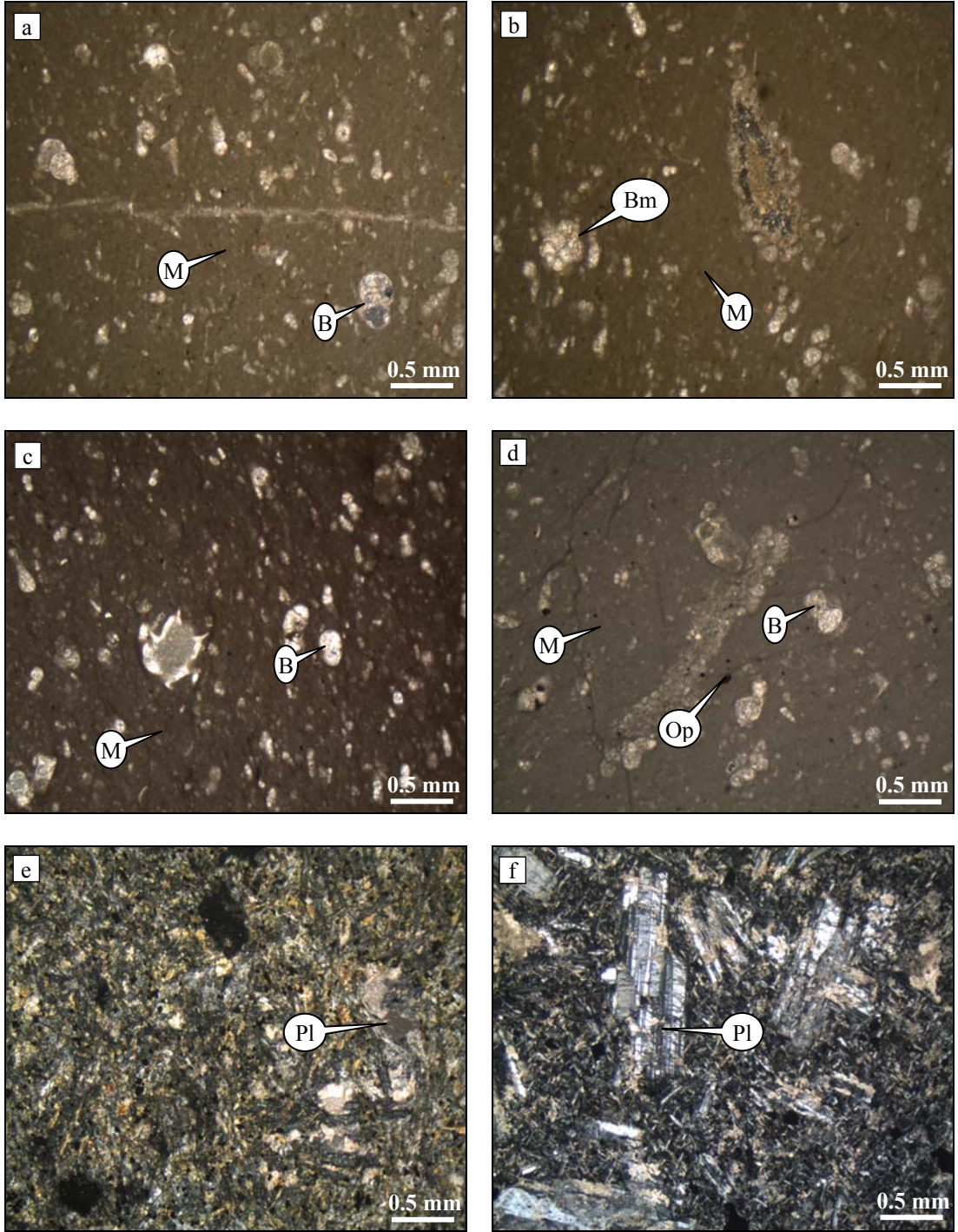
Kireçtaşları, %10-15 civarında pelajik foraminifer ile % 2-3 oranında opak ve kuvars mineralleri içeren biyomikritten oluşur. Pelajik foraminiferlerin içi genellikle sparitik kalsit tarafından doldurulmuştur (Şekil 3.8a-d).

Kireçtaşlarını kesen oldukça spilitleşmiş bazalt dayk ve silleri mevcuttur. Bazalttarda yapılan mikroskopik incelemelerde genel olarak özşekilli fenokristaller halinde gözlenen plajiyoklasların tamamının albit ikizlenmesi gösterdiği, kırıklı ve çatlaklı bir görünüme sahip olduğu belirlenmiştir. Hamur içerisinde çok küçük latalar şeklinde gözlenen plajiyoklas mikrolitleri ise plajiyoklas fenokristallerinin arasını doldurmaktadır. Klinopiroksenler, çok küçük latalar şeklinde gözlenmekte olup, tamamen özşekilsizdirler ve çoğunlukla kloritleşmişlerdir. Kalsit, çoğunlukla boşluk dolgusu şeklinde gelişmekte olup, yer yer de açık renkli minerallerin alterasyonu sonucu oluşmuştur (Şekil 3.8e ve f).

Çapkınoğlu (1981), Bulgurlu civarından aldığı örnekler içinde *Globotruncana* sp., *Rugoglobigerina* sp., *Pseudotextularia* sp., *Lenticulina* sp., *Heterohelix* sp., *Globotruncana* sp. (grup *arca*), *Globotruncana* sp. (grup *contusa*), *Globotruncana* sp. (grup *lapparenti*), *Globotruncana* sp. (grup *stuarti*), *Rugoglobigerina* sp. (grup *rugosa*), *Planoglobulina* sp., *Recemiguembelina* sp., *Hedbergella* sp., *Orbitoides* sp. (grup *apiculatus*), *Siderolites* sp. ve *Simplorbites* sp.'den oluşan faunaya dayanarak birime Geç Maastrichtiyen yaşını vermiştir.



Şekil 3.7. Cankurtaran Formasyonu ve Subaşı Sırtı Formasyonu dokanağının (a), formasyon tabanındaki (b ve c) ve tavanındaki (e) ince tabakalı kireçtaşı-marn seviyesinin, orta seviyedeki kalın tabakalı kireçtaşlarının (d) Şubaşı Yöresi'ndeki görünüşleri, tabaka düzlemi boyunca yerleşmiş bazalt silinin (f) Cankurtaran Tepe civarındaki görünümü



Şekil 3.8. Cankurtaran Formasyonu'na ait kireçtaşları (a-d) ile kireçtaşlarının tabaka düzlemine yerleşmiş bazaltın (sil) (e) ve tabakaları kesen bazaltın (dayk) (f) mikroskopik görünüşleri (Ç.N.; B: biyojen, Bm: biomorfa, M: mikrit, Op: opak mineral, Pl: plajiyoklas)

Ayrıca, Çiftepınar ve İçhala Yöreleri arasında, birimin üst seviyelerinden derlediği nokta örneklerde saptadığı *Globorotalia pseudomenardii* BOLLI ve *Globorotalia* sp. (grup *laevigata*) ile birimin yaşının Paleosen'e kadar uzandığını saptamıştır. Bu veriye dayanarak Cankurtaran Formasyonu'nun Geç Maastrichtiyen-Paleosen yaşında olduğunu belirlemiştir.

Cankurtaran Formasyonu'nun istiflenmesi sırasında başlangıçta sığ ve yüksek enerjili olan ortam gittikçe derin ve düşük enerjili bir ortama dönüşmüştür. Tabanda bentik fauna içeren tanetaşı ile başlayan istif üste doğru bentik ve pelajik foraminiferli istiftaşı, pelajik foraminiferli vaketaşı ile devam ederek en üstte vaketaşı ile son bulmuştur. Bu sekansiyel gelişim çökeltmenin transgresif geliştiğine işaret etmektedir (Çapkınoğlu, 1981).

Cankurtaran Formasyonu, Tonya Formasyonu (Korkmaz, 1993) ve Bakırköy Formasyonu (Güven, 1993) ile deneştirilebilir jeolojik ve stratigrafik özelliktedir.

3.1.3. Şenkaya Sırtı Formasyonu

Başlıca bordo renkli marnlardan oluşan birim, ilk olarak Çapkınoğlu (1981) tarafından tipik yüzeylemelerinin izlendiği Şenkaya Sırtı civarına izafeten Şenkaya Sırtı Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Cankurtaran Formasyonu ile net bir kontak oluşturan birimin üst sınırı, Kabaköy Formasyonu'nun (Güven, 1993) tabanını oluşturmaktadır. Üst sınır arazinin örtülü olması nedeniyle hiçbir yerde net olarak izlenememektedir.

Bu formasyona ilişkin yüzeylemeler; Kordon Sırtı, Şenkaya Sırtı, Hasanefendi Deresi, Güneşli Dere vadisi ile Çamaklar, Çifteköprü, Çiftepınar ve Subaşı Yöreleri civarında izlenmektedir. Formasyonun güney sınırı devamlı olmayıp düşey atımlı faylarla kesilmiştir. Hakim litolojisini marnların oluşturduğu bu istif içinde marnlar genel olarak bordo, gri ve kirli sarı renkte olup, yer yer ince tabakalanmalı kırmızı ve gri renkli kireçtaşı ile ince orta tabakalanmalı kiltası ara seviyeleri içermektedir (Şekil 3.9). Yumuşak bir morfoloji sunan bu istif içinde kireçtaşı ara seviyeleri daha keskin hatlarla kendilerini belli etmektedir. Az miktardaki bu kireçtaşı ve kiltası ara seviyeleri dışında formasyon tek düze bir marn istifi şeklindedir (Çapkınoğlu, 1981).

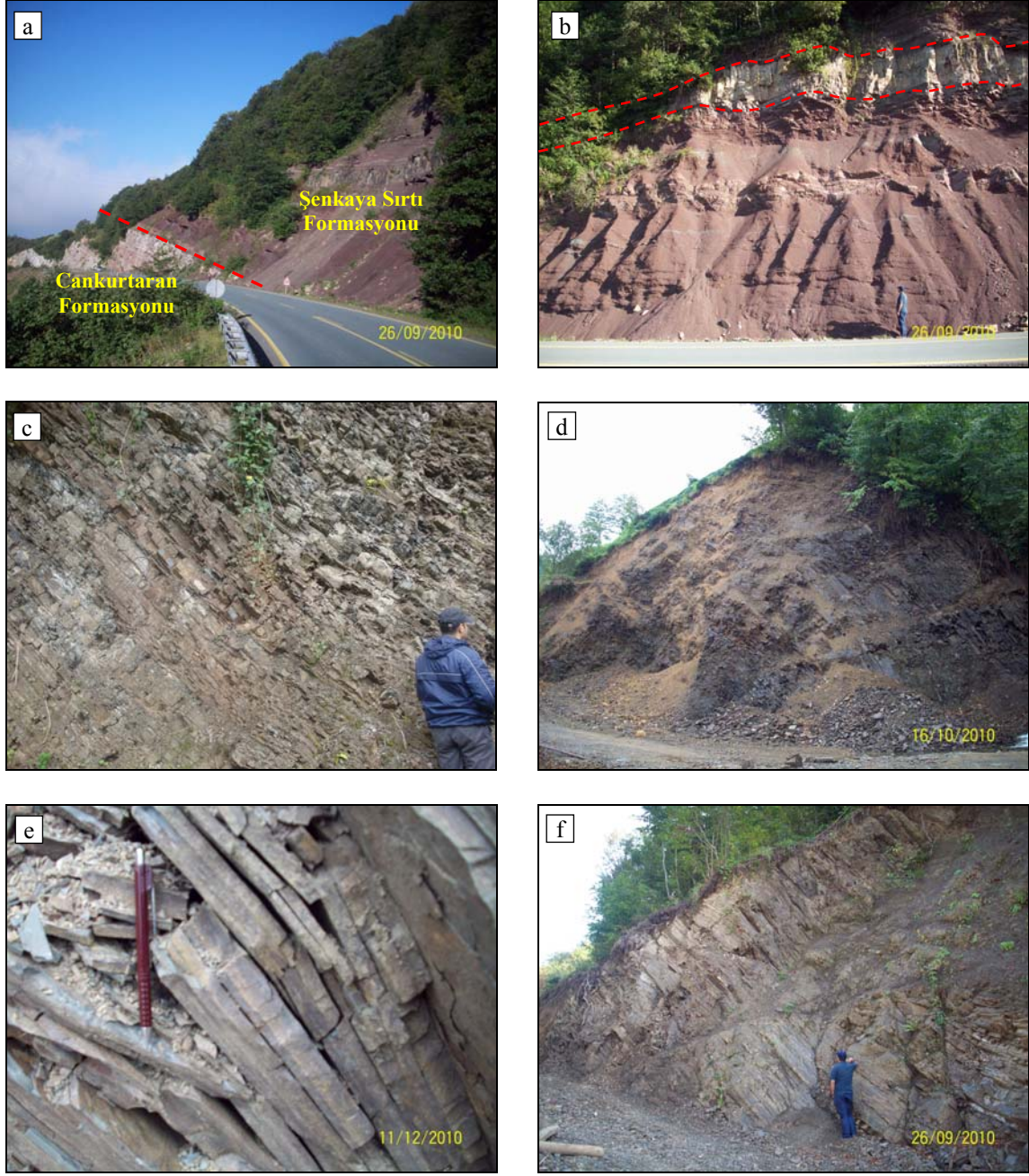
Genel olarak formasyonun tabanını oluşturan bordo renkli marnlar, gri ve kirli sarı renkli marnlarla yanal ve düşey geçiş oluşturmaktadır. Bol miktarda ve düzensiz çatlaklar içeren marnlar genellikle belirgin bir tabakalanma göstermemektedir. Yer yer laminalı yapıdadırlar. Hasanefendi Deresi civarında formasyonun tavanına doğru yumrulu bir yapı kazanan kirli sarı renkli marnlar, kil miktarının artmasıyla kiltasına yakın bir görünüm

kazanmıştır. Yaklaşık 450 m kalınlığa erişen bu istif içinde tabakalar arası zayıflık düzlemlerine yerleşmiş çok sayıda andezitik ve bazaltik sil saptanmıştır. Marnlar bordo, gri ve kirlili sarı renkli olup, genellikle belirgin bir tabakalanma göstermezler. Bazen kalın, çok kalın yer yer de masif bir görünüm sunarlar. Bol çatlaklı ve dağılgan olup, yer yer yumrulu ve laminalı bir yapı gösterirler. Kireçtaşları genellikle kırmızı, yer yer gri renkli ve ince tabakalanmalıdır. Sert ve konkoidal kırılmalı olup, formasyon içinde bantlar şeklindedir. Kilitaşları koyu gri renkli ve ince tabakalanmalıdır. Bol miktarda kalsit dolgulu mikro çatlaklar içermektedirler. Çatlaklar genellikle birbirine paraleldir. Yer yer laminalı yapılar izlenmektedir (Çapkinoğlu, 1981).

Marnlarda yapılan mikroskobik incelemelerde çimentonun karbonat, kil ve demiroksitten oluştuğu, yoğun olarak köşeli kuvars ve feldspat mineralleri ile ince-uzun latalar halinde hornblend kristalleri, köşeli ve yuvarlak taneler halinde opak mineraller, az oranda ise küçük biyotit pulcukları içerdiği belirlenmiştir (Şekil 3.10a ve b).

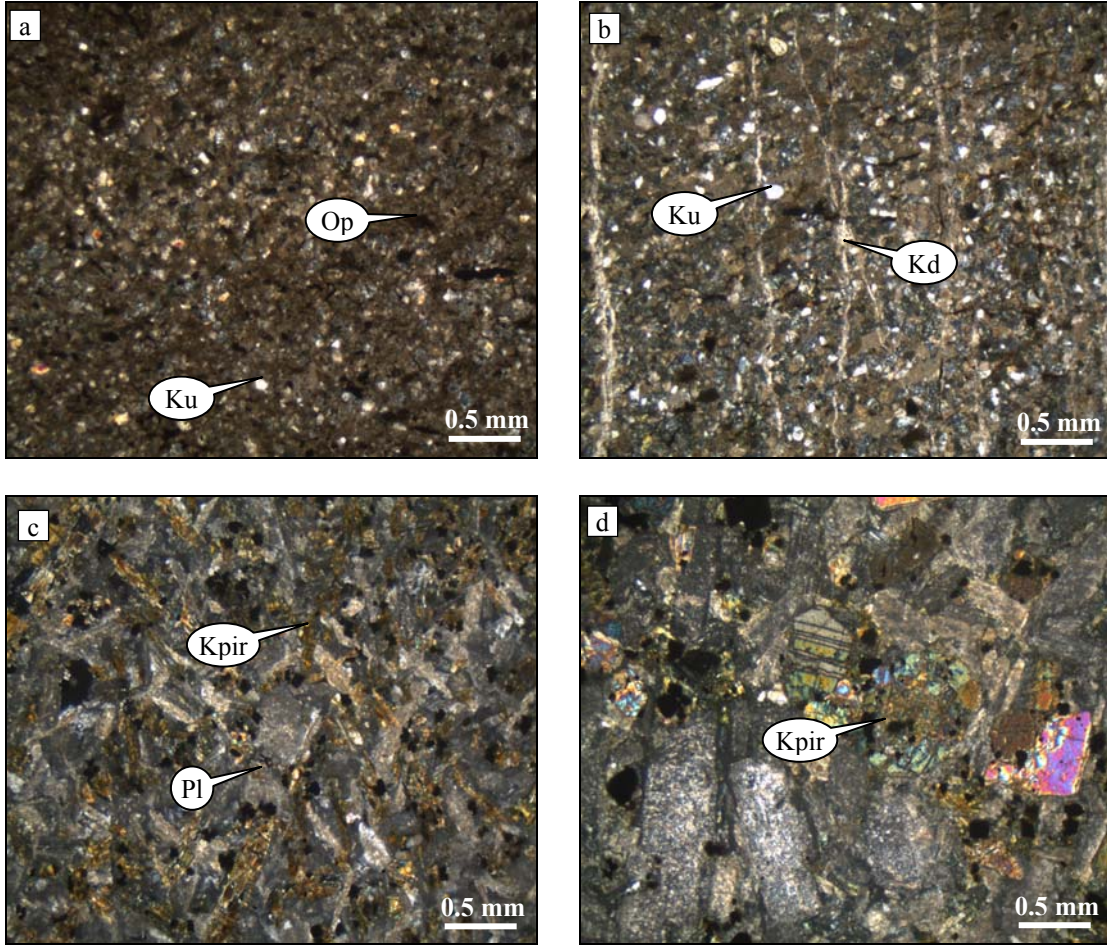
Marn tabaka düzlemlerinin arasına yerleşen diyabaz sillerinde yapılan mikroskobik incelemelerde, plajiyoklasların yarı özşekilli ve özşekilsiz fenokristaller halinde olduğu ve tamamen alterasyona maruz kalmış olduğu belirlenmiştir. Megakristaller halinde gözlenen plajiyoklaslarda ise elek ve sünger dokusu vardır. Plajiyoklaslar yer yer opak mineral ve klinopiroksen inklüzyonları içermektedir. Klinopiroksenler daha çok yarı özşekilli ve özşekilli fenokristaller, daha az oranda özşekilsiz mikrofenokristaller halinde gözlenmektedir. Yoğun bir şekilde kloritleşmişlerdir. Fenokristaller halinde gözlenen klinopiroksenler, oldukça çatlaklı ve kırıklı bir yapıya sahiptir. Bol olarak opak mineral inklüzyonları içerirler. Olivinler genel olarak özşekilsiz ve iddingisitleşmiş fenokristaller ve mikrofenokristaller halindedir. Kloritler daha çok mafik minerallerin alterasyonu sonucu oluşmuştur. Opak mineraller ise özşekilli yer yer de köşeli iri taneler halindedir (Şekil 3.10c ve d).

Marn fasiyesinde gelişme gösteren Şenkaya Sırtı Formasyonu içinde çok az miktarda pelajik fauna saptanmıştır. Bu pelajik fauna, derin deniz ortamını yansıtmaya karşın, tüm formasyon içinde izlenen kil boyutundaki kırıntılı malzeme, çökelmenin Cankurtaran Formasyonu'na oranla daha sığ bir ortamda geliştiğini göstermektedir (Çapkinoğlu, 1981).



Şekil 3.9. Şenkaya Sırtı Formasyonu ve Cankurtaran Formasyonu dokanağı (a) ile marn tabaka düzlemi boyunca yerleşmiş diyabaz silinin Cankurtaran Tepe civarındaki görünümü (b), ince tabakalı marn seviyesinin Subaşı (c, d, e) ve Çiftköprü Yöreleri'ndeki (f) görünümü

Formasyon fauna içeriği yönünden fakirdir. Ancak birimin, Geç Maastrichtiyen-Paleosen yaşlı Cankurtaran Formasyonu'nu uyumlu olarak üstlemesi ve Eosen yaşlı Kabaköy Formasyonu'nun altında yer alması nedeniyle Paleosen yaşında olduğu söylenebilir. Ayrıca, seyrek olarak izlenen *Globigerin*'ler de, formasyonun Paleosen yaşında olduğunu kanıtlamaktadır (Çapkınoğlu, 1981).

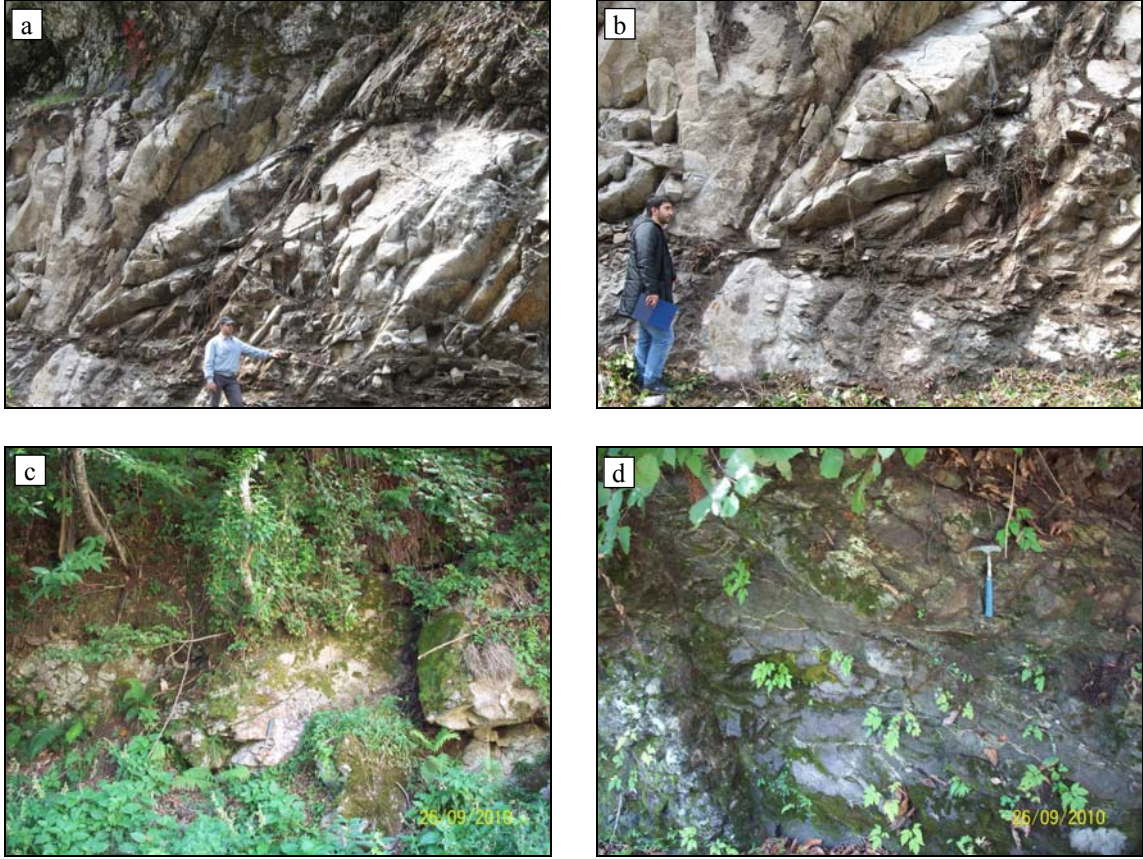


Şekil 3.10. Şenkaya Sırtı Formasyonu'na ait marnların (a ve b) ve tabaka düzlemi boyunca yerleşmiş diyabazın (c ve d) mikroskobik görünüşleri (Ç.N.; Kpir: klinopiroksen, Kd: kalsit damarı, Ku: kuvars, Op: opak minerak, Pl: plajiyoklas)

3.1.4. Kabaköy Formasyonu

Tipik olarak Kabaköy (Gümüşhane) Yöresi'nde yüzeyleme veren ve genellikle kırıntılı çökellerle başlayıp üste doğru volkanik karakterde olan birim, ilk olarak Güven (1993) tarafından Kabaköy Formasyonu olarak tanımlanmıştır. Cankurtaran Tüneli çıkış bölümünün de içinde yer aldığı Çifteköprü Yöresi'nde genişçe yayılımlar gösteren andezit ve bazalttan oluşan birim (Şekil 3.11), Kabaköy Formasyonu ile benzer litolojik ve stratigrafik özellikler gösterdiği için aynı isimle adlandırılmıştır.

Paleosen yaşlı birimlerin üzerine taban konglomerası ile açısız uyumsuzlukla gelen formasyon, tabanda kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve marn tabakaları içeren andezit-bazalt ve piroklastitlerinden oluşmaktadır.

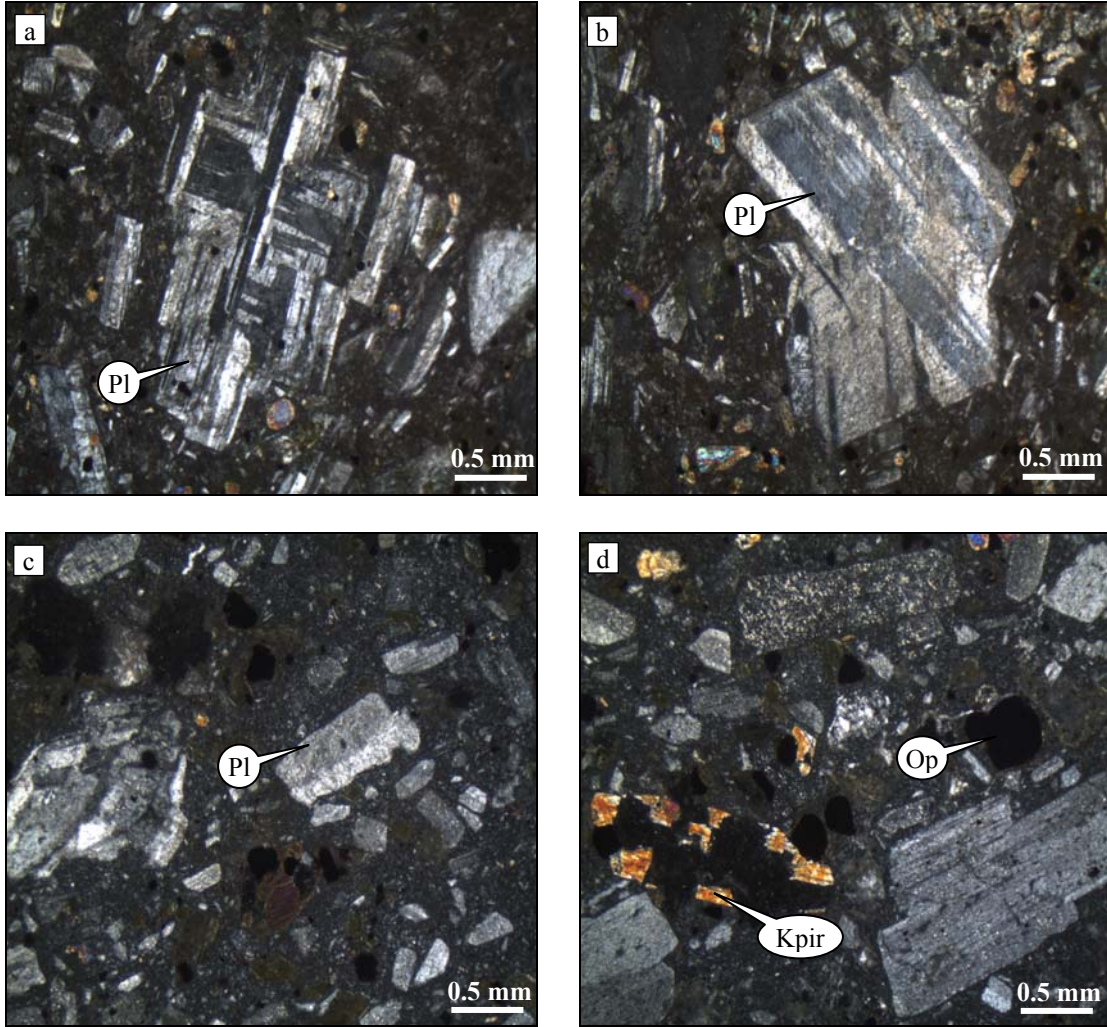


Şekil 3.11. Kabaköy Formasyonu'na ait bazaltların Çifteköprü Yöresi'nde bulunan Cankurtaran Tüneli çıkış bölümündeki (a ve b) ve Balıklı Dere vadisindeki görünümleri (c ve d)

Formasyonun tabanındaki tortul seviye Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümünde gözlenemediğinden, Şenkaya Sırtı Formasyonu ile Kabaköy Formasyonu arasındaki sınırın bu alanda faylı olduğu düşünülmektedir. Bu bölgedeki bazaltlar, faylanmadan dolayı eklemlili ve düşük dayanımlı bir yapı kazanmış ve yoğun bir biçimde kloritleşmiştir.

Bazaltların mikroskobik incelemelerinde, mikrolitik porfirik dokuya sahip olivin-ojit bazalt olduğu belirlenmiştir. Plajiyoklaslar genel olarak yarı özşekilli ve özşekilli fenokristaller, nadiren de özşekilsiz mikrofenokristaller halindedir. Özşekilli iri plajiyoklas fenokristalleri elek ve sünger dokusu göstermektedir. Ayrıca, yer yer klinopiroksen ve opak mineral inklüzyonları içermektedir. Plajiyoklas fenokristallerinde genellikle albit ikizi, yer yer de karlsbat ikizi gözlenmektedir. Köşeli mikrofenokristaller halinde gözlenen plajiyoklaslar ise zonlanma göstermektedir. Klinopiroksenler genel olarak yarı özşekilli ve özşekilli kristaller halinde gözlenmektedir. Yarı özşekilli ve özşekilsiz klinopiroksen fenokristalleri ise parçalanmış ve kırılmış, yer yer de kloritleşmiştir. Kalsit, boşluk dolgusu

şeklindedir. Klorit ise daha çok mafik minerallerin alterasyonu sonucu, ikincil olarak oluşmuştur. Opak mineraller köşeli iri kristaller halinde, daha çok ise küçük yuvarlağımsı taneler halindedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Kabaköy Formasyonu'na ait bazaltların mikroskobik görünüşleri (Ç.N.; Kpir: klinopiroksen, Op: opak mineral, Pl: plajiyoklas)

Binlerce metre kalınlığa varan istifin üst sınırı inceleme alanında görülmektedir. Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı Formasyonu'nun tavanını oluşturan alt sınır, arazinin örtülü olması nedeniyle net olarak izlenememektedir. Veri yetersizliği nedeniyle formasyonun tümüyle ne tür bir ortamda geliştiğini belirtmek olanaksızdır. Ancak, birimin alt seviyelerinde, iri taneli kumtaşları içinde izlenen *Nummulites*'ler neritik bir ortamı yansıtmaktadır. Ayrıca, marnlı seviyeler içinde izlenen kırıntılı malzemenin bolluğu da ortamın derin olmadığını kanıtlamaktadır (Çapkınoğlu, 1981).

Çapkinoğlu (1981), formasyonun Borçka-Artvin karayolu üzerindeki mostralarından aldığı örneklerden *Nummulites* sp. (grup *atacicus*), *Nummulites* sp. (grup *planulatus*), *Nummulites* sp. (grup *burdigalensis*) ve *Nummulites* sp. (grup *laevigatus*) fosillerini saptayarak birime Eosen yaşını vermiştir.

3.1.5. Alüvyonlar ve Yamaç Molozları

Çalışma alanı içindeki akarsu vadilerinin hem dar hem de oldukça yüksek eğimli olmalarından dolayı alüvyon oluşukları iri bloklu malzemeler şeklinde kendini göstermektedir. Tünel çıkış bölümünün bulunduğu Çiftköprü Yöresi'ndeki Cihala Çayı'nın birleştiği Çoruh Nehri boyunca, Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yoğun şekilde gözlenmektedir. Alüvyonların içinde çevre kayaçların bloktan kil boyutuna kadar olan malzemelerini gözlemek olasıdır.

Yamaç molozları, çalışma alanı içindeki yamaç eteklerinde yer almakta olup, bunlar yamaçların bulunduğu alandaki kayaç türlerine göre köşeli, yassı ve bazıları küt köşeli, blok, çakıl, kum, silt ve killerden oluşmuşlardır. Silt ve kil miktarı, diğer elemanlara göre daha fazladır. Şenkaya Sırtı Formasyonu'nun yüzelediği alanlardaki yamaç molozları formasyonun litolojik özelliğinden dolayı yoğun silt ve kil içerikli malzeme şeklindedir. Ayrıca, bu alanlardaki yamaç molozlarının içinde yer yer küçük ölçekli heyelanların geliştiği belirlenmiştir. Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümündeki yamaçta moloz kalınlığı 5 metreden fazla olup, çıkış portalındaki yamaçta ise yamaç molozu oluşumu yoktur.

3.2. Jeoteknik Birimlerin Tanımlanması

Jeoteknik birimler tanımlanırken esas alınan ölçütler; litolojik özellikler, mineralojik bileşim, ayrışma durumu ve süreksizliklerin sıklığıdır. Arazi gözlemleriyle bu özelliklerin değişim gösterdiği alanlar belirlenerek jeoteknik birimler tanımlanır ve her bir jeoteknik birimin mühendislik özellikleri ayrı ayrı araştırılır (IAEG, 1976; Dearman, 1981).

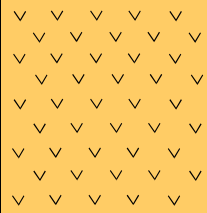
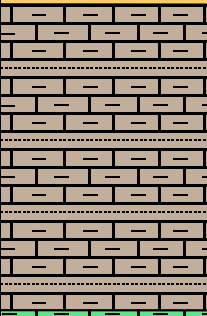




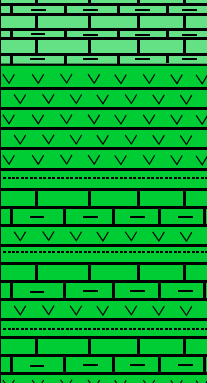

Bu çalışmada, tünel güzergahının ve çevresinin jeolojisini ortaya koymak amacıyla detay araştırmalar yapılmıştır. Jeoteknik birimleri tanımlamak için litolojik özelliklerden ve süreksizlik sıklığı değerlerinden yararlanılmış olup, jeoteknik birimlerin yanal ve düşey devamlılıklarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen güzergah çalışmaları sonucunda 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası ve jeolojik kesitler hazırlanmıştır (Şekil 3.1-3.3). Tünel

güzergahındaki kayalar, Anon (1976) ve ISRM (1976) tarafından önerilen ve Dearman (1981) tarafından düzenlenen litolojiye, kökene ve jeoteknik özelliklere dayanan sınıflama sistemleri kullanılarak dört litolojik ve altı ayrı jeoteknik birime ayrılmıştır. Subaşı Sırtı Formasyonu'na ait volkano-tortul kayalar A litolojik birimi, Cankurtaran Formasyonu'na ait marn arakatkılı kireçtaşlarından oluşan birim B litolojik birimi, Şenkaya Sırtı Formasyonu'na ait yer yer kiltası ara katkılı marnlardan oluşan birim C litolojik birimi, Kabaköy Formasyonu'na ait bazaltlardan oluşan birim ise D litolojik birimi olarak tanımlanmıştır. A litolojik birimi kendi içerisinde A1 ve A2, B litolojik birimi de kendi içerisinde B1 ve B2 jeoteknik birimlerine ayrılmıştır (Şekil 3.13 ve 3.14).

Jeoteknik birimler tanımlanırken proje güzergahında açılan 13 adet temel sondaj kuyusundan ve mostralardan alınan ölçümlerden ve örneklerden yararlanılmıştır. Ayrıca, tünelin giriş ve çıkış bölümlerinde başlatılan kazıyla şuan için sadece A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerinde belirli bir metreye kadar ilerlenilmiştir. Sondaj ve mostra çalışmalarından elde edilen verilerin doğruluğu bu üç jeoteknik birim için tünel içinde yapılan gözlem ve ölçümlerle karşılaştırılarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır.

A1 jeoteknik birimi CGP1-6 ve YSK-6 temel sondajlarında, A2 jeoteknik birimi YSK2, YSK3, YSK4 ve YSK 6 temel sondajlarında, B1 jeoteknik birimi YSK-7 temel sondajında, B2 jeoteknik birimi YSK-7 temel sondajında, C1 jeoteknik birimi YSK-7 temel sondajında, D1 jeoteknik birimi ise YSK-8 temel sondajında kesilmiştir (Şekil 3.14). Ancak, açılan temel sondajlarında jeoteknik birimlerin sadece belirli bir bölümü kesilmiş olup, jeoteknik birimlerin özelliklerini tam olarak tanımlamada yeterli sayıda değildir. Bu nedende, jeoteknik birimlerin alt ve üst sınırları arasındaki mühendislik özelliklerinin tamamını belirlemek için açılan temel sondajlar, mostra ölçümleriyle de desteklenmiştir.

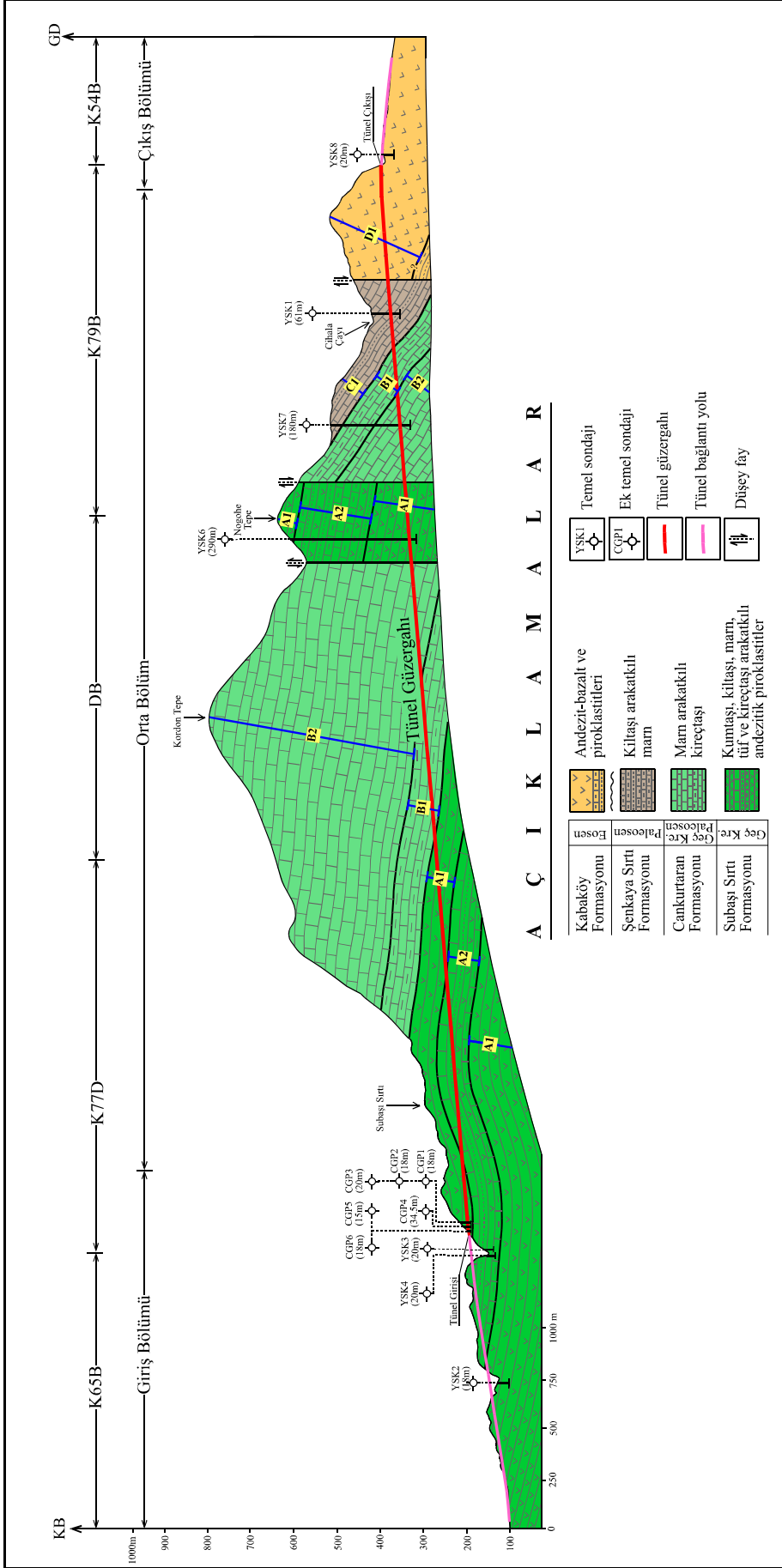
A1 jeoteknik birimi Subaşı Sırtı Formasyonu'nun taban ve tavan seviyelerinde gözlenen sıkı matriksli aglomera, volkanik breş ve iri taneli tüflerin oluşturduğu piroklastitlerden oluşmaktadır. Masif bir yapı sunan birimde genellikle mafik minerallerin ayrışmasına bağlı olarak yeşil renk hakimdir ve bu özellikleriyle diğer birimlerden kolaylıkla ayırt edilmektedir. Tünel giriş bölümünde bulunan A1 jeoteknik birimi küçük bir antiklinalle tünel güzergahının orta kısmında tekrar yüzeylenmektedir. Bunun haricinde, Nogohe Tepe civarında faylı olarak yüzeye çıkan Subaşı Sırtı Formasyonu'na ait birimlerde yapılan YSK-6 nolu araştırma sondajında da tünel kotu seviyesinde A1 jeoteknik birimine ait piroklastik kayalar kesilmiştir.

| Jeolojik Birimler | Jeoteknik Birimler | Formasyon | Kalınlık | LİTOLOJİ | AÇIKLAMALAR |
|-------------------|--------------------|---------------|----------|---|---|
| D | D1 | Kabaköy | > 1000 m |  | Bazalt |
| C | C1 | Şenkaya Sırtı | 450 m |  | Yer yer kıltaşı arakatkılı ince tabakalı marn |
| B | B1 | Cankurtaran | 350 m |  | Marn arakatkılı ince tabakalı kireçtaşı |
| | B2 | | |  | Kalın tabakalı kireçtaşı |
| | B1 | | |  | Marn arakatkılı ince tabakalı kireçtaşı |
| A | A1 | Subaşı Sırtı | 600 m |  | Tavan piroklastitleri (Aglomera, volkanik breş, tüf) |
| | A2 | | |  | Tortul araseviye (Kumtaşı, kıltaşı, marn, kireçtaşı, tüfit) |
| | A1 | | |  | Taban piroklastitleri (Aglomera, volkanik breş, tüf) |

Ölçeksizdir

Şekil 3.13. Çalışma alanı çevresi için jeolojik ve jeoteknik birim ilişkisini gösteren stratigrafik kolon kesit

A2 jeoteknik birimi Subaşı Sırtı Formasyonu'nun taban ve tavan seviyelerindeki piroklastitlerin arasında bulunan tortul kayalardan oluşmaktadır. Birim ince-orta tabakalanmalı kireçtaşı, marn, kumtaşı, tüf, silttaşı yer yer de kıltaşı araldanmasından oluşmaktadır.



Şekil 3.14. Cankurtaran Tünel güzergahındaki jeoteknik birimlerin birleştirilmiş jeoloji kesiti üzerindeki görünümü (Yüksel Proje'den (2007) değiştirilerek)

B1 jeoteknik birimi Cankurtaran Formasyonu'nun taban ve tavan seviyelerinde gözlenen marn ara katkılı kireçtaşlarından oluşmaktadır. Kireçtaşları ince-orta takabalı olup, açık gri renkli oldukça yumuşak 1-1.5 cm kalınlığında marn ara seviyeleri içerir.

B2 jeoteknik birimi Cankurtaran Formasyonu'nun taban ve tavan seviyelerindeki marn ara katkılı kireçtaşlarının arasında bulunan kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşmaktadır. B2 jeoteknik birimi, B1 jeoteknik birimi ile aynı litolojik ve fiziko-mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen, düşük süreksizlik sıklığı nedeniyle farklı jeoteknik birim olarak tanımlanmıştır.

C1 jeoteknik birimi Şenkaya Sırtı Formasyonu'na ait oldukça düşük dayanıma sahip ve dağılgan yer yer kıltaşı ara katkılı marnlardan, tünelin çıkış bölümünde bulunan D1 jeoteknik birimi ise Kabaköy Formasyonu'na ait kloritleşmiş bazaltlardan oluşmaktadır.

3.3. Kaya Malzemelerinin Fiziko-mekanik Özellikleri

3.3.1. Birim Hacim Ağırlık

Bu çalışmada, jeoteknik birimlerden alınan kaya bloklarından laboratuvarında düzgün şekilli örnekler hazırlanmış ve kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Deneyler yapılırken, ISRM (1977) tarafından önerilen yöntemler esas alınmıştır. Birim hacim ağırlık hesaplamaları yapılırken düzgün şekilli örneklerin hacim ve ağırlıkları dikkate alınmıştır. Deneylerde A1 jeoteknik birimini temsil etmesi amacıyla tuf, A2 jeoteknik birimi için ince taneli tuf, B1 ve B2 jeoteknik birimleri aynı litolojiden oluştuğu için kireçtaşı, C1 jeoteknik birimi için marn ve D1 jeoteknik birimi için bazalt örnekleri kullanılmıştır. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerine ait birim hacim değerleri özet olarak Tablo 3.1'de, deneyler sırasında alınan ölçümler ve yapılan hesaplamalar ise Ek 1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık değerleri

| Jeoteknik birim | Litoloji | Birim hacim ağırlık (γ , kN/m ³) | | | | |
|-----------------|-----------|--|----------|----------|----------|----------|
| | | Örnek sayısı | Ortalama | En büyük | En küçük | Std. Sp. |
| A1 | Tuf | 12 | 25.78 | 26.73 | 24.67 | 0.0678 |
| A2 | Tuf | 12 | 22.97 | 24.67 | 20.80 | 0.0015 |
| B1-B2 | Kireçtaşı | 12 | 24.62 | 25.89 | 23.55 | 0.0009 |
| C1 | Marn | 10 | 22.73 | 24.73 | 18.95 | 0.0022 |
| D1 | Bazalt | 8 | 24.73 | 26.04 | 23.16 | 0.0013 |

3.3.2. Schmidt Çekici Geri Tepme Sayısı

Schmidt çekici ile okunan geri tepme sayısını etkileyen en önemli parametrelerden biri çekiç tipi, diğeri ise uygulanan ölçme ve ölçüleri değerlendirme yöntemidir. Uygulamada L ve N tipi çekiçler kullanılmakta olup, bu çalışmada ise ISRM (1981) tarafından önerilen L tipi Schmidt sertlik çekici kullanılmıştır. Bu yöntemde, deney örneği veya kayaç yüzeyi üzerinde birbirinden uzaklığı çekicinin uç çapına eşit olan en az 10 ayrı noktadan okunan geri tepme sayıları, çekicinin konumuna göre standardize edilir ve en küçük 5 değer çıkarılarak ortalama geri tepme sayısı hesaplanır.

Bu çalışmada, jeoteknik birimlerdeki taze kaya ve süreksizlik yüzeylerinde Schmidt çekici ile ölçümler yapılmıştır. Ölçümler düşey tutuş açısına göre yapıldığı için belirlenen değerlere herhangi bir düzeltme uygulanmamıştır. Schmidt çekici ölçüm sonuçları özet olarak Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Jeoteknik birimlerdeki taze kaya ve süreksizlik yüzeylerine ait ortalama Schmidt çekici geri tepme sayısı değerleri

| Jeoteknik birim | Litoloji | Schmidt Çekici Geri Tepme Sayısı | | |
|-----------------|-----------|----------------------------------|---------------|--------------|
| | | Taze yüzey | Tabaka yüzeyi | Eklem yüzeyi |
| A1 | Tüf | 36 | - | 28 |
| A2 | Tüf | 42 | 40 | 38 |
| B1-B2 | Kireçtaşı | 48 | 36 | 39 |
| C1 | Marn | 24 | 23 | 17 |
| D1 | Bazalt | 44 | - | 36 |

3.3.3. Nokta Yük Dayanım İndeksi

Kaya malzemelerinin tek eksenli basınç dayanımının tahmininde de kullanılmakta olan nokta yük dayanım indeksi, nokta yükleme deneyi ile saptanmaktadır. ISRM (1985) tarafından önerilen yöntemlerde, kaya malzemesine ait nokta yük dayanım indeksinin 20-25 katının tek eksenli basınç dayanımına eşit olduğu belirtilmiştir. Nokta yükleme deneyinin uygulanışı ve deney sonuçlarının değerlendirilmesi ilk kullanıldığından bu yana büyük değişiklikler göstermiştir.

Bu çalışmada, nokta yükleme deneyi yapılırken ISRM (1985) tarafından önerilen yöntemler esas alınmıştır. Deneyler, karot ve kaya bloklarından alınan düzensiz şekilli örnekler üzerinde uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan düzensiz şekilli örneklerin 50 ± 35

mm boyutunda, kalınlık/genişlik oranının ise 0.3-1.0 arasında olmasına dikkat edilmiştir. Örnekler konik uçların arasına örneğın eksenine dik yönde yerleştirilmiş ve 10-60 sn içinde kırılacak şekilde yükleme yapılmıştır. ISRM (1985), bu deneyin en az 10 örnek üzerinde yapılmasını önermiştir. Nokta yük dayanım indeksi aşağıdaki eşitlikle belirlenmiştir.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (1)$$

Burada; I_s : düzeltilmemiş nokta yük dayanım indeksi (MPa), D_e : düzensiz örneklerde konik başlıkların temas noktalarından geçen en küçük kesit alanı (mm^2) ve P: yenilme anında kaydedilen yüküdür (kgf).

(1) nolu formülle hesaplanan nokta yük dayanım indeksini referans çapa göre düzeltmek için ISRM (1985) tarafından önerilen (2) ve (3) nolu formüller kullanılmıştır. I_s değeri, çapsal deneylerde D'nin diğeri deneylerde ise D_e 'nin bir fonksiyonu olarak değışmektedir.

$$F = (D_e / 50)^{0.45} \quad (2)$$

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad (3)$$

Burada; $I_{s(50)}$: düzeltilmiş nokta yük dayanım indeksi (MPa) ve F: boyut düzeltme faktörüdür.

Proje aşamasında açılan temel sondajlarından A1 ve B2 jeoteknik birimleri hariç diğeri jeoteknik birimlerin düşük süreksizlik sıklığına sahip olması nedeniyle standartlara uygun boyutlarda tek eksenli basınç deneyi için örnekler derlenememiştir. Ayrıca, açılan temel sondajları, jeoteknik birimlere ait litolojik birimlerin tamamını kesmediğı için kesilmeyen litolojik birimler için mostralardan kaya blokları alınmış ve nokta yükleme deneyi için düzensiz şekilli örnekler hazırlanmıştır. Bu nedenle, tüm jeoteknik birimlerde aynı deney yöntemini uygulamak amacıyla kaya malzemelerinin tek eksenli basınç dayanımını belirlemede nokta yükleme deneyinden yararlanılmıştır.

Kaya malzemelerine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri hesap edilirken güvenli tarafta kalmak için nokta yük dayanım indeksi değerinin 20 katı alınmıştır. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerinin nokta yük dayanım indeksi ve bu değerlere karşılık gelen tek eksenli basınç dayanımı değerleri özet olarak Tablo 3.3’de, deneyler sırasında alınan ölçümler ve yapılan hesaplamalar ise Ek 2’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerine ait nokta yük dayanım indeksi ve bu değerlere karşılık gelen tek eksenli basınç dayanımı değerleri

| Jeoteknik Litoloji birim | Nokta Yük Dayanım İndeksi ($I_{s(50)}$, MPa) | | | | | | Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σ_{ci} , MPa) | | | |
|-----------------------------|--|----------|----------|----------|----------|------|--|----------|----------|----------|
| | Örnek sayısı | Ortalama | En büyük | En küçük | Std. Sp. | | Ortalama | En büyük | En küçük | Std. Sp. |
| A1 | Tüf | 42 | 1.72 | 4.28 | 0.37 | 0.82 | 34.34 | 85.70 | 7.38 | 16.41 |
| | Volk. breş | 20 | 1.36 | 3.00 | 0.15 | 0.74 | 27.12 | 59.92 | 3.10 | 14.88 |
| A2 | Tüf | 30 | 3.64 | 8.13 | 1.38 | 1.72 | 72.79 | 162.51 | 27.59 | 34.47 |
| | Kumtaşı | 26 | 5.68 | 7.26 | 4.12 | 1.19 | 113.56 | 145.14 | 82.33 | 23.78 |
| | Kireçtaşı | 42 | 4.15 | 8.36 | 1.41 | 1.82 | 83.01 | 167.23 | 28.14 | 36.48 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 24 | 8.47 | 12.70 | 4.89 | 3.33 | 169.48 | 253.95 | 97.84 | 66.53 |
| B1-B2 | Kireçtaşı | 29 | 2.75 | 4.73 | 0.62 | 1.01 | 55.05 | 94.64 | 12.46 | 20.11 |
| C1 | Marn | 53 | 1.31 | 2.82 | 0.27 | 0.66 | 26.19 | 56.31 | 5.37 | 13.27 |
| D1 | Bazalt | 38 | 3.05 | 11.91 | 1.29 | 2.25 | 60.98 | 238.26 | 25.83 | 44.94 |

3.4. Süreksizliklerin Özellikleri

Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimlerin içerdiği süreksizliklerin özelliklerini belirlemek için açılan az sayıdaki temel sondajlarından, A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerinde belirli bir metreye kadar kazılmış tünelin duvarlarında ve mostralarda yapılan hat etüdü yönteminden yararlanılmıştır. Hat etüdü yöntemi, geniş bir alanda kaya kütesinin incelenmesine ve süreksizliklerden doğrudan ölçüm alınmasına olanak kılan bir yöntemdir. Jennings (1970) tarafından önerilen yöntem, Piteau (1970) tarafından yeniden düzenlenmiş, Priest ve Hudson (1976) ve ISRM (1978) tarafından geliştirilmiştir. Süreksizliklerin özellikleriyle ilgili veri toplanmasında en doğru sonuçların alındığı hat etüdü yöntemiyle yapılan ölçümler süreksizlik ara uzaklığı ve devamlılığına bağlı olarak mostralarda genellikle tek hat üzerinde yapılmıştır. Ölçümün yapılacağı hattın üzerine şerit metre serilerek, başlangıç ve bitiş noktaları işaretlenmiştir. Şerit metre merkezde olmak üzere hattın 50 cm üzerinde ve altında kalan kısımlar esas alınarak süreksizliklerin özellikleri tanımlanmıştır.

3.4.1. Süreksizlik Takımı

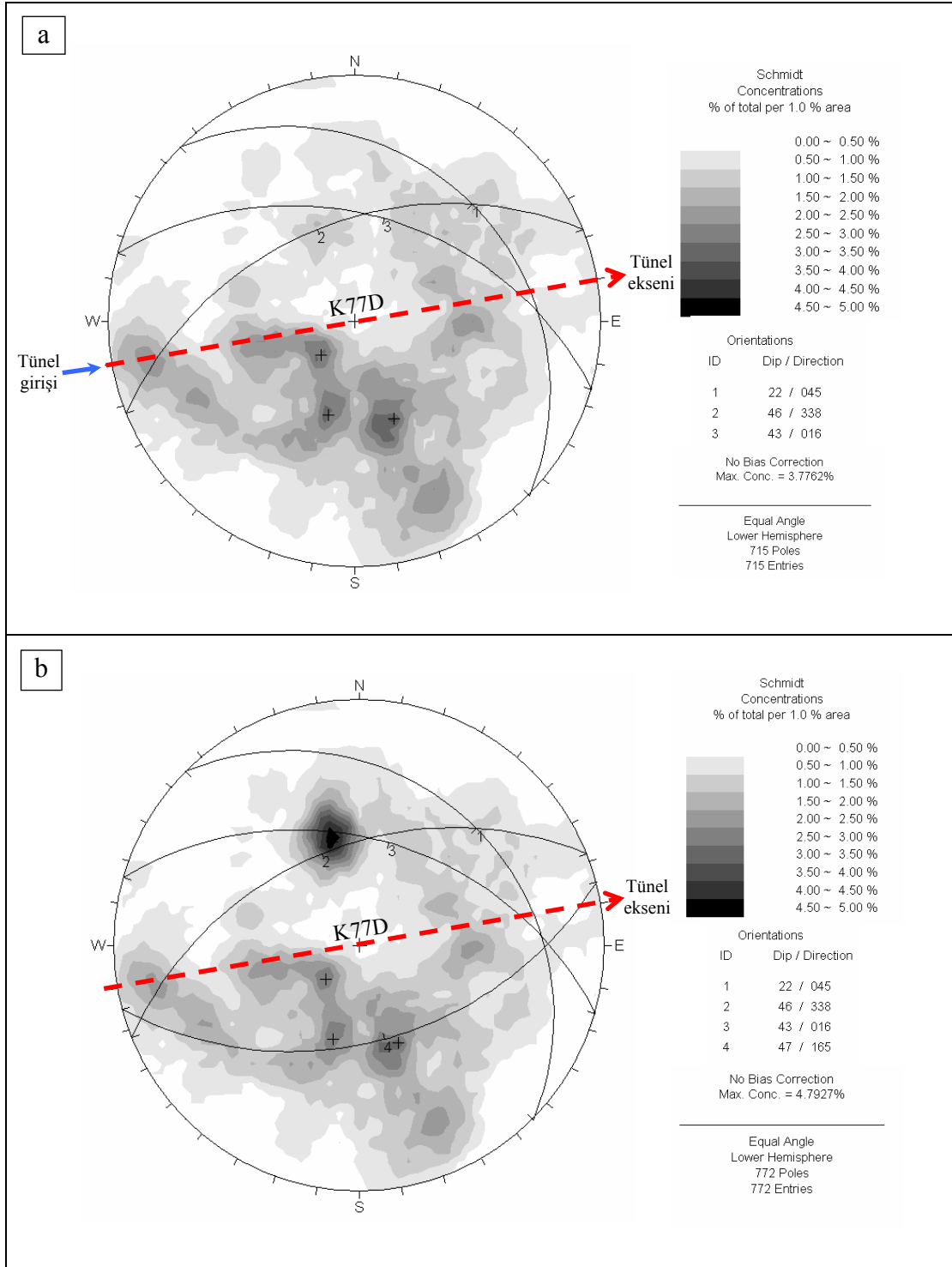
Süreksizlik takımlarının sayısının ve bunların ağırlıklı yönelimlerinin belirlenmesi ve mühendislik uygulamalarında değerlendirilmesi amacıyla, ekvatorial eş-alan stereonetine işlenen kutup noktalarından yararlanılarak kontur diyagramları hazırlanmaktadır. Bu diyagramların hazırlanmasındaki amaç, benzer özelliklere sahip süreksizliklerin dağılımından, dolayısıyla kutup noktalarının gruplaşmasından hareketle süreksizlik takımı sayılarının ve bu takımların eĝemen yönelimlerinin belirlenmesidir. Kontur diyagramlarıyla yapılan değerlendirmelerde, kutupların en fazla yoğunlaştığı konturların merkezi esas alınarak süreksizlik takımları için eĝemen yönelimler belirlenmektedir. Bununla birlikte, en çok gözlenen yönelim değerlerinden sapma gösteren tali yönelimlerin bulunabileceği değerlendirmede dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada, Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan kaya kütlelerinde yapılan pusula ölçümleri ile her bir jeoteknik birime ait ana süreksizlik takımları ve bu süreksizlik takımlarının yönelimleri belirlenmiş ve Dips v5.0 (Rocscience, 1998) programı yardımıyla kontur diyagramları hazırlanmıştır (Şekil 3.15-3.18).

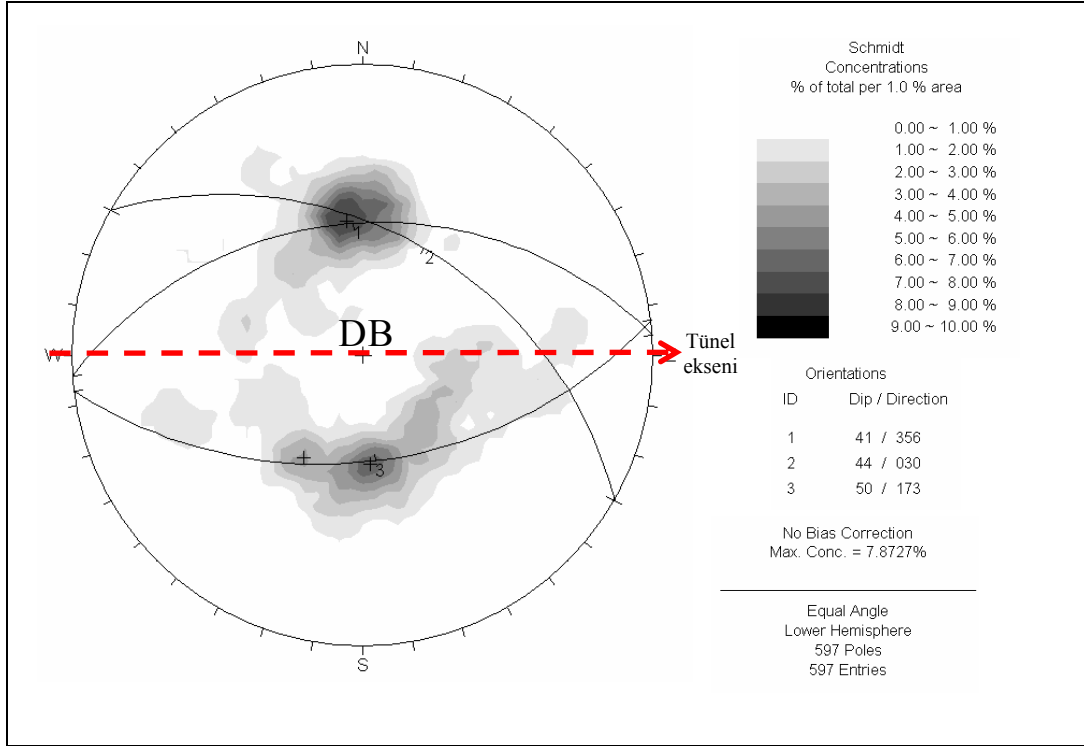
Jeoteknik birimlere ait kontur diyagramlarının yorumlanması neticesinde, A1 jeoteknik biriminin üç, A2 jeoteknik biriminin dört, B1 ve B2 jeoteknik birimlerinin üç, C1 jeoteknik biriminin dört, D1 jeoteknik biriminin ise üç süreksizlik takımı içerdiği belirlenmiştir. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik takımlarının yönelimleri Tablo 3.4'de özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.4. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik takımlarının yönelimleri

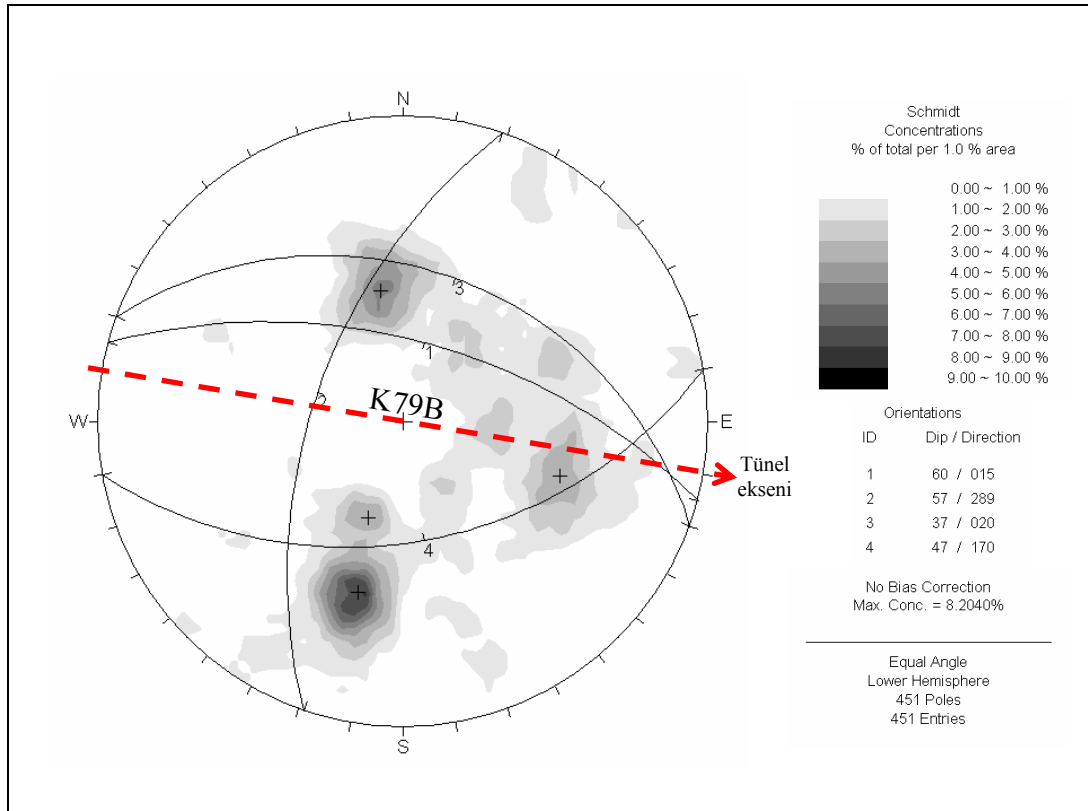
| Jeoteknik birim | Takım no | Süreksizlik türü | Eĝim açısı | Eĝim yönü açısı |
|-----------------|----------|------------------|------------|-----------------|
| A1 | 1 | Ekleme | 22 | 45 |
| | 2 | Ekleme | 46 | 338 |
| | 3 | Ekleme | 43 | 16 |
| A2 | 1 | Ekleme | 22 | 45 |
| | 2 | Ekleme | 46 | 338 |
| | 3 | Ekleme | 43 | 16 |
| | 4 | Tabaka | 47 | 165 |
| B1-B2 | 1 | Ekleme | 41 | 356 |
| | 2 | Ekleme | 44 | 30 |
| | 3 | Tabaka | 50 | 173 |
| C1 | 1 | Ekleme | 60 | 15 |
| | 2 | Ekleme | 57 | 289 |
| | 3 | Ekleme | 37 | 20 |
| | 4 | Tabaka | 47 | 170 |
| D1 | 1 | Ekleme | 68 | 200 |
| | 2 | Ekleme | 33 | 109 |
| | 3 | Ekleme | 30 | 323 |



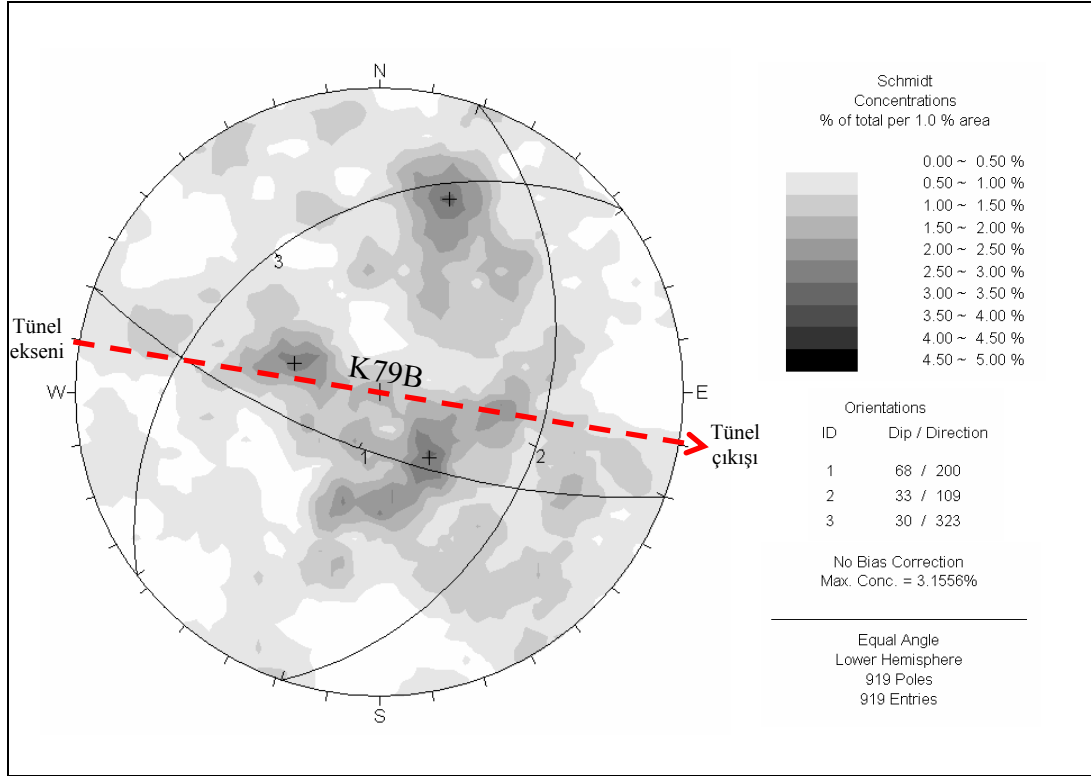
Şekil 3.15. A1 (a) ve A2 (b) jeoteknik birimlerine ait kontur diyagramları (alt yarı küre)



Şekil 3.16. B1 ve B2 jeoteknik birimlerine ait kontur diyagramı (alt yarı küre)



Şekil 3.17. C1 jeoteknik birimine ait kontur diyagramı (alt yarı küre)



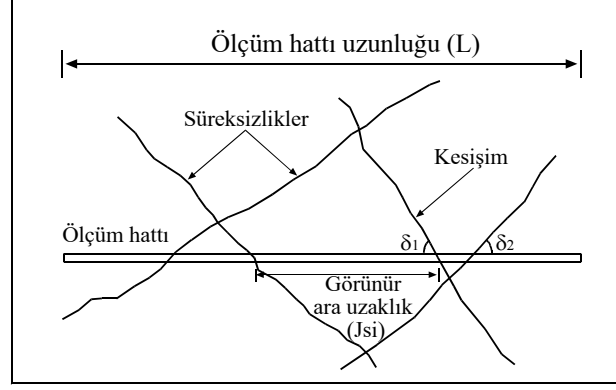
Şekil 3.18. D1 jeoteknik birimine ait kontur diyagramı (alt yarı küre)

3.4.2. Süreksizlik Ara Uzaklığı

Süreksizlik ara uzaklığı, bir süreksizlik takımındaki süreksizlikler arasındaki dik uzaklık olarak tanımlanmaktadır (ISRM, 1981). Süreksizlik ara uzaklığı, mostra yüzeyinde süreksizlik doğrultusuna dik yönde serilen bir şerit metre boyunca gözlenen süreksizliklerin sayılması ile belirlenebileceği gibi (Şekil 3.19), sondaj karotlarından da tayin edilebilmektedir. Ölçüm hattı veya sondaj eksenini boyunca iki süreksizlik arasında ölçülen uzaklık “görünür ara uzaklık” olarak bilinir. Süreksizlik takımlarında iki süreksizlik arasındaki dik uzaklığı yani gerçek ara uzaklığı bulmak için aşağıdaki düzeltme yapılmıştır.

$$\text{Gerçek süreksizlik aralığı} = J_{si} \times \sin(\delta_1) \times \sin(\beta_j) \quad (4)$$

Burada; J_{si} : görünür ara uzaklık, δ_1 : süreksizlik doğrultusu ile ölçüm hattı arasındaki açı ve β_j : süreksizlik eğim açısıdır.



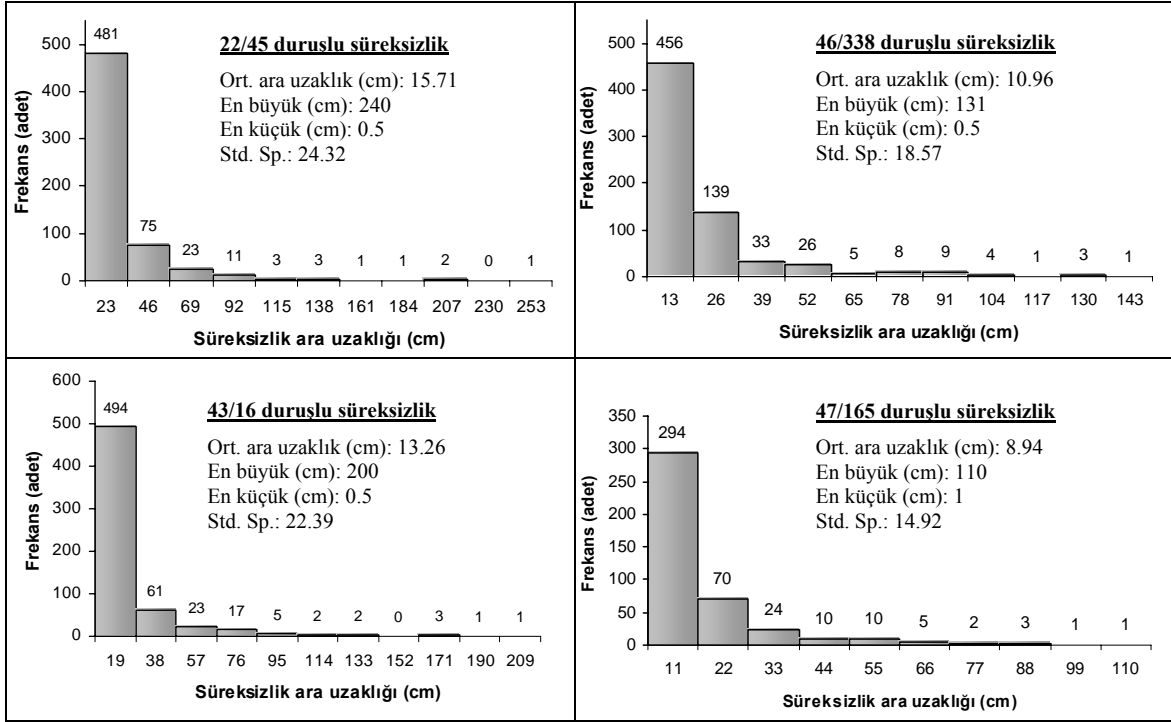
Şekil 3.19. Hat etüdü ile süreksizlik ara uzaklığı tayini (ISRM, 1981)

Priest ve Hudson (1976) süreksizlik ara uzaklığını daha duyarlı bir şekilde belirlemek için istatistiksel dağılım modellerinden yararlanmış ve süreksizlik ara uzaklığının negatif eksponansiyel dağılıma uyduğunu belirlemiştir.

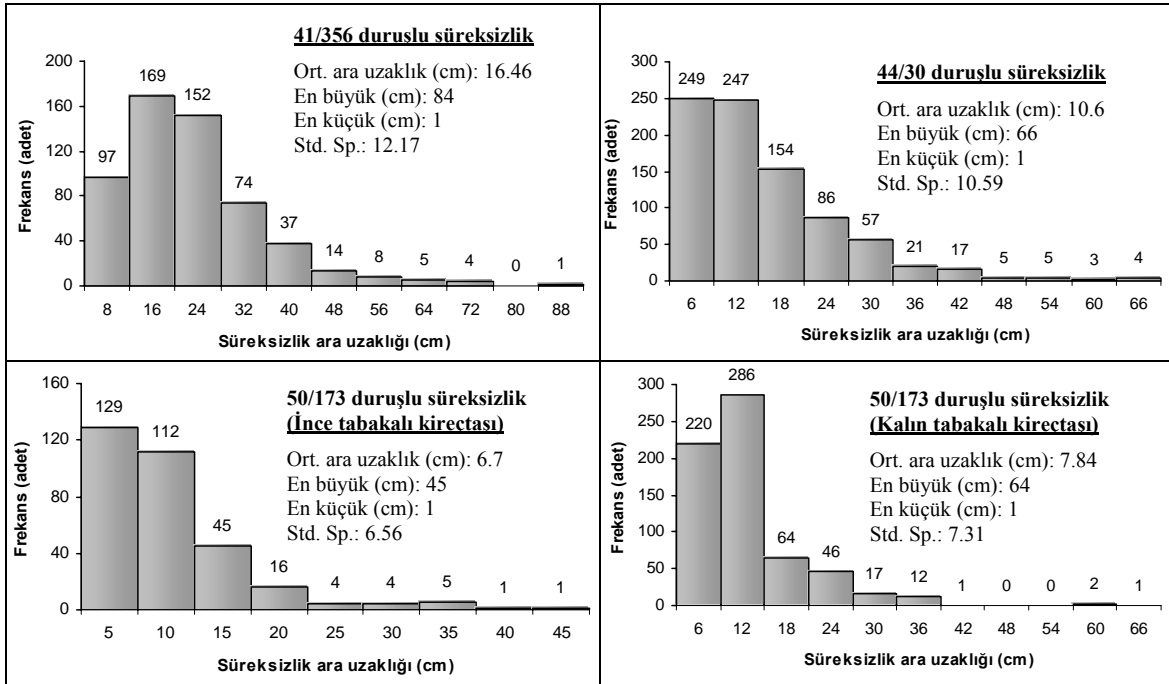
Bu çalışmada, her bir jeoteknik birime ait süreksizlik ara uzaklığı değerleri, ara uzaklık dağılımlarıyla ilişkili olarak belirlenen sınıf aralıklarına göre gruplandırılmış ve frekansları hesaplanmıştır. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik ara uzaklığı değerleri Şekil 3.20-3.23’de, süreksizlik ara uzaklığı parametrelerine ait % frekans dağılımları ise Tablo 3.5’de verilmiştir.

Histogramlar incelendiğinde, tüm jeoteknik birimler için süreksizlik ara uzaklığı dağılımlarının negatif eksponansiyel dağılıma uyduğu görülmektedir. A1 ve A2 jeoteknik birimlerindeki 4 süreksizlik takımı için ortalama ara uzaklık değerleri sırasıyla 15.71 cm, 10.96 cm, 13.26 cm ve 8.94 cm; B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki 3 süreksizlik takımı için 16.46 cm, 10.6 cm, 6.7 cm (ince tabakalı kireçtaşı) ve 7.84 cm (kalın tabakalı kireçtaşı); C1 jeoteknik birimindeki 4 süreksizlik takım için 6.89 cm, 3.56 cm, 2.39 cm ve 2.12 cm; D1 jeoteknik birimindeki 3 süreksizlik takımı için ise 14.17 cm, 10.18 cm ve 12.28 cm olarak hesaplanmıştır.

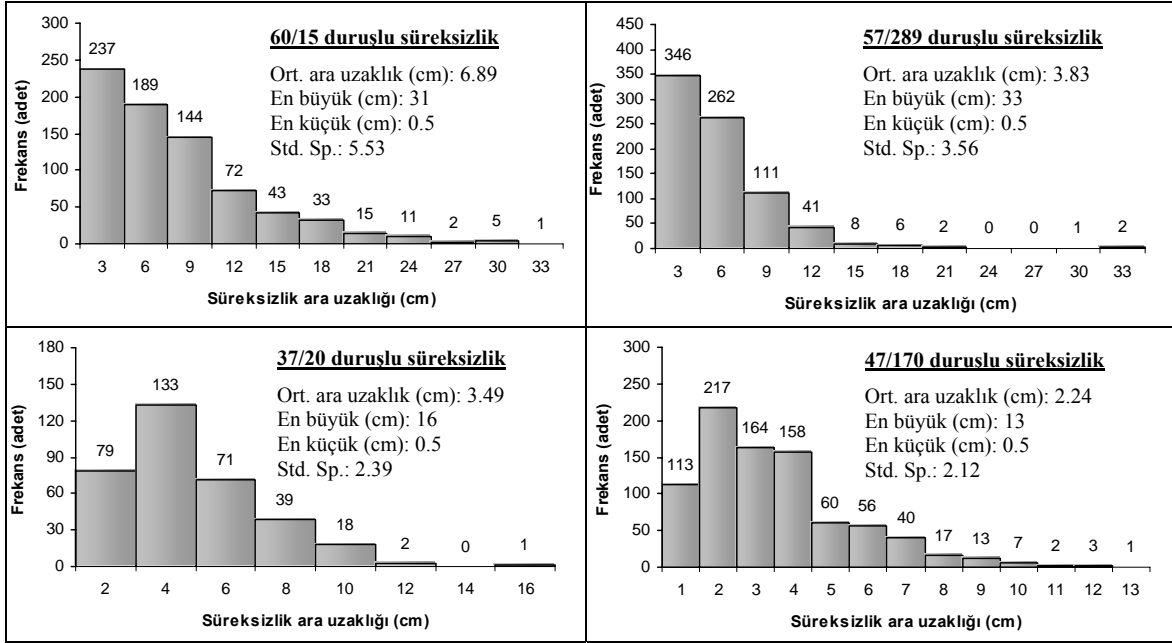
Tablo 3.5’de görüldüğü gibi ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre A1, A2, B1, B2 ve D1 jeoteknik birimlerindeki tüm süreksizlik takımları ile C1 jeoteknik birimindeki 60/15 yönelimli süreksizlik takımının “yakın ara uzaklıklı”, C1 jeoteknik birimindeki diğer süreksizlik takımlarının ise “dar ara uzaklıklı” olduğu belirlenmiştir.



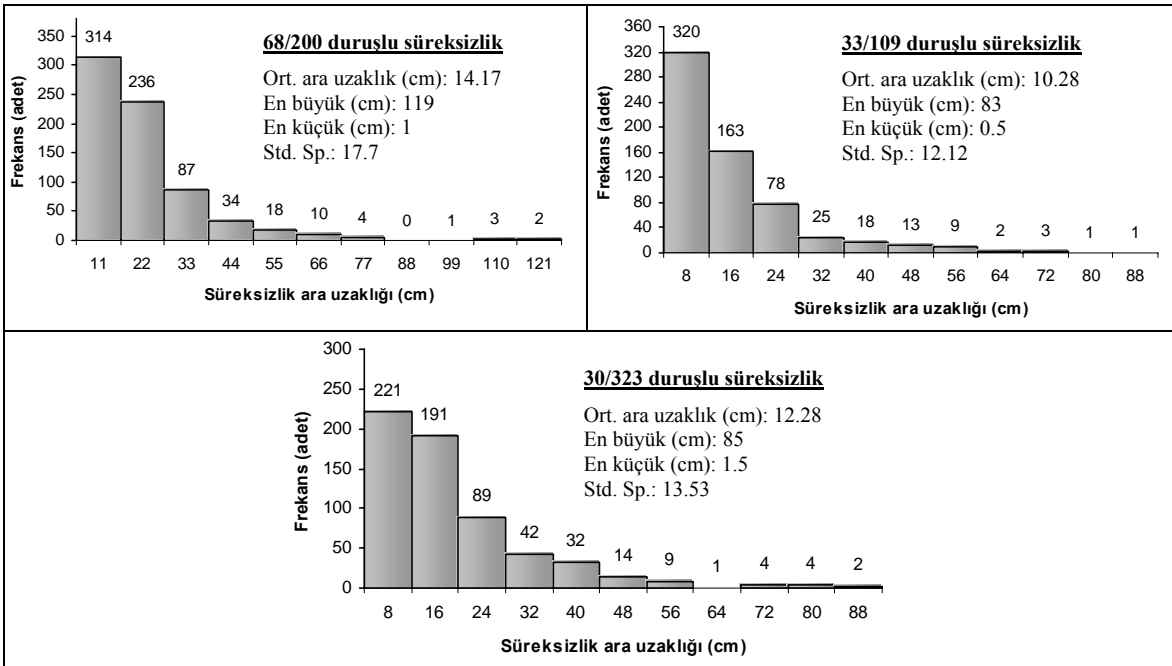
Şekil 3.20. A1 ve A2 jeoteknik birimlerindeki süreksizliklere ait ara uzaklık histogramları



Şekil 3.21. B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki süreksizliklere ait ara uzaklık histogramları



Şekil 3.22. C1 jeoteknik birimindeki süreksizliklere ait ara uzaklık histogramları



Şekil 3.23. D1 jeoteknik birimindeki süreksizliklere ait ara uzaklık histogramları

Tablo 3.5. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik takımlarına ait ara uzaklık değerlerinin dağılımı ve bu değerlerin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Süreksizlik ara uzaklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) | | A1 ve A2 jeoteknik birimleri | | | | B1 ve B2 jeoteknik birimleri | | | | C1 jeoteknik birimi | | | D1 jeoteknik birimi | | | |
|---|------------------------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 22/45 | 46/338 | 43/16 | 47/165 | 41/356 | 44/30 | B1 50/173 | B2 50/173 | 60/15 | 57/289 | 37/20 | 47/170 | 68/200 | 33/109 | 30/323 |
| Süreksizlik ara uzaklığı (cm) | Tanımlama | Süreksizlik ara uzaklığı frekans değeri (%) | | | | | | | | | | | | | | |
| < 2 | Çok dar ara uzaklıklı | 2 | 1 | 3 | 5 | - | 2 | 2 | - | 13 | 16 | 10 | 20 | 1 | 2 | - |
| 2-6 | Dar ara uzaklıklı | 18 | 26 | 28 | 29 | 6 | 24 | 40 | 24 | 38 | 57 | 66 | 65 | 18 | 28 | 20 |
| 6-20 | Yakın ara uzaklıklı | 53 | 50 | 48 | 48 | 53 | 52 | 52 | 66 | 45 | 26 | 24 | 15 | 45 | 52 | 53 |
| 20-60 | Orta derecede ara uzaklıklı | 21 | 19 | 14 | 15 | 39 | 21 | 6 | 10 | 4 | 1 | - | - | 33 | 17 | 26 |
| 60-200 | Geniş ara uzaklıklı | 5 | 4 | 4 | 2 | 2 | - | - | - | - | - | - | - | 56 | 1 | 2 |
| 200-600 | Çok geniş ara uzaklıklı | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 3 | - | - |
| >600 | İleri derecede geniş ara uzaklıklı | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Ortalama süreksizlik ara uzaklığı (cm) | | 15.71 | 10.96 | 13.26 | 8.94 | 16.46 | 10.6 | 6.7 | 7.84 | 6.89 | 3.56 | 2.39 | 2.12 | 14.17 | 10.28 | 12.28 |
| Tanımlama | | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Dar ara uzaklıklı | Dar ara uzaklıklı | Dar ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı |

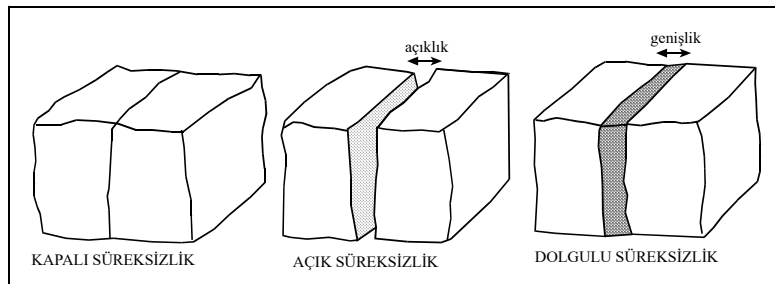
3.4.3. Süreksizlik Yüzeylerinin Açıklığı

Açıklık, bir süreksizliğin birbirine bakan karşılıklı iki yüzeyi arasındaki dik uzaklık olup, boş olabileceği gibi su veya her hangi bir dolgu maddesi tarafından da doldurulmuş olabilmektedir (ISRM, 1981; Şekil 3.24).

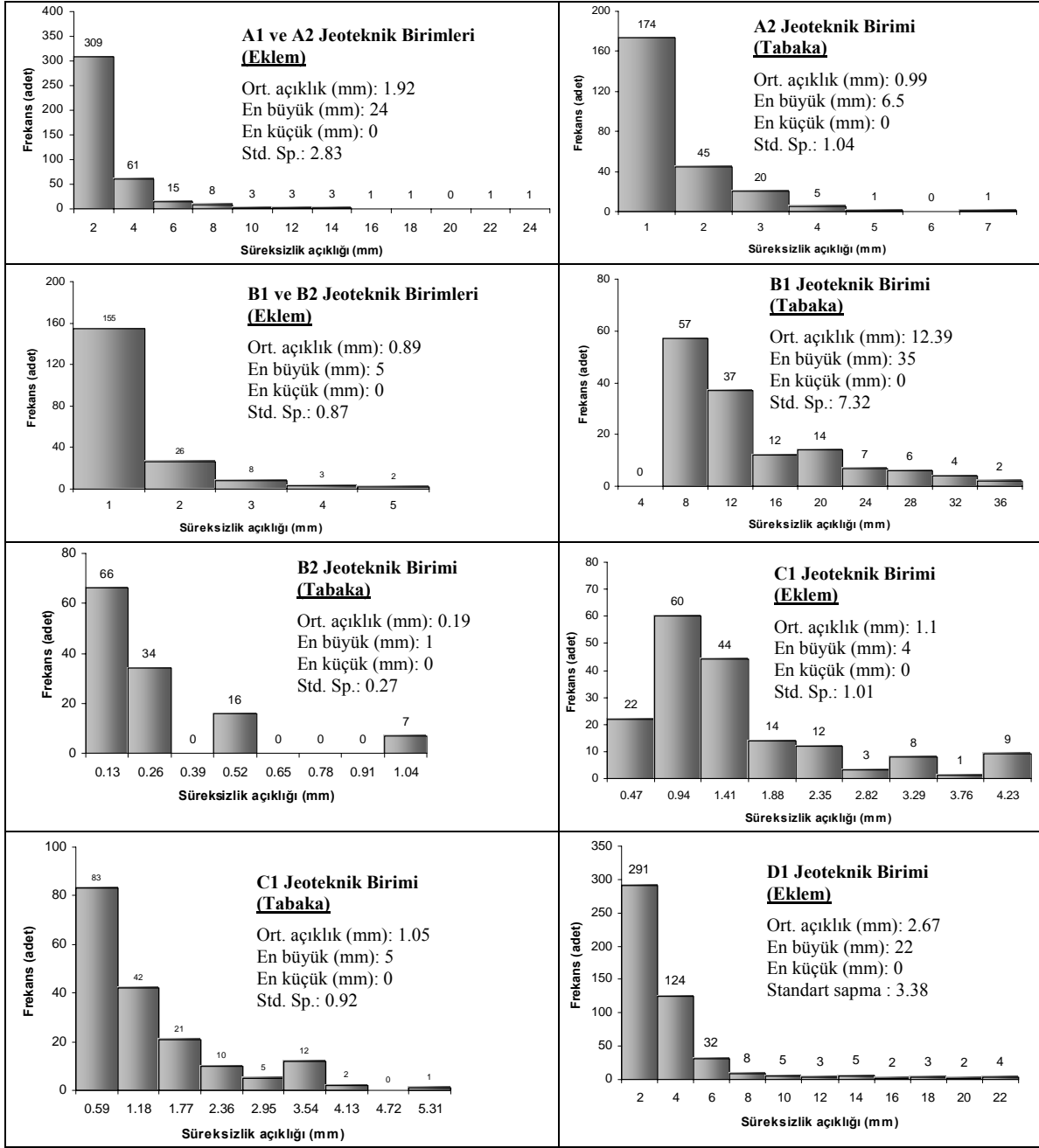
Bu çalışmada, kompas mikrometresi kullanılarak süreksizliklere ait açıklık değerinin ölçülmesiyle ortalama açıklık değerleri belirlenmiştir. Süreksizliklerin açıklığı, ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Tablo 3.6). Her bir jeoteknik birimine ait açıklık değerleri süreksizlik türlerine göre ISRM (1981) tarafından önerilen sınıf aralıkları göz önüne alınarak gruplandırılmış ve histogramları çizilmiştir (Şekil 3.25).

A1 ve A2 jeoteknik birimlerindeki eklem ve tabaka türü süreksizlikler için ortalama açıklık değerleri sırasıyla 1.92 mm ve 0.99 mm; B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki eklem ve tabaka türü süreksizlikler için 0.89 mm, 12.39 mm (ince tabakalı kireçtaşı) ve 0.19 mm (kalın tabakalı kireçtaşı); C1 jeoteknik birimlerindeki eklem ve tabaka türü süreksizlikler için 1.1 mm ve 1.05 mm; D1 jeoteknik birimindeki eklem türü süreksizlikler için ise 2.67 mm'dir.

Tablo 3.6'da görüldüğü gibi ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre A1, A2, C1 jeoteknik birimlerindeki tüm süreksizlikler ile B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki eklem türü süreksizliklerin "açık", B1 jeoteknik birimindeki tabaka türü süreksizliklerin "geniş", B2 jeoteknik birimindeki tabaka türü süreksizliklerin "sıkı", D1 jeoteknik birimindeki eklem türü süreksizliklerin ise "orta derecede geniş" olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.24. Süreksizliklerin iki yüzeyi arasındaki açıklığı tanımlayan blok diyagramları (ISRM, 1981)



Şekil 3.25. Jeoteknik birimlerdeki tabaka ve eklemlere ait süresizlik açıklığı histogramları

Tablo 3.6. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik açıklığı değerlerinin dağılımı ve bu değerlerin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Süreksizlik açıklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) | | A1 ve A2 jeoteknik birimleri | | B1 ve B2 jeoteknik birimleri | | C1 jeoteknik birimi | | D1 jeoteknik birimi | |
|---|---------------------|---|--------|------------------------------|-----------|---------------------|-------|---------------------|---------------------|
| | | Eklem | Tabaka | Eklem | B1 Tabaka | B2 Tabaka | Eklem | Tabaka | Eklem |
| Süreksizlik açıklığı (mm) | Tanımlama | Süreksizlik açıklığı frekans değeri (%) | | | | | | | |
| < 0.1 | Çok sıkı | 22 | 25 | 19 | - | 5 | 13 | 14 | 13 |
| 0.1-0.25 | Sıkı | - | - | - | - | 28 | - | - | - |
| 0.25-0.5 | Kısmen açık | 13 | 30 | 32 | - | 13 | 35 | 33 | - |
| 0.5-2.5 | Açık | 43 | 37 | 43 | - | 6 | 42 | 44 | 35 |
| 2.5-10 | Orta derecede geniş | 20 | 8 | 6 | 43 | - | 10 | 9 | 48 |
| >10 | Geniş | 2 | - | - | 57 | - | - | - | 4 |
| 10-100 | Çok geniş | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 100-1000 | Aşırı geniş | - | - | - | - | - | - | - | - |
| >1000 | Boşluklu | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Ortalama süreksizlik açıklığı (mm) | | 1.92 | 0.99 | 0.89 | 12.39 | 0.19 | 1.1 | 1.05 | 2.67 |
| Tanımlama | | Açık | Açık | Açık | Geniş | Sıkı | Açık | Açık | Orta derecede geniş |

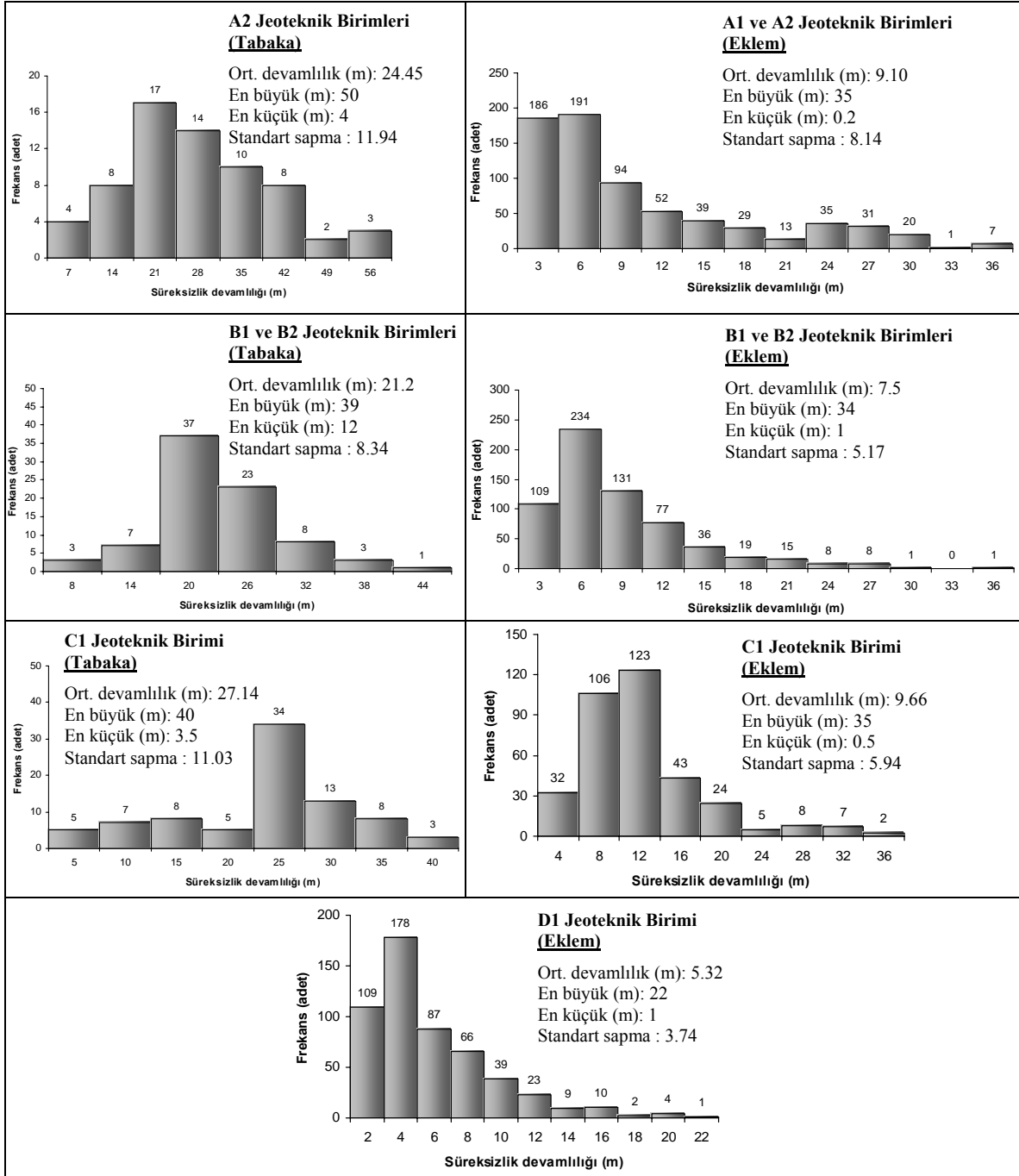
3.4.4. Süreksizliklerin Devamlılığı

Süreksizliklerin devamlılığı, süreksizliklerin bir düzlemdeki alansal yayılımının göstergesi veya boyutları olup, duraylılığı etkileyen önemli bir özelliktir. Devamlılık alansal oran olarak tanımlanmasına karşın, alansal ölçümün zor olması nedeniyle genellikle mostradaki süreksizlik izinin ölçülmesiyle bulunmaktadır (ISRM, 1981). Bu durumda devamlılık, süreksizlik izi olarak ele alınmaktadır.

Bu çalışmada, devamlılık parametresi ISRM'deki (1981) tanımlamalar esas alınarak doğrudan şerit metre ile mostra yüzeylerinde yapılan ölçümler ile belirlenmiştir. Süreksizliklerin devamlılığı ISRM (1981) tarafından önerilen devamlılık tanımlama ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Tablo 3.7). Her bir jeoteknik birimine ait devamlılık değerleri süreksizlik türlerine göre ISRM (1981) tarafından önerilen sınıf aralıkları göz önüne alınarak gruplandırılmış ve histogramları çizilmiştir (Şekil 3.26).

A1 ve A2 jeoteknik birimlerindeki tabaka ve eklem türü süreksizlikler için ortalama devamlılık değerleri sırasıyla 24.45 m ve 9.1 m; B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki tabaka ve eklem türü süreksizlikler için 21.2 m ve 7.5 m; C1 jeoteknik birimlerindeki tabaka ve eklem türü süreksizlikler için 27.11 m ve 9.66 m; D1 jeoteknik birimindeki eklem türü süreksizlikler için ise 5.18 m'dir.

Tablo 3.7'de görüldüğü gibi ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre jeoteknik birimlerindeki tabaka türü süreksizliklerin “çok yüksek devamlı”, eklem türü süreksizliklerin ise “orta derecede devamlı” olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.26. Jeoteknik birimlerdeki tabaka ve eklemlere ait devamlılık histogramları

Tablo 3.7. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik devamlılığı değerlerinin dağılımı ve bu değerlerin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Süreksizlik devamlılığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) | | A1 ve A2 jeoteknik birimleri | | B1 ve B2 jeoteknik birimleri | | C1 jeoteknik birimi | | D1 jeoteknik birimi |
|--|------------------------|---|--------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| | | Ekleme | Tabaka | Ekleme | Tabaka | Ekleme | Tabaka | Ekleme |
| Süreksizlik devamlılığı (m) | Tanımlama | Süreksizlik açıklığı frekans değeri (%) | | | | | | |
| < 1 | Çok düşük devamlı | 3 | 1 | - | - | - | - | - |
| 1-3 | Düşük derecede devamlı | 24 | - | 17 | - | 3 | - | 40 |
| 3-10 | Orta derecede devamlı | 43 | 10 | 64 | - | 56 | 37 | 51 |
| 10-20 | Yüksek devamlı | 16 | 30 | 6 | 59 | 35 | 15 | 9 |
| >20 | Çok yüksek devamlı | 14 | 58 | 3 | 41 | 6 | 48 | - |
| Ortalama süreksizlik devamlılığı (m) | | 9.1 | 24.45 | 7.5 | 21.2 | 9.66 | 27.11 | 5.18 |
| Tanımlama | | Orta derecede devamlı | Çok yüksek devamlı | Orta derecede devamlı | Çok yüksek devamlı | Orta derecede devamlı | Çok yüksek devamlı | Orta derecede devamlı |

3.4.5. Süreksizlik Yüzeylerinin Pürüzlülüğü ve Dalgahlığı

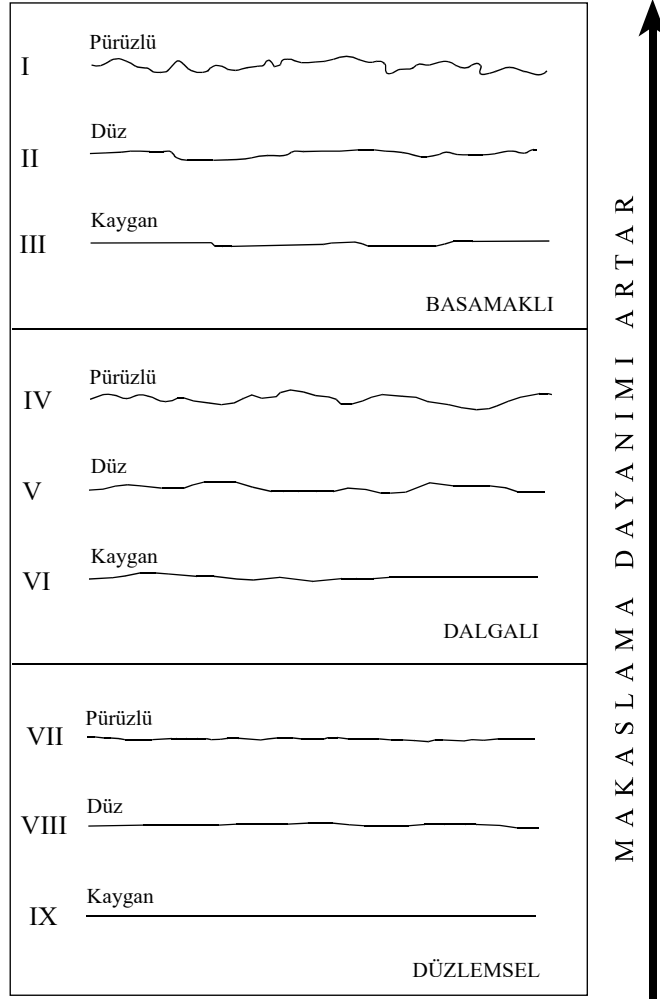
Pürüzlülük ve dalgahlık sırasıyla, bir süreksizlik yüzeyinin küçük ölçekte (cm boyutunda) ve büyük ölçekte (m boyutunda) düzlemsellikten sapmasının bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (ISRM, 1981). Süreksizlik pürüzlüğünün belirlenmesine yönelik değişik yöntemler önerilmiştir.

Bu çalışmada, pürüzlülük ve dalgahlık parametreleri bulunurken, ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlerden yararlanılmıştır. Pürüzlülük ölçümleri yapılırken, arazide telli profilometre ile ölçülen süreksizlik yüzeyi profillerinin, mevcut standart profillerle karşılaştırılması esasına dayanan ve ISRM (1981) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Şekil 3.27). Ayrıca, eklem ve tabaka yüzeylerine ait Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen süreksizlik yüzeyi pürüzlük sayısı (JRC) değerini belirlemek için süreksizlik yüzeylerinden alınan değişik ölçüm profillerinden yararlanılmıştır. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik yüzeyleri pürüzlülük ve dalgahlık tanımlamaları Tablo 3.8’de özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.8’de görüldüğü gibi, ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre jeoteknik birimlerindeki eklem türü süreksizliklere ait yüzeylerin “dalgalı pürüzlü”; A1, A2, B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki tabaka türü süreksizliklere ait yüzeylerin “dalgalı düz”; C1 jeoteknik birimindeki tabaka türü süreksizliklere ait yüzeylerin ise “düzlemsel pürüzlü” olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.8. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünün ve dalgahlığının ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi ve JRC değer aralıkları

| Jeoteknik birim | Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü ve dalgahlığı | | | |
|-----------------|--|-------|-------------------|-----|
| | Eklem yüzeyi | JRC | Tabaka yüzeyi | JRC |
| A1 ve A2 | Dalgalı pürüzlü | 6-8 | Dalgalı düz | 4-6 |
| B1 ve B2 | Dalgalı pürüzlü | 8-10 | Dalgalı düz | 2-4 |
| C1 | Dalgalı pürüzlü | 12-14 | Düzlemsel pürüzlü | 2-4 |
| D1 | Dalgalı pürüzlü | 8-10 | - | - |

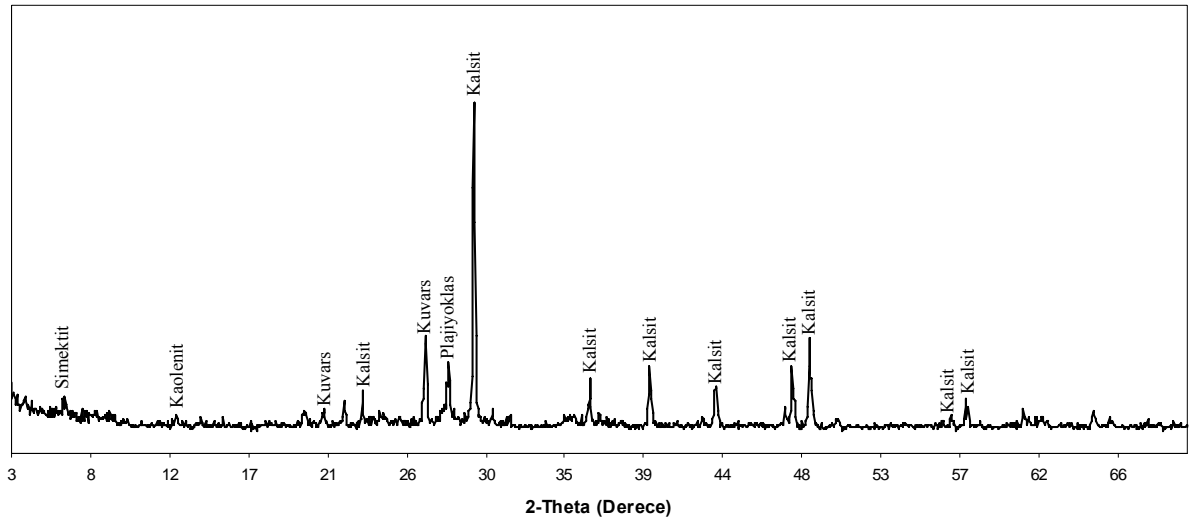


Şekil 3.27. Pürüzlülüğün kantitatif olarak belirlenmesinde kullanılan pürüzlülük profilleri (ISRM, 1981)

3.4.6. Süreksizliklerdeki Dolgu Malzemesinin Özelliği

Açık süreksizlik yüzeyleri boş olabileceği gibi su veya her hangi bir dolgu maddesi tarafından da doldurulmuş olabilmektedir (ISRM, 1981). Dolgu malzemesi, süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasını dolduran ve genellikle ana kaya malzemesinden daha zayıf olan malzemedir. Dolgulu bir süreksizlikte, süreksizliğin iki yüzeyi arasındaki dik uzaklık dolgunun kalınlığını verir. Kum, silt, kil, breş ve milonit tipik dolgu malzemeleridir. Kalsit, kuvars ve pirit gibi yüksek dayanıma sahip mineraller hariç tutulursa, dolgu içeren süreksizlikler dolgunsuz veya pürüzlü yüzeylere oranla daha düşük kayma dayanımına sahiptirler ve bu nedenle kaya kütlelerinin dayanımı üzerinde daha etkin bir rol oynamaktadırlar.

Bu çalışmada, süreksizliklerdeki dolgu malzemesinin özelliklerinin belirlenmesinde ISRM (1981) tanımlama ölçütlerinden yararlanılmıştır. A1 ve A2 jeoteknik birimlerindeki eklem türü süreksizlerin genellikle kil ve silt ile yer yerde 1-1.5 mm kalınlığında kalsit ile, tabaka türü süreksizlerin ise genellikle 0.5-1 mm kalınlığında kalsit ile dolgulu olduğu belirlenmiştir. B1 jeoteknik birimindeki marnların kalınlıkları 1-1.5 cm arasında olup, oldukça yumuşak ve jeolog çekicinin ucuyla kolaylıkla kazılabilir özelliktedir. Marnlar bu özelliklerinden dolayı kireçtaşı tabakalarının arasında dolgu görevi görmektedir. Seçilen marn örneklerinden XRD (X-ışını kırınımı) çekimleri yapılarak mineral türleri ve şişen kil grubunda kil içerip içermedikleri araştırılmıştır. Buna göre dolgu görevi gören marnlarda yoğun olarak gözlenen mineralin kalsit olduğu, diğer mineral birlikteliğinin ise plajiyoklas+kuvars+simektit+kaolenit olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.28). B2 jeoteknik birimindeki tabaka türü süreksizlikler kapalı olduğundan herhangi bir dolgu malzemesi tarafından doldurulmamıştır. B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki eklem türü süreksizlerin ise genellikle 0.5-1 mm kalınlığında gri, kirli beyaz renkli kil ile yer yer de kalsit ile dolgulu olduğu saptanmıştır. C1 jeoteknik birimindeki eklem ve tabaka türü süreksizliklerin genellikle çok ince kil sıvaması ile, D1 jeoteknik birimindeki eklem türü süreksizliklerin ise 1-2 mm kalınlığında kil ve silt türü malzeme ile dolgulu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.28. B1 jeoteknik birimindeki marn dolgularına ait yönlü XRD difraktogramı

3.4.7. Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi

Süreksizlik yüzeylerinin bozunma derecesinin tayini için ISRM (1981) tarafından arazi çalışmaları sırasında kullanılabilecek bozunma sınıflaması ölçütleri önerilmiştir. Bu sınıflama, arazi çalışması sırasında kolaylıkla belirlenebilen görsel bir sınıflamadır.

ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre belirlenen jeoteknik birimlerdeki süreksizlik yüzeylerinin bozunma dereceleri Tablo 3.9’da özet olarak verilmiştir. Buna göre, B1, B2, C1 ve D1 jeoteknik birimlerindeki eklem ve tabaka türü süreksizliklerin yüzeylerinin “az bozunmuş”, A1 ve A2 jeoteknik birimlerindeki tabaka türü süreksizliklerin yüzeylerinin “bozunmamış”, eklem türü süreksizliklerin yüzeylerinin ise “az bozunmuş” özellikte olduğu belirlenmiştir.

3.4.8. Süreksizlik Yüzeylerindeki Su Durumu

Kaya kütlelerinde suyun sızması, birbiriyle bağlantılı süreksizlikler boyunca (ikincil geçirgenlik) meydana gelen akışla gerçekleşir. Bu çalışmada, ISRM (1981) tarafından önerilmiş olan ve kazı aynalarında yapılacak gözlemleri esas alan su sızıntısıyla ilgili tanımlamalardan yararlanılmıştır.

Tünel güzergahındaki jeolojik yapı ve litoloji, yeraltı suyunun birikmesi veya kaçması üzerinde etkilidir. Antiklinallerde yeraltı suyu seviyesi düşük, senklinallerde ise yüksektir. Tünelin kıvrım eksenine yerine kanatlarda açılması su problemleriyle karşılaşma riskini en aza indirmektedir. Bu nedenle, Kordon Tepe Antiklinali’nin sağ kanadında açılması planlanan Cankurtaran Tüneli’nin kazısı sırasında süreksizliklerden aşırı bir su geliminin olması beklenmemektedir. Ancak, çalışma alanının ülkemizin en fazla yağış alan bölgesi içinde olduğu düşünüldüğünde süreksizlik yüzeylerinden damlama ve sızıntılar halinde devamlı su akışlarının olması mümkündür.

C1 jeoteknik biriminin üzerinden akan Cihala Çayı’nın bir kolu tünel güzergahını kesmektedir. C1 jeoteknik biriminin hem litolojik özelliği hem de süreksizliklerinin kille dolgulu olduğu göz önüne alındığında kazı işlemini olumsuz bir şekilde etkileyecek su sorunuyla karşılaşılması beklenmemektedir. Bu haliyle C1 jeoteknik birimi akitard özelliğindedir.

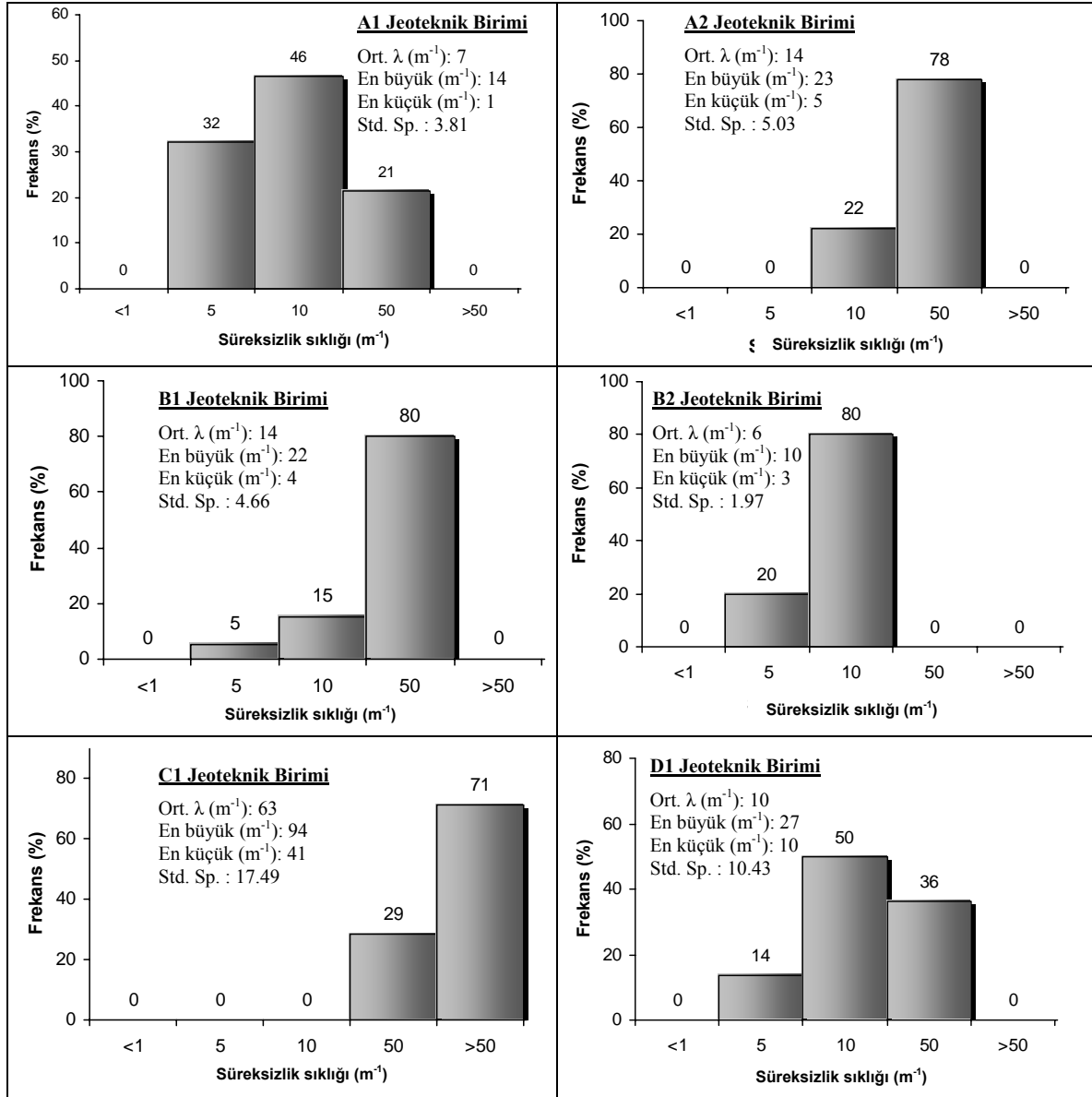
Bu nedenle, tünel güzergahındaki hem kaya kütlelerinin hem de süreksizlik yüzeylerinin, ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre sızıntı sınıflaması açısından “çok az sızıntı gözleniyor” sınıfına girdiği belirlenmiştir.

Tablo 3.9. Jeoteknik birimlerdeki kaya kütlelerinin ve süreksizlik yüzeylerinin bozunma derecesinin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Tanım | Tanımlama Ölçütü | Bozunma Derecesi | A1 ve A2 jeoteknik birimleri | | B1 ve B2 jeoteknik birimleri | | C1 jeoteknik birimi | | D1 jeoteknik birimi |
|-------------------------|--|------------------|------------------------------|------------|------------------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| | | | Eklem | Tabaka | Eklem | Tabaka | Eklem | Tabaka | Eklem |
| Bozunmamış (Taze) | Kayalarda bozunma gözlenmiyor, ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi olabilir. | I | - | Bozunmamış | - | - | - | - | - |
| Az bozunmuş | Kaya malzemesi ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeni ile tüm kayanın rengi değişmiş ve kaya taze halinden daha zayıf olabilir. | II | Az bozunmuş | - | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş |
| Orta derecede bozunmuş | Kayanın yarısından daha az bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrılmış veya parçalanmıştır. Kaya; taze yada renk değişimine uğramış olup, sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir. | III | - | - | - | - | - | - | - |
| İleri derecede bozunmuş | Kayanın yarısından daha fazla bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrılmış veya parçalanmıştır. Kaya; taze yada renk değişimine uğramış olup ya bir eklem kütle yada çekirdek taşı halindedir. | IV | - | - | - | - | - | - | - |
| Tamamen bozunmuş | Kayanın tümü toprak zemine dönüşerek ayrılmış veya parçalanmıştır. Ancak orijinal kaya kütlelerinin yapısı halen korunmaktadır. | V | - | - | - | - | - | - | - |
| Artık zemin | Kayanın tümü toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlelerinin yapısı ve dokusu kaybolmuştur. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmamakla birlikte zemin taşınmamıştır. | VI | - | - | - | - | - | - | - |

3.4.9. Süreksizlik Sıklığı

Bir metredeki doğal süreksizliklerin sayısı, ilerleme aralığı boyunca doğal süreksizliklerin sayısı için hesaplanmaktadır. Eğer, faylanma veya makaslama nedeniyle bir ilerleme aralığı boyunca süreksizlik sıklığında belirgin farklılıklar gözleniyorsa bu kısımlar için süreksizlik sıklığı ayrı olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, kaya kütleleri için süreksizlik sıklığı parametresinin tanımlanması amacıyla Franklin vd. (1971) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri kullanılmış olup, jeoteknik birimlere ait süreksizlik sıklığı değerlerinin yüzde dağılımları Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik sıklığı histogramları

A1 jeoteknik biriminin süreksizlik sıklığı değerlerine göre % 46'sı “kırıklı-çatlaklı”, % 32'si “az çatlaklı-kırıklı” ve % 21'i “çok çatlaklı-kırıklı”dır. A2 jeoteknik biriminin süreksizlik sıklığı değerlerine göre % 78'i “çok çatlaklı-kırıklı” ve % 22'si “kırıklı-çatlaklı”dır. B1 jeoteknik biriminin süreksizlik sıklığı değerlerine göre % 80'i “çok çatlaklı-kırıklı”, % 15'i “kırıklı-çatlaklı” ve % 5'i “az çatlaklı-kırıklı”dır. B2 jeoteknik biriminin süreksizlik sıklığı değerlerine göre % 80'i “kırıklı-çatlaklı” ve % 20'si “az çatlaklı-kırıklı”dır. C1 jeoteknik biriminin süreksizlik sıklığı değerlerine göre % 71'i “parçalanmış” ve % 29'u “çok çatlaklı-kırıklı”dır. D1 jeoteknik biriminin süreksizlik sıklığı değerlerine göre % 14'ü “az çatlaklı-kırıklı”, % 50'si “kırıklı-çatlaklı” ve % 36'sı “çok çatlaklı-kırıklı”dır. Tüm jeoteknik birimlere ait süreksizlik sıklığına ait % frekans dağılımları Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Jeoteknik birimlerin Franklin vd. (1971) tarafından önerilen süreksizlik sıklığı tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Süreksizlik sıklığı (λ , m ⁻¹) | Tanımlama | Jeoteknik birimler | | | | | |
|---|-----------------------|--------------------|----|----|----|----|----|
| | | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 |
| Süreksizlik sıklığı frekans değeri (%) | | | | | | | |
| <1 | Masif | - | - | - | - | - | - |
| 1-4 | Az çatlaklı-kırıklı | 32 | - | 5 | 20 | - | 14 |
| 5-10 | Kırıklı-çatlaklı | 46 | 22 | 15 | 80 | - | 50 |
| 11-50 | Çok çatlaklı- kırıklı | 21 | 78 | 80 | - | 29 | 36 |
| >50 | Parçalanmış | - | - | - | - | 71 | - |

3.4.10. Hacimsel Eklem Sayısı

Palmström (1982, 1985 ve 1996) tarafından tanımlanan Hacimsel eklem sayısı (J_v), birim hacimdeki, diğer bir ifadeyle 1 metreküpteki eklem sayısını göstermektedir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (5)$$

Burada; S_n : gözlenen her bir süreksizlik takımı için bulunan metre cinsinden ara uzaklık değeridir.

Her bir süreksizlik takımına ait ara uzaklık değerlerinden yararlanılarak bulunan hacimsel eklem sayısı, ISRM (1981) ve Palmström (1996) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmiştir (Tablo 3.11). Buna göre, A1, B2, ve D1 jeoteknik birimlerinin “yüksek”, A2 ve B1 jeoteknik birimlerinin “çok yüksek”, C1 jeoteknik biriminin ise “aşırı derecede yüksek” hacimsel eklem sayısına sahip kaya kütleleri olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.11. Jeoteknik birimlere ait J_v değerlerinin ISRM (1981) ve Palmström (1996) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Jeoteknik birim | Hacimsel eklem sayısı | | | |
|-----------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------|
| | J_v (eklem/m ³) | Tanımlama (ISRM, 1981) | Tanımlama (Palmström, 1996) | |
| A1 | 23.03 | Küçük bloklar | Yüksek | Çok eklemli |
| A2 | 34.22 | Çok küçük bloklar | Çok yüksek | İleri derecede eklemli |
| B1 | 30.43 | Çok küçük bloklar | Çok yüksek | İleri derecede eklemli |
| B2 | 28.26 | Küçük bloklar | Yüksek | Çok eklemli |
| C1 | 131.61 | Çok küçük bloklar | Aşırı derecede yüksek | Parçalanmış |
| D1 | 24.93 | Küçük bloklar | Yüksek | Çok eklemli |

3.4.11. Kaya Kalite Göstergesi (RQD)

Kaya kalite göstergesi (RQD), ilk olarak Deere (1964) tarafından sondajdan alınan karot boylarından yararlanılarak temel kayalarının kalitesini ifade etmek için aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır.

$$RQD = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{L} \quad (6)$$

Burada; n: ilerleme aralığındaki karot parçalarının sayısı; l: RQD'ye dahil edilen uzunluğu 10 cm ve daha büyük olan karot parçalarının boyu, L: ilerleme uzunluğudur (cm).

RQD, karotlu sondajlarla saptanabileceği gibi, kaya yüzleklerinden, yarma, shaft, galeri ve tünel duvarlarından yararlanılarak da saptanabilmektedir. Palmström (2005), 1 m³'lük kaya bloğunun içerdiği süreksizlik sayısından yararlanarak RQD'nin aşağıdaki eşitlikle bulunabileceğini belirtmiştir.

$$RQD = 110 - 2.5 J_v \quad (7)$$

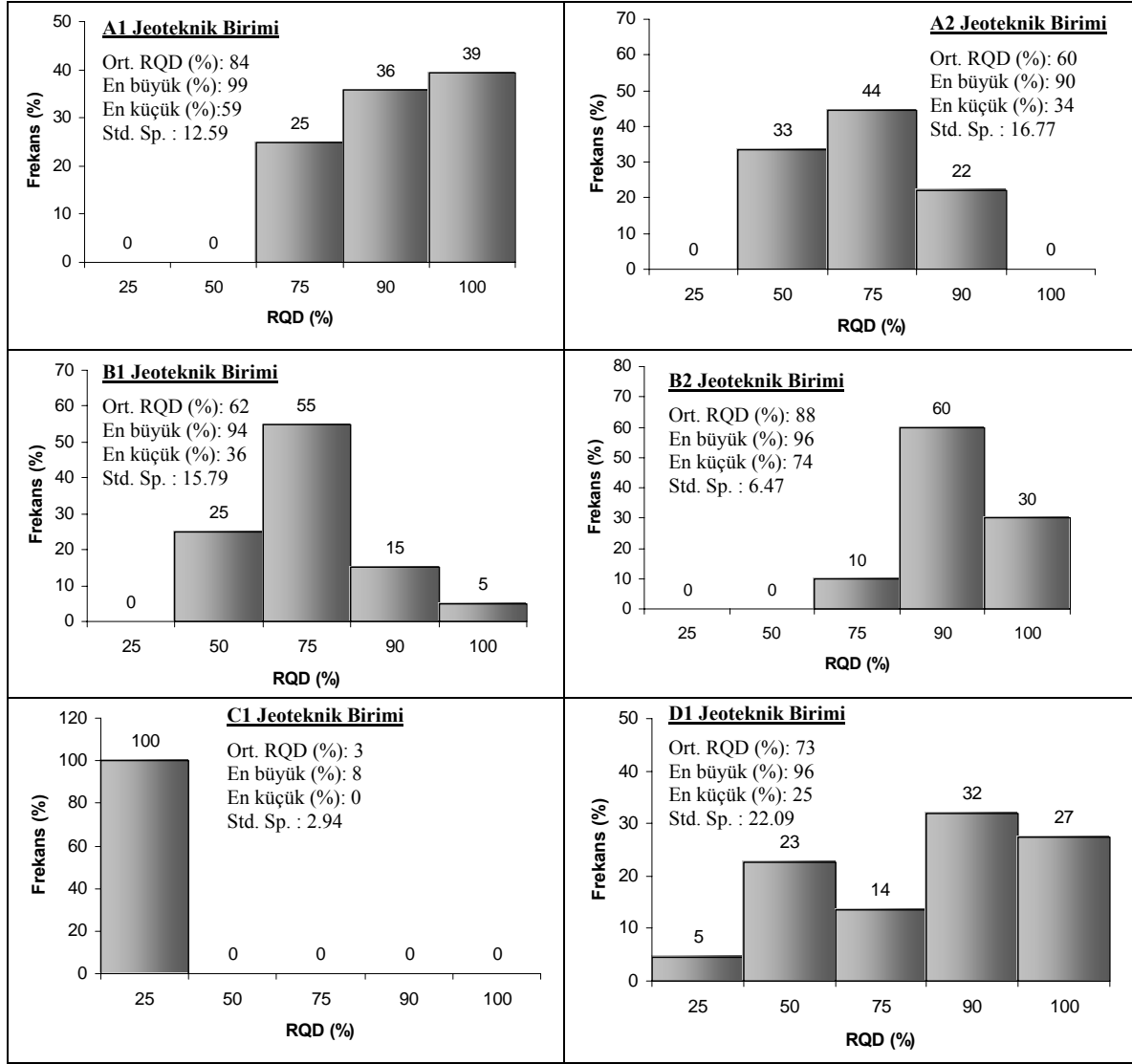
Burada; J_v : 1 m³'lük kaya bloğundaki süreksizlik sayısıdır ($J_v < 4$ ise $RQD = 100$ alınır).

Priest ve Hudson (1976), 1 m³'teki çatlak sayısı yerine, birim uzunluktaki (1 m) bir doğru boyunca saptanan süreksizlik sayısını göz önüne alarak aşağıdaki bağıntıyı vermiştir.

$$RQD = 100 e^{-(0.1\lambda)}(0.1\lambda + 1) \quad (8)$$

Burada; λ : 1 metre uzunluğundaki ölçüm hattını kesen ortalama süreksizlik sayısıdır.

Cankurtaran Tünel Projesi kapsamında açılan temel sondajlarında jeoteknik birimlerin sadece belirli bir bölümü kesilmiştir. Bu nedende, her bir jeoteknik birimi temsil edecek RQD değerini sadece sondaj verilerine göre belirlemek yanlış yorumlamaların yapılmasına neden olacaktır. Bu nedenle, sondaj verileri, tünel içi duvar ve mostra ölçümleriyle de desteklenmiştir. Bu çalışmada, ölçüm hattı boyunca birbirine dik yönde yapılan ölçümlerle belirlenen süreksizlik sıklığı (λ) değerlerinden yararlanılarak jeoteknik birimler için RQD değerleri hesaplanmıştır (Şekil 3.30, Tablo 3.12). İnceleme alanında sistematik süreksizliklerin yanı sıra düzensiz süreksizliklerin de gelişmiş olması nedeniyle RQD'yi belirlemek için Priest ve Hudson (1976) tarafından önerilen 8 numaralı eşitlikten yararlanılmıştır. 8 numaralı eşitlik, süreksizlik ara uzaklığı negatif eksponansiyel dağılım gösteren kaya kütlelerinde RQD için en doğru sonuçları vermektedir. Diğer dağılım modellerini gösteren süreksizlik ara uzaklığı değerleri için Palmström (2005) tarafından önerilen 7 numaralı eşitliği kullanmak, RQD değeri için daha anlamlı sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik ara uzaklığı histoğramları negatif eksponansiyel dağılım gösterdiği için RQD hesaplamalarında 8 numaralı eşitlik kullanılmıştır.



Şekil 3.30. Jeoteknik birimlere ait kaya kalite göstergesi (RQD) histogramları

Tablo 3.12. Jeoteknik birimlere ait RQD değerlerinin Deere (1964) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Jeoteknik birim | RQD (%) | Tanımlama (Deere, 1964) |
|-----------------|---------|-------------------------|
| A1 | 84 | İyi |
| A2 | 60 | Orta |
| B1 | 62 | Orta |
| B2 | 88 | İyi |
| C1 | 3 | Çok zayıf |
| D1 | 73 | Orta |

RQD değerlerine göre A1 jeoteknik biriminin % 39'u "çok iyi kaliteli", % 36'sı "iyi kaliteli" ve % 25'i "orta kaliteli"; A2 jeoteknik biriminin % 22'si "iyi kaliteli", % 44'ü "orta kaliteli" ve % 33'ü "zayıf kaliteli"; B1 jeoteknik biriminin % 5'i "çok iyi kaliteli", % 15'i "iyi kaliteli", % 55'i "orta kaliteli" ve % 25'i "zayıf kaliteli"; B2 jeoteknik biriminin % 30'u "çok iyi kaliteli", % 60'ı "iyi kaliteli" ve % 10'u "orta kaliteli"; C1 jeoteknik biriminin % 100'ü "çok zayıf kaliteli"; D1 jeoteknik biriminin % 27'si "çok iyi kaliteli", % 32'si "iyi kaliteli", % 14'ü "orta kaliteli", % 23'ü "zayıf kaliteli" ve % 5'i "çok zayıf kaliteli"dir.

3.4.12. Süreksizlik Yüzeylerinin Kayma Dayanımı

Kaya kütlesinin duraylılığı değerlendirilirken, kaya kütlesindeki kritik süreksizliklerin kayma dayanımının belirlenmesi oldukça önemlidir. Kaya kütlesinin mekanik davranışı, kaya malzemesinin ve süreksizliklerin özellikleri tarafından denetlenmektedir. Kaya malzemesine oranla daha düşük dayanım değerlerine sahip olan süreksizlikler, kaya ortamının dayanımını ve mekanik davranışını belirleyen ana etmendir. Pürüzlü süreksizlik yüzeylerinin doruk kayma dayanımlarının belirlenmesi için yapılan büyük ölçekli yerinde kayma deneyi zaman alıcı ve pahalı bir deneydir. Bu deneye alternatif olarak Barton (1973) tarafından pratik ampirik bir yöntem önerilmiştir. Barton yenilme ölçütü olarak da bilinen yönteme ait Barton ve Choubey (1977) tarafından yeniden düzenlenen kayma dayanımı eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (9)$$

Burada; τ : kayma gerilmesi (MPa), σ_n : süreksizlik düzlemine etki eden normal gerilme (MPa), JRC: süreksizlik yüzeyi pürüzlülük katsayısı, JCS: süreksizlik yüzeyinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), ϕ_r : artık sürtünme açısıdır.

Artık sürtünme açısı (ϕ_r), Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen (10) nolu eşitlikle belirlenmektedir.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r / R) \quad (10)$$

Burada; R: taze yüzeyin Schmidt çekici geri tepme sayısı, r: süreksizlik yüzeyinin Schmidt çekici geri tepme sayısı, ϕ_b : pürüzsüz ve düz yüzeye ait temel sürtünme açısıdır.

Süreksizlik yüzeyi pürüzlülük katsayısı (JRC) Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen süreksizlik yüzeyi profilleri ile ölçüm profillerinin karşılaştırılmasından belirlenebileceği gibi aşağıda verilen eşitlik yardımıyla da belirlenebilmektedir.

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)} \quad (11)$$

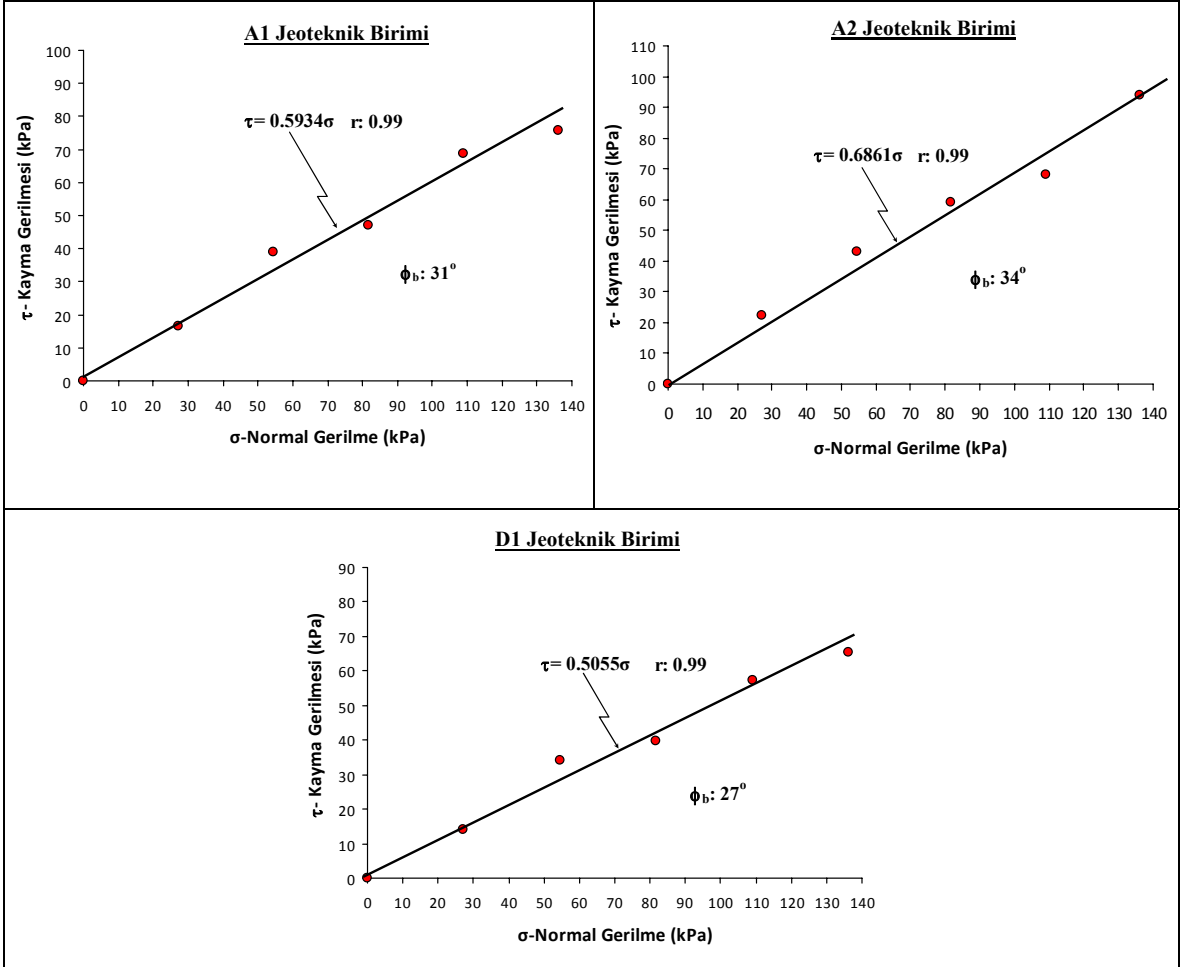
Burada; α : süreksizlik yüzeyinde yapılan Tilt deneyi sonucunda belirlenen kayma açısı, σ_n : Tilt deneyinde kaymanın gerçekleştiği süreksizlik düzlemine etki eden normal gerilme (deneyde küçük kaya parçaları kullanıldığından 0.1 MPa alınabilir).

Süreksizlik yüzeyinin tek eksenli basınç dayanımı (JCS) ise Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen abakta kayanın birim hacim ağırlık ve süreksizlik yüzeyine ait Schmidt çekici geri tepme sayısının okunması ile belirlenmiştir. Güvenli tarafta kalmak amacıyla hesaplanan JCS değerleri negatif sapma değeri kadar azaltılmıştır.

Barton yenilme ölçütünde kullanılan değişkenler belirlendikten sonra, düşük normal gerilme değerleri için kayma gerilmesi değerleri hesaplanır ve elde edilen $\sigma_n - \tau$ veri çiftleri kullanılarak doğrusal olmayan yenilme zarfı çizilir. Doğrusal olmayan yenilme zarfına çizilen teğetten süreksizlik yüzeylerine ait doruk kohezyon (c_p) ve doruk sürtünme açısı (ϕ_p) belirlenir.

Bu çalışmada, jeoteknik birimlere ait temel sürtünme açısını (ϕ_b) belirlemek için, CANMET (1977) tarafından önerilen yöntemle göre deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır. Arazi çalışmalarından derlenen blok örnekleri 6x6x1 cm ebatlarında yüzeyleri pürüzsüz olacak şekilde kesilmiş ve farklı normal gerilmeler altında beş adet makaslama deneyi yapılmıştır (Şekil 3.31). Cankurtaran Tüneli'nin giriş portal şevi A1 jeoteknik biriminde, çıkış portal şevi D1 jeoteknik biriminde, giriş bölümündeki yol yarması şevi A2 jeoteknik biriminde, çıkış bölümündeki yol yarması şevi ise D1

jeoteknik biriminde açılacaktır. Yapılan deneylerde A1 jeoteknik birimi için tuf, A2 jeoteknik birimi için ince taneli tuf ve D1 jeoteknik birimi için bazalt örnekleri kullanılmıştır. Elde edilen veriler yardımıyla A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerindeki yüzeyleri pürüzsüz olan örneklere ait σ - τ regresyon doğruları çizilmiştir (Şekil 3.32). İlk önce σ ve τ değişkenleri arasındaki ilişkinin derecesini gösteren korelasyon katsayısının anlamlılığı % 95 güven düzeyinde (α : 0.05 anlamlılık düzeyinde) kritik Pearson korelasyon katsayısı değerleri kullanılarak test edilmiş, daha sonra çizilen regresyon doğrularına ait denklemlerin anlamlılığı % 95 güven düzeyinde varyans analizi ile test edilmiştir. İstatistiksel analizler yapılırken SPSS v15.0 (2006) bilgisayar programından yararlanılmıştır.



Şekil 3.31. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerine ait ϕ_b değerinin belirlenmesi için deformasyon kontrollü makaslama deneylerine göre çizilen σ - τ grafikleri

Yapılan testler sonucunda σ ve τ değişkenlerine ait korelasyon katsayısı değerlerinin kritik Pearson korelasyon katsayısı değerlerinden büyük olduğu ve bu iki değişken arasındaki ilişkinin sayısallaştırılması için oluşturulacak regresyon denklemlerinin anlamlı olabileceği belirlenmiştir. Oluşturulan regresyon denklemlerinin anlamlılığını test etmek için yapılan varyans analizinde, F_{hesap} değerlerinin F_{tablo} değerlerinden büyük olduğu tespit edilmiş ve denklemlerin anlamlı olduğu saptanmıştır (Tablo 3.13).

Tablo 3.13. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerine ait ϕ_b değerlerinin belirlenmesi için deformasyon kontrollü makaslama deneyiyle belirlenen σ - τ değişkenlerinin α : 0.05 anlamlılık düzeyine göre korelasyon ve varyans analizlerinin sonuçları

| Jeoteknik birim | Hesaplanan korelasyon katsayısı (r_{hesap}) | Kritik Pearson korelasyon katsayısı (r_{tablo}) | Korelasyon katsayısının testi | Regresyon denklemi | F_{hesap} | F_{tablo} | Regresyon denkleminin testi |
|-----------------|--|--|-------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|
| A1 | 0.99 | 0.811 | İlişki anlamlı H_0 ret | $\tau = 0.5934\sigma$ | 211.258 | 7.71 | İlişki anlamlı H_0 ret |
| A2 | 0.99 | 0.811 | H_0 ret | $\tau = 0.6861\sigma$ | 271.588 | 7.71 | H_0 ret |
| D1 | 0.99 | 0.811 | H_0 ret | $\tau = 0.5055\sigma$ | 218.541 | 7.71 | H_0 ret |

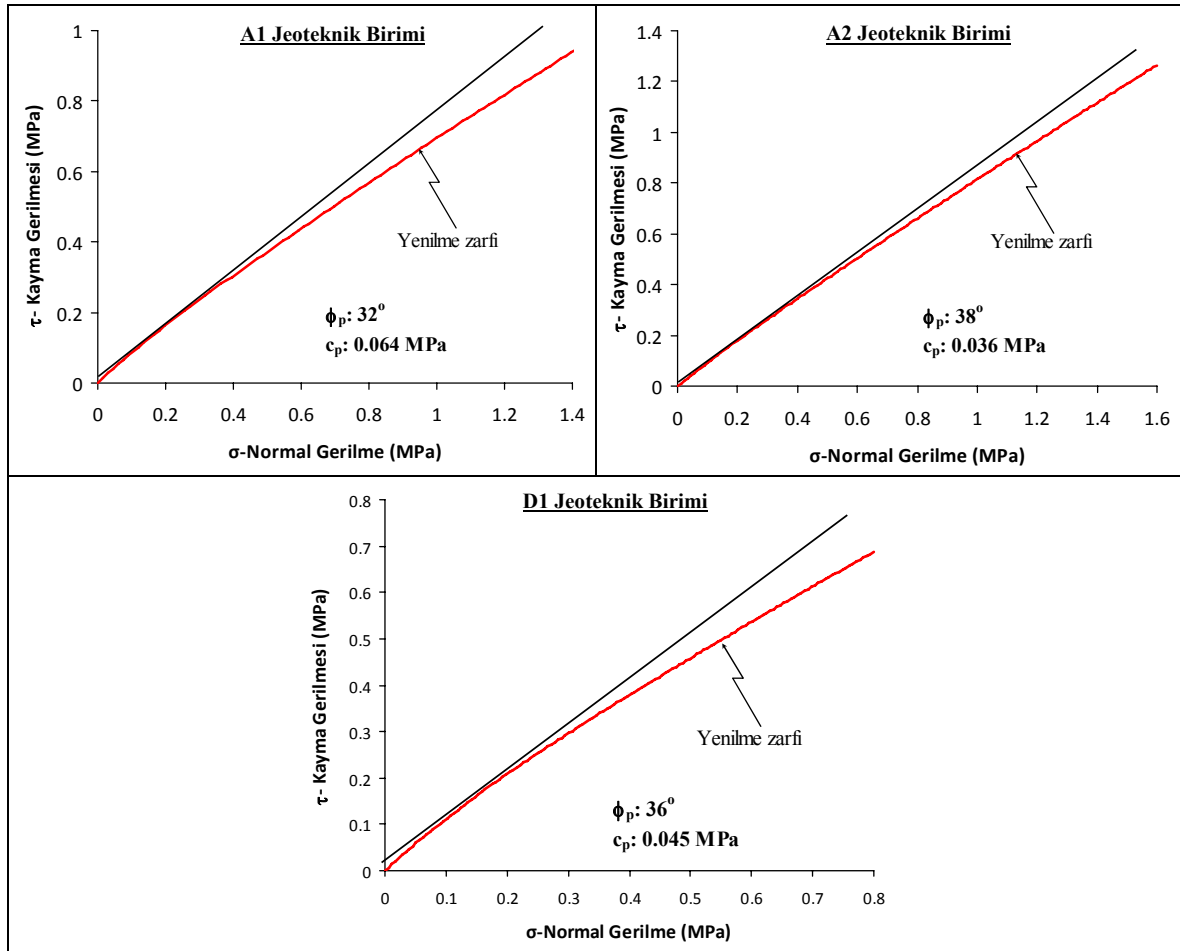
H_0 : Kayma gerilmesi ile normal gerilme arasında doğrusal bir ilişki yoktur.
 H_1 : Kayma gerilmesi ile normal gerilme arasında doğrusal bir ilişki vardır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerine ait temel sürtünme açısı (ϕ_b) değerlerinin sırasıyla 31° , 34° ve 27° olduğu belirlenmiştir. Tilt deneyi, A1 ve D1 jeoteknik birimlerindeki eklem yüzeylerinde; A2 jeoteknik biriminde ise yüksek derecede devamlılığa sahip olduğu için tabaka yüzeylerinde yapılmıştır. Barton yenilme ölçütünde kullanılan değişkenler Tablo 3.14'de özet olarak verilmiştir.

A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerine etkiyen normal gerilme düzeyi dikkate alınarak seçilen farklı normal gerilmeler için kayma gerilmesi değerleri hesaplanmış ve elde edilen σ_n - τ veri çiftleri kullanılarak doğrusal olmayan yenilme zarfı çizilmiştir. Doğrusal olmayan yenilme zarfına çizilen teğetten süreksizlik yüzeylerine ait doruk kohezyon (c_p) ve doruk sürtünme açısı (ϕ_p) değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.32).

Tablo 3.14. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerdeki süreksizliklerin kayma dayanımını belirlemek için uygulanan Barton yenilme ölçütünde kullanılan değişkenler

| Jeoteknik birim | Süreksizlik türü | ϕ_b | r | R | ϕ_r | α | JCS (MPa) | JRC |
|-----------------|------------------|----------|----|----|----------|----------|------------|-----|
| A1 | Eklem | 31 | 28 | 36 | 27 | 43 | 20 (41±21) | 6.3 |
| A2 | Tabaka | 34 | 40 | 42 | 33 | 44 | 39 (64±25) | 4.0 |
| D1 | Eklem | 27 | 36 | 44 | 23 | 49 | 37 (61±24) | 9.3 |



Şekil 3.32. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerdeki süreksizlik yüzeylerine ait doruk ϕ_p ve c_p değerlerinin belirlenmesi için Barton yenilme ölçütüne göre çizilen σ - τ grafikleri

A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerindeki süreksizliklere ait doruk içsel sürtünme açısı değerlerinin sırasıyla 32°, 38° ve 36°; doruk kohezyon değerlerinin ise sırasıyla 0.064 MPa, 0.036 MPa ve 0.045 MPa olduğu saptanmıştır.

Çalışma alanındaki A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerini temsil etmesi için duraylılık analizlerinde kullanmak amacıyla Barton yenilme ölçütü yardımıyla belirlenen kayma dayanımı parametreleri Tablo 3.15’de özet olarak sunulmuştur.

Tablo 3.15. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerindeki süreksizliklere ait Barton yenilme ölçütü kullanılarak belirlenen doruk ve artık kayma dayanımı parametreleri

| Jeoteknik birim | Kayma dayanımı belirlenen süreksizlik yüzeyi | Doruk içsel sürtünme açısı (ϕ_p , derece) | Doruk kohezyon (c_p , MPa) | Artık içsel sürtünme açısı (ϕ_r , derece) | Artık kohezyon (c_r , MPa) |
|-----------------|--|---|-------------------------------|---|-------------------------------|
| A1 | Eklem | 32 | 0.064 | 27 | 0 |
| A2 | Tabaka | 38 | 0.036 | 33 | 0 |
| D1 | Eklem | 36 | 0.045 | 23 | 0 |

Tablo 3.16 ve 3.17’de, jeoteknik birimlerdeki süreksizliklerin özellikleri özet olarak sunulmuş ve bu değerler literatürdeki tanımlama ölçütlerine (Deere, 1964; Franklin vd., 1971; ISRM, 1981; Palmström, 1996) göre değerlendirilmiştir.

Tablo 3.16. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik özelliklerinin literatürdeki tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Süreksizlik özelliği | A1 ve A2 jeoteknik birimleri | | | B1 ve B2 jeoteknik birimleri | | | | C1 jeoteknik birimi | | | D1 jeoteknik birimi | | | | |
|--|------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | | | | | | B1 | B2 | | | | | | | |
| Süreksizlik takımları | 22/45 | 46/338 | 43/16 | 47/165 | 41/356 | 44/30 | 50/173 | 50/173 | 60/15 | 57/289 | 37/20 | 47/170 | 68/200 | 33/109 | 30/323 |
| Süreksizlik türü | Eklem | Eklem | Eklem | Tabaka | Eklem | Eklem | Tabaka | Tabaka | Eklem | Eklem | Eklem | Tabaka | Eklem | Eklem | Eklem |
| Süreksizlik ara uzaklığı (cm) | 15.71 | 10.96 | 13.26 | 8.94 | 16.46 | 10.6 | 6.7 | 7.84 | 6.89 | 3.56 | 2.39 | 2.12 | 14.17 | 10.28 | 12.28 |
| Tanımlama (ISRM, 1981) | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Dar ara uzaklıklı | Dar ara uzaklıklı | Dar ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı | Yakın ara uzaklıklı |
| Süreksizlik açıklığı (mm) | 1.92 | 1.92 | 1.92 | 0.99 | 0.89 | 0.89 | 12.39 | 0.19 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.05 | 2.67 | 2.67 | 2.67 |
| Tanımlama (ISRM, 1981) | Açık | Açık | Açık | Açık | Açık | Açık | Geniş | Sıkı | Açık | Açık | Açık | Açık | Orta derecede geniş | Orta derecede geniş | Orta derecede geniş |
| Süreksizlik devamlılığı (m) | 9.1 | 9.1 | 9.1 | 24.45 | 7.5 | 7.5 | 21.2 | 21.2 | 9.66 | 9.66 | 9.66 | 27.11 | 5.18 | 5.18 | 5.18 |
| Tanımlama (ISRM, 1981) | Orta derecede devamlı | Orta derecede devamlı | Orta derecede devamlı | Çok yüksek devamlı | Orta derecede devamlı | Orta derecede devamlı | Çok yüksek devamlı | Çok yüksek devamlı | Orta derecede devamlı | Orta derecede devamlı | Orta derecede devamlı | Çok yüksek devamlı | Orta derecede devamlı | Orta derecede devamlı | Orta derecede devamlı |
| Süreksizlik pürüzlülüğü (JRC) | 6-8 | 6-8 | 6-8 | 4-6 | 8-10 | 8-10 | 2-4 | 2-4 | 12-14 | 12-14 | 12-14 | 2-4 | 8-10 | 8-10 | 8-10 |
| Tanımlama (ISRM, 1981) | Dalgali pürüzlü | Dalgali pürüzlü | Dalgali pürüzlü | Dalgali düz | Dalgali pürüzlü | Dalgali pürüzlü | Dalgali düz | Dalgali düz | Dalgali pürüzlü | Dalgali pürüzlü | Dalgali pürüzlü | Düzlemsel pürüzlü | Dalgali pürüzlü | Dalgali pürüzlü | Dalgali pürüzlü |
| Süreksizlik yüzeylerinin bozunma derecesi (ISRM, 1981) | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Taze | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş |
| Süreksizlik yüzeylerindeki su durumu (ISRM, 1981) | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor |

Tablo 3.17. Jeoteknik birimlere ait λ , J_v ve RQD değerlerinin literatürdeki tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi ve süreksizlik yüzeylerine ait kayma dayanımı parametreleri

| | A1 jeoteknik birimi | A2 jeoteknik birimi | B1 jeoteknik birimi | B2 jeoteknik birimi | C1 jeoteknik birimi | D1 jeoteknik birimi |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Süreksizlik sıklığı (λ , m ⁻¹) | 7 | 14 | 14 | 6 | 63 | 10 |
| Tanımlama (Franklin vd., 1971) | Kırıklı-çatlaklı | Çok çatlaklı- kırıklı | Çok çatlaklı- kırıklı | Kırıklı-çatlaklı | Parçalanmış | Kırıklı-çatlaklı |
| Hacimsel eklem sayısı (J_v , eklem/m ³) | 23.03 | 34.22 | 30.43 | 28.26 | 131.61 | 24.93 |
| Tanımlama (ISRM, 1981) | Küçük bloklar | Çok küçük bloklar | Çok küçük bloklar | Küçük bloklar | Çok küçük bloklar | Küçük bloklar |
| Tanımlama (Palmström, 1996) | Yüksek | Çok yüksek | Çok yüksek | Yüksek | Aşırı derecede yüksek | Yüksek |
| Kaya kalite göstergesi (RQD, %) | 80 | 60 | 62 | 88 | 3 | 73 |
| Tanımlama (Deere, 1964) | İyi | Orta | Orta | İyi | Çok zayıf | Orta |
| Doruk içsel sürtünme açısı (ϕ_p , derece) | 32 | 38 | - | - | - | 36 |
| Artık içsel sürtünme açısı (ϕ_r , derece) | 27 | 33 | - | - | - | 23 |
| Doruk kohezyon (c_p , MPa) | 0.064 | 0.036 | - | - | - | 0.045 |
| Artık kohezyon (c_r , MPa) | 0 | 0 | - | - | - | 0 |

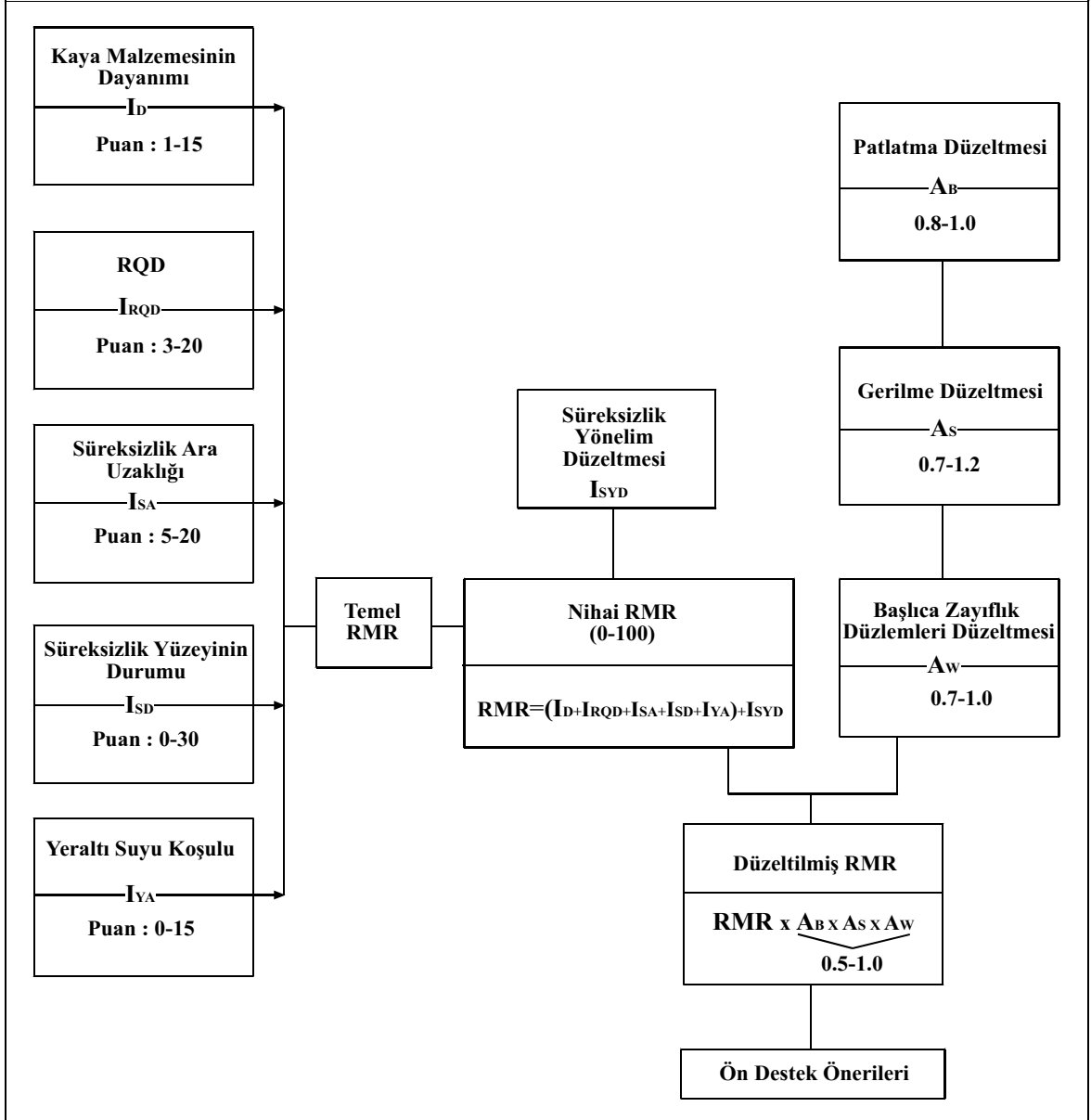
3.5. Jeoteknik Birimlerin Kaya Kütle Sınıflama Sistemlerine Göre Değerlendirilmesi

3.5.1. RMR (Kaya Kütle Puanlaması) Sınıflama Sistemi

RMR sınıflama sistemi, Bieniawski (1973) tarafından geliştirilmiş bir kaya kütle sınıflama sistemi olup, daha sonraki yıllarda karşılaşılan mühendislik probleminin amacına yönelik olarak modifiye edilmiş (Laubscher, 1977 ve 1984; Weaver, 1975; Olivier, 1979; Ghose ve Raju, 1981; Nakao vd., 1983; Gonzalez 1983; Romana, 1985) ve son halini 1989 yılında yapılan değişiklikle almıştır (Bieniawski, 1989). RMR sistemine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında aşağıdaki parametreler kullanılmaktadır.

- Kaya malzemesinin nokta yük dayanım indeksi veya tek eksenli basınç dayanımı
- Kaya kalitesi göstergesi (RQD)
- Süreksizlik ara uzaklığı
- Süreksizliklerin durumu (Devamlılık, açıklılık, pürüzlülük, dolgu ve bozunma)
- Süreksizliklerin yönelimi
- Yeraltı suyu koşulları

Hat etüdlerinden ve bir dizi laboratuvar deneyinden elde edilen sonuçlara göre parametrelere verilen puanların toplamı kullanılarak kaya kütleleri RMR sistemine göre sınıflandırılmaktadır. Çalışmada, RMR sistemi kullanılarak düzeltilmiş RMR sınıf puanının tayin edilmesinde izlenmiş olan akış şeması Şekil 3.33'de verilmiştir.

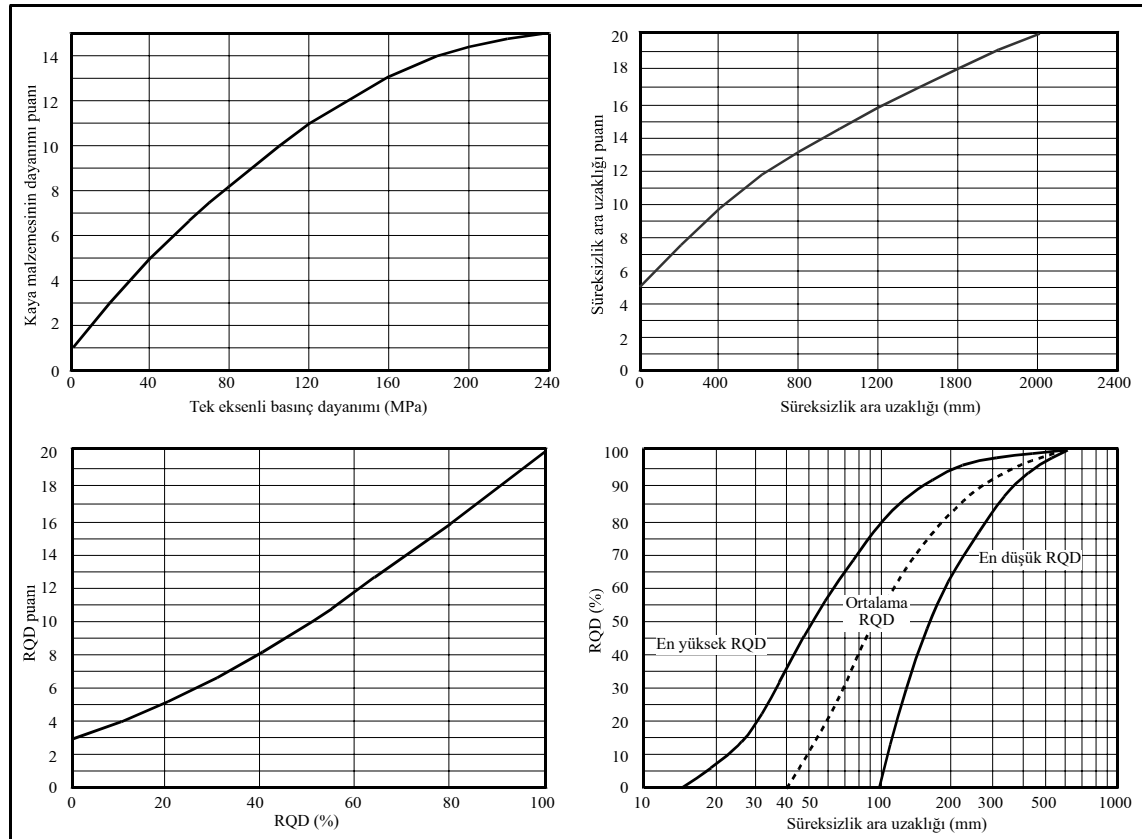


Şekil 3.33. RMR puanını hesaplama aşamalarını gösteren akış şeması (Bieniawski, 1989)

Tablo 3.18’de RMR kaya sınıflama sisteminin 1989’daki son versiyonu ve bu sisteme göre verilen puanlar görülmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı, RQD ve süreksizlik ara uzaklığı parametrelerine ait puanlar ise Şekil 3.34’de verilen grafikler yardımıyla belirlenmektedir.

Tablo 3.18. RMR kaya kütle sınıflama sisteminin son versiyonu (Bieniawski, 1989)

| | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------|--|-----|----|
| 1 | Kaya malzemesinin dayanımı (MPa) | Nokta yük dayanım indeksi | > 10 | 4-10 | 2-4 | 1-2 | Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım | | |
| | | Tek eksenli basınç dayanımı | > 250 | 100-250 | 50-100 | 25-50 | 5-25 | 1-5 | <1 |
| 2 | Kaya kalite göstergesi, RQD (%) | | 90-100 | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 | | |
| 3 | Süreksizlik ara uzaklığı (cm) | | >200 | 60-200 | 20-60 | 20-6 | <6 | | |
| 4 | Süreksizlik durumu | Devamlılık (m) | <1 | 1-3 | 3-10 | 10-20 | >20 | | |
| | | Puan | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 | | |
| | | Açıklık (mm) | Yok | <0.1 | 0.1-1 | 1-5 | >5 | | |
| | | Puan | 6 | 5 | 4 | 1 | 0 | | |
| | | Pürüzlülük | Çok pürüzlü | Pürüzlü | Az pürüzlü | Düz | Kaygan | | |
| | | Puan | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | |
| Dolgu | Yok | <5 mm (sert) | >5 mm (sert) | <5 mm (yumuşak) | >5 mm (yumuşak) | | | | |
| Puan | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 | | | | |
| Bozunma | Bozunmamış | Az bozunmuş | Orta derecede bozunmuş | Bozunmuş | Çok bozunmuş | | | | |
| Puan | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | | | |
| 5 | Yeraltı suyu (lt/dk) | 10 m'lik kısımdan gelen su | Yok | 10 | 25 | 25-125 | >125 | | |
| | | Genel koşullar | Tamamen kuru | Nemli | Islak | Damlama | Su akışı | | |
| | | Puan | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | |



Şekil 3.34. RMR sisteminin son versiyonundaki tek eksenli basınç dayanımı, süreksizlik aralığı ve RQD parametrelerine ait puanlama grafikleri (Bieniawski, 1989)

RMR sınıflama sisteminde süreksizlik takımının yönelimi göz ardı edilmemiş ve Bieniawski (1979 ve 1989) tarafından süreksizlik yönelimi düzeltmesi ortaya atılmıştır. Tablo 3.19’de süreksizlik yöneliminin etkisi, Tablo 3.20’de ise süreksizlik yönelimine göre düzeltme katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 3.19. RMR sisteminde süreksizlik eğim ve doğrultusunun etkisi (Bieniawski, 1989)

| Doğrultu tünel eksenine dik | | | | Doğrultu tünel eksenine paralel | | Doğrultuya bakılmaksızın |
|-----------------------------|---------|----------------------------|-------------|---------------------------------|---------|--------------------------|
| Eğim yönünde ilerleme | | Eğime karşı yönde ilerleme | | | | |
| Eğim | Eğim | Eğim | Eğim | Eğim | Eğim | Eğim |
| 45°-90° | 20°-45° | 45°-90° | 20°-45° | 45°-90° | 20°-45° | 0°-20° |
| Çok uygun | Uygun | Orta | Uygun değil | Hiç uygun değil | Orta | Orta |

Tablo 3.20. RMR sisteminde süreksizlik yönelimine göre düzeltme (Bieniawski, 1989)

| Süreksizliklerin doğrultu ve eğimi | Çok uygun | Uygun | Orta | Uygun değil | Hiç uygun değil |
|------------------------------------|-----------|-------|------|-------------|-----------------|
| Tüneller | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 |
| Puan | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 |
| Şevler | 0 | -5 | -25 | -50 | -60 |

RMR sistemi, tüneller ve madencilik uygulamalarında da yaygın olarak kullanıldığından, yapılacak olan patlatmalarda, yerinde gerilmeler ve fayların durumu gibi faktörler de dikkate alınarak gerektiği durumlarda bu faktörler için düzeltme yapılmalı ve nihai RMR değerinde azaltmaya gidilmelidir (Laubscher, 1977; Kendorski vd., 1983). Bununla birlikte, gerilme alanının yatay ve düşey bileşenlerinin çok pahalı olan yerinde ölçüm deneyleriyle belirlenmesi nedeniyle, gerilme düzeltme katsayısı uygulamada çok fazla dikkate alınmamaktadır. Tablo 3.21’de patlatma ve başlıca zayıflık düzeltmeleriyle ilgili uygulama koşulları, yöntemler ve düzeltme katsayıları verilmiştir.

Tablo 3.21. Patlatma ve başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme katsayıları (Kendorski vd., 1983)

| Patlatma düzeltmesi (A_B) | | | |
|---|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | Koşullar/Yöntem | Uygulanabilir terim | Düzeltilme katsayısı |
| 1 | Makineyle kazı | Hasarsız | 1.0 |
| 2 | Denetimli patlatma | Çok az hasar | 0.94-0.97 |
| 3 | İyi klasik patlatma | Orta derecede hasar | 0.90-0.94 |
| 4 | Kötü klasik patlatma | Şiddetli hasar | 0.80-0.90 |
| Başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme (A_w) | | | |
| | Koşul | | Düzeltilme katsayısı |
| 1 | Zayıflık düzlemi yok | | 1.00 |
| 2 | Sert dayklar | | 0.90 |
| 3 | Yumuşak cevher zonları | | 0.85 |
| 4 | Ana kaya/cevher dokanak zonları | | 0.80 |
| 5 | Kıvrımlar | | 0.75 |
| 6 | Fay zonları | | 0.70 |

Kaya kütesinin sınıfı, yukarıda belirtilen işlemlerin yapılmasıyla elde edilen RMR puanına göre Tablo 3.22'den belirlenir.

Tablo 3.22. RMR sınıflama sistemine göre kaya sınıfları ve puanları (Bieniawski,1989)

| Sınıf No | I | II | III | IV | V |
|-----------------|--------------|-----------|------------|------------|----------------|
| Tanımlama | Çok iyi kaya | İyi kaya | Orta kaya | Zayıf kaya | Çok zayıf kaya |
| Puan | 100-81 | 80-61 | 60-41 | 40-21 | 20-0 |

Bu çalışmada, Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan her bir jeoteknik birim RMR sistemi ile sınıflandırılarak kaya kütle kaliteleri açısından değerlendirilmiştir. RMR puanı hesaplamalarında güvenli tarafta kalmak amacıyla jeoteknik birimler için değerlendirilen parametrelerin en düşük değerleri göz önüne alınmış ve kaya kütle tanımlamaları düzeltilmiş RMR puanlarına göre yapılmıştır. Bieniawski'ye (1989) göre A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimleri "zayıf kaya", B1 ve C1 jeoteknik birimi ise "çok zayıf kaya" olarak değerlendirilmiştir. Jeoteknik birimler için hesap edilen RMR değerleri Tablo 3.23'de verilmiştir.

Tablo 3.23. Jeoteknik birimlerin RMR kaya kütle sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi

| | | Jeoteknik birimler | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|---|---|--|--|---------------------------|--------------------------------------|
| | | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | |
| 1 | σ_{ci} (MPa) | 27.12 | 72.79 | 55.05 | 55.05 | 26.19 | 60.98 | |
| | Puan | 4.8 | 7.5 | 6.1 | 6.1 | 4.7 | 6.8 | |
| 2 | RQD (%) | 84 | 60 | 62 | 88 | 3 | 73 | |
| | Puan | 16.8 | 12 | 12.2 | 17.2 | 3.3 | 14.5 | |
| 3 | Süreksizlik ara uzaklığı (cm) | 10.96 | 8.94 | 6.7 | 7.84 | 2.12 | 10.28 | |
| | Puan | 6.5 | 6.1 | 5.9 | 6 | 5.1 | 6.8 | |
| 4 | Süreksizlik durumu | Devamlılık (m) | 9.1 | 24.45 | 21.2 | 21.2 | 27.11 | 5.18 |
| | | Puan | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | | Açıklık (mm) | 1.92 | 0.99 | 12.39 | 0.89 | 1.1 | 2.67 |
| | | Puan | 1 | 4 | 0 | 4 | 1 | 1 |
| | | Pürüzlülük | Dalgalı pürüzlü | Dalgalı düz | Dalgalı düz | Dalgalı düz | Düzlemsel pürüzlü | Dalgalı pürüzlü |
| | | Puan | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | | Dolgu | 1-1.5 mm kalınlığında silt-kil yer yer kalsit dolgulu | 1-1.5 mm kalınlığında silt-kil yer yer kalsit dolgulu | 1-1.5 cm kalınlığında yumuşak marn dolgulu | 0.5-1 mm kalınlığında kil yer yer kalsit dolgulu | Çok ince kil sıvaması | 1-2 mm kalınlığında silt-kil dolgulu |
| | | Puan | 4 | 4 | 0 | 4 | 2 | 2 |
| Bozunma | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | Az bozunmuş | | |
| Puan | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | | |
| 5 | Yeraltı suyu (lt/dk) | Genel koşullar | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | Çok az sızıntı gözleniyor | |
| | | Puan | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| Temel RMR | | 49.1 | 43.6 | 34.2 | 47.3 | 26.1 | 47.1 | |
| Süreksizlik yönelim düzeltmesi | | -2 | -2 | -5 | -5 | -5 | -2 | |
| Nihai RMR | | 47.1 | 41.6 | 29.2 | 42.3 | 21.1 | 45.1 | |
| Patlatma düzeltmesi | | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | |
| Gerilme düzeltmesi | | İhmal edilmiş | İhmal edilmiş | İhmal edilmiş | İhmal edilmiş | İhmal edilmiş | İhmal edilmiş | |
| Zayıflık düzlemleri düzeltmesi | | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | |
| Düzeltilmiş RMR | | 29.7 | 26.2 | 18.4 | 26.6 | 13.3 | 28.4 | |
| Tanımlama (Bieniawski, 1989) | | Zayıf kaya | Zayıf kaya | Çok zayıf kaya | Zayıf kaya | Çok zayıf kaya | Zayıf kaya | |

3.5.2. Q (Kaya Kütle Kalitesi) Sınıflama Sistemi

Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute) sistemi olarak bilinen bu sistem, Barton vd. (1974) tarafından geliştirilmiştir. Sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin destek seçimlerine yönelik bölümünü Grimstad ve Barton (1993) tarafından, SRF (Gerilme Azaltma Faktörü) ve ESR (Kazı Destek Oranı) parametreleri ise Barton ve Grimstad (1994) tarafından yeniden düzenlenmiştir. Q değeri Barton vd. (1974) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikle belirlenmektedir.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (12)$$

Burada; RQD: kaya kalite göstergesi (%), J_n : süreksizlik takımı sayısı, J_r : süreksizlik pürüzlülük değeri, J_a : süreksizlik yüzeyi bozunma değeri, J_w : süreksizlik suyu azaltma faktörü ve SRF: gerilme azaltma faktörüdür.

Formülde verilen;

RQD/J_n : Kaya kütlelerinin yapısını ve blok boyutunun ölçüsünü,

J_r/J_a : Bloklar arasındaki kayma dayanımını,

J_w/SRF : Aktif gerilmeyi vermektedir.

(12) nolu eşitlikte verilen formülün SRF içermeyen şekli Goel vd. (1995) tarafından Q_N olarak aşağıda verilen eşitlikte tanımlanmıştır.

$$Q_N = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) J_w \quad (13)$$

Hoek vd. (1995) tarafından (12) nolu eşitlikte verilen formülün SRF içermeyen ve süreksizlik suyu azaltma faktörünün (J_w) 1 olarak kabul edildiği şekli, Q' (modifiye Q) olarak tanımlanmıştır. Q' , (14) nolu eşitlik yardımıyla belirlenmektedir.

$$Q' = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \quad (14)$$

Son olarak Barton (2002) tarafından sisteme MPa cinsinden kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı eklenmiş ve Q_C (normalize Q) olarak aşağıda verilen formülle tanımlanmıştır.

$$Q_C = Q \left(\frac{\sigma_{ci}}{100} \right) \quad (15)$$

Q sınıflama sistemindeki girdi parametlerinin belirlenmesi için önerilen kategoriler Tablo 3.24-3.29'de verilmiştir.

Tablo 3.24. Kaya kalite göstergesi - % RQD (Deere, 1964)

| | RQD | KAYA KALİTE GÖSTERGESİ TANIMI |
|---|------------|--------------------------------------|
| 1 | 0-25 | Çok zayıf |
| 2 | 25-50 | Zayıf |
| 3 | 50-75 | Orta |
| 4 | 75-90 | İyi |
| 5 | 90-100 | Çok iyi (Mükemmel) |

Not: RQD < 10 (0 dahil) ise, Q'nun hesaplanmasında RQD için 10 gibi nominal bir değer kullanılır. RQD için 100,95,90,...vb. gibi 5'lik aralıklar yeterlidir.

Tablo 3.25. Süreksizlik takım sayısı - J_n (Barton vd., 1974)

| | SÜREKSİZLİK TAKIM SAYISI | J_n |
|---|---|-------------------------|
| A | Masif, eklem çok az veya hiç yok | 0.5-1.0 |
| B | Bir süreksizlik takımı | 2 |
| C | Bir süreksizlik takımı ve gelişigüzel eklemeler | 3 |
| D | İki süreksizlik takımı | 4 |
| E | İki süreksizlik takımı ve gelişigüzel eklemeler | 6 |
| F | Üç süreksizlik takımı | 9 |
| G | Üç süreksizlik takımı ve gelişigüzel süreksizlikler | 12 |
| H | Dört veya daha fazla süreksizlik takımı, gelişigüzel, çok fazla sayıda, küp şeker görünümünde | 15 |
| I | Parçalanmış kaya, toprak görünümünde | 20 |

*Not: *Arakesitler (kesişen tüneller) için (3.0x J_n) kullanılır.
Portallar (girişler) için (2.0x J_n) kullanılır.

Tablo 3.26. Süreksizlik pürüzlülük sayısı - J_r (Barton vd., 1974)

| SÜREKSİZLİK PÜRÜZLÜLÜK SAYISI | | J_r |
|--|---|-------------------------|
| Süreksizlik yüzeyi temasta veya 10 cm'den az makaslama hareketiyle temasta | | |
| <i>Not: Bu sıralamada tanımlamalar, küçük ve ara ölçekli özellikler göstermektedir</i> | | |
| A | Süreksiz | 4 |
| B | Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı | 3 |
| C | Düz, dalgalı | 2 |
| D | Sürtünme izli, dalgalı | 1.5 |
| E | Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel | 1.5 |
| F | Düz, düzlemsel | 1.0 |
| G | Sürtünme izli düzlemsel | 0.5 |
| <i>Not: *İlgili süreksizlik takımının ortalama aralığı 2m'den daha büyük ise, J_r'ye 1.0 ilave edilebilir. *En az dirence göre yönelmesi koşuluyla, çizgiselliklere sahip düz sürtünme yüzeyli süreksizlikler için $J_r = 0.5$ alınabilir.</i> | | |
| Makaslama hareketiyle süreksizlik yüzeylerinin teması sağlanmadığında | | |
| H | Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon | 1.0 |
| I | Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki kumlu, çakıllı ya da parçalanmış zon | 1.0 |

Tablo 3.27. Süreksizlik yüzeyi bozunma sayısı - J_a (Barton vd., 1974)

| SÜREKSİZLİK YÜZEYİ BOZUNMA SAYISI | | J_a | ϕ° |
|---|--|-------------------------|--------------------------------|
| a) Süreksizlik yüzeyleri temasta (Mineral dolgu yada kil kaplaması yok) | | | |
| A | Sıkıca bağlanmış sert, yumuşamayan, geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot) | 0.75 | - |
| B | Bozunmamış süreksizlik yüzeyleri, yalnızca yüzeysel kirlenme | 1.0 | 25-35 |
| C | Az bozunmuş süreksizlik yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kum içermeyen kaya parçaları vd. | 2.0 | 25-30 |
| D | Siltli veya kumlu-kil sıvamaları, küçük kil fraksiyonu (yumuşak değil) | 3.0 | 20-25 |
| E | Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral sıvamaları, örneğin kaolen veya mika. Ayrıca klorit, talk, jips, grafit vs. ve az miktarda şişen killer | 4.0 | 8-16 |
| b) 10 cm'den az bir kayma hareketiyle süreksizlik yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde (İnce mineral dolgu) | | | |
| F | Kum taneleri, kil içermeyen parçalanmış kaya vd. | 4.0 | 25-30 |
| G | Aşırı konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolguları (sürekli ancak kalınlığı 5 mm'den az) | 6.0 | 16-24 |
| H | Orta veya düşük derecede konsolide olmuş yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli ancak kalınlığı 5 mm'den az) | 8.0 | 12-16 |
| I | Şişen kil dolguları, örneğin; montmorillonit (sürekli ancak kalınlığı 5 mm'den az) J_a değeri şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve suyun etkisine bağlıdır | 8-12 | 6-12 |
| c) Süreksizlik yüzeylerinde kayma durumunda temas yok (İnce mineral dolgu) | | | |
| J | Parçalanmış kaya veya kil zonları veya bantları (kilin tanımlanması için G, H ve J maddelerine bakınız) | 6-8 veya 8-12 | 6-24 |
| K | Siltli veya kumlu kil zonları veya bantları, düşük kil fraksiyonu (yumuşamayan) | 5.0 | - |
| L | Kalın, sürekli kil zonları veya bantları (kilin tanımlanması için G, H ve J maddelerine bakınız) | 10-13 veya 13-20 | 6-24 |

Tablo 3.28. Süreksizlik suyu azaltma faktörü - J_w (Barton vd., 1974)

| SÜREKSİZLİK SUYU AZALTMA FAKTÖRÜ | | J_w | Yaklaşık su basıncı (kgf/cm ²) |
|----------------------------------|--|----------|--|
| A | Kuru kazılar ya da küçük sızma, örneğin yerel olarak < 5 lt/dk | 1.0 | <1 |
| B | Orta derecede su gelişi veya basınç, yer yer süreksizliklerdeki dolguların yıkanması | 0.66 | 1-2.5 |
| C | Dolgunsuz, süreksizlik içeren, dayanımlı kayada büyük miktarda su gelişi veya yüksek basınç | 0.5 | 2.5-10 |
| D | Büyük miktarda su gelişi veya yüksek basınç, süreksizlik dolgularının aşırı derecede yıkanması | 0.33 | 2.5-10 |
| E | Patlatmada son derece aşırı su gelişi veya su basıncı, zamanla azalan | 0.2-0.1 | 10 |
| F | Zamanla azalmaksızın devam eden son derecede aşırı su gelişi veya basıncı | 0.1-0.05 | >10 |

*Not: *C ve F faktörleri kaba tahminlerdir. Drenaj ölçümleri yapılırsa J_w arttırılır.
Buz oluşumundan kaynaklanan özel problemler dikkate alınmamıştır.

Tablo 3.29. Gerilme azaltma faktörü - SRF (Barton ve Grimstad, 1994)

| GERİLME AZALTMA FAKTÖRÜ | | SRF | |
|---|---|------------------------|-----------------------------|
| a) Kazıyı kesen zayıf zonlar, tünel kazılırken kaya kütleinin gevşemesine neden olabilirler | | | |
| A | Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren zayıf zonlar, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte) | | 10 |
| B | Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği < 50 m) | | 5 |
| C | Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50 m) | | 2.5 |
| D | Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte) | | 7.5 |
| E | Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, (kazı derinliği < 50m) | | 5.0 |
| F | Kil içermeyen dayanımlı kayada tek bir makaslama zonu, (kazı derinliği >50 m) | | 2.5 |
| G | Gevşek ve açık süreksizlikler, fazla süreksizlik içeren "küp şekeri" görünümü (herhangi bir derinlikte) | | 5.0 |
| <i>Not: *Kayma zonları yalnızca kazıyı etkiliyor, ancak kesmiyorsa, SRF için yukarıda verilen değerler %25-50 dolaylarında azaltılmaktadır</i> | | | |
| b) Dayanımlı kaya, kaya gerilmesi sorunları | | | |
| | | σ_{ci}/σ_1 | $\sigma_\theta/\sigma_{ci}$ |
| H | Düşük gerilme, yüzeye yakın | >200 | <0.01 |
| I | Orta derecede gerilme | 200-10 | 0.01-0.3 |
| J | Yüksek gerilme, çok sıkı yapı (genellikle duraylı, yan duvar duraylılığı açısından uygun olmayabilir) | 10-5 | 0.3-0.4 |
| K | Masif kayada 1 saatlik bir süreden sonra orta derecede dilimlenme | 5-3 | 0.5-0.65 |
| L | Masif kayada 1 birkaç dakikadan sonra dilimlenme ve kaya patlaması | 3-2 | 0.65-1 |
| M | Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon | <2 | >1 |
| <i>Not: *Oldukça anizotrop bakir bir gerilme alanı için (ölçülebilirse): $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ olduğunda, σ_c $0.75\sigma_c$'ye, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise ve $0.5\sigma_c$'ye düşürülür. Burada: σ_{ci} tek eksenli basınç dayanımı, σ_θ en büyük teğetsel gerilme (elastik kuramdan tahmin edilen) ve σ_1 ile σ_3 de en büyük ve en küçük asal gerilmelerdir.</i> | | | |
| <i>*Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarla ilgili birkaç vaka kaydı mevcuttur. Bu tip durumlarda SRF'nin 2,5'den 5'e çıkarılması önerilir.</i> | | | |
| <i>*Sıkışan kaya vakaları $H > Q^{1/3}$ derinlik koşulunda meydana gelebilir (Singh vd., 1993). Kaya kütleinin basınç dayanımı $\sigma_{cm} = 0.7\gamma Q^{1/3}$ (MPa) eşitliğinden tahmin edilebilir. Burada: γ kayanın birim hacim ağırlığıdır (kN/m³)</i> | | | |
| c) Yüksek kaya basıncının etkisi altında dayanımsız kayada plastik akma | | | |
| N | Az sıkıştıran kaya basıncı | | 1-5 |
| O | Aşırı sıkıştıran kaya basıncı | | >5 |
| d) Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme aktivitesi | | | |
| P | Düşük kaya basıncı | | 5-10 |
| R | Çok yüksek kaya basıncı | | 10-15 |

Yukarıda verilen ölçütlere göre Q değerleri bilinen kaya kütlelerinin kalitesi Tablo 3.30'a göre tanımlanmaktadır.

Tablo 3.30. Q değerlerine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılması (Barton vd., 1974)

| Q değeri | Kaya sınıfı |
|------------|--------------------|
| 0.001-0.01 | Son derecede zayıf |
| 0.01-0.1 | Çok fazla zayıf |
| 0.1-1 | Çok zayıf |
| 1-4 | Zayıf |
| 4-10 | Orta |
| 10-40 | Sağlam |
| 40-100 | Çok sağlam |
| 100-400 | Çok fazla sağlam |
| 400-1000 | Son derece sağlam |

Bu çalışmada, Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan her bir jeoteknik birim Q sistemi ile sınıflandırılarak kaya kütle kaliteleri açısından değerlendirilmiştir. Q değeri hesaplamalarında güvenli tarafta kalmak amacıyla jeoteknik birimler için değerlendirilen parametrelerin en düşük değerleri göz önüne alınmıştır. Yapılan hesaplamalarda jeoteknik birimlere ait Q, Q_N , Q' ve Q_C değerleri belirlenmiş olup, kaya kütle tanımlamaları ise Q değerlerine göre yapılmıştır. Barton vd.'ne (1974) göre A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimleri “çok zayıf”, B1 jeoteknik birimi “çok fazla zayıf”, C1 jeoteknik birimi ise “son derece zayıf” olarak değerlendirilmiştir. Jeoteknik birimler için hesap edilen Q, Q_N , Q' ve Q_C değerleri Tablo 3.31'de verilmiştir.

Tablo 3.31. Jeoteknik birimlerin Q kaya kütle sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi

| Jeoteknik birimler | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|------------|--|--|--|---|--|--------------|------|
| | A1 | | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | | |
| σ_{ci} (MPa) | 27.12 | | 72.79 | 55.05 | 55.05 | 26.19 | 58.69 | | |
| RQD (%) | 84 | | 60 | 62 | 88 | 3 | 73 | | |
| J_n | Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler 12 x 2 (Giriş bölümü için) 12 (Orta bölüm için) | | Dört eklem takımı ve gelişigüzel eklemler 15 | Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler 12 | Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler 12 | Dört eklem takımı ve gelişigüzel eklemler 15 | Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler 12 x 2 (Çıkış bölümü için) 12 (Orta bölüm için) | | |
| J_r | Dalgalı pürüzlü 3 | | Dalgalı düz 2 | Dalgalı düz 2 | Dalgalı düz 2 | Düzlemsel pürüzlü 1.5 | Dalgalı pürüzlü 3 | | |
| J_a | 1-1.5 mm kalınlığında silt-kil yer yer kalsit dolgulu 4 | | 1-1.5 mm kalınlığında silt-kil yer yer kalsit dolgulu 4 | 1-1.5 cm kalınlığında yumuşak marn dolgulu 20 | 0.5-1 mm kalınlığında kil yer yer kalsit dolgulu 4 | Çok ince kil sıvaması 1 | 1-2 mm kalınlığında silt-kil dolgulu 4 | | |
| J_w | Çok az sızıntı gözleniyor 1 | | Çok az sızıntı gözleniyor 1 | Çok az sızıntı gözleniyor 1 | Çok az sızıntı gözleniyor 1 | Çok az sızıntı gözleniyor 1 | Çok az sızıntı gözleniyor 1 | | |
| SRF | Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte) 7.5 | | Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte) 7.5 | Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte) 7.5 | Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte) 7.5 | Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren zayıf zonlar, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte) 10 | Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte) 7.5 | | |
| Q | Giriş Bölümü | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Çıkış Bölümü | |
| | 0.35 | 0.70 | 0.27 | 0.07 | 0.49 | 0.015 | 0.61 | 0.30 | |
| | Q_N | 2.63 | 5.26 | 2.00 | 0.52 | 3.67 | 0.15 | 4.56 | 2.28 |
| | Q' | 2.63 | 5.26 | 2.00 | 0.52 | 3.67 | 0.15 | 4.56 | 2.28 |
| Q_C | 0.09 | 0.19 | 0.19 | 0.04 | 0.27 | 0.004 | 0.37 | 0.19 | |
| Tanımlama (Barton vd., 1974) | Çok zayıf | Çok zayıf | Çok zayıf | Çok fazla zayıf | Çok zayıf | Son derecede zayıf | Çok zayıf | Çok zayıf | |

3.5.3. RMi (Kaya Kütle İndeksi) Sınıflama Sistemi

İlk defa Palmström (1995) tarafından önerilen RMi sistemi, eklemlili ve masif kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında, kaya kütle dayanımı, deformasyon modülü ve Hoek-Brown sabitlerinin belirlenmesinde, yeraltı açıklıklarının destek tasarımında, tünel delme makinesinin (TBM) performans değerlendirmesinde kullanılmaktadır (Palmström 1995 ve 1996). Kaya kütlelerinin ön destek tasarımı için tünel çapının ve blok hacminin girdi parametresi olarak kullanıldığı sisteme beş yıllık pratik uygulamalardan sonra Palmström (2000) tarafından son şekli verilmiştir. Eklemlili kaya kütlelerinde RMi, aşağıdaki eşitlikler yardımı ile belirlenmektedir.

$$RMi = \sigma_{ci} JP = \sigma_{ci} 0.2 \sqrt{jC} (Vb)^{Db} \quad (16)$$

$$JP = 0.2 \sqrt{jC} (Vb)^{Db} \quad (17)$$

$$jC = jL \frac{jR}{jA} \quad (18)$$

$$Db = 0.37 jC^{-0.2} \quad (19)$$

$$Vb = \beta J_v^{-3} \quad (20)$$

$$\beta = 20 + 7(S1/S3) \quad (21)$$

Burada; σ_{ci} : kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), JP: süreksizlik dayanım azaltma faktörü, jC: süreksizlik faktörü, jL: süreksizlik uzunluk faktörü, jR: süreksizlik pürüzlülük faktörü, jA: süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü, Vb: blok hacmi (m^3), J_v : hacimsel eklem sayısı (eklem/ m^3), Db: blok çapı (m), β : blok şekli faktörü, S1: en büyük süreksizlik ara uzaklığı (cm) ve S3: en küçük süreksizlik ara uzaklığıdır (cm).

RMi kaya kütle sınıflama sistemindeki süreksizlik faktörünün (jC) belirlenmesinde kullanılan jR değeri Tablo 3.32'den, jL değeri Tablo 3.33'den, jA değeri ise Tablo 3.34'den belirlenmektedir.

Tablo 3.32. Süreksizlik pürüzlülük faktörü – jR (Palmström, 2000)

| Pürüzlülük | Dalgalık | | | | |
|-------------------------|-----------|-----------|--------|------------|------------------------------|
| | Düzlemsel | Az dalgah | Dalgah | Çok dalgah | Basamaklı yada iç içe girmiş |
| Düzensiz yada basamaklı | 3 | 4.5 | 6 | 9 | 12 |
| Çok pürüzlü | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 |
| Pürüzlü | 1.5 | 2 | 3 | 4.5 | 6 |
| Düzlemsel | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 4 |
| Sürtünme izli, kaygan | 0.5-1 | 1 | 1.5 | 2 | 3 |

Dolgulu süreksizlikler için jR= 1 alınır

Tablo 3.33. Süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü – jA (Palmström, 2000)

| a) Süreksizlik yüzeyleri temasta | | | |
|---|---|--|------------------------------------|
| Süreksizlik yüzeyi özelliği | Tanımlama | | jA |
| Kapalı süreksizlikler | Yumuşamayan, geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot) | | 0.75 |
| Süreksizlik yüzeyi temiz | Bozunmamış süreksizlik yüzeyleri, yalnızca yüzeysel kirlenme (Demir boyaması) | | 1 |
| | Bozunmuş süreksizlik yüzeyleri | Taze kaya yüzeyinden bir derece yüksek bozunma | 2 |
| | | Taze kaya yüzeyinden iki derece yüksek bozunma | 4 |
| Sıvama yada ince dolgu | Birikinti malzemesi | Kil haricinde silt, kum veya kalsit dolgu | 3 |
| | Kohezif malzeme | Kil, klorit veya talk dolgu | 4 |
| b) Süreksizlik yüzeylerinde temas yok yada yer yer dolgulu süreksizlikler | | | |
| | | Süreksizlik yüzeylerinde yer yer temas var | Süreksizlik yüzeylerinde temas yok |
| Dolgu türü | Tanımlama | İnce dolgu (Ortalama 5 mm) | Kalın dolgu |
| Birikinti malzemesi | Kil haricinde silt, kum veya kalsit dolgu | 4 | 8 |
| Sert kohezif malzeme | Sıkıca bağlanmış kil, klorit veya talk dolgu | 6 | 10 |
| Yumuşak kohezif malzeme | Orta ve az konsolide olmuş kil, klorit veya talk dolgu | 8 | 12 |
| Şişen kil malzemesi | Şişen dolgular | 8 - 12 | 12 - 20 |

Tablo 3.34. Süreksizlik uzunluk faktörü – jL (Palmström, 2000)

| Süreksizlik uzunluğu (m) | Süreksizlik türü | Süreksizlik | |
|--------------------------|---|-------------|----------|
| | | Sürekli* | Süreksiz |
| < 0.5 | Kırık | 4 | 8 |
| < 1 | Foliasyon | 3 | 6 |
| 0.1 - 1 | Kısa süreksizlik | 2 | 4 |
| 1 - 10 | Orta uzunlukta süreksizlik | 1 | 2 |
| 10 - 30 | Uzun ve geniş süreksizlik | 0.75 | 1.5 |
| > 30 | Dolgulu, demir boyamalı yada makaslanmış süreksizlik | 0.5 | 1 |

* Sürekli süreksizlikler masif bir kayada son bulur

Yukarıda belirtilen işlemlerin yapılmasıyla kaya kütleleri için belirlenen R_{Mi} değerlerinin değerlendirilmesi Tablo 3.35'e göre yapılmaktadır.

Tablo 3.35. R_{Mi} değerlerinin tanımlamaları (Palmström, 2000)

| R _{Mi} değeri | Sınıf |
|------------------------|---------------|
| 100-40 | Çok yüksek |
| 40-10 | Yüksek |
| 10-1 | Orta |
| 1-0.4 | Düşük |
| 0.4-0.1 | Çok düşük |
| 0.1-0.01 | Oldukça düşük |

Bu çalışmada, Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimlere ait R_{Mi} değerleri belirlenmiş ve bu değerlerin sınıflandırmaları yapılmıştır. R_{Mi} hesaplamalarında güvenli tarafta kalmak amacıyla jeoteknik birimler için değerlendirilen parametrelerin en düşük değerleri göz önüne alınmıştır. Palmström'a (2000) göre A1 jeoteknik birimi için hesap edilen R_{Mi} değeri "düşük", A2, B2 ve D1 jeoteknik birimleri için ise "orta", B1 jeoteknik birimi için "çok düşük", C1 jeoteknik birimi için ise "oldukça düşük" olarak değerlendirilmiştir. Jeoteknik birimler için hesap edilen R_{Mi} değerleri Tablo 3.36'da verilmiştir.

Tablo 3.36. Jeoteknik birimlere ait R_{Mi} değerlerinin değerlendirilmesi

| | Jeoteknik birimler | | | | | |
|--------------------------------|--------------------|---------|-----------|---------|---------------|---------|
| | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 |
| σ_{ci} (MPa) | 27.12 | 72.79 | 55.05 | 55.05 | 26.19 | 60.98 |
| J_v (eklem/m ³) | 23.03 | 34.22 | 30.43 | 28.26 | 131.61 | 24.93 |
| S1 (cm) | 15.71 | 15.71 | 16.46 | 16.46 | 6.89 | 14.17 |
| S3 (cm) | 10.96 | 8.94 | 6.70 | 7.84 | 2.12 | 10.28 |
| jR | 3.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 1.50 | 3.00 |
| jA | 3.00 | 3.00 | 20.00 | 3.00 | 4.00 | 3.00 |
| jL | 1.00 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.00 |
| jC | 1.00 | 1.00 | 0.15 | 1.00 | 0.56 | 1.00 |
| Db (m) | 0.37 | 0.37 | 0.54 | 0.37 | 0.42 | 0.37 |
| β | 30.03 | 32.30 | 37.20 | 34.70 | 42.75 | 29.65 |
| Vb (m ³) | 0.00246 | 0.00081 | 0.00132 | 0.00154 | 0.00002 | 0.00191 |
| JP | 0.0217 | 0.0143 | 0.0021 | 0.0182 | 0.0016 | 0.0197 |
| R _{Mi} | 0.59 | 1.04 | 0.12 | 1.00 | 0.04 | 1.20 |
| Tanımlama (Palmström, 2000) | Düşük | Orta | Çok düşük | Orta | Oldukça düşük | Orta |

3.5.4. NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) Sınıflama Sistemi

1950'lerden sonra, yeraltı kazılarının ve tünel açımının artması, güvenli ve ucuz tünel açma yöntemlerinin de ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu yıllarda yeraltında yapılan hidroelektrik santral yerlerinin kazıları sırasında bölünmüş kazı yönteminin uygulanması, Avusturya Yöntemi olarak adlandırılmıştır. Geniş kesitli olan bu kazılarda, ilk olarak tabana yakın bir galeriyle kazıya başlanıp daha sonra yan ve üst galerilerle kazı, aşamalı olarak üst yarıya doğru genişletilmektedir. Daha sonra geliştirilen bu yöntem, "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi" (NATM) adını almıştır. NATM'in esas gelişimi 1970'li yıllarda olmuştur (Kökçüoğlu, 2006).

Rabcewicz (1964), bu yöntemi, ince ve geçici bir destekleme uygulayarak, deformasyonlara izin vermek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak; böylelikle son desteklemeyi (kaplama) daha az yüklemek ve daha ince bir yapı oluşturmak olarak tanımlamıştır. Bu tanımlamaya göre deformasyonlar kazı sırasında ölçülerek projedeki hesaplamalarla karşılaştırılacaktır.

Bütünüyle tünel açımı sırasında yapılacak gözlem ve deformasyon ölçümlerine dayanan NATM kaya sınıflaması bu anlamda yapım aşamasının sınıflamasıdır. Tasarım aşamasındaki nitelikleri incelendiğinde, bu kaya sınıflamasının tanımsal olduğu ve bu bağlamda da nicel veri sağlamayacağı görülür. Göreceli olarak üniform jeolojik yapıya sahip bölgelerde kaya kalitesinin sayılarla ifade edildiği ve kaya davranışının formülle

tahmin edildiği kaya sınıflama sistemleri geliştirilirken, jeolojik yapının büyük değişkenlikler gösterdiği bölgelerde NATM gibi esnek yapım yöntemleri ve kazı sırasında kaya davranışını esas alan kaya sınıflama sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi hemen her türlü zemine ve kayaya uygulanan, ekonomik bir yöntem olarak tanınmıştır. Bu yöntemin 20'den fazla ilkesi bulunmaktadır. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin ana prensibi, tünel kazısını çevreleyen zemini yük taşıyıcı destek elemanı haline getirerek zamana bağlı gerilme değişimlerini etkilemek ve minimum destekleme önlemlerini gerektirecek şekilde kontrollü bir gerilme boşalımını sağlamaktır. Bunu yapabilmek için ön sağlamlaştırmanın uygun bir yük-şekil değiştirme özelliğine sahip olması ve tam zamanında yapılması gerekir. NATM, belirli bir destek ve kazı işlemine bağımlı değildir. Ancak, aşağıda belirtilen ilkelere uyulmasında yarar vardır. Başlıca esasları, ana kayanın ilk sağlamlığını korumak, dağı fazla kurcalamamak ya da dağı ürkütmemek, yükü dağa taşımak, koruyucu zonu boşluk yakınında oluşturmak, şekil değiştirme ve gerilmeleri ölçümlerle denetlemek, sağlamlaştırma işlemlerini en kısa zamanda tamamlamak ve kazı kesitlerini olabildiğince yuvarlak seçmektir.

NATM yönteminin ana esasları Vardar'a (1979) göre aşağıdaki gibidir;

1. Yeraltı yapısının ana malzemesi, dağın kendisidir. Tünelin esas taşıyıcı kısmı, boşluğu çevreleyen ana kayadır.

2. Kayacın başlangıçtaki sağlamlığı korunmalıdır. Bu nedenle uyulması gereken ana ilke, kayacın ilksel sağlamlığını korumaya çalışmaktır.

3. Gevşemelerin olabildiğince önüne geçilmelidir. Çünkü gevşemeler, kayanın taşıma direncini azaltmaktadır.

4. Tek ve iki eksenli gerilme ortamından kaçınılmalıdır. Çünkü bu tür gerilmelerin etkisinde bulunan kayanın taşıma direnci düşmektedir.

5. Koruyucu zon, kayanın taşıma direncini azaltmaksızın oluşturulmalıdır. Kazı sırasında oluşan şekil değiştirmeler; koruyucu zonun oluşmasında yeterli olacak şekilde, fakat kayacı aşırı gevşeterek taşıma dayanımının azalmasına neden olmayacak şekilde denetlenmeli ve yönlendirilmelidir. Bu alanda başarılı olunduğu ölçüde, güvenlik ve ekonomiklik artmaktadır.

6. Sağlamlaştırma işlemleri tam zamanında ve gerekli esneklikte yapılmalıdır. Bunu sağlamak için sağlamlaştırma işlemlerine ne çok erken, ne de çok geç başlanmalı ve iksa

direncini oluşturan yapının ne çok rijit ne de çok zayıf olmasına özen gösterilmelidir.

7. Özgül zaman faktörü (kayacın kendisini tutma süresi) doğru olarak tahmin edilmelidir.

8. Ön deneyler ve ölçümler yapılmalıdır. Zaman faktörünün ve kayanın kazı sonrasındaki şekil değiştirme davranışının önceden belirlenebilmesi için laboratuvarda ve arazide deneylerin yapılması ve deneme galerisinde konverjans ve deformasyonların ölçülmesi zorunludur. Bilindiği gibi, boşluğun kendini tutma süresi, deformasyon hızı ve kaya kalitesi, yeraltı kaya mekaniğinde de projelendirme için gerekli olan en önemli etmenler arasındadır.

9. Sağlamaştırma kuvvetleri, bağlayıcı türde (püskürtme beton) olmalıdır. Kazı sonrasında büyük şekil değiştirmelerin ve gevşemelerin beklendiği durumlarda sağlamaştırma dayanımı yayılı yükler şeklinde ve sağlamaştırma önlemi boşluk yüzeyini bağlayacak biçimde olmalıdır. Bunu sağlayan en başarılı yöntem, kısa sürede prizlenen püskürtme beton kullanımudur.

10. Sağlamaştırma kaplamaları, ince kabuk şeklinde olmalıdır. Geçici ve kalıcı sağlamaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde ve bükülebilir esneklikte olmalıdır. Böylelikle, kabuk içinde eğilme momentlerinin oluşması ve bunların meydana getireceği çekme ve makaslama kırıkları önlenebilecektir.

11. Sağlamaştırma, çelik hasır, ankraj ve çelik bağlarla yapılmalıdır. Sağlamaştırma, kabuğun kalınlaştırılması ile değil, kabuğa gerekli esnekliği verecek olan çelik hasırla sağlanmalıdır. Kayayı kendi kendine taşıtmak için etkin gerilmeler ankrajlar ile dağın içine aktarılmalıdır.

12. Sağlamaştırma zamanı ve elemanları ölçümlerle saptanmalıdır. Tünel duvarındaki ve onu çevreleyen kayalar içindeki deformasyonların ve gerilmelerin ölçülmesi, kayacın uygulama sırasındaki davranışını göstermesi bakımından önem taşımaktadır. Ön varsayımlara göre yapılan projelendirme ile dağın içine girildikten sonra uygulanması gereken proje çoğu zaman beklenmedik yeni etmenlerin de ortaya çıkması nedeniyle birbirinden farklı olacaktır. Bu nedenle, yeraltı kaya yapıları mühendisliğinde bir projeden değil, adım adım ve yer yer değişen bir projeler sisteminden söz edilmelidir. Bu sistemin kendi arasındaki uyumu ve kaya ortamına uygunluğun başarılabilmesi için ise gözleme, ölçme, deneyleme, denetleme, yorumlama ve arşivlendirme gibi tüm mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği çalışmalarının eksiksiz yapılması zorunludur. Bu çalışmaların yapılmadığı ve kesitler boyunca hep aynı projenin kullanıldığı durumlarda NATM'ın

kullanılamayacağı bilinmelidir.

13. Tünel, statik bakımdan zayıf zon ile sağlamlaştırma kabuğunun oluşturduğu bir halkadır. Modern anlamda tüneller dairesel kesitli yapılardır. Dağın içindeki boşluk gerisinde oluşturulan gerilme halkası (taşıyıcı zon) ile boşluk duvarına yapıştırılan sağlamlaştırma kabuğu birlikte çalışan bir halka oluştururlar. Statik bakımdan tünel, duraylılık araştırmalarında iki boyutta bir çember ve üç boyutta ise bir tüptür.

14. Sağlamlaştırma kabuğu kapalı halka şeklinde olmalıdır. Bu çemberin statik bakımdan taşıyabilir duruma gelebilmesi için halkaların kapanması zorunludur. Yay veya çentikli derzli halka statik bakımdan çembere kıyasla duraysızdır. Bu bakımdan kalot, sağ ve sol yan kazılar sağlamlaştırıldıktan sonra taban kazısı bitirilmeli ve sağlamlaştırma kaplaması bir halka şeklinde boşluk duvarına yapışmalıdır. Bilindiği gibi bu durum en iyi biçimde ancak tam kesit kazılarını izleyen daire şeklindeki sağlamlaştırma kabuklarıyla elde edilebilir. Ancak, taban kayacının taşıma özelliklerinin iyi olduğu durumlarda, tabanın sağlamlaştırılması ve sağlamlaştırma yayının bir halkaya tamamlanması gerekmeyebilir.

15. Halka en kısa zamanda oluşturulmalıdır. Kayacın ikincil gerilmelerin oluşumu sırasındaki davranışı, kabuğun deformasyonlarına bağlıdır. Tam kapanmış bir çember, taşıyıcı halka durumunda olmadığı için, gevşemeleri arttıran ve boşluğu çevreleyen kayaları plastikleştirerek onun taşıma direncini düşüren bir etken olmaktadır. Kaya içindeki deformasyonların ve plastik zon oluşumlarının zamanın bir fonksiyonu olduğu göz önüne alınacak olursa, sağlamlaştırma yayını en kısa zamanda halka şeklinde kapatmak çok olumlu sonuçlar verecektir. Tünel statiği üç boyuttaki bir tüp içinde değerlendirilirse; sağlamlaştırma halkasından fazlaca uzaklaşmış kalot kazılarında, tavanın sağlamlaştırılmasıyla oluşturulan yay şeklindeki kabuk, (daha fazla deformasyonlara izin vermesi nedeniyle) tüneli ekseni boyunca eğmeye çalışan bir moment meydana getirmektedir. Eğilmeye zorlanan bu tüpün uç kısmındaki kalot kabuğunun yan ayaklarında çok büyük gerilme oluşarak tüneli tehlikeye sokar. Dolayısıyla kalot anosu, sağlamlaştırma halkasından fazla uzaklaşmamalı ve tünel kaplaması en kısa zamanda yapılmalıdır.

16. Dağ olabildiğince az kurcalanmalıdır. Boşluğun açılması, ilksel gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilme dağılımı oluşturmaktadır. Boşluğun biçimi ve boyutunu değiştirmeye yönelen her yeni kazı bir kez daha gerilmelerin yönünün, şiddetinin ve yerinin değişmesine neden olacak ve böylece kaya dokusu giderek gevşeyecek ve kayanın taşıma direnci azalacaktır. Gerilmelerin boşalması sırasında kaçınılmaz olan

boşluk içine yönelen şekil değiştirmeler süreksizlik yüzeylerini açmakta, rölatif ötelenmelerle kayanın dokusu örşelenmektedir. Bu durum kayanın geçirimliliğini artırmakta ve çatlakların mekanik davranışlarının değişmesi bakımından da önem taşımaktadır. Unutulmaması gereken nokta, kayanın en sağlam olduğu durumunun kazı öncesindeki ilk durumu olduğudur. Bu durumu en az değiştiren kazı ilkesi ise, ikincil gerilme durumunun bir defada oluşturulmasıdır. Dolayısıyla, kısmi kazılar çalışmalarını karmaşıklaştırdığı ve doğal yapının giderek bozulmasına neden olduğu için tam kesit kazıları en uygun olanıdır.

17. Tünel açma yöntemi, yapının güvenliği açısından önemlidir. Tünel açma yönteminin uygulanış biçimi yeraltı kaya yapısının duraylılığı ve güvenliği açısından, kayanın zamana bağlı davranışını doğrudan doğruya etkilediği için büyük önem taşımaktadır. Yöntemler, uygulanış biçimlerine göre organizasyon ve zamanlamada büyük farklılıklar oluştururlar. Bu bakımdan ano uzunlukları, atım derinlikleri, sağlamlaştırmanın gerçekleşme süresi, tabanın kapanması, sağlamlaştırma direncinin sağlanması yeraltı yapılarının güvenliğine büyük ölçüde etkimektedir.

18. Yuvarlatılmış boşluk profilleri kullanılmalıdır. Tünelin en kesiti daire veya elips şeklinde olmalı, çıkıntı, çentik ve köşeler bulunmamalıdır. Bunlar, yapı duvarında ve kaya içinde gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeler meydana getirerek, yapının duraylılığını ve güvenliğini tehlikeye sokmaktadır.

19. İç kabuk ince olmalı ve dış kabuk ile sürtünmesiz fakat sıkı bağlı olmalıdır. İki kabuklu sağlamlaştırmalarda, iç kabuk da istenmeyen eğilme momentlerinin oluşmaması için ince olmalıdır. Ancak, dış kabuktan gelebilecek olan yüklerin kesmeye çalışmaması için, dış kabuğa sürtünmesiz bir şekilde ve tam yüzeyiyle sıkıca oturması sağlanmalıdır.

20. Ön (geçici) sağlamlaştırma işlemleriyle yapının duraylılığı sağlanmış olmalıdır. Kabuk ve çevresindeki kayadan oluşan yeraltı kaya yapısının şekil değiştirmeleri iç kabuğun yerleştirilmesinden önce durdurulmuş, yani ikincil gerilme durumu dengeli son şeklini almış olmalıdır. İkinci kabuğun görevi güvenliği arttırmak ve mimarı görünümü sağlamaktır. Ancak, yeraltı sularının bulunduğu durumlarda iç kabuk tüm yükleri alacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Bu durumlarda dış kabuk ile iç kabuğun arası bitüm, jeomebran, jeotekstil vb. malzeme ile su geçirmeyecek biçimde yalıtılmak zorundadır. Geçici sağlamlaştırmanın en önemli öğelerden biri olan ankrajların kalıcı sağlamlaştırma durumlarında hesaba katılabilmesi için bunların belli oranda korozyona karşı korunmuş olması gerekmektedir.

21. Yapım süresi içinde yönlendirme ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır. Kaya ve kabuktan oluşan sistemin yapım süreci içindeki karşılıklı davranışlarının bilinmesi deformasyonların sönümlenip sönümlenmediğinin belirlenmesi ve gerilmelerin, yer, büyüklük ve türlerinin saptanması açısından büyük önem taşımaktadır. Kaya ve beton içine yerleştirilen ölçme aygıt ve gereçleri yapının tamamlanmasından sonra da kontrol amacıyla kullanılmalıdır.

22. Drenajla dağdan kabuğa iletilen su basıncı boşaltılmalıdır. Yeraltı suyunun bulunduğu durumlarda açılan her boşluk, bir drenaj yapısı gibi çalışmakta ve suyu kendisine çekmektedir. Hem süreksizliklerin mekanik özelliklerini değiştirmesi ve hem de çalışma ortamını güç koşullar altına sokması bakımından istenmeyen su geliri, su boşaltan ağızların beton ile tıkanmasından sonra kabuk gerisinde büyük değerlere varan su basınçları oluşturulabilir. Boşluk suyu basıncının sistemin taşıma gücünü azaltması nedeniyle bu suyun drene edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla boşluk çevresine drenaj boruları yerleştirilmelidir.

Bu prensiplerin önemi, bilhassa zor kaya şartlarında anlaşılmaktadır. Zor kayalar; düşük dayanımlı, yüksek plastiklikte ve ileri derecede eklemli kayalar, başta yanal gerilmeler olmak üzere yüksek gerilmelere maruz kalan kayalar, üzerinde çok az ve çok fazla yük bulunan tünellerdeki kayalar ve jeodinamik etkilerle bozuşan kayalardır. Son yıllarda NATM'a göre inşa edilen tünellerde kaya sınıfları belirlenirken, kazı sırasında karşılaşılan kayanın jeoteknik özellikleri, örtü yükü, kazı kesiti, ilerleme adım boyu, kazı sırasında karşılaşılan yeraltı suyu ve jeoteknik ölçüm sonuçları dikkate alınarak tanımlanmaktadır.

Avusturya Standartlarından olan ÖNORM B2203 (1994), NATM için stabil kayadan basınç yaratan kayaya kadar değişen on kaya sınıfını tanımlamıştır (Tablo 3.37).

Bu çalışmada, jeoteknik birimlerin ve NATM kaya sınıflarının isimleri benzerlik gösterdiği için karıştırılmaması amacıyla NATM kaya sınıflarının rakamları alt indis olarak verilmiştir.

Tablo 3.37. NATM'a göre kaya kütlelerinin sınıflandırması (ÖNORM B2203, 1994)

| Kaya Sınıfı | | Açıklamalar | Destekleme |
|-------------|----------------|------------------|---|
| A | A ₁ | Sağlam | <p>Sonradan Az Sökülen Kaya Kütleleri: Bu sınıfta yer alan kaya kütleleri genellikle duraylı olup, elastik davranış gösterirler. Yersel iksa uygulanması durumunda yerçekimi nedeniyle, yer yer sığ göçükler oluşabilir. Göçükler genellikle izole olmuş, önemsiz eklem yapıları nedeniyle oluşur. Elastik deformasyon hızla azalır</p> |
| | A ₂ | Zamanla Kırılgan | |
| B | B ₁ | Kırılgan | <p>Gevrek Kaya Kütleleri: Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları, yapısal kenetlenme ve/veya çekme dayanımı azlığından dolayı, hızlı ve gevşemeye ve ayrışmaya yatkındır. Hemen hemen tüm çevrede, boşluk çevresinde ikincil gerilmeler, kaya kütlelerinin dayanımını biraz aşmakta, bununla beraber bu zayıflık içerilere ulaşmaktadır. İksa yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler oluşur</p> |
| | B ₂ | Çok Kırılgan | |
| | B ₃ | Döküntülü | |
| C | C ₁ | Kaya Patlamalı | <p>Baskılı Kaya Kütleleri: Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları genellikle, kaya basıncının yeniden dağılım süreci ve/veya deplasman sınırlamaları sonucunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu gösterir. Kaya kütleleri aşırı gerilme altında kalmasından dolayı, kabuk atma, burulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zayıflık mekanizmaları oluşur. Çatlamaya veya dökülmeye eğilimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenlere sahip kaya kütleleri bu gruba girer. Bu gruba giren kaya kütleleri, davranış ve kendini tutma süreleri, su sızıntılarından olumsuz yönde, önemli ölçüde etkilenir.</p> |
| | C ₂ | Baskılı | |
| | C ₃ | Çok Baskılı | |
| | C ₄ | Akıcı | |
| | C ₅ | Şişen Kabaran | |
| | | | <p>Sık yerleştirilmiş kaya bulonları ve çelik hasır gereklidir. Jeolojik şartlara göre yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir.</p> <p>Tünel kesit çevresinde sistematik destekleme yapılmalıdır. Tavanda süren uygulanmalıdır. Jeolojik şartlara göre yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir.</p> <p>Tünel kesit çevresinde sistematik destekleme yapılmalıdır. Tavanda süren boru uygulanmalıdır. Üst yarı kazısında geçici ring yapıları gerekebilir.</p> <p>Süren boru ve çelik levha süren tatbiki, tavanda gereklidir. Kazı aynasında püskürtme beton, hasır çelik, kaya bulonu ve drenaj elemanları kazı sırasında veya sonrasında kullanılmalıdır.</p> <p>Tavanda, süren boru ve çelik levha süren gereklidir. Bölümlere ayrılmış kesit kazısı püskürtme beton ile yapılmalıdır. Üst yarı aynasından geride taban kemeri gereklidir.</p> |

Tasarım aşamasındayken tünel güzergahı boyunca arazi ve sondaj çalışmalarından elde edilen verileri kullanarak sayısal bir sınıflandırma yapan Q ve RMR sistemlerine ait değerler, Şekil 3.35'de verilen eşleştirmeler yardımıyla NATM sisteminde karşılık gelen harfsel kaya sınıfına dönüştürülür. Böylece yapım aşamasına geçildiğinde zaman alıcı ve yapımı zor olan Q ve RMR sınıflama sistemleri yerine, bu sistemlerin tasarım aşamasında birleştirilmesi ile bulunmuş olan NATM sistemindeki sınıf değerleri kullanılarak kazı sırasında karşılaşılabilecek sorunlar en kısa zamanda çözümlenebilmektedir. Ancak sayısal kaya kütle sınıflama sistemlerinde kaya kütlelerinin zamana bağlı davranışı göz önüne alınmadığından tasarım aşamasında belirlenen NATM kaya sınıfı kazı aşamasında yapılan deformasyon ölçümleri ile değiştirilebilir. NATM'ın yukarıda anlatılan yapıma yönelik

niteliklerini, tasarım aşamasında kullanmak için yapılan kaya sınıflamalarının eşleştirilmeleri Şekil 3.35’de verilmiştir.

| Q KAYA KÜTLE SINIFI (Barton vd., 1974) | NATM KAYA KÜTLE SINIFI (ÖNORM B2203, 1994) | RMR KAYA KÜTLE SINIFI (Bieniawski, 1989) |
|---|---|---|
| 1000 SON DERECE SAĞLAM | A ₁ SAĞLAM | 100 |
| 400 ÇOK FAZLA SAĞLAM | | ÇOK İYİ |
| 100 70.4 ÇOK SAĞLAM | A ₂ ZAMANLA KIRILGAN | 80 |
| 40 SAĞLAM | | İYİ |
| 10 ORTA | B ₁ KIRILGAN | 60 |
| 4 ZAYIF | B ₂ ÇOK KIRILGAN | 50 |
| 1.47 1 ÇOK ZAYIF | B ₃ DÖKÜNTÜLÜ | 40 |
| 0.1 | | ZAYIF |
| 0.03 ÇOK FAZLA ZAYIF | C ₁ KAYA PATLAMALI | 30 |
| 0.016 0.01 0.008 | C ₂ BASKILI | 20 |
| 0.002 0.001 SON DERECE ZAYIF | C ₃ ÇOK BASKILI | 15 |
| | C ₄ AKICI | 10 |
| | C ₅ ŞİŞEN-KABARAN | 5 |
| | | 0 |
| | | ÇOK ZAYIF |

Şekil 3.35. NATM, Q ve RMR kaya kütle sınıflarının eşleştirilmesi (KGM, 1997)

NATM kaya kütle sınıflama sistemi tanımsal bir sınıflama olduğundan Q ve RMR sınıflama sistemleri gibi nicel veri sağlamamaktadır. Bu nedenle tünel açımı sırasında yapılacak gözlem ve deformasyon ölçümlerine dayanan NATM kaya sınıflaması tasarım aşaması sınıflaması olmayıp bu anlamda yapım aşaması sınıflamasıdır. Belirli bir destek ve kazı işlemine bağımlı olmayan NATM sisteminin tünel destekleme tasarımında Q ve RMR sınıflamalarıyla birlikte kullanılması daha sağlıklı veriler sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan her bir jeoteknik birim için hesaplanan Q ve RMR değerleri, NATM sınıflamasıyla birlikte değerlendirilerek kaya kütle sınıflaması yapılmıştır. Q sistemi, RMR sistemine göre daha tutucu davranarak C1 jeoteknik birimi için daha düşük NATM kaya sınıfını tanımlamıştır. ÖNORM B2203'e (1994) göre, nihai RMR değerleri dikkate alındığında A2, B1, B2 ve D1 jeoteknik birimleri "B₃"; A1 jeoteknik birimi "B₂"; C1 jeoteknik birimi ise "C₁" olarak sınıflandırılmıştır. Q değerleri göz önüne alındığında ise A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimleri "B₃"; B1 jeoteknik birimi "C₁"; C1 jeoteknik birimi ise "C₃" olarak sınıflandırılmıştır. Tablo 3.38'de jeoteknik birimler için Q ve RMR değerlerine karşılık gelen NATM kaya sınıfları verilmiştir.

Tablo 3.38. Jeoteknik birimlerin NATM kaya kütle sınıflamasına göre değerlendirilmesi

| | Jeoteknik birimler | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|
| | A1 | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | D1 |
| Giriş Bölümü | Orta | Orta | Orta | Orta | Orta | Orta | Orta | Çıkış Bölümü |
| Nihai RMR | 47.1 | 47.1 | 41.6 | 29.2 | 42.3 | 21.1 | 44.8 | 45.1 |
| Tanımlama (Bieniawski, 1989) NATM | Orta kaya | Orta kaya | Orta kaya | Zayıf kaya | Orta kaya | Zayıf kaya | Orta kaya | Orta kaya |
| Tanımlama (ÖNORM B 2203, 1994) | B ₂ | B ₂ | B ₃ | B ₃ | B ₃ | C ₁ | B ₃ | B ₃ |
| Q | Çok kırılğan | Çok kırılğan | Döküntülü | Döküntülü | Döküntülü | Kaya patlamalı | Döküntülü | Döküntülü |
| Tanımlama (Barton vd., 1974) NATM | 0.35 | 0.70 | 0.27 | 0.07 | 0.49 | 0.0150 | 0.61 | 0.30 |
| Tanımlama (ÖNORM B 2203, 1994) | Çok zayıf | Çok zayıf | Çok zayıf | Çok fazla zayıf | Çok zayıf | Son derecede zayıf | Çok zayıf | Çok zayıf |
| Tanımlama (ÖNORM B 2203, 1994) | B ₃ | B ₃ | B ₃ | C ₁ | B ₃ | C ₃ | B ₃ | B ₃ |
| Tanımlama (ÖNORM B 2203, 1994) | Döküntülü | Döküntülü | Döküntülü | Kaya patlamalı | Döküntülü | Çok baskılı | Döküntülü | Döküntülü |

3.5.5. GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) Sistemi

İlk kez Hoek vd. (1995) tarafından önerilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), başlangıçta RMR ve Q değerleri ile ilişkilendirilmiş, daha sonra önerdikleri GSI sınıflama abağından belirlenmeye çalışılmıştır. GSI, arazi gözlemlerinden yararlanarak farklı jeolojik ve jeoteknik koşullara bağlı olarak kaya kütlesi dayanımının hesaplanması esasına dayanır. Kaya kütlesi karakterizasyonu, kaya yapısı, yani bloklu olması veya süreksizliklerin yüzey koşulları (pürüzlülük, bozunma ve dolgu vb.) gibi görsel izlenimlere bağlıdır. GSI yardımıyla kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri ve kütle sabitleri ampirik olarak belirlenebilmektedir.

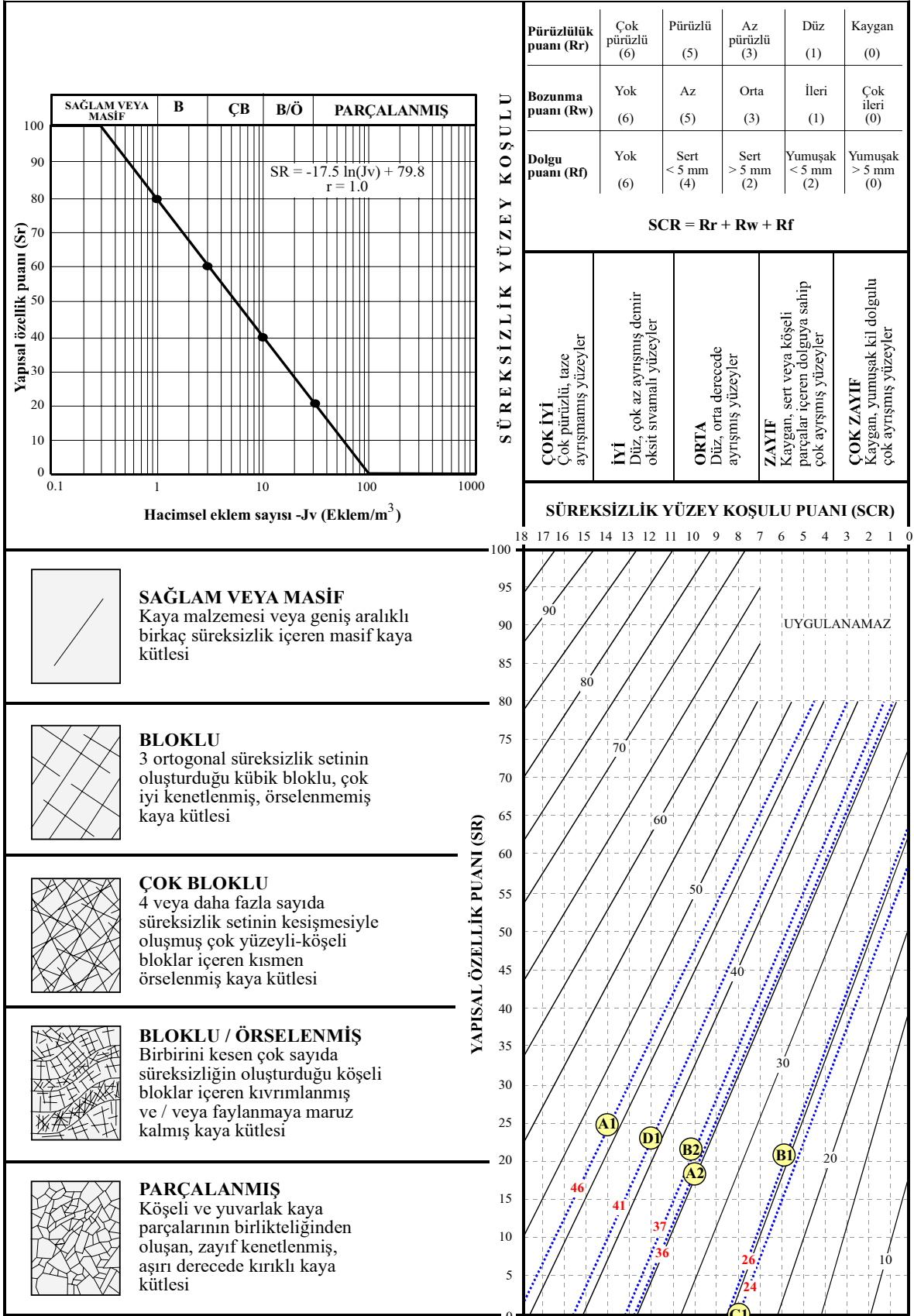
Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından GSI değerinin belirlenmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalarda süreksizlik yüzey koşulunun ve kaya kütlesi yapısının ölçülebilen veya tanımlanabilen kaya kütlesi parametrelerinin daha hassas bir şekilde belirlenmesi amacıyla bir puanlama sistemine geçilmesi uygun görülmüştür. Bu amaçla “yapısal özellik puanı” (SR) ve “süreksizlik yüzey koşulu puanı” (SCR) sisteme dahil edilmiştir.

Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimlere ait GSI değerleri belirlenirken, SR ve SCR parametrelerinden yararlanılmış ve yapılan hesaplamalar Tablo 3.39’da özet olarak verilmiştir. Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından yeniden düzenlenmiş GSI abağının en son hali ve jeoteknik birimlere ait GSI değerleri Şekil 3.36’da verilmiştir.

A1, B1, B2 ve D1 jeoteknik birimleri, Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen GSI abağında değerlendirildiğinde “parçalanmış” sınıfında; A2 ve C1 jeoteknik birimleri ise “bloklu / örselenmiş” sınıfında yer almaktadır.

Tablo 3.39. Jeoteknik birimlerin GSI sistemine göre değerlendirilmesi

| | Jeoteknik birimler | | | | | |
|---------------------------------------|------------------------|-------------|------------------------|------------------------|-------------|------------------------|
| | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 |
| J_v (eklem/m ³) | 23.03 | 34.22 | 30.43 | 28.26 | 131.61 | 24.93 |
| Rr | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| Rw | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Rf | 4 | 4 | 0 | 4 | 2 | 2 |
| SCR | 14 | 10 | 6 | 10 | 8 | 12 |
| SR | 25 | 18 | 20 | 21 | 0 | 24 |
| GSI | 46 | 36 | 26 | 37 | 24 | 41 |
| Tanımlama (Sönmez ve Ulusay, 2002) | Bloklu / Örselenmiş | Parçalanmış | Bloklu / Örselenmiş | Bloklu / Örselenmiş | Parçalanmış | Bloklu / Örselenmiş |



Şekil 3.36. Jeoteknik birimlere ait GSI değerlerinin Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen modifiye edilmiş GSI abağında gösterimi

3.6. Jeoteknik Birimlerin Kütle Özellikleri

3.6.1. Poisson Oranının Belirlenmesi

Sismik kırılma yöntemi yardımıyla kaya kütlelerine ait dinamik poisson oranı değerleri dolaylı olarak belirlenebilmektedir. Bu yöntem, yer yüzünde veya çok sığ derinliklerde yapay olarak meydana getirilen sismik dalgaların yer içerisinde kırılarak yayıldıktan sonra yer yüzündeki alıcılara gelmeleri için geçen zamandan faydalanarak yer altının yapısı, farklı birimlerin devamlılığı, fiziksel ve elastik özellikleri hakkında fikir veren ve en çok tercih edilen bir yöntemdir (Ersoy, 2007).

Çalışmada, sismik kırılma ölçümleri için 12 kanallı, Geometrics marka ve ES3000 model araştırma sismografi kullanılmıştır. Her bir jeoteknik birimi temsil etmesi amacıyla en uygun lokasyonlar belirlenerek toplam 6 profilde sismik kırılma yöntemiyle ölçüm yapılmıştır (Şekil 3.2). P dalgalarını (boyuna dalga) üretmek için zemin üzerine yerleştirilmiş çelik levhaya (20 cm x 30 cm ebadında) balyozla vurulmuştur. S dalgalarını (enine dalga) üretmek için ise zemine açılmış yaklaşık 50 cm derinliğindeki çukura çelik levha düşey olarak yerleştirilmiş ve aynı işlem uygulanmıştır. P dalgalarını algılayabilmek için düşey bileşenli alıcılar (jeofon), S dalgalarını algılayabilmek için ise yatay bileşenli alıcılar kullanılmıştır. 6 farklı istasyondan alınan profillerde düz ve ters vuruşlar yapılmıştır. Sismik kırılma yöntemi yardımıyla jeoteknik birimlerdeki kaya kütlelerine ait dinamik poisson oranı değerleri belirlenmiştir. Hesaplamalarda ASTM (2005) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır.

$$v = \left(V_p^2 - 2V_s^2 \right) / 2 \left(V_p^2 - V_s^2 \right) \quad (22)$$

Burada; V_p : elastik ses dalgasının boyuna yayılma hızı (m/sn), V_s : elastik ses dalgasının enine yayılma hızı (m/sn) ve v : poisson oranıdır.

Ölçüm sırasında kırılan elastik ses dalgalarına ait varış zamanları kaydedilerek zaman-uzaklık grafikleri çizilmiştir. Elde edilen grafikler değerlendirilerek elastik ses dalgalarının (P ve S) kaya kütleleri içerisindeki yayılma hızları hesaplanmış ve buna bağlı olarak kaya kütlelerinin dinamik poisson oranı değerleri belirlenmiştir. Yapılan sismik ölçümler sonucunda belirlenen jeoteknik birimlere ait elastik ses dalgasının yayılma hızları

ve dinamik Poisson oranı değerleri Tablo 3.40'da verilmiştir.

Tablo 3.40. Elastik ses dalgalarının jeoteknik birimler içerisindeki yayılma hızları ve dinamik Poisson oranı değerleri

| Jeoteknik birim | Sismik kırılma ölçüm hattı | V _p (m/sn) | V _s (m/sn) | Poisson oranı (ν) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| A1 Üst zon | SH1 | 1462 | 975 | 0.10 |
| A1 Alt zon | SH1 | 3456 | 2039 | 0.23 |
| A2 | SH2 | 3182 | 1321 | 0.40 |
| B1 | SH3 | 4393 | 1200 | 0.46 |
| B2 | SH4 | 2200 | 1250 | 0.26 |
| C1 | SH5 | 1150 | 600 | 0.31 |
| D1 | SH6 | 1492 | 644 | 0.39 |

Tablo 3.40'da görüldüğü gibi, A1 jeoteknik birimi düşük süreksizlik sıklığıyla orantılı olarak düşük dinamik poisson oranına sahiptir. B1 jeoteknik birimi ise B2 jeoteknik birimiyle aynı litolojide olmasına rağmen yüksek süreksizlik sıklığına sahip olması sebebiyle sismik kırılma çalışmalarından yüksek dinamik poisson oranı elde edilmiştir. Ayrıca, A1 jeoteknik biriminde yapılan sismik kırılma çalışmaları sonucunda yüzeyden itibaren iki farklı zonanın mevcut olduğu belirlenmiştir. Üst zonda yüzeysel şartlardan etkilenecek bozunmuş kaya kütlelerinin, alt zonda ise bozunmamış kaya kütlelerinin olduğu saptanmıştır. A1 jeoteknik birimindeki üst zon bozunmanın etkisiyle sürekli bir kaya kütlesi yapısı kazandığından, süreksizlik içeren alt zondan daha düşük bir poisson oranı değerine sahiptir.

3.6.2. Deformasyon Modülünün Belirlenmesi

Kaya kütlelerinin deformasyon modülü (E_m), mühendislik uygulamalarının tasarımında kullanılan en önemli parametrelerden birisi olup, bu parametrenin belirlenmesine yönelik araştırmacılar tarafından bir çok çalışma yapılmıştır. Bu parametrenin belirlenmesindeki en önemli güçlükler, kaya kütlelerinin sağlam kaya ile birlikte süreksizlikleri de içermesi nedeniyle laboratuvarında deney yapabilecek kadar büyük boyutta örnek alınamaması ve arazide yapılan deneylerin hem uzun zaman alması hem de maliyetli olmasıdır. Bu güçlükler, araştırmacıları kaya kütlelerinin deformasyon modülünü ampirik ilişkiler yardımıyla belirleyebilmek için çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir.

Araştırmacılar tarafından kaya kütlelerinin deformasyon modülünü belirlemeye yönelik önerilen çeşitli ampirik eşitlikler özet olarak Tablo 3.41’de, bu eşitlikler yardımıyla jeoteknik birimler için hesap edilen deformasyon modülü değerleri ise Tablo 3.42’de verilmiştir. Hesaplanan deformasyon modüllerine ait veri seti içinde çok büyük ve çok küçük değerler bulunduğundan, ortalamanın bu değerlerden etkilenmemesi için aritmetik ortalama yerine geometrik ortalama kullanılmış ve ortalama E_m değerleri belirlenmiştir.

Tablo 3.41. Kaya kütlelerinin deformasyon modülünü belirlemeye yönelik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler

| Araştırmacı | Eşitlik | Not | Eşitlik numarası |
|-------------------------------|--|---|------------------|
| Serafim ve Pereira (1983) | $E_m = 10^{(RMR-100)/40}$ (GPa) | RMR < 50 için | (23) |
| Verman (1993) | $E_m = 0.3H^\alpha 10^{(RMR-20)/38}$ (GPa) | H ≥ 50 m için α = 0.16-0.30 | (24) |
| Palmström (1995) | $E_m = 5.6RMI^{0.375}$ (GPa) | RMI > 0.1 için | (25) |
| Hoek ve Brown (1997) | $E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$ (GPa) | | (26) |
| Read vd. (1999) | $E_m = 0.1(RMR/10)^3$ (GPa) | | (27) |
| Palmström ve Singh (2001) | $E_m = 7RMI^{0.4}$ (GPa) | 1 < RMI < 30 için | (28) |
| Hoek vd. (2002) | $E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$ (GPa) | $\sigma_{ci} < 100$ MPa için | (29) |
| Barton (2002) | $E_m = 10.Q_c^{1/3}$ (GPa) | | (30) |
| ASTM (2005) | $E_m = (\rho Vs^2 (3Vp^2 - 4Vs^2) / (Vp^2 - Vs^2)) / 10^{10}$ (GPa) | | (31) |
| Hoek ve Diederichs (2006) | $E_m = 100000 \left(\frac{1 - (D/2)}{1 + e^{(75+25D-GSI)/11}} \right)$ (MPa) | | (32) |
| Chun vd. (2006) | $E_m = 0.3228e^{(0.0485RMR)}$ (GPa) | | (33) |
| Işık vd. (2008) | $E_m = 6.7RMR - 103.06$ (MPa) | RMR ≥ 27 için | (34) |
| Işık vd. (2008) | $E_m = 5.67GSI$ (MPa) | | (35) |
| RMR: Kaya Kütle Puanlaması | | σ_{ci} : Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa) | |
| RMI: Kaya Kütle İndeksi | | D: Örselenme faktörü | |
| Q: Kaya Kütle Kalitesi | | Vp: Elastik ses dalgasının boyuna yayılma hızı (m/sn) | |
| Q _C : Normalize Q | | Vs: Elastik ses dalgasının enine yayılma hızı (m/sn) | |
| GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi | | H: Yeraltı kazısının derinliği (m) | |
| | | ρ: Kaya malzemesinin yoğunluğu (kg/m ³) | |

Tablo 3.42. Jeoteknik birimlere ait deformasyon modülü değerleri

| Eşitlik numarası | Jeoteknik birimler | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | A1 | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | D1 |
| | Giriş Bölümü | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Çıkış Bölümü |
| (23) | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | 0.05 |
| (24) | 3.27 | 4.40 | 2.62 | 1.86 | 4.27 | 0.88 | 3.27 | 2.85 |
| (25) | 4.59 | 4.59 | 5.69 | 2.51 | 5.60 | 1.72 | 5.92 | 5.92 |
| (26) | 4.14 | 4.14 | 3.81 | 1.86 | 3.51 | 1.15 | 4.65 | 4.65 |
| (27) | 11.84 | 11.84 | 8.29 | 4.00 | 10.58 | 1.78 | 10.25 | 10.25 |
| (28) | 5.66 | 5.66 | 7.12 | 2.98 | 7.01 | 1.99 | 7.42 | 7.42 |
| (29) | 4.14 | 4.14 | 3.81 | 1.86 | 3.51 | 1.15 | 4.65 | 4.65 |
| (30) | 4.56 | 5.75 | 5.79 | 3.36 | 6.46 | 1.58 | 7.09 | 5.63 |
| (31) | 26.97 | 26.97 | 11.42 | 10.56 | 9.9 | 2.19 | 2.9 | 2.9 |
| (32) | 6.69 | 6.69 | 2.81 | 1.15 | 3.06 | 0.96 | 4.35 | 4.35 |
| (33) | 3.49 | 3.49 | 2.67 | 1.70 | 3.20 | 1.14 | 3.12 | 3.12 |
| (34) | 0.23 | 0.23 | 0.19 | 0.13 | 0.21 | 0.07 | 0.21 | 0.21 |
| (35) | 0.26 | 0.26 | 0.20 | 0.15 | 0.21 | 0.14 | 0.23 | 0.23 |
| Ortalama E_m (GPa) | 2.51 | 2.61 | 2.02 | 1.14 | 2.21 | 0.65 | 2.15 | 2.09 |
| En büyük | 26.97 | 26.97 | 11.42 | 10.56 | 10.58 | 2.19 | 10.25 | 10.25 |
| En küçük | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | 0.05 |
| Std. Sp. | 7.07 | 7.03 | 3.40 | 2.73 | 3.41 | 0.72 | 3.05 | 2.97 |

3.6.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Doğal malzemelerin dayanım parametreleri, bu malzemelerden alınmış temsil edici büyüklükteki örneklerin laboratuvarında uygun şartlarda test edilmesi ile belirlenir. Ancak sık eklemlili kaya kütlelerinden, sağlam kaya malzemesi ile birlikte süreksizlik sistemlerini de içerecek büyüklükte ve metre boyutuna varan örneklerin alınması genellikle mümkün olmamaktadır. Yeterli büyüklükte örnek alınsa bile, bu örneği laboratuvar ölçeğinde test edecek hücre ve ekipman geliştirilmemiştir. Eklemlili kaya kütlelerinin dayanım (σ_{cm}) özelliğini belirlemek için araştırmacılar tarafından çeşitli ampirik eşitlikler önerilmiştir. Bu eşitlikler, özet olarak Tablo 3.43'de sunulmuştur.

Tablo 3.43'de verilen eşitlikler yardımıyla jeoteknik birimler için hesap edilen tek eksenli basınç dayanımı değerleri özet olarak Tablo 3.44'de verilmiştir. Hesaplanan tek eksenli basınç dayanımlarına ait veri seti içinde çok büyük ve çok küçük değerler bulunduğundan, ortalamanın bu değerlerden etkilenmemesi için aritmetik ortalama yerine geometrik ortalama kullanılmış ve ortalama σ_{cm} değerleri belirlenmiştir.

Tablo 3.43. Kaya kütlesinin dayanımını belirlenmeye yönelik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler

| Araştırmacı | Eşitlik | Not | Eşitlik numarası |
|---|--|---|------------------|
| Hoek ve Brown (1980) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \sqrt{\exp(RMR - 100)/9}$ (MPa) | | (36) |
| Yudhbir vd. (1983) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{7.65(RMR-100)/100}$ (MPa) | | (37) |
| Ramamurthy (1986) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{(RMR-100)/18.75}$ (MPa) | | (38) |
| Goel (1994) | $\sigma_{cm} = \frac{5.5\gamma(Q_N)^{1/3}}{\sigma_{ci} B^{0.1}}$ (MPa) | | (39) |
| Kalamaras ve Bieniawski (1995) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{(RMR-100)/24}$ (MPa) | | (40) |
| Palmström (1995) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} JP$ (MPa) | | (41) |
| Bhasin ve Grimstad (1996) | $\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{100} 7\gamma Q^{1/3}$ (MPa) | | (42) |
| Sheorey (1997) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{(RMR-100)/20}$ (MPa) | | (43) |
| Singh vd. (1997) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^n$ (MPa) | GSI \geq 25 için n=0.5 GSI<25 için n=0.6 | (44) |
| Trueman (1998) | $\sigma_{cm} = 0.5e^{0.06RMR}$ (MPa) | | (45) |
| Aydan ve Dalgic (1998) | $\sigma_{cm} = \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)} \sigma_{ci}$ (MPa) | $\beta=6$ | (46) |
| Barton (2000) | $\sigma_{cm} = 5\gamma Q_c^{1/3}$ (MPa) | | (47) |
| Hoek vd. (2002) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a$ (MPa) | | (48) |
| Ramamurthy (2004) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{-0.008[250(1-0.3\log Q)]}$ (MPa) | | (49) |
| Ramamurthy (2004) | $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{-0.008[5(100-RMR)]}$ (MPa) | | (50) |
| RMR: Kaya Kütle Puanlaması | | σ_{ci} : Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa) | |
| Q: Kaya Kütle Kalitesi | | s, a: Kaya kütle sabitleri | |
| Q _C : Normalize Q | | B: Yeraltı kazısının genişliği (m) | |
| Q _N : SRF içermeyen Q | | γ : Birim hacim ağırlık (t/m ³) | |
| JP: Süreksizlik dayanım azaltma faktörü | | | |

Tablo 3.44. Jeoteknik birimlere ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

| Eşitlik numarası | Jeoteknik birimler | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | A1 | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | D1 |
| | Giriş Bölümü | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Çıkış Bölümü |
| (36) | 1.60 | 1.60 | 3.17 | 1.42 | 2.95 | 0.43 | 3.17 | 3.17 |
| (37) | 0.55 | 0.55 | 0.97 | 0.36 | 0.98 | 0.09 | 1.04 | 1.04 |
| (38) | 1.80 | 1.80 | 3.60 | 1.65 | 3.31 | 0.51 | 3.57 | 3.57 |
| (39) | 0.57 | 0.72 | 0.17 | 0.16 | 0.30 | 0.20 | 0.29 | 0.23 |
| (40) | 3.25 | 3.25 | 6.94 | 3.55 | 6.13 | 1.21 | 6.65 | 6.65 |
| (41) | 0.59 | 0.59 | 1.04 | 0.12 | 1.00 | 0.04 | 1.16 | 1.16 |
| (42) | 3.52 | 4.43 | 7.68 | 3.97 | 7.62 | 1.05 | 9.12 | 7.24 |
| (43) | 2.13 | 2.13 | 4.34 | 2.05 | 3.95 | 0.65 | 4.27 | 4.27 |
| (44) | 3.27 | 3.53 | 6.28 | 2.56 | 5.69 | 0.97 | 6.70 | 6.21 |
| (45) | 9.51 | 9.51 | 6.84 | 3.89 | 8.54 | 2.39 | 8.29 | 8.29 |
| (46) | 3.76 | 3.76 | 8.31 | 4.39 | 7.16 | 1.46 | 7.80 | 7.80 |
| (47) | 5.99 | 7.55 | 6.78 | 4.22 | 8.10 | 1.83 | 8.94 | 7.10 |
| (48) | 3.17 | 3.43 | 5.84 | 2.14 | 5.34 | 0.78 | 6.40 | 5.91 |
| (49) | 10.13 | 10.13 | 26.35 | 18.70 | 20.35 | 8.29 | 22.48 | 22.48 |
| (50) | 0.50 | 0.51 | 1.35 | 1.01 | 1.03 | 0.48 | 1.14 | 1.13 |
| Ortalama σ_{cm} (MPa) | 2.21 | 2.34 | 3.61 | 1.72 | 3.53 | 0.67 | 3.87 | 3.66 |
| En büyük | 10.13 | 10.13 | 26.35 | 18.70 | 20.35 | 8.29 | 22.48 | 22.48 |
| En küçük | 0.50 | 0.51 | 0.17 | 0.12 | 0.98 | 0.09 | 0.29 | 1.04 |
| Std. Sp. | 3.04 | 3.16 | 6.25 | 4.50 | 4.97 | 2.03 | 5.48 | 5.37 |

3.6.4. Kaya Kütle Sabitlerinin Belirlenmesi

Süreksizlik içeren kaya kütlelerinin dayanım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan m_b ve s sabitleri ile Hoek-Brown yenilme ölçütünde kullanılan a sabiti GSI, RMR ve Q değerlerine bağlı ampirik büyüklüklerdir. m_b sabiti kayanın türüne, kayayı oluşturan tanelerin büyüklüğüne, geometrisine ve kenetlenme derecesine, s sabiti ise kaya kütlelerinin içerdiği bloklar/taneler arasındaki çekilme dayanımına ve süreksizlikler tarafından sınırlanan kaya malzemesi parçalarının birbirleriyle kenetlenme derecesine bağlıdır. Yeraltı açıklıklarının tasarımında kullanılan kaya kütle sabitlerinin belirlenmesine yönelik birçok araştırmacı tarafından çeşitli eşitlikler önerilmiştir. Bu eşitlikler Tablo 3.45’de özet olarak verilmiştir. Bu sabitlerin belirlenmesinde kullanılan örselenme faktörü (D) ise B1 ve C1 jeoteknik biriminde mekanik yeraltı kazısı, diğer jeoteknik birimlerde ise denetimli yeraltı patlatması yapılacağı varsayılarak sıfır kabul edilmiştir.

Tablo 3.45. m_b , s ve a kaya kütle sabitlerini belirlenmeye yönelik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler

| Araştırmaçı | Eşitlik | Eşitlik numarası |
|-------------------------------|--|------------------|
| Hoek vd. (1995) | $m_b = m_i 0.135(Q')^{1/3}$ | (51) |
| Palmström (1995) | $m_b = m_i JP^{0.64}$ | (52) |
| Singh vd. (1997) | $m_b = m_i 0.135Q_N^{1/3}$ | (53) |
| Hoek ve Brown (1998) | $m_b = m_i e^{\left(\frac{RMR-100}{28}\right)}$ | (54) |
| Hoek vd. (2002) | $m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}$ | (55) |
| Ramamurthy (1986) | $s = e^{\left(\frac{1}{40}(0.0564RMR-5.64)\right)}$ | (56) |
| Hoek vd. (1995) | $s = 0.002Q'$ | (57) |
| Palmström (1995) | $s = JP^2$ | (58) |
| Singh vd. (1997) | $s = 0.002Q_N$ | (59) |
| Hoek ve Brown (1998) | $s = e^{\left(\frac{RMR-100}{9}\right)}$ | (60) |
| Hoek vd. (2002) | $s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}$ | (61) |
| Hoek vd. (2002) | $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$ | (62) |
| RMR: Kaya Kütle Puanlaması | JP: Süreksizlik dayanım azaltma faktörü | |
| Q_N : Normalize Q | D: Örselenme faktörü | |
| Q : Modifiye Q | m_i : Kaya malzemesi sabiti | |
| GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi | γ : Birim hacim ağırlık (t/m^3) | |

Kaya kütlelerinin yenilme sonrası göstereceği davranışın nasıl olacağını bilmesi de yeraltı kazılarının tasarımında ve duraylılığında önemlidir. Tünel duvarları gibi sınırlandırılmış ortamlarda çoğu kaya kütleleri dayanım azalmasına uğrar ve birim deformasyon artık dayanım seviyesine ulaşır (Cai vd. 2007). Büyük ölçekli testler yaparak kaya kütlelerinin bu özelliğini yerinde belirlemek çok zordur. Hoek (2007) ortalama bir kaliteye sahip kaya kütlelerine ait yenilme sonrası özelliklerin GSI değerinde kırılmış kaya kütlelerini temsil edecek şekilde azaltmalar yapılarak bulunabileceğini belirtmiştir. Russo vd. (1998) yaptıkları çalışmalarda yenilme öncesi duruma ait doruk GSI değerinin, yenilme sonrası duruma ait artık GSI (GSI_r) değerinin yaklaşık % 36'sı olduğunu belirlemiştir.

$$GSI_r = 0.36 GSI \quad (63)$$

Bu konuyla ilgili olarak en son çalışma Cai vd. (2007) tarafından yapılmış ve yenilme sonrası duruma ait GSI_r değerinin belirlenmesi için aşağıdaki formülü önermiştir.

$$GSI_r = GSI e^{-0.0134GSI} \quad (64)$$

GSI_r 'nin bir forksiyonu olarak değişen artık m_{br} , s_r ve a_r kütle sabitlerinin belirlenmesine yönelik Cai vd. (2007) tarafından önerilen eşitlikler ve Russo vd. (1998) tarafından önerilen (63) nolu eşitliğin Hoek vd. (2002) tarafından önerilen kütle sabitlerine uygulanmasıyla elde edilen eşitlikler Tablo 3.46'da sunulmuştur.

Tablo 3.46. m_{br} , s_r ve a_r kaya kütle sabitlerini belirlenmeye yönelik araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler

| Araştırmacı | Eşitlik | Eşitlik numarası |
|------------------|--|------------------|
| Russo vd. (1998) | $m_{br} = m_i e^{\left(\frac{GSI_r - 100}{28 - 14D}\right)}$ | (65) |
| Russo vd. (1998) | $s_r = e^{\left(\frac{GSI_r - 100}{9 - 3D}\right)}$ | (66) |
| Russo vd. (1998) | $a_r = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI_r/15} - e^{-20/3} \right)$ | (67) |
| Cai vd. (2007) | $m_{br} = m_i e^{\left(\frac{GSI_r - 100}{28}\right)}$ | (68) |
| Cai vd. (2007) | $s_r = e^{\left(\frac{GSI_r - 100}{9}\right)}$ | (69) |
| Cai vd. (2007) | $a_r = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI_r/15} - e^{-20/3} \right)$ | (70) |

Hesaplanan s kütle sabitlerine ait veri seti içinde çok büyük ve çok küçük değerler bulunduğundan ortalamanın bu değerlerden etkilenmemesi için geometrik ortalama kullanılarak ortalama s değeri, m_b kütle sabitlerine ait veri setinde ise ortalamayı etkileyecek farklı değerler bulunmadığından aritmetik ortalama kullanılarak ortalama m_b değeri belirlenmiştir. Jeoteknik birimler için hesap edilen kaya kütle sabitleri Tablo 3.47'de verilmiştir.

Ayrıca, A1, A2, B1, B2, C1 ve D1 jeoteknik birimleri için kaya malzemesi sabiti olan m_i , RocLab v1.0 (Rocscience, 2002) programı kullanılarak sırasıyla 13, 7, 8, 8, 7 ve 25 olarak belirlenmiştir.

Çalışma alanındaki her bir jeoteknik birimi temsil etmesi için sayısal analizlerde kullanmak amacıyla belirlenen kütle özellikleri Tablo 3.48'de özet olarak sunulmuştur.

Tablo 3.47. Jeoteknik birimlere ait kaya kütle sabiti değerleri

| Eşitlik numarası | Jeoteknik birimler | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | A1 | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | D1 |
| | Giriş Bölümü | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Çıkış Bölümü |
| (51) | 2.02 | 2.29 | 0.92 | 0.70 | 1.24 | 0.45 | 4.10 | 3.56 |
| (52) | 2.42 | 3.05 | 1.19 | 0.87 | 1.67 | 0.50 | 5.60 | 4.44 |
| (53) | 1.12 | 1.12 | 0.46 | 0.16 | 0.62 | 0.12 | 2.03 | 2.03 |
| (54) | 2.11 | 2.11 | 0.93 | 0.76 | 1.22 | 0.50 | 3.74 | 3.74 |
| (55) | 1.89 | 1.89 | 0.71 | 0.57 | 0.84 | 0.46 | 3.04 | 3.04 |
| (56) | 0.478 | 0.602 | 0.145 | 0.131 | 0.251 | 0.153 | 0.245 | 0.195 |
| (57) | 0.931 | 0.931 | 0.924 | 0.911 | 0.928 | 0.901 | 0.928 | 0.928 |
| (58) | 0.00047 | 0.00047 | 0.00021 | 0.000046 | 0.00033 | 0.000027 | 0.00038 | 0.00038 |
| (59) | 0.0053 | 0.0105 | 0.004 | 0.00103 | 0.0073 | 0.0003 | 0.0091 | 0.0045 |
| (60) | 0.0035 | 0.0035 | 0.0019 | 0.00067 | 0.0029 | 0.00027 | 0.0027 | 0.0027 |
| (61) | 0.0025 | 0.0025 | 0.00082 | 0.00027 | 0.00091 | 0.00022 | 0.00142 | 0.00142 |
| (62) | 0.508 | 0.508 | 0.515 | 0.529 | 0.514 | 0.533 | 0.511 | 0.511 |
| (65) | 0.66 | 0.66 | 0.31 | 0.31 | 0.36 | 0.27 | 1.19 | 1.19 |
| (66) | 0.00009 | 0.00009 | 0.00006 | 0.00004 | 0.00007 | 0.00004 | 0.00008 | 0.00008 |
| (67) | 0.56 | 0.56 | 0.57 | 0.59 | 0.57 | 0.59 | 0.56 | 0.56 |
| (68) | 0.89 | 0.89 | 0.44 | 0.43 | 0.50 | 0.37 | 1.64 | 1.64 |
| (69) | 0.00024 | 0.00024 | 0.00018 | 0.00011 | 0.00018 | 0.00010 | 0.00021 | 0.00021 |
| (70) | 0.53 | 0.53 | 0.54 | 0.55 | 0.54 | 0.55 | 0.53 | 0.53 |
| Ortalama m_b | 1.91 | 2.09 | 0.84 | 0.61 | 1.12 | 0.41 | 3.70 | 3.36 |
| En büyük | 2.42 | 3.05 | 1.19 | 0.87 | 1.67 | 0.50 | 5.60 | 4.44 |
| En küçük | 1.12 | 1.12 | 0.46 | 0.16 | 0.62 | 0.12 | 2.03 | 2.03 |
| Std. Sp. | 0.47 | 0.7 | 0.27 | 0.27 | 0.40 | 0.16 | 1.32 | 0.87 |
| Ortalama s | 0.0146 | 0.0170 | 0.0074 | 0.0022 | 0.0107 | 0.0014 | 0.0121 | 0.0104 |
| En büyük | 0.931 | 0.931 | 0.924 | 0.911 | 0.928 | 0.901 | 0.928 | 0.928 |
| En küçük | 0.00047 | 0.00047 | 0.00021 | 0.000046 | 0.00033 | 0.000027 | 0.00038 | 0.00038 |
| Std. Sp. | 0.0015 | 0.0045 | 0.0017 | 0.0004 | 0.0033 | 0.0001 | 0.0041 | 0.0016 |
| a | 0.508 | 0.508 | 0.515 | 0.529 | 0.514 | 0.533 | 0.511 | 0.511 |
| Ortalama m_{br} | 0.77 | 0.77 | 0.37 | 0.37 | 0.43 | 0.32 | 1.41 | 1.41 |
| Ortalama s_r | 0.00017 | 0.00017 | 0.00012 | 0.00008 | 0.00012 | 0.00007 | 0.00014 | 0.00014 |
| Ortalama a_r | 0.54 | 0.54 | 0.55 | 0.57 | 0.55 | 0.57 | 0.55 | 0.55 |

Tablo 3.48. Jeoteknik birimlere ait kaya kütle özellikleri

| | Jeoteknik birimler | | | | | | | |
|---------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | A1 | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | D1 |
| | Giriş Bölümü | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Çıkış Bölümü |
| ν | 0.23 | 0.23 | 0.40 | 0.46 | 0.26 | 0.31 | 0.39 | 0.39 |
| E_m (GPa) | 2.51 | 2.61 | 2.02 | 1.14 | 2.21 | 0.65 | 2.15 | 2.09 |
| σ_{cm} (MPa) | 2.21 | 2.34 | 3.61 | 1.72 | 3.53 | 0.67 | 3.87 | 3.66 |
| m_b | 1.91 | 2.09 | 0.84 | 0.61 | 1.12 | 0.41 | 3.70 | 3.36 |
| s | 0.0146 | 0.0170 | 0.0074 | 0.0022 | 0.0107 | 0.0014 | 0.0121 | 0.0104 |
| a | 0.508 | 0.508 | 0.515 | 0.529 | 0.514 | 0.533 | 0.511 | 0.511 |
| m_{br} | 0.77 | 0.77 | 0.37 | 0.37 | 0.43 | 0.32 | 1.41 | 1.41 |
| s_r | 0.00017 | 0.00017 | 0.00012 | 0.00008 | 0.00012 | 0.00007 | 0.00014 | 0.00014 |
| a_r | 0.54 | 0.54 | 0.55 | 0.57 | 0.55 | 0.57 | 0.55 | 0.55 |

3.7. Cankurtaran Tünelinin Ön Destek Tasarımı

Kaya kütle sınıflama sistemleri yeraltı açıklıklarının ön destek tasarımının yapılmasında yardımcı olmasına rağmen destekleme yapıldıktan sonra destek elemanlarının çevre kayacıyla olan etkileşiminin nasıl olacağıyla ilgili herhangi bir ön bilgi verememektedir. Bu nedenle, ampirik yöntemlerle belirlen destek elemanlarının tünelde oluşabilecek deformasyonları ve gerilmeleri ne ölçüde azalttığını belirlemek için güvenli bir tasarım açısından sayısal yöntemlerle desteklenmesi gereklidir. Bu çalışma kapsamında, kaya kütle sınıflama sistemleri kullanılarak jeoteknik birimlerde açılacak tünel için belirlenen ön destek tasarımı, sayısal analizlerle desteklenerek uygulanabilir destek elemanlarının neler olabileceği belirlenmeye çalışılmıştır.

3.7.1. Ampirik Destek Tasarımı

RMR sınıflama sistemi Tablo 3.49’da verilen kılavuzun kullanılmasıyla ön tasarım için uygun destek sistemlerinin seçimine olanak sağlamaktadır. Bu kılavuzun klasik delme ve patlatma yöntemlerinin uygulandığı kaya kütlelerinde, düşey gerilmenin 25 MPa’dan düşük olduğu ortamlarda inşa edilen, genişliği 10 m’ye kadar ve kesiti at nalı şeklinde olan tünellere uygulanabileceği dikkate alınmalıdır.

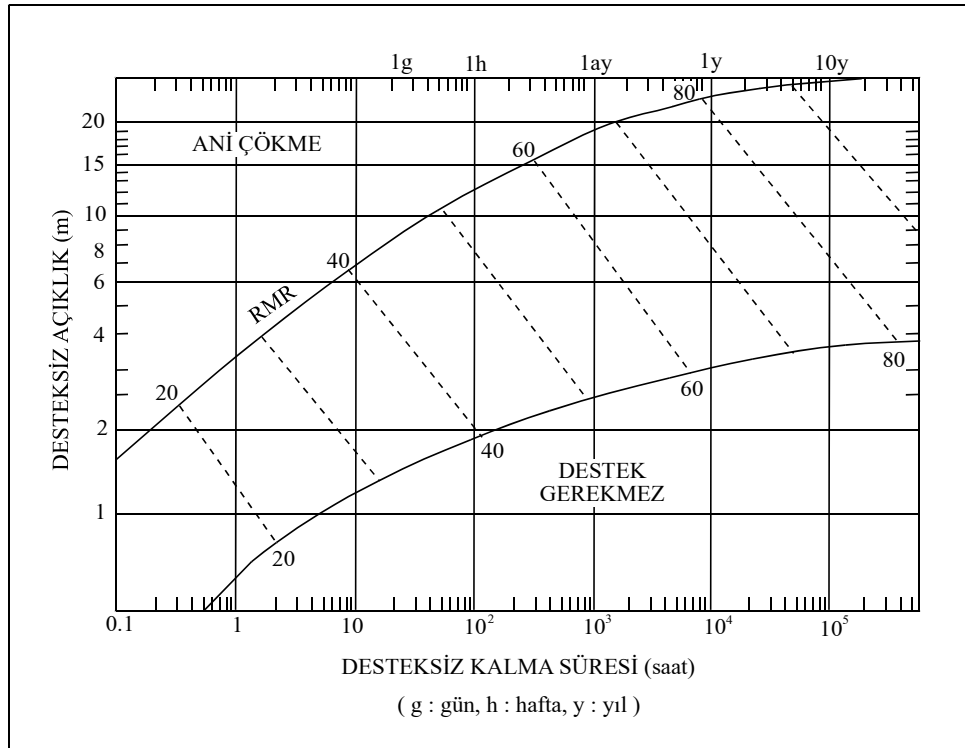
Cankurtaran Tüneli’nde uygulanması planlanan kazı genişliğinin 12 m ve kazı kesitinin modifiye at nalı şeklinde olacağı göz önüne alındığında, ön destek tasarımı için Tablo 3.49’da önerilen kılavuzun uygulanabilir olmadığı görülmektedir.

RMR puanı bilinen kaya kütlelerinde oluşturulacak yeraltı açıklıklarının belirli bir tavan genişliğine göre desteksiz durma sürelerinin tahmini amacıyla Şekil 3.37’de verilen abak kullanılmaktadır. Bu abak üzerinde jeoteknik birimlere ait düzeltilmiş RMR puanları, 12 m’lik tünel açıklığı göz önüne alınarak değerlendirildiğinde “ani çökme” riskiyle karşılaşılmasının olası olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.49. RMR sistemine göre tüneller kazıları ve destekleri için kılavuz (Bieniawski, 1989)

| Kaya Sınıf No | Kazı | Kaya bulonları* | Püskürtme beton | Çelik destek |
|---------------|--|---|---|---|
| I | Tam kesit, 3 m ilerleme | Bir miktar kaya bulonu haricinde genellikle destek gerektirmez | - | - |
| II | Tam kesit, 1.0-1.5 m ilerleme, komple destek. Aynaya 20 m mesafede | Kemerin her 2-3 m'sinde yer yer bulon, tel kafeslerle 2-2.5 m aralıklı | Gerektiğinde tavan kimerinde 50 mm | Yok |
| III | Tavan kimeri ve tabanda ilerleme. Tavandan 1.5-3 m ilerleme. Komple destek. Aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli | 3-4 m uzunlukta sistematik bulonlar, kimerde tel kafesli duvarlar ve kimerde 1.5-2 m aralıklı | Tavan kimerinde 50-100 mm ve yan duvarlarda 30 mm | Yok |
| IV | Tavan kimeri ve Tabandan ilerleme. Tavandan 1.0-1.5 m ilerleme. Kazıya uygun şekilde aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli tahkimat | Tel kafesli duvarlarda ve kimerde 1-1.5 m aralıklı, 4-5 m uzunlukta sistematik bulonlar | Tavan kimerinde 100-150 mm ve yan duvarlarda 100 mm | Gereken yerde 1.5m aralıklı yer yer hafif profiller |
| V | Tavan ve tabanda birlikte ilerleme. Tavandan 0.5-1 m ilerleme, kazıyla birlikte destek yerleştirilmeli. Patlamadan hemen sonra püskürtme beton uygulanmalı | Tel kafesli duvarlarda ve kimerde 1-1.5 m aralıklı, 5 m uzunlukta sistematik bulonlar. | Tavan kimerinde 150-200 mm, yan duvarlarda 150 mm, aynaya 50 mm | Çelik iksalı 0.75 m aralıklı orta-ağır profiller |

*20 mm çaplı tamamen reçine dolgulu
(Şekil: At nalı; İnşaat: Delme ve patlatma; Genişlik 10 m; Düşey gerilme < 25 MPa)



Şekil 3.37. Bieniawski (1989) tarafından önerilen desteksiz kalabilme süresini tahmin abağı

Q sistemine göre sınıflandırılan tünel kayalarının ön destek tasarımının yapılmasında “eş değer boyut” (De) değerinin bulunması gerekmektedir. Eş değer boyut, aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak belirlenmektedir.

$$Eş\ değer\ boyut\ (De) = \frac{En, \text{ çap veya yükseklik (m)}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} \quad (71)$$

Eşitlikteki ESR değeri, kazının türü, amacı ve yüzeyden derinliği ile ilgili olup, Tablo 3.50’den yararlanılarak saptanmaktadır.

Tablo 3.50. Değişik yeraltı kazıları için güncelleştirilmiş ESR değerleri (Barton ve Grimstad, 1994)

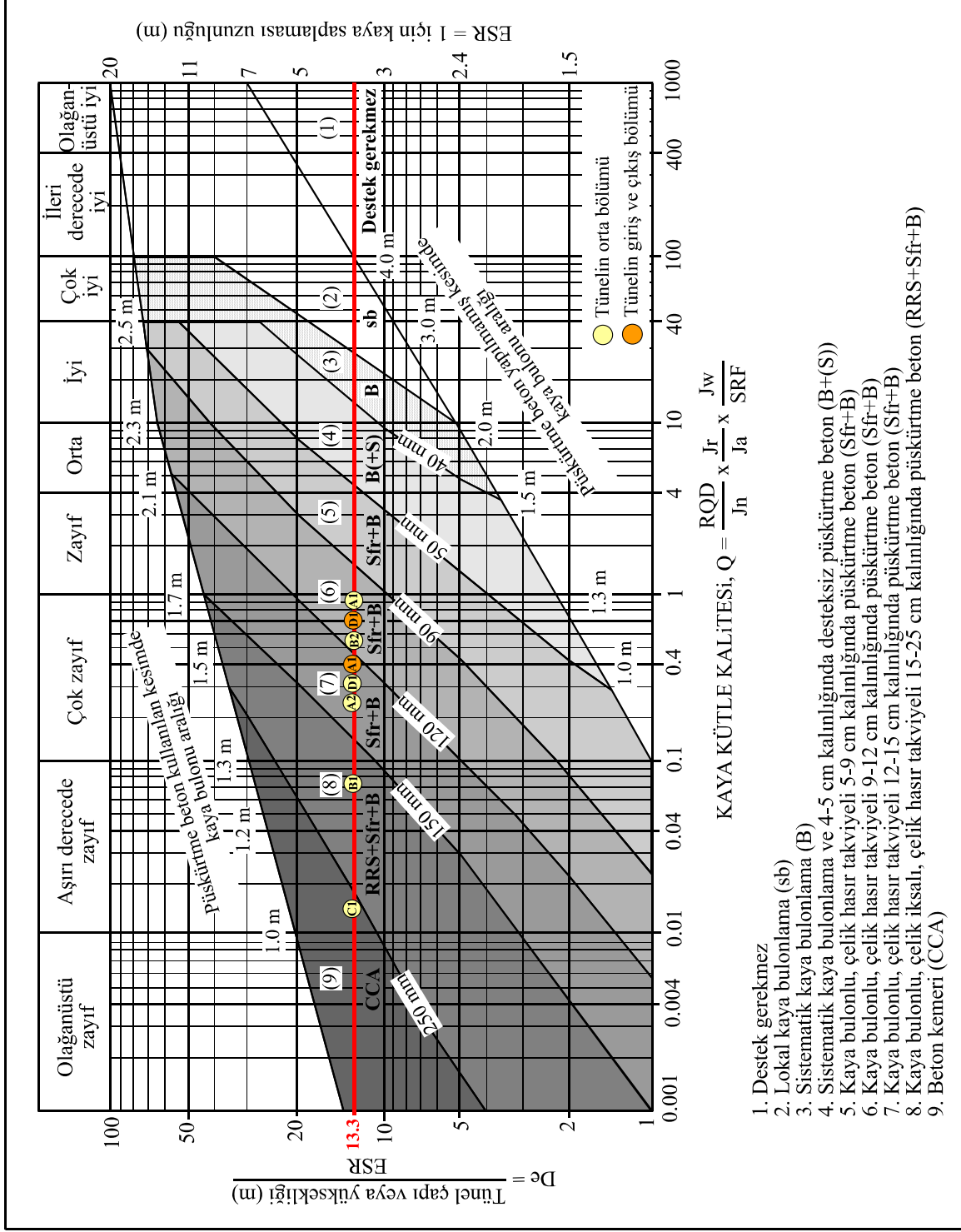
| Kazı Tipi | Güncelleştirilmiş ESR |
|--|-----------------------|
| A Geçici maden kazıları | 2-5 |
| B Düşey bacalar | |
| C Kalıcı maden kazıları, hidroelektrik santralleri, su tünelleri (yüksek basınçlı cebri borular hariç), deneme ve yaklaşım tünelleri | 1.6-2.0 |
| D Depolar, su tasfiye odaları, ufak yol ve demir yolları tünelleri | 1.2-1.3 |
| E Santral binası, ana yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, kapılar ve kesişme yerleri, tünel portalları ve kesişim yerleri | 0.9-1.1 |
| F Yeraltı nükleer santralleri, metro istasyonları, fabrikalar, spor ve sosyal tesisler | 0.5-0.8 |

De ve Q değerleri kullanılarak ön destek tasarımına ait kategoriler Şekil 3.38, 3.39’da verilen abaklar yardımıyla belirlenmektedir. Tünel duvarları için yapılacak ön destek tasarımında ise Grimstad ve Barton (1993) tarafından önerilen duvar faktörü (Q_w) kullanılmalıdır. Belirlenen Q değerleri, Tablo 3.51’de verilen katsayılar kadar arttırılarak Q_w değeri elde edilmektedir.

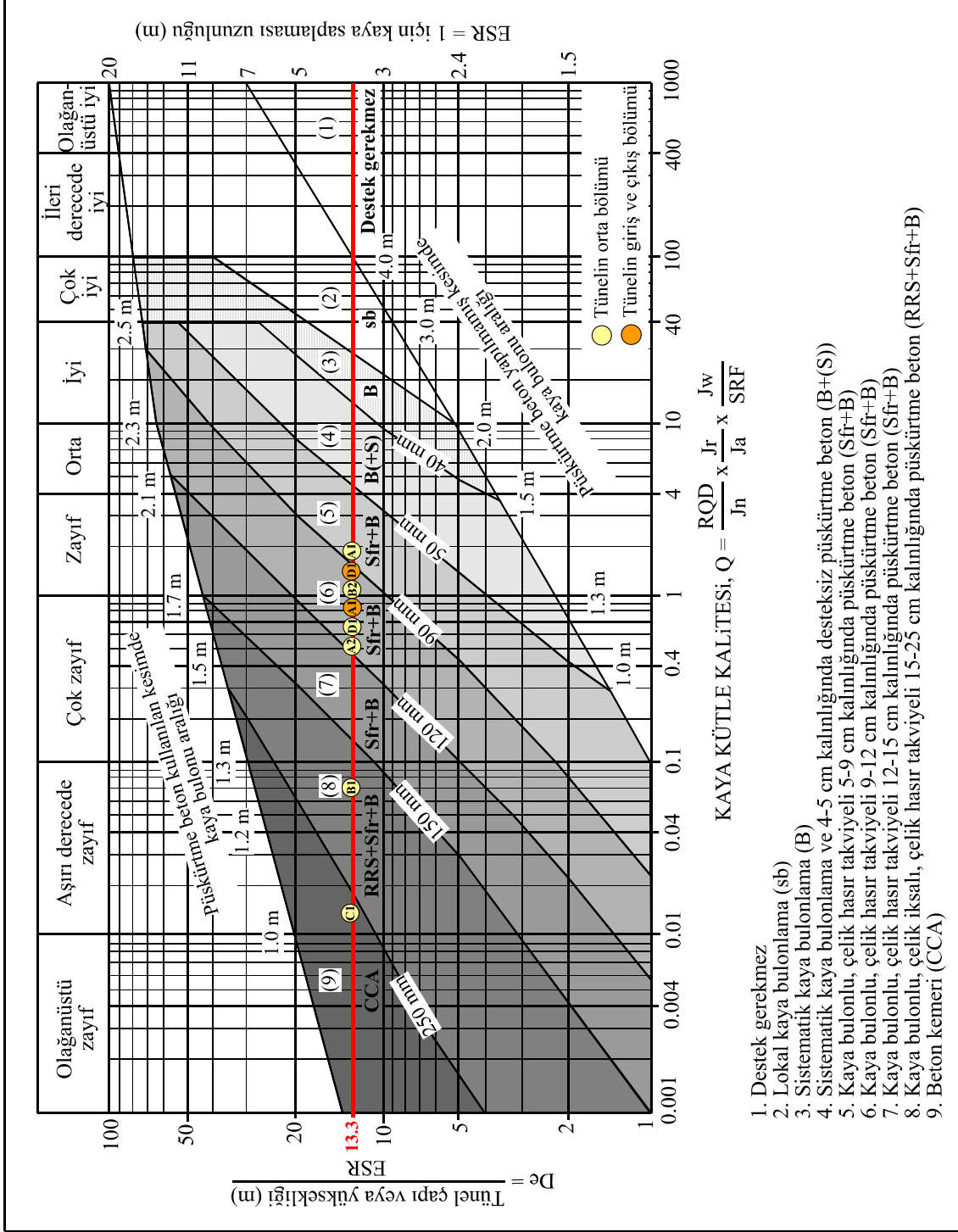
Tablo 3.51. Q kaya kütlesi niteliğine göre duvar faktörünün (Q_w) belirlenmesi (Grimstad ve Barton, 1993)

| Q Değeri | Duvar Faktörü (Q_w) |
|----------|-------------------------|
| >10 | 5 x Q |
| 0.1-10 | 2.5 x Q |
| <0.1 | Q |

Bu çalışma kapsamında, tünel tavanı için destek kategorisinin belirlenmesinde Q değerleri, duvarlar için ise Q_w değerleri kullanılmıştır. Şekil 3.38, 3.39’da verilen abaklar üzerinde jeoteknik birimler için belirlenen Q ve Q_w değerleri 12 m’lik tünel açıklığı ve seçilen ESR: 0.9 değeri göz önüne alınarak destek kategorileri belirlenmiştir.



Şekil 3.38. Jeoteknik birimlerde açılacak tünelin tavanı için önerilen destek kategorilerinin Q sistemi tünel destek abağı üzerinde gösterimi (Grimstad ve Barton, 1993)



Destek kategorilerinin belirlendiği Şekil 3.38, 3.39'daki abakta kaya bulonu uzunlukları verilmemiştir. Bulon uzunlukları kazı boyutuna bağlı olup, tavanda kullanılacak bulonların uzunluğu genellikle kazının enine, duvarlarda kullanılacak olanların ise kazının boyuna bağlıdır. Buna göre Barton vd. (1974), inşaat sırasında karşılaşılan duruma göre değiştirilmek koşuluyla tavanda ve duvarda kullanılacak bulonların uzunluklarının aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenebileceğini önermiştir.

$$L_{\text{tavan}} = 2 + (0.15B / ESR) \quad (72)$$

$$L_{\text{duvar}} = 2 + (0.15H / ESR) \quad (73)$$

Burada; L: bulon uzunluğu (m), B: kazı eni (m), H: kazı yüksekliği (m) ve ESR: kazı destek oranıdır.

Barton vd. (1974), Q değeri bilinen kaya kütlelerinde oluşturulacak en büyük desteksiz açıklığı bulmak için aşağıdaki eşitliği önermiştir.

$$B_{\text{max}} = 2(ESR)Q^{0.4} \quad (74)$$

Burada; B_{max} : en büyük desteksiz açıklık (m) ve ESR: kazı destek oranıdır.

RMi sistemine göre sınıflandırılan tünel kayalarının ön destek tasarımının yapılmasında “boyut oranı” (Sr) ve “zemin durumu faktörü” (Gc) değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Boyut oranı (Sr) ve zemin durumu faktörü (Gc) Palmström (2000) tarafından önerilen aşağıdaki eşitliklerle belirlenmektedir.

$$Sr = \left(\frac{Dt}{Db} \right) \left(\frac{Co}{Nj} \right) \quad (75)$$

$$Gc = RMi(SL.C.Gw.IL) \quad (76)$$

Burada; Dt: yeraltı kazısının genişliği (m), Db: blok çapı (m), Co: süreksizlik

yönelim faktörü, Nj: süreksizlik takım sayısı faktörü, SL: gerilme seviyesi, C: tavan/duvar faktörü, Gw: yeraltı suyu durumu ve IL: kaya kütle yapısının kenetlenme durumudur.

Süreksizlik yönelim faktörü (Co), süreksizlik takım sayısı faktörü (Nj), tavan/duvar faktörü (C), gerilme seviyesi (SL), yeraltı suyu durumu (Gw) ve kaya kütle yapısının kenetlenme durumu (IL) Tablo 3.52-3.57'den yararlanılarak belirlenmektedir.

Tablo 3.52. Süreksizlik yönelim faktörü - Co (Palmström, 2000)

| Duvarda | | Tavanda | Tanımlama | Co |
|----------------|----------------|--------------------------|-----------------|-----|
| *Doğrultu >30° | *Doğrultu <30° | Doğrultuya bakılmaksızın | | |
| Eğim<30° | Eğim<20° | Eğim >60° | Uygun | 1 |
| Eğim 30°-60° | Eğim 20°-45° | Eğim 45°-60° | Orta | 1.5 |
| Eğim >60° | Eğim 45°-60° | Eğim 20°-45° | Uygun değil | 2 |
| - | Eğim >45° | Eğim<20° | Hiç uygun değil | 3 |

** Süreksizlik doğrultusu tünel eksenine ile ilişkili olacak şekilde dikkate alınmalıdır*

Tablo 3.53. Süreksizlik takım sayısı faktörü - Nj (Palmström, 2000)

| Süreksizlik takım sayısı | Nj |
|---|------|
| Bir süreksizlik takımı | 3 |
| Bir süreksizlik takımı ve gelişigüzel eklemler | 2 |
| İki süreksizlik takımı | 1.5 |
| İki süreksizlik takımı ve gelişigüzel eklemler | 1.2 |
| Üç süreksizlik takımı | 1 |
| Üç süreksizlik takımı ve gelişigüzel süreksizlikler | 0.85 |
| Dört süreksizlik takımı | 0.75 |
| Dört süreksizlik takımı ve gelişigüzel süreksizlikler | 0.65 |

Tablo 3.54. Tavan/duvar faktörü - C (Palmström, 2000)

| Tavan/duvar faktörü | C |
|---------------------|-----|
| Yatay (tavan) | 1 |
| 30° dalımlı | 1.5 |
| 45° dalımlı | 2.2 |
| 60° dalımlı | 3 |
| Dikey (duvar) | 5 |

Tablo 3.55. Gerilme seviyesi - SL (Palmström, 2000)

| Gerilme seviyesi | Ortalama derinlik (m) | SL |
|------------------------------|-----------------------|-----|
| Çok düşük (Portallarda, vb.) | <10 | 0.1 |
| Düşük | 10-35 | 0.5 |
| Orta | 35-350 | 1 |
| Yüksek | >350 | 1.5 |

Tablo 3.56. Yeraltı suyu durumu - Gw (Palmström, 2000)

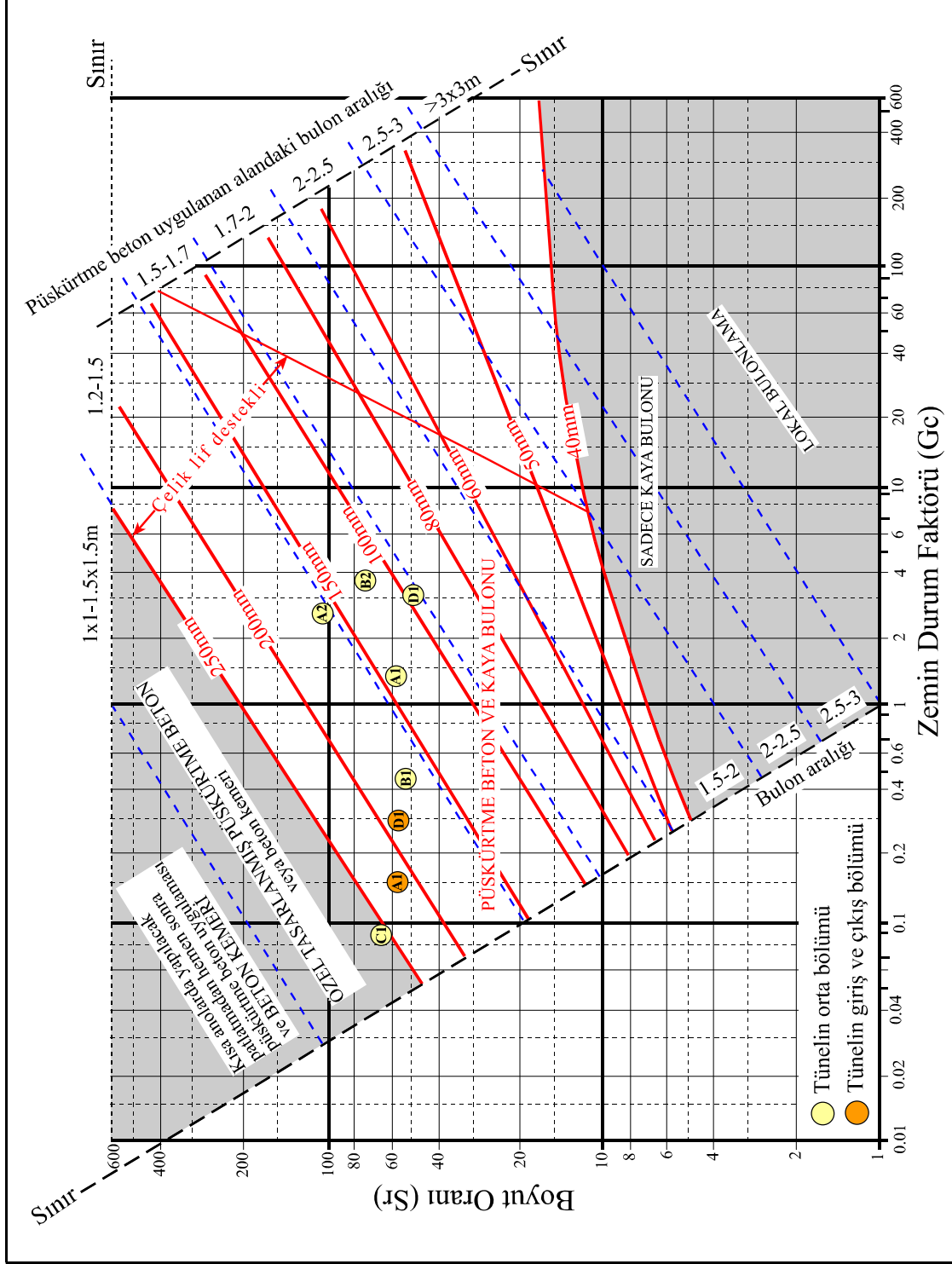
| Yeraltı suyu durumu | Gw |
|------------------------|-----|
| Kuru, nemli yada ıslak | 1 |
| Damlama | 2.5 |
| Su akışı | 5 |

Tablo 3.57. Kaya kütle yapısının kenetlenme durumu - IL (Palmström, 2000)

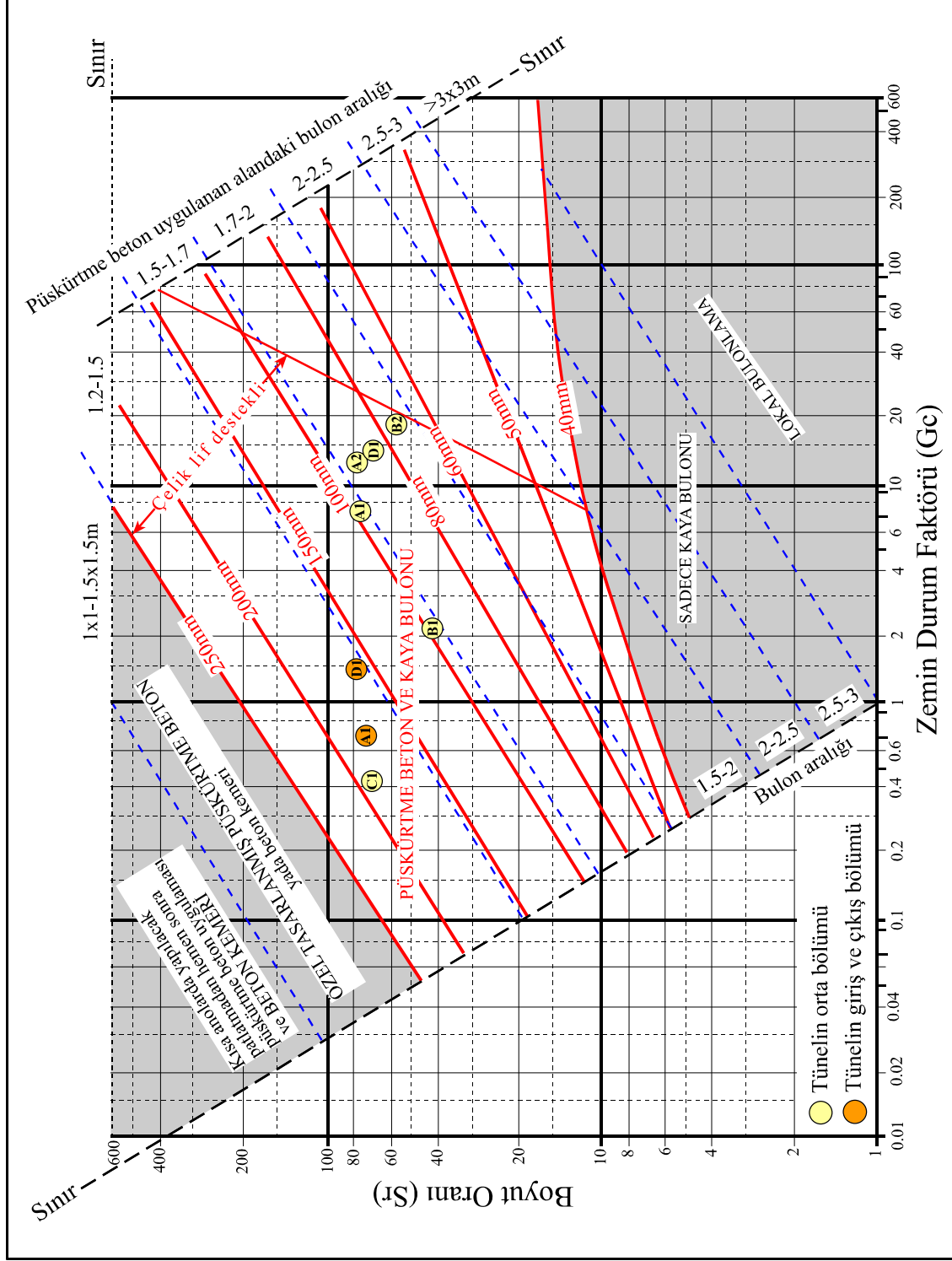
| Kaya kütle yapısının kenetlenme durumu | IL | |
|--|---|-----|
| Çok sıkı yapılı | Örselenmemiş kaya kütlesi, iyi kenetlenmiş | 1.3 |
| Sıkı yapılı | Birkaç süreksizlik takımı içeren örselenmemiş kaya kütlesi | 1 |
| Örselenmiş / açık | Şekilsiz bloklar içeren kıvrımlanmış / faylanmış kaya kütlesi | 0.8 |
| Zayıf kenetlenmiş | Şekilsiz ve köşeli bloklar içeren kırıklı kaya kütlesi | 0.5 |

Sr ve Gc değerlerini kullanılarak Şekil 3.40, 3.41’de süreksizlik içeren kaya kütleleri için önerilen abak yardımıyla yeraltı kazılarının ön destek tasarımı yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, tünel tavanı ve duvarları için değişen “tavan/duvar faktörü” (C) ve “süreksizlik yönelim faktörü” (Co) değerlerine göre Şekil 3.40, 3.41’de verilen abak kullanılarak jeoteknik birimler için destek elemanları belirlenmiştir.

Sr ve Gc değerlerinin belirlenmesinde kullanılan jeoteknik birimlere ait R_{Mi} destek tasarımı belirleme parametreleri özet olarak Tablo 3.58’de verilmiştir.



Şekil 3.40. Jeoteknik birimlerde açılacak tünelin tavanı için önerilen destek kategorilerinin RMI sistemi tünel destek abağı üzerinde gösterimi (Palmström, 2000)



Şekil 3.41. Jeoteknik birimlerde açılacak tünelin duvarı için önerilen destek kategorilerinin RMI sistemi tünел destek abağı üzerinde gösterimi (Palmström, 2000)

Tablo 3.58. Tünel tavan ve duvarlarının ön destek tasarımı için Sr ve Gc değerlerinin belirlenmesinde kullanılan jeoteknik birimlere ait R_{Mi} destek tasarımı belirleme sistemi parametreleri

| | Jeoteknik birimler | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | A1 | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | D1 |
| | Giriş Bölümü | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Orta Bölüm | Çıkış Bölümü |
| D _t (m) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| D _b (m) | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.54 | 0.37 | 0.42 | 0.37 | 0.37 |
| C _o tavan | 1.5 | 1.5 | 2 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| C _o duvar | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2 | 2 |
| N _j | 0.85 | 0.85 | 0.65 | 0.85 | 0.85 | 0.65 | 0.85 | 0.85 |
| S _r tavan | 57.23 | 57.23 | 99.79 | 52.22 | 76.31 | 66.71 | 52.46 | 57.23 |
| S _r duvar | 76.31 | 76.31 | 74.84 | 39.16 | 57.23 | 66.71 | 69.95 | 76.31 |
| SL | 0.1 | 1 | 1 | 1.5 | 1.5 | 1 | 1 | 0.1 |
| C _t tavan | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C _t duvar | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| G _w | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| IL | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.8 | 1 | 1 |
| R _{Mi} | 0.59 | 0.59 | 1.04 | 0.12 | 1.00 | 0.04 | 1.20 | 1.20 |
| G _c tavan | 0.15 | 1.47 | 2.61 | 0.44 | 3.76 | 0.09 | 3.01 | 0.30 |
| G _c duvar | 0.73 | 7.34 | 13.04 | 2.22 | 18.79 | 0.43 | 15.05 | 1.50 |

Destek elemanlarının belirlendiği Şekil 3.41, 3.42'deki abaklarda kaya bulonu uzunlukları verilmemiştir. Palmström (2000) tarafından yeraltı kazısının tavan açıklığına, duvar yüksekliği ve kaya kütleindeki blokların çapına bağlı olarak tavan ve duvar bulonlarının uzunluklarını belirlemeye yönelik aşağıdaki formüller önerilmiştir.

$$Lb_{tavan} = 1.4 + 0.16Dt(1 + 0.1/Db) \quad (77)$$

$$Lb_{duvar} = 1.4 + 0.08(Dt + 0.5Wt)(1 + 0.1/Db) \quad (78)$$

Burada; L_b: bulon uzunluğu (m), D_t: kazı eni (m), W_t: duvar yüksekliği (m) ve D_b: blok çapıdır (m).

R_{Mi} sistemine göre kaya kütleleri sınıflandırılırken süreksizliklerin özellikleri, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ve süreksizliklerle sınırlandırılmış blokların hacmi gibi yeraltı kazılarının duraylılığı üzerinde oldukça önemli rol oynayan parametreler dikkate alınırken, Q sisteminde ise sadece süreksizliklerin özellikleri göz önüne alınmaktadır. Ayrıca, Q sisteminde kaya bulonlarının uzunluğunu belirlemek için

Tablo 3.60. Jeoteknik birimler için Q ve RMI sistemlerine göre ön destekleme elemanları

| <i>Q sistemine göre ön destekleme elemanları</i> | | |
|--|--------------|--|
| A1 | Giriş bölümü | Tavanda 1.3–1.5 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=4$ m uzunluğunda, duvarda 1.5–1.7 m aralıklı $L_{\text{duvar}}=3.5$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, çelik hasır takviyeli, tavanda 12-15 cm duvarda 9–12 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B) |
| | Orta bölüm | Tavanda 1.5–1.7 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=4$ m uzunluğunda, duvarda 1.7–2.1 m aralıklı $L_{\text{duvar}}=3.5$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, çelik hasır takviyeli, tavanda 9-12 cm duvarda 5–9 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B) |
| A2 | Orta bölüm | Tavanda 1.3–1.5 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=4$ m uzunluğunda, duvarda 1.5–1.7 m aralıklı $L_{\text{duvar}}=3.5$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, çelik hasır takviyeli, tavanda 12-15 cm duvarda 9–12 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B) |
| B1 | Orta bölüm | Tavanda, duvarda ve tabanda 1.2–1.3 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=4$ m $L_{\text{duvar}}=3.5$ m $L_{\text{taban}}=3.5$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, çelik ıksalı, çelik hasır takviyeli, 15–25 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+RRS+B) |
| B2 | Orta bölüm | Tavanda ve duvarda 1.5–1.7 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=4$ m $L_{\text{duvar}}=3.5$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, çelik hasır takviyeli, 9–12 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B) |
| C1 | Orta bölüm | Tavanda, duvarda ve tabanda 1.0–1.2 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=4$ m $L_{\text{duvar}}=3.75$ m $L_{\text{taban}}=3.75$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, beton kemeri (CCA) |
| D1 | Orta bölüm | Tavanda ve duvarda 1.5–1.7 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=4$ m $L_{\text{duvar}}=3.5$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, çelik hasır takviyeli, 9–12 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B) |
| | Çıkış bölümü | Tavanda 1.3–1.5 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=4$ m uzunluğunda, duvarda 1.5–1.7 m aralıklı $L_{\text{duvar}}=3.5$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, çelik hasır takviyeli, tavanda 12-15 cm duvarda 9–12 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B) |
| <i>RMI sistemine göre ön destekleme elemanları</i> | | |
| A1 | Giriş bölümü | Tavanda ve duvarda 1.2–1.5 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=3.84$ m $L_{\text{duvar}}=2.77$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, tavanda 20–25 cm duvarda 15–20 cm kalınlığında çelik lifli püskürtme beton |
| | Orta bölüm | Tavanda ve duvarda 1.5–1.7 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=3.84$ m $L_{\text{duvar}}=2.77$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, tavanda 10–15 cm duvarda 8–10 cm kalınlığında çelik lifli püskürtme beton |
| A2 | Orta bölüm | Tavanda 1.2–1.5 m duvarda 1.7–2 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=3.84$ m $L_{\text{duvar}}=2.77$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, tavanda 15–20 cm duvarda 8–10 cm kalınlığında çelik lifli püskürtme beton |
| B1 | Orta bölüm | Tavanda 1.2–1.5 m duvarda ve tabanda 1.5–1.7 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=3.68$ m $L_{\text{duvar}}=2.68$ m $L_{\text{taban}}=2.68$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, tavanda 15–20 cm duvarda ve tabanda 8–10 cm kalınlığında çelik lifli püskürtme beton |
| B2 | Orta bölüm | Tavanda 1.5–1.7 m duvarda 1.7–2 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=3.84$ m $L_{\text{duvar}}=2.77$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, tavanda 10–15 cm duvarda 6-8 cm kalınlığında çelik lifli püskürtme beton |
| C1 | Orta bölüm | Tavanda 1-1.5 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=3.78$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, özel tasarlanmış püskürtme beton yada beton kemeri, duvarda ve tabanda 1.2–1.5 m aralıklı $L_{\text{duvar}}=2.74$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, 15–20 cm kalınlığında çelik lifli püskürtme beton |
| D1 | Orta bölüm | Tavanda 1.5–1.7 m duvarda 1.7–2 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=3.84$ m $L_{\text{duvar}}=2.77$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, tavanda ve duvarda 8–10 cm kalınlığında çelik lifli püskürtme beton |
| | Çıkış bölümü | Tavanda ve duvarda 1.2–1.5 m aralıklı $L_{\text{tavan}}=3.84$ m $L_{\text{duvar}}=2.77$ m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, tavanda 20–25 cm duvarda 15–20 cm kalınlığında çelik lifli püskürtme beton |

Belirli bir destek ve kazı işlemine bağımlı olmayan NATM sisteminin tünel destekleme tasarımında Q ve RMR sınıflamalarıyla birlikte kullanılması daha sağlıklı verilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Jeoteknik birimler için NATM'a göre yapılan ön destek tasarımında güvenli tarafta kalmak için Q değerlerini kullanmak daha avantajlıdır. NATM ile birlikte değerlendirilen RMR değerlerine göre; A1 jeoteknik birimi "B₂", A2,

B1, B2 ve D1 jeoteknik birimleri “B₃”, C1 jeoteknik birimi “C₁” olarak sınıflandırılmıştır. Q değerlerine göre ise A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimleri “B₃”, B1 jeoteknik birimi “C₁”, C1 jeoteknik birimi “C₃” olarak sınıflandırılmıştır. Jeoteknik birimler için NATM’a göre önerilen destek elemanları Tablo 3.61’de yer almaktadır.

Tablo 3.61. Jeoteknik birimler için NATM kaya kütle sınıflamasına göre önerilen ön destek elemanları

| | Jeoteknik birimler | | | | | | | |
|--|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | A1 | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | D1 |
| | Giriş bölümü | Orta bölüm | Orta bölüm | Orta bölüm | Orta bölüm | Orta bölüm | Orta bölüm | Çıkış bölümü |
| NATM (RMR sistemine göre) | B ₂ | B ₂ | B ₃ | B ₃ | B ₃ | C ₁ | B ₃ | B ₃ |
| Tanımlama (ÖNORM B 2203, 1994) | Çok kırılğan | Çok kırılğan | Döküntülü | Döküntülü | Döküntülü | Kaya patlamalı | Döküntülü | Döküntülü |
| NATM (Q sistemine göre) | B ₃ | B ₃ | B ₃ | C ₁ | B ₃ | C ₃ | B ₃ | B ₃ |
| Tanımlama (ÖNORM B 2203, 1994) | Döküntülü | Döküntülü | Döküntülü | Kaya patlamalı | Döküntülü | Çok baskılı | Döküntülü | Döküntülü |
| <i>NATM’a göre B₂ sınıfı için destek elemanları</i> | | | | | | | | |
| Tünel tavan ve duvarlarında sistematik destekleme gereklidir. Gerekliğinde tavanda süren kullanılacaktır. | | | | | | | | |
| <i>NATM’a göre B₃ sınıfı için destek elemanları</i> | | | | | | | | |
| Tünel tavanı ve yan duvarlarda, aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik destekleme gerekmektedir. Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir. Sistematik çelik iksa kullanılacaktır. Jeolojik şartlara göre üst yarı aynasından 100-150 m’den daha geride olmamak üzere yerinde dökme bir taban kemeri betonu yapmak gerekebilir. | | | | | | | | |
| <i>NATM’a göre C₁ sınıfı için destek elemanları</i> | | | | | | | | |
| Destekleme elemanları olarak kısa ama sık yerleştirilmiş kaya bulonları ve çelik hasır gereklidir. Ek tedbir olarak kaya külesindeki basıncı azaltıcı delikler açılabilir. Bu yöntemle kaya patlamaları da önlenir. Jeolojik şartlara göre üst yarı aynasından 100-150 m’den daha geride olmamak üzere yerinde dökme bir taban kemeri betonu yapmak gerekebilir. | | | | | | | | |
| <i>NATM’a göre C₃ sınıfı için destek elemanları</i> | | | | | | | | |
| Tünel kesit çevresinde sistematik destekleme yapılmalıdır. Tavanda süren boru uygulanmalıdır. Üst yarı kazısında geçici ring yapıları gerekebilir. | | | | | | | | |

3.7.2. Sayısal Destek Tasarımı

Bu bölümde, jeoteknik birimlere ait jeoteknik ve jeomekanik parametreler kullanılarak tünel kazısı esnasında oluşan ikincil gerilmelerin dağılımları, kazı etrafındaki deformasyonlar ve kaya kütleleri ile örtüşen uygun destek sistemleri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminde herhangi bir ortam, sonlu eleman denilen parçacıklara bölünmektedir. Elemanlar birbirine düğüm noktaları denilen köşe noktalarında

bağlanmaktadır. Eleman içindeki gerçek deplasman değişimi bazı basit fonksiyonlar (genellikle polinomlar) seçilerek düğüm noktalarındaki değerler cinsinden yaklaşık olarak ifade edilir. Düğüm noktalarındaki ve sonradan bulunması gereken deplasman bileşenlerine ise serbestlik derecesi adı verilmektedir. Yöntemde, önce bir eleman için davranış denklemleri kullanılarak düğüm noktalarının deplasmanları hesaplanır. Tüm yapının davranış denklemleri ise yapıyı oluşturan elemanların denge denklemlerinin, elemanlar arasındaki deplasman sürekliliği sağlayacak şekilde toplanması ile bulunur. Elde edilen bu denklemler, bilinen deplasman sınır şartlarını sağlayacak şekilde değiştirildikten sonra ortaya bilinmeyen değişkenleri deplasmanlar olan bir lineer cebirsel denklem takımı çıkar. Denklem takımının çözümü ile de düğüm noktalarındaki deplasmanlar hesaplanmış olur. Yapıda oluşan şekil değiştirme ve gerilme bileşenleri ise hesaplanan deplasman değerlerinden, sonradan türev almak suretiyle elde edilirler.

Bu çalışmada, Rocscience (2008) tarafından geliştirilen “Phase² v7.0” (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Phase² programı, “Hibrit elemanlar yöntemi” (Sınır elemanlar ve sonlu elemanlar yönteminin karmasından oluşan sayısal yöntem) ile modellenen tünel-zemin sisteminde, kazı ve destekleme yöntemine uygun olarak değişen ardışık gerilme dağılımlarının incelenmesine olanak sağlamaktadır. Modellemeler ve analizler, tünel kazı aşaması ve destek sistemi uygulaması sırasında meydana gelebilecek en elverişsiz durumlarla karşı karşıya kalınacağı hesaba katılarak yapılmıştır. Buldukları NATM kaya sınıfından dolayı A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimlerinde 12 m genişliğinde, 9 m yüksekliğinde üst yarı ve alt yarı kazı modeli, B1 ve C1 jeoteknik birimlerinde ise 10.5 m yüksekliğinde üst yarı, alt yarı ve taban kazı modeli uygulanarak 18 m mesafeli çift tüp kazı kesitleri oluşturulmuştur (Şekil 3.42). Jeoteknik birimler için yapılan modellemede detay analiz için kazı etrafında hassas zonlama yapılmış ve üç düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlar kullanılmıştır.

Tünelin giriş bölümünde A1, çıkış bölümünde D1 jeoteknik birimi bulunmakta olup, diğer jeoteknik birimler ise tünel güzergahının orta bölümünde yer almaktadır. Ayrıca, tünelin giriş bölümünde bulunan A1 jeoteknik birimi küçük bir antiklinalle tünel güzergahının orta kısmında tekrar yüzeylenmektedir. Bunun haricinde, Nogohe Tepe civarında faylı olarak yüzeye çıkan Subaşı Sırtı Formasyonu’na ait birimlerde yapılan YSK-6 nolu araştırma sondajında da tünel kotu seviyesinde A1 jeoteknik birimine ait piroklastik kayalar kesilmiştir. A1 jeoteknik biriminde açılacak tünelin üstündeki en

büyük örtü yüksekliği giriş bölümünde yaklaşık olarak 50 m, orta bölümünde 320 m, Nogohe Tepe civarında 280 m; A2 jeoteknik biriminde 100 m; B1 jeoteknik biriminde 410 m; B2 jeoteknik biriminde 520 m; C1 jeoteknik biriminde 80 m; D1 jeoteknik biriminde açılacak tünelin çıkış bölümünde 50 m, orta bölümünde ise 120 m civarındadır.

Cankurtaran Tünel güzergahında bulunan fay zonlarında temel sondaj kuyuları açılmadığı için buradaki kaya kütlelerine ait mühendislik özelliklerin tünel kazı derinliğinde nasıl değiştiği belirlenememiştir. Bu sebeple, fay zonları için ön destek tasarımı yapılamamıştır. Bu zonların kazı esnasında yerinde yapılacak jeoteknik çalışmalara göre desteklenmesi tünelin duraylılığının sağlanması açısından daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Nogohe Tepe civarında tünel güzergahını kesen düşey faylar, şuan için pasif durumdadır. Bu bölgedeki kayalar parçalanmış ve ezilmiş olduğundan haliyle kaya kütlelerinin özelliği de değişmiş olacaktır. Bu nedenle, fay zonundaki malzemenin davranışı kayadan çok zemin özelliğinde olduğundan, bu zonlarda aşırı sökülme fazla, kemerlenme ise az olacaktır. Kazı işleminin ilerletilmesi ile ayna ilerisindeki fay zonlarının belirlenmesi açısından belirli aralıklarla deformasyon ölçümleri alınmalıdır. Bu zonlar uygun kazı yöntemi ile kazılarak, destekleme elemanları gecikmeden yerleştirilmelidir.

Cankurtaran Tüneli'nin güzergahı, Kordon Tepe Antiklinali'nin sağ kanadında yer almaktadır. Tünel güzergahı, orta kısımlara doğru kavis yaparak antiklinalin eksenine doğru yaklaşmaktadır (Şekil 3.2). Antiklinallerin eksen yerlerinde, tünelin tavanına gelen basınç az, buna karşın kanatlarda ise fazladır. Bu nedenle, kanatlarda açılan tünelin duvarlarına asimetrik basınçlar geleceğinden buralarda aşırı sökülmenin gelişmesi olasıdır. Antiklinalin eksenine doğru yaklaştıkça ise kemerlenmeden dolayı tavan basıncı azalacaktır. Kordon Tepe Antiklinali'nin eksenine yakın kısımda, B2 jeoteknik birimi yer aldığından bu birimde yapılacak desteklemenin üzerine gelen basınç az olacak ve kemerlenmeden dolayı tünelin duraylılığına olumlu yönde katkıda bulunacaktır.

Sayısal analizler için oluşturulan modellerin üst kısımları, örtü yüksekliği göz önüne alınarak sınırlandırılmıştır. Kazı etrafında oluşacak plastik zonun genişliğini ve yenilen sonlu elemanları belirlemek için yapılan analizlerde, Hoek vd. (2002) tarafından önerilen yenilme kriterinden yararlanılmıştır.

Tünelin açılacağı derinlikte oluşacak düşey gerilme (σ_v) miktarı, örtü yüküne bağlı olarak derinlikle birlikte arttığı kabulünden yola çıkarak Fenner (1938) tarafından aşağıda önerilen eşitlik yardımıyla belirlenmiştir.

$$\sigma_v = \gamma.H \quad (79)$$

Burada; γ : birim hacim ağırlık (MN/m^3) ve H: örtü yükü kalınlığıdır (m).

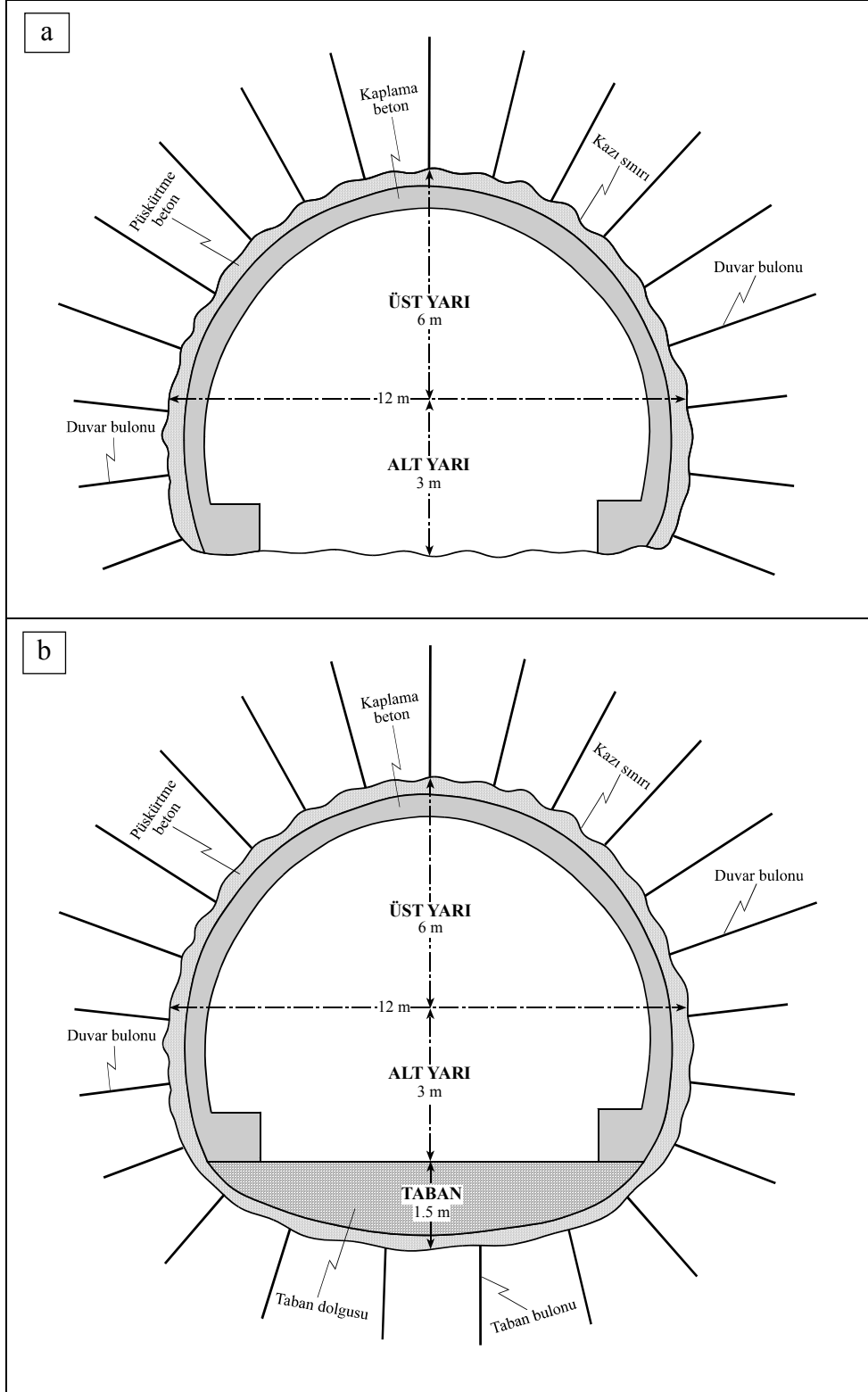
Örselenmemiş yatay gerilme (σ_h) miktarını ölçmek oldukça zordur. Yatay gerilme, sığ derinliklerde oldukça değişkendir ve derinlere inildikçe hidrostatik olarak artma eğilimindedir. Bu çalışmada, tünelin açılacağı derinlikte oluşacak yatay gerilme miktarını belirlemek için Sheorey vd. (2001) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır.

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \frac{\beta E_m G}{1-\nu} (H + 1000) \quad (80)$$

Burada; β : lineer ısı genleşme katsayısı ($8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), G: jeotermik gradyan (0.024°C/m), ν : kaya kütleinin poisson oranı, H: örtü yükü kalınlığı (m) ve E_m : kaya kütleinin deformasyon modülüdür (GPa).

Cankurtaran Tünel Projesi'nin bulunduğu bölgede, yıkıcı özellikte deprem oluşturacak herhangi bir aktif fay zonu mevcut değildir. Ancak, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nda (KAF) ve Erzurum Fay Zonu'nda meydana gelen güçlü depremlerin zayıf yansımaları bölgede hissedilmektedir. Proje alanı, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın "Türkiye Deprem Haritası" değerlendirmelerine göre 4. derece deprem bölgesinde yer almaktadır ve bölgede beklenen ivme değeri ise 0.10-0.20 g arasındadır. Bu nedenle, analiz modellerine yatay yer ivmesi 0.20 g olacak şekilde ek sismik yük eklenerek deprem etkisi de dikkate alınmıştır.

Phase² programı ile tünel modellemesi iki ayrı aşamada yapılmıştır. İlk aşamada kazı yapıldıktan sonra tünel etrafında gelişen ikincil gerilme dağılımları, yenilme noktaları (makaslama ve çekme gerilmesi) ve yer değiştirmeler belirlenmiştir. İkinci aşamada ise jeoteknik birimler için Q ve R_{Mi} sistemlerine göre önerilmiş ön destek tasarımı kazı modelinde uygulanmıştır. Bu destek elemanlarının deformasyonları ne ölçüde azalttıkları belirlenerek destek elemanlarının uygulanabilirlikleri araştırılmıştır.



Şekil 3.42. A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimlerinde (a) ve B1 ve C1 jeoteknik birimlerinde (b) uygulanacak tünel kazı kesitleri

Modellerde kullanılan destek elemanlarının özellikleri Tablo 3.60'da, analizlerde kullanılan jeoteknik birimlere ait özellikler Tablo 3.62'de, destek elemanı olarak kullanılan püskürtme beton, bulon, çelik hasır ve çelik iksaya ait KGM (2006) teknik şartnamesinde verilen sınır karakteristik değerler ise Tablo 3.63'de özet olarak sunulmuştur.

Tablo 3.62. Sayısal analizlerde kullanılan jeoteknik birimlere ait özellikler

| | Jeoteknik birimler | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | A1 | A1 | A1 | A2 | B1 | B2 | C1 | D1 | D1 |
| | Giriş bölümü | Orta bölüm | Nogohe Tepe civarı | Orta bölüm | Orta bölüm | Orta bölüm | Orta bölüm | Orta bölüm | Çıkış bölümü |
| Malzeme türü | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik |
| ν | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.40 | 0.46 | 0.26 | 0.31 | 0.39 | 0.39 |
| σ_{ci} (MPa) | 27.12 | 27.12 | 27.12 | 72.79 | 55.05 | 55.05 | 26.19 | 60.98 | 60.98 |
| σ_{cm} (MPa) | 2.21 | 2.34 | 3.61 | 1.72 | 3.53 | 0.67 | 3.87 | 3.66 | 2.21 |
| E_m (GPa) | 2.51 | 2.61 | 2.61 | 2.02 | 1.14 | 2.21 | 0.65 | 2.15 | 2.09 |
| γ (kN/m ³) | 25.78 | 25.78 | 25.78 | 22.97 | 24.62 | 22.73 | 22.73 | 24.73 | 24.73 |
| m_i | 13 | 13 | 13 | 7 | 8 | 8 | 7 | 25 | 25 |
| m_b | 1.91 | 2.09 | 2.09 | 0.84 | 0.61 | 1.12 | 0.41 | 3.70 | 3.36 |
| s | 0.0146 | 0.0170 | 0.0170 | 0.0074 | 0.0022 | 0.0107 | 0.0014 | 0.0121 | 0.0104 |
| a | 0.508 | 0.508 | 0.508 | 0.515 | 0.529 | 0.514 | 0.533 | 0.511 | 0.511 |
| m_{br} | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.37 | 0.37 | 0.43 | 0.32 | 1.41 | 1.41 |
| s_r | 0.00017 | 0.00017 | 0.00017 | 0.00012 | 0.00008 | 0.00012 | 0.00007 | 0.00014 | 0.00014 |
| a_r | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.55 | 0.57 | 0.55 | 0.57 | 0.55 | 0.55 |
| Dilatasyon | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° |
| σ_v (MPa) | 1.29 | 8.25 | 7.22 | 2.30 | 10.09 | 12.80 | 1.82 | 2.97 | 1.24 |
| σ_h (MPa) | 0.39 | 2.47 | 2.16 | 1.53 | 8.60 | 4.50 | 0.82 | 1.90 | 0.79 |

Tablo 3.63. Sayısal analizlerde kullanılan destek elemanlarına ait sınır karakteristik değerleri (KGM, 2006)

| Özellikler | Püskürtme beton | Kaya bulonu | Çelik iksa | Çelik hasır |
|--|------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| Elastisite modülü, E (GPa) | 20 | 200 | 200 | 200 |
| Poisson oranı, ν | 0.20 | - | 0.35 | 0.35 |
| Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa) | 20 | - | 400 | 500 |
| Artık tek eksenli basınç dayanımı, (MPa) | 3.5 | - | - | - |
| Çekme dayanımı, (MPa) | 3.1 | - | 500 | 500 |
| Artık çekme dayanımı, (MPa) | 0 | - | - | - |
| Çekme kapasitesi (MN) | - | 0.25 | - | - |
| Artık çekme kapasitesi (MN) | - | 0.025 | - | - |
| Tür | - | Ø28 mm, SN bulonu | I profil, 160x100 mm | Ø6.5 mm, 150x150 mm |

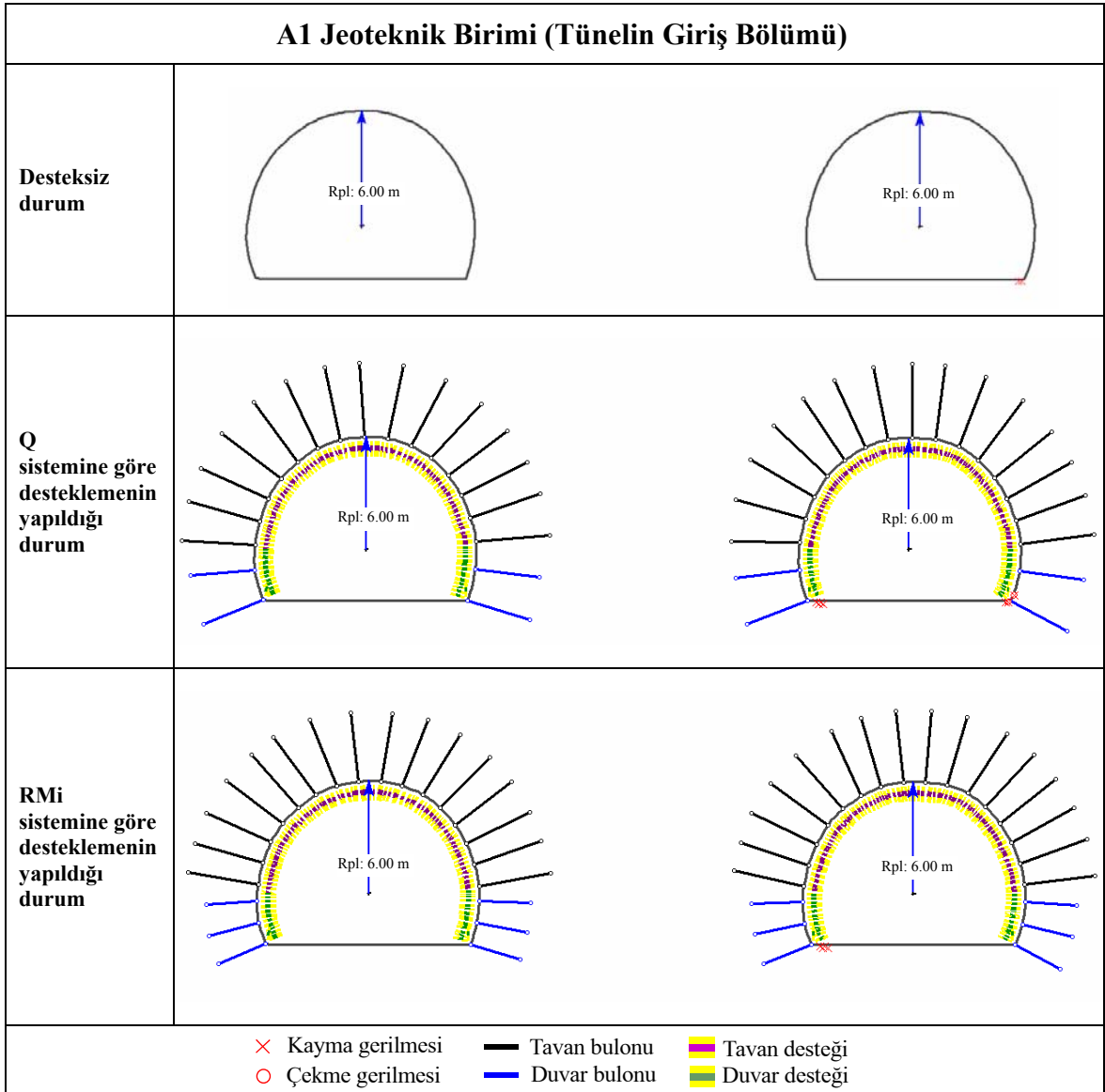
Sayısal analizlerle desteksiz durumlar için kazı kesiti etrafında kayma ve çekme gerilmesine bağlı olarak oluşacak plastik zonun genişliği belirlenmiş ve ampirik sistemlere göre belirlenen ön destek elemanlarının bu zonu ne ölçüde azalttığı araştırılmıştır (Şekil 3.43-3.51). Yapılan sayısal analizler sonucunda tünel kazı kesitinde gerilmelerin en çok tavanda ve tabanda yoğunlaştığı saptanmıştır. Tünelin giriş bölümündeki A1 jeoteknik birimi ile tünel güzergahının orta bölümündeki A2 ve C1 jeoteknik birimleri RMI sistemine göre; tünel güzergahının orta bölümündeki B1 jeoteknik birimi ile giriş ve çıkış bölümlerindeki D1 jeoteknik birimi ise Q sistemine göre desteklendiğinde plastik zonun destek zonunun içinde kaldığı ve duraylılık sorununun meydana gelmeyeceği tespit edilmiştir. Ancak, tünel portalları, jeoteknik birimlerin davranışının öğrenildiği kazının başlangıç noktası olması ve buralarda sıklıkla göçüklerin yaşanması sebebiyle tünelin en problemleri bölümleri olarak görülmektedir. Bu nedenle, duraylılığın sağlanması açısından güvenli tarafta kalmak amacıyla portallarda ek desteklemenin yapılması, iş güvenliği açısından faydalı olacaktır.

Cankurtaran Tüneli'nin giriş ve çıkış bölümlerinde başlatılan kazıyla şuan için sadece A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerinde belirli bir metreye kadar ilerlenilmiştir. Bu jeoteknik birimler, NATM'a göre B₃ sınıfı için önerilen destekleme elemanlarıyla desteklenmiştir. Destekleme elemanı olarak, tünelin tavan ve duvarında 1.5 m aralıklı çelik iksa destekli, çift kat çelik hasırlı 20 cm kalınlığında püskürtme beton ile 1.5x1.5 m aralıklı olacak şekilde tavanda ve duvarda 4 m uzunluğunda, omuzlarda ise 6 m uzunluğunda Ø28 mm çaplı sistematik kaya bulonları kullanılmıştır. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimleri için tünelde uygulanan destekleme elemanlarının yoğunluğu, Tablo 3.60'da Q ve RMI sistemlerine göre önerilen ön destekleme elemanlarından fazladır. A1 ve D1 jeoteknik birimlerinin tünelin portal kesimlerinde olduğu dikkate alındığında, duraylılığın sağlanması açısından yapılan destekleme ile güvenli tarafta kalındığı görülmektedir.

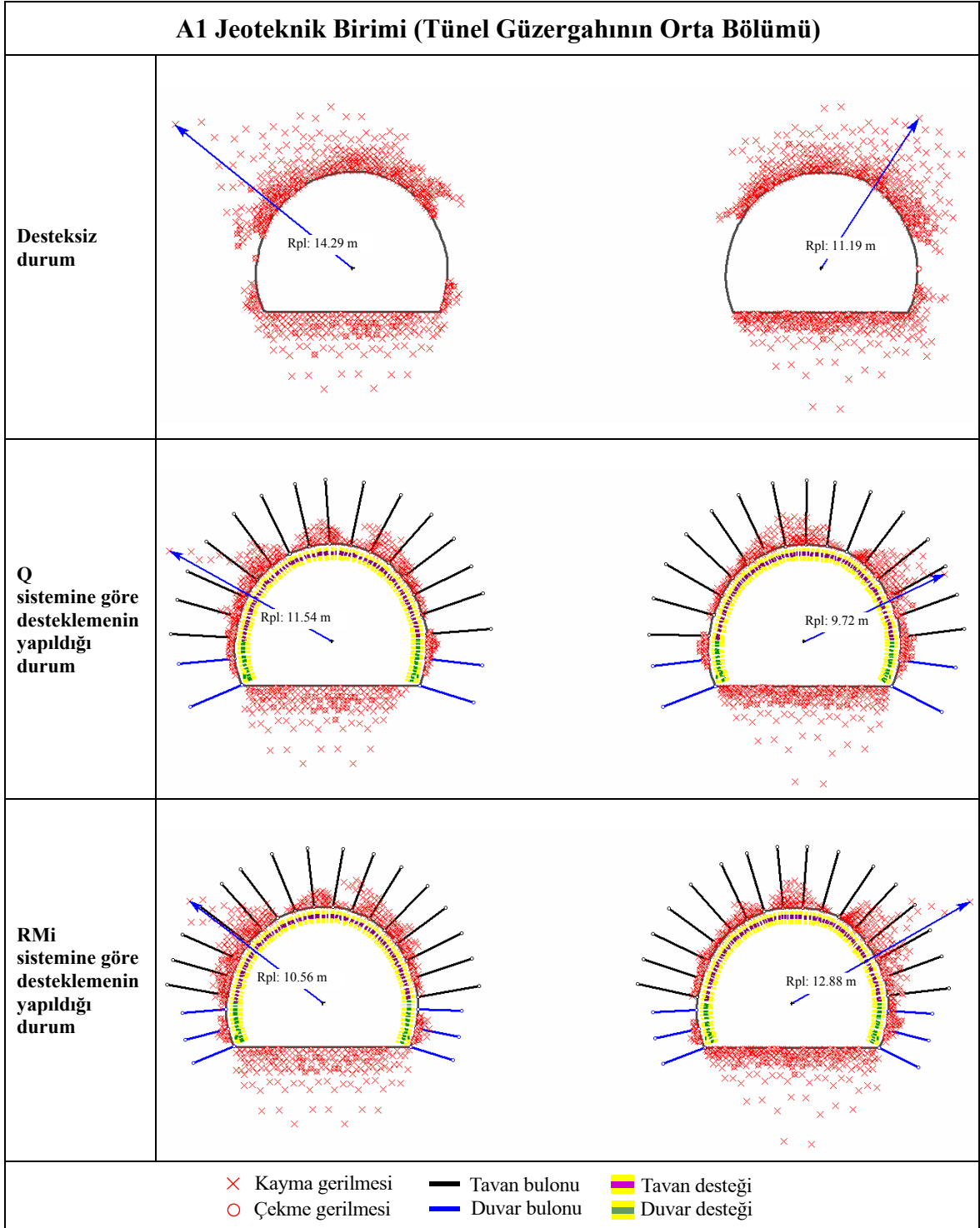
Destekleme sonrası duruma ait Tablo 3.64-3.68'de verilen toplam yerdeğiştirme değerlerinin oldukça düşük olmasına rağmen tünel güzergahının orta bölümü ve Nogohe Tepe civarında yüzeylenen A1 jeoteknik biriminde ve tünel güzergahının orta bölümde yüzeylenen B2 jeoteknik biriminde destekleme sonrası oluşan plastik zon, destek zonunun dışında kalmıştır. Bu bölümlerde kazı sonrası oluşan kayma ve çekme gerilmeleri, sol tüpün sol omuzunda, sağ tüpün ise sağ omuzunda yoğunlaşarak destek zonunu geçmiştir (Şekil 3.44, 3.45, ve 3.48). Bu bölümlerde duraylılık problemlerinin meydana gelme olasılığı yüksektir. Bu nedenle duraylılık sorunu beklenen bu bölümlerin doğru destek

elemanlarının belirlenmesi açısından yeniden analiz edilmesi gerekmektedir.

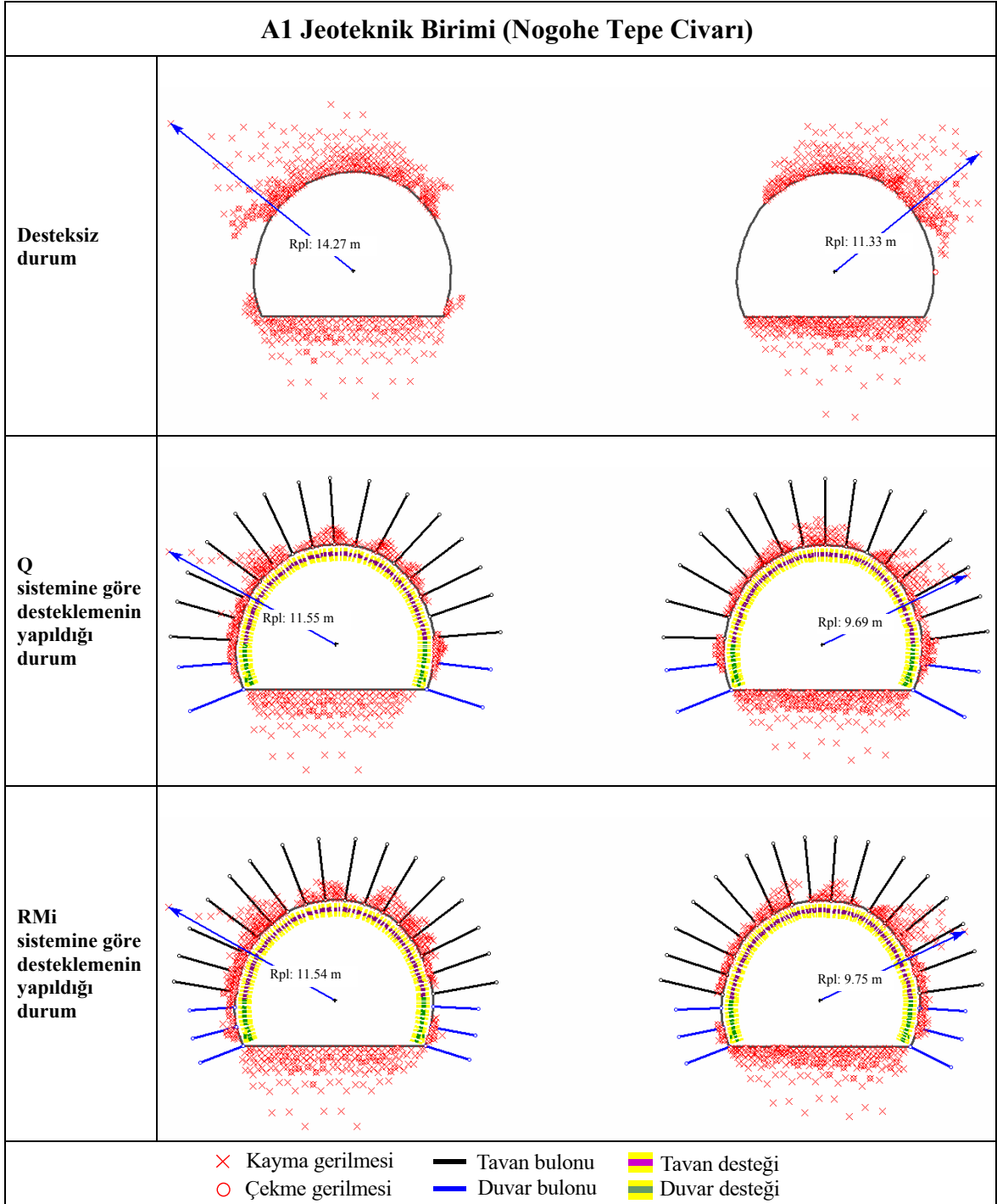
Yapılan sayısal analizler sonucunda, ampirik ön destek tasarımının derin yeraltı kazılarında deformasyonları azaltmada yeterli olmadığı ve sayısal analizlerle desteklenmesi gerektiği belirlenmiştir. Ayrıca, sayısal analizler için kullanılan girdi parametrelerinin, açılan az sayıdaki temel sondajlarından ve mostra ölçümlerinden elde edildiği ve kaya kütle özelliklerinin tünel kotunda daha iyi olabileceği göz ardı edilmemelidir.



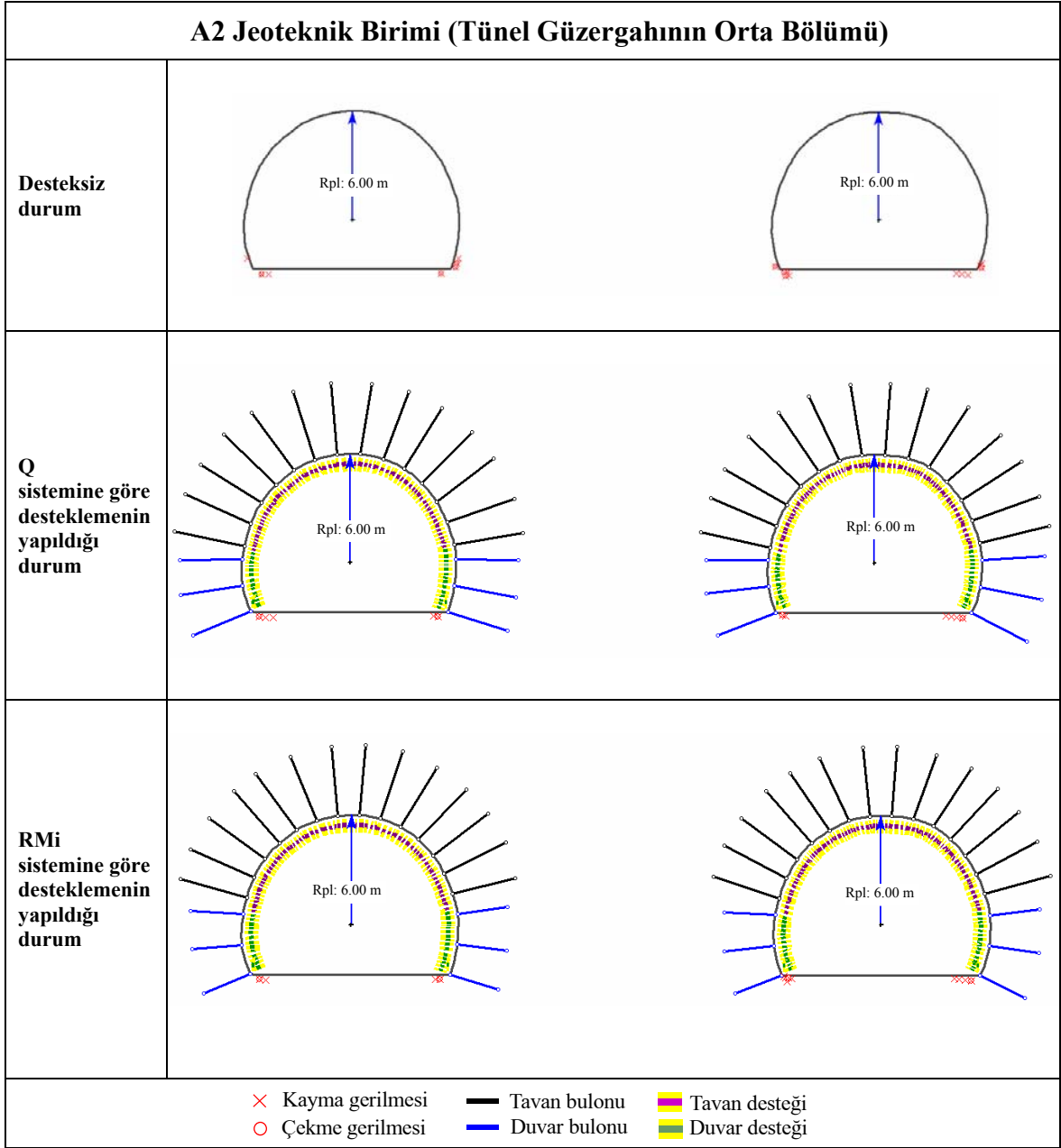
Şekil 3.43. Giriş bölümdeki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği



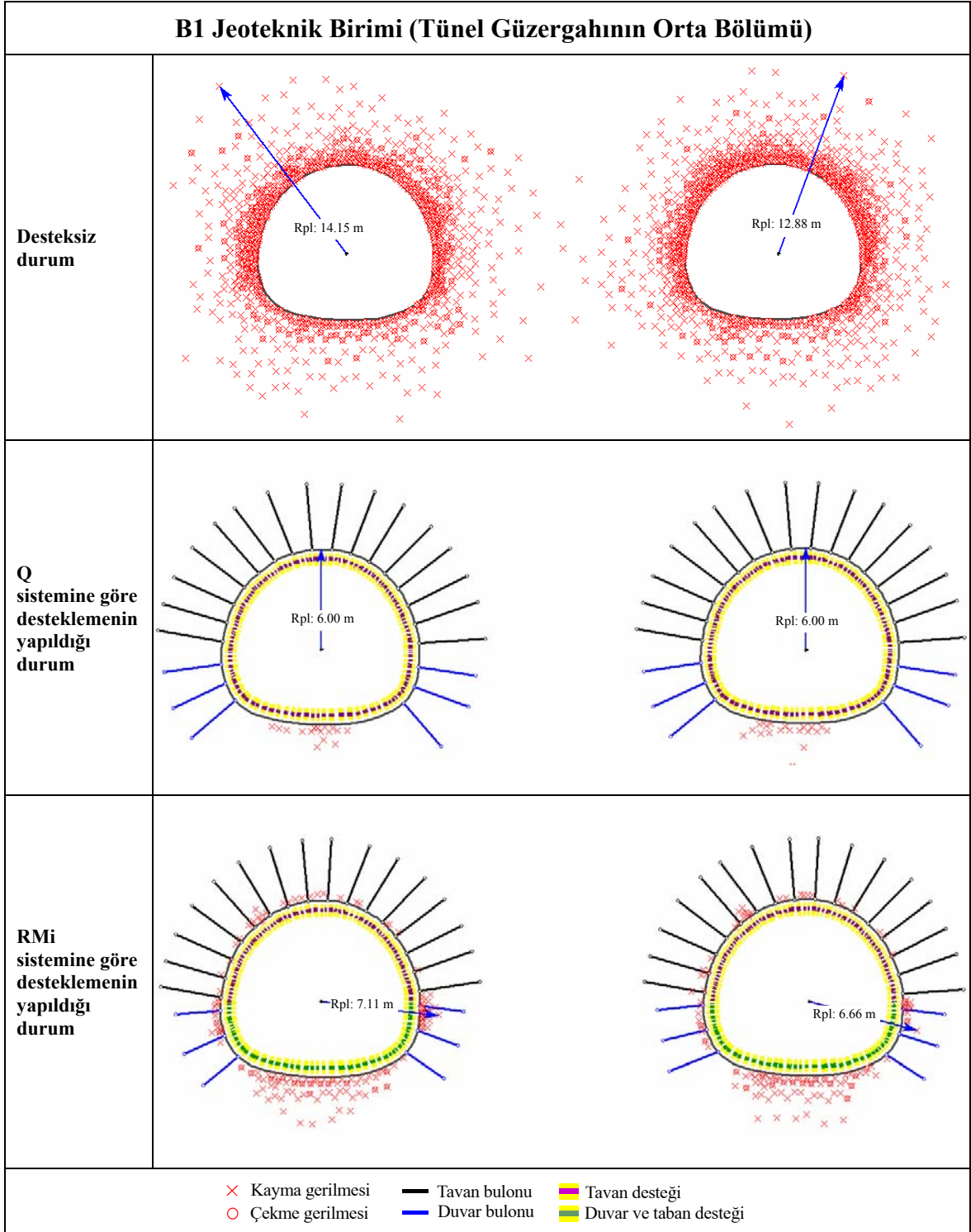
Şekil 3.44. Tünel güzergahının orta bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünel için desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği



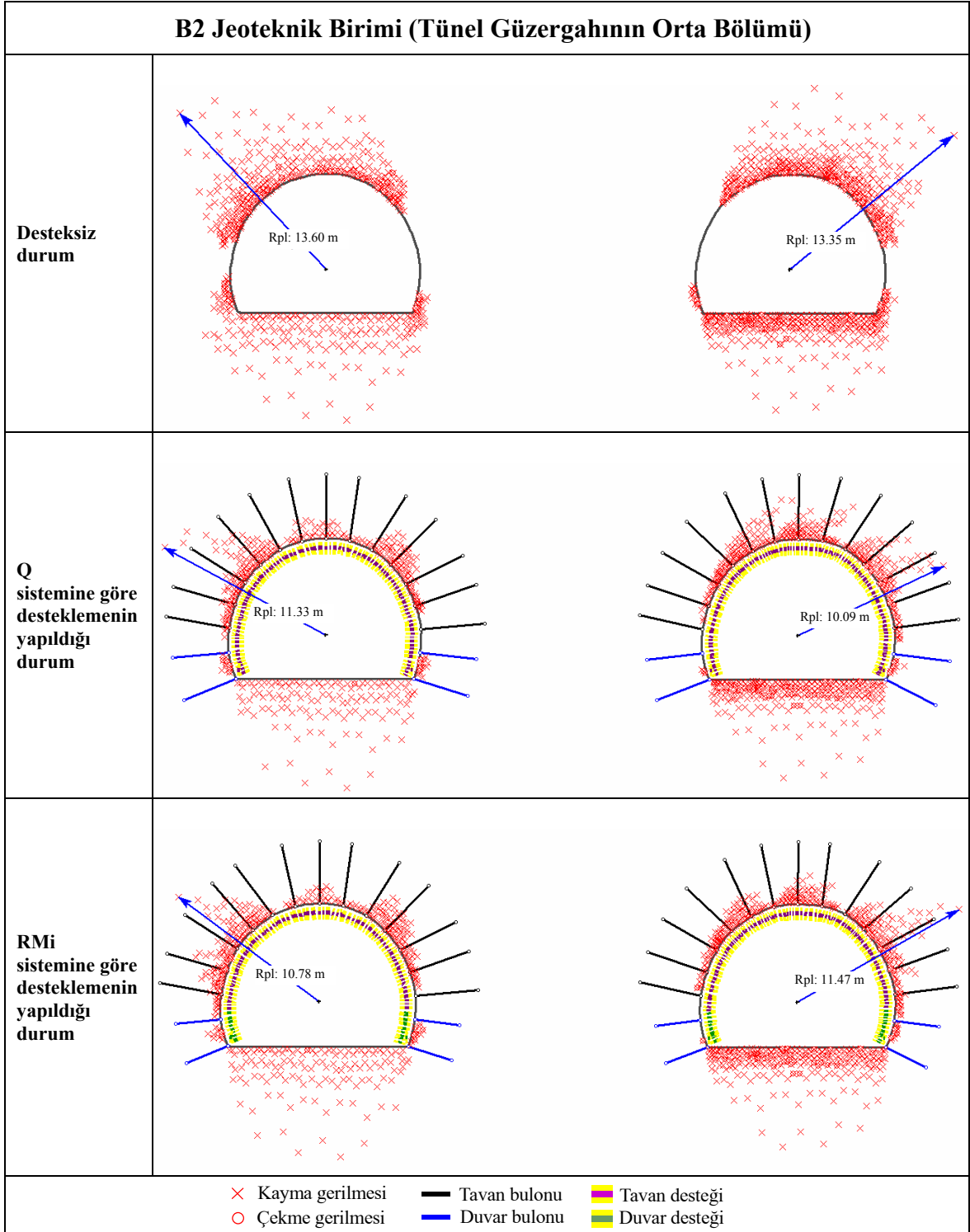
Şekil 3.45. Nogohe Tepe civarındaki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği



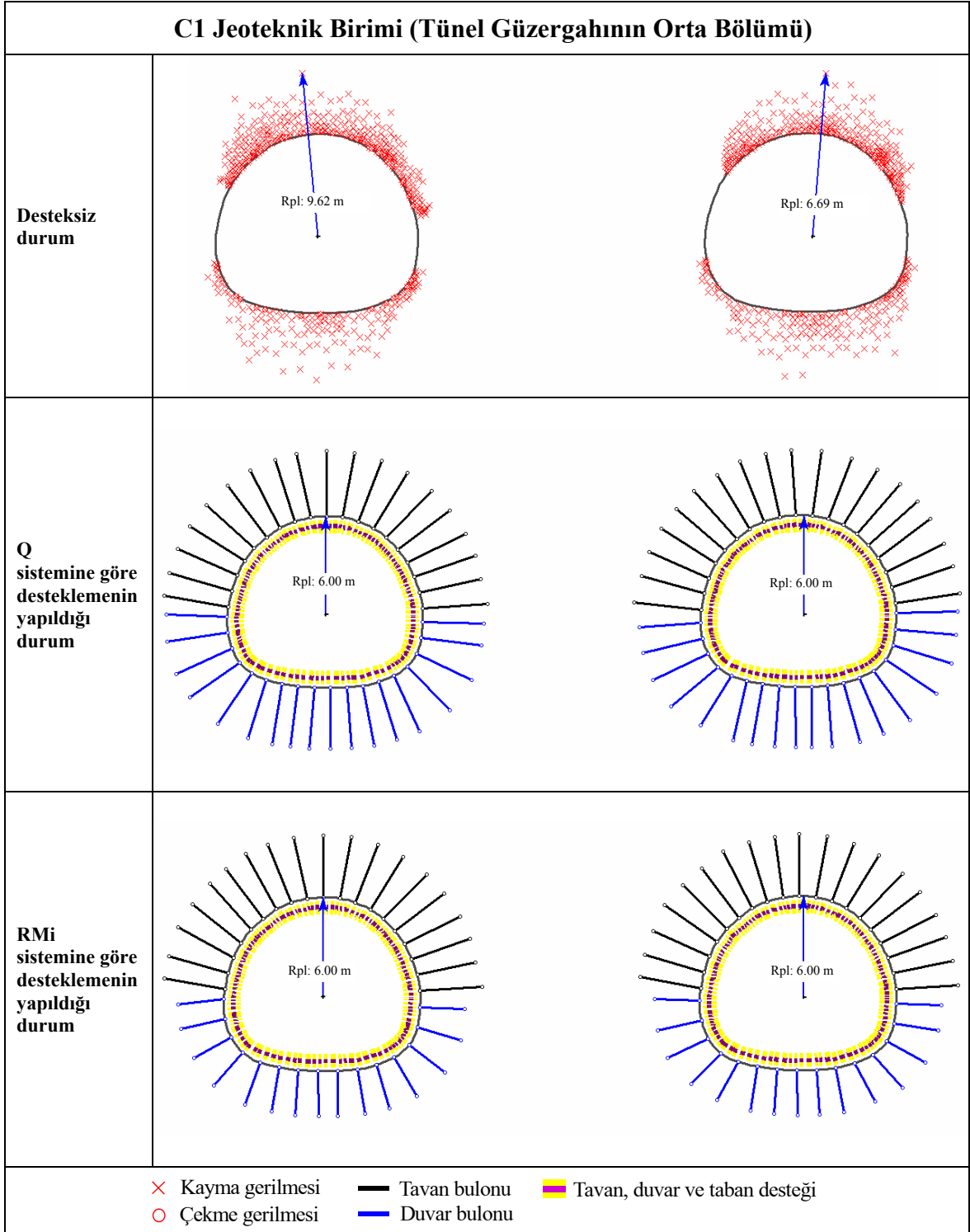
Şekil 3.46. Tünel güzergahının orta bölümündeki A2 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği



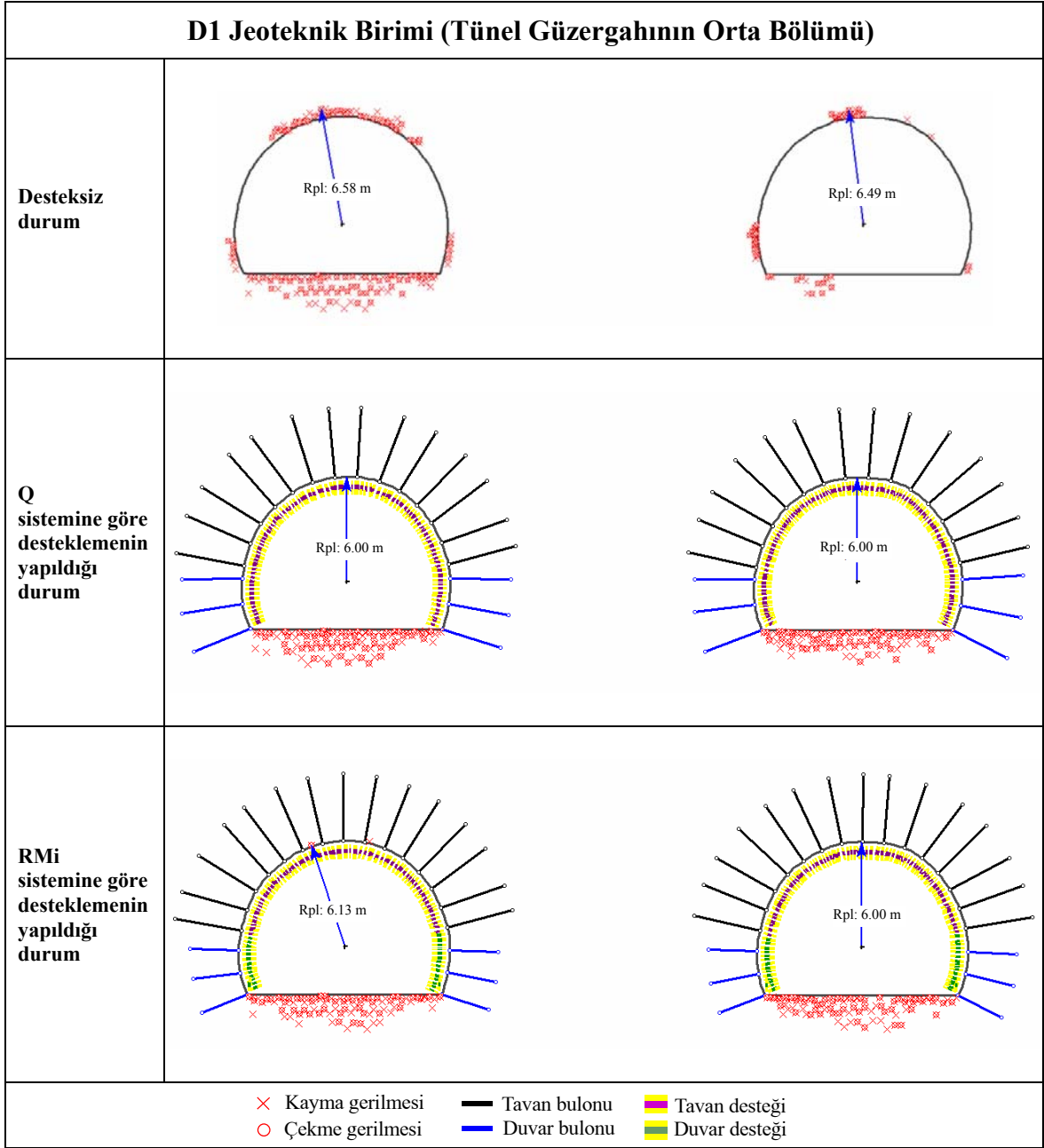
Şekil 3.47. Tünel güzergahının orta bölümündeki B1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği



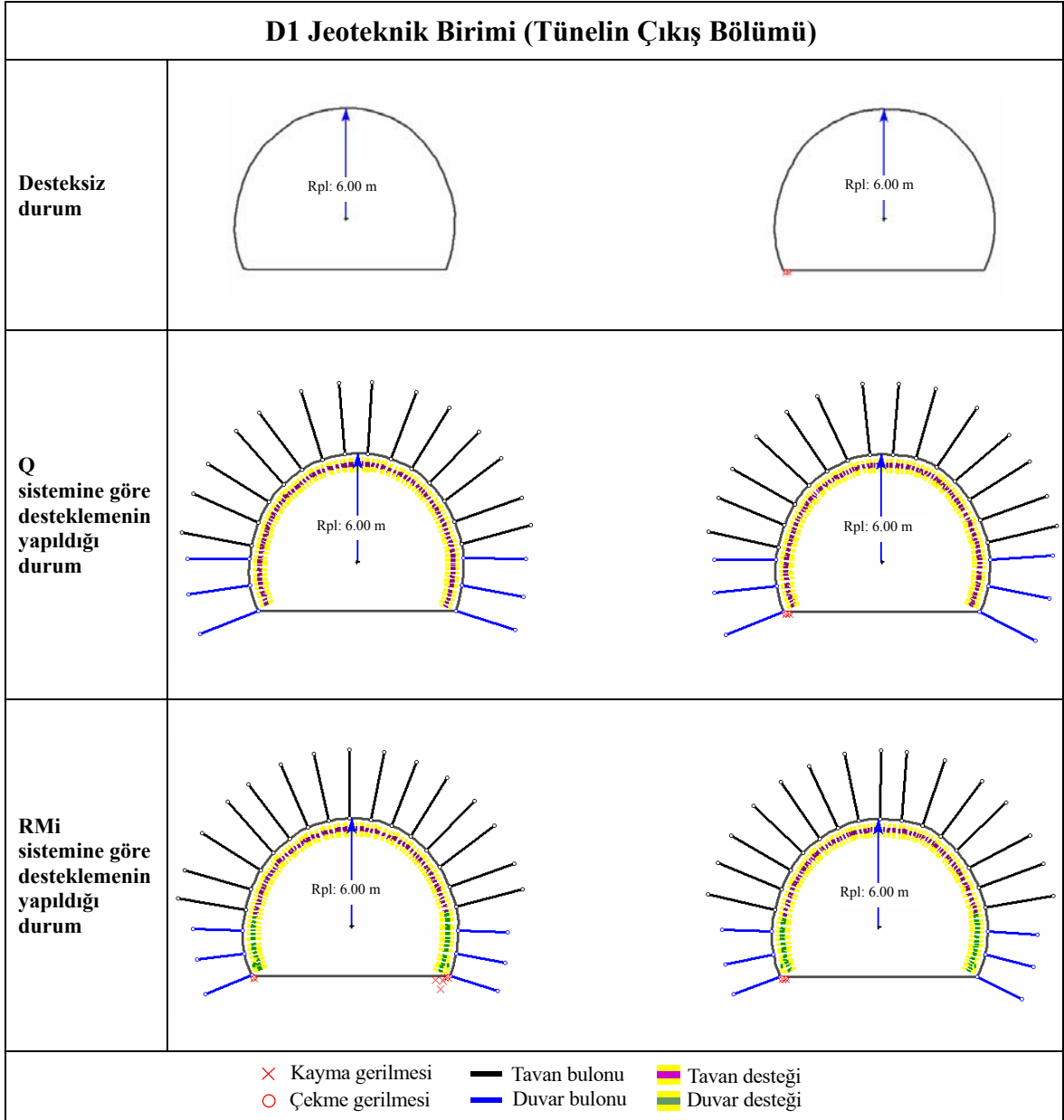
Şekil 3.48. Tünel güzergahının orta bölümündeki B2 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği



Şekil 3.49. Tünel güzergahının orta bölümündeki C1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği



Şekil 3.50. Tünel güzergahının orta bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak tünel için desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği



Şekil 3.51. Çıkış bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği

Tablo 3.64. Tünel güzergahının giriş ve orta bölümlerindeki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı

| | | A1 Jeoteknik Birimi (Tünelin Giriş Bölümü) | | | | | | A1 Jeoteknik Birimi (Tünel Güzergahının Orta Bölümü) | | | | | |
|-----------|------------------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|
| | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | |
| | | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp |
| Tavan | σ_1 (MPa) | 2.80 | 2.80 | 2.40 | 2.40 | 2.30 | 2.30 | 1.20 | 1.20 | 6.75 | 6.00 | 7.50 | 6.75 |
| | σ_3 (MPa) | 0.14 | 0.04 | 0.33 | 0.28 | 0.44 | 0.32 | 0.00 | 0.00 | 1.40 | 1.20 | 1.60 | 1.40 |
| | U_t (m) | 5.00e-004 | 7.50e-004 | 4.00e-004 | 6.00e-004 | 4.00e-004 | 6.00e-004 | 2.50e-002 | 2.75e-002 | 6.00e-003 | 6.00e-003 | 4.00e-003 | 6.00e-003 |
| Taban | σ_1 (MPa) | 1.60 | 1.40 | 1.60 | 1.40 | 1.40 | 1.40 | 0.60 | 0.60 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | U_t (m) | 1.25e-003 | 1.25e-003 | 1.20e-003 | 1.20e-003 | 1.20e-003 | 1.20e-003 | 3.25e-002 | 3.75e-002 | 3.00e-002 | 3.40e-002 | 3.00e-002 | 3.40e-002 |
| Sol duvar | σ_1 (MPa) | 0.00 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.60 | 1.20 | 0.75 | 2.25 | 0.75 | 0.75 |
| | σ_3 (MPa) | -0.04 | 0.00 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.00 |
| | U_t (m) | 4.25e-003 | 2.75e-003 | 3.80e-003 | 2.60e-003 | 3.80e-003 | 2.40e-003 | 4.50e-002 | 2.25e-002 | 3.60e-002 | 2.00e-002 | 3.60e-002 | 2.00e-002 |
| Sağ duvar | σ_1 (MPa) | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.20 | 1.20 | 1.20 | 2.25 | 0.75 | 3.00 | 2.25 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.11 | 0.14 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 0.20 | 0.20 |
| | U_t (m) | 2.75e-003 | 4.25e-003 | 2.40e-003 | 3.80e-003 | 2.40e-003 | 3.60e-003 | 2.00e-002 | 4.75e-002 | 1.80e-002 | 3.60e-002 | 1.80e-002 | 3.60e-002 |
| | R_{pl} (m) | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 14.19 | 11.19 | 11.54 | 9.72 | 10.56 | 12.88 |

σ_1 = En büyük asal gerilme (Mpa) σ_3 = En küçük asal gerilme (Mpa) U_t = Toplam yer değiştirme miktarı (m) R_{pl} = Plastik zonun yarıçapı (m)

Tablo 3.65. Nogohe Tepe civarındaki A1 ve tünel güzergahının orta bölümündeki A2 jeoteknik birimlerinde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı

| | | A1 Jeoteknik Birimi (Nogohe Tepe Cıvarı) | | | | | | A2 Jeoteknik Birimi (Tünel Güzergahının Orta Bölümü) | | | | | |
|-----------|------------------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|
| | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | |
| | | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp |
| Tavan | σ_1 (MPa) | 1.10 | 1.10 | 5.85 | 5.85 | 6.50 | 5.20 | 4.55 | 4.20 | 4.20 | 3.85 | 3.85 | 3.85 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 1.20 | 1.00 | 1.40 | 1.00 | 0.15 | 0.15 | 0.75 | 0.50 | 0.75 | 0.50 |
| | U_t (m) | 2.00e-002 | 2.00e-002 | 4.00e-003 | 6.00e-003 | 4.50e-003 | 4.50e-003 | 6.50e-003 | 6.50e-003 | 4.40e-003 | 4.80e-003 | 4.40e-003 | 4.80e-003 |
| Taban | σ_1 (MPa) | 0.55 | 0.55 | 0.65 | 0.00 | 0.65 | 0.65 | 2.10 | 2.10 | 2.10 | 2.10 | 2.10 | 1.75 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | U_t (m) | 2.75e-002 | 3.25e-002 | 2.40e-002 | 2.60e-002 | 2.40e-002 | 2.40e-002 | 8.00e-003 | 8.00e-003 | 6.80e-003 | 7.20e-003 | 6.80e-003 | 7.20e-003 |
| Sol duvar | σ_1 (MPa) | 0.55 | 1.55 | 0.65 | 2.60 | 0.65 | 0.65 | 2.10 | 2.45 | 2.10 | 2.10 | 2.45 | 2.80 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.50 | 0.50 | 0.75 |
| | U_t (m) | 3.75e-002 | 2.00e-002 | 3.00e-002 | 1.80e-002 | 3.00e-002 | 1.65e-002 | 9.00e-003 | 6.00e-003 | 7.60e-003 | 5.20e-003 | 7.20e-003 | 4.80e-003 |
| Sağ duvar | σ_1 (MPa) | 1.10 | 1.10 | 1.95 | 1.30 | 2.60 | 1.30 | 2.45 | 2.45 | 2.45 | 2.10 | 2.80 | 2.45 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.20 | 0.00 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.75 | 0.50 | 0.75 | 0.75 |
| | U_t (m) | 2.00e-002 | 3.75e-002 | 1.60e-002 | 3.00e-002 | 1.65e-002 | 2.85e-002 | 6.00e-003 | 9.00e-003 | 4.80e-003 | 7.60e-003 | 4.80e-003 | 7.20e-003 |
| | R_{pl} (m) | 14.27 | 11.33 | 11.55 | 9.69 | 11.54 | 12.88 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |

σ_1 = En büyük asal gerilme (Mpa) σ_3 = En küçük asal gerilme (Mpa) U_t = Toplam yer değiştirme miktarı (m) R_{pl} = Plastik zonun yarıçapı (m)

Tablo 3.66. Tünel güzergahının orta bölümündeki B1 ve B2 jeoteknik birimlerinde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı

| | | B1 Jeoteknik Birimi (Tünel Güzergahının Orta Bölümü) | | | | | | B2 Jeoteknik Birimi (Tünel Güzergahının Orta Bölümü) | | | | | |
|-----------|------------------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|
| | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | |
| | | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp |
| Tavan | σ_1 (MPa) | 1.40 | 1.40 | 14.40 | 14.40 | 15.00 | 14.00 | 2.70 | 1.80 | 9.00 | 7.50 | 10.50 | 9.00 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 6.00 | 6.00 | 5.50 | 4.95 | 0.30 | 0.00 | 2.10 | 1.75 | 2.80 | 2.00 |
| | U_t (m) | 2.10e-001 | 2.10e-001 | 2.80e-002 | 2.80e-002 | 4.20e-002 | 4.20e-002 | 6.50e-002 | 8.00e-002 | 1.40e-002 | 1.75e-002 | 1.20e-002 | 1.60e-002 |
| Taban | σ_1 (MPa) | 1.40 | 1.40 | 5.60 | 7.20 | 4.00 | 4.00 | 0.90 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 1.50 | 1.50 | 0.55 | 1.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | U_t (m) | 1.80e-001 | 1.80e-001 | 4.00e-002 | 4.00e-002 | 5.95e-002 | 5.95e-002 | 8.00e-002 | 7.50e-002 | 7.00e-002 | 7.00e-002 | 7.20e-002 | 6.80e-002 |
| Sol duvar | σ_1 (MPa) | 1.40 | 1.40 | 9.60 | 12.00 | 10.00 | 14.00 | 1.80 | 4.50 | 1.50 | 4.50 | 0.00 | 4.50 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 3.75 | 6.00 | 2.20 | 4.95 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 1.05 | 0.00 | 0.40 |
| | U_t (m) | 1.95e-001 | 1.95e-001 | 3.40e-002 | 2.20e-002 | 4.90e-002 | 3.15e-002 | 8.50e-002 | 4.00e-002 | 6.30e-002 | 3.50e-002 | 6.40e-002 | 3.60e-002 |
| Sağ duvar | σ_1 (MPa) | 1.40 | 0.70 | 11.20 | 11.20 | 11.00 | 11.00 | 4.50 | 0.90 | 4.50 | 1.50 | 6.00 | 1.50 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 6.00 | 6.00 | 3.85 | 3.85 | 0.30 | 0.00 | 1.40 | 0.00 | 1.20 | 0.00 |
| | U_t (m) | 1.95e-001 | 2.10e-001 | 2.40e-002 | 3.40e-002 | 3.50e-002 | 4.90e-002 | 4.00e-002 | 8.50e-002 | 3.50e-002 | 6.65e-002 | 3.60e-002 | 6.40e-002 |
| | R_{pl} (m) | 14.15 | 12.88 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 13.60 | 13.35 | 11.33 | 10.09 | 10.78 | 11.47 |
| | | σ_1 = En büyük asal gerilme (Mpa) | | σ_3 = En küçük asal gerilme (Mpa) | | | | U_t = Toplam yer değiştirme miktarı (m) | | | | R_{pl} = Plastik zonun yarıçapı (m) | |

Tablo 3.67. Tünel güzergahının orta bölümündeki C1 ve D1 jeoteknik birimlerinde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı

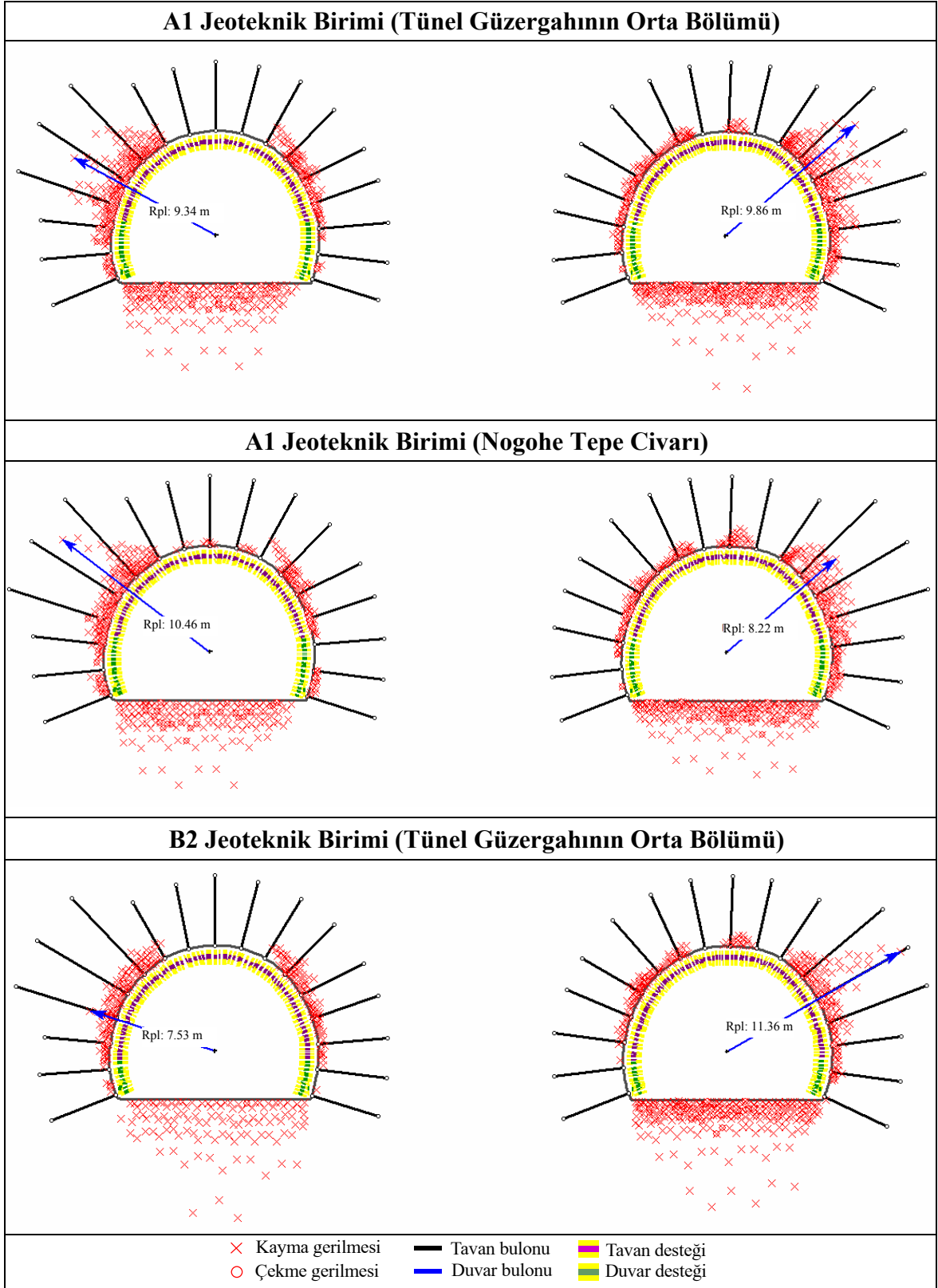
| | | C1 Jeoteknik Birimi (Tünel Güzergahının Orta Bölümü) | | | | | | D1 Jeoteknik Birimi (Tünel Güzergahının Orta Bölümü) | | | | | |
|-----------|------------------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|
| | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | |
| | | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp |
| Tavan | σ_1 (MPa) | 0.60 | 0.45 | 2.55 | 2.55 | 2.40 | 2.55 | 3.00 | 4.80 | 5.40 | 5.40 | 5.60 | 5.20 |
| | σ_3 (MPa) | 0.07 | 0.01 | 1.15 | 1.15 | 1.11 | 1.17 | 0.15 | 0.00 | 0.80 | 0.80 | 0.60 | 0.60 |
| | U_t (m) | 2.00e-002 | 2.00e-002 | 3.50e-003 | 3.50e-003 | 3.50e-003 | 3.50e-003 | 7.80e-003 | 7.80e-003 | 5.50e-003 | 5.50e-003 | 5.50e-003 | 6.05e-003 |
| Taban | σ_1 (MPa) | 0.45 | 0.45 | 2.10 | 2.10 | 2.10 | 2.10 | 1.80 | 2.40 | 0.90 | 0.90 | 1.20 | 2.00 |
| | σ_3 (MPa) | 0.01 | 0.01 | 0.38 | 0.38 | 0.39 | 0.39 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.10 | 0.10 |
| | U_t (m) | 2.40e-002 | 2.40e-002 | 2.80e-003 | 2.80e-003 | 3.50e-003 | 3.50e-003 | 1.08e-002 | 9.60e-003 | 9.90e-003 | 9.35e-003 | 9.90e-003 | 9.90e-003 |
| Sol duvar | σ_1 (MPa) | 0.60 | 0.90 | 0.60 | 0.90 | 0.60 | 0.90 | 2.40 | 2.40 | 2.70 | 2.70 | 2.40 | 2.80 |
| | σ_3 (MPa) | 0.01 | 0.01 | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.60 | 0.35 | 0.60 |
| | U_t (m) | 3.40e-002 | 1.80e-002 | 1.26e-002 | 7.70e-003 | 1.26e-002 | 7.70e-003 | 1.20e-002 | 7.20e-003 | 1.05e-002 | 6.60e-003 | 1.05e-002 | 6.60e-003 |
| Sağ duvar | σ_1 (MPa) | 0.75 | 0.45 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 3.00 | 3.00 | 2.70 | 2.70 | 2.80 | 2.80 |
| | σ_3 (MPa) | 0.07 | 0.01 | 0.66 | 0.69 | 0.65 | 0.65 | 0.15 | 0.15 | 0.80 | 0.60 | 0.60 | 0.35 |
| | U_t (m) | 1.80e-002 | 3.40e-002 | 8.40e-003 | 1.26e-002 | 8.40e-003 | 1.26e-002 | 7.80e-003 | 1.08e-002 | 6.60e-003 | 9.90e-003 | 6.60e-003 | 1.05e-002 |
| | R_{pl} (m) | 9.62 | 9.69 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.58 | 6.49 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |

σ_1 = En büyük asal gerilme (Mpa) σ_3 = En küçük asal gerilme (Mpa) U_t = Toplam yer değiştirme miktarı (m) R_{pl} = Plastik zonun yarıçapı (m)

Tablo 3.68. Çıkış bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait desteksiz ve destekli durumlar için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı

| | | D1 Jeoteknik Birimi (Tünelin Çıkış Bölümü) | | | | | |
|--|------------------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|
| | | Desteksiz durum | | Q sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | | RMi sistemine göre desteklemenin yapıldığı durum | |
| | | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp |
| Tavan | σ_1 (MPa) | 2.60 | 2.30 | 2.25 | 2.25 | 2.20 | 2.20 |
| | σ_3 (MPa) | 0.17 | 0.09 | 0.30 | 0.30 | 0.37 | 0.30 |
| | U_t (m) | 3.00e-003 | 3.25e-003 | 2.25e-003 | 2.25e-003 | 2.25e-003 | 2.25e-003 |
| Taban | σ_1 (MPa) | 1.10 | 1.10 | 1.25 | 1.00 | 1.20 | 1.00 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.30 |
| | U_t (m) | 4.00e-003 | 4.00e-003 | 3.50e-003 | 3.50e-003 | 3.50e-003 | 3.50e-003 |
| Sol duvar | σ_1 (MPa) | 1.10 | 1.10 | 1.00 | 1.00 | 1.20 | 1.20 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.30 | 0.18 | 0.27 |
| | U_t (m) | 4.75e-003 | 3.25e-003 | 4.00e-003 | 2.50e-003 | 4.00e-003 | 2.50e-003 |
| Sağ duvar | σ_1 (MPa) | 1.40 | 1.10 | 1.25 | 1.00 | 1.20 | 1.20 |
| | σ_3 (MPa) | 0.09 | 0.09 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.22 |
| | U_t (m) | 3.00e-003 | 4.75e-003 | 2.50e-003 | 4.00e-003 | 2.50e-003 | 4.00e-003 |
| | R_{pl} (m) | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| σ_1 = En büyük asal gerilme (Mpa) | | | | U_t = Toplam yer değiştirme miktarı (m) | | | |
| σ_3 = En küçük asal gerilme (Mpa) | | | | R_{pl} = Plastik zonun yarıçapı (m) | | | |

Cankurtaran Tünel güzergahının orta bölümünde ve Nogohe Tepe civarında yüzeylenen A1 jeoteknik birimi ile tünel güzergahının orta bölümde yüzeylenen B2 jeoteknik birimi Q ve RMi sistemine göre desteklendiğinde oluşan plastik zon, destek zonunun dışında kalmaktadır. Bu nedenle, bu bölümler için sayısal analizler yapılarak uygun destek elemanları yeniden belirlenmiştir. Yapılan destek tasarımında, püskürtme beton kalınlığı artırılarak çelik iksa takviyesi yapılmıştır. Ayrıca, kayma ve çekme gerilmelerinin yoğunlaştığı sol tüpün sol omuzu ile sağ tüpün sağ omuzunda uygulanacak bulonların boyu artırılarak, oluşan plastik zonun, destek zonunun içinde kalması sağlanmıştır. Yapılan sayısal analizler sonucunda, kazı etrafında yoğunlaşan kayma ve çekme gerilmelerinin azaldığı ve önerilen destekleme elemanlarının tünel için uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Sayısal analizlerde sınır karakteristik değerleri Tablo 3.63'de verilen destek elemanları kullanılmıştır. Kazı etrafında destekleme sonucu oluşan gerilmeler ve plastik zon Şekil 3.52'de, ikincil gerilmeler ve toplam yerdeğiştirme miktarları Tablo 3.69'da, önerilen destek elemanları ise Tablo 3.70'de özet olarak sunulmuştur.



Şekil 3.52. Tünel güzergahının orta bölümündeki A1 ve B2 jeoteknik birimlerinde ve Nogohe Tepe civarındaki A1 jeoteknik biriminde açılacak tünele ait sayısal analizlerle belirlenmiş destekli durum için çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımlarına göre oluşan plastik zonun genişliği

Tablo 3.69. Tünel güzergahının orta bölümündeki ve Nogohe Tepe civarındaki A1 jeoteknik biriminde ve tünel güzergahının orta bölümündeki B2 jeoteknik biriminde açılacak tünel için sayısal analizlerle belirlenen destekli durum için sağ ve sol tüpte oluşacak ikincil gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik zonun yarı çapı

| | | Jeoteknik Birimler | | | | | |
|--|------------------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|
| | | A1 Jeoteknik Birimi (Tünel Güzergahının Orta Bölümü) | | A1 Jeoteknik Birimi (Tünelin Nogohe Tepe Civarı) | | B2 Jeoteknik Birimi (Tünel Güzergahının Orta Bölümü) | |
| | | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp | Sol tüp | Sağ tüp |
| Tavan | σ_1 (MPa) | 13.6 | 6.40 | 8.40 | 6.60 | 21.00 | 10.50 |
| | σ_3 (MPa) | 2.75 | 1.25 | 1.60 | 1.40 | 4.60 | 2.60 |
| | U_t (m) | 4.00e-003 | 4.00e-003 | 3.00e-003 | 3.00e-003 | 7.00e-003 | 7.00e-003 |
| Taban | σ_1 (MPa) | 0.00 | 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.00 | 0.00 |
| | σ_3 (MPa) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.10 |
| | U_t (m) | 2.80e-002 | 3.40e-002 | 2.40e-002 | 2.55e-002 | 5.95e-002 | 6.30e-002 |
| Sol duvar | σ_1 (MPa) | 0.80 | 1.60 | 0.70 | 0.70 | 3.00 | 1.50 |
| | σ_3 (MPa) | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.10 |
| | U_t (m) | 3.40e-002 | 2.00e-002 | 2.85e-002 | 1.65e-002 | 5.60e-002 | 3.50e-002 |
| Sağ duvar | σ_1 (MPa) | 3.20 | 3.20 | 2.80 | 2.10 | 4.50 | 3.00 |
| | σ_3 (MPa) | 0.25 | 0.50 | 0.40 | 0.20 | 0.60 | 0.60 |
| | U_t (m) | 1.60e-002 | 3.40e-002 | 1.50e-002 | 2.85e-002 | 3.15e-002 | 5.95e-002 |
| | R_{p1} (m) | 9.34 | 9.86 | 10.46 | 8.22 | 7.53 | 11.36 |
| σ_1 = En büyük asal gerilme (Mpa) | | | | U_t = Toplam yer değiştirme miktarı (m) | | | |
| σ_3 = En küçük asal gerilme (Mpa) | | | | R_{p1} = Plastik zonun yarıçapı (m) | | | |

Tablo 3.70. Tünel güzergahının orta bölümündeki ve Nogohe Tepe civarındaki A1 jeoteknik birimi ve tünel güzergahının orta bölümündeki B2 jeoteknik birimi için sayısal analizlere göre önerilen ön destekleme elemanları

| Jeoteknik birimler | Bölüm | Ön destekleme elemanları |
|--------------------|--------------------|---|
| A1 | Orta bölüm | Sistematically olarak 1.5x1.5 m aralıklı tavanda ve duvarda $L_{\text{tavan+duvar}}=4$ m, omuzlarda ise $L_{\text{omuz}}=6$ m uzunluğunda kaya bulonlu, çift kat çelik hasır ve 1.5m aralıklı çelik iksa takviyeli, tavanda 30 cm, duvarda 20 cm kalınlığında püskürtme beton |
| | Nogohe Tepe civarı | Sistematically olarak 1.5x1.5 m aralıklı tavanda ve duvarda $L_{\text{tavan+duvar}}=4$ m, omuzlarda ise $L_{\text{omuz}}=6$ m uzunluğunda kaya bulonlu, çift kat çelik hasır ve 1.5m aralıklı çelik iksa takviyeli, tavanda 20 cm, duvarda 15 cm kalınlığında püskürtme beton |
| B2 | Orta bölüm | Sistematically olarak 1.5x1.5 m aralıklı tavanda ve duvarda $L_{\text{tavan+duvar}}=4$ m, omuzlarda ise $L_{\text{omuz}}=6$ m uzunluğunda kaya bulonlu, çift kat çelik hasır ve 1.5m aralıklı çelik iksa takviyeli, tavanda 30 cm, duvarda 20 cm kalınlığında püskürtme beton |

3.8. Cankurtaran Tüneli'nin Giriş ve Çıkış Bölümlerinde Açılacak Portal ve Yol Yarma Şevlerinin Duraylılık Analizleri

Kaya şevlerinin duraylılık problemlerinin çözümü, oluşturulacak şevin ve süreksizliklerle sınırlandırılmış blokların geometrisi, kaya kütesinin ve malzemesinin özellikleri, süreksizliklerin ve şevin yönelimi, yeraltı suyu koşulu, süreksizlik yüzeyinin kayma dayanımı, dinamik yükler, kalıcı gerilmeler gibi çeşitli etmenlerin bilinmesine bağlıdır. Bu özelliklerden gerekli olanlar bilindiğinde kinematik, limit denge ve sayısal analizler yapılarak kaya şevlerinin duraylılık sorunları araştırılabilmektedir.

Bu çalışmada, Cankurtaran Tüneli'nin giriş ve çıkış bölümlerinde açılması planlanan portal ve yol yarma şevlerinin duraylılığı kinematik, limit denge ve sayısal analizler yapılarak incelenmiştir. Giriş bölümündeki portal şevi A1 jeoteknik biriminde, yol yarma şevi A1 ve A2 jeoteknik birimlerinde, çıkış bölümündeki portal ve yol yarma şevleri ise D1 jeoteknik biriminde açılacaktır. Yol yarma şevleri, giriş bölümünde Şubaşı Viyadüğü'nden önce, çıkış bölümünde ise 7 Nolu köprüden sonra kazılacaktır. Ayrıntılı duraylılık analizlerine başlamadan önce kaya şevlerinin düzlemsel, kama tipi ve devrilme türü yenilmeler açısından duraylı veya duraysız olarak tanımlanması amacıyla yenilmelerin süreksizlikler tarafından kontrol edildiği varsayılarak kinematik analizler yapılmıştır. Yapılan kinematik analizlerde girdi parametresi olarak jeoteknik birimlerindeki süreksizlik takımlarının ve kaya şevlerinin yönelimi ve süreksizlik yüzeylerine ait içsel sürtünme açısı değerleri kullanılmıştır. Çalışmada Wyllie ve Mah (2004) tarafından önerilen birleşik kinematik analiz yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan kinematik analizler sonucunda yalnızca çıkış bölümündeki portal şevinde 68/200 ve 33/109 yönelimli eklem setlerinin kama tipi kayma oluşturma olasılığının olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.53, 3.54). Kinematik analizlerde kullanılan girdi parametreleri ve analiz sonuçları özet olarak Tablo 3.71'de sunulmuştur.

Çıkış bölümündeki portal şevinde kama tipi kayma oluşturma olasılığı olan 68/200 ve 33/109 yönelimli eklemlerin kayma dayanımı parametreleri, kayması olası bloğun ağırlığı, şev geometrisi, süreksizliklerdeki su durumu ve sismik yükler dikkate alınarak limit denge analizi yapılmıştır. Limit denge analizinde duraylılık, hareket ettirici kuvvet ve momentlerin harekete karşı koyan kuvvet ve momentlerin oranına dayanan güvenlik sayısı (Gs) ile tanımlanmaktadır. Kama tipi kaymanın limit denge analizi yapılırken Rocscience (2006) tarafından geliştirilen "Swedge v5.0" programından yararlanılmıştır. Analiz modeli oluşturulurken eklemlerin suyla dolu olduğu varsayılmış ve depremin etkisini dikkate

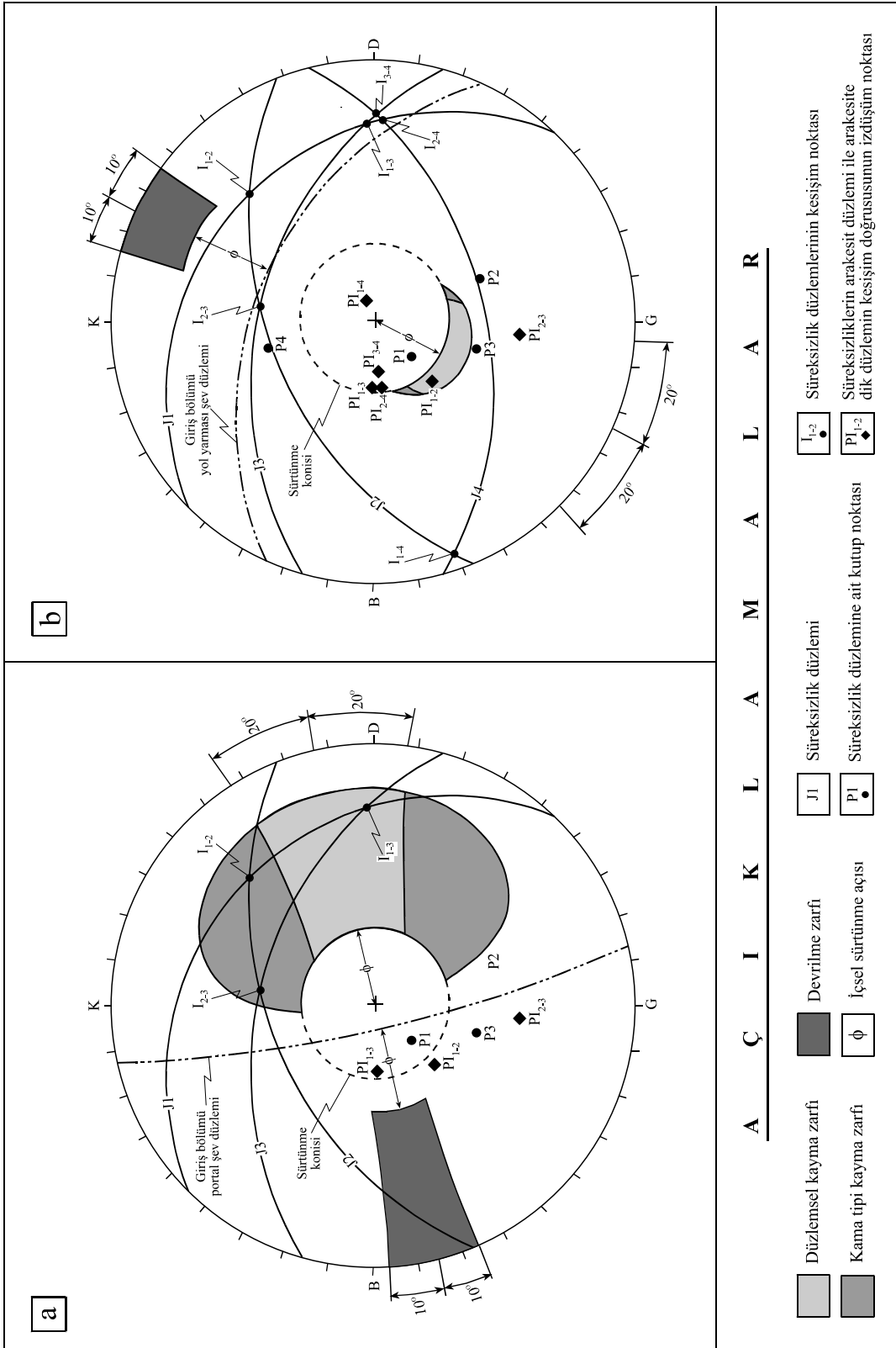
almak için bölgede beklenen en büyük yatay yer ivmesi olan 0.20 g, sismik yük olarak modele eklenmiştir. Çıkış portal şevinin açılacağı 40 m yüksekliğindeki yamacın eğimi yaklaşık 50° olduğundan şev düzenleme işlemi yapılmadan doğrudan 10 m'lik ayna kazısı yapıldıktan sonra tünel açma işlemine geçilecektir (Şekil 3.58a). Bu özelliklere sahip giriş portal şevinde yapılan limit denge analizi sonucunda, güvenlik sayısı değerinin Gs: 10.58 gibi yüksek bir değerde olduğu ve kama tipi kaymanın beklenmediği belirlenmiştir. Kama tipi kaymanın limit denge analizinde kullanılan girdi parametreleri ve analiz sonuçları özet olarak Tablo 3.72'de verilmiştir.

Tablo 3.71. Kinematik analizlerde kullanılan girdi parametreleri ve analiz sonuçları

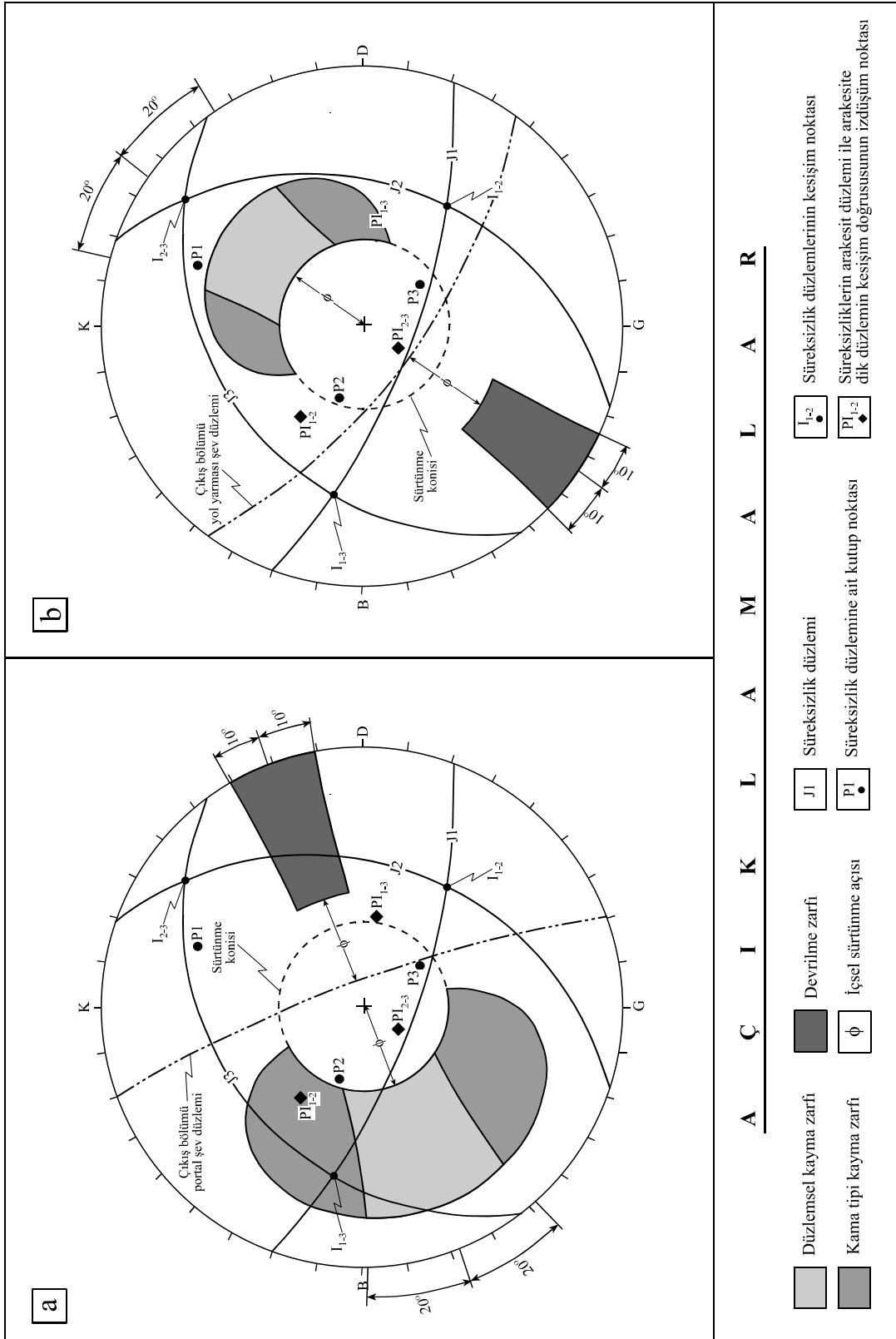
| Jeoteknik birim | Takım no | Süreksizlik türü | Süreksizlik yönelimi | İçsel sürtünme açısı (ϕ , derece) | Şev yeri | Şev yönelimi | Duraylılık durumu |
|-----------------|----------|------------------|----------------------|---|-----------------------------|--------------|-------------------|
| A1-A2 | 1 | Eklem | 22/45 | 32 | Giriş bölümü portal şevi | 79/257 | Duraylı |
| | 2 | Eklem | 46/338 | 32 | | 42/25 | Duraylı |
| | 3 | Eklem | 43/16 | 32 | Giriş bölümü yol yarma şevi | | |
| | 4 | Tabaka | 47/165 | 38 | | | |
| D1 | 1 | Eklem | 68/200 | 36 | Çıkış bölümü portal şevi | 79/70 | Kama tipi kayma |
| | 2 | Eklem | 33/109 | 36 | | | |
| | 3 | Eklem | 30/323 | 36 | Çıkış bölümü yol yarma şevi | 66/216 | Duraylı |

Tablo 3.72. Kama tipi kaymanın limit denge analizinde kullanılan girdi parametreleri ve analiz sonuçları

| Jeoteknik birim | Takım no | Süreksizlik türü | Süreksizlik yönelimi | İçsel sürtünme açısı (ϕ , derece) | Kohezyon (c, MPa) | Birim hacim ağırlık (γ , kN/m ³) |
|--------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|---|-------------------|--|
| D1 | 1 | Eklem | 68/200 | 36 | 0.045 | 24.73 |
| | 2 | Eklem | 33/109 | 36 | 0.045 | 24.73 |
| Şev yüksekliği (m) | Yatay yer ivmesi (g) | Şev yeri | Şev yönelimi | Güvenlik sayısı (Gs) | Duraylılık durumu | |
| 10 | 0.20 | Çıkış bölümü portal şevi | 79/70 | 10.58 | Duraylı | |



Şekil 3.53. Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümündeki portal (a) ve yol yarma (b) şevlerinin kinematik analizleri



Şekil 3.54. Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümündeki portal (a) ve yol yarma (b) şevlerinin kinematik analizleri

Cankurtaran Tüneli'nin giriş ve çıkış bölümlerinde açılması planlanan portal ve yol yarma şevlerinde gelişebilecek dairesel kayma türü duraysızlıkları belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi tabanlı "Phase² v7.0" (Rocscience, 2008) programından yararlanılmış ve şevlere ait kazı sonrası durum için kritik SRF (Gerilme azaltma faktörü) değerleri belirlenmiştir. Oluşturulan modellerde Hoek vd. (2002) tarafından önerilen yenilme kriteri kullanılarak gerilme-deformasyon analizleri yapılmış ve plastik yenilmeler araştırılmıştır. Sayısal analizlerde yeraltı suyu ve sismik yükler de dikkate alınmış ve üç düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlar kullanılmıştır. Jeoteknik birimlerde kontrollü patlatma ve mekanik kazı uygulanacağı için örselenme faktörü D: 0.7 alınmıştır. Giriş bölümündeki portal şevi A1 jeoteknik biriminde, yol yarma şevi A1 ve A2 jeoteknik birimlerinde; çıkış bölümündeki portal ve yol yarma şevleri ise D1 jeoteknik biriminde açılacaktır. A1 jeoteknik birimi Subaşı Sırtı Formasyonu'nuna ait sıkı matriksli aglomera, volkanik breş ve iri taneli tüflerin oluşturduğu piroklastitlerden oluşmaktadır. Bu litolojik özelliğinden dolayı A1 jeoteknik biriminin belirli bir derinliği kadar yüzeysel şartlardan etkilenerek bozunmuş olduğu hem sismik kırılma çalışmalarıyla (SH1) hem de proje çalışmalarından sonra giriş bölümünde yapılacak şev kazısı tasarımlarını yeniden düzenlemek amacıyla açılan sığ derinlikli ek temel sondaj kuyularından (CGP1-6) elden edilen veriler yardımıyla belirlenmiştir. Yapılan arazi çalışmaları çalışmaları sonucunda bozunma derinliğinin yaklaşık olarak 10 m olduğu belirlenmiş ve buna göre zonlu analiz modeli oluşturulmuştur. Analizlerde, üst seviyedeki bozunmuş zon için A1 jeoteknik birimine ait malzeme ve kütle özelliklerinin en düşük değerleri kullanılmıştır. A2 ve D1 jeoteknik birimlerinde ise yapılan arazi gözlemleri sonucunda yüzeysel bozunma derinliğinin çok düşük olduğu belirlendiğinden, oluşturulan sayısal analiz modellerinde bozunma göz ardı edilmiştir. Şevlerin geometrisi, projede uygulanacak kazı dizaynına göre oluşturulmuştur. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimleri, yeraltı suyu içerecek litolojiye sahip olmadığı Yapılan sayısal analizler sonucunda giriş bölümünde açılacak portal ve yol yarma şevlerine ait kritik SRF değerlerinin sırasıyla 1.35, 2.66 ve 4.56, çıkış bölümünde açılacak portal ve yol yarma şevlerine ait kritik SRF değerlerinin ise sırasıyla 2.63 ve 1.89 olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.55-3.59). Phase² v7.0 programıyla yapılan sayısal analizlerde şevlerin duraylı olarak kabul edilmesi için SRF>1.5 olması gerekmektedir (Rocscience, 2008). Giriş ve çıkış bölümünde açılacak şevlere ait SRF değerleri incelendiğinde, yalnızca giriş bölümündeki portal şevinde dairesel kayma türü duraysızlığın gerçekleşme riskinin olduğu saptanmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan girdi parametreleri Tablo 3.73'de, analiz sonuçları ise Tablo

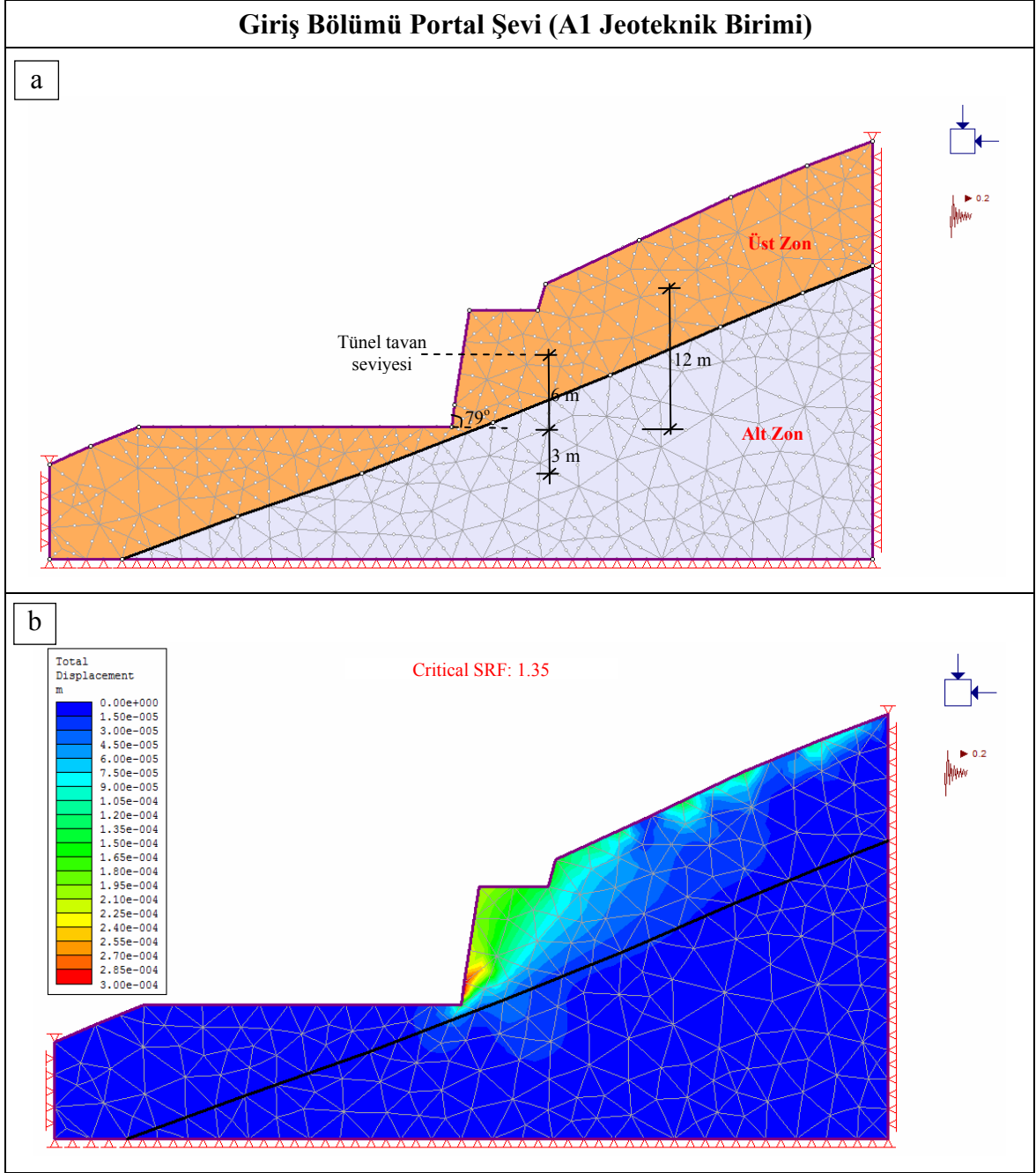
3.74’de özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.73. Sayısal şev duraylılık analizlerinde kullanılan girdi parametreleri

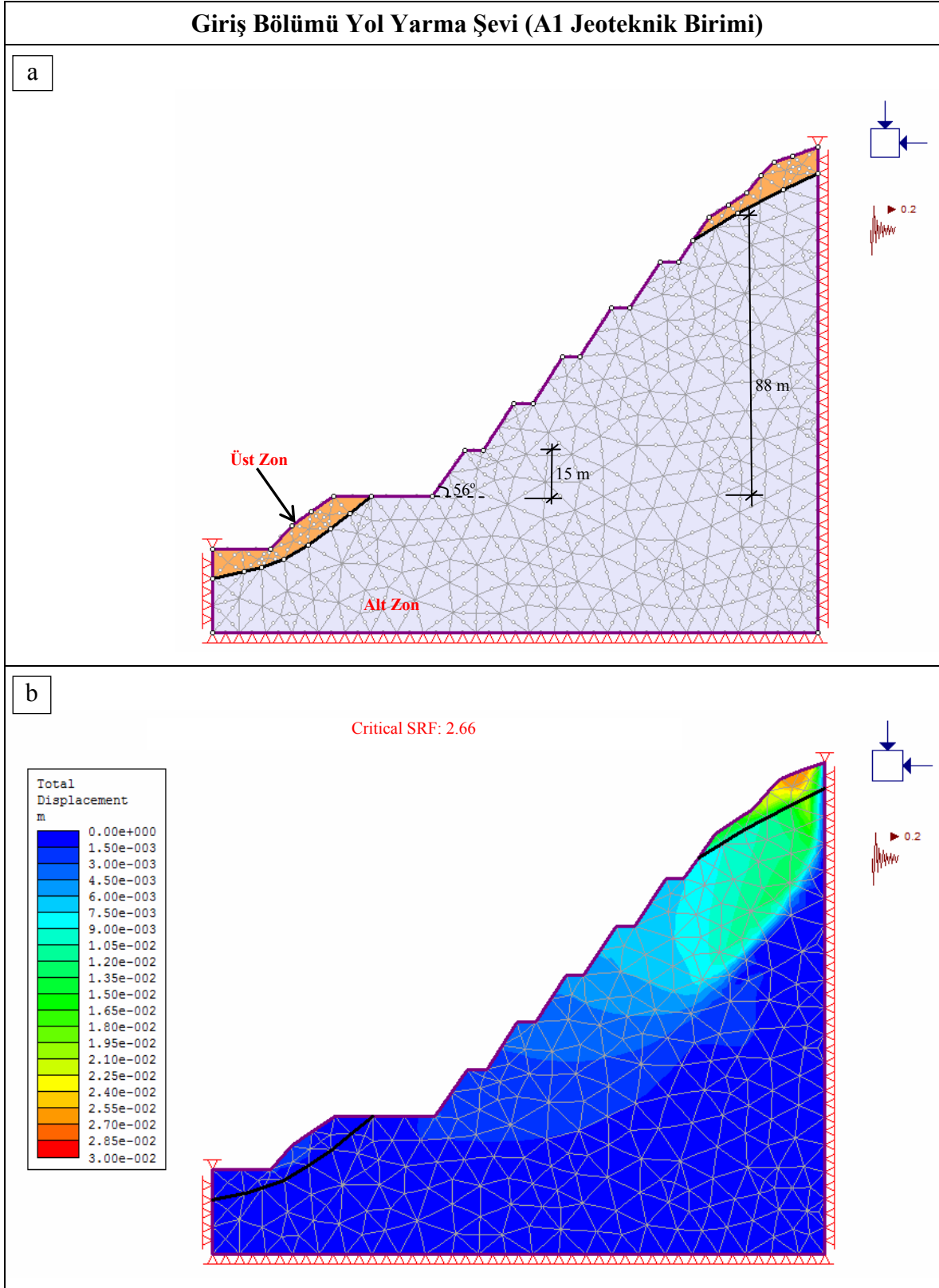
| | Jeoteknik birimler | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | A1 | | A1 | A2 | D1 |
| | Alt zon | | Üst zon | | |
| | Portal şevi | Yol yarma şevi | | | |
| Malzeme türü | İzotropik, Plastik | İzotropik, Plastik | İzotropik, Plastik | İzotropik, plastik | İzotropik, plastik |
| ν | 0.23 | 0.23 | 0.10 | 0.40 | 0.39 |
| σ_{ci} (MPa) | 27.12 | 27.12 | 3.10 | 72.79 | 60.98 |
| σ_{cm} (MPa) | 2.48 | 2.43 | 0.46 | 3.07 | 3.95 |
| E_m (GPa) | 2.68 | 2.23 | 0.95 | 1.73 | 2.13 |
| γ (kN/m ³) | 25.78 | 25.78 | 25.78 | 22.97 | 24.73 |
| m_i | 13 | 13 | 13 | 7 | 25 |
| m_b | 2.30 | 1.99 | 1.79 | 1.50 | 1.82 |
| s | 0.017 | 0.0125 | 0.0096 | 0.0055 | 0.0088 |
| a | 0.508 | 0.508 | 0.536 | 0.515 | 0.511 |
| m_{br} | 0.77 | 0.51 | 0.38 | 0.46 | 0.49 |
| s_r | 0.00017 | 0.00012 | 0.00005 | 0.00009 | 0.00011 |
| a_r | 0.54 | 0.54 | 0.57 | 0.55 | 0.55 |
| D | 0 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| Dilatasyon | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° |
| Yatay yer ivmesi (g) | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |

Tablo 3.74. Şevlere ait kazı geometrisi bilgileri ve sayısal şev duraylılık analizi sonuçları

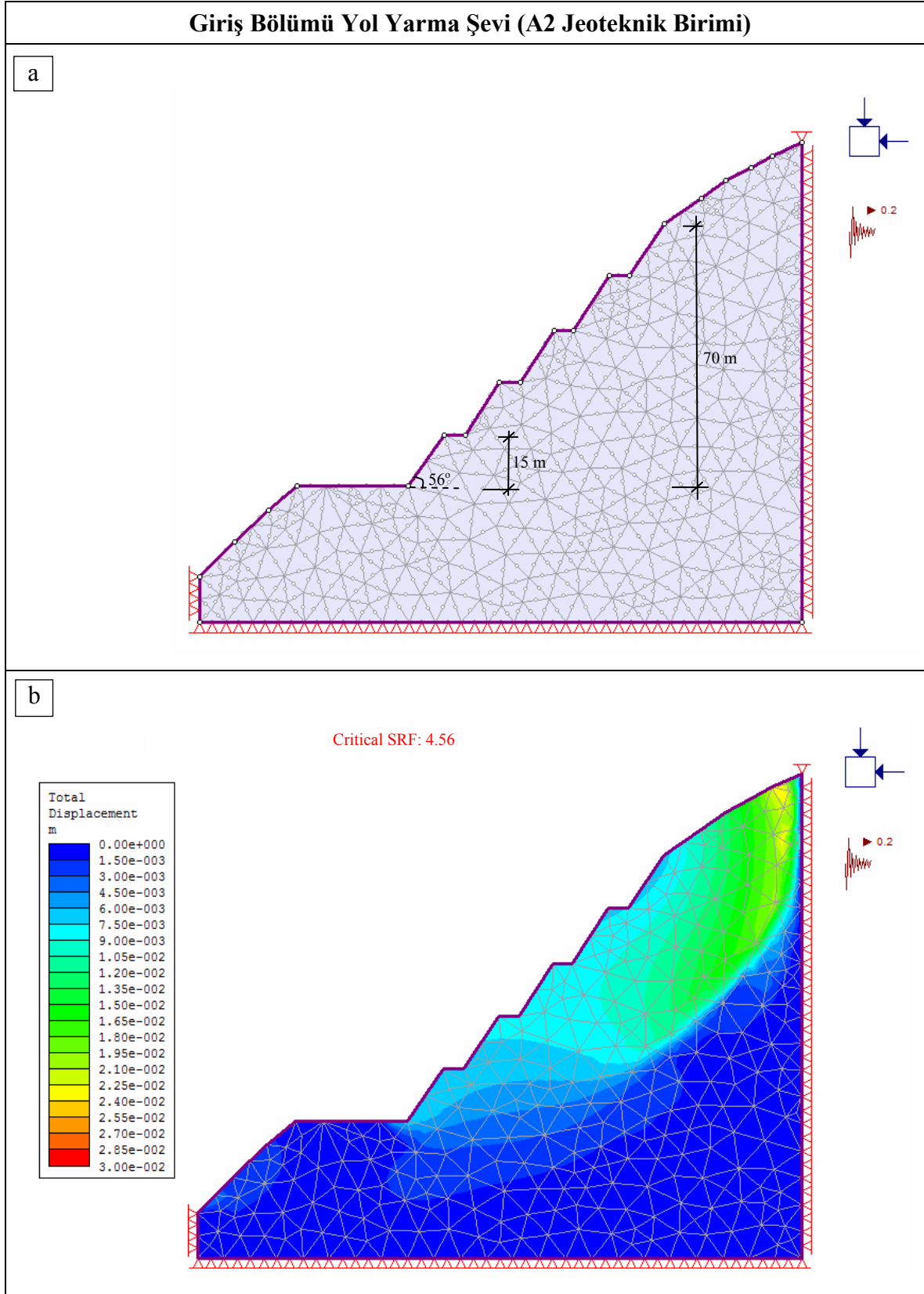
| | Giriş Bölümü | | | Çıkış Bölümü | |
|--------------------|--------------|----------------|---------|--------------|----------------|
| | Portal Şevi | Yol Yarma Şevi | | Portal Şevi | Yol Yarma Şevi |
| | A1 | A1 | A2 | D1 | D1 |
| Genel şev açısı | - | 42° | 42° | - | 66° |
| Şev açısı | 79° | 56° | 56° | 79° | 76° |
| Şev yüksekliği (m) | 12 | 88 | 70 | 12 | 30 |
| SRF | 1.35 | 2.66 | 4.56 | 2.63 | 1.89 |
| Duraylılık durumu | Duraysız | Duraylı | Duraylı | Duraylı | Duraylı |



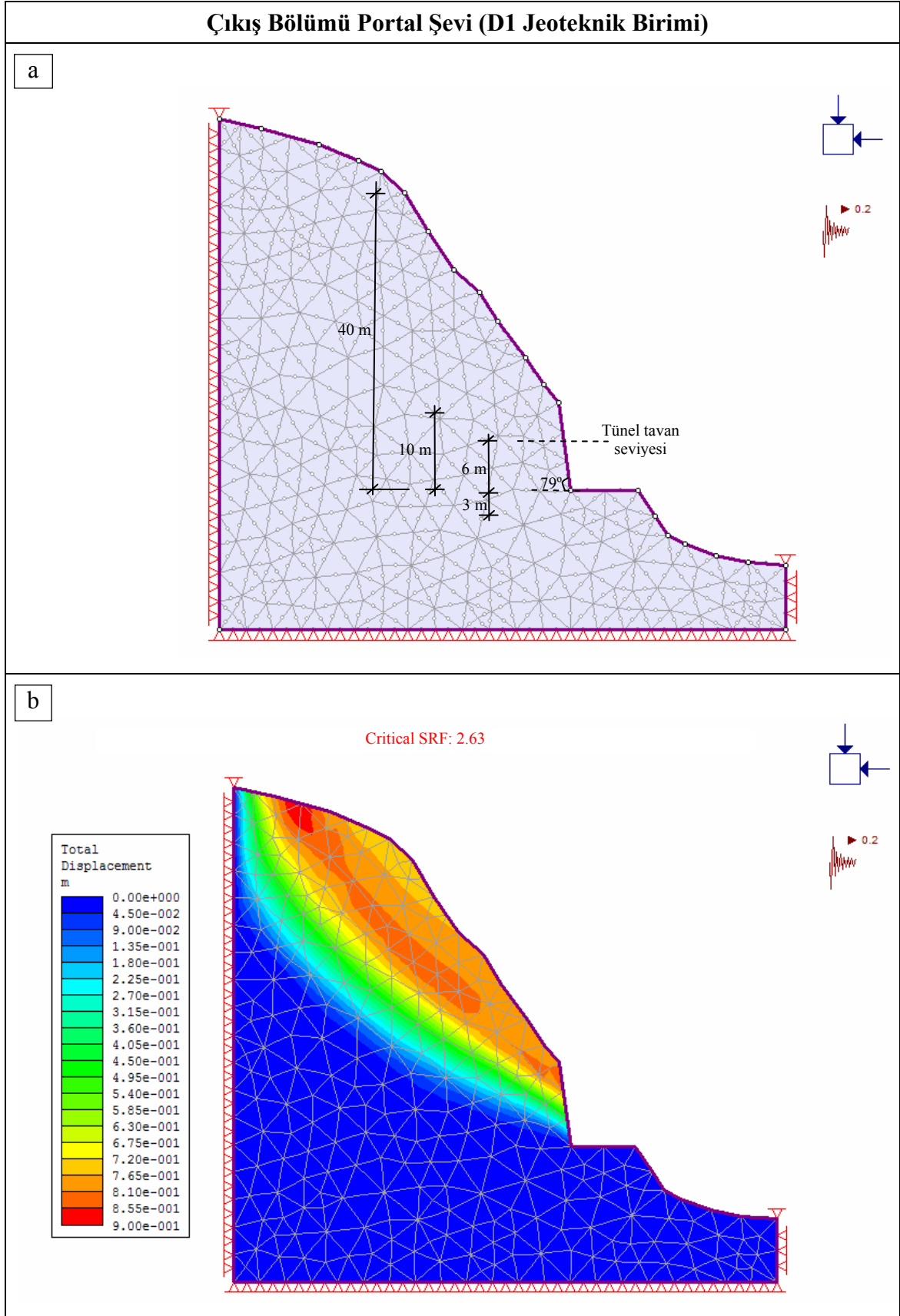
Şekil 3.55. Giriş bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak portal şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b)



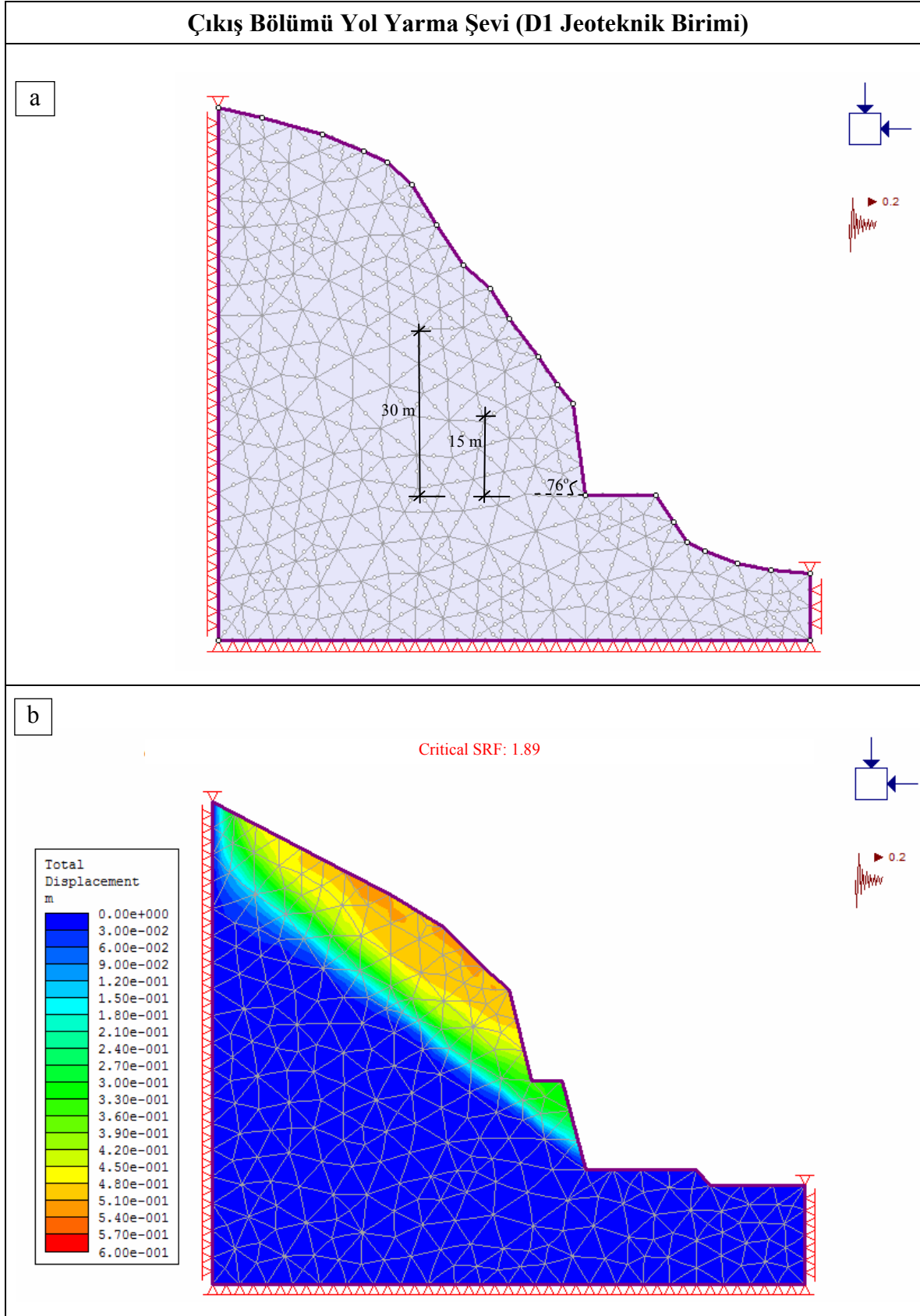
Şekil 3.56. Giriş bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak yarma şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b)



Şekil 3.57. Giriş bölümündeki A2 jeoteknik biriminde açılacak yol yarma şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b)



Şekil 3.58. Çıkış bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak portal şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b)

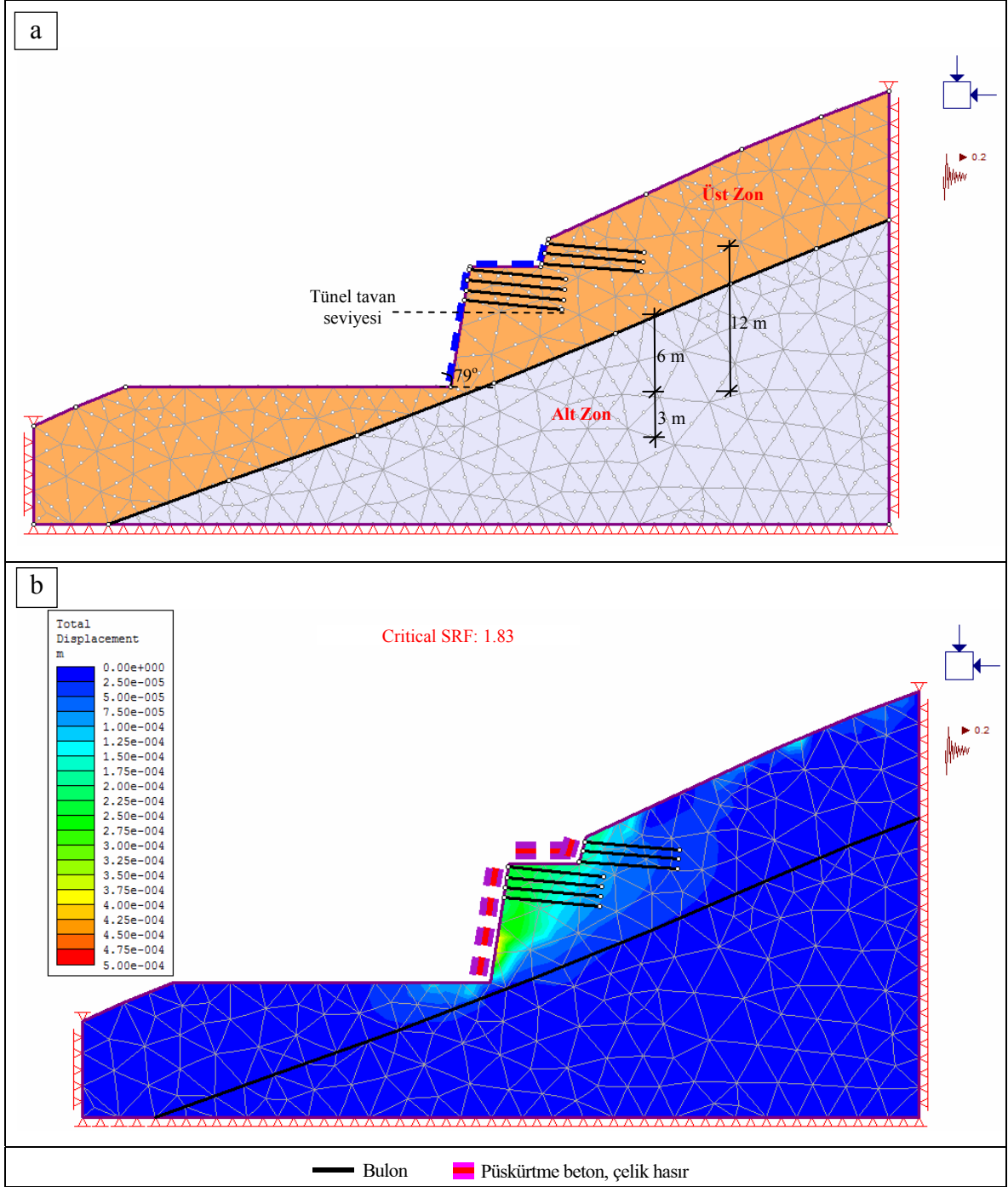


Şekil 3.59. Çıkış bölümündeki D1 jeoteknik biriminde açılacak yol yarma şevine ait sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b)

Giriş bölümünde açılacak portal şevindeki duraysızlık sorununun giderilmesi için uygun destekleme elemanları ile desteklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, giriş portal şevinde $SRF > 1.5$ koşulunu sağlayan uygulanabilir ön destekleme elemanlarını belirlemek için Phase² v7.0 programından yararlanılmış. Yapılan analizler sonucunda desteksiz durum için 1.35 olan SRF değeri, desteklemeden sonra 1.5 değerinin üzerine çıkmıştır (Şekil 3.60). Analizlerde destekleme elemanları olarak püskürtme beton, çelik hasır ve bulon kullanılmıştır. 30 cm kalınlığında çift kat çelik hasırlı püskürtme beton ve tünel tavan seviyesinden itibaren şev aynasına 0.8 m aralıklı 8 m uzunluğunda bulon uygulamasından sonra SRF değeri 1.35'den 1.83'e çıkmış ve portal şevi duraylı hale gelmiştir. Önerilen destek elemanları uygulanabilir özellikte olup, duraylılık analizinde kullanılan destek elemanlarına ait KGM (2006) teknik şartnamesinde verilen sınır karakteristik değerler ve önerilen ön destekleme elemanları Tablo 3.75'de özet olarak sunulmuştur.

Tablo 3.75. Sayısal duraylılık analizlerinde kullanılan destek elemanlarına ait sınır karakteristik değerler (KGM, 2006) ve ön destekleme elemanları

| Özellikler | Püskürtme beton | Kaya bulonu | Çelik hasır |
|--|------------------------|----------------------|------------------------|
| Elastisite modülü, E (GPa) | 20 | 200 | 200 |
| Poisson oranı, ν | 0.20 | - | 0.35 |
| Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa) | 20 | - | 500 |
| Artık tek eksenli basınç dayanımı, (MPa) | 3.5 | - | - |
| Çekme dayanımı, (MPa) | 3.1 | - | 500 |
| Artık çekme dayanımı, (MPa) | 0 | - | - |
| Çekme kapasitesi (MN) | - | 0.25 | - |
| Artık çekme kapasitesi (MN) | - | 0.025 | - |
| Tür | - | Ø28 mm, SN bulonu | Ø6.5 mm, 150x150 mm |
| Ön destekleme elemanları | | | |
| Şev aynasında tünel tavan seviyesinden itibaren 0.8x0.8 m aralıklı L= 8 m uzunluğunda sistematik kaya bulonlu, 30 cm kalınlığında çift kat çelik hasırlı püskürtme beton | | | |



Şekil 3.60. Giriş bölümündeki A1 jeoteknik biriminde açılacak portal şevine ait desteklenmiş duruma göre sayısal analiz modeli (a) ve SRF analizi (b)

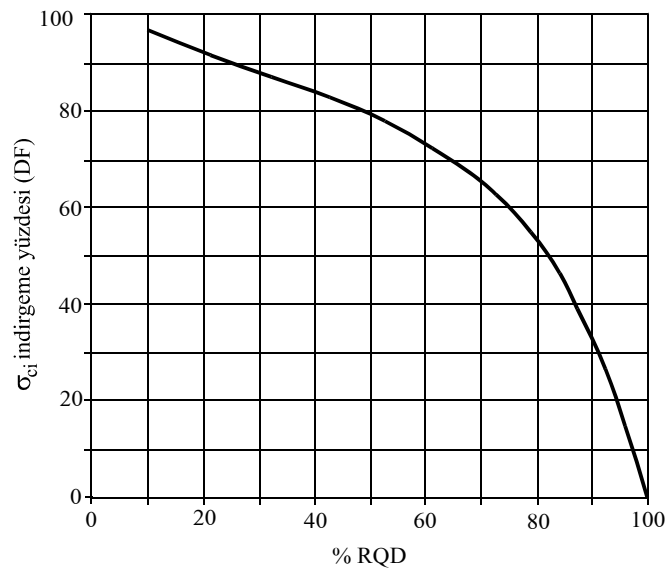
3.9. Subaşı Viyadüğü ve 7 Nolu Köprü'nün İnşaa Edileceği Jeoteknik Birimlerin Taşıma Gücünün Belirlenmesi

Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümüne Subaşı Viyadüğü, çıkış bölümüne ise 7 Nolu Köprü inşa edilerek hemzemin kavşaklara bağlantı yapılması planlanmaktadır. Subaşı Viyadüğü A2 jeoteknik birimine ait tortul birimlerin üzerine, 7 Nolu Köprü ise D1 jeoteknik birimine ait bazaltların üzerine inşa edilecektir. A2 ve D1 jeoteknik birimlerinin taşıma gücünü belirlemek için araştırmacılar tarafından önerilmiş aşağıdaki ampirik yöntem ve eşitliklerden yararlanılmıştır.

Süreksizlik içeren kaya kütlelerinin izin verilebilir taşıma gücünün belirlenmesinde Peck vd. (1974) tarafından önerilen RQD ve σ_{ci} değerlerinin kullanıldığı eşitlik aşağıda verilmiştir. Basit ve pratik olması nedeniyle uygulamada en çok kullanılan bu yöntemde Şekil 3.61'de verilen grafikten kaya malzemesine ait tek eksenli basınç dayanımının yüzde kaç oranında indirgeneceği belirlenir ve belirlenen bu indirgenme katsayısı (DF) kullanılarak kaya kütlelerinin izin verilebilir taşıma gücü hesap edilir.

$$q_a = \sigma_{ci} - (\sigma_{ci} \cdot DF) \quad (81)$$

Burada; q_a : izin verilebilir taşıma gücü (MPa), σ_{ci} : kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa) ve DF: indirgenme katsayısıdır (%).



Şekil 3.61. İzin verilebilir taşıma gücü için DF ve RQD ilişkisi (Peck vd., 1974)

Imai vd. (1976) tarafından sismik dalga hızlarından yararlanarak süreksizlik içeren kaya kütlelerinin nihai taşıma gücünün tahminine yönelik çalışmalar yapılmış ve boyuna dalga hızının kullanıldığı aşağıdaki formül önerilmiştir.

$$q_u = 10Vp^3 \quad (82)$$

Burada; q_u : nihai taşıma gücü (kgf/cm^2) ve Vp : elastik ses dalgasının boyuna yayılma hızıdır (km/sn).

Süreksizlik içeren kaya kütlelerinin izin verilebilir taşıma gücü Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre Wyllie (1992) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmektedir.

$$q_a = \frac{C_{f1} s^{0.5} \sigma_{ci} \left[1 + (m_b s^{0.5} + 1)^{0.5} \right]}{G_s} \quad (83)$$

Burada; q_a : izin verilebilir taşıma gücü (MPa), m_b ve s : kaya kütle sabitleri, σ_{ci} : kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), C_{f1} : düzeltme faktörü ve G_s : güvenlik sayısıdır.

Düzeltilme faktörü (C_{f1}), Tablo 3.76'daki temel şekline bağlı olarak değişen değerlerden, Güvenlik sayısı (G_s) ise Tablo 3.77'deki yapının özelliğine ve temelde meydana gelecek yenilmenin sonuçlarına bağlı olan tanımlamalardan belirlenmektedir. Bu çalışmada, inşa edilmesi planlanan viyadük ve köprü temel tabanı şeklinin kare olacağı varsayılmış ve C_{f1} : 1.25 olarak alınmıştır.

Tablo 3.76. Temel şekline bağlı düzeltme faktörü (C_{f1}) (Wyllie, 1992)

| Temel şekli | C_{f1} |
|---------------------|----------|
| Şerit ($L/B > 6$) | 1 |
| Dikdörtgen | |
| $L/B=2$ | 1.12 |
| $L/B=5$ | 1.05 |
| Kare | 1.25 |
| Dairesel | 1.2 |

Tablo 3.77. Yapı türlerine ve zemin araştırmalarının niteliğine göre güvenlik sayıları (Gs) (Winkerton ve Fang, 1975)

| Sınıf | Tipik yapılar | Sınıf özellikleri | Zemin araştırmaları (Gs) | |
|-------|--|---|--------------------------|---------|
| | | | Mükemmel, tamamlanmış | Sınırlı |
| A | Demiryolu köprüleri, ambarlar, yüksek fırınlar, istinat duvarları, silolar | En büyük tasarım yükü uygulanır (duraysızlık çok kötü sonuçlara neden olur) | 3 | 4 |
| B | Otoyol köprüleri, hafif sanayi yapıları, işyeri binaları | En büyük tasarım yükü uygulanmaz (duraysızlık ciddi sonuçlar doğurur) | 2.5 | 3.5 |
| C | Apartman, resmi binalar | En büyük tasarım yükü uygulanmaz | 2 | 3 |

Süreksizlik içeren kaya kütlelerinin nihai taşıma gücü Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre Kulhawy ve Carter (1992) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenebilmektedir.

$$q_u = \sigma_{ci} \left[s^a + (m_b s^a + s)^a \right] \quad (84)$$

Burada; q_u : nihai taşıma gücü (MPa), m_b , s ve a : kaya kütle sabitleri, σ_{ci} : kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımıdır (MPa).

Bieniawski (1989) tarafından önerilen RMR sistemi, izin verilebilir taşıma gücünün belirlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Bu amaçla Mehrotra (1992) temel RMR puanı bilinen kaya kütlelerinin izin verilebilir taşıma gücünü belirlemeye yönelik Tablo 3.78'de verilen taşıma gücü aralıklarını önermiştir. A2 ve D1 jeoteknik birimlerinin izin verilebilir taşıma gücünü, temel RMR puan aralıkları arasına karşılık gelen taşıma gücü değerlerinin interpolasyon yapılmasıyla belirlenmiştir.

Tablo 3.78. Kaya kütleleri için RMR puanına göre izin verilebilir taşıma gücü (Mehrotra, 1992)

| Sınıf No | I | II | III | IV | V |
|--|--------------|----------|-----------|------------|----------------|
| Tanımlama | Çok iyi kaya | İyi kaya | Orta kaya | Zayıf kaya | Çok zayıf kaya |
| Puan | 100-81 | 80-61 | 60-41 | 40-21 | 20-0 |
| İzin verilebilir taşıma gücü, q_a (tonf/m ²) | 600-440 | 440-280 | 280-135 | 135-45 | 45-30 |

Serrano vd. (2000), Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre süreksizlik içeren kaya kütlelerinin nihai taşıma gücünü belirlemek için aşağıdaki eşitlikleri önermiştir.

$$q_u = \beta_n (N_\beta - \zeta_n) \quad (85)$$

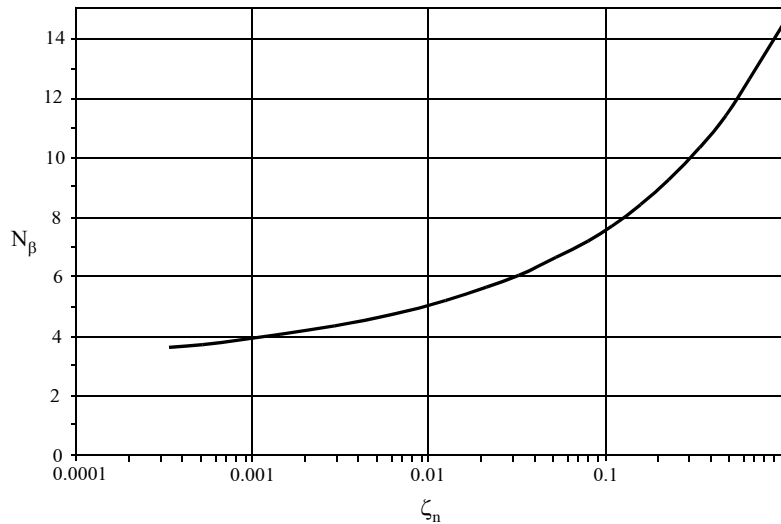
$$\beta_n = \sigma_{ci} A_n \quad (86)$$

$$\zeta_n = \frac{s}{m_b A_n} \quad (87)$$

$$A_n = \left(\frac{m_b (1-a)}{2^{1/a}} \right)^{a/(1-a)} \quad (88)$$

Burada; q_u : nihai taşıma gücü (MPa), m_b ve a : kaya kütle sabitleri, σ_{ci} : kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), β_n : dayanım modülü, ζ_n : kaya kütlelerinin sıklığı ve N_β : normalleştirilmiş iç yüke bağlı bir fonksiyondur.

N_β değeri Şekil 3.62’de verilen grafik yardımıyla belirlenmektedir.



Şekil 3.62. Süreksizlik içeren kaya kütleleri için taşıma gücü faktörü (Serrano vd., 2000)

Subaşı Viyadüğü'nün ve 7 Nolu Köprü'nün inşa edileceği kaya kütlelerine kontrollü patlatma ve mekanik kazı uygulanacağı için örselenme faktörü D: 0.7 alınmış ve taşıma gücü hesaplamalarında kullanılacak parametreler hesap edilmiştir. Yukarıda anlatılan yöntemlere göre belirlenen A2 ve D1 jeoteknik birimlerine ait MPa cinsinden izin verilebilir taşıma gücü değerleri Tablo 3.79'da özet olarak verilmiştir. Hesaplanan izin verilebilir taşıma gücüne ait veri seti içinde çok büyük ve çok küçük değerler bulunduğundan, ortalamanın bu değerlerden etkilenmemesi için aritmetik ortalama yerine geometrik ortalama kullanılmış ve ortalama q_a değerleri belirlenmiştir.

Tablo 3.79. Taşıma gücü hesaplamalarında kullanılan parametreler ve A1 ve D1 jeoteknik birimleri için farklı yöntemlerle belirlenmiş izin verilebilir taşıma gücü değerleri

| | Jeoteknik birimler | |
|--|--------------------|--------|
| | A2 | D1 |
| Temel RMR | 43.6 | 47.1 |
| σ_{ci} (MPa) | 72.79 | 60.98 |
| RQD (%) | 60 | 73 |
| DF (%) | 72 | 62 |
| V_p (m/sn) | 3182 | 1492 |
| D | 0.7 | 0.7 |
| m_b | 1.50 | 1.82 |
| s | 0.0055 | 0.0077 |
| a | 0.515 | 0.511 |
| C_{f1} | 1.25 | 1.25 |
| G_s | 3.5 | 3.5 |
| N_β | 5.8 | 5.9 |
| A_n | 0.174 | 0.216 |
| β_n | 12.68 | 13.15 |
| ζ_n | 0.0210 | 0.0224 |
| İzin verilebilir taşıma gücü değerleri (q_w MPa) | | |
| Peck vd. (1974) | 20.38 | 23.17 |
| Imai vd. (1976) | 9.37 | 0.97 |
| Wyllie (1992) | 3.96 | 4.25 |
| Kulhawey ve Carter (1992) | 8.05 | 8.61 |
| Mehrotra (1992) | 15.48 | 18.92 |
| Serrano vd. (2000) | 20.94 | 22.08 |
| Ortalama q_a | 11.20 | 8.37 |
| En büyük | 20.94 | 23.17 |
| En küçük | 3.96 | 0.97 |
| Std. Sp. | 6.97 | 9.61 |

3.10. Jeoteknik Birimlerin Kazılabilirlik Sınıflama Sistemlerine Göre Değerlendirilmesi

Kazılabilirlik, kayaçların buldukları yerden kazı ekipmanları ile ne ölçüde koparılabildiklerinin, sökülebilirlik ise ripperli dozer ile ne ölçüde sökülerek parçalanabileceğinin göreceli ifadesidir (Ceylanoğlu vd., 2007). Yeraltı ve yerüstü kazılarında doğru kazı yönteminin ve ekipmanın seçilmesi kayaların kazılabilirlik özelliklerine bağlıdır. Kayaların kazılabilirlik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılacak doğru çalışmalar, mühendislik projelerinin uygulanabilirliğine katkı sağlayacaktır. Kaya kütlelerinin jeoteknik özelliklerinin iyi bir şekilde değerlendirilmesi ve buna uygun kazı yönteminin belirlenmesi, kazı sırasında karşılaşılabilecek problemleri ve kazı maliyetini en aza indirecektir. Bu nedenle birçok araştırmacı, kayaların malzeme ve kütle özelliklerinden yola çıkarak kazılabilirliği belirlemeye yönelik ön tasarım amaçlı birçok ampirik kazılabilirlik ve sökülebilirlik sınıflama sistemi geliştirmiştir (Franklin vd., 1971; Atkinson, 1971; Bailey, 1975; Weaver, 1975; Kirsten, 1982; Abdullatif ve Cruden, 1983; Scoble ve Müftüoğlu, 1984; Singh vd., 1986; Smith, 1986; Bozdağ, 1988; Paşamehmetoğlu vd., 1988; Karpuz, 1990; Pettifer ve Fookes, 1994; Hoek ve Karzulovic, 2000; Ceylanoğlu vd., 2007; Tsiambaos ve Saroglou, 2009). Geliştirilen bu sistemlerin çoğu arazi gözlemlerinden, laboratuvar deneylerinden ve yerinde yapılan deneme kazılarından elde edilen verilere dayanmaktadır.

Kaya ortamında yüzeyden derine doğru gidildikçe bozunma etkisinin azalmasına bağlı olarak kazılmaya karşı gösterilen direnç artmaktadır. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemlerinin birçoğunda süreksizlik yüzeyinin bozunma derecesi, pürüzlülüğü, su durumu, dolgu durumu ve açıklığı gibi yüzeysel şartlardan kolaylıkla etkilenen girdi parametreleri kullanılmaktadır. Yeraltı kazıları için bu parametreleri kullanarak kazı yöntemini belirlemeye çalışmak çoğu zaman uygulama aşamasında soruna yol açmaktadır.

Kaya vd. (2011) yüzey kazıları için uygulamada yaygın olarak kullanılan Franklin vd. (1971), Kirsten (1982), Abdullatif ve Cruden (1983), Pettifer ve Fookes (1994), Hoek ve Karzulovic (2000), Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemlerinin yeraltı kazılarında uygulanabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla yerinde yapılan kazı yöntemleri ile kazılabilirlik sınıflama sistemlerine göre belirlenen kazı yöntemlerini karşılaştırmış ve Pettifer ve Fookes (1994) ile Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazı yöntemlerinin, yerinde uygulanan kazı yöntemleriyle birebir

uyuştuğunu belirlemiştir. Yeraltı kazılarında kaya kütlesinin kazılabilirlik özelliği blok boyutu ve kaya malzemesinin dayanımı tarafından kontrol edilmektedir. Bu parametrelerin kullanıldığı kazılabilirlik sınıflama sistemlerine göre kazı yöntemini belirlemek uygulama aşamasında daha iyi sonuçlar vermekte ve projenin uygulanabilirliğine katkıda bulunmaktadır. Bu iki kazılabilirlik sistemi de GSI, $I_{s(50)}$ ve I_f değişkenlerini etkin olarak kullandığından yüzey kazılarının yanı sıra yeraltı kazıları için de uygulanabilir özelliktedir (Kaya vd., 2011).

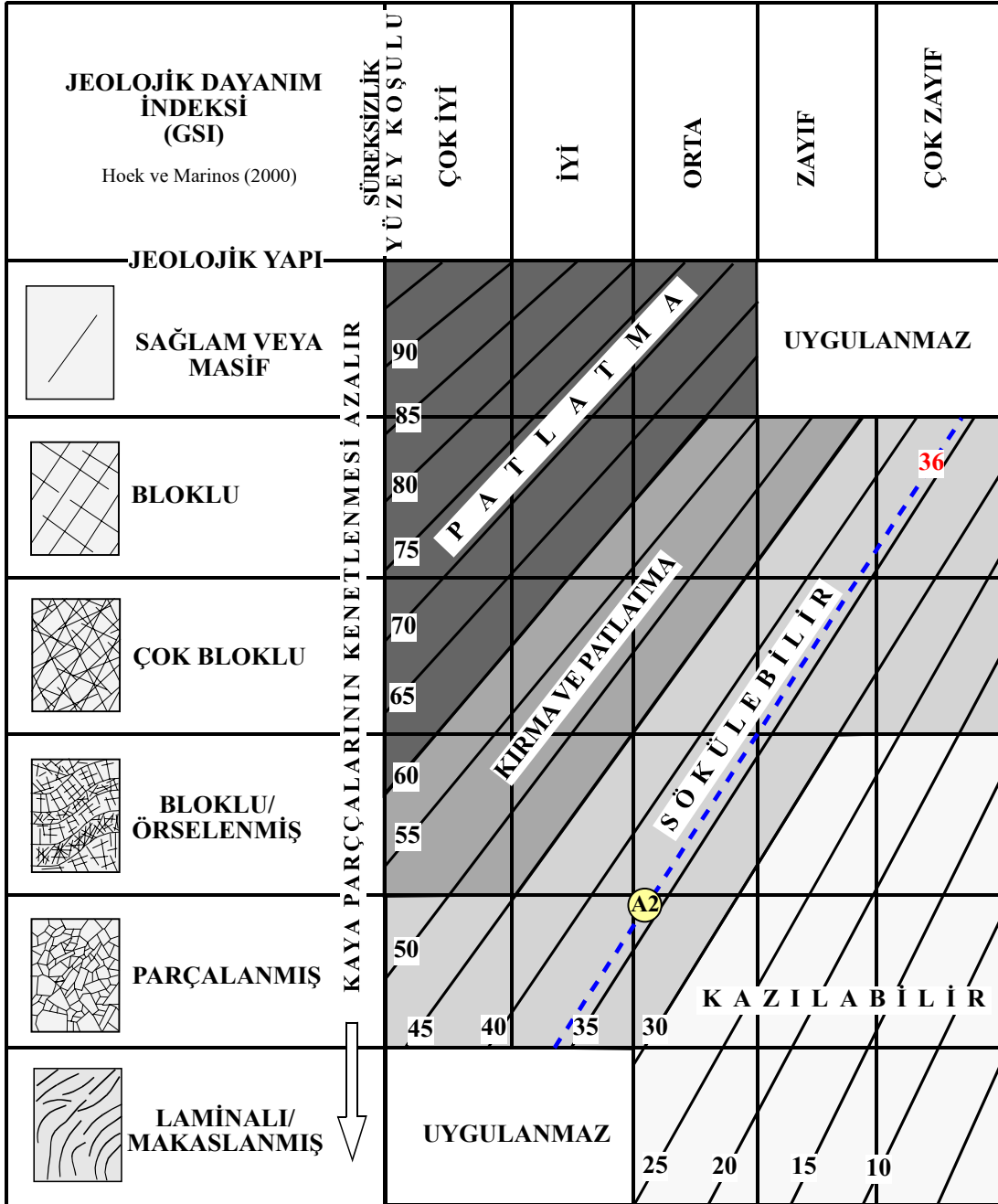
Bu çalışmada, Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimlerin kazılabilirlik özelliklerini belirlemek için Pettifer ve Fookes (1994) ile Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemlerinden yararlanılmıştır.

Pettifer ve Fookes (1994) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sisteminde girdi parametresi olarak süreksizlik aralık indeksi (I_f) ve nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)}$) değerleri kullanılmaktadır. Süreksizlik aralık indeksi (I_f), hacimsel eklem sayısından (J_v) yararlanılarak üç süreksizlik takımı içeren kaya kütleleri için ISRM (1981) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmektedir.

$$I_f = \frac{3}{J_v} \quad (89)$$

Pettifer ve Fookes (1994) tarafından önerilen sınıflandırmaya göre A1, B1, B2 ve D1 jeoteknik birimleri “kolay sökülebilir”, A2 jeoteknik birimi “zor sökülebilir”, C1 jeoteknik birimi ise “zor kazılabilir” kaya sınıflarındandır (Şekil 3.63).

Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sisteminde girdi parametresi olarak GSI ve $I_{s(50)}$ parametreleri kullanılmaktadır. $I_{s(50)} \geq 3$ MPa ve $I_{s(50)} < 3$ MPa koşuluna göre kaya kütlelerini kazılabilirlik açısından değerlendirmek için iki farklı GSI abağı önerilmiştir. A1, B1, B2, C1 ve D1 jeoteknik birimlerinin kazı sınıfını belirlemek için $I_{s(50)} < 3$ MPa koşuluna göre önerilmiş GSI abağı, A2 jeoteknik birimi için ise $I_{s(50)} > 3$ MPa koşuluna göre önerilmiş GSI abağı kullanılmıştır. Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen sınıflandırmaya göre A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimleri “sökülebilir”, B1 ve C1 jeoteknik birimleri ise “kazılabilir” kaya sınıfındadır (Şekil 3.64 ve 3.65).



Şekil 3.65. A2 jeoteknik biriminin Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi ($I_{s(50)} > 3$ MPa)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Hopa-Borçka karayolunun 7+980-13+208 kilometreleri arasında çift tüp olarak inşa edilmesi planlanan Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tüneli'nin proje güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimler mühendislik jeolojisi açısından incelenmiştir. Yapılan jeoteknik çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

1. Çalışma alanı ve yakın çevresindeki birimlerin tanınması ve jeolojik modelin oluşturulması amacı ile önceki çalışmalardan yararlanarak 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası hazırlanmıştır. Çalışma alanı ve çevresinde bulunan kayalar, litostratigrafik sınıflama ve adlama kuralları (NACS, 1983) esas alınarak tanımlanmış ve yaşlıdan gence doğru aşağıdaki birimler ayrılmıştır;

- Tabanda piroklastitlerle başlayıp kireçtaşı, marn, kumtaşı, tuf, silttaşı arakatlıları içeren ve tavana doğru tekrar piroklastit seviyesi ile son bulan Geç Kretase yaşlı Subaşı Sırtı Formasyonu,
- Tabanda ve tavanda ince tabakalanmalı marn ara seviyeleri içeren, orta kısmında ise tamamen kireçtaşından oluşan Geç Maastrichtiyen-Paleosen yaşlı Cankurtaran Formasyonu,
- Yer yer ince-orta tabakalanmalı kiltası ara seviyeleri içeren ve marnlardan oluşan Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı Formasyonu,
- Tabanda kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve marn tabakaları içeren andezit-bazalt ve piroklastitlerinden oluşan Eosen yaşlı Kabaköy Formasyonu,
- Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ve yamaç molozları.

2. Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan kayalar litolojik ve jeoteknik özelliklere dayanan sınıflama sistemleri kullanılarak dört litolojik ve altı jeoteknik birime ayrılmıştır. Bunlardan, Subaşı Sırtı Formasyonuna ait volkano-tortul kayalar A litolojik birimi, Cankurtaran Formasyonu'na ait marn arakatlı kireçtaşlarından oluşan birim B litolojik birimi, Şenkaya Sırtı Formasyonu'na ait yer yer kiltası arakatlı marnlardan oluşan birim C litolojik birimi, Kabaköy Formasyonu'na ait bazaltlardan oluşan birim ise D litolojik birimi olarak tanımlanmıştır. A litolojik birimi kendi içerisinde A1 ve A2, B litolojik birimi de B1 ve B2 jeoteknik birimlerine ayrılmıştır.

3. Jeoteknik birimlerde açılan temel sondajlarından, A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerinde belirli bir metreye kadar kazılmış tünelin duvarlarında ve mostralarda yapılan hat etüdü yönteminden yararlanılarak süreksizliklerin özellikleri ile su durumu araştırılmış ve sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

➤ A1 ve A2 jeoteknik birimlerindeki eklem türü süreksizliklerin yakın ara uzaklıklı, açık, orta derecede devamlı, dalgalı pürüzlü, az bozunmuş, kil ve silt ile yer yerde 1-1.5 mm kalınlığında kalsit ile dolgulu olduğu ve damlama-sızıntı halinde su akışının mevcut olduğu tespit edilmiştir.

➤ A2 jeoteknik birimindeki tabaka türü süreksizliklerin yakın ara uzaklıklı, açık, çok yüksek devamlı, dalgalı düz, bozunmamış, kil ve silt ile yer yer 0.5-1 mm kalınlığında kalsit ile dolgulu olduğu ve damlama-sızıntı halinde su akışının mevcut olduğu belirlenmiştir.

➤ B1 ve B2 jeoteknik birimlerindeki eklem türü süreksizliklerin yakın ara uzaklıklı, açık, orta derecede devamlı, dalgalı pürüzlü, az bozunmuş, 0.5-1 mm kalınlığında kil ile yer yer de kalsit ile dolgulu olduğu ve damlama-sızıntı halinde su akışının mevcut olduğu saptanmıştır.

➤ B1 jeoteknik birimindeki tabaka türü süreksizliklerin yakın ara uzaklıklı, geniş, çok yüksek devamlı, dalgalı düz, az bozunmuş, 1-1.5 cm kalınlığında oldukça yumuşak marn ile dolgulu olduğu ve damlama-sızıntı halinde su akışının mevcut olduğu tespit edilmiştir.

➤ B2 jeoteknik birimindeki tabaka türü süreksizliklerin yakın ara uzaklıklı, sıkı, çok yüksek devamlı, dalgalı düz, az bozunmuş, dolgusuz ve damlama-sızıntı halinde su akışının mevcut olduğu belirlenmiştir.

➤ C1 jeoteknik birimindeki eklem türü süreksizliklerin dar ara uzaklıklı, açık, orta derecede devamlı, dalgalı pürüzlü, az bozunmuş, çok ince kil sıvaması ile dolgulu olduğu ve damlama-sızıntı halinde su akışının mevcut olduğu saptanmıştır.

➤ C1 jeoteknik birimindeki tabaka türü süreksizliklerin dar ara uzaklıklı, açık, çok yüksek devamlı, düzlemsel pürüzlü, az bozunmuş, çok ince kil sıvaması ile dolgulu olduğu ve damlama-sızıntı halinde su akışının mevcut olduğu tespit edilmiştir.

➤ D1 jeoteknik birimindeki eklem türü süreksizliklerin yakın ara uzaklıklı, orta derecede geniş, orta derecede devamlı, dalgalı pürüzlü, az bozunmuş, 1-2 mm kalınlığında kil ve silt türü malzeme ile dolgulu olduğu ve damlama-sızıntı halinde su akışının mevcut olduğu saptanmıştır.

4. A1, B2 ve D1 jeoteknik birimlerinin, süreksizlik sıklığı değerlerine göre “kırıklı-çatlaklı”, A2 ve B1 jeoteknik birimlerinin “çok kırıklı-çatlaklı”, C1 jeoteknik biriminin ise “parçalanmış” özellikte kaya kütlesi olduğu tespit edilmiştir.

5. Jeoteknik birimlere ait süreksizlik sıklığı değerleri kullanılarak RQD değerleri hesaplanmıştır. A1 jeoteknik birimi % 84, B2 jeoteknik birimi % 88 RQD değerleri ile “iyi kaliteli” kaya sınıfına; A2 jeoteknik birimi % 60, B1 jeoteknik birimi % 62, D1 jeoteknik birimi % 73 RQD değeri ile “orta kaliteli” kaya sınıfına; C1 jeoteknik birimi ise % 3 RQD değeri ile “çok zayıf kaliteli” kaya sınıfına girmektedir.

6. Jeoteknik birimlerdeki süreksizlik takımlarına ait ara uzaklık değerlerinden yararlanılarak bulunan hacimsel eklem sayısı değerlerine göre; A1, B2, ve D1 jeoteknik birimlerinin “yüksek”, A2 ve B1 jeoteknik birimlerinin “çok yüksek”, C1 jeoteknik biriminin ise “aşırı derecede yüksek” hacimsel eklem sayısına sahip kaya kütlesi olduğu belirlenmiştir.

7. Cankurtaran Tüneli'nin giriş portal şevi A1 jeoteknik biriminde, çıkış portal şevi D1 jeoteknik biriminde, giriş bölümündeki yol yarması şevi A2 jeoteknik biriminde, çıkış bölümündeki yol yarması şevi ise D1 jeoteknik biriminde açılacaktır. Bu jeoteknik birimlerindeki süreksizliklerin yüzeylerine ait kayma dayanımı parametreleri, Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen yenilme ölçütü yardımıyla belirlenmiştir. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerindeki süreksizliklere ait doruk içsel sürtünme açısı değerlerinin sırasıyla 32°, 38° ve 36°; doruk kohezyon değerlerinin ise sırasıyla 0.064 MPa, 0.036 MPa ve 0.045 MPa olduğu saptanmıştır.

8. Kaya bloklarından ve sondaj karotlarından hazırlanan örnekler üzerinde çalışmanın amacına uygun fiziko-mekanik deneyler yapılarak, birim hacim ağırlık, Schmidt çekici geri tepme sayısı, nokta yükü dayanım indeksi ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

A1 jeoteknik birimindeki kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık değerlerinin 24.67-26.73kN/m³ arasında, A2 jeoteknik biriminde 20.80-24.67kN/m³ arasında, B1 ve B2 jeoteknik biriminde 25.89-23.55kN/m³ arasında, C1 jeoteknik biriminde 18.95-24.73 kN/m³ arasında, D1 jeoteknik biriminde ise 18.95-24.73 kN/m³ arasında değiştiği saptanmıştır.

A1 jeoteknik birimindeki taze kaya ve süreksizlik yüzeylerine ait Schmidt çekici geri tepme sayısı değerlerinin 28-36 arasında, A2 jeoteknik biriminde 38-42 arasında, B1 ve B2

jeoteknik biriminde 36-48 arasında, C1 jeoteknik biriminde 17-24 arasında, D1 jeoteknik biriminde ise 36-44 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

A1 jeoteknik birimindeki kaya malzemelerine ait nokta yük dayanım indeksi değerlerinin 0.12-4.28 MPa arasında, A2 jeoteknik biriminde 1.38-12.70 MPa arasında, B1 ve B2 jeoteknik biriminde 0.62-4.73 MPa arasında, C1 jeoteknik biriminde 0.28-2.82 MPa arasında, D1 jeoteknik biriminde ise 1.29-11.91 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir.

A1 jeoteknik birimindeki kaya malzemelerine ait tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin 3.10-85.70 MPa arasında, A2 jeoteknik biriminde 27.59-253.95 MPa arasında, B1 ve B2 jeoteknik biriminde 5.37-56.31 MPa arasında, C1 jeoteknik biriminde 0.28-2.82 MPa arasında, D1 jeoteknik biriminde ise 25.83-238.26 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir.

9. Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan kaya kütleleri RMR, Q, RMi, NATM ve GSI kaya kütle sınıflama sistemlerine göre sınıflandırılmış ve sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

➤ Jeoteknik birimlere ait düzeltilmiş RMR değerleri 18.4-29.7 arasında değişmekte olup, bu değerlere göre kaya sınıfı “ok zayıf” ile “zayıf” arasındadır.

➤ Jeoteknik birimlere ait Q değerleri 0.015-0.70 arasında değişmekte olup, bu değerlere göre kaya sınıfı “son derece zayıf” ile “ok zayıf” arasındadır.

➤ Jeoteknik birimlere ait RMi değerleri 0.04-1.16 arasında değişmekte olup, bu değerlere “orta” ile “oldukça düşük” arasındadır.

➤ Nihai RMR değerlerine göre jeoteknik birimlere ait NATM kaya sınıfı “C₁” ile “B₂” arasında, Q değerlerine göre ise “C₃” ile “B₃” arasında değişmektedir.

➤ Jeoteknik birimlere ait GSI değerleri 24-46 arasında değişmekte olup, bu değerlere göre kaya sınıfı “parçalanmış” ile “bloklu / örselenmiş” arasındadır.

10. Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimlere ait Poisson oranı (ν) değerleri 0.1-0.46 arasında, deformasyon modülü (E_m) değerleri 0.65-2.61 GPa arasında, tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}) değerleri 1.36-5.98 MPa arasında, m_b değerleri 0.41-3.36 arasında, s değerleri 0.0022-0.017 arasında, a değerleri 0.533-0.508 arasında, m_{br} değerleri 1.41-0.32 arasında, s_r değerleri 0.00007-0.00017 arasında, a_r değerleri ise 0.54-0.57 arasında değişmektedir.

11. Cankurtaran Tüneli’nde uygulanacak n destekleme elemanları Q ve RMi sistemlerine göre belirlenmiş ve bu destek elemanlarının deformasyonları ne ölçüde azalttıkları sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılarak destek elemanlarının

uygulanabilirlikleri incelenmiştir. Yapılan sayısal analizler sonucunda tünel kazı kesitinde kayma ve çekme gerilmelerinin en çok tavanda ve tabanda yoğunlaştığı saptanmıştır. Tünelin giriş bölümündeki A1 jeoteknik birimi ile tünel güzergahının orta bölümündeki A2 ve C1 jeoteknik birimleri R_{Mi} sistemine göre; tünel güzergahının orta bölümündeki B1 jeoteknik birimi ile çıkış bölümlerindeki D1 jeoteknik birimi ise Q sistemine göre desteklendiğinde plastik zonun destek zonunun içinde kaldığı ve duraylılık sorununun meydana gelmeyeceği tespit edilmiştir. Ancak, tünel portalları duraylılık açısından riskli bölümler arasında olduğu için güvenli tarafta kalmak amacıyla buralara ek desteklemenin yapılması, iş güvenliği açısından faydalı olacaktır.

12. Cankurtaran Tüneli'nin giriş ve çıkış bölümlerinde başlatılan kazıyla şuan için sadece A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerinde belirli bir metreye kadar ilerlenilmiştir. Bu jeoteknik birimler, NATM'a göre B₃ sınıfı için önerilen destekleme elemanlarıyla desteklenmiştir. A1 ve D1 jeoteknik birimlerinin tünelin portal kesimlerinde olduğu dikkate alındığında, duraylılığın sağlanması açısından yapılan destekleme ile güvenli tarafta kalındığı görülmektedir.

13. Destekleme sonrası duruma ait toplam yerdeğiştirme değerlerinin oldukça düşük olmasına rağmen tünel güzergahının orta bölümünde ve Nogohe Tepe civarında yüzeylenen A1 jeoteknik biriminde ve tünel güzergahının orta bölümde yüzeylenen B2 jeoteknik biriminde, destekleme sonrası oluşan plastik zon, destek zonunun dışında kalmıştır. Bu bölümlerde kazı sonrası oluşan kayma ve çekme gerilmeleri, sol tüpün sol omuzunda; sağ tüpün ise sağ omuzunda yoğunlaşarak destek zonunu geçmiştir. Bu bölümlerde duraylılık problemlerinin meydana gelme olasılığı yüksektir. Bu nedenle duraylılık sorunu beklenen bu bölümler, doğru destek elemanlarının belirlenmesi açısından yeniden analiz edilmiş ve uygun destek elemanları belirlenmiştir.

13. Yapılan sayısal analizler sonucunda, ampirik ön destek tasarımının derin yeraltı kazılarında deformasyonları azaltmada yeterli olmadığı ve sayısal analizlerle desteklenmesi gerektiği saptanmıştır. Ayrıca, sayısal analizler için kullanılan girdi parametrelerinin, açılan az sayıdaki temel sondajlarından ve mostra ölçümlerinden elde edildiği ve kaya kütle özelliklerinin tünel kotunda daha iyi olabileceği göz ardı edilmemelidir.

14. Cankurtaran Tünel güzergahında bulunan fay zonlarında temel sondaj kuyuları açılmadığı için buradaki kaya kütlelerine ait mühendislik özelliklerin tünel kazı derinliğinde nasıl değiştiği belirlenememiştir. Bu sebeple, fay zonları için ön destek

tasarımı yapılamamıştır. Bu zonların kazı esnasında yerinde yapılacak jeoteknik çalışmalara göre desteklenmesi tünelin duraylılığının sağlanması açısından daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Kazı işleminin ilerletilmesi ile ayna ilerisindeki fay zonlarının belirlenmesi açısından belirli aralıklarla deformasyon ölçümleri alınmalıdır. Bu zonlar uygun kazı yöntemi ile kazılarak, destekleme elemanları gecikmeden yerleştirilmelidir.

15. Cankurtaran Tüneli'nin güzergahı, Kordon Tepe Antiklinali'nin sağ kanadında yer almaktadır. Tünel güzergahı, orta kısımlara doğru kavis yaparak antiklinalin eksenine doğru yaklaşmaktadır. Kanatlarda açılan tünelin duvarlarına asimetric basınçlar geleceğinden buralarda aşırı sökülmenin gelişmesi olasıdır. Kordon Tepe Antiklinali'nin eksenine yakın kısımda, B2 jeoteknik birimi yer aldığından bu birimde yapılacak desteklemenin üzerine gelen basınç az olacak ve kemerlenmeden dolayı tünelin duraylılığına olumlu yönde katkıda bulunacaktır.

16. Cankurtaran Tüneli'nin giriş ve çıkış bölümlerinde açılması planlanan portal ve yol yarma şevlerinin duraylılığı kinematik ve limit denge analizleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan kinematik analizler sonucunda yalnızca çıkış bölümündeki portal şevinde 68/200 ve 33/109 yönelimli eklem setlerinin kama tipi kayma oluşturma olasılığının olduğu belirlenmiştir. Limit denge analizi sonucunda ise, güvenlik sayısı değerinin G_s : 10.58 gibi yüksek bir değerde olduğu ve kama tipi kaymanın beklenmediği saptanmıştır.

17. Cankurtaran Tüneli'nin giriş ve çıkış bölümlerinde açılması planlanan portal ve yol yarma şevlerinde gelişebilecek dairesel kayma türü duraysızlıkları belirlemek için sayısal analizler yapılmıştır. Yapılan sayısal analizler sonucunda giriş bölümünde açılacak portal ve yol yarma şevlerine ait kritik SRF değerlerinin sırasıyla 1.35, 2.66 ve 4.56, çıkış bölümünde açılacak portal ve yol yarma şevlerine ait kritik SRF değerlerinin ise sırasıyla 2.63 ve 1.89 olduğu belirlenmiştir. Giriş ve çıkış bölümünde açılacak şevlere ait SRF değerleri incelendiğinde, yalnızca giriş bölümündeki portal şevinde dairesel kayma türü duraysızlığın gerçekleşme riskinin olduğu saptanmıştır.

Giriş bölümünde açılacak portal şevindeki duraysızlık sorununun giderilmesi için sayısal analizler yapılarak destekleme önerileri yapılmıştır. Analizlerde destekleme elemanları olarak püskürtme beton, çelik hasır ve bulon kullanılmıştır. 30 cm kalınlığında çift kat çelik hasırlı püskürtme beton ve tünel tavan seviyesinden itibaren şev aynasına 0.8 m aralıklı 8 m uzunluğunda bulon uygulamasından sonra SRF değeri 1.35'den 1.83'e çıkmış ve portal şevi duraylı hale gelmiştir.

16. Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümüne Subaşı Viyadüğü, çıkış bölümüne ise 7 Nolu Köprü inşa edilerek hemzemin kavşaklara bağlantı yapılması planlanmaktadır. Subaşı Viyadüğü A2 jeoteknik birimine ait tortul birimlerin üzerine, 7 Nolu Köprü ise D1 jeoteknik birimine ait bazaltların üzerine inşa edilecektir. Peck vd. (1974), Imai vd. (1976), Wyllie (1992), Kulhawy ve Carter (1992), Mehrotra (1992) ve Serrano vd. (2000) tarafından önerilmiş ampirik yöntem ve eşitliklerden yararlanılarak belirlenen izin verilebilir taşıma gücü; A2 jeoteknik birimi için q_a : 11.20 MPa olarak, D1 jeoteknik birimi için ise q_a : 8.37 MPa olarak belirlenmiştir.

17. Cankurtaran Tünel güzergahında ve çevresinde yer alan jeoteknik birimlerin kazılabilirlik özelliklerini belirlemek için Pettifer ve Fookes (1994) ve Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen kazılabilirlik sınıflama sistemlerinden yararlanılmıştır. Pettifer ve Fookes (1994) tarafından önerilen sınıflandırmaya göre A1, B1, B2 ve D1 jeoteknik birimleri “kolay sökülebilir”, A2 jeoteknik birimi “zor sökülebilir”, C1 jeoteknik birimi ise “zor kazılabilir” kaya sınıfındadır. Tsiambaos ve Saroglou (2009) tarafından önerilen sınıflandırmaya göre A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimleri “sökülebilir”, B1 ve C1 jeoteknik birimleri ise “kazılabilir” kaya sınıfındadır.

Yapılan analizler sonucunda A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimlerinin hidrolik kırıcıyla sökülebilir, B1 ve C1 jeoteknik birimlerinin ise kepçeyle kazılabilir özellikte olduğu belirlenmiştir. A1, A2 ve D1 jeoteknik birimlerinde hem yüzey hem de yeraltı kazısı; B1, B2 ve C1 jeoteknik birimlerinde ise sadece yeraltı kazısı yapılacaktır. Bu nedenle, hidrolik kırıcı kullanılarak sökme işleminin yapılacağı A1, A2, B2 ve D1 jeoteknik birimlerinde kontrollü patlatma yaparak kazı işlemini yürütmek hızlı ilerleme açısından faydalı olacaktır.

5. KAYNAKLAR

- Abdullatif, O., M. ve Cruden, D., M., 1983. The Relationship Between Rock Mass Quality and Ease Of Excavation, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 28, 183-187.
- Ağar, Ü., 1977. Demirözü (Bayburt) ve Köse (Kelkit) Bölgesinin Jeolojisi, Doktora Tezi, İ.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akın, H., 1978. Geologie, Magmatismus und Lager-Staettenbidung im Ostpontischen Gebirge-Turkei aus der Sicht der Plattentektonik, Geologische Rundschau, 68, 253-283.
- Aliyazıcıoğlu, İ., 1999. Kale (Gümüşhane) Yöresi Volkanik Kayaçlarının Petrografik, Jeokimyasal ve Petrolojik İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Anon., 1976. Engineering Geological Maps, A Guide to Their Preparation, UNESCO Publishing House, Paris, 79 s.
- Arslan, M. ve Aslan, Z., 2006. Mineralogy, Petrography and Whole-Rock Geochemistry of Tertiary Granitic Intrusion in the Eastern Pontides, Turkey, Journal of Asian Earth Sciences, 27, 177-193.
- Aslan, Z., Arslan, M. ve Şen, C., 1999. Doğu Pontid'lerin Kuzey ve Güney Zonlarında Yüzeyleyen Eosen Yaşlı Granitik Sokulumların Karşılaştırılmalı Jeolojik, Petrografik ve Jeokimyasal Özellikleri, 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Mayıs, Ankara, Bildiriler Kitabı: 223-230.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 2005. Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, ASTM Publications, 7 s.
- Atkinson, T., 1971. Selection of Open-Pit Excavating and Loading Equipment, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 80, A, 101-129.
- Aydan, O. ve Dalgic, S., 1998. Prediction of Deformation Behaviour of 3-Lanes Bolu Tunnels Through Squeezing Rocks of North Anatolian Fault Zone (NAFZ), International Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, November, Taipei, Taiwan, Proceedings book: 228-233.
- Bailey, A., D., 1975. Rock Types and Seismic Velocities Versus Rippability, Highway Geology Symposium, August, Idaho, USA, Proceedings book: 26, 135-142.
- Barton, N., R., 1973. Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints, Engineering Geology, 7, 287-332.

- Barton, N., Lien, R. ve Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics, 6, 189-239.
- Barton, N. ve Choubey, V., 1977. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mechanics, 10, 1-2, 1-54.
- Barton, N. ve Grimstad, E., 1994. The Q-System Following Twenty Years of Application in NTM Support Selection, Felsbau, 428-436.
- Barton, N., R., 2000. TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock, Balkema, Rotterdam, 169 s.
- Barton, N., R., 2002. Some New Q-value Correlations to Assist in Site Characterization and Tunnel Design, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science., 39, 1, 185-216.
- Bektaş, O., 1984. Pontidlerde Üst Kretase Yaşlı Şoşonitik Volkanizma ve Jeotektonik Önemi, K.T.Ü. Yerbilimleri Dergisi, 3, 1-2, 53-62.
- Bektaş, O., 1986. Paleostress Trajectories and Polyphase Rifting in Arc-Back of Eastern Pontides, MTA Bulletin, 103-104, 1-15.
- Bhasin, R. ve Grimstad, E., 1996. The Use of Stres-Strength Relationships in the Assessment of Tunnel Stability, Tunnelling and Underground Space Technology, 11, 1, 93-98.
- Bieniawski, Z., T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Transactions of South African Institution of Civil Engineering, 15, 335-344.
- Bieniawski, Z. T., 1979. The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications, ISRM 4th International Congress on Rock Mechanics, Balkema, September, Montreux, Boston, Proceedings book: 5, 55-95.
- Bieniawski, Z., T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York, 251 s.
- Boynukalın, S., 1990. Dereli (Giresun) Baraj Yeri ve Göl Alanının Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Kayaçlarının Jeomekanik Özellikleri, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bozdağ, T., 1988. Indirect Rippability Assessment of Coal Measure Rocks, MSc Thesis, M.E.T.Ü., The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Boztuğ, D., Wagner, G., A., Erçin, A., İ., Göç, D., Yegingil, Z., İskenderoglu, A., Kuruçelik, M.K., Kömür, İ. ve Güngör, Y., 2002. Sphene and Zircon Fission-Track Geochronology Unravelling Subduction and Collision-Related Magma Surges in the Composite Kaçkar Batholith, Eastern Black Sea Region, Turkey, 1st International Symposium of The Faculty of Mines (İTÜ) on Earth Sciences and Engineering, May, İstanbul, Turkey, Proceedings book:121 s.

- Cai, M., Kaiser, P., K., Tasaka, Y. ve Minami, M., 2007. Determination of Residual Strength Parameters of Jointed Rock Masses Using the GSI System, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 4, 2, 247-265.
- Çakıcı, H., 2005. Deriner (Artvin) Baraj Yeri Kaya Kütlesi Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology), 1977. Pit Slope Manual: Supplement 5-1, Plane Shear Analysis, CANMET Report, 16-77.
- Çapkinoğlu, Ş., 1981. Borçka-Çavuşlu (Hopa) Arasının Jeolojisi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ceylanoğlu, A., Gül, Y. ve Akin, A., 2007. Investigation of Diggability and Rippability Classification Systems and Proposition of a New Classification System (in Turkish), Mining Journal, 46, 2, 13-26.
- Chun, B., Lee, Y., Seo, D. ve Lim, B., 2006. Correlation of Deformation Modulus by PMT with RMR and Rock Mass Condition, Tunnelling and Underground Space Technology. 21, 3-4, 231-232.
- Çoğulu, E., 1975. Gümüşhane ve Rize Granitik Plütonlarının Mukayeseli Petrojeolojik ve Jeokronometrik Etüdü, Doçentlik Tezi, İ.T.Ü., Maden Fakültesi, İstanbul.
- Dearman, W., R., 1981. Engineering Geology of Carbonate Rocks, Symposium on Engineering Geological Problems of Construction on Soluble Rocks, Genel Report, Session 1, September, United Kingdom, Proceedings book: 24, 3-17.
- Deere, D., U., 1964. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposed, Rock Mechanics and Rock Engineering, 1, 17-22.
- Deere, D., U. ve Miller, R., P., 1966. Classification and Index Properties of Intact Rock, AF Special Weapons Centre, Kirtland Air Force Base, New Mexico, Technical Report: AFWL-TR-65-116.
- Eren, M., 1983. Gümüşhane-Kale Arasının Jeolojisi ve Mikrofasies İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ersoy, H., 2007. Trabzon İli Katı Atıkları İçin Düzenli Depolama Yeri Seçimi ve Önerilen Düzyurt Depolama Alanının Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ertunç, A., 1980. Çoruh Havzası Olası Baraj Yerleri, Göl Alanları ve Tünel Güzergahlarının Mühendislik Jeolojisi, E.İ.E. Yayını, Ankara, 80, 59.
- Eyüboğlu, I., 1978. Artvin-Arhavi-Kutunit (Tepeköy) Yöresinin Ayrıntılı Jeoloji Raporu, MTA, Derleme No: 605, Ankara.

- Franklin, J., A., Broch, E. ve Walton, G., 1971. Logging the Mechanical Character of Rock, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 80, A, 1-9.
- Fenner, R. 1938. Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdrucks, Glückauf, 74, 32, 681-695.
- Gedik, A., Ercan, T., Korkmaz, S. ve Karataş, S., 1992. Rize-Fındıklı-Çamlıhemşin Arasında (Doğu Karadeniz) Yer Alan Magmatik Kayaçların Petrolojisi ve Doğu Pontid'lerdeki Bölgesel Yayılımları, Türkiye Jeoloji Bülteni, 35, 15-38.
- Gedikoğlu, A., 1970. Etude Geologique de la Region de Gököy (Province D'Ordu-Turquie), PhD. Thesis, Faculte Des Sciences, DE l'Universite de Grenoble.
- Gedikoğlu, A., 1978. Harşit Granit Karmaşığı ve Çevre Kayaçları, Doçentlik Tezi, K.T.Ü., Yer Bilimleri Fakültesi, Trabzon.
- Gedikoğlu, A., Pelin, S. ve Özsayar, T., 1979. The Main Lines of Geotectonic Development in the East Pontids in the Mesozoic Era, Geocom, 1, 555-580.
- Ghose, A., K. ve Raju, N., M., 1981. Characterization of Rock Mass Vis-A-Vis Application of Rock Bolting in Indian Coal Measures, 22nd U.S. Symposium of Rock Mechanics, MIT, June, Cambridge, MA, Proceedings book: 422-427.
- Goel, R., K., 1994. Correlations for Predicting Support Pressures and Closures in Tunnels, PhD. Thesis, Nagpur University, Nagpur, India.
- Goel, R., K., Jethwa, J., L. ve Paithankar, A., G., 1995. Indian Experiences with Q and RMR Systems, Tunnelling and Underground Space Technology. 10, 1, 97-109.
- Gonzalez De Vallejo, L., I., 1983. A New Rock Classification System for Underground Assessment Using Surface Data, International Symposium on Engineering Geology, Underground Constructions, LNEC, September, Lisbon, Proceedings book: 1, 85-94.
- Gökçe, A., 2001. Çakmakaya ve Damarköy (Murgul-Artvin) Bakır Yataklarında Sıvı Kapanımı, Oksijen ve Hidrojen İzotopları Jeokimyası İncelemeleri ve Yatakların Oluşumu Açısından Düşündükleri, Türkiye Jeoloji Bülteni, 44, 2, 23-38.
- Grimstad, E. ve Barton, N., 1993. Updating The Q-System for NMT, International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet-Mix Sprayed Concrete for Underground Support, May, Norwegian Concrete Association, Oslo, Proceedings book: 44-66.
- Gündüz, Ö., 1999. Gümüşhane Köyü (Artvin-Ardanuç) Civarındaki Porfiri Cu-Au Cevherleşmesi ile Metazomatik Tip Cevherleşmelerin Jeolojisi, Mineralojisi ve Alterasyonu, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Güngör, Y., Boztuğ, D. ve Yılmaz, O., 1997. Kaçkar Batoliti Altıparmak Dağı-Soğanlı Dağı Arası (Çamlıhemşin-Rize) Kesiminin Petrografik, Jeokimyasal ve Petrojenetik İncelenmesi, Çukurova Üniversitesinde Jeoloji Mühendisliği Eğitiminin 20. Yılı Sempozyumu, Nisan, Adana, Bildiriler Kitabı: 223-224.
- Güven, İ., H., 1990. Artvin-Borçka Arasında Kalan Bölgenin Jeoloji ve Prospeksiyon Raporu, MTA , Ankara (yayımlanmamış).
- Güven, İ., H., 1993. Doğu Pontidler'in Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Komplikasyonu, MTA, Ankara (yayımlanmamış).
- Hoek, E. ve Brown, E., T., 1980. Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 s.
- Hoek, E., Kaiser, P., K. ve Bawden, W., F., 1995. Support of Underground Excavations in Hard Rock, Balkema, Rotterdam, 215 s.
- Hoek, E. ve Brown, E., T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Geomechanics Abstract, 27, 3, 227-229.
- Hoek, E. ve Brown, E., T., 1998. Practical Estimates of Rock Mass Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 34, 8, 1165-1186.
- Hoek, E. ve Karzulovic, A., 2000. Rock Mass Properties for Surface Mines, Slope Stability in Surface Mining, Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), Colorado, 59-70.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. ve Corkum, B., 2002. Hoek-Brown Failure Criterion 2002 Edition, Proceedings of the NARMS-TAC 2002, Mining Innovation and Technology, Toronto, Canada, 267-273.
- Hoek, E. ve Diederichs, M., S., 2006. Empirical Estimation of Rock Mass Modulus, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 43, 203-215.
- Hoek, E., 2007. Practical Rock Engineering, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada, 341 s.
- IAEG (International Association of Engineering Geology), 1976, Engineering Geological Maps, A Guide to Their Preparation, The Unesco Press, Paris, 79 s.
- Imai, T., Fumoto, H. ve Yokoto, K., 1976. P and S Wave Velocities in Subsurface of Ground in Japan, Urana Research Institute, OYO Corporation.
- Işık, N., S., Ulusay, R. ve Doyuran, V., 2008. Deformation Modulus of Heavily Jointed-Sheared and Blocky Greywackes by Pressuremeter Tests: Numerical, Experimental and Empirical Assessments, Engineering Geology, 101, 269-282.

- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1976. Engineering Geological Maps, The UNESCO Press, 15, 78.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1977. ISRM Suggested Methods: The Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, Pergamon Press, Oxford.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1978. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests: Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts, 15, 319-68.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring, Pergamon Press, London, 211 s.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1985. Suggested Method for Determining Point Load Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts, 2, 22, 53-60.
- Jenning, J., E., 1970. A Mathematical Theory for the Calculation of the Stability of Slopes in Open Cast Mines, Symposium on Planning Open Pit Mines, Balkema, August, Cape Town, Proceedings book: 87-112.
- JICA (Japan International Cooperation Agency), 1985. The Republic of Turkey Report on the Cooperative Mineral Exploration of Gümüşhane Area, Phase 1, Metal Mining Agency of Japan.
- Kalamaras, G., S. ve Bieniawski, Z., T., 1995. A Rock Mass Strength Concept for Coal Incorporating the Effect of Time, 8th International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Balkema, September, Rotterdam, Proceedings book: 295–302.
- Karpuz, C., 1990. A Classification System for Excavation of Surface Coal Measures, Mining Science and Technology, 11, 157-163.
- Karslı, M., 2009. Arhavi-Hopa (Artvin) Arasındaki Karayolu Şevlerinin Duraylılık Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kaya, A., Bulut, F. ve Alemdağ, S., 2011. Applicability of Excavatability Classification Systems in Underground Excavations: A Case Study, Scientific Research and Essays, 6, 25, 5331-5341.
- Kaygusuz, A., 2000. Torul ve Çevresinde Yüzeyleyen Kayaçların Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Kendorski, F., S., Cummings, R., A., Bieniawski, Z., T., ve Sinner, E., H., 1983. Rock Mass Classification for Block Caving Mine Drift Support, 5th International Congress on Rock Mechanics, ISRM, October, Melbourne, Proceedings book: B, 51-63.
- Ketin, İ., 1961. Türkiye’de Magmatik Faaliyet, Türkiye Jeoloji Bülteni, Ankara, 7, 2, 1-15.
- Ketin, İ., 1966. Anadolu’nun Tektonik Birlikleri, MTA Dergisi, Ankara, No: 66, 20-34.
- Ketin, İ. ve Canitez, N., 1972. Yapısal Jeoloji, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul, 520 s.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), 1997. NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), 2006, Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 753 s.
- Kirsten, H., A., D., 1982. A Classification System for Excavation in Natural Materials, The Civil Engineering in South Africa, 24, 293-308.
- Kökçüoğlu, H., 2006. Sonlu Elemanlar Metodu İle Tünel Modellemesi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Koprivica, D., 1976. Hopa-Arhavi Bölgesinin Jeolojisi, Yapısal Özellikleri ile Sülfür ve Manganez Zuhurları (KD Türkiye), MTA Dergisi, 87, 1-20.
- Köprübaşı, N., 1993. Tirebolu-Harşit (Giresun) Arası Jura-Kretase Yaşlı Magmatik Kayaçların Petrolojisi ve Jeokimyası, Türkiye Jeoloji Bülteni, 36, 139-150.
- Köprübaşı, N., Şen, C. ve Kaygusuz, A., 2000. Doğu Pontid Ada Yayı Granitoidlerin Karşılaştırılmalı Petrografik ve Kimyasal Özellikleri, Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, 1, 4, 111-120.
- Korkmaz, S., 1993. Tonya-Düzköy (GB-Trabzon) Yöresinin Stratigrafisi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 36, 151-158.
- Kraeff, A., 1963. Hopa-Murgul Bölgesinin Jeolojisi ve Maden Yatakları, MTA, Ankara, 60, 44-59.
- Kulhawy, F., H. ve Carter, J., P., 1992. Settlement and Bearing Capacity of Foundations on Rock Masses and Socketed Foundations in Rock Masses, Engineering in Rock Masses, Butterworth-Heinemann, Oxford, 231-245.
- Laubscher, D., H., 1977. Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses-Mining Applications, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 86, A, 1-8.

- Laubscher, D., H., 1984. Design Aspects and Effectiveness of Support Systems in Different Mining Conditions, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 93, A, 70-81.
- Mehrotra, V., K., 1992. Estimation of Engineering Properties of Rock Mass, PhD. Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India, 257 s.
- MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü), 1998. Artvin İli'nin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynakları, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etüdları Dairesi, Ankara.
- NACS (North American Commission on Stratigraphy), 1983. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 67, 5, 841-875.
- Nakao, K., Lihoshi, S. ve Koyama, S., 1983. Statistical Reconsiderations on the Parameters for Geomechanics Classification, 5th International Congress on Rock Mechanics, ISRM, October, Melbourne, Proceedings book: 1, 13-16.
- Olivier, H., J., 1979. Applicability of Geomechanics Classification to the Orange-Fish Tunnel Rock Masses, Civil Engineering in South Africa, 21, 179-185.
- ÖNORM (Österreichischer Normen) B2203, 1994. Untertagebauarbeiten Werkvertragsnorm, Österreichischer Normen, Österreich.
- Özdoğan, K., 1992. Karadağ (Torul-Gümüşhane) ve Yakın Çevresinin Jeolojisi, Mineralojisi, Petrografisi ve Maden Zuhurlarının Jenetik İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Özsayar, T., 1971. Paläontologie und Geologie des Gebietes Östlich Trabzon (Anatolien), Gieben, Geologische Schriften, 165-183.
- Özsayar, T., Gedikoglu, A. ve Pelin, S. 1981. Artvin Yöresi Yastık Lavların Yaşına İlişkin Paleontolojik Veriler, K.T.Ü. Yerbilimleri Dergisi, 1, 1, 38-42.
- Özsayar, T., Pelin, S., Gedikoğlu, A., Eren, A. ve Çapkinoğlu, Ş. 1982. Ardanuç (Artvin) Yöresi'nin Jeolojisi, K.T.Ü. Yerbilimleri Dergisi, 2, 1-2, 21-37.
- Öztürk, H., T., 2007. Tüneller ve Tasarım İlkeleri, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Palmström, A., 1982. The Volumetric Joint Count-A Useful and Simple Measure of the Degree of Jointing, 4th International Congress of the IAEG, November, New Delhi, Proceedings book: 221-228.
- Palmström, A., 1985. Application of the Volumetric Joint Count as a Measure of Rock Mass Jointing, International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, September, Sweden, Proceedings book: 103-110.

- Palmström, A., 1995. RMI-A Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes, PhD. Thesis, University of Oslo, Norway.
- Palmström, A., 1996. RMI-A System for Rock Mass Strength for Use in Rock Engineering, Journal of Rock Mechanics and Tunnelling, 2, L, 69-108.
- Palmström, A. ve Singh, B., 2001. The Deformation Modulus of Rock Masses: Comparisons Between in situ Tests and Indirect Estimates, Tunnelling and Underground Space Technology. 16, 115-131.
- Palmström, A., 2000. Recent Developments in Rock Support Estimates by the Rmi, Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, 6, 1, 1-19.
- Palmström, A., 2005. Measurements of and correlations between block size and Rock Quality Designation (RQD), Tunnels and Underground Space Technology, 20, 362-377.
- Paşamehmetoğlu, A., G., Karpuz, C., Müftüoğlu, Y., Özgenoğlu, A., Bilgin, A., Ceylanoğlu, A., Bozdağ, T., Toper, Z. ve Dinçer, T., 1988. Assessment of the Geotechnical and Performance Data and Proposition of a Classification System (in Turkish), Final Report, Middle East Technical University, 150 s.
- Peck, R., B., Hanson, W., E. ve Thornburn, T., H., 1974. Foundation Engineering, John Wiley and Sons, New York, 410 s.
- Pettifer, G., S. ve Fookes, P., G., 1994. A Revision of the Graphical Method for Assessing the Excavatability of Rock, Quarterly Journal of Engineering Geology, 27, 145-164.
- Piteau, D., R., 1970. Geological Factors Significant to the Stability of Slopes Cut in Rock, International Symposium on Planning Open Pit Mines, South African Institute of Mining and Metallurgy, October, Johannesburg, Proceedings book: 33-53.
- Priest, S., D. ve Hudson, J.A., 1976. Discontinuity spacing in rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts, 13, 135-148.
- Rabcewicz, L., 1964. The New Austrian Tunnelling Method, Water Power, 16, 453-457.
- Ramamurthy, T., 1986. Stability of Rock Masses, 8th Annual Lecture, Indian Geotechnical Journal, 1-74.
- Ramamurthy, T., 2004. A Geo-Engineering Classification for Rocks and Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 41, 89-101.
- Read, S., A., L., Richards, L., R. ve Perrin, N., D., 1999. Applicability of the Hoek–Brown Failure Criterion to New Zealand Greywacke Rocks, 9th International Society for Rock Mechanics Congress, August, Paris, Proceedings book: 2, 655-660.

- Rocscience, 1998. Dips v5.0 Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience, 2002. Roclab v1.0 Rock Mass Strength Analysis Using the Generalized Hoek-Brown Failure Criterion, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience, 2006. Swedge v5.0 Surface Wedge Analysis for Slopes, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience, 2008. Phase² v7.0 Finite Element Analysis for Excavations and Slopes, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Romana, M., 1985. New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes, International Symposium on the Role of Rock Mechanics, ISRM, Zacatecas, 49-53.
- Russo, G., Kalamaras, G., S. ve Grasso, P., A., 1998. Discussion on the Concepts of Geomechanical Classes Behavior Categories and Technical Classes for an Underground Project, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee 1998, 54 s.
- Satıcı, Ö., 2007. Kavak Merzifon Yolu T4 (Küçükbelvar) Tüneli Duraylılık Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Schultze-Westrum, H., H., 1961. Kuzeydoğu Anadolu'da Doğu Pontus Mineral Bölgesinin Jeolojisi ve Maden Yatakları ile İlgili Mütalalar, MTA Dergisi, 57, 63-71.
- Scoble, M., J. ve Müftüoğlu, Y., V., 1984. Derivation of a Diggability Index for Surface Mine Equipment Selection, Mining Science and Technology, 1, 305-322.
- Serafim, J., L. ve Pereira., J., P., 1983. Considerations of the Geomechanics Classification of Bieniawski, International Symposium Engineering Geology and Underground Construction, Balkema, September, Rotterdam, Proceedings book: 1, 1133-1142.
- Serrano, A., Olalla, C. ve Gonzalez, J., 2000. Ultimate Bearing Capacity of Rock Masses Based on the Modified Hoek-Brown Criterion, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37, 6, 1013-8.
- Sheorey, P., R., 1997. Empirical Rock Failure Criteria, Balkema, Rotterdam, 176 s.
- Sheorey, P., R., Murali, M., G. ve Sinha, A., 2001. Influence of Elastic Constants on the Horizontal in situ Stress, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 38, 1, 1211-1216.
- Singh, R., N., Denby, B., Eğretli, İ. ve Pathan, A., G., 1986. Assessment of Ground Rippability in Opencast Mining Operations, University of Nottingham Mining Department Magazine, 38, 21-34.

- Singh, B., Viladkar. M., N., Samadhiya, N., K. ve Mehrotra, V., K., 1997. Rock Mass Strength Parameters Mobilized in Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 12, 1, 47-54.
- Smith, H., J., 1986. Estimating Rippability of Rock Mass Classification, 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics, University of Alabama, June, Alabama, Proceedings book: 443-448.
- Sönmez, H. ve Ulusay, R., 1999. Modifications to the Geological Strength Index (GSI) and Their Applicability to Stability of Slopes, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 36-6, 743-760.
- Sönmez, H. ve Ulusay, R., 2002. A Discussion on the Hoek-Brown Failure Criterion and Suggested Modification to the Criterion Verified by Slope Stability Case Studies, Yerbilimleri Dergisi, 26, 77-9.
- SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), 2006. SPSS v15.0 for Windows, SPSS Inc., Chicago.
- Şahin, S., Y., Güngör, Y. ve Boztug, D., 2004. Comparative petrogenetic Investigation of Composite Kaçkar Batholith Granitoids in Eastern Pontide Magmatic Arc, Northern Turkey, Earth Planets Space, 56, 429-446.
- Şarman, E., 1975. İsrail ve Eseli Güneyindeki G41-b1, b2, b3, b4, G42-a1, a4 Paftalarına ait Sahanın 1/10.000 Ölçekli Jeolojik Etüd Raporu, MTA, Etüd Rapor No: 1259, Ankara.
- Tarhan, F., 1982. Artvin Graniti'nin Mühendislik Jeolojisi ve Baraj Yeri Olma Açısından İrdelenmesi, Doçentlik Tezi, K.T.Ü., Yer Bilimleri Fakültesi, Trabzon.
- Temelsu Mühendislik Limited Şirketi, 1990, Cankurtaran Karayolu Tüneli Kesin Proje Raporu, Ankara.
- Tokel, S., 1972. Stratigraphical and Volcanic History of the Gümüşhane Region, PhD. Thesis, University College, London.
- Topuz, G., Eyüboğlu, Y. ve Dokuz, A., 2002. Petrology and Age of the Saraycık Granodiorite, Pulur Massive, Eastern Pontides, NE Turkey: Preliminary Results, 1st International Symposium of Istanbul Technical University the Faculty of Mines on Earth Sciences and Engineering, May, İstanbul, Turkey, Proceedings book: 120.
- Trueman, R., 1998. An Evaluation of Strata Support Techniques in Dual Life Gate Roads, PhD. Thesis, University of Wales, Cardiff.
- Tsiambaos, G. ve Saroglou, H., 2009. Excavatability Assessment of Rock Masses Using the Geological Strength Index (GSI), Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 69, 1, 13-27.

- Türk-Japon Ekibi, 1985. The Republic of Turkey Report on the Cooperative Mineral Exploration of Gümüşhane Area, Phase 1, 72 s.
- Tüysüz, N., 2000. Geology, Lithochemistry and Genesis of the Murgul Massive Sulfide Deposit, NE Turkey, Urban and Fischer Verlag, Chemie der Erde Geochemistry, 60, 3, 231-250.
- Van, A., 1990. Pontid Kuşağı'nda Artvin Bölgesi'nin Jeokimyası, Petrojenezi ve Masif Sülfid Mineralizasyonları, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Vardar, M., 1979. Yeraltı Kaya Yapıları Mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin Ana İlkeleri, Ankrajlar ve Boyutlandırılması, D.S.İ. Mühendislik Jeolojisi Toplantısı, İstanbul, 6 s.
- Verman, M., 1993. Rock Mass-Tunnel Support Interaction Analysis, PhD. Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India.
- Weaver, J., M., 1975. Geological Factors Significant in the Assessment of Rippability, The Civil Engineering in South Africa, 17, 12, 313-316.
- Winkerton, H., F., ve Fang, H., Y., 1975. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Wyllie, D., C. ve Mah, C., W., 2004. Rock Slope Engineering, Spon Press, New York, 437 s.
- Wyllie, D., C., 1992. Foundations on Rock, Chapman and Hall, London.
- Yalçınlar, İ., 1981. İspir-Pazar-Arhavi ve Yusufeli Arasındaki Bölgenin Jeolojisi, MTA, Rapor No: 2022, Ankara.
- Yılmaz, A., Engin, T., Adamia S. ve Lazarashvili, T., 1997. Geoscientific Studies of the Area Along Turkish-Georgian Border, MTA, Ankara.
- Yılmaz, S. ve Boztuğ, D., 1996. Space and Time Relations of Three Plutonic Phases in the Eastern Pontides, Turkey, International Geology Review, 38, 935-956.
- Yılmaz, S., Toy, S. ve Yılmaz, Y., 2010. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde iklim değişikliğinin ve Bölgenin Bitki Örtüsü Üzerindeki Etkisinin Artvin İli Özelinde İncelenmesi, 3. Ulusal Karadeniz Ormancılık Kongresi, Mayıs, Artvin, Bildiriler Kitabı: 4, 1523-1531.
- Yılmaz, Y., 1972. Petrology and Structure of the Gümüşhane Granite and Surrounding Rocks, North-Eastern Anatolia, PhD. Thesis, London University, London.
- Yılmaz, Y., 1976. Geochemical Study of the Gümüşhane Granite, İ.Ü., Fen Fakültesi, Mec. Seri B, 39, 3-4, 173-203.

- Yudhbir, L., W. ve Prinzl, F., 1983. An Empirical Failure Criterion for Rock Masses, 5th International Congress Society of Rock Mechanics, May, Melbourne, Proceedings book: 1, B, 1-8.
- Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., 2007. Hopa-Borçka Yolu Cankurtaran Tüneli Kesin Proje Raporu, Ankara, 60 s.
- Zankl, H., 1961. Magmatismus und Bauplan des Ostpontischen Gebirges im Querprofil des Harşit-Tales, NE Anatolien, Geologische Rundschau, 51, 218-239.
- Zankl, H., 1962. Magmatismus und Bauplan des Ostpontischen Gebirges im Querprofil des Harşit-Tales, Bayerische, Akademie der Wissenschaften, Abhandlungen, Neue Folge, München, Heft, 109, 61-91.

6. EKLER

Ek 1. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

| BİRİM HACİM AĞIRLIK TAYİNİ | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|----------------|-------------------------|--------------|--|-------------------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Örnek No | Yükseklik (cm) | Alan (cm ²) | Ağırlık (gr) | Birim hacim ağırlık (kN/m ³) | Yoğunluk (kg/m ³) |
| A1 | Tüf | T1 | 9.5 | 23.06 | 597 | 26.73 | 2778 |
| | Tüf | T2 | 9.6 | 23.06 | 579 | 25.80 | 2690 |
| | Tüf | T3 | 11 | 23.06 | 665 | 25.72 | 2672 |
| | Tüf | T4 | 11 | 23.06 | 638 | 24.67 | 2564 |
| | Tüf | T5 | 9 | 23.06 | 550 | 26.00 | 2701 |
| | Tüf | T6 | 10 | 23.06 | 603 | 25.65 | 2665 |
| | Tüf | T7 | 11 | 23.06 | 638 | 24.67 | 2564 |
| | Tüf | T8 | 9.5 | 23.06 | 597 | 26.73 | 2777 |
| | Tüf | T9 | 9.5 | 23.06 | 578 | 25.88 | 2689 |
| | Tüf | T10 | 10.9 | 23.06 | 666 | 25.73 | 2673 |
| | Tüf | T12 | 10 | 23.06 | 603 | 25.65 | 2666 |
| | <i>Ortalama</i> | | | | | | 25.78 |
| A2 | Tüf | TF1 | 10 | 23.06 | 489 | 20.80 | 2162 |
| | Tüf | TF2 | 10 | 23.06 | 551 | 23.44 | 2436 |
| | Tüf | TF3 | 9 | 23.06 | 491 | 23.21 | 2412 |
| | Tüf | TF4 | 11 | 23.06 | 557 | 21.54 | 2238 |
| | Tüf | TF5 | 9.5 | 23.06 | 539 | 24.14 | 2508 |
| | Tüf | TF6 | 10.9 | 23.06 | 557 | 21.54 | 2237 |
| | Tüf | TF7 | 9.5 | 23.06 | 551 | 24.67 | 2564 |
| | Tüf | TF8 | 10 | 23.06 | 489 | 20.80 | 2162 |
| | Tüf | TF9 | 9.5 | 23.06 | 539 | 24.14 | 2508 |
| | Tüf | TF10 | 10 | 23.06 | 551 | 23.44 | 2437 |
| | Tüf | TF11 | 9.4 | 23.06 | 551 | 24.67 | 2564 |
| | Tüf | TF12 | 11 | 23.06 | 557 | 21.54 | 2238 |
| <i>Ortalama</i> | | | | | | 22.97 | 2344 |
| B1-B2 | Kireçtaşı | K1 | 11.5 | 23.06 | 675 | 24.97 | 2595 |
| | Kireçtaşı | K2 | 9.1 | 23.06 | 530 | 25.05 | 2603 |
| | Kireçtaşı | K3 | 11 | 23.06 | 609 | 23.55 | 2447 |
| | Kireçtaşı | K4 | 10 | 23.06 | 576 | 24.51 | 2547 |
| | Kireçtaşı | K5 | 10 | 23.06 | 576 | 24.50 | 2546 |
| | Kireçtaşı | K6 | 11.5 | 23.06 | 675 | 24.97 | 2595 |
| | Kireçtaşı | K7 | 11.5 | 23.06 | 700 | 25.89 | 2691 |
| | Kireçtaşı | K8 | 9 | 23.06 | 529 | 25.05 | 2603 |
| | Kireçtaşı | K9 | 10 | 23.06 | 576 | 24.50 | 2546 |
| | Kireçtaşı | K10 | 9.1 | 23.06 | 530 | 25.05 | 2603 |
| | Kireçtaşı | K11 | 10 | 23.06 | 576 | 24.50 | 2545 |
| | Kireçtaşı | K12 | 9.1 | 23.06 | 503 | 23.78 | 2471 |
| <i>Ortalama</i> | | | | | | 24.62 | 2512 |

Ek 1'in devamı

| BİRİM HACİM AĞIRLIK TAYİNİ | | | | | | | |
|----------------------------|----------|-------------|-------------------|----------------------------|-----------------|---|----------------------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Örnek No | Yükseklik (cm) | Alan (cm ²) | Ağırlık (gr) | Birim hacim ağırlık (kN/m ³) | Yoğunluk (kg/m ³) |
| C1 | Marn | M1 | 10 | 34.16 | 798 | 22.92 | 2381 |
| | Marn | M2 | 11.1 | 32.95 | 876 | 23.73 | 2464 |
| | Marn | M3 | 9.1 | 34.16 | 594 | 18.95 | 1970 |
| | Marn | M4 | 10 | 33.04 | 786 | 23.34 | 2425 |
| | Marn | M5 | 9 | 34.16 | 595 | 18.96 | 1971 |
| | Marn | M6 | 11 | 32.94 | 876 | 23.72 | 2464 |
| | Marn | M7 | 10 | 33.02 | 786 | 23.33 | 2425 |
| | Marn | M8 | 11 | 34.22 | 949 | 24.73 | 2570 |
| | Marn | M9 | 9.9 | 33.02 | 786 | 23.33 | 2425 |
| | Marn | M10 | 9.1 | 34.16 | 594 | 18.95 | 1970 |
| <i>Ortalama</i> | | | | | | 22.73 | 2319 |
| D1 | Bazalt | B1 | 14 | 35.40 | 1289 | 25.51 | 2651 |
| | Bazalt | B2 | 14 | 34.52 | 1193 | 24.22 | 2517 |
| | Bazalt | B3 | 15.9 | 35.11 | 1326 | 23.17 | 2407 |
| | Bazalt | B4 | 14 | 35.40 | 1289 | 25.51 | 2651 |
| | Bazalt | B5 | 11.2 | 34.79 | 1017 | 26.04 | 2708 |
| | Bazalt | B6 | 16 | 35.11 | 1326 | 23.16 | 2406 |
| | Bazalt | B7 | 14 | 34.52 | 1193 | 24.22 | 2517 |
| | Bazalt | B8 | 11 | 34.80 | 1016 | 26.04 | 2706 |
| <i>Ortalama</i> | | | | | | 24.73 | 2523 |

Ek 2. Jeoteknik birimlerdeki kaya malzemelerine ait nokta yükleme deneyi sonuçları

| NOKTA YÜKLEME DENEYİ | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|---------------|--------------------|------------------------------------|------|--------------------------|-----------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Çap (cm) | Genişlik (cm) | Yenilme yükü (kgf) | De ² (mm ²) | F | I _{s(50)} (MPa) | σ _{ci} (MPa) |
| A1 | Tüf | 4.5 | 4.7 | 518.5 | 2694.27 | 1.02 | 1.92 | 38.39 |
| | Tüf | 3.4 | 5 | 344.5 | 2165.61 | 0.97 | 1.51 | 30.21 |
| | Tüf | 3.5 | 4 | 289 | 1783.44 | 0.93 | 1.47 | 29.46 |
| | Tüf | 4.5 | 4.5 | 581.5 | 2579.62 | 1.01 | 2.23 | 44.53 |
| | Tüf | 4 | 5.2 | 185.5 | 2649.68 | 1.01 | 0.70 | 13.91 |
| | Tüf | 4.5 | 4.6 | 659 | 2636.94 | 1.01 | 2.48 | 49.61 |
| | Tüf | 4.6 | 4.5 | 547.5 | 2636.94 | 1.01 | 2.06 | 41.22 |
| | Tüf | 4 | 4.3 | 424.5 | 2191.08 | 0.97 | 1.84 | 36.89 |
| | Tüf | 5.5 | 6 | 472.5 | 4203.82 | 1.12 | 1.24 | 24.78 |
| | Tüf | 3.5 | 6.3 | 103 | 2808.92 | 1.03 | 0.37 | 7.38 |
| | Tüf | 4.5 | 6 | 248.5 | 3439.49 | 1.07 | 0.76 | 15.23 |
| | Tüf | 2.5 | 4.5 | 408 | 1433.12 | 0.88 | 2.46 | 49.27 |
| | Tüf | 2.5 | 4.2 | 513 | 1337.58 | 0.87 | 3.27 | 65.35 |
| | Tüf | 3.3 | 2.8 | 150 | 1177.07 | 0.84 | 1.05 | 21.10 |
| | Tüf | 3.3 | 4.6 | 169.5 | 1933.76 | 0.94 | 0.81 | 16.23 |
| | Tüf | 3 | 3 | 260.5 | 1146.50 | 0.84 | 1.87 | 37.40 |
| | Tüf | 5 | 4.8 | 305.5 | 3057.32 | 1.05 | 1.03 | 20.51 |
| | Tüf | 6 | 5.6 | 406.5 | 4280.25 | 1.13 | 1.05 | 21.02 |
| | Tüf | 3 | 5 | 702.5 | 1910.83 | 0.94 | 3.39 | 67.88 |
| | Tüf | 3.3 | 3.3 | 692 | 1387.26 | 0.88 | 4.28 | 85.70 |
| | Tüf | 2.7 | 2.8 | 150 | 963.06 | 0.81 | 1.23 | 24.65 |
| | Tüf | 3.3 | 3.8 | 215.5 | 1597.45 | 0.90 | 1.20 | 23.92 |
| | Tüf | 3.6 | 4 | 435.5 | 1834.39 | 0.93 | 2.17 | 43.43 |
| | Tüf | 3.2 | 4 | 213 | 1630.57 | 0.91 | 1.16 | 23.27 |
| | Tüf | 2.8 | 3 | 305.5 | 1070.06 | 0.83 | 2.31 | 46.26 |
| | Tüf | 3.5 | 3.2 | 327.5 | 1426.75 | 0.88 | 1.98 | 39.68 |
| | Tüf | 2.5 | 3 | 80.5 | 955.41 | 0.81 | 0.67 | 13.31 |
| | Tüf | 3.4 | 3.4 | 393 | 1472.61 | 0.89 | 2.32 | 46.47 |
| | Tüf | 3.4 | 3.4 | 210 | 1472.61 | 0.89 | 1.24 | 24.83 |
| | Tüf | 4 | 5.4 | 357 | 2751.59 | 1.02 | 1.30 | 26.00 |
| | Tüf | 3.5 | 5.4 | 335.5 | 2407.64 | 0.99 | 1.36 | 27.10 |
| | Tüf | 4 | 5.4 | 552.5 | 2751.59 | 1.02 | 2.01 | 40.24 |
| | Tüf | 3.5 | 5.4 | 701 | 2407.64 | 0.99 | 2.83 | 56.63 |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 490.5 | 3714.65 | 1.09 | 1.42 | 28.31 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 429 | 3714.65 | 1.09 | 1.24 | 24.76 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 455.5 | 3714.65 | 1.09 | 1.31 | 26.29 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 331 | 3714.65 | 1.09 | 0.96 | 19.11 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 583 | 3714.65 | 1.09 | 1.68 | 33.65 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 1079.5 | 3714.65 | 1.09 | 3.12 | 62.31 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 572 | 3714.65 | 1.09 | 1.65 | 33.02 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 601.5 | 3714.65 | 1.09 | 1.74 | 34.72 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 489 | 3714.65 | 1.09 | 1.41 | 28.23 | |
| Ortalama | | | | | | | 1.72 | 34.34 |

Ek 2'nin devamı

| NOKTA YÜKLEME DENEYİ | | | | | | | | |
|----------------------|---------------|----------|---------------|--------------------|------------------------------------|------|--------------------------|-----------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Çap (cm) | Genişlik (cm) | Yenilme yükü (kgf) | De ² (mm ²) | F | I _{s(50)} (MPa) | σ _{ci} (MPa) |
| A1 | Volkanik breş | 4 | 5.4 | 412.5 | 2751.59 | 1.02 | 1.50 | 30.05 |
| | Volkanik breş | 3 | 5.4 | 300.5 | 2063.69 | 0.96 | 1.37 | 27.35 |
| | Volkanik breş | 3 | 5.4 | 278.5 | 2063.69 | 0.96 | 1.27 | 25.35 |
| | Volkanik breş | 3 | 5.4 | 280.5 | 2063.69 | 0.96 | 1.28 | 25.53 |
| | Volkanik breş | 3 | 5.4 | 167.5 | 2063.69 | 0.96 | 0.76 | 15.25 |
| | Volkanik breş | 2.5 | 5.4 | 404 | 1719.75 | 0.92 | 2.12 | 42.36 |
| | Volkanik breş | 3 | 5.4 | 607.5 | 2063.69 | 0.96 | 2.77 | 55.30 |
| | Volkanik breş | 2.5 | 5.4 | 571.5 | 1719.75 | 0.92 | 3.00 | 59.92 |
| | Volkanik breş | 3 | 5.4 | 395 | 2063.69 | 0.96 | 1.80 | 35.96 |
| | Volkanik breş | 2.5 | 5.4 | 345.5 | 1719.75 | 0.92 | 1.81 | 36.22 |
| | Volkanik breş | 4 | 5.4 | 42.5 | 2751.59 | 1.02 | 0.15 | 3.10 |
| | Volkanik breş | 3.5 | 5.4 | 274.5 | 2407.64 | 0.99 | 1.11 | 22.17 |
| | Volkanik breş | 5.4 | 5.4 | 123.5 | 3714.65 | 1.09 | 0.36 | 7.13 |
| | Volkanik breş | 5.4 | 5.4 | 276 | 3714.65 | 1.09 | 0.80 | 15.93 |
| | Volkanik breş | 5.4 | 5.4 | 181.5 | 3714.65 | 1.09 | 0.52 | 10.48 |
| | Volkanik breş | 5.4 | 5.4 | 627 | 3714.65 | 1.09 | 1.81 | 36.19 |
| | Volkanik breş | 5.4 | 5.4 | 622.5 | 3714.65 | 1.09 | 1.80 | 35.93 |
| | Volkanik breş | 5.4 | 5.4 | 338.5 | 3714.65 | 1.09 | 0.98 | 19.54 |
| | Volkanik breş | 5.4 | 5.4 | 418 | 3714.65 | 1.09 | 1.21 | 24.13 |
| | Volkanik breş | 5.4 | 5.4 | 251 | 3714.65 | 1.09 | 0.72 | 14.49 |
| Ortalama | | | | | | | 1.36 | 27.12 |
| A2 | Tüf | 4.2 | 5.5 | 921 | 2942.68 | 1.04 | 3.18 | 63.68 |
| | Tüf | 4 | 4.8 | 889 | 2445.86 | 1.00 | 3.55 | 70.94 |
| | Tüf | 2.8 | 3.6 | 1236 | 1284.08 | 0.86 | 8.13 | 162.51 |
| | Tüf | 5 | 5.5 | 1016.5 | 3503.18 | 1.08 | 3.07 | 61.40 |
| | Tüf | 3 | 5 | 882 | 1910.83 | 0.94 | 4.26 | 85.22 |
| | Tüf | 3 | 3 | 878 | 1146.50 | 0.84 | 6.30 | 126.04 |
| | Tüf | 4 | 8 | 1516 | 4076.43 | 1.12 | 4.07 | 81.43 |
| | Tüf | 4.5 | 4 | 949.5 | 2292.99 | 0.98 | 3.98 | 79.65 |
| | Tüf | 4.6 | 5.5 | 1014.5 | 3222.93 | 1.06 | 3.27 | 65.37 |
| | Tüf | 5.7 | 10.5 | 1381.5 | 7624.20 | 1.29 | 2.28 | 45.68 |
| | Tüf | 5 | 8 | 1311.5 | 5095.54 | 1.17 | 2.96 | 59.26 |
| | Tüf | 4.5 | 6.7 | 490.5 | 3840.76 | 1.10 | 1.38 | 27.59 |
| | Tüf | 5 | 5 | 874 | 3184.71 | 1.06 | 2.84 | 56.84 |
| | Tüf | 5 | 4.5 | 404.5 | 2866.24 | 1.03 | 1.43 | 28.55 |
| | Tüf | 5.4 | 5.4 | 1345.5 | 3714.65 | 1.09 | 3.88 | 77.67 |
| | Tüf | 4.2 | 5.5 | 921 | 2942.68 | 1.04 | 3.18 | 63.68 |
| | Tüf | 4 | 4.8 | 889 | 2445.86 | 1.00 | 3.55 | 70.94 |
| | Tüf | 2.8 | 3.6 | 1236 | 1284.08 | 0.86 | 8.13 | 162.51 |
| | Tüf | 5 | 5.5 | 1016.5 | 3503.18 | 1.08 | 3.07 | 61.40 |
| | Tüf | 3 | 5 | 882 | 1910.83 | 0.94 | 4.26 | 85.22 |
| Tüf | 3 | 3 | 878 | 1146.50 | 0.84 | 6.30 | 126.04 | |
| Tüf | 4 | 8 | 1516 | 4076.43 | 1.12 | 4.07 | 81.43 | |
| Tüf | 4.5 | 4 | 949.5 | 2292.99 | 0.98 | 3.98 | 79.65 | |
| Tüf | 4.6 | 5.5 | 1014.5 | 3222.93 | 1.06 | 3.27 | 65.37 | |
| Tüf | 5.7 | 10.5 | 1381.5 | 7624.20 | 1.29 | 2.28 | 45.68 | |
| Tüf | 5 | 8 | 1311.5 | 5095.54 | 1.17 | 2.96 | 59.26 | |
| Tüf | 4.5 | 6.7 | 490.5 | 3840.76 | 1.10 | 1.38 | 27.59 | |
| Tüf | 5 | 5 | 874 | 3184.71 | 1.06 | 2.84 | 56.84 | |
| Tüf | 5 | 4.5 | 404.5 | 2866.24 | 1.03 | 1.43 | 28.55 | |
| Tüf | 5.4 | 5.4 | 1345.5 | 3714.65 | 1.09 | 3.88 | 77.67 | |
| Ortalama | | | | | | | 3.64 | 72.79 |

Ek 2'nin devamı

| NOKTA YÜKLEME DENEYİ | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|-------------|------------------|-----------------------|---------------------------------------|------|--------------------------|-----------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Çap (cm) | Genişlik (cm) | Yenilme yükü (kgf) | De ² (mm ²) | F | I _{s(50)} (MPa) | σ _{ci} (MPa) |
| | Kireçtaşı | 4.5 | 5.4 | 452.5 | 3095.54 | 1.05 | 1.50 | 30.08 |
| | Kireçtaşı | 4.7 | 4.8 | 663.5 | 2873.89 | 1.03 | 2.34 | 46.73 |
| | Kireçtaşı | 3 | 3.6 | 968 | 1375.80 | 0.87 | 6.03 | 120.65 |
| | Kireçtaşı | 4 | 5 | 432 | 2547.77 | 1.00 | 1.67 | 33.40 |
| | Kireçtaşı | 4.2 | 5 | 1843.5 | 2675.16 | 1.02 | 6.86 | 137.24 |
| | Kireçtaşı | 4 | 3 | 920 | 1528.66 | 0.90 | 5.28 | 105.68 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 2.6 | 688.5 | 828.03 | 0.78 | 6.36 | 127.19 |
| | Kireçtaşı | 5 | 7 | 1938 | 4458.60 | 1.14 | 4.86 | 97.11 |
| | Kireçtaşı | 2.7 | 5.5 | 1587.5 | 1891.72 | 0.94 | 7.73 | 154.59 |
| | Kireçtaşı | 4.7 | 6 | 2065 | 3592.36 | 1.08 | 6.12 | 122.33 |
| | Kireçtaşı | 5 | 6.5 | 754.5 | 4140.13 | 1.12 | 2.00 | 40.04 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 4.2 | 912.5 | 1337.58 | 0.87 | 5.81 | 116.24 |
| | Kireçtaşı | 4.5 | 8 | 1601.5 | 4585.99 | 1.15 | 3.93 | 78.51 |
| | Kireçtaşı | 4.5 | 4 | 771 | 2292.99 | 0.98 | 3.23 | 64.68 |
| | Kireçtaşı | 23 | 4.5 | 892.5 | 1318.47 | 0.87 | 5.75 | 114.97 |
| | Kireçtaşı | 3.7 | 5.5 | 835.5 | 2592.36 | 1.01 | 3.19 | 63.73 |
| | Kireçtaşı | 5.5 | 5.5 | 1030 | 3853.50 | 1.10 | 2.89 | 57.79 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 3 | 614 | 955.41 | 0.81 | 5.08 | 101.52 |
| | Kireçtaşı | 5.5 | 4.5 | 817 | 3152.87 | 1.05 | 2.68 | 53.55 |
| | Kireçtaşı | 5.5 | 6 | 888 | 4203.82 | 1.12 | 2.33 | 46.57 |
| A2 | Kireçtaşı | 4.5 | 5 | 818.5 | 2866.24 | 1.03 | 2.89 | 57.76 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 4.5 | 772.5 | 1433.12 | 0.88 | 4.66 | 93.28 |
| | Kireçtaşı | 4.5 | 6 | 1285.5 | 3439.49 | 1.07 | 3.94 | 78.76 |
| | Kireçtaşı | 4.2 | 4.7 | 1401 | 2514.65 | 1.00 | 5.47 | 109.42 |
| | Kireçtaşı | 3 | 3.4 | 473.5 | 1299.36 | 0.86 | 3.08 | 61.69 |
| | Kireçtaşı | 3.6 | 4 | 767.5 | 1834.39 | 0.93 | 3.83 | 76.54 |
| | Kireçtaşı | 3 | 4 | 477.5 | 1528.66 | 0.90 | 2.74 | 54.85 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 3 | 445 | 955.41 | 0.81 | 3.68 | 73.58 |
| | Kireçtaşı | 3.2 | 6.5 | 703 | 2649.68 | 1.01 | 2.64 | 52.72 |
| | Kireçtaşı | 3 | 4 | 545.5 | 1528.66 | 0.90 | 3.13 | 62.66 |
| | Kireçtaşı | 3 | 3.5 | 479.5 | 1337.58 | 0.87 | 3.05 | 61.08 |
| | Kireçtaşı | 4 | 4 | 1819.5 | 2038.22 | 0.96 | 8.36 | 167.23 |
| | Kireçtaşı | 4.9 | 8 | 904.5 | 4993.63 | 1.17 | 2.08 | 41.51 |
| | Kireçtaşı | 3 | 4.5 | 598 | 1719.75 | 0.92 | 3.13 | 62.70 |
| | Kireçtaşı | 2.1 | 2.2 | 589 | 588.54 | 0.72 | 7.09 | 141.77 |
| | Kireçtaşı | 4 | 4 | 1481.5 | 2038.22 | 0.96 | 6.81 | 136.16 |
| | Kireçtaşı | 2.7 | 3 | 764.5 | 1031.85 | 0.82 | 5.95 | 119.08 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 3 | 468.5 | 955.41 | 0.81 | 3.87 | 77.46 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 2.5 | 384.5 | 796.18 | 0.77 | 3.66 | 73.22 |
| | Kireçtaşı | 5 | 5.5 | 1011.5 | 3503.18 | 1.08 | 3.05 | 61.10 |
| | Kireçtaşı | 4 | 5 | 364 | 2547.77 | 1.00 | 1.41 | 28.14 |
| Ortalama | | | | | | | 4.15 | 83.01 |

Ek 2'nin devamı

| NOKTA YÜKLEME DENEYİ | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|-------------|------------------|-----------------------|---------------------------------------|------|-----------------------------|--------------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Çap (cm) | Genişlik (cm) | Yenilme yükü (kgf) | De ² (mm ²) | F | I _{s(50)} (MPa) | σ _{ci} (MPa) |
| A2 | Kumtaşı | 4 | 4 | 1390 | 2038.22 | 0.96 | 6.39 | 127.75 |
| | Kumtaşı | 3 | 4.5 | 924.5 | 1719.75 | 0.92 | 4.85 | 96.93 |
| | Kumtaşı | 3.7 | 5 | 1002.5 | 2356.69 | 0.99 | 4.12 | 82.33 |
| | Kumtaşı | 3.5 | 5 | 1443.5 | 2229.30 | 0.97 | 6.19 | 123.77 |
| | Kumtaşı | 5 | 6.5 | 1685.5 | 4140.13 | 1.12 | 4.47 | 89.45 |
| | Kumtaşı | 3.7 | 5 | 1002.5 | 2356.69 | 0.99 | 4.12 | 82.33 |
| | Kumtaşı | 3 | 4.5 | 924.5 | 1719.75 | 0.92 | 4.85 | 96.93 |
| | Kumtaşı | 5 | 6.5 | 1685.5 | 4140.13 | 1.12 | 4.47 | 89.45 |
| | Kumtaşı | 3.5 | 5 | 1443.5 | 2229.30 | 0.97 | 6.19 | 123.77 |
| | Kumtaşı | 3.7 | 5 | 1002.5 | 2356.69 | 0.99 | 4.12 | 82.33 |
| | Kumtaşı | 3.5 | 4.5 | 1392.5 | 2006.37 | 0.95 | 6.48 | 129.56 |
| | Kumtaşı | 4 | 4 | 1390 | 2038.22 | 0.96 | 6.39 | 127.75 |
| | Kumtaşı | 3.5 | 4.5 | 1560 | 2006.37 | 0.95 | 7.26 | 145.14 |
| | Kumtaşı | 4 | 4 | 1390 | 2038.22 | 0.96 | 6.38 | 127.75 |
| | Kumtaşı | 3 | 4.5 | 924.5 | 1719.75 | 0.92 | 4.86 | 96.93 |
| | Kumtaşı | 3.7 | 5 | 1002.5 | 2356.69 | 0.99 | 4.12 | 82.33 |
| | Kumtaşı | 3.5 | 5 | 1443.5 | 2229.30 | 0.97 | 6.19 | 123.78 |
| | Kumtaşı | 5 | 6.5 | 1685.5 | 4140.13 | 1.12 | 4.47 | 89.45 |
| | Kumtaşı | 3.7 | 5 | 1002.5 | 2356.69 | 0.99 | 4.13 | 82.33 |
| | Kumtaşı | 3 | 4.5 | 924.5 | 1719.75 | 0.92 | 4.85 | 96.93 |
| Kumtaşı | 5 | 6.5 | 1685.5 | 4140.13 | 1.12 | 4.47 | 89.45 | |
| Kumtaşı | 3.5 | 5 | 1443.5 | 2229.30 | 0.97 | 6.19 | 123.76 | |
| Kumtaşı | 3.7 | 5 | 1002.5 | 2356.69 | 0.99 | 4.12 | 82.33 | |
| Kumtaşı | 3.5 | 4.5 | 1392.5 | 2006.37 | 0.95 | 6.47 | 129.56 | |
| Kumtaşı | 4 | 4 | 1390 | 2038.22 | 0.96 | 6.39 | 127.73 | |
| Kumtaşı | 3.5 | 4.5 | 1560 | 2006.37 | 0.95 | 7.26 | 145.14 | |
| Ortalama | | | | | | | 5.68 | 113.56 |
| A2 | Marn (Silisleşmiş) | 4 | 4 | 2763 | 2038.22 | 0.96 | 12.70 | 253.95 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3.5 | 4 | 1474.5 | 1783.44 | 0.93 | 7.51 | 150.30 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 2.7 | 4 | 785 | 1375.80 | 0.87 | 4.89 | 97.84 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 4.5 | 6 | 1822 | 3439.49 | 1.07 | 5.58 | 111.63 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3 | 4.5 | 2354 | 1719.75 | 0.92 | 12.34 | 246.80 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 4 | 4 | 2763 | 2038.22 | 0.96 | 12.70 | 253.95 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3 | 6.2 | 1912 | 2369.43 | 0.99 | 7.82 | 156.39 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3 | 4.5 | 2354 | 1719.75 | 0.92 | 12.35 | 246.80 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3.5 | 4 | 1474.5 | 1783.44 | 0.93 | 7.51 | 150.30 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3 | 6.2 | 1912 | 2369.43 | 0.99 | 7.81 | 156.38 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 4.5 | 6 | 1822 | 3439.49 | 1.07 | 5.58 | 111.63 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 4 | 4 | 2763 | 2038.21 | 0.96 | 12.70 | 253.95 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3.5 | 4 | 1474.5 | 1783.44 | 0.93 | 7.51 | 150.30 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 2.7 | 4 | 785 | 1375.80 | 0.87 | 4.89 | 97.84 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 4.5 | 6 | 1822 | 3439.49 | 1.07 | 5.58 | 111.63 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3 | 4.5 | 2354 | 1719.75 | 0.92 | 12.34 | 246.81 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 4 | 4 | 2763 | 2038.20 | 0.96 | 12.70 | 253.95 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3 | 6.2 | 1912 | 2369.43 | 0.99 | 7.82 | 156.38 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3 | 4.5 | 2354 | 1719.75 | 0.92 | 12.34 | 246.80 |
| | Marn (Silisleşmiş) | 3.5 | 4 | 1474.5 | 1783.45 | 0.93 | 7.51 | 150.31 |
| Marn (Silisleşmiş) | 3 | 6.2 | 1912 | 2369.43 | 0.99 | 7.82 | 156.38 | |
| Marn (Silisleşmiş) | 4.5 | 6 | 1822 | 3439.49 | 1.07 | 5.58 | 111.62 | |
| Ortalama | | | | | | | 8.47 | 169.48 |

Ek 2'nin devamı

| NOKTA YÜKLEME DENEYİ | | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|-------------|------------------|-----------------------|---------------------------------------|------|--------------------------|-----------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Çap (cm) | Genişlik (cm) | Yenilme yükü (kgf) | De ² (mm ²) | F | I _{s(50)} (MPa) | σ _{ci} (MPa) |
| B1-B2 | Kireçtaşı | 5 | 6 | 863.5 | 3821.66 | 1.10 | 2.44 | 48.76 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 5.5 | 521.5 | 1751.59 | 0.92 | 2.70 | 53.90 |
| | Kireçtaşı | 3 | 4.5 | 418.5 | 1719.75 | 0.92 | 2.19 | 43.88 |
| | Kireçtaşı | 4 | 10 | 1233 | 5095.54 | 1.17 | 2.79 | 55.71 |
| | Kireçtaşı | 4 | 9.5 | 705.5 | 4840.76 | 1.16 | 1.66 | 33.17 |
| | Kireçtaşı | 6 | 6.5 | 563 | 4968.15 | 1.17 | 1.30 | 25.94 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 7 | 852.2 | 2229.30 | 0.97 | 3.65 | 73.07 |
| | Kireçtaşı | 4 | 5.5 | 777 | 2802.55 | 1.03 | 2.79 | 55.80 |
| | Kireçtaşı | 6.5 | 7.5 | 321.5 | 6210.19 | 1.23 | 0.62 | 12.46 |
| | Kireçtaşı | 3 | 5 | 602 | 1910.83 | 0.94 | 2.91 | 58.17 |
| | Kireçtaşı | 4 | 7 | 600.5 | 3566.88 | 1.08 | 1.79 | 35.77 |
| | Kireçtaşı | 3.7 | 3.7 | 531.5 | 1743.95 | 0.92 | 2.76 | 55.12 |
| | Kireçtaşı | 3 | 3 | 425.5 | 1146.50 | 0.84 | 3.05 | 61.08 |
| | Kireçtaşı | 2.5 | 4 | 669.5 | 1273.89 | 0.86 | 4.43 | 88.57 |
| | Kireçtaşı | 4.5 | 6 | 1001 | 3439.49 | 1.07 | 3.07 | 61.33 |
| | Kireçtaşı | 4.5 | 7 | 760 | 4012.74 | 1.11 | 2.07 | 41.32 |
| | Kireçtaşı | 3.5 | 3 | 708 | 1337.58 | 0.87 | 4.51 | 90.19 |
| | Kireçtaşı | 5 | 4 | 918.5 | 2547.77 | 1.00 | 3.55 | 71.01 |
| | Kireçtaşı | 3 | 5 | 575 | 1910.83 | 0.94 | 2.78 | 55.56 |
| | Kireçtaşı | 3.7 | 5.4 | 320.5 | 2545.22 | 1.00 | 1.24 | 24.80 |
| | Kireçtaşı | 2.2 | 5.4 | 505.5 | 1513.38 | 0.89 | 2.93 | 58.52 |
| | Kireçtaşı | 2.3 | 5.4 | 464.5 | 1582.17 | 0.90 | 2.60 | 51.95 |
| | Kireçtaşı | 2.2 | 3.5 | 324 | 980.89 | 0.81 | 2.62 | 52.49 |
| | Kireçtaşı | 5.4 | 5 | 685 | 3439.49 | 1.07 | 2.10 | 41.97 |
| | Kireçtaşı | 5.4 | 3.7 | 530 | 2545.22 | 1.00 | 2.05 | 41.01 |
| | Kireçtaşı | 3.4 | 5 | 677 | 2165.61 | 0.97 | 2.97 | 59.37 |
| | Kireçtaşı | 4.5 | 6 | 927.5 | 3439.49 | 1.07 | 2.84 | 56.83 |
| | Kireçtaşı | 4 | 3.5 | 928.5 | 1783.44 | 0.93 | 4.73 | 94.64 |
| | Kireçtaşı | 4 | 4 | 1024.5 | 2038.22 | 0.96 | 4.71 | 94.16 |
| | Ortalama | | | | | | | 2.75 |

Ek 2'nin devamı

| NOKTA YÜKLEME DENEYİ | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|---------------|--------------------|------------------------------------|------|--------------------------|-----------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Çap (cm) | Genişlik (cm) | Yenilme yükü (kgf) | De ² (mm ²) | F | I _{s(50)} (MPa) | σ _{ci} (MPa) |
| | Marn | 2.6 | 3 | 33.5 | 993.63 | 0.81 | 0.27 | 5.37 |
| | Marn | 2.1 | 3.9 | 93 | 1043.31 | 0.82 | 0.72 | 14.36 |
| | Marn | 2.4 | 3.6 | 225.5 | 1100.64 | 0.83 | 1.67 | 33.41 |
| | Marn | 2.2 | 5.5 | 222 | 1541.40 | 0.90 | 1.27 | 25.34 |
| | Marn | 2.1 | 4 | 163.5 | 1070.06 | 0.83 | 1.24 | 24.76 |
| | Marn | 2.1 | 5.5 | 69 | 1471.34 | 0.89 | 0.41 | 8.16 |
| | Marn | 2.2 | 3.1 | 126.5 | 868.79 | 0.79 | 1.13 | 22.51 |
| | Marn | 2 | 2.4 | 241 | 611.46 | 0.73 | 2.82 | 56.31 |
| | Marn | 2.3 | 3.5 | 102 | 1025.48 | 0.82 | 0.80 | 15.96 |
| | Marn | 2.2 | 2.6 | 72.5 | 728.66 | 0.76 | 0.74 | 14.79 |
| | Marn | 2.1 | 3.1 | 142 | 829.30 | 0.78 | 1.31 | 26.20 |
| | Marn | 2.2 | 2.4 | 210 | 672.61 | 0.74 | 2.28 | 45.58 |
| | Marn | 2 | 3.5 | 118.5 | 891.72 | 0.79 | 1.03 | 20.67 |
| | Marn | 1.7 | 4.5 | 233.5 | 974.52 | 0.81 | 1.90 | 38.02 |
| | Marn | 1.8 | 3 | 30 | 687.90 | 0.75 | 0.32 | 6.40 |
| | Marn | 2 | 3 | 211 | 764.33 | 0.77 | 2.07 | 41.47 |
| | Marn | 2 | 2.3 | 227 | 585.99 | 0.72 | 2.74 | 54.82 |
| | Marn | 1.7 | 2.7 | 81 | 584.71 | 0.72 | 0.98 | 19.59 |
| | Marn | 2.7 | 3.7 | 298 | 1272.61 | 0.86 | 1.97 | 39.46 |
| | Marn | 2 | 3.5 | 291.5 | 891.72 | 0.79 | 2.54 | 50.84 |
| | Marn | 2.7 | 3.5 | 218 | 1203.82 | 0.85 | 1.51 | 30.13 |
| | Marn | 2 | 3.7 | 56.5 | 942.68 | 0.80 | 0.47 | 9.44 |
| | Marn | 2.7 | 2.5 | 211 | 859.87 | 0.79 | 1.89 | 37.86 |
| | Marn | 2.5 | 4 | 119.5 | 1273.89 | 0.86 | 0.79 | 15.81 |
| | Marn | 2.5 | 4.5 | 149 | 1433.12 | 0.88 | 0.90 | 17.99 |
| | Marn | 2.5 | 4.5 | 326.5 | 1433.12 | 0.88 | 1.97 | 39.43 |
| | Marn | 2.7 | 3.5 | 254.5 | 1203.82 | 0.85 | 1.76 | 35.18 |
| C1 | Marn | 2.5 | 4 | 43.5 | 1273.89 | 0.86 | 0.29 | 5.75 |
| | Marn | 3.5 | 3.5 | 226 | 1560.51 | 0.90 | 1.28 | 25.55 |
| | Marn | 2.4 | 3 | 102 | 917.20 | 0.80 | 0.87 | 17.41 |
| | Marn | 2 | 3.5 | 102 | 891.72 | 0.79 | 0.89 | 17.79 |
| | Marn | 2 | 2.5 | 225.5 | 636.94 | 0.74 | 2.55 | 51.05 |
| | Marn | 2.1 | 3 | 95.5 | 802.55 | 0.77 | 0.90 | 18.07 |
| | Marn | 2.8 | 4 | 221 | 1426.75 | 0.88 | 1.34 | 26.78 |
| | Marn | 5.2 | 6.5 | 393.5 | 4305.73 | 1.13 | 1.01 | 20.26 |
| | Marn | 3.5 | 3 | 228.5 | 1337.58 | 0.87 | 1.46 | 29.11 |
| | Marn | 2.7 | 2.5 | 196.5 | 859.87 | 0.79 | 1.76 | 35.25 |
| | Marn | 3.5 | 5 | 226.5 | 2229.30 | 0.97 | 0.97 | 19.42 |
| | Marn | 2.5 | 4 | 53.5 | 1273.89 | 0.86 | 0.35 | 7.08 |
| | Marn | 2.4 | 3 | 106.5 | 917.20 | 0.80 | 0.91 | 18.17 |
| | Marn | 2.5 | 4.5 | 105.5 | 1433.12 | 0.88 | 0.64 | 12.74 |
| | Marn | 3.8 | 6 | 415.5 | 2904.46 | 1.03 | 1.45 | 29.02 |
| | Marn | 4 | 3.5 | 130 | 1783.44 | 0.93 | 0.66 | 13.25 |
| | Marn | 3.5 | 4 | 213 | 1783.44 | 0.93 | 1.09 | 21.71 |
| | Marn | 3 | 4 | 360 | 1528.66 | 0.90 | 2.07 | 41.35 |
| | Marn | 3.6 | 3.5 | 146.5 | 1605.10 | 0.91 | 0.81 | 16.20 |
| | Marn | 2.6 | 2.5 | 58.5 | 828.03 | 0.78 | 0.54 | 10.81 |
| | Marn | 4.5 | 5.5 | 532 | 3152.87 | 1.05 | 1.74 | 34.87 |
| | Marn | 3.5 | 3.5 | 370.5 | 1560.51 | 0.90 | 2.09 | 41.88 |
| | Marn | 4 | 4 | 249.5 | 2038.22 | 0.96 | 1.15 | 22.93 |
| | Marn | 4 | 4.5 | 343 | 2292.99 | 0.98 | 1.44 | 28.77 |
| | Marn | 3.7 | 4 | 340 | 1885.35 | 0.94 | 1.66 | 33.20 |
| | Marn | 3.7 | 2.5 | 283 | 1178.34 | 0.84 | 1.99 | 39.77 |
| | | | | | Ortalama | | 1.31 | 26.19 |

Ek 2'nin devamı

| NOKTA YÜKLEME DENEYİ | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|---------------|--------------------|------------------------------------|------|--------------------------|-----------------------|
| Jeoteknik birim | Litoloji | Çap (cm) | Genişlik (cm) | Yenilme yükü (kgf) | De ² (mm ²) | F | I _{s(50)} (MPa) | σ _{ci} (MPa) |
| | Bazalt | 3.5 | 4 | 1485.5 | 993.63 | 0.81 | 11.91 | 238.26 |
| | Bazalt | 2 | 3.6 | 319.5 | 917.20 | 0.80 | 2.73 | 54.52 |
| | Bazalt | 2.5 | 3 | 827.5 | 955.41 | 0.81 | 6.84 | 136.82 |
| | Bazalt | 2.5 | 2.5 | 200 | 796.18 | 0.77 | 1.90 | 38.09 |
| | Bazalt | 2.5 | 2.5 | 263.5 | 796.18 | 0.77 | 2.51 | 50.18 |
| | Bazalt | 2.6 | 3 | 234.5 | 993.63 | 0.81 | 1.88 | 37.61 |
| | Bazalt | 2.3 | 2 | 243.5 | 585.99 | 0.72 | 2.94 | 58.81 |
| | Bazalt | 4 | 6 | 437.5 | 3057.32 | 1.05 | 1.47 | 29.37 |
| | Bazalt | 2.5 | 3 | 261.5 | 955.41 | 0.81 | 2.16 | 43.24 |
| | Bazalt | 2 | 2.5 | 775.5 | 636.94 | 0.74 | 8.78 | 175.56 |
| | Bazalt | 2.7 | 4 | 397.5 | 1375.80 | 0.87 | 2.48 | 49.54 |
| | Bazalt | 3 | 4 | 612.5 | 1528.66 | 0.90 | 3.52 | 70.35 |
| | Bazalt | 2.5 | 3.5 | 225 | 1114.65 | 0.83 | 1.65 | 33.01 |
| | Bazalt | 2 | 4 | 1014.5 | 1019.11 | 0.82 | 7.98 | 159.56 |
| | Bazalt | 2.8 | 4.5 | 422 | 1605.10 | 0.91 | 2.33 | 46.67 |
| | Bazalt | 2.6 | 4 | 728.5 | 1324.84 | 0.87 | 4.67 | 93.49 |
| | Bazalt | 3.7 | 3.4 | 298.5 | 1602.55 | 0.90 | 1.65 | 33.06 |
| | Bazalt | 3 | 3.5 | 611.5 | 1337.58 | 0.87 | 3.89 | 77.90 |
| | Bazalt | 3.5 | 5.5 | 646.5 | 2452.23 | 1.00 | 2.57 | 51.49 |
| D1 | Bazalt | 3.4 | 5 | 581 | 2165.61 | 0.97 | 2.55 | 50.95 |
| | Bazalt | 2.6 | 2.7 | 157.5 | 894.27 | 0.79 | 1.37 | 27.41 |
| | Bazalt | 3 | 3 | 516.5 | 1146.50 | 0.84 | 3.71 | 74.15 |
| | Bazalt | 4 | 6.5 | 685 | 3312.10 | 1.07 | 2.16 | 43.22 |
| | Bazalt | 2.5 | 2.5 | 329 | 796.18 | 0.77 | 3.13 | 62.65 |
| | Bazalt | 3 | 4 | 381 | 1528.66 | 0.90 | 2.19 | 43.76 |
| | Bazalt | 3 | 5 | 282.5 | 1910.83 | 0.94 | 1.36 | 27.30 |
| | Bazalt | 3.5 | 4.5 | 388.5 | 2006.37 | 0.95 | 1.81 | 36.15 |
| | Bazalt | 3 | 3 | 315.5 | 1146.50 | 0.84 | 2.26 | 45.29 |
| | Bazalt | 3 | 3 | 289.5 | 1146.50 | 0.84 | 2.08 | 41.56 |
| | Bazalt | 3 | 5 | 327 | 1910.83 | 0.94 | 1.58 | 31.60 |
| | Bazalt | 3 | 3.5 | 440.5 | 1337.58 | 0.87 | 2.81 | 56.11 |
| | Bazalt | 6 | 5.5 | 852 | 4203.82 | 1.12 | 2.23 | 44.68 |
| | Bazalt | 4 | 4.5 | 461.5 | 2292.99 | 0.98 | 1.94 | 38.72 |
| | Bazalt | 4.3 | 4.7 | 863 | 2574.52 | 1.01 | 3.31 | 66.18 |
| | Bazalt | 3.6 | 4.5 | 307 | 2063.69 | 0.96 | 1.40 | 27.95 |
| | Bazalt | 4 | 5.5 | 648 | 2802.55 | 1.03 | 2.33 | 46.53 |
| | Bazalt | 3 | 4.5 | 472.5 | 1719.75 | 0.92 | 2.48 | 49.54 |
| | Bazalt | 3.2 | 4.5 | 259 | 1834.39 | 0.93 | 1.29 | 25.83 |
| Ortalama | | | | | | | 3.05 | 60.98 |

ÖZGEÇMİŞ

Ayberk KAYA, 1983 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğrenimini 1994 yılında Elazığ Namık Kemal İlkokulu'nda, ortaöğrenimini 1997 yılında Elazığ Mezre Ortaokulu'nda tamamlayarak 2001 yılında Elazığ Mehmet Akif Ersoy Lisesi'nin yabancı dil ağırlıklı bölümünden mezun oldu. 2002 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yabancı Diller Okulu, Lisans Öncesi İngilizce Hazırlık Programı'nı başarıyla tamamladı ve Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2006 yılında bölüm birincisi olarak Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu ve aynı yıl yüksek lisans eğitimine başladı. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladıktan sonra, doktora programına başladı. Halen Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya devam eden yazar, iyi derecede İngilizce bilmektedir.