

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TÜNEL UYGULAMALARINDA KULLANILAN KAYA DAYANIM  
PARAMETRELERİNİN DOLAYLI YÖNTEMLERLE TAHMİNİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Kadir KARAMAN**

**HAZİRAN 2015  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TÜNEL UYGULAMALARINDA KULLANILAN KAYA DAYANIM  
PARAMETRELERİNİN DOLAYLI YÖNTEMLERLE TAHMİNİ**

**Kadir KARAMAN**

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 05 / 2015**

**Tezin Savunma Tarihi : 15 / 06 / 2015**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL**

**Trabzon 2015**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalında  
Kadir KARAMAN Tarafından Hazırlanan**

**TÜNEL UYGULAMALARINDA KULLANILAN KAYA DAYANIM  
PARAMETRELERİNİN DOLAYLI YÖNTEMLERLE TAHMİNİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 26 /05/2015 gün ve 1604 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**DOKTORA TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

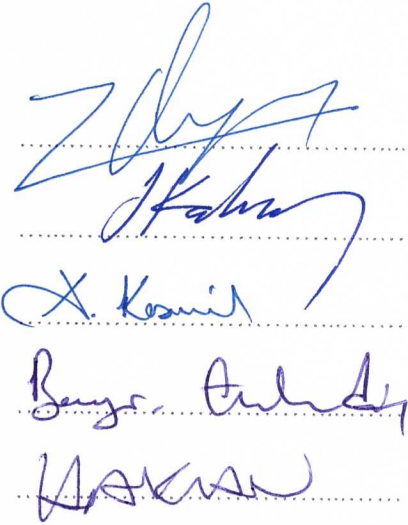
**Başkan : Prof. Dr. Turgay ONARGAN**

**Üye : Prof. Dr. Sair KAHRAMAN**

**Üye : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL**

**Üye : Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI**

**Üye : Doç. Dr. Hakan ERSOY**

  
The image shows five handwritten signatures in blue ink, each placed on a horizontal dotted line. The signatures correspond to the names listed in the text: Turgay Onargan, Sair Kahraman, Ayhan Kesimal, Bayram Erçikdi, and Hakan Ersoy.

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmış ve 9706 nolu K.T.Ü Bilimsel Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir.

Tez danışmanı olarak çalışmanın tüm aşamasında desteğini veren, çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli ortamı hazırlayarak karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yol gösterici olan Prof. Dr. Ayhan KESİMAL'a teşekkür ederim.

Doktora tez jürisinde yer alarak çalışmalarına katkıda bulunan Prof. Dr. Turgay ONARGAN ve Prof. Dr. Sair KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Laboratuvarda örnek hazırlama, üç eksenli basınç dayanımı ve tek eksenli deformabilite deneylerinde yardımcı olan Doç Dr. Bayram ERÇIKDI'ya ve laboratuvar deneylerine ilave olarak istatistiksel analizlerde bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR'e teşekkür ederim. Tez çalışmamın değişik aşamalarında yardımlarını gördüğüm Prof. Dr. Hacı DEVECİ, Doç. Dr. Hakan ERSOY, Yrd. Doç. Dr. Ayberk KAYA ve Arş. Gör. Şener ALİYAZICIOĞLU'na, ince kesitlerin değerlendirme aşamasında yardımcı olan Prof. Dr. Mehmet ARSLAN ve Yrd. Doç. Dr. Hasan KOLAYLI'ya, arazi çalışmalarında bana yardımcı olan Jeoloji Mühendisleri Serkan DEMİREL ve Yaşar DİZMAN'a ve ince kesitlerin hazırlanmasında emeği geçen Makine Mühendisi Murat KAYIKÇI'ya teşekkür ederim. Ayrıca K.T.Ü. Bilimsel Araştırma Fonuna ve ENERJİ-SA şirketi çalışanlarına teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında kendilerine yeterince zaman ayıramadığım kızım Zeynep ve eşime gösterdikleri sonsuz inanç, destek, sabır ve fedakarlıklarından dolayı içtenlikle teşekkür ederim.

Kadir KARAMAN  
Trabzon 2015

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Doktora Tezi olarak sunduğum “Tünel Uygulamalarında Kullanılan Kaya Dayanım Parametrelerinin Dolaylı Yöntemlerle Tahmini” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ayhan KESİMAL‘in 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. 15/06/2015

Kadir KARAMAN

## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| ÖNSÖZ.....  | III             |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....   | IV              |
| İÇİNDEKİLER.....  | V               |
| ÖZET.....   | VIII            |
| SUMMARY.....  | IX              |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | X               |
| TABLolar DİZİNİ.....  | XIII            |
| SEMBOLLER DİZİNİ.....   | XVI             |
| 1. GENEL BİLGİLER.....  | 1               |
| 1.1. Giriş.....   | 1               |
| 1.2. Çalışmanın Amacı .....   | 3               |
| 1.3. Kaya Malzemesine Ait Tek Eksenli Basınç Dayanımı Parametresi.....      | 4               |
| 1.3.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmininde Önceki Yaklaşımlar.....       | 5               |
| 1.3.2. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Parametresinin Kullanıldığı Alanlar..... | 8               |
| 1.3.2.1. Dayanım Puanının Belirlenmesine Yönelik Önceki Yaklaşımlar.....    | 9               |
| 1.4. Kayaların Makaslama Dayanım Parametreleri .....                        | 13              |
| 1.5. Kaya Kütlesi Deformasyon Modülü Parametresi .....                      | 14              |
| 1.6. Çalışma Alanının Genel Özellikleri.....                                | 16              |
| 1.7. Önceki Çalışmalar.....   | 17              |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....  | 19              |
| 2.1. Giriş.....   | 19              |
| 2.2. Karot Örneklerinin Hazırlanması.....                                   | 21              |
| 2.3. Kaya Malzemelerinin Fiziko-Mekanik Özellikleri.....                    | 22              |
| 2.3.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi.....                              | 24              |
| 2.3.2. Tek Eksenli Deformabilite Deneyi.....                                | 24              |
| 2.3.3. Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi.....                               | 26              |
| 2.3.4. Schmidt Çekici Sertlik Tayini.....                                   | 26              |
| 2.3.5. Brazilian Çekme Deneyi .....   | 28              |
| 2.3.6. Ultrasonik P–dalga Hızı Deneyi (UPV).....                            | 28              |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 2.3.7.   | Nokta Yüku Dayanım İndeksi Deneyi (PLI).....                           | 29  |
| 2.3.8.   | Birim Hacim Ağırlığı Deneyi.....                                       | 31  |
| 2.4.     | Deney Sonuçları ve Kaya Türüne Göre Sonuçların Değerlendirilmesi.....  | 32  |
| 2.5.     | Kaya Kütlelerinin İçerdiği Süreksizliklere Ait Parametreler.....       | 35  |
| 2.5.1.   | Süreksizlik Ara Uzaklığı.....  | 36  |
| 2.5.2.   | Süreksizliklerin Devamlılığı.....                                      | 37  |
| 2.5.3.   | Süreksizlik Yüzeyinin Pürüzlülüğü ve Dalgalılığı.....                  | 37  |
| 2.5.4.   | Süreksizlik Yüzeylerinin Açıklığı ve Dolgu Durumu.....                 | 38  |
| 2.5.5.   | Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi.....                         | 39  |
| 2.5.6.   | Kaya Kalite Göstergesi (RQD).....                                      | 40  |
| 2.6.     | Kaya Kütleli Sınıflama Sistemleri.....                                 | 41  |
| 2.6.1.   | RMR (Kaya Kütle Puanlaması) Sınıflama Sistemi.....                     | 42  |
| 2.6.2.   | Q (Kaya Kütle Kalitesi) Sınıflama Sistemi.....                         | 47  |
| 2.6.3.   | RMi (Kaya Kütle İndeksi) Sınıflama Sistemi.....                        | 53  |
| 2.7.     | Kaya Kütlelerinin Deformasyon Modülünün Belirlenmesi.....              | 56  |
| 2.8.     | Kullanılan İstatistik Yöntemler.....                                   | 59  |
| 3.       | BULGULAR VE İRDELEME.....  | 62  |
| 3.1.     | Çalışma Alanı ve Çevresinin Genel Jeolojisi.....                       | 62  |
| 3.2.     | Kaya Malzemesi UCS Parametresinin Dolaylı Yöntemlerle Belirlenmesi.    | 66  |
| 3.2.1.   | Schmidt Çekici Deneyinin UCS Tahmininde Kullanımı.....                 | 66  |
| 3.2.2.   | Schmidt Sertliği ile UPV ve UCS Arasındaki İlişki.....                 | 71  |
| 3.2.2.1. | Schmidt Sertliği ile UPV/UCS Oranı Arasındaki İlişki.....              | 75  |
| 3.2.3.   | Nokta Yüku Dayanım İndeksinden UCS Tahmini.....                        | 79  |
| 3.2.3.1. | PLI'den Elde Edilen Eşitliğin Literatürle Karşılaştırılması.....       | 80  |
| 3.2.3.2. | UCS Tahmininde k Katsayısının Araştırılması.....                       | 81  |
| 3.2.4.   | Diğer İndeks Deneylerin UCS Tahmininde Kullanımı.....                  | 88  |
| 3.3.     | UCS Parametresinin Kaya Kütleli Sınıflama Sistemlerinde Kullanımı..... | 93  |
| 3.3.1.   | UCS Değerlerinin RMi Sisteminde Kullanımı ve Karşılaştırılması.....    | 94  |
| 3.3.1.1. | RMi Sisteminde UCS Parametresinin Rolü.....                            | 98  |
| 3.3.2.   | UCS Değerlerinin Q Sisteminde Kullanımı ve Karşılaştırılması.....      | 99  |
| 3.3.2.1. | Q Sisteminde UCS Parametresinin Rolü.....                              | 103 |
| 3.3.3.   | RMR Sisteminde Dayanım Puanının Belirlenmesi.....                      | 105 |
| 3.3.3.1. | RMR Sisteminde UCS Parametresinin Rolü.....                            | 109 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 3.3.3.2. | PLI'den Dayanım Puanının Belirlenmesi.....                          | 111 |
| 3.3.3.3. | Önerilen Grafiğin Çalışılan Kaya Kütlelerine Uygulanması.....       | 119 |
| 3.4.     | Kaya Kütleli Sınıflama Sistemlerinin Karşılaştırılması.....         | 122 |
| 3.5.     | Kaya Malzemesi Makaslama Dayanım Parametrelerinin Belirlenmesi..... | 125 |
| 3.5.1.   | Ölçülen ve Tahmini Kohezyon Değerlerinin Karşılaştırılması.....     | 128 |
| 3.6.     | Kaya Kütleli Deformasyon Modülünün ( $E_m$ ) Belirlenmesi .....     | 133 |
| 4.       | SONUÇLAR.....   | 138 |
| 5.       | KAYNAKLAR.....  | 141 |
| 6.       | EKLER.....  | 157 |
| ÖZGEÇMİŞ |   |     |



Doktora Tezi

ÖZET

TÜNEL UYGULAMALARINDA KULLANILAN KAYA DAYANIM PARAMETRELERİNİN  
DOLAYLI YÖNTEMLERLE TAHMİNİ

Kadir KARAMAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Ayhan KESİMAL  
2015, 156 Sayfa, 5 Ek Sayfa

Bu çalışmada, tünel uygulamalarında kullanılan önemli kaya dayanım parametrelerinin dolaylı yöntemlerle tahmini amaçlanmıştır. Bu amaçla, bir hidroelektrik santral tüneline farklı kazı aynalarındaki süreksizliklerin mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Laboratuvar deneyleri ise çalışılan aynalardan getirilen temsili kaya bloklarından elde edilen karotlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ve arazi çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak kaya kütleleri RMR, Q ve R<sub>Mi</sub> sistemlerine göre sınıflandırılmıştır. Problemlili kaya ortamlarında UCS parametresinin dolaylı yoldan tahmini için Schmidt sertlik yöntemi önerilmiştir. Ayrıca, UPV/UCS oranı kullanılarak Schmidt sertlik sınıfının pratik olarak tahminine yönelik bir sınıflama geliştirilmiştir. Kapsamlı literatür taraması yapılarak toplam 490 kaya örneği bulguları derlenmiş ve kayalar 12 farklı gruba ayrılarak PLI'den UCS tahminine yönelik yeni eşitlikler elde edilmiştir. Ölçülen ve tahmini UCS değerleri RMR, R<sub>Mi</sub> ve normalize Q (Q<sub>c</sub>) tahmininde karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada genel olarak regresyon, korelasyon, ANOVA analizleri ile birlikte bazı yöntemler (UCS, C, vb.) için % tahmin hatası, % VAF, RMSE ve % MAPE analizleri gerçekleştirilmiştir. RMR sisteminde PLI parametresi kullanılarak dayanım puanının tahminine yönelik PLI<1 MPa ve PLI>1 MPa için grafikler önerilmiştir. Kaya malzemelerinin kohezyon ve içsel sürtünme açıları farklı yaklaşımlar kullanılarak belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Kaya kütlesi deformasyon modülü (E<sub>m</sub>), PLI ve RQD parametreleri kullanılarak literatürdeki eşitliklere kıyasla daha pratik ve ucuz bir şekilde tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma tünellerde kullanılan kaya dayanım parametrelerinin dolaylı yöntemlerden tahmininde yenilikler içermekte ve uygulayıcılara kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca geliştirilen tahmin modelleri jeoteknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde daha kolay ve pratik olarak kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Tek eksenli basınç dayanımı, Schmidt çekici, Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, Kohezyon ve içsel sürtünme açısı, Kaya kütlesi deformasyon modülü

PhD. Thesis

SUMMARY

INDIRECT DETERMINATION OF ROCK STRENGTH PARAMETERS  
IN TUNNEL APPLICATIONS

Kadir KARAMAN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mining Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Ayhan KESİMAL  
2015, 156 Pages, 5 Pages Appendix

In this study, rock strength parameters used in tunnel applications were aimed to estimate by indirect methods. For this purpose, the engineering properties of discontinuities in different excavation faces were determined in the tunnel of a hydroelectric power plant. Laboratory tests were carried out on the core samples derived from representative rock blocks obtained from studied excavation faces. The rock masses were classified according to the RMR, Q, and RMI classification systems by using data obtained from laboratory and field studies. Schmidt rebound hammer method was proposed for indirect estimation of the UCS parameter in the problematic rock conditions. Additionally, a classification was suggested for practical estimation of Schmidt hardness classes using the ratio of UPV/UCS. The data of 490 rock samples were gathered by means of the detailed literature survey and new equations were obtained for the UCS estimation from the PLI, dividing the rocks into 12 different groups. The measured and estimated UCS values were compared in the estimation of RMR, RMI and normalize Q ( $Q_c$ ). In this study, prediction error (%), VAF %, RMSE and MAPE % analyses were performed for some methods (UCS, C, etc.) as well as the regression, correlation and ANOVA analyses. In the RMR system, charts used in the estimation of strength ratings were suggested using the PLI parameter for the  $PLI < 1$  MPa and  $PLI > 1$  MPa. The cohesion and internal friction angle of rock materials were determined and compared by using the various approaches. Rock mass deformation modulus ( $E_m$ ) was estimated more practical and cheaper compared to the equations proposed in the literature by means of the PLI and RQD. Consequently, this study brings novelty in indirect estimation of the rock strength parameters used in tunneling and provides simplicity for applicators. Furthermore, prediction models developed in this study can be used as a more convenient and practical for rock mass classification systems widely preferred in geotechnical applications.

**Key Words:** Uniaxial compressive strength, Schmidt hammer, Rock mass classification systems, Cohesion and internal friction angle, Rock mass deformation modulus

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 1.1.  | RMR sisteminin 1979 versiyonuna ait dayanım puanlaması.....   | 10 |
| Şekil 1.2.  | Ünal (1996) tarafından önerilen dayanım puan grafiği.....   | 10 |
| Şekil 1.3.  | BPI ve UCS arasındaki ilişki (a), parametre–puan grafiği (b) ve kaya tipine göre ortalama BPIc (c) (Sülükçü ve Ulusay, 2001)..... | 12 |
| Şekil 1.4.  | CSI ve UCS arasındaki ilişki (a) ve CSI’den önerilen parametre–puan grafiği (b) (Yılmaz, 2009; Yılmaz, 2010).....                 | 13 |
| Şekil 1.5.  | Çalışma alanı yer bulduru haritası.....   | 17 |
| Şekil 2.1.  | Çalışılan tünelin topoğrafik görünümü.....  | 19 |
| Şekil 2.2.  | Çalışılan tünelin kesit üzerinden görünümü.....   | 20 |
| Şekil 2.3.  | Giriş (a), yaklaşım I (b) ve II (c) ile çıkış (d) tünel portalları.....   | 21 |
| Şekil 2.4.  | Laboratuvarda yapılan çeşitli işlemler.....   | 22 |
| Şekil 2.5.  | Tünel aynasından (a) ve pasa sahasından alınan kaya blokları (b).....   | 23 |
| Şekil 2.6.  | UCS deneyine tabi tutulan bir örneğin görünümü.....   | 24 |
| Şekil 2.7.  | Tek eksenli deformabilite deneyine tabi tutulan karot örnekler.....   | 25 |
| Şekil 2.8.  | Örneklerin deformabilite deneyi çıktıları.....  | 25 |
| Şekil 2.9.  | Üç eksenli basınç dayanımı deneyinden görünüm.....  | 26 |
| Şekil 2.10. | Bazı örneklerin Schmidt çekici ile görüntüsü.....   | 27 |
| Şekil 2.11. | BÇD deneyine tabi tutulan bazı örnekler (a, b).....   | 28 |
| Şekil 2.12. | Ultrasonik P–dalga hızı ölçümlerinin yapılması.....   | 29 |
| Şekil 2.13. | Nokta yükü dayanım indeksi deneyinden görünüm.....  | 30 |
| Şekil 2.14. | Süreksizlik yüzeyinde pürüzlülük ve dalgalılık (ISRM, 1981).....  | 37 |
| Şekil 2.15. | Tünel aynasında pürüzlülük ölçümleri.....   | 38 |
| Şekil 2.16. | RMR puanının belirlenmesi için akım şeması (Bieniawski, 1989).....  | 43 |
| Şekil 2.17. | RMR sisteminde parametre–puan grafikleri (Bieniawski, 1989).....  | 45 |
| Şekil 2.18. | RMi sisteminin girdi parametrelerini gösteren şema.....   | 54 |
| Şekil 3.1.  | Çalışma sahası ve çevresinin jeolojik dikme kesiti (Bulut, 1989).....   | 63 |
| Şekil 3.2.  | Dasit tek nikol (a) ve çift nikol görünümü (b).....   | 64 |
| Şekil 3.3.  | Kireçtaşı tek nikol (a) ve çift nikol görünümü (b).....   | 65 |
| Şekil 3.4.  | Metabazalt tek nikol (a) ve çift nikol görünümü (b).....  | 65 |
| Şekil 3.5.  | Bazalt tek nikol görünümü .....   | 65 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Şekil 3.6.  | Mikro-diyorit tek nikol (a) ve çift nikol görünümü (b).....                         | 65  |
| Şekil 3.7.  | $R_{R1}-R_{R4}$ ile UCS arasındaki ilişki (Karaman ve Kesimal, 2015b).....          | 67  |
| Şekil 3.8.  | $R_{D1}-R_{D3}$ ile UCS arasındaki ilişki (Karaman ve Kesimal, 2015b).....          | 68  |
| Şekil 3.9.  | UCS değerleri arasındaki ANOVA analizi (Karaman ve Kesimal, 2015b)                  | 69  |
| Şekil 3.10. | UCS ve UPV arasındaki ilişki (a-d).....   | 72  |
| Şekil 3.11. | $R_{ISRM-EV}$ ve $R_{ISRM-RV}$ ile UCS arasındaki ilişki (a-h).....                 | 73  |
| Şekil 3.12. | $R_{ISRM-EV}$ ve $R_{ISRM-RV}$ ile UPV arasındaki ilişki (a-h).....                 | 74  |
| Şekil 3.13. | $R_{ISRM-EV}$ ve $R_{ISRM-RV}$ ile UPV/UCS oranı arasındaki ilişki (a-h).....       | 76  |
| Şekil 3.14. | UPV/UCS oranının Schmidt sertlik sınıfı üzerindeki değişimi.....                    | 78  |
| Şekil 3.15. | PLI ve UCS arasındaki ilişki.....   | 79  |
| Şekil 3.16. | UCS ve PLI arasında elde edilen eşitliğin literatürle karşılaştırılması.....        | 81  |
| Şekil 3.17. | Jeolojik kökene göre UCS ve PLI arasındaki ilişki (a-d) .....                       | 84  |
| Şekil 3.18. | Magmatik kayalarda UCS ve PLI arasındaki ilişki (a-c) .....                         | 85  |
| Şekil 3.19. | Metamorfik kayalarda UCS ve PLI arasındaki ilişki (a, b) .....                      | 85  |
| Şekil 3.20. | Tortul kayalarda UCS ve PLI arasındaki ilişki (a-c).....                            | 86  |
| Şekil 3.21. | Farklı k'dan hesaplanan ölçülen ve tahmini UCS arasındaki ilişki (a-c)...           | 88  |
| Şekil 3.22. | BÇD ve UCS arasındaki ilişki (Karaman vd., 2015b).....                              | 89  |
| Şekil 3.23. | UCS ile BHA (a) ve UPV (b) arasındaki ilişki.....                                   | 90  |
| Şekil 3.24. | Ölçülen ve tahmini UCS arasındaki ilişki.....                                       | 92  |
| Şekil 3.25. | Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin örnek noktalarına karşı gösterimi...            | 93  |
| Şekil 3.26. | Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin R <sub>Mi</sub> sisteminde kullanılması (a-e).  | 96  |
| Şekil 3.27. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen R <sub>Mi</sub> verilerinin ANOVA grafiği     | 98  |
| Şekil 3.28. | R <sub>Mi</sub> değerlerinin UCS parametresine bağlı değişimi.....                  | 99  |
| Şekil 3.29. | UCS parametresinin R <sub>Mi</sub> sınıflaması üzerindeki etkisi.....               | 99  |
| Şekil 3.30. | Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin Q <sub>c</sub> sisteminde kullanılması (a-e)... | 102 |
| Şekil 3.31. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen Q <sub>c</sub> verilerinin ANOVA grafiği...   | 103 |
| Şekil 3.32. | Q <sub>c</sub> değerlerinin UCS parametresine bağlı değişimi.....                   | 104 |
| Şekil 3.33. | UCS parametresinin Q sınıflaması üzerindeki etkisi.....                             | 105 |
| Şekil 3.34. | Ölçülen ve tahmini dayanım puanlarının korelasyon grafikleri (a-f).....             | 106 |
| Şekil 3.35. | Ölçülen ve tahmini dayanım puanlarının ANOVA analizi.....                           | 108 |
| Şekil 3.36. | RMR puanının UCS parametresine bağlı değişimi.....                                  | 110 |
| Şekil 3.37. | UCS parametresinin RMR sınıfı üzerindeki etkisi.....                                | 110 |
| Şekil 3.38. | UCS ve PLI arasındaki ilişki, PLI<1 (a) ve PLI>1 (b) için (Metot-1).....            | 113 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Şekil 3.39. | UCS ile PLI arasındaki ilişki, $PLI < 1$ (a) ve $PLI > 1$ (b) için (Metot-2)..... | 114 |
| Şekil 3.40. | $PLI < 1$ (a) ve $PLI > 1$ (b) için yöntemlerin karşılaştırılması.....            | 117 |
| Şekil 3.41. | $PLI < 1$ (a) ve $PLI > 1$ MPa (b) için önerilen dayanım puan grafikleri .....    | 118 |
| Şekil 3.42. | Birleştirilmiş dayanım puan grafiği (Karaman vd., 2015c).....                     | 119 |
| Şekil 3.43. | Yöntemlerin karşılaştırılması; dayanım puanı (a) ve RMR (b).....                  | 121 |
| Şekil 3.44. | Ölçülen ve tahmini RMR puanları arasındaki % hata değerleri.....                  | 121 |
| Şekil 3.45. | RMR ve Q arasındaki ilişki (a) ve literatürle karşılaştırılması (b).....          | 124 |
| Şekil 3.46. | RMR, $R_{Mi}$ , Q ve $Q_c$ arasındaki ilişki.....                                 | 125 |
| Şekil 3.47. | C-UCS (a) ve C-BÇD (b) arasındaki ilişki.....                                     | 127 |
| Şekil 3.48. | $\phi$ değerlerinin pratik tahmini (bazalt ve kireçtaşları için örnek gösterim).. | 128 |
| Şekil 3.49. | Ölçülen ve tahmini C arasında korelasyon analizleri.....                          | 130 |
| Şekil 3.50. | Kohezyon değerlerinin ANOVA grafiği .....   | 132 |
| Şekil 3.51. | $E_m$ değerlerinin örnek noktasına göre değişimi.....                             | 134 |
| Şekil 3.52. | RMR ile $E_m$ arasındaki ilişki .....   | 134 |
| Şekil 3.53. | $E_m$ değerlerinin karşılaştırılması (Karaman vd., 2014).....                     | 134 |
| Şekil 3.54. | $E_m$ değerlerin ANOVA grafiği (Karaman vd., 2014).....                           | 136 |
| Şekil 3.55. | Elde edilen deformasyon modülü değerlerinin histogram grafikleri.....             | 137 |

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tablo 1.1.  | Literatürde PLI'den UCS tahminine yönelik geliştirilen eşitlikler.....     | 6  |
| Tablo 1.2.  | Literatürde önerilmiş Schmidt sertlik yöntemleri (Göktan ve Güneş, 2005)   | 7  |
| Tablo 1.3.  | Schmidt sertliğinden UCS tahmini için önerilen eşitlikler.....             | 7  |
| Tablo 1.4.  | BÇD ve UPV'den UCS tahminine yönelik literatürde önerilen eşitlikler....   | 8  |
| Tablo 1.5.  | RMR sisteminin gelişimi süresince dayanım puanlarının değişimi.....        | 9  |
| Tablo 1.6.  | Deformasyon modülü tahmininde kullanılan bazı ampirik eşitlikler.....      | 16 |
| Tablo 2.1.  | Bu çalışma ve literatürden derlenen PLI ve UCS değerleri.....              | 31 |
| Tablo 2.2.  | Kaya malzemelerine ait fiziko–mekanik deney sonuçları.....                 | 33 |
| Tablo 2.3.  | Farklı yöntemlere göre elde edilmiş Schmidt sertlik değerleri.....         | 34 |
| Tablo 2.4.  | Kaya türüne göre indeks deneylerin sonuçları.....                          | 35 |
| Tablo 2.5.  | Süreksizlik ara uzaklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).....             | 36 |
| Tablo 2.6.  | Süreksizlik devamlılığının tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).....           | 37 |
| Tablo 2.7.  | Süreksizlik açıklığını tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) .....              | 39 |
| Tablo 2.8.  | Kaya kütlelerinin bozunma derecesi (ISRM, 1981).....                       | 40 |
| Tablo 2.9.  | RQD sınıflaması (Deere, 1964).....   | 41 |
| Tablo 2.10. | RMR sisteminin 1989 versiyonu (Bieniawski, 1989).....                      | 44 |
| Tablo 2.11. | RMR sisteminde süreksizlik yönelim etkisi (Bieniawski, 1989).....          | 44 |
| Tablo 2.12. | RMR sisteminde süreksizlik yönelim düzeltmesi (Bieniawski, 1989).....      | 44 |
| Tablo 2.13. | Patlatma ve zayıflık düzlemleri düzeltmesi (Kendorski vd., 1983).....      | 46 |
| Tablo 2.14. | RMR puanına göre kaya sınıfları (Bieniawski,1989) .....                    | 46 |
| Tablo 2.15. | Çalışılan birimlerin RMR <sub>89</sub> puanları .....                      | 47 |
| Tablo 2.16. | RQD puanına göre tanımlama (Deere, 1964).....                              | 48 |
| Tablo 2.17. | Süreksizlik takım sayısı - J <sub>n</sub> (Barton vd., 1974).....          | 49 |
| Tablo 2.18. | Süreksizlik pürüzlülük sayısı - J <sub>r</sub> (Barton vd., 1974).....     | 49 |
| Tablo 2.19. | Süreksizlik yüzeyi bozunma sayısı - J <sub>a</sub> (Barton vd., 1974)..... | 50 |
| Tablo 2.20. | Süreksizlik suyu azaltma faktörü - J <sub>w</sub> (Barton vd., 1974).....  | 50 |
| Tablo 2.21. | Gerilme azaltma faktörü - SRF (Barton ve Grimstad, 1994).....              | 51 |
| Tablo 2.22. | Q değerlerine göre kaya sınıflaması (Barton vd., 1974).....                | 51 |
| Tablo 2.23. | Çalışma sahasındaki birimlerin Q ve Q <sub>c</sub> puanları .....          | 52 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tablo 2.24. | Süreksizlik pürüzlülük faktörü, jR (Palmström, 2000).....                               | 54  |
| Tablo 2.25. | Süreksizlik uzunluk faktörü, jL (Palmström, 2000) .....                                 | 54  |
| Tablo 2.26. | Süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü, jA (Palmström, 2000).....                           | 55  |
| Tablo 2.27. | RMi puanına göre tanımlama (Palmström, 2000).....                                       | 55  |
| Tablo 2.28. | Çalışma sahasındaki birimlerin RMi puanları .....                                       | 56  |
| Tablo 2.29. | Ampirik eşitlikler yardımıyla hesaplanan $E_m$ değerleri.....                           | 58  |
| Tablo 2.30. | Pearson korelasyon katsayısına göre değişkenler (Özdamar, 2009).....                    | 60  |
| Tablo 2.31. | MAPE değerlerinin sınıflaması (Lewis, 1982).....  | 61  |
| Tablo 3.1.  | Dunnet testi ile çoklu grupların karşılaştırılması.....                                 | 69  |
| Tablo 3.2.  | % 10'dan küçük tahmin hata değerleri (Karaman ve Kesimal, 2015b).....                   | 70  |
| Tablo 3.3.  | Verilerin istatistik analiz değerleri.....  | 77  |
| Tablo 3.4.  | UPV/UCS oranından sertlik sınıfı tahmini (Karaman ve Kesimal, 2015a)..                  | 79  |
| Tablo 3.5.  | Kaya tipine göre korelasyon katsayıları ve regresyon eşitlikleri .....                  | 80  |
| Tablo 3.6.  | Farklı kökenden kayaçlar için PLI'den UCS tahmini.....                                  | 84  |
| Tablo 3.7.  | Çalışma kapsamında farklı deneylerden UCS tahmini için üretilen ampirik eşitlikler..... | 91  |
| Tablo 3.8.  | Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin korelasyon analiz sonuçları.....                    | 91  |
| Tablo 3.9.  | VAF, RMSE, MAPE ve korelasyon katsayısı değerleri (UCS).....                            | 93  |
| Tablo 3.10. | Ölçülen ve tahmini UCS değerleri.....   | 94  |
| Tablo 3.11. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen RMi değerleri.....                                | 95  |
| Tablo 3.12. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen RMi değerlerinin korelasyon analizi.....          | 97  |
| Tablo 3.13. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen RMi değerlerinin ANOVA analizi                    | 97  |
| Tablo 3.14. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen $Q_c$ değerleri.....                              | 100 |
| Tablo 3.15. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen $Q_c$ değerlerinin korelasyon analizi             | 101 |
| Tablo 3.16. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen $Q_c$ değerlerinin ANOVA analizi...               | 103 |
| Tablo 3.17. | Ölçülen ve tahmini dayanım puanı değerlerinin korelasyon analizi.....                   | 106 |
| Tablo 3.18. | Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen $R_s$ değerleri.....                              | 107 |
| Tablo 3.19. | Ölçülen dayanım değerleri ile tahmini değerlerin kıyaslanması.....                      | 107 |
| Tablo 3.20. | PLI ve UCS değerlerinin sınıflandırılması.....  | 113 |
| Tablo 3.21. | Ölçülen ve tahmini $R_s$ arasında VAF, RMSE, MAPE ve r değerleri.....                   | 115 |
| Tablo 3.22. | PLI<1 ve PLI>1 MPa için ANOVA analizi (yöntemler için).....                             | 115 |
| Tablo 3.23. | PLI<1 ve PLI>1 MPa için ANOVA analizi (ortalama için).....                              | 116 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tablo 3.24. | Grupların dayanım puanı ve RMR puanına göre karşılaştırılması.....  | 121 |
| Tablo 3.25. | VAF, RMSE ve MAPE değerleri (dayanım puanı ve RMR).....             | 122 |
| Tablo 3.26. | RMR tahmini için Q sisteminden önerilen eşitlikler.....             | 123 |
| Tablo 3.27. | C ve $\phi$ ile UCS ve BÇD arasında regresyon analiz bulguları..... | 126 |
| Tablo 3.28. | İçsel sürtünme açısının tahmini için yaklaşımlar.....               | 128 |
| Tablo 3.29. | Ölçülen ve tahmini C değerleri.....                                 | 131 |
| Tablo 3.30. | Dunnett yöntemine göre grupların karşılaştırılması.....             | 132 |
| Tablo 3.31. | Tukey HSD yöntemine göre grupların karşılaştırılması.....           | 132 |
| Tablo 3.32. | VAF, RMSE, MAPE ve r değerleri (kohezyon).....                      | 133 |
| Tablo 3.33. | Grupların çoklu karşılaştırması (ANOVA Tamhane's T2 testi).....     | 136 |



## SEMBOLLER DİZİNİ

|                          |   |
|--------------------------|---|
| A                        | : Konik başlıkların temas noktalarından geçen örneğin kesit alanı       |
| A <sub>B</sub>           | : Patlatma düzeltmesi   |
| A <sub>S</sub>           | : Gerilim düzeltmesi  |
| A <sub>W</sub>           | : Başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme                        |
| BÇD                      | : Brazilian çekme dayanımı  |
| BHA (γ)                  | : Birim hacim ağırlığı  |
| BPI <sub>c</sub>         | : Disk makaslama indeksi  |
| C (C <sub>1</sub> )      | : Kohezyon  |
| CSI                      | : Karot boğma indeksi   |
| C <sub>2</sub>           | : UCS ve BÇD parametresinden lineer Mohr zarfı ile elde edilen kohezyon |
| C <sub>3</sub>           | : UCS parametresinden regresyon analizi ile elde edilen kohezyon        |
| C <sub>4</sub>           | : BÇD parametresinden regresyon analizi ile elde edilen kohezyon        |
| Ç                        | : Çıkış tüneli  |
| ÇR                       | : Çambaşı regülatörü  |
| D                        | : Örnek çapı  |
| Db                       | : Blok çapı   |
| De                       | : Eşdeğer karot çapı  |
| D <sub>p</sub>           | : Düzeltilmiş puan  |
| D <sub>1</sub>           | : Deneme yöntem 1, bu çalışmada önerilen Schmidt sertlik yöntemi        |
| D <sub>2</sub>           | : Deneme yöntem 2, bu çalışmada önerilen Schmidt sertlik yöntemi        |
| D <sub>3</sub>           | : Deneme yöntem 3, bu çalışmada önerilen Schmidt sertlik yöntemi        |
| E <sub>i</sub>           | : Kaya malzemesine ait elastisite modülü                                |
| E <sub>m</sub>           | : Kaya kütlelerine ait deformasyon modülü                               |
| F                        | : Nokta yükü indeksi deneyinde boyut düzeltme faktörü                   |
| G                        | : Giriş tüneli  |
| HES                      | : Hidroelektrik santral   |
| I <sub>s</sub>           | : Düzeltilmemiş nokta yük dayanım indeksi                               |
| I <sub>s(50)</sub> (PLI) | : 50 mm çapa göre düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi                |
| J <sub>n</sub>           | : Süreksizlik takımı sayısı   |
| J <sub>r</sub>           | : Süreksizlik pürüzlülük değeri   |

|               |   |
|---------------|---|
| $J_a$         | : Süreksizlik yüzeyi bozunma değeri                                 |
| $jA$          | : Süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü                                |
| $jC$          | : Süreksizlik faktörü   |
| $jL$          | : Süreksizlik uzunluk faktörü                                       |
| $JP$          | : Eklem/süreksizlik parametresi                                     |
| $jR$          | : Süreksizlik pürüzlülük faktörü                                    |
| $J_r/J_a$     | : Bloklar arasındaki kayma dayanımı                                 |
| $J_v$         | : 1 m <sup>3</sup> 'lük kaya bloğundaki süreksizlik sayısı          |
| $J_w$         | : Süreksizlik suyu azaltma faktörü                                  |
| $J_w/SRF$     | : Aktif gerilme   |
| $k$           | : UCS/PLI oranı   |
| $L$           | : Örnek boyu  |
| $L/D$         | : Boy/çap oranı   |
| $\ddot{O}_D$  | : Ölçülmüş değer  |
| $\ddot{O}_p$  | : Ölçülen puan  |
| $P$           | : Örneği kıran kuvvet   |
| $Q$           | : Kaya Kütle Kalitesi   |
| $Q_c$         | : Normalize Q   |
| $R_{ISRM-RV}$ | : Schmidt sertlik yönteminde ISRM revize versiyon                   |
| $R_{ISRM-EV}$ | : Schmidt sertlik yönteminde ISRM eski versiyon ( $R_1$ )           |
| $R_L$         | : L tipi Schmidt çekici   |
| $R_N$         | : N tipi Schmidt çekici   |
| $RM_i$        | : Kaya Kütle İndeksi  |
| $RMR$         | : Kaya Kütle Puanlaması   |
| $RMR_T$       | : Temel RMR puanı   |
| $RMR_{89}$    | : RMR'nin 1989 versiyonu  |
| $RQD$         | : Kaya Kalite Göstergesi  |
| $RQD/J_n$     | : Kaya kütlelerinin yapısı ve blok boyutunun ölçüsü                 |
| $R_S$         | : Kaya malzemesi dayanım puanı                                      |
| $R_1$         | : ISRM, (2007) tarafından önerilen Schmidt sertlik yöntemi          |
| $R_2$         | : ASTM, (2001) tarafından önerilen Schmidt sertlik yöntemi          |
| $R_3$         | : USBR, (1998) tarafından önerilen Schmidt sertlik yöntemi          |
| $R_4$         | : Sumner ve Nel, (2002) tarafından önerilen Schmidt sertlik yöntemi |

|                |  |
|----------------|--|
| SB             | : Santral binası   |
| SD             | : Süreksizlik durum puanı düzeltmesi   |
| S.Ö.           | : Süreksizlik özellikleri (RQD, süreksizlik ara uzaklığı, devamlılık, açıklık, pürüzlülük, dolgu, bozunma) toplam puanları |
| SRF            | : Gerilme azaltma faktörü  |
| SYD            | : Süreksizlik yönelim düzeltmesi   |
| S1             | : En büyük süreksizlik ara uzaklığı  |
| S3             | : En küçük süreksizlik ara uzaklığı  |
| T <sub>D</sub> | : Tahmini değer  |
| UCS            | : Tek eksenli basınç dayanımı  |
| UPV            | : Ultrasonik P–dalga hızı deneyi   |
| V <sub>b</sub> | : Blok hacmi   |
| WD             | : Ayrışma derecesi   |
| Y-I            | : Yaklaşım I tüneli  |
| Y-II           | : Yaklaşım II tüneli   |
| YSD            | : Yeraltı suyu durum puanı   |
| $\sigma_c$     | : Çekme dayanımı   |
| $\nu$          | : Poisson oranı  |
| $\beta$        | : Blok şekli faktörü   |
| $\mu_s$        | : Mikro saniye   |
| $\phi$         | : İçsel sürtünme açısı   |
| $\lambda$      | : 1 metre uzunluğundaki ölçüm hattını kesen ortalama süreksizlik sayısı  |

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak giderek artmakta olan enerji, ulaşım, yerleşim ve alt yapı gibi gereksinimlerin karşılanabilmesi için, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yeraltı yapıları hızla çoğalmakta ve boyut olarak büyümektedir. Bu yapıların başında tüneller gelmektedir. Ancak tüneller; baraj, köprü ayağı ve bina gibi yapılara kıyasla daha fazla oranda bilinmeyenleri içermektedir. Bu nedenle çeşitli araştırma yöntemlerinden yararlanılarak bu bilinmeyenlerin sayısının en aza indirilmesi gerekmektedir. Tünel inşaatı sırasında karşılaşılan yeraltı suyu, ayrışmış ve çok çatlaklı kayalar, fay zonları vb. gibi sorunlar inşaatta gecikmelere neden olmakta ve bunların sonucunda pahalı çözümlere gidilmekte, bu da maliyeti büyük ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle mühendislik jeolojisi çalışmaları tünellerin daha ekonomik, daha az riskle ve daha kısa sürede açılmasına büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır (Bulutlar, 1983; Genç, 1983).

Yumuşak zeminlerde tünel inşaatı sırasında düşük dayanım ve yüksek deformasyonların etkisiyle; tünelin duraylılığı, kazı yöntemi, tahkimat ve kaplama dizaynı doğrudan etkilenmektedir. Daha yüksek dayanım özelliğine sahip kaya ortamlarında açılan tünellerde ise jeolojik koşulların sürekli değişim göstermesi, kayaçların tabakalanma şekilleri, kıvrımlanmalar, süreksizlikler, metamorfizma, ayrışma, geçirimli ve geçirimsiz kayaçların birbirini izlemesi, yeraltı suyu ve farklı basınç direncine sahip kayaçların varlığı gibi sorunlarla sıkça karşılaşılmaktadır. Bu faktörlerin etkisiyle tünelde ilerleme hızı azalabilmekte, kazı yöntemi değiştirilebilmekte, bazı durumlarda tüneller durdurulmakta ve/veya terk edilmektedir (Genç, 1983).

Fazla süreksizlik içermeyen bir kaya kütlesi içinde açılan tünel veya yeraltı boşlukları ilave destek elemanına gerek duymadan kendi kendini tutabilmektedir (Onargan vd., 2009). Zayıf ve çok eklem içeren kaya kütlesi içinde açılan yeraltı açıklıklarında ise çeşitli faktörlere bağlı olarak çoğu zaman destek gerekmektedir. Yeraltında oluşturulan bir açıklık civarında, doğal gerilmeler için var olan denge, üstteki kaya yükü, tektonik kuvvetler, süreksizlik düzlemleri ile kayanın diğer jeoteknik özellikleri ve yeraltı suyunun miktar ve basıncına bağlı olarak değişmektedir. Tünel kazısında en uygun ve ekonomik destekleme sisteminin belirlenmesi, tasarım ve inşa aşaması için

mühendislik projelerinin uygulamasına katkıda bulunmaktadır (Kaya vd., 2011). Tünel duraylılığı genelde kaya bulunu ve iksa sistemleri gibi uygun destek ve güçlendiriciler (tahkimat) ile sağlanmaktadır (Sozio, 1998; Mair, 1998; Funatsu vd., 2008). Tünel tasarımcısının asıl amacı uygun kazı yöntemiyle beraber en uygun ve ekonomik destek sistemini belirlemektir. Bu nedenle bir projenin ilk evrelerindeki ana kaygı duraylılığı etkileyen deformasyonlar olmaktadır. Yeraltı açıklıklarındaki deformasyonlar ve çevre kayacın duraysızlığı başlıca sorunlardandır (Aksoy vd., 2006). Birçok durumda, ilk evrelerde küçük bir yanlış yorumlama bile tünelin inşa safhasında maliyetin artmasına ve zaman kaybına yol açmaktadır (Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2004).

Görgül (kaya kütlesi sınıflama sistemleri) ve sayısal yöntemler (Phase<sup>2</sup>, Flac), yeraltı mühendislik yapılarının tasarlanmasında (tünellerin açılması esnasında destekleme ve takviye elamanlarının seçiminde) yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bazılarıdır. Projelerin ilk aşamasında veya tünel güzergahı belirleme çalışmalarında bir çok araştırmacı tarafından başarıyla kullanılmış olan kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri evrensel düzeyde kabul görmüştür (Bieniawski, 1989; Barton, 2002; Ramamurthy, 2004; Başarır vd., 2005; Hoek ve Diederichs, 2006; Gürocak, 2011). Bu sistemler kaya kütle kalitesinin sayısal tanımlaması için önemlidir. Güvenilir bir destek kapasitesinin duraylılık analizi ve tahmini kaya mühendisliğindeki en zor araştırmalardan biridir. Bu nedenle, tünellerde destek kapasitesini belirlemek ve duraylılık analizlerini yapmak için birden fazla yöntemin kullanılması daha sağlıklı değerlendirme sağlamaktadır (Gürocak vd., 2007).

Mühendislik jeolojisi çalışmaları kaya malzemesinin ve doğal süreksizliklerin detaylı olarak incelenmesini içermektedir. Bu bağlamda, kaya kütlelerinin ayrışma/alterasyon derecesi, dokusu, renk tayini, basınç dayanımı, süreksizliklerin ise yönelimleri, aralık uzaklıkları, açıklıkları, dolgu durumları, dalgalılık ve pürüzlülükleri gibi özellikleri tanımlanmaktadır. Farklı sınıflandırma sistemleri farklı parametreleri dikkate almaktadır. Bu nedenle, projelerin ilk aşamalarının yürütülmesi süresince en az iki farklı kaya kütlesi sınıflama sisteminin kullanılması gerektiği önerilmektedir (Hoek vd., 1993). Kaya Kütle Puanlaması (RMR), Kaya Kütle Kalitesi (Q) ve Kaya Kütle İndeksi (RMi) yeraltı mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2004; Gürocak vd., 2007; Verma ve Singh, 2010; Kaya vd., 2011).

## 1.2. Çalışmanın Amacı

Kaya kütlelerinde uygulanan yeraltı mühendislik çalışmalarında yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek olması, yatırımlar yapılmadan önce tasarımlarının iyi planlanmasını gerektirmektedir. Özellikle sadece süreksizliklerin veya kaya malzemesinin mühendislik özellikleri dikkate alınarak yapılan mühendislik tasarımlarıyla ilgili sorunlar, araştırmacıları süreksizliklerle birlikte kaya malzemesini de içeren kaya kütlelerinin bir sistem olarak dikkate alınmasının önemine yöneltmiştir (Ulusay ve Sönmez, 2007). Kaya kütlelerinin davranışını ortaya koyabilmek için kaya malzemesi özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin ana kütleyle temsil edebilmesi gerekir (Beyhan, 2008). Hidroelektrik santrali, karayolu ve madencilik gibi çeşitli amaçlara yönelik olarak açılacak tünellerde güzergah seçimi ilk yapılan çalışmalardan biridir. Ancak güzergah seçimine bile etki edebilecek ve tünel açılmasında tahkimattan kazıya kadar bir çok faktörü etkileyen en önemli unsur jeolojik özelliklerdir. Tünel güzergâhındaki kaya kütlelerinin içerdiği süreksizlik ve kaya malzemelerinin mühendislik özellikleri (jeolojik veriler) ile yeraltı suyu durumu tünel çalışmalarının genel anlamda gidişatını belirler. Bu bağlamda ön analizlerde söz konusu jeolojik verilerin projenin amacına uygun olarak toplanması ve değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Tünellerde yapılan jeoteknik çalışmalarda güzergah etütleri ilk yapılan çalışmalardan biridir. İçinden tünelin geçeceği kaya ortamını tanımlamak amacıyla araştırma sondajları yapılır. Açılan sondaj kuyularında yapılabiliyorsa tünel kotundaki kayalar için yerinde deneyler yapılarak deformasyon modülü belirlenir. Çıkan karotlardan süreksizliklerin özellikleri tanımlanır, laboratuvar deneyleri için örnekler alınır ve gerekli parametreler belirlenerek tünelin ön destek tasarımında kullanılır. RMR, Q, RMI gibi sınıflamalara göre destek elemanları belirlenerek sayısal analizlerle test edilir ve revize edilir. Ancak uygulamada topoğrafyanın uygun olmadığı durumda araştırma sondajları yetersiz kalabilmektedir. Kaya yüzleklerinden süreksizliklerin özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan çalışmalar da sondaj verilerinin daha sağlıklı değerlendirilmesine katkıda bulunmaktadır. Jeoteknik uygulamalarda gerekli olan en önemli kaya malzeme parametresi tek eksenli basınç dayanım (UCS) parametresidir. Eğer baraj, istinat duvarı, otoyol köprüleri gibi mühendislik yapılarını taşıyacak kaya ortamının taşıma gücünün de bilinmesi gerekiyorsa kaya malzemesine ait kohezyon (C) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) parametrelerinin belirlenmesi de önem arz etmektedir. Ayrıca kaya kütlesi deformasyon modülü ( $E_m$ ) tünel gibi önemli mühendislik

uygulamalarında bilinmesi gerekli olan önemli bir parametredir. Ancak özellikle güzergah belirleme çalışmalarında ve projelerin ilk aşamasında kaya kütlelerinden temsili örnek almada yaşanan güçlüklerden veya problemlili kaya ortamlarından (zayıf, piroklastik, sık eklemlili, vb.) dolayı RMR ve RMI sınıflamasında ve bazı  $E_m$  eşitliklerinde kullanılan UCS gibi yüksek kaliteli karot gerektiren deneylerin yapılması mümkün olmamaktadır (Sülükçü ve Ulusay, 2001; Gökçeoğlu, 2002; Yılmaz, 2010). Temsili örnek alınmasını güçleştiren unsurlardan biri de engebelili arazi yapısından dolayı araştırma sondajlarının yeteri kadar yapılamamasıdır. Bu nedenle bu çalışmanın amacı, projelerin ilk aşamasında araştırmacıların sıklıkla kullandığı önemli jeoteknik parametrelere (UCS, C,  $\phi$  ve  $E_m$ ) alternatif yaklaşımlar sunmak ve sonuçlarını literatür ile tartışmaktır. Jeoteknik verilerin yetersiz olduğu durumda hangi parametrelerin diğerinin yerine alternatif olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve bununla ilgili sınırlamalar belirtilmiştir.

Doğu Karadeniz Havzası, aldığı yağış miktarı ve önemli yüzeysel su potansiyeliyle, küçük hidroelektrik santraller (HES) açısından verimli bir havzadır. Uzlu vd. (2008) tarafından Doğu Karadeniz Havzası'ndaki inşa, fizibilite vb. aşamada bulunan küçük hidroelektrik santraller toplamının 2008 yılı itibariyle 213 olduğu rapor edilmiştir. Bunlardan 84 tanesi sadece Trabzon il sınırları içerisinde yer almaktadır. HES projeleri kapsamında tünel gibi mühendislik tasarımlarının yapıldığı bilinmektedir. Bu projelerin dışında ayrıca karayolu tünelleri vb. gibi mühendislik jeolojisi projeleri yapılmaktadır. Bu çalışmada, HES projesi kapsamında açılan 7132 metre uzunluğundaki enerji tüneli (Trabzon-Çaykara) örnek çalışma sahası olarak değerlendirilmeye alınmıştır.

### **1.3. Kaya Malzemesine Ait Tek Eksenli Basınç Dayanımı Parametresi**

UCS parametresi uluslararası deney standartlarına uygun ölçüde hazırlanan karot örnekler ve bir yükleme cihazı ile belirlenmektedir (ISRM, 2007). Ancak, bu parametrenin doğrudan belirlenmesi projelerin başlangıç aşamalarında nispeten pahalı, zahmetli ve zaman alıcı olabilmektedir. Ayrıca, standartlara veya önerilmiş yöntemlere uygun boyutlarda örnek hazırlanması her zaman mümkün olmamakta, özellikle zayıf, lamine ve ileri derecede eklemlili kayalarda bu işlem çoğu kez olanaksız hale gelmektedir. Bu nedenle nispeten daha küçük boyutlarda örnek hazırlama işleminin olduğu dolaylı yöntemlere olan ilgi artmıştır (Ulusay ve Sönmez, 2007).

### 1.3.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmininde Önceki Yaklaşımlar

Literatürde birçok araştırmacı nokta yükü dayanım indeksini (PLI) pratikliği ve numune hazırlama kolaylığından dolayı UCS tahmininde kullanmıştır (D'Andrea vd., 1964; Deere ve Miller, 1966; Broch ve Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; Read vd., 1980; ISRM, 1985; Vallejo vd., 1989; Cargill ve Shakoor, 1990; Smith, 1997; Kahraman, 2001; Palchik ve Hatzor, 2004; Fener vd., 2005; Kılıç ve Teymen, 2008; Singh vd., 2012; Mishra ve Basu, 2013; Karaman vd., 2015a). Ayrıca Schmidt sertlik (R), ultrasonik P dalga hızı (UPV), birim hacim ağırlık ( $\gamma$ , BHA), Brazilian çekme (BÇD) deneyleri UCS tahmininde sıklıkla kullanılan dolaylı yöntemler olmuştur (Singh vd., 1983; Yaşar ve Erdoğan, 2004a; Yagiz, 2009; Ersoy ve Kanık, 2012; Karaman ve Kesimal, 2013; Karaman ve Kesimal, 2015a).

PLI, hem laboratuvar hem de arazide uygulanabilirliği ve test kolaylığı açısından UCS tahmini için yaygın olarak kullanılan ve kabul gören bir deney yöntemidir. Birçok araştırmacı UCS ve PLI arasında ilişkiyi araştırmak için farklı kökenden (magmatik, metamorfik ve tortul) çeşitli kayaç örnekleri üzerinde çalışmalarda bulunmuş ve UCS tahmini için eşitlikler önermişlerdir (Broch ve Franklin, 1972; Kahraman, 2001; Tsiambaos ve Sabatakakis, 2004; Heidari vd., 2012; Singh vd., 2012). Bu eşitliklerin çoğu benzer sonuçlar vermesine rağmen, tüm kayaç tipleri için PLI'den UCS tahminine yönelik tek bir eşitlik yoktur (Chau ve Wong, 1996; Hawkins, 1998; Romana, 1999). Ayrıca bazı yazarlar uygulama kolaylığından dolayı UCS ile PLI arasında sıfır kesişim eşitliklerini kullanmışlardır (Tablo 1.1). Kahraman (2001) UCS ve PLI arasında lineer bir ilişki bulmuş olup, kömür kökenli kayaçların diğer kayaçlara nazaran daha dik eğim çizgisine sahip olduğunu vurgulamıştır. Kahraman vd (2005) ve Fener vd (2005) ise UCS ve PLI arasındaki ilişkinin lineer olduğunu sırasıyla 38 farklı ( $r=0.78$ ) ve 11 farklı kayaç için ( $r=0.85$ ) belirtmişlerdir. Quane ve Russel (2005) UCS ve PLI arasında dayanımı yüksek kayaçlarda lineer, dayanımı düşük kayaçlarda ise lineer olmayan bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır. Kılıç ve Teymen (2008) 19 farklı kayaç üzerinde yaptığı çalışmada, UCS ve PLI arasındaki ilişkiyi en iyi temsil eden eğrinin logaritmik olduğunu ( $r=0.99$ ) ifade etmişlerdir. Kahraman (2014) piroklastik kayaçlar üzerinde yaptığı çalışmada doymun ve kuru durumda UCS ve PLI arasındaki ilişkiyi farklı regresyon modellerini (lineer, logaritmik, üstel vb.) kullanarak araştırmış ve değişkenler arasında çok yüksek ilişki ( $r=0.93$ ) elde etmiştir.



Tablo 1.1. Literatürde PLI'den UCS tahminine yönelik geliştirilen eşitlikler

| Referans                    | Kaya Tipi                    | Eşitlik                        |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| D'Andrea vd. (1964)         | –                            | UCS = 15.3PLI+16.3             |
| Deere ve Miller (1966)      | –                            | UCS = 20.7PLI+29.6             |
| Singh (1981)                | –                            | UCS = 18.7PLI–13.2             |
| Gunsallus ve Kulhawy (1984) | –                            | UCS = 16.5PLI+51.0             |
| Cargill ve Shakoor (1990)   | –                            | UCS = 23PLI+13                 |
| Grasso vd. (1992)           | –                            | UCS = 9.30PLI+20.04            |
| Ulusay vd. (1994)           | Kumtaşı                      | UCS = 19PLI+12.7               |
| Kahraman (2001)             | Magmatik, tortul, metamorfik | UCS = 8.41PLI+9.51             |
| Fener vd. (2005)            | Magmatik, tortul, metamorfik | UCS = 9.08PLI+39.32            |
| Kahraman vd. (2005)         | Magmatik, tortul, metamorfik | UCS = 10.91PLI+27.41           |
| Heidari vd. (2012)          | Jips                         | UCS = 5.575PLI+21.92           |
| Karaman ve Kesimal (2012)   | Magmatik, tortul, metamorfik | UCS = 20.42PLI–5.146           |
| Kahraman (2014)             | Piroklastik kayalar          | UCS = 2.27e <sup>1.04PLI</sup> |
| Broch ve Franklin (1972)    | Çeşitli kayalar              | UCS = 24PLI                    |
| Jenni ve Ballisat (1979)    | Kireçtaşları ve dolomitler   | UCS = 12PLI                    |
| Hassani vd. (1980)          | Tortul kayalar               | UCS = 29PLI                    |
| Read vd. (1980)             | Tortul kayalar               | UCS = 20PLI                    |
| ISRM (1985)                 | Magmatik, tortul, metamorfik | UCS = (20–25)PLI               |
| Vallejo vd. (1989)          | Kumtaşı                      | UCS = 17.4PLI                  |
| Ghosh ve Srivastava (1991)  | Granitik kayalar             | UCS = 16PLI                    |
| Tugrul ve Zarif (1999)      | Granitik kayalar             | UCS = 15.25PLI                 |
| Basu and Aydin (2006)       | Hong Kong Granitleri         | UCS = 18PLI                    |
| Agustawijaya (2007)         | Zayıf tortul kayalar         | UCS = 13.4PLI                  |
| Karaman vd. (2015a)         | Magmatik, tortul, metamorfik | UCS = 17.7PLI                  |

Schmidt çekici beton sertliğini test etmek için ilk olarak 1948 yılında geliştirilmiştir (Schmidt, 1951). Daha sonra ise kaya dayanımını test etmede kullanılmaya başlanmıştır (Katz vd., 2000). Schmidt sertlik değeri 1960'lı yılların başından itibaren UCS tahmininde kullanılmaya başlanmıştır (Deere ve Miller, 1966; Kahraman, 2001). Ucuz, kolay, pratik ve hasarsız bir deney yöntemi olan Schmidt çekici, sertlik tayini, kaya ve betonların sertlik dayanımlarının tayini ve UCS parametresini dolaylı yoldan tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Schmidt çekici hem arazide hem laboratuvarında uygulanabilmektedir. Schmidt çekici ile okunan geri tepme sayısını etkileyen etkenler; kullanılan çekiç tipi, test edilen kayacın ayrışma durumu, kayaç yüzeyindeki pürüzlülükler, kayaç yüzeyinin nem içeriği, çekicinin kalibrasyonu, örnek boyutu, uygulanan ölçme ve ölçüleri değerlendirme yöntemidir (Poole ve Farmer, 1980; Sumner ve Nel, 2002; Büyüksağış ve Gökten, 2007). Literatürde çeşitlik amaçlara yönelik olarak oldukça fazla sayıda Schmidt sertlik belirleme yöntemi ve UCS tahmini için geliştirilmiş eşitlik bulunmaktadır (Tablo 1.2 ve Tablo 1.3) (Hucka, 1965; Deere ve Miller, 1966; Poole ve Farmer, 1980; Haramy ve De Marco, 1985; Gökten ve Ayday, 1993; USBR, 1998; ASTM, 2001).

Tablo 1.2. Literatürde önerilmiş Schmidt sertlik yöntemleri (Göktaş ve Güneş, 2005)

| Yazar                         | Test prosedürü  |
|-------------------------------|---|
| ISRM (2009)                   | Bu yöntemde numune üzerine Schmidt çekici ile 20 farklı noktaya tek vuruş yapılır. Eğer birbirini izleyen 10 okumada fark 4 ise ( $\pm 2$ sınırları içinde) deney durdurulabilir.   |
| ISRM (2007)                   | Bu yöntemde numune üzerine Schmidt çekici ile en az piston çapı kadar uzaklıkta 20 farklı noktaya tek vuruş yapılır, en büyük 10 vuruş değerinin ortalaması alınır.   |
| Sumner ve Nel (2002)          | Farklı noktalardan alınan 15 okumanın en büyük 5'ini iptal ederek geriye kalan 10 küçük değer ortalaması alınır.  |
| ASTM (2001)                   | Bu yöntemde numune üzerine Schmidt çekici ile 10 farklı noktaya tek vuruş yapılarak bu vuruşların ortalaması alınarak ortalamanın 7 birim altındaki ve üstündeki değerler iptal edilerek geriye kalanların ortalaması Schmidt sertlik değeri olarak alınır. |
| Katz vd. (2000)               | 32-40 noktadan okuma alınarak en büyük % 50 okumanın ortalaması alınır.   |
| USBR (1998)                   | Farklı noktalardan ölçülen 10 okumanın en küçük değerleri atılarak geriye kalan en yüksek 5 değer ortalaması alınır.  |
| Göktaş ve Ayday (1993)        | En az piston çapı kadar uzaklıkta 20 farklı noktaya tek vuruş yapılır. Chauvenet kriteri uygulanarak aykırı değerler iptal edilir ve geriye kalanların ortalaması alınır.   |
| Kazi ve Al-Mansour (1980)     | En az 35 okuma alınarak en düşük 10 okuma iptal edilir ve geriye kalan 25 değer ortalaması alınır.  |
| Poole ve Farmer (1980)        | Numune üzerine Schmidt çekici ile 3 farklı noktanın her birine 5 vuruş yapıp, bu 3 noktadaki en yüksek değerlerin ortalaması alınır.  |
| Fowell ve McFeat Smith (1976) | Bir noktadan alınan 10 okumanın son 5'inin ortalaması alınır.   |
| Soiltest (1976)               | 15 tek okuma alınarak en büyük 10 değer ortalaması alınır. Ortalamadan sapma 2.5'ten az olmalıdır.  |
| Deere ve Miller (1966)        | NX çaplı karot örneğini 45° döndürerek karot üzerinde alınan toplam 24 okumanın hatalı olanlarını atarak geriye kalanların ortalaması alınır.   |
| Hucka (1965)                  | Numune üzerinde 3 farklı noktada, her bir noktada 10 tekrar olmak üzere, yapılan deneyden elde edilen en yüksek üç değer ortalamasını alınır.   |

Tablo 1.3. Schmidt sertliğinden UCS tahmini için önerilen eşitlikler

| Araştırmacı                | Önerilen eşitlikler                        | Kaya tipi                               | r    |
|----------------------------|--|---|------|
| Singh vd. (1983)           | $UCS = 2 \times R_L$                       | 30 tortul birim                         | 0.86 |
| Shorey vd. (1984)          | $UCS = 0.4 \times R_N - 3.6$               | 20 litolojik birim                      | 0.94 |
| Haramy ve DeMarco (1985)   | $UCS = 0.99 \times R_L - 0.38$             | 10 farklı litoloji                      | 0.70 |
| O'Rourke (1989)            | $UCS = 4.85 \times R_L - 76.18$            | Kumtaşı, silttaşı anhidrit              | 0.77 |
| Sachpazis (1990)           | $UCS = 4.29 \times R_L - 67.52$            | 33 farklı karbonat                      | 0.96 |
| Gökçeoğlu (1996)           | $UCS = 0.0001 \times R_N^{3.2658}$         | Marn                                    | 0.84 |
| Katz vd. (2000)            | $UCS = 2.21e^{(0.07 \times R_N)}$          | Tebeşir taşı, kireçtaşı, mermer, granit | 0.96 |
| Yılmaz ve Sendir (2002)    | $UCS = \exp(0.818 + 0.06 \times R)$        | Jips                                    | 0.98 |
| Yaşar ve Erdoğan (2004b)   | $UCS = 4 \times 10^{-6} \times R_L^{4.29}$ | Karbonat, kumtaşı, bazalt               | 0.89 |
| Fener vd. (2005)           | $UCS = 4.24e^{(0.059 \times R_N)}$         | 11 farklı kayaç örneği                  | 0.81 |
| Aydın ve Basu (2005)       | $UCS = 1.45e^{(0.07 \times R_L)}$          | Granit                                  | 0.92 |
| Shalabi vd. (2007)         | $UCS = 3.201 \times R_L - 46.59$           | Şeyl, anhidrit, dolomit                 | 0.76 |
| Kılıç ve Teymen (2008)     | $UCS = 0.0137 \times R_N^{2.2721}$         | 19 farklı kayaç örneği                  | 0.97 |
| Yağız (2009)               | $UCS = 0.0028 \times R^{2.584}$            | 7 farklı karbonat, 2 metamorfik         | 0.92 |
| Karaman ve Kesimal (2015b) | $UCS = 0.1383 \times R_L^{1.743}$          | 47 farklı kayaç örneği                  | 0.96 |
|                            | $UCS = 0.097 \times R_L^{1.8776}$          | 10 farklı tortul kayaç                  | 0.97 |
|                            | $UCS = 4.2423 \times R_L - 81.92$          | 29 farklı magmatik kayaç                | 0.92 |

$R_N$ : N tipi Schmidt çekici,  $R_L$ : L tipi Schmidt çekici

Literatürde ayrıca BÇD, BHA ve UPV parametrelerinden UCS tahmini yapılmaktadır (Tablo 1.4) (Kahraman vd., 2012; Karaman vd., 2015b). BÇD kaya malzemelerinin doğrudan çekme dayanımını elde etmede kullanılan en yaygın yöntemdir (Li vd., 2013). BÇD kaya malzemelerinin en zor dayanım testleri arasında olan doğrudan çekme dayanım testi ile kıyaslandığında kolay bir deney olarak görülmektedir. Doğrudan çekme dayanımına kıyasla çok daha ucuz olmasının yanında özel bir tecrübe gerektirmemesi ve örnek hazırlama kolaylığı yaygınlığını artırmıştır (Mellor ve Hawkes, 1971; Bieniawski ve Hawkes, 1978). BÇD özellikle problemlili zemin koşulları (ince tabakalı, proklastik kayalar, oldukça çatlaklı/eklemlili kayalar) dikkate alındığında kaya malzemesinin UCS parametresinin tahmininde kullanılabileceği önerilmiştir (Karaman vd., 2015b). Literatürde UCS ile BÇD arasındaki ilişkiyi araştıran sınırlı sayıda çalışmalar mevcuttur (Farah, 2011; Kahraman vd., 2012; Nazir vd., 2013; Karaman vd., 2015b) (Tablo 1.4). Ayrıca UPV ve UCS arasındaki ilişki de birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır (Tuğrul ve Zarif, 1999; Kahraman, 2001; Kılıç ve Teymen, 2008; Karaman ve Kesimal, 2013).

Tablo 1.4. BÇD ve UPV'den UCS tahminine yönelik literatürde önerilen eşitlikler

| Referans                | Eşitlik                       | r      | Kaya tipi                      |
|-------------------------|-------------------------------|--------|--------------------------------|
| Tuğrul and Zarif (1999) | $UCS = 35.54 UPV - 55$        | r=0.80 | Granitik kayalar               |
| Kahraman (2001)         | $UCS = 9.95 UPV^{1.21}$       | r=0.83 | Magmatik, metamorfik ve tortul |
| Kılıç ve Teymen (2008)  | $UCS = 2.304 UPV^{2.4315}$    | r=0.97 | Magmatik, metamorfik ve tortul |
| Khandelwal (2013)       | $UCS = 0.033 UPV - 34.83$     | r=0.93 | Magmatik, metamorfik ve tortul |
| Farah (2011)            | $UCS (Psi)=5.11 BÇD - 133.86$ | r=0.82 | Ayrışmış kireçtaşları          |
| Kahraman vd. (2012)     | $UCS (MPa)=10.61 BÇD$         | r=0.73 | Magmatik, metamorfik ve tortul |
| Nazir vd. (2013)        | $UCS (MPa)=9.250 BÇD^{0.947}$ | r=0.95 | Kireçtaşları                   |

### 1.3.2. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Parametresinin Kullanıldığı Alanlar

UCS parametresi kayaların yapı ve kaplama taşı olarak kullanılabilirliğinde, şev duraylılığı ve tünelcilik gibi çeşitli kaya mühendisliği tasarımlarında kullanılmaktadır (Onargan ve Kun, 2002; Yagiz, 2008, Karaman vd., 2013a). UCS parametresi ayrıca kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde (RMR ve RMi) kullanılan önemli girdi parametrelerinden biridir. Ayrıca Barton (2002) tarafından Q sistemine MPa cinsinden kaya malzemesinin UCS parametresi eklenmiş ve normalize Q ( $Q_c$ ) olarak ifade edilmiştir. RMi ve  $Q_c$  sistemlerinde UCS doğrudan etkiliyken, RMR sisteminde dayanım puanı en yüksek 15

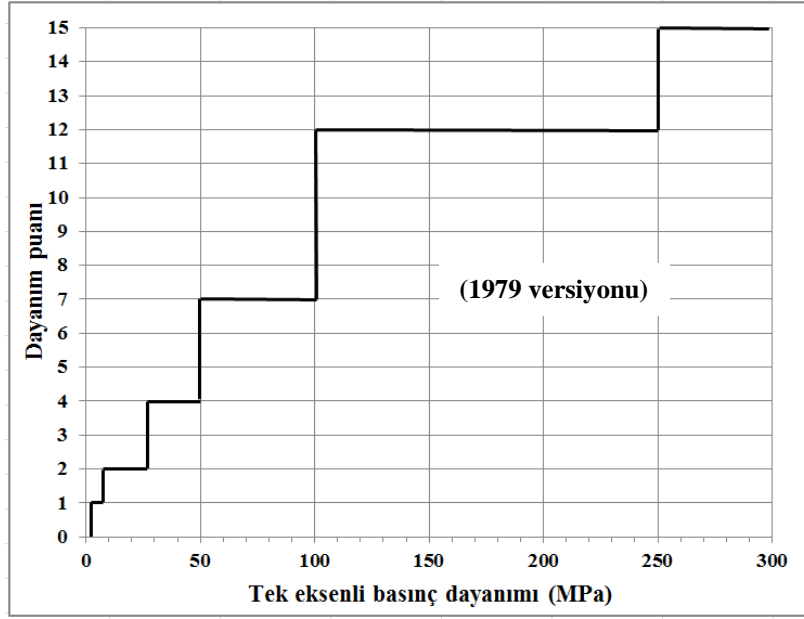
olarak değerlendirilmektedir (Bieniawski, 1989). Literatürde, RMR sisteminde kullanılan dayanım puanının belirlenmesine yönelik çalışmalar mevcuttur (Sülükçü ve Ulusay, 2001; Yılmaz, 2010; Karaman vd., 2015c).

### 1.3.2.1. Dayanım Puanının Belirlenmesine Yönelik Önceki Yaklaşımlar

RMR'nin eski versiyonunda dayanım puanlarına ilişkin bilgiler Tablo 1.5'te verilmiştir. 1974, 1976 ve 1979 yıllarındaki versiyonlarında kaya malzemesi dayanım ve buna karşılık gelen dayanım puanlarında değişikliklerin yapıldığı görülmektedir. 1974 versiyonunda dayanım puanı en fazla 10 ve kaya malzemesi dayanımı ise 200 MPa olduğu Tablo 1.5'ten anlaşılmaktadır. 1976 versiyonunda dayanım puanı 15'e çıkarılmış ve sisteme PLI parametresi de eklenmiştir. 1979 versiyonunda ise hem PLI hem UCS değerlerinde güncellemeler yapılmıştır. 1979 versiyonuna ait tablo değerlerini daha iyi anlayabilmek için bir grafik çizilmiştir (Şekil 1.1). 1979 versiyonunda da görüldüğü gibi kaya malzemesinin dayanımı 100 MPa ile 250 MPa arasında olduğunda dayanım puanı 12 olmaktadır. Dayanım açısından 2.5 kat fark olmasına rağmen RMR sisteminde kullanılacak dayanım puanının aynı olduğu grafikten görülmektedir. Bu durum jeoteknik uygulamalarda problemlere yol açmış olduğundan, Bieniawski (1989) tarafından dayanım puanının hassas bir şekilde belirlenmesine yönelik dayanım puan grafiği önerilmiştir. Ancak, UCS parametresinin doğrudan belirlenmesi projelerin başlangıç aşamalarında pahalı, zahmetli ve zaman alıcı olabilmektedir. Ayrıca problemlili kaya kütleli ortamlarından sağlam karot alımı güçleşmektedir. Bu nedenle bazı araştırmacılar tarafından dayanım puanının belirlenmesine yönelik daha pratik yaklaşımlar sunulmuştur.

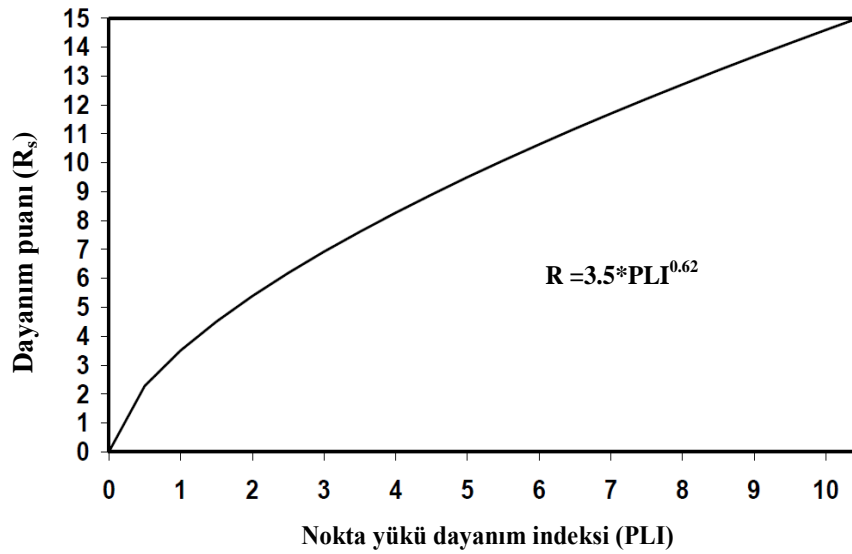
Tablo 1.5. RMR sisteminin gelişimi süresince dayanım puanlarının değişimi

| RMR sisteminin 1974 versiyonundaki dayanım puanları |      |         |        |       |                          |      |     |
|---|------|---------|--------|-------|--------------------------|------|-----|
| <b>UCS (MPa)</b>                                    | >200 | 100-200 | 50-100 | 25-50 | <25                      | -    | -   |
| <b>Dayanım puanı</b>                                | 10   | 5       | 2      | 1     | 0                        | -    | -   |
| RMR sisteminin 1976 versiyonundaki dayanım puanları |      |         |        |       |                          |      |     |
| <b>PLI (MPa)</b>                                    | >8   | 4-8     | 2-4    | 1-2   | <b>UCS tercih edilir</b> |      |     |
| <b>UCS (MPa)</b>                                    | >200 | 100-200 | 50-100 | 25-50 | 25-10                    | 10-3 | 3-1 |
| <b>Dayanım puanı</b>                                | 15   | 12      | 7      | 4     | 2                        | 1    | 0   |
| RMR sisteminin 1979 versiyonundaki dayanım puanları |      |         |        |       |                          |      |     |
| <b>PLI (MPa)</b>                                    | >10  | 4-10    | 2-4    | 1-2   | <b>UCS tercih edilir</b> |      |     |
| <b>UCS (MPa)</b>                                    | >250 | 100-250 | 50-100 | 25-50 | 5-25                     | 1-5  | <1  |
| <b>Dayanım puanı</b>                                | 15   | 12      | 7      | 4     | 2                        | 1    | 0   |



Şekil 1.1. RMR sisteminin 1979 versiyonuna ait dayanım puanlaması

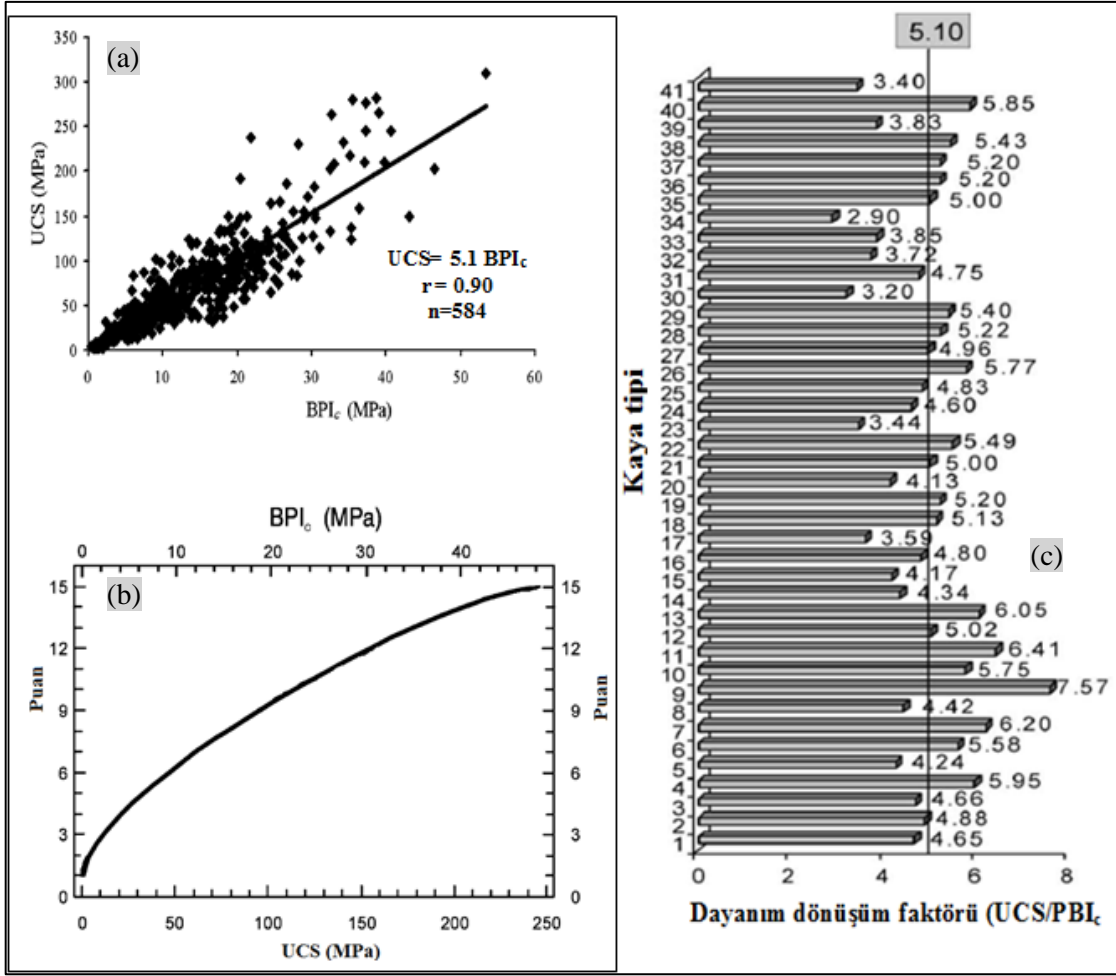
Ünal (1996) kil içeren, zayıf, tabakalı ve anizotropik kayalara yönelik olarak modifiye RMR (M-RMR) sistemini önermiştir. Bor ve kömür madenlerinde 4 yılda geliştirdiği M-RMR ve RMR sistemlerine yönelik olarak PLI parametresinden dayanım puanının tahminine yönelik grafik önermiştir (Şekil 1.2). Önerilen grafikte eksenel ve çapsal deney sonuçlarının ortalamasının dikkate alınması nedeniyle özellikle anizotropik kaya malzemelerine yönelik bu grafiğin oldukça önemli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 1.2. Ünal (1996) tarafından önerilen dayanım puan grafiği

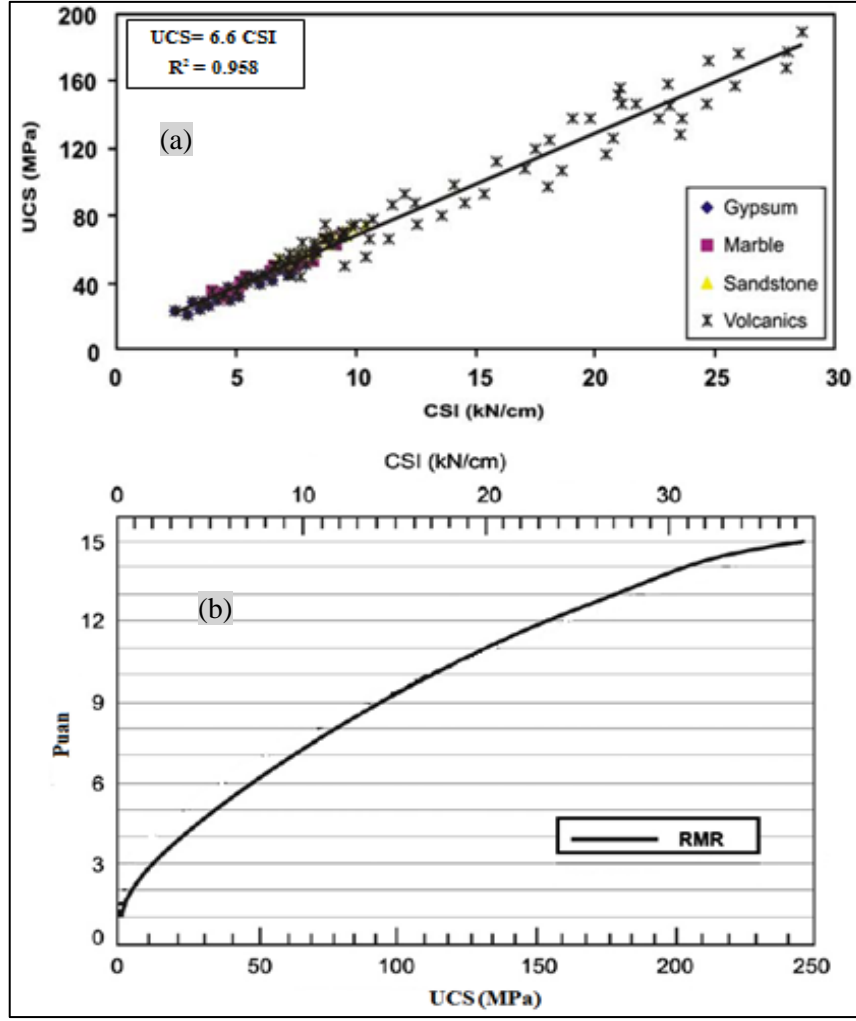
RMR sisteminde UCS parametresinin kullanıldığı parametre puan grafiği için disk makaslama indeksi ( $BPI_c$ ) (Sülükçü ve Ulusay, 2001) ve karot boğma indeksi (CSI) (Yılmaz, 2010) gibi alternatif deneyler de önerilmiştir. İnce tabakalı ve şistozite düzlemleri yüzünden küçük parçalara ayrılan karotların UCS değerini elde etmede disk makaslama deneyi kullanılmaktadır (Ulusay vd., 2001). Kaya malzemesine ait karotlar yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı küçük diskler şeklinde bölündüğünde, karot uzunluğu yeterince uzun örneklerin hazırlanmasına (nokta yükü indeksi için bile) müsaade etmediğinde,  $BPI_c$  deneyinin kullanımı önerilmektedir (Sülükçü ve Ulusay, 2001). Ancak UCS ile korelasyonu mümkün olan ve kaya malzemelerinin dayanım sınıflamasında kullanılabilen bir deney olmasına rağmen  $BPI_c$  bazı sınırlamalara sahiptir. Bu deney sadece çok ince örneklerin üzerinde uygulanabilir. Ayrıca, düzensiz yenilme (geçersiz test sonucu) oluşumu çok daha fazla örnek ihtiyacını gerektirmektedir (Yılmaz, 2009).

UCS ile  $BPI_c$  arasında yüksek korelasyondan dolayı Ulusay ve Gökçeoğlu (1999) kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde alternatif bir girdi parametresi olarak kullanılabileceğini önermişlerdir. Sülükçü ve Ulusay (2001)  $BPI_c$ 'nin özellikle PLI ve UCS testleri için standart örnek hazırlamanın oldukça zor olduğu çok zayıf kayalara yönelik olduğunu belirtmişlerdir. Ulusay ve Gökçeoğlu (1999) dayanım dönüşüm faktörü olarak ifade ettikleri UCS/ $BPI_c$  oranını ortalama 5.5 bulmuşlar ve RMR'nin değişimini gösteren bir grafik geliştirmişlerdir. Sülükçü ve Ulusay (2001) ise daha genelleştirilmiş dayanım dönüşüm faktörünü 5.1 olarak güncellemişlerdir (Şekil 1.3a) ve Ulusay ve Gökçeoğlu (1999) tarafından önerilen parametre puan grafiğini  $BPI_c$  değerlerine dayanarak modifiye etmişlerdir (Şekil 1.3b). Yazarlar tarafından sunulan UCS/ $BPI_c$  oranı ile (5.1 katsayısı) kaya tipi arasındaki ilişki grafiğinden de görüldüğü gibi tüm kayalar için tek bir oran söz konusu değildir (Şekil 1.3c). 41 kayaçtan 17 tanesinin ortalama UCS/ $BPI_c$  oranı 5.1 değerinin üzerinde olmuştur. PLI'den elde edilen k katsayısında olduğu gibi UCS/ $BPI_c$  oranının tüm kaya tipleri için hatta aynı kaya tipi için de aynı olamayacağı nedeniyle genel bir varsayım yapıldığı anlaşılmaktadır. Ancak UCS ve PLI deneylerinin mümkün olmadığı jeolojik formasyonlarda  $BPI_c$  değerlerinden UCS tahmini veya doğrudan parametre puan grafiğinden elde edilen dayanım puanının RMR'de kullanımı oldukça önemlidir. Bununla beraber Sülükçü ve Ulusay (2001) sadece zayıf kayalara yönelik olarak değil,  $BPI_c$  değerlerinin 0–50 MPa arasında olduğu kayalara yönelik bir abak geliştirmiştir.



Şekil 1.3. BPI ve UCS arasındaki ilişki (a), parametre–puan grafiği (b) ve kaya tipine göre ortalama  $BPI_c$  (c) (Sülükçü ve Ulusay, 2001)

Yılmaz (2009) kaya malzemesinin bir nokta yerine bir hat boyunca yüklenmesiyle heterojen veya anizotropi etkisini en aza indireceği varsayımı ile Karot Boğma İndeksi (CSI) deneyini önermiştir. Bu deneyin kaya kütle özelliklerinden dolayı uygun karot uzunluğunun alınmadığı durumlarda kullanılabileceği önerilmiştir (Yılmaz, 2010). Yazar CSI ve UCS arasında çok yüksek bir ilişki bulmuştur (Şekil 1.4a). CSI ile UCS arasında 6.6 katsayını elde etmiştir. Bu katsayıdan yola çıkarak CSI deneyinin kaya kütle sınıflama sistemlerinde kullanımı ile ilgili önerilerde bulunmuştur (Şekil 1.4b).



Şekil 1.4. CSI ve UCS arasındaki ilişki (a) ve CSI'den önerilen parametre-puan grafiği (b) (Yılmaz, 2009; Yılmaz, 2010)

#### 1.4. Kayaların Makaslama Dayanım Parametreleri

Kayaların makaslama dayanım parametreleri (kohezyon ( $C$ ) ve içsel sürtünme açısı, ( $\phi$ )), madencilik, inşaat ve mühendislik jeolojisi çalışmalarında (taşıma gücü hesabı) kullanılmaktadır. Kayaların makaslama gerilmesi altında gelişen deformasyona karşı gösterdiği direnci belirlemek için kullanılan  $C$  ve  $\phi$  kaya malzemesinin litolojik özelliği ve anizotropisi gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Yang vd., 2011). Kaya malzemesinin makaslama dayanım parametreleri doğrudan makaslama ve üç eksenli basınç deneyleri ile ASTM (2004) ve ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenebilmektedir. Madencilik uygulamalarında, üç eksenli basınç deneyi yaygın kullanıma sahiptir.



Ancak, üç eksenli basınç deneyinin yapılmasında pahalı ekipmanlara ve yüksek kalitede karot örneklerine ihtiyaç duyulması ve bu deneylerin oldukça zaman alıcı olması nedeniyle pratikte güçlükler yaşanmaktadır (Kahraman ve Alber, 2008). Ayrıca üç eksenli basınç deneyi için gerekli olan yanal basınç ünitesinin kullanımı ve örneklerin Hoek hücresi içerisine konulup alınması gibi önem ve dikkat gerektiren çalışmalar da deneyi zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte, BÇD ve UCS deneylerinde Hoek hücresine ve yanal basınç ünitesine gerek olmadığından dolayı üç eksenli basınç deneyine göre kolay olduğu uygulayıcılar tarafından bilinmektedir. Brazilian çekme deneyinde ise kullanılan ekipmanın üç eksenli basınç ve doğrudan çekme deneylerine göre daha pratik ve ucuz oluşu ayrıca daha az dikkat gerektiren bir deney olması nedeniyle çoğunlukla tercih edilmektedir (Hobbs, 1964; Mellor ve Hawkes, 1971; Hudson vd., 1972; Bieniawski ve Hawkes, 1978; Coviello vd., 2005; Li vd., 2013). Ancak kayaçların makaslama dayanım parametrelerinin ( $C$  ve  $\phi$ ) dolaylı yoldan tahminine yönelik literatürdeki çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca, üç eksenli basınç deneyi yapma olanağı bulunamadığı durumlarda BÇD ve UCS parametreleri kullanılarak  $C$  ve  $\phi$ 'nin dolaylı olarak belirlenmesi ile ilgili istatistiksel verilerin kullanıldığı ayrıntılı bir uygulamaya literatürde rastlanmamıştır.

### **1.5. Kaya Kütleli Deformasyon Modülü Parametresi**

Kaya malzemesinin UCS parametresinin yanı sıra kaya kütlelerine ait deformasyon modülü ( $E_m$ ) parametresi de tünel gibi mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Birçok tasarım parametresi arasında kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü kaya mühendisliği projelerinin başarıyla yürütülmesinde ve tasarımında hayati öneme sahip olan önemli bir parametredir. Ancak, yerinde testler zaman alıcı ve pahalı hatta bazı durumlarda yapılması imkânsız olabilmektedir. Bu sınırlandırmalar, araştırmacıları deformasyon modülünü daha düşük fiyatla kolay bir şekilde kaya kütle sınıflama sistemlerinden (RMR, Q, RMI, vb.) dolaylı olarak tahmininde ampirik eşitlik geliştirmesine zorlamıştır. Sayısal analizlerin girdi parametrelerinden biri olan  $E_m$ , kaya kütlelerinin yenilme öncesindeki mekanik davranışını en iyi temsil eden bir parametre olmasından dolayı, birçok tasarım parametresi arasında kaya mühendislik projelerinin başarıyla gerçekleştirilmesinde çok önemli bir yere sahiptir.  $E_m$  ayrıca yeraltı açıklığı etrafında izlenen deformasyonların yorumlanmasında, tahkimat ve nihai tünel kaplama tasarımında kullanılmaktadır (Hoek ve Diederichs, 2006). Ancak bu parametrenin

arazide tayini hem çok zor hem de pahalıdır (Aksoy vd., 2012). Ayrıca, arazide yapılan deneyler, kaya kütlelerinin deformasyonları hakkında doğrudan bilgi vermesine karşın, Bieniawski (1973) tarafından belirtildiği gibi yerinde yapılan testlere tek başına güvenilmemesi gerektiği ifade edilmiştir (Shen vd., 2012). Palmström ve Singh (2001) ise yerinde yapılan deneylerin ekipmandan ve patlatma etkisinden dolayı ölçüm hatalarına yol açtığı, bu nedenle kaya kütlelerinin iyi bir şekilde değerlendirilmesi ve uygun dolaylı yöntemin/eşitliğin birçok durumda yerinde deneylere göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle,  $E_m$  parametresinin pratik yoldan tahminine yönelik literatürde araştırmacılar tarafından bir çok ampirik eşitlikler önerilmiştir (Bieniawski, 1978; Serafım ve Pereira, 1983; Aydan vd., 1997; Hoek ve Brown, 1997; Read vd., 1999; Palmström ve Singh, 2001; Barton, 2002; Zhang ve Einstein, 2004; Karaman vd., 2014). Bazı araştırmacılar da (Hashemi vd., 2010; Shen vd., 2012; Aksoy vd., 2012; Khabbazi vd., 2013) literatürde  $E_m$  tahmini için önerilen eşitlikleri kendi bulgularıyla kıyaslamışlardır. Gürocak (2011) ise farklı ampirik eşitlikler ile (9 eşitlik) tahmin ettiği  $E_m$  değerlerinin ortalamasını alarak sayısal analizlerde kullanmıştır.  $E_m$  tahminine yönelik eşitliklerin oluşturulmasında çoğunlukla kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden (RMR, Q, vb.) daha az oranda da indeks deneylerden (UCS, elastisite modülü ( $E_i$ ), vb.) yararlanılmıştır. Örneğin RMR'den elde edilen eşitlikler birçok araştırmacı tarafından kullanılmış ve  $E_m$  tahmininde güvenilirliği konusunda övgü ile bahsedilmiştir (Nejati vd., 2014). Palmstrom ve Singh (2001)  $E_m$  tahmininde en sık RMR sisteminin kullanıldığını ifade etmişlerdir. Khabbazi vd. (2013) test edilen parametreler (UCS, UPV) arasında deformasyon modülü ile en iyi ilişkiyi RMR'nin verdiğini belirtmişlerdir. Ancak özellikle güzergah belirleme çalışmalarında ve projelerin ilk aşamasında kaya kütlelerinden temsili örnek alımında yaşanan güçlüklerden veya problemlili kaya ortamlarından (piroklastik, sık eklemlili, vb.) dolayı RMR sınıflamasında ve bazı  $E_m$  eşitliklerinde kullanılan UCS gibi yüksek kaliteli karot gerektiren deneylerin yapılması mümkün olmamaktadır (Karaman vd., 2014).

Araştırmacılar tarafından  $E_m$  parametresini pratik yoldan belirlemeye yönelik önerilen ve bu çalışma kapsamında kullanılan ampirik eşitlikler Tablo 1.6'da verilmiştir. Literatürde deformasyon modülünün belirlenmesine yönelik araştırmacılar oldukça çok sayıda ampirik eşitlik önermişlerdir. Literatürde  $E_m$  parametresini tahmin etmek için üretilen eşitliklerin çoğu kaya kütle sınıflama sistemlerinden (RMR, Q,  $RM_i$  vb.) oluşmaktadır. Farklı olarak  $E_m$  parametresini tahmin etmek için; Kayabaşı vd. (2003) ayrışma derecesi, RQD ve kaya malzemesine ait elastisite modülü parametrelerini içeren

bir eşitlik önermiştir. Gökçeoğlu vd. (2003) ise bu parametrelere ilave olarak UCS parametresini de eşitliğe ilave etmiştir. Zhang ve Einstein (2004) ise sadece RQD ve  $E_i$  parametrelerini içeren bir eşitlik geliştirmiştir. Eşitliklere bakıldığında süreksizlik parametreleri ile birlikte kaya malzemesinin dayanım özellikleri ve/veya deformasyon özellikleri  $E_m$  parametresinin tahmininde kullanılmıştır.

Tablo 1.6. Deformasyon modülü tahmininde kullanılan bazı ampirik eşitlikler

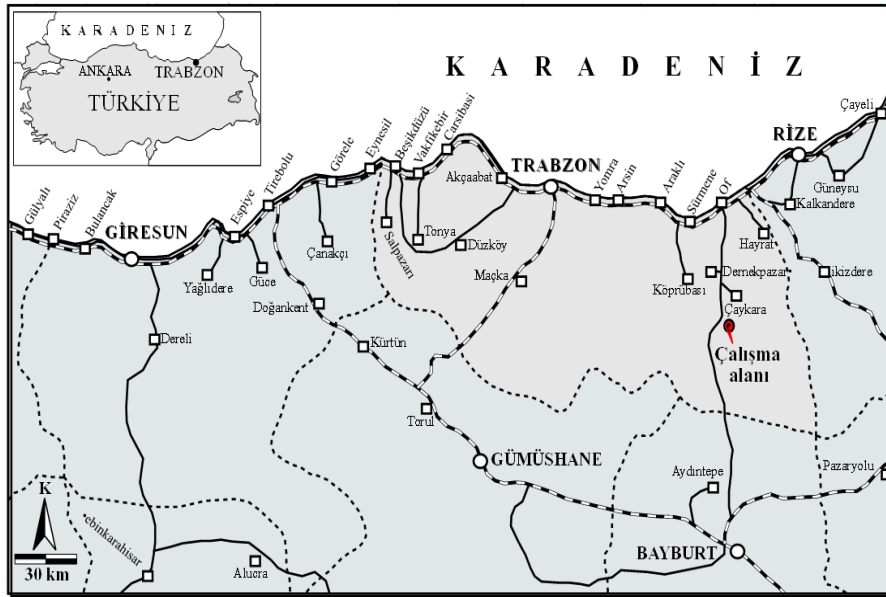
| Araştırmacı                | Eşitlik   | Not      |
|----------------------------|---|----------|
| * Bieniawski (1978)        | $E_m = 2RMR - 100$ (GPa)  | RMR > 50 |
| * Serafim ve Perira (1983) | $E_m = 10^{((RMR-10)/40)}$ (GPa)  | RMR ≤ 50 |
| * Aydan vd. (1997)         | $E_m = 0.0097 RMR^{3.54}$ (MPa)   |          |
| * Read vd. (1999)          | $E_m = 0.1 (RMR/10)^3$ (GPa)  |          |
| * Barton (2002)            | $E_m = 10 Q_c^{1/3}$ , $Q_c = Q UCS/100$ (GPa)                                      |          |
| Kayabaşı vd. (2003)        | $E_m = 0.135 \left[ \frac{E_i(1+\frac{RQD}{100})}{WD} \right]^{1.1811}$ (GPa)       |          |
| Gökçeoğlu vd. (2003)       | $E_m = 0.001 \left[ \frac{(E_i/UCS)(1+\frac{RQD}{100})}{WD} \right]^{1.5528}$ (GPa) |          |
| * Zhang ve Einstein (2004) | $E_m = (10^{0.0186 RQD - 1.91}) E_i$ (GPa)  |          |
| Ramamurthy (2004)          | $E_m = E_i e^{-0.0035[5(100-RMR)]}$ (GPa)   |          |
| Ramamurthy (2004)          | $E_m = E_i e^{-0.0035[250(1-0.3\log Q)]}$ (GPa)                                     |          |
| Sönmez vd. (2006)          | $E_m = E_i 10^{[(RMR-100)(100-RMR)/4000] \exp(-RMR/100)}$ (GPa)                     |          |
| Chun vd. (2006)            | $E_m = 0.3228 e^{(0.0485 RMR)}$ (GPa)   |          |
| Işık vd. (2008)            | $E_m = 6.7 RMR - 103.06$ (MPa)  | RMR ≥ 27 |
| Khabbazi vd. (2013)        | $E_m = 9E - 7 RMR^{3.868}$ (GPa)  |          |

\*: Bu çalışmada kullanılan eşitlikler, UCS: Kaya malzemesine ait tek eksenli basınç dayanımı,  $E_i$ : Kaya malzemesine ait elastisite modülü, WD: Ayrışma derecesi

## 1.6. Çalışma Alanının Genel Özellikleri

Çalışma alanı, Trabzon ili Çaykara ilçesi merkezinin güneyinde 1/25000 ölçekli Trabzon G44 – d2 ve G44 – c1 paftaları içerisinde yer almaktadır. Çalışma sahasının kuzeyinde Çaykara ilçesi, güneyinde Uzungöl beldesi, doğusunda Of–Baltacı havzası, batısında Sürmene Manahos havzası bulunmaktadır. Çalışma sahası Trabzon’a uzaklığı 83 km’dir (Şekil 1.5). Çambaşı HES yeri Çaykara ilçe merkezinin 2 km güneyinde bulunur. Çalışma alanı engebeli bir morfoloji sunar. Yükseklikler 300 ile 1786 metre arasında değişmektedir. Arazi genelde ormanlık ve bitki örtüsü ile kaplıdır. Vadiler oldukça diktir. İnceleme alanın önemli vadileri Haldizen ve Ögene dereleri ile bunların birleşmesinden oluşan Solaklı deresidir. Ayrıca enerji tüneli güzergahını dik olarak kesen ve Solaklı deresine mansaplanan küçük debili Taşlıgedik, Çambaşı, Serdarlı, Koldere ve Karona yan dereleri bulunmaktadır.

İnceleme alanında dağınık yerleşim şekli egemendir. Çalışma alanına en yakın yerleşim yeri, santral yerinin 2 km kuzeyindeki Çaykara ilçesidir. Ögene–Çambaşı derivasyon tüneli güzergahı, yerleşimi olmayan dağlık, sarp ve ormanlık bölgeden geçmektedir. Çambaşı enerji tüneli güzergahı ise yoğun yerleşimi ve köy yolları olan daha az engebeli alanlardan geçmektedir. Çaykara–Uzungöl yöresinde, Doğu Karadeniz Bölgesi'nin tipik ılıman ve bol yağışlı iklimi görülür. Gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farkı azdır. Yazları sıcak, kışları ılık geçer. En çok yağış ilkbahar mevsiminde görülür. Çambaşı barajı yağış alanını oluşturan dağların yüksek kesimleri kar yağışlarının etkisi altındadır. Havzanın yüksek kesimlerinde depolanan kar ilkbahar mevsiminde sıcaklıkların artmasına paralel olarak erimeye başlar. Kar erimesine (özellikle Nisan ve Mayıs aylarında) ilave olarak yağın yağmurlar taşkınlara sebep olabilir.



Şekil 1.5. Çalışma alanı yerbulduru haritası

## 1.7. Önceki Çalışmalar

Çalışma sahası ve çevresi ile ilgili olarak ilk çalışmalar Trabzon DSİ 22. Bölge Müdürlüğünce yapılmış ve 1981 yılında “Doğu Karadeniz Havzası İstikşaf Raporu” adı altında yayınlanmıştır. Proje üzerindeki planlama çalışmaları 1984 yılında tamamlanmış olup, “Çambaşı Barajı ve HES” planlama raporu hazırlanmıştır. Bu çalışma ile Solaklı deresinin üzerinde; Haldizen dere ile Ögene deresinin birleşim yerinin hemen mansabında,

585 m. maksimum su seviyeli bir baraj düşünölmüş ve 5330 m. uzunluğunda enerji tüneli ile 307 m. kotunda Çambaşı HES tesisi önerilmiştir. Yukarıdaki çalışmalar dışında MTA Genel Müdürlüğünce gerçekleştirilmiş çalışmalar vardır. MTA Doğu Karadeniz Bölge Müdürlüğünce yürütölen çalışmalar sonucunda 1/25000 ve daha büyük ölçekli haritalarında kullanıldığı çalışmalar yapılmış ve 1/100000 ölçekli haritalara dayandırılan bölgenin genel jeolojisi ile ilgili temel kaynaklar rapor halinde yayınlanmıştır.

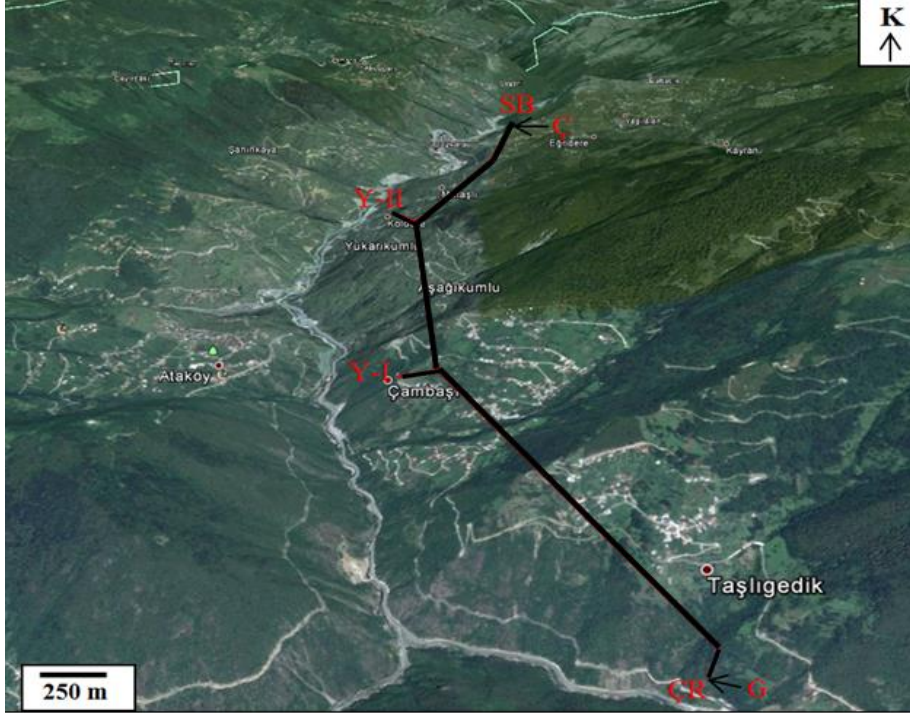
Ayrıca Bulut (1989) tarafından “Çambaşı (Trabzon-Çaykara) Barajı ve Uzungöl HES Yerlerinin Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi” adlı bir doktora tez çalışması bulunmaktadır. Çambaşı tüneli, iletim tüneli, denge bacası ve hidroelektrik santral yerleri ile Uzungöl-I regölatörü, iletim tüneli, denge bacası ve hidroelektrik santral yerlerini mühendislik jeolojisi açısından incelemiştir. İnceleme alanının 1/25000 ölçekli jeoloji haritası yapılmış, hidrolik yapı yerlerindeki kayaların kaya kalite özelliklerinin “orta ve iyi kaliteli” olduğu, çatlak ara uzunluklarının “orta ve geniş”, açıklık, çatlak ve fay zonu dolgularının genellikle montmorillonit türü kil mineralleri içerdiğini ortaya koymuştur. Baraj temelini oluşturan metabazaltın fiziksel, mekanik ve elastik özellikleri açısından izotrop kabul edilebileceğı sonucuna varmıştır. Kaya kalite özelliğı açısından (RQD) Çambaşı barajı ve Çambaşı hidroelektrik santrali II yerlerindeki metabazalt, Uzungöl hidroelektrik santral yerindeki granitoyid ve Çambalı cebri boru II güzergahındaki dasitlerin genellikle “orta ve iyi kaliteli”, Çambaşı HES- I yeri ve Uzungöl iletim tüneli giriş ağızındaki metabazalt, Çambaşı denge bacası I ve II yerleri ile Çambaşı cebri boru- I güzergahındaki dasitler ise çoğunlukla “çok kötü ve kötü kaliteli kaya” sınıflarında yer aldıklarını ifade etmiştir. Çok ayrılmış kayalarda açılacak tünelin desteklenmesinin gerektiğı ortaya konmuştur.

Özdemir (2011), “Çambaşı Regölatörü ve HES Tünel Güzergahındaki Kayaların Bazı Mühendislik Özellikleri ile Delinebilirlikleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans çalışması yapmıştır. Tez kapsamında araştırma amaçlı açılan 4 adet karotlu sondajda, sondaj çalışma parametreleri olan baskı, devir ile birlikte delinen kayanın tek eksenli basınç dayanımı özelliklerinin arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler esas alınarak ilerleme hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bazı kaya özellikleri ile ilerleme hızları arasındaki ilişkiler analiz edilerek delinen kaya türleri için en uygun baskı, devir ve ilerleme hızları bulunmuştur.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Bu tez kapsamında, Çambaşı enerji tüneline değişik litoloji ve/veya süreksizlik özelliklerine sahip 37 farklı kazı aynasında ayrıntılı mühendislik jeolojisi çalışmaları yapılmıştır. Enerji tüneli; 4.30 metre net kazı çapında, 7132 m uzunluğunda ve modifiye at nalı kesitte inşa edilmiştir. Enerji tüneline üç farklı jeolojik kökene (magmatik, metamorfik ve tortul) ait metabazalt, bazalt, dasit, volkanik breş ve kireçtaşı gibi çeşitli kayalara rastlanılmıştır. Enerji tüneli kendi içerisinde giriş (G), yaklaşım-I (Y-I), yaklaşım-II (Y-II) ve çıkış (Ç) tünelleri şeklinde adlandırılmıştır (Şekil 2.1). Şekil 2.1’de SB ifadesi yaklaşık santral binası yerini ve ÇR ise Çambaşı regülatör yerini ifade etmektedir. Enerji tüneli ve ölçüm noktalarının daha iyi gözlenebilmesi için plan kesit ayrıca verilmiştir (Şekil 2.2). Giriş, yaklaşım-I, yaklaşım-II ve çıkış tünel portalları Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Çalışılan tünelin topoğrafik görünümü





Şekil 2.3. Giriş (a), yaklaşım-I (b) ve II (c) ile çıkış (d) tünelleri

## 2.2. Karot Örneklerinin Hazırlanması

Standartlara uygun boyutta örneklerin hazırlanması, deneysel çalışmalar öncesi yapılan en önemli aşamadır. Kaya bloklarından karot alma işlemleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvara getirilen kaya bloklarından NX (54,7 mm) çapında karot örnekler alınmıştır. Alınan karotlar karot kesme makinasında kesilip, zımpara ile pürüzlülükleri giderilmiştir. Araziden kaya bloklarının laboratuvara getirilmesi, karot alım işlemi ve alınan bazı karotlar Şekil 2.4’te gösterilmiştir. Karot örneklerin Böhme aşınma cihazında zımpara tozu ile alt ve üst yüzeylerinin pürüzlülüğü giderilmiştir. Her örnek noktasına ait ortalama 15–20 arasında sağlam karot alınmaya çalışılmıştır.





Şekil 2.4. Laboratuvarda yapılan çeşitli işlemler

### 2.3. Kaya Malzemelerinin Fiziko-Mekanik Özellikleri

Çalışılan kazı aynalarını temsil eden kaya blokları (her kaya tipi için en az dört kaya bloğu) patlatma işlemi sonrası tünel aynasından veya pasa sahasından alınarak laboratuvara getirilmiştir (Şekil 2.5). Deneyler sağlam karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Zayıflık düzlemi veya içerdiği kırık zonlardan dolayı örnek yenildiğinde sonuçlar çıkarılarak ortalamaya dahil edilmemiştir. Laboratuvar deney sonuçlarını en çok etkileyen özelliklerden biri kayaçların içerdiği anizotropi olmaktadır (Karaman ve Kesimal, 2015b). Çalışma sahasındaki metamorfik kayaçalarda şistozite ve

foliasyon gibi anizotropik özellikler bulunmamaktadır. Ayrıca magmatik kayalar akma yapısı göstermemektedir. Kireçtaşlarından alınan kaya blokları çoğunlukla masif olduğundan deneyleri olumsuz etkileyecek tabakalanma düzlemine rastlanmamıştır. Kaya malzemelerinin mühendislik özelliklerini etkileyen parametrelerden biri de görünür porozitedir (Karaman ve Kesimal, 2015c). Çalışma sahasındaki kayaların porozitesi volkanik breş hariç genellikle % 1 ile % 3 arasında değişmiştir. Volkanik breşin ortalama görünür porozitesi % 3.7 olarak bulunmuştur. Ortalama görünür porozite ve standart sapma değerleri metabazalt için  $1.3 \pm 0.7$ , dasit için  $1.6 \pm 0.4$ , bazalt için  $1.7 \pm 0.5$  ve kireçtaşı için  $2.4 \pm 0.5$  olarak elde edilmiştir.



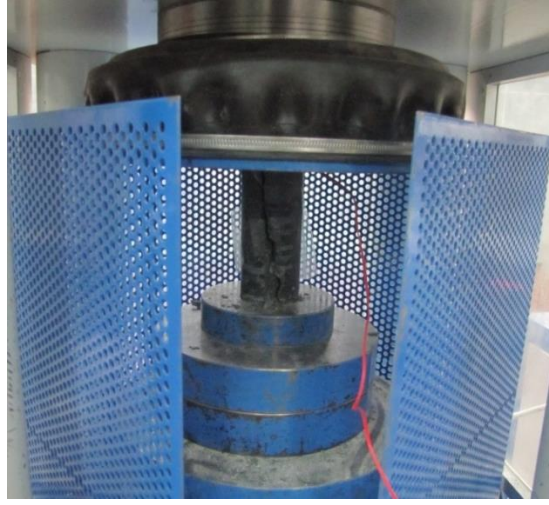
Şekil 2.5. Tünel aynasından (a) ve pasa sahasından alınan kaya blokları (b)

Kaya malzemeleri üzerinde aşağıda verilen indeks deneyler ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır.

- Tek eksenli basınç dayanımı deneyi
- Tek eksenli deformabilite deneyi
- Üç eksenli basınç dayanımı deneyi
- Schmidt sertlik deneyi
- Brazilian çekme deneyi
- Ultrasonik P–dalga hızı deneyi
- Nokta yükü dayanım indeksi deneyi
- Birim hacim ağırlık deneyi

### 2.3.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) jeoteknik uygulamaların birçoğunda ve kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. UCS deneylerinde boy/çap (L/D) oranı 2.5 olan karot örnekleri kullanılmıştır. Deneyler, 300 ton kapasiteli bilgisayar kontrollü pres ile yükleme hızı 0.75 MPa/s arasında olacak şekilde uygulanmıştır. 37 noktanın her biri için 5'er adet karot örneği deneye tabi tutularak ortalaması UCS değeri olarak kaydedilmiştir (ISRM, 2007). Şekil 2.6 'da UCS deneylerine ait görüntü yer almaktadır.



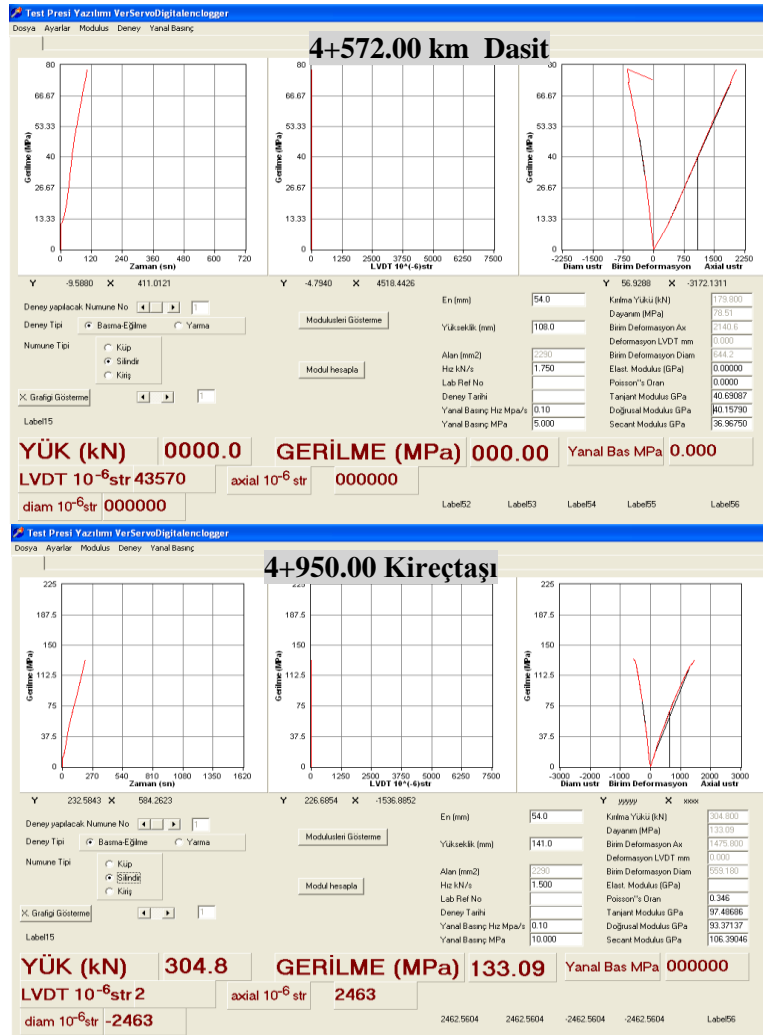
Şekil 2.6. UCS deneyine tabi tutulan bir örneğin görünümü

### 2.3.2. Tek Eksenli Deformabilite Deneyi

Bu deney, silindirik şekilli sağlam karot örneklerinin tek eksenli yükleme koşullarında gerilme–birim deformasyon özelliklerinin, Young modülünün ve poisson oranının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Tek eksenli deformabilite deneyi için, karot örneklerinin eksen ve çapına paralel deformasyon ölçerler (strain gage) yapıştırılarak deney esnasında kayaçta oluşacak deformasyonlar hassas bir şekilde ölçülmüştür. Tek eksenli deformabilite deneyinde Kyowa deney aleti ile kayaçların poisson oranı ( $\nu$ , P.O.) ve elastisite modülü (sekant) ( $E_i$ ) belirlenmiştir (Şekil 2.7). Deformabilite deneyine tabi tutulan dasit ve kireçtaşı için örnek ekran görüntüsü Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Tek eksenli deformabilite deneyine tabi tutulan karot örnekler



Şekil 2.8. Örneklerin deformabilite deneyi çıktıları

### 2.3.3. Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Üç eksenli basınç deneyi, karot örneğe sabit bir yanal basınç uygulanırken örnek yenilinceye kadar düşey eksen boyunca düşey yük uygulanmasına dayanmaktadır. Deney düzeneği, karot örneğe sabit yanal basınç uygulamak için Hoek hücresinden ve düşey yük uygulamak için hidrolik presten oluşmaktadır (ISRM, 2007).

Deney öncesi plastik bir kılıf (membran) Hoek hücresi içerisine yerleştirilmiştir. Hücreye, basınca dayanıklı bir hortumla yanal basınç ünitesi bağlanmıştır. Hücre üzerindeki hava çıkış vidası gevşetilerek, hücre ve membran arasındaki boşluğa hava kalmayacak şekilde yanal basınç ünitesiyle yağ pompalanmıştır (air removing). Hava çıkış vidası tekrar sıkıştırılmış ve yanal basınç düzeneği deney için hazırlanmıştır. Üç eksenli basınç dayanımı için karot örneklerinin Hoek hücresine uygun olarak hazırlanması (boy/çap, 2) ve yanal basınç ünitesi ile (farklı yanal basınçlarda) 300 ton kapasiteli bilgisayar kontrollü sistem kullanılmıştır. Her bir kaya grubu için ortalama 9 adet örnek, 3–15 MPa arasında değişen 3 farklı yanal basınç altında deneye tabi tutulmuş (Şekil 2.9) ve kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 2.9. Üç eksenli basınç dayanımı deneyinden görünüm

### 2.3.4. Schmidt Çekici Sertlik Tayini

Bu çalışmada, Schmidt çekici deneyi kaya malzemesinin Schmidt sertlik değerini belirlemek, kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımını tahmin etmek için yapılmıştır. Deneylerde L tipi Schmidt çekici ve V tipi karot beşiği kullanılmıştır (Şekil 2.10). Bu çalışmada, Schmidt çekici sertliğinin ölçümünden önce teste tabi tutulacak yüzeyler

dolgudan arındırılarak temizlenmiştir. Tablo 1.2’de gösterilen Schmidt çekici yöntemlerinin standartlarca belirtilen boyutlarda karot alımının güç olduğu problemlili kaya ortamlarında (çok eklemlili, zayıf, piroklastik vb.) uygulanması araştırmacıları zaman zaman zor duruma düşürmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada Schmidt sertliğini daha pratik yoldan tahmin etmede aşağıda açıklanan üç farklı deneme yöntemi ( $D_1$ - $D_3$ ) önerilmiştir. Deneme yöntemlerinin sonuçları literatürde oldukça yaygın kullanıma sahip 4 farklı yöntemin (ISRM, 2007 ( $R_1$ ); ASTM, 2001 ( $R_2$ ); USBR, 1998 ( $R_3$ ) ve Sumner ve Nel, 2002 ( $R_4$ )) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ilk 6 okuma  $D_1$ , 8 okuma  $D_2$ , 10 okuma  $D_3$ ,  $R_2$  ve  $R_3$ , 15 okuma  $R_4$  ve 20 okuma  $R_1$  yöntemleri için kullanılmış ve Schmidt sertlik değerleri elde edilmiştir. Önerilen yöntemler UCS tahmininde kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen deneme yöntemleri aşağıda verilmiştir.

Deneme yöntem 1 ( $D_1$ ): Birbirinden en az piston çapı kadar uzaklıkta bulunan 6 farklı noktadan okunan bütün değerlerin ortalaması Schmidt sertlik değeri olarak alınır.

Deneme yöntem 2 ( $D_2$ ): Birbirinden en az piston çapı kadar uzaklıkta bulunan 8 farklı noktadan okuma alınır. En büyük ve en küçük okumalar iptal edilir geriye kalan 6 değerlerin ortalaması Schmidt sertlik değeri olarak alınır.

Deneme yöntem 3 ( $D_3$ ): Birbirinden en az piston çapı kadar uzaklıkta bulunan 10 farklı noktadan okuma alınır. En büyük ve en küçük 2 okuma iptal edilir geriye kalan 6 değerlerin ortalaması Schmidt sertlik değeri olarak alınır.



Şekil 2.10. Bazı örneklerin Schmidt çekici ile görüntüsü

### 2.3.5. Brazilian Çekme Deneyi

Çekme dayanımı; kayaçların kazılabilirliğinde, yeraltı kazılarında, patlayıcı madde kullanımında ve sökülebilirlik gibi mühendislik çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kaya malzemenin çekme dayanımı Brazilian çekme dayanımı (BÇD) deneyi ile belirlenmiştir. BÇD için uygun boy/çap oranında (0.2–0.75, genelde 0.5) örnekler hazırlanarak deneyler 30 ton kapasiteli bilgisayar kontrollü pres ile yapılmıştır. Çekme dayanımı aşağıda verilen eşitlikle bulunmaktadır. Şekil 2.11’de Brazilian çekme deneyine tabi tutulan bazı örnekler görülmektedir.

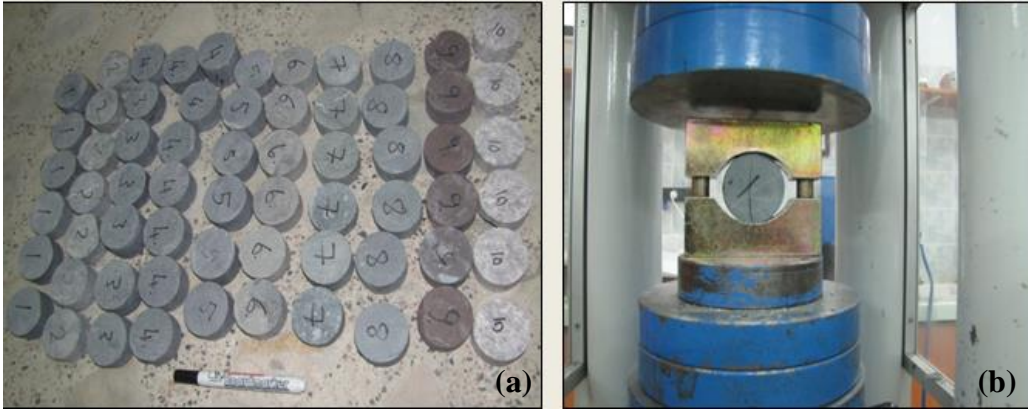
$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

Eşitlikte;

$\sigma_t$ : Çekme dayanımı (MPa)

P: Örneği kıran yük (kg)

D: Örnek çapı (cm) ve L örnek boyutu (cm)



Şekil 2.11. BÇD deneyine tabi tutulan bazı örnekler (a, b)

### 2.3.6. Ultrasonik P–dalga Hızı Deneyi (UPV)

UCS deneylerinden önce aynı karotlar üzerinde UPV deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan karotların uçları zımpara ile parlatılmış ve probların (54 kHz) temas edeceği yüzeylerin düzgün olması sağlanmıştır. İnce bir vazelin tabaka probların temas edeceği karotların uç kısımlarına iyi bir iletim sağlanması için sürülmüştür. Örnekten

geçen ultrasonik P dalgası 0.1 mikro saniye ( $\mu\text{s}$ ) hassasiyetle okunmuştur. P dalga hızı verici ve alıcı arasındaki mesafenin (örnek boyu) geçiş süresine oranı ile elde edilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Ultrasonik P–dalga hızı ölçümlerinin yapılması

### 2.3.7. Nokta Yüğü Dayanım İndeksi Deneyi (PLI)

İlk olarak ISRM (1985) tarafından standart haline getirilen PLI için eksenel, çapsal ve şekilsiz olmak üzere üç farklı değerlendirme yöntemi bulunmaktadır. Bu çalışmada, her kaya türü için eksenel deneyler NX çaplı örnekler üzerinde yapılmıştır. Örnek boyutları eksenel deney için L/D oranı (0.5–0.55) arasında olan karot örnekleri kullanılmıştır. Örnekler 10–60 saniye arasında kırılacak şekilde yüklemeye tabi tutulmuştur. Deneylerde dijital nokta yükü test aleti kullanılmış olup (Şekil 2.13), ilk olarak düzeltilmemiş nokta yükü indeksi ( $I_s$ ) bulunmuştur. Düzeltilmemiş nokta yük dayanımı değeri referans çapa ( $D=50$  mm) göre düzeltmek için ISRM (2007) tarafından önerilen eşitlikler kullanılmıştır. Her kaya türü için 10’ar adet örnek olmak üzere toplam 370 adet karot örneği deneylerde kullanılmıştır. Her kaya türü için en yüksek ve en düşük iki sonuç ortalamaya dahil edilmemiş olup, geriye kalan 6 değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Nokta yükü dayanım indeksi aşağıdaki eşitlikle belirlenmektedir. Bu çalışmada tünel güzergahındaki 37 farklı kazı aynasından elde edilen kayalara ilave olarak kapsamlı literatür taraması sonucunda UCS ve PLI parametrelerini içeren 6 farklı ülkeden toplam 490 kaya örneği derlenmiştir (Tablo 2.1).



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

Eşitlikte;  $I_s$ : Düzeltilmemiş nokta yük dayanım indeksi (MPa), P: Örneği kıran kuvvet (kN), De: Eşdeğer karot çapı (cm)'dir.

Karot örneklerde çapsal yükleme için  $De^2=D^2$  , aksenal ve şekilsiz örnekler üzerinde yapılan deneylerde ise  $De^2=4A/\pi$  olarak alınmaktadır. Burada; ( $A=WxD$ ; konik başlıkların temas noktalarından geçen örneğin en küçük kesit alanıdır. Eğer konik uçların örneğin içine girmesi durumu söz konusu ise;  $A=WD$  olarak alınır. Bu eşitliklerde, W genişlik (cm), D ise yükleme noktaları arasındaki uzaklıktır.

Yukarıda ifade edilen düzeltilmemiş nokta yük dayanımı değeri referans çapa (D=50 mm) göre düzeltmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

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

$$F = (D_e/A)^{0.45} \quad (4)$$

Eşitlikte;

$I_{s(50)}$ : 50 mm çaplı karota göre düzeltilmiş nokta yük dayanımı, PLI (MPa),

F: Boyut düzeltme faktörüdür.



Şekil 2.13. Nokta yükü dayanım indeksi deneyinden görünüm

Tablo 2.1. Bu çalışma ve literatürden derlenen PLI ve UCS değerleri

| Litoloji  | Lokasyon  | Araştırmacılar  |
|---|---|---|
| Aglomera, volkanik breş, volkanik bomba, tüff ( <b>Piroklastik</b> ), Andezit, bazalt, dasit, riyodasit, trakit ve trakiandezit ( <b>Volkanik</b> ), Granit, granodiyorit, diyorit, siyenit, gabro, kuvars diyorit, kuvars monzodiyorit, kuvars monzonit, kuvars siyenit, monzonit, tonalit ve monzogranit ( <b>Plütonik</b> )  | Amerika Birleşik Devletleri,<br>Japonya,<br>Nijerya,<br>Türkiye   | Bu çalışma, Kaya ve Karaman (2015), Kahraman (2014), Gül ve Ceylanoğlu (2013), Gürocak vd. (2008), Kohno ve Maeda (2012), Mishra ve Basu (2012), Singh vd. (2012), Alemdağ vd. (2011), Adebayo vd. (2010), Kahraman ve Günaydın (2009), Kılıç ve Teymen (2008), Karakuş ve Tütmez (2006), Kahraman vd. (2005), Quane ve Russell (2005), Sülükcü ve Ulusay (2001), Kahraman (2001), Topal (2000), Tuğrul ve Zarif (1999), Ghosh ve Srivastava (1991), Catallini (1986) |
| Kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, killi kireçtaşı, çakıllı kireçtaşı, biyosparitik kireçtaşı, sparitik kristalize kireçtaşı, biyomikritik kireçtaşı, kumlu sparitik kireçtaşı, yüksek poroziteli kireçtaşı, kumlu kireçtaşı, pelmikritik kireçtaşı, biyopelsparitik kireçtaşı, mikritik kireçtaşı ve killi biyomikritik kireçtaşı ( <b>Kimyasal</b> ), kumtaşı, altere kumtaşı, çamurtaşı, konglomera, marn, silttaşı, şeyl, konglomera, siltli şeyl, killi şeyl ve kil taşı ( <b>Kırıntılı</b> ), Anhidrit, dolomit, kaya tuzu ve jips ( <b>Evaporit</b> ) | Amerika Birleşik Devletleri,<br>Hindistan,<br>Japonya,<br>Türkiye | Bu çalışma, Kaya ve Karaman (2015), Gül ve Ceylanoğlu (2013), Kohno ve Maeda (2012), Kahraman ve Günaydın (2009), Mishra ve Basu (2012), Singh vd. (2012), Kılıç ve Teymen (2008), Karakuş ve Tütmez (2006), Kahraman vd. (2005), Zarif ve Tuğrul (2003), Grene (2001), Kahraman (2001), Sülükcü ve Ulusay (2001)   |
| Gnays, mikaşist, migmatit, sepantinit, amfibol şist, kondalit, amfibolit, epidiorit, epidot-amfibolit, listvanit, şist ve peridotit ( <b>Foliasyonlu/ Yönelimli</b> ), mermer, metagabro, kuvartiz, metakumtaşı, metabazalt, amfibol feldispatik kuvartiz ve feldispatik kuvartiz ( <b>Yönelimsiz</b> )   | Hindistan,<br>Türkiye,<br>Yunanistan                              | Bu çalışma, Kaya ve Karaman (2015), Gül ve Ceylanoğlu (2013), Mishra ve Basu (2012), Singh vd. (2012), Diamantis vd. (2009), Kahraman ve Günaydın (2009), Kılıç ve Teymen (2008), Karakuş ve Tütmez (2006), Kahraman vd. (2005), Kahraman (2001), Sülükcü ve Ulusay (2001), Singh ve Singh (1993)   |

### 2.3.8. Birim Hacim Ağırlığı Deneyi

Bu çalışmada, kazı aynalarından alınan kaya bloklarından laboratuvarında düzgün şekilli silindirik örnekler hazırlanmış ve kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Birim hacim ağırlık hesaplamaları yapılırken silindirik örneklerin hacim ve ağırlıkları dikkate alınmıştır. Örneklerin boyutlarının ölçümünde 0.01 mm

hassasiyete sahip dijital kumpas kullanılmıştır. Deneyle her bir örnekleme noktası için üç kere yapılmıştır.

#### **2.4. Deney Sonuçları ve Kaya Türüne Göre Sonuçların Değerlendirilmesi**

Tünel güzergahına ait 37 ölçüm noktası için gerçekleştirilen fiziko–mekanik deney sonuçları Tablo 2.2’de verilmiştir. Tablo 2.3’te ise 8 farklı Schmidt sertlik ölçme ve değerlendirme yöntemi kullanılarak 46–47 kayaç türü için ayrı ayrı sertlik değerleri hesaplanmıştır. Tablo 2.3’te iki grup Schmidt sertlik değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Birinci grupta  $R_1$  ve  $R_3$  ile daha yüksek değerler okunmuşken, ikinci grupta ise nispeten daha düşük değerler elde edilmiştir. Sertlik değerlerindeki farklılığın yöntemler arasındaki uygulama farklılığından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Örneğin, ISRM (2007) ve USBR (1998) yöntemleri küçük değerleri ortalamaya dahil etmemektedir. Ayrıca, ISRM revize versiyon (ISRM, 2009) ile elde edilen sertlik değerleri diğer yöntemlerden daha yüksektir. Bunun nedeni ISRM (2009) tarafından önerilen ölçülen sertlik değerlerinin grafik yardımıyla düzeltilmesidir. Tablo 2.2’de deney sonuçları değerlendirilerek kaya tipine göre en düşük, en yüksek, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 2.4 oluşturulmuştur. Tablo 2.4’ten görüldüğü gibi kayaçlar petrografik olarak aynı özelliklere sahip olsalar bile deney sonuçlarında farklılıklar olabileceği görülmüştür. Kaya kütlelerinin süreksizlik özellikleri (devamlılık, ara uzaklık, açıklık ayrışma durumu vb.) ve yeraltı suyu durumu tünelin farklı güzergahlarında/noktalarında farklılıklar içerebilmektedir. Benzer şekilde kaya malzemelerinin de özellikle mikro–çatlak yapılarına bağlı olarak mühendislik özelliklerinde oldukça farklı sonuçlar verdiği Tablo 2.4’ten görülmektedir. Bu nedenle kaya kütlelerindeki değişimler dikkate alınarak 37 farklı kazı aynasındaki hem kaya kütlelerinin hem de o ortamı yansıtan kaya malzemesinin mühendislik özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan bu tezin önemi ortaya çıkmıştır. Özellikle güzergah belirleme çalışmalarında tek bir noktaya ait kaya özelliklerine göre farklı noktalar için yapılan değerlendirmelerin hatalı sonuçlar verebileceği anlaşılabilmektedir.

Tablo 2.2. Kaya malzemelerine ait fiziko–mekanik deney sonuçları

| No | Km       | Kaya türü     | UCS<br>(MPa) | $E_i$<br>(GPa) | $\nu$ | C<br>(MPa) | $\phi$<br>(°) | BÇD<br>(MPa) | UPV<br>(m/s) | PLI<br>(MPa) | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|----|----------|---------------|--------------|----------------|-------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------------|
| 1  | 0+495.10 | Bazalt        | 197.0        | 86.3           | 0.31  | 36.0       | 50.0          | 34.4         | 5855         | 10.0         | 27.7                             |
| 2  | 0+702.00 | Metabazalt    | 158.0        | 73.5           | 0.26  | 32.0       | 46.0          | 26.3         | 5009         | 8.6          | 30.0                             |
| 3  | 0+919.00 | Metabazalt    | 66.0         | 72.5           | 0.35  | 15.0       | 41.0          | 9.4          | 3944         | 3.8          | 26.4                             |
| 4  | 1+110.00 | Metabazalt    | 146.0        | 58.5           | 0.39  | 22.0       | 56.0          | 22.4         | 4864         | 7.8          | 30.5                             |
| 5  | 1+325.00 | Metabazalt    | 133.0        | 35.0           | 0.20  | 28.0       | 44.5          | 20.6         | 4800         | 7.1          | 28.1                             |
| 6  | 1+675.00 | Bazalt        | 95.0         | 71.5           | 0.32  | 21.0       | 43.0          | 14.7         | 4467         | 5.3          | 27.3                             |
| 7  | 1+813.80 | Bazalt        | 115.3        | 74.8           | 0.30  | 24.5       | 44.0          | 22.5         | 5239         | 6.5          | 27.5                             |
| 8  | 2+473.00 | Bazalt        | 152.4        | 93.7           | 0.24  | 30.0       | 47.0          | 23.7         | 4605         | 8.1          | 27.5                             |
| 9  | 2+677.00 | Metabazalt    | 96.0         | 66.5           | 0.28  | 24.0       | 37.0          | 18.6         | 4172         | 6.1          | 26.9                             |
| 10 | 3+005.00 | Metabazalt    | 111.0        | 59.0           | 0.37  | 27.0       | 39.0          | 16.8         | 4389         | 8.8          | 27.1                             |
| 11 | 3+310.00 | Metabazalt    | 71.0         | 31.5           | 0.20  | 17.0       | 43.0          | 15.9         | 4223         | 4.9          | 26.7                             |
| 12 | 3+580.00 | Metabazalt    | 81.0         | 26.0           | 0.17  | 18.0       | 43.0          | 14.9         | 4325         | 5.0          | 26.7                             |
| 13 | 3+743.00 | Bazalt        | 75.0         | 15.5           | 0.21  | 14.0       | 49.0          | 12.2         | 4576         | 5.4          | 27.0                             |
| 14 | 3+901.00 | Bazalt        | 34.0         | 11.5           | 0.14  | 8.0        | 43.0          | 4.4          | 2985         | 2.8          | 25.5                             |
| 15 | 4+090.00 | Dasit         | 61.0         | 20.0           | 0.21  | 14.0       | 43.0          | 5.7          | 4534         | 3.8          | 26.0                             |
| 16 | 4+300.00 | Bazalt        | 87.0         | 51.0           | 0.31  | 19.0       | 43.0          | 10.5         | 5031         | 4.1          | 26.9                             |
| 17 | 4+427.00 | Dasit         | 61.0         | 20.0           | 0.23  | 14.0       | 40.0          | 5.3          | 4129         | 3.4          | 24.9                             |
| 18 | 4+572.00 | Dasit         | 72.0         | 20.0           | 0.33  | 18.0       | 37.0          | 5.8          | 4356         | 3.9          | 26.2                             |
| 19 | 4+772.00 | Dasit         | 65.5         | 45.2           | 0.27  | 14.0       | 44.0          | 9.8          | 4226         | 3.6          | 25.8                             |
| 20 | 4+874.00 | Dasit         | 56.0         | 19.5           | 0.21  | 11.0       | 47.0          | 6.6          | 4052         | 3.4          | 25.7                             |
| 21 | 4+950.00 | Kireçtaşı     | 117.0        | 78.5           | 0.34  | 23.0       | 47.0          | 17.2         | 4968         | 5.6          | 26.8                             |
| 22 | 5+052.00 | Kireçtaşı     | 92.0         | 32.5           | 0.22  | 18.0       | 45.0          | 11.1         | 4340         | 5.2          | 26.7                             |
| 23 | 5+235.00 | Bazalt        | 100.0        | 71.5           | 0.33  | 20.7       | 45.0          | 16.1         | 5310         | 6.7          | 25.0                             |
| 24 | 5+350.00 | Kireçtaşı     | 91.0         | 54.5           | 0.28  | 19.0       | 44.5          | 12.7         | 4836         | 5.6          | 26.4                             |
| 25 | 5+545.30 | Kireçtaşı     | 75.0         | 62.5           | 0.24  | 15.0       | 50.0          | 10.8         | 3382         | 5.2          | 26.3                             |
| 26 | 5+690.00 | Bazalt        | 77.0         | 17.0           | 0.20  | 16.0       | 45.0          | 10.9         | 4435         | 4.9          | 25.5                             |
| 27 | 5+857.50 | Vulkanik breş | 41.0         | 15.5           | 0.23  | 11.0       | 39.0          | 5.5          | 4182         | 2.1          | 24.6                             |
| 28 | 6+005.00 | Kireçtaşı     | 120.0        | 26.5           | 0.21  | 24.0       | 47.0          | 18.0         | 5366         | 5.7          | 26.5                             |
| 29 | 6+171.00 | Bazalt+dasit  | 94.0         | 41.0           | 0.17  | 20.0       | 44.0          | 13.5         | 3983         | 6.1          | 27.0                             |
| 30 | 6+300.00 | Bazalt        | 125.0        | 74.0           | 0.30  | 25.0       | 47.0          | 19.3         | 4934         | 6.6          | 27.8                             |
| 31 | 6+400.00 | Dasit         | 68.0         | 18.5           | 0.18  | 14.0       | 49.0          | 8.6          | 3956         | 3.3          | 26.8                             |
| 32 | 6+403.00 | Dasit         | 66.0         | 17.0           | 0.16  | 12.0       | 49.0          | 7.2          | 3943         | 3.3          | 26.6                             |
| 33 | 6+560.00 | Bazalt        | 107.0        | 58.5           | 0.29  | 21.0       | 47.0          | 18.8         | 5602         | 6.4          | 27.3                             |
| 34 | 6+725.00 | Dasit         | 132.0        | 36.5           | 0.26  | 25.0       | 47.0          | 20.6         | 4968         | 6.8          | 27.2                             |
| 35 | 6+873.00 | Dasit         | 87.0         | 21.0           | 0.29  | 19.0       | 43.0          | 16.5         | 4336         | 4.2          | 26.4                             |
| 36 | 6+994.00 | Dasit         | 110.0        | 63.5           | 0.19  | 18.0       | 54.0          | 17.1         | 4648         | 5.0          | 26.9                             |
| 37 | 7+119.80 | Dasit         | 90.0         | 37.1           | 0.26  | 19.0       | 44.0          | 14.6         | 4356         | 4.3          | 26.7                             |

No: Kaya kodu, Km: Tünel güzergahındaki örnekleme noktaları, UCS: Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı,  $E_i$ : Kaya malzemesi elastisite modülü,  $\nu$ : Poisson oranı C: Kohezyon,  $\phi$ : İçsel sürtünme açısı, BÇD: Brazilian çekme dayanımı, UPV: Ultrasonik P dalga hızı, PLI: Nokta yükü dayanım indeksi ve  $\gamma$ : Birim hacim ağırlık

Tablo 2.3. Farklı yöntemlere göre elde edilmiş Schmidt sertlik değerleri

| No | Kaya türü                 | R <sub>D1</sub> | R <sub>D2</sub> | R <sub>D3</sub> | R <sub>R1</sub> | R <sub>R2</sub> | R <sub>R3</sub> | R <sub>R4</sub> | R <sub>ISRM-RV</sub> |
|----|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| 1  | Bazalt                    | 59.8            | 59.8            | 60.5            | 62.1            | 60.4            | 62.2            | 59.3            | 63.0                 |
| 2  | Metabazalt                | 53.8            | 53.2            | 52.5            | 53.6            | 52.5            | 54.8            | 51.8            | 55.0                 |
| 3  | Metabazalt                | 45.0            | 45.3            | 45.7            | 46.4            | 45.6            | 46.6            | 44.6            | 48.5                 |
| 4  | Metabazalt                | 51.2            | 51.5            | 51.5            | 53.1            | 51.4            | 53.0            | 50.4            | 54.0                 |
| 5  | Metabazalt                | 46.0            | 46.5            | 47.3            | 48.9            | 47.2            | 48.8            | 45.7            | 50.0                 |
| 6  | Bazalt                    | 36.8            | 37.5            | 38.0            | 40.6            | 38.0            | 39.4            | 37.8            | 42.7                 |
| 7  | Bazalt                    | 53.2            | 52.8            | 52.7            | 54.1            | 52.8            | 54.0            | 52.5            | 55.5                 |
| 8  | Bazalt                    | 55.2            | 54.5            | 54.5            | 55.9            | 54.7            | 56.4            | 53.3            | 56.5                 |
| 9  | Metabazalt                | 37.0            | 37.0            | 36.3            | 39.9            | 36.0            | 40.0            | 33.6            | 41.0                 |
| 10 | Metabazalt                | 42.2            | 42.5            | 42.3            | 43.7            | 42.2            | 44.2            | 40.6            | 45.0                 |
| 11 | Metabazalt                | 41.5            | 41.8            | 41.8            | 43.6            | 41.8            | 43.4            | 40.7            | 45.5                 |
| 12 | Metabazalt                | 47.3            | 47.0            | 46.5            | 46.9            | 46.5            | 47.4            | 45.8            | 49.7                 |
| 13 | Bazalt                    | 40.0            | 40.0            | 40.0            | 41.5            | 39.9            | 40.8            | 39.9            | 44.6                 |
| 14 | Bazalt                    | 32.0            | 32.2            | 32.3            | 33.7            | 32.5            | 33.4            | 31.7            | 37.3                 |
| 15 | Dasit                     | 32.8            | 32.8            | 32.8            | 33.0            | 32.9            | 33.8            | 31.6            | 37.5                 |
| 16 | Bazalt                    | 35.5            | 35.7            | 35.7            | 36.9            | 35.7            | 37.2            | 34.4            | 40.0                 |
| 17 | Dasit                     | 32.2            | 32.3            | 32.3            | 33.5            | 32.1            | 34.0            | 30.8            | 35.8                 |
| 18 | Dasit                     | 40.7            | 40.7            | 40.0            | 43.2            | 40.3            | 41.8            | 39.5            | 44.0                 |
| 19 | Dasit                     | 30.3            | 30.7            | 30.7            | 31.5            | 30.5            | 31.6            | 29.0            | 34.4                 |
| 20 | Dasit                     | 30.0            | 29.7            | 29.7            | 30.5            | 29.6            | 30.8            | 27.6            | 33.8                 |
| 21 | Kireçtaşı                 | 36.8            | 37.2            | 37.7            | 39.5            | 37.7            | 38.8            | 37.1            | 42.4                 |
| 22 | Kireçtaşı                 | 36.7            | 36.5            | 36.0            | 37.4            | 35.8            | 38.4            | 33.9            | 39.0                 |
| 23 | Bazalt                    | 45.7            | 46.0            | 45.8            | 46.6            | 45.7            | 46.8            | 44.5            | 48.6                 |
| 24 | Kireçtaşı                 | 33.0            | 33.8            | 33.8            | 35.3            | 33.9            | 36.2            | 32.2            | 37.8                 |
| 25 | Kireçtaşı                 | 36.3            | 35.7            | 36.0            | 37.6            | 36.0            | 37.8            | 34.8            | 40.1                 |
| 26 | Bazalt                    | 42.2            | 41.8            | 42.0            | 42.6            | 41.8            | 43.0            | 41.1            | 45.4                 |
| 27 | Volkanik breş             | 26.8            | 26.2            | 25.8            | 28.7            | 26.0            | 27.4            | 25.7            | 31.6                 |
| 28 | Kireçtaşı                 | 47.8            | 48.0            | 48.2            | 49.5            | 48.2            | 49.2            | 47.9            | 50.8                 |
| 29 | Bazalt+dasit              | 47.7            | 47.8            | 47.7            | 49.5            | 47.7            | 48.8            | 47.2            | 50.4                 |
| 30 | Bazalt                    | 46.7            | 46.7            | 46.3            | 48.1            | 46.1            | 47.6            | 45.6            | 49.3                 |
| 31 | Dasit                     | 35.2            | 35.8            | 35.5            | 36.9            | 35.6            | 37.2            | 34.4            | 39.5                 |
| 32 | Dasit                     | 36.5            | 36.5            | 36.8            | 38.7            | 36.5            | 38.6            | 35.3            | 41.3                 |
| 33 | Bazalt                    | 38.0            | 37.0            | 37.0            | 40.6            | 37.9            | 40.0            | 36              | 42.6                 |
| 34 | Dasit                     | 51.3            | 52.0            | 52.0            | 53.5            | 52.0            | 53.6            | 50.8            | 55.1                 |
| 35 | Dasit                     | 45.3            | 45.2            | 45.2            | 46.1            | 45.1            | 46.0            | 44.2            | 48.2                 |
| 36 | Dasit                     | 48.0            | 47.5            | 46.3            | 49.7            | 47.0            | 49.0            | 45.8            | 50.3                 |
| 37 | Dasit                     | 42.7            | 42.8            | 42.5            | 44.0            | 42.4            | 43.6            | 41.2            | 45.8                 |
| 38 | Andezit-1                 | 52.3            | 51.3            | 52.2            | 54.2            | 52.1            | 54.4            | 48.3            | 54.0                 |
| 39 | Andezit-2                 | 52.2            | 52.3            | 52.3            | 52.9            | 52.2            | 52.8            | 51.3            | 55.2                 |
| 40 | Bazalt                    | 41.8            | 42.3            | 42.0            | 45.6            | 42.0            | 45.2            | 40.7            | 45.7                 |
| 41 | Granite                   | 63.8            | 63.5            | 64.3            | 67.1            | 64.4            | 66.6            | 63.4            | -                    |
| 42 | Dasit                     | 46.0            | 46.7            | 46.8            | 47.0            | 46.6            | 47.8            | 45.0            | 49.8                 |
| 43 | Biyomikritik kireçtaşı -1 | 12.2            | 11.0            | 11.5            | 15.5            | 11.4            | 13.6            | 10.2            | 17.5                 |
| 44 | Biyomikritik kireçtaşı -2 | 16.0            | 15.3            | 15.3            | 17.2            | 15.6            | 18.0            | 13.3            | 20.0                 |
| 45 | Biyomikritik kireçtaşı -3 | 11.5            | 10.5            | 11.5            | 15.4            | 12.1            | 14.8            | 11.0            | 17.5                 |
| 46 | Biyomikritik kireçtaşı -4 | 9.7             | 10.2            | 11.2            | 13.5            | 11.1            | 13.6            | 10.0            | 16.4                 |
| 47 | Kumlu kireçtaşı           | 25.2            | 26.5            | 25.7            | 31.0            | 25.0            | 30.0            | 23.5            | 30.6                 |

R<sub>D1</sub>: Deneme yöntem-1, R<sub>D2</sub>: Deneme yöntem-2, R<sub>D3</sub>: Deneme yöntem-3, R<sub>R1</sub>: ISRM, 2007 (eski versiyon, R<sub>ISRM-EV</sub>), R<sub>R2</sub>: ASTM, 2001, R<sub>R3</sub>: USBR, 1998, R<sub>R4</sub>: Sumner ve Nel, 2002 ve R<sub>ISRM-RV</sub>: ISRM, 2009 (revize versiyon)

Tablo 2.4. Kaya türüne göre indeks deneylerin sonuçları

| Kaya türü  |                 | UCS<br>(MPa) | E <sub>i</sub><br>(GPa) | $\nu$           | C<br>(MPa) | $\phi$<br>(der.) | BÇD<br>(MPa) | UPV<br>(m/s)   | PLI<br>(MPa)  | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|------------|-----------------|--------------|-------------------------|-----------------|------------|------------------|--------------|----------------|---------------|----------------------------------|
| Bazalt     | ED              | 34           | 11.5                    | 0.14            | 8          | 43               | 4.4          | 2985           | 3             | 25.02                            |
|            | EY              | 197          | 93.7                    | 0.33            | 36         | 50               | 34.4         | 5855           | 10            | 27.76                            |
|            | Ort. $\pm$ S.S. | 106 $\pm$ 43 | 57 $\pm$ 29             | 0.27 $\pm$ 0.06 | 21 $\pm$ 8 | 46 $\pm$ 2       | 17 $\pm$ 8   | 4822 $\pm$ 768 | 6 $\pm$ 2     | 27 $\pm$ 1                       |
| Dasit      | ED              | 56           | 17                      | 0.16            | 11         | 37               | 5.3          | 3943           | 3             | 24.92                            |
|            | EY              | 132          | 63.5                    | 0.33            | 25         | 54               | 20.6         | 4968           | 7             | 27.17                            |
|            | Ort. $\pm$ S.S. | 79 $\pm$ 24  | 29 $\pm$ 15             | 0.24 $\pm$ 0.05 | 16 $\pm$ 4 | 45 $\pm$ 5       | 11 $\pm$ 5   | 4319 $\pm$ 311 | 4 $\pm$ 1     | 26 $\pm$ 0.6                     |
| Kireçtaşı  | ED              | 75           | 26.5                    | 0.21            | 15         | 44.5             | 10.8         | 3382           | 5             | 26.29                            |
|            | EY              | 120          | 78.5                    | 0.34            | 24         | 50               | 18           | 5366           | 6             | 26.78                            |
|            | Ort. $\pm$ S.S. | 99 $\pm$ 19  | 51 $\pm$ 21             | 0.26 $\pm$ 0.05 | 20 $\pm$ 4 | 47 $\pm$ 2       | 14 $\pm$ 3   | 4578 $\pm$ 763 | 5.4 $\pm$ 0.2 | 26.5 $\pm$ 0.2                   |
| Metabazalt | ED              | 66           | 26                      | 0.17            | 15         | 37               | 9.4          | 3944           | 4             | 26.4                             |
|            | EY              | 158          | 73.5                    | 0.39            | 32         | 56               | 26.3         | 5009           | 9             | 30.51                            |
|            | Ort. $\pm$ S.S. | 108 $\pm$ 35 | 53 $\pm$ 19             | 0.28 $\pm$ 0.08 | 23 $\pm$ 6 | 44 $\pm$ 6       | 18 $\pm$ 5   | 4466 $\pm$ 380 | 6.5 $\pm$ 2   | 27.8 $\pm$ 1.6                   |

ED: En düşük, EY: En yüksek, Ort: Ortalama, S.S: standart sapma

## 2.5. Kaya Kütlelerinin İçerdiği Süreksizliklere Ait Parametreler

Çambaşı HES Tünel güzergahında yer alan kazı aynalarındaki süreksizliklerin özelliklerini belirlemek için hat etüdü yönteminden yararlanılmıştır. Bu ölçümler jeolojik (kaya tipinin değişimi) ve kazı aynalarındaki değişimler (süreksizlik özelliklerindeki ve yeraltı suyu durumundaki değişiklik, vb.) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Hat etüdü yöntemine göre süreksizliklerin özellikleri belirlenmiştir. Hat etüdü yöntemi, geniş bir alanda kaya kütlelerinin 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 yöntemi uygulanırken 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 belirlenmiştir. 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. Bazı durumlarda ölçümün yapıldığı kazı aynasındaki bazı süreksizliklerin doğal süreksizlik mi, yoksa kazı sonrası oluşmuş veya patlatma kaynaklı kırıklar olup olmadığı konusunda kuşku olabilir. Hat etütlerinde yapay kırıklar dikkatli bir şekilde ayırtlanmalı ve değerlendirilmeye alınmamalıdır. Patlatma veya mekanik kazı sonucu gelişmiş kırıklar, genellikle küçük (devamlılıkları az), pürüzlü, düzensiz, temiz ve gelişigüzel bir yönelime

sahip olma gibi özellikleri ile doğal süreksizliklerden farklı olmaktadır (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Örneklemenin yapıldığı noktalarda süreksizliklerin mühendislik özelliklerine yönelik çalışmalar ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır. Süreksizliklerin durumu Brunton marka jeolog pusulasıyla, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü Barton pürüzlülük tarağıyla, süreksizlik ara uzaklığı ve açıklığı şerit metre ve dijital kumpas ile belirlenmiştir.

### 2.5.1. Süreksizlik Ara Uzaklığı

Bir süreksizlik takımında birbirine komşu iki süreksizlik arasındaki dik uzaklık olarak tanımlanan süreksizlik ara uzaklığı kaya kütlelerinin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Ölçüm hattı boyunca iki süreksizlik arasında ölçülen uzaklık “görünür ara uzaklık” değerini vermektedir. Bir süreksizlik setindeki süreksizliklerin birbirine paralel olduğu nadiren görüldüğü için gerçek aralık parametresi ölçüm hattının yöneliminden veya ölçümün yapıldığı mostranın konumundan etkilenmektedir. Bundan dolayı süreksizlik sıklığının değerlendirilmesinde görünür ara uzaklık değerinin ölçülmesi uygulamada daha yaygın şekilde tercih edilmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2007). Bu çalışmada kaya kütleleri için süreksizlik ara uzaklığı parametresinin tanımlanması amacıyla ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri kullanılmıştır (Tablo 2.5).

Tablo 2.5. Süreksizlik ara uzaklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981)

| Aralık (mm) | Tanımlama                          |
|-------------|------------------------------------|
| < 20        | Çok dar ara uzaklıklı              |
| 20–60       | Dar ara uzaklıklı                  |
| 60–200      | Yakın ara uzaklıklı                |
| 200–600     | Orta derecede ara uzaklıklı        |
| 600–2000    | Geniş ara uzaklıklı                |
| 2000–6000   | Çok geniş ara uzaklıklı            |
| > 6000      | İleri derecede geniş ara uzaklıklı |

### 2.5.2. Süreksizliklerin Devamlılığı

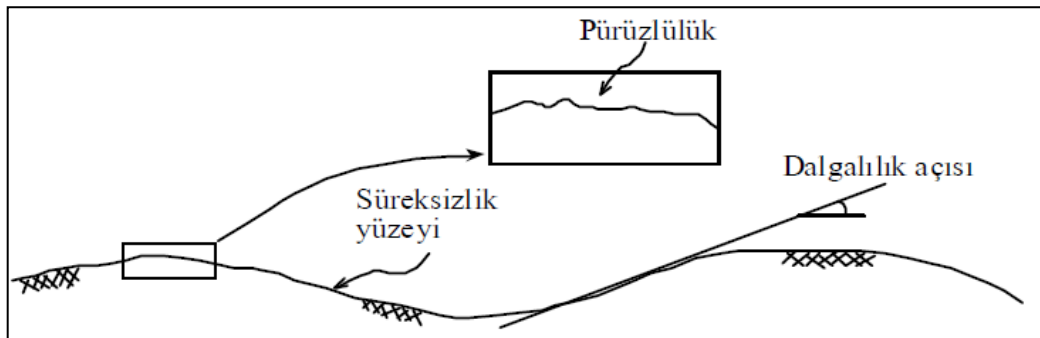
Devamlılık alansal oran olarak tanımlanmasına karşın, alansal ölçümün zor olması nedeniyle genellikle mostradaki süreksizlik izinin ölçülmesiyle bulunmaktadır (ISRM, 1981). Bu durumda devamlılık, süreksizlik izi olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmada, devamlılık parametresi ISRM (1981) tarafından önerildiği şekliyle tanımlamalar esas alınarak doğrudan şerit metre ile yapılan ölçümler ile belirlenmiştir. Süreksizliklerin devamlılığı ISRM (1981) tarafından önerilen devamlılık tanımlama ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Tablo 2.6).

Tablo 2.6. Süreksizlik devamlılığının tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981)

| Tanımlama                 | Süreksizlik izinin uzunluğu (m) |
|---------------------------|---------------------------------|
| Çok düşük devamlılık      | <1                              |
| Düşük derecede devamlılık | 1-3                             |
| Orta derecede devamlılık  | 3-10                            |
| Yüksek devamlılık         | 10-30                           |
| Çok yüksek devamlılık     | >30                             |

### 2.5.3. Süreksizlik Yüzeyinin Pürüzlülüğü ve Dalgalılığı

Pürüzlülük, süreksizlik yüzeyinin küçük ölçekte (cm boyutunda), dalgalılık ise büyük ölçekte (metre boyutunda) düzlemsellikten sapmasının bir ölçütüdür (ISRM, 1981). Süreksizliklerin özellikleri, karot veya arazide veya tünel aynasında görünen yüzeyler üzerinde belirlenmektedir. Bu belirlemede küçük ölçekli yüzey pürüzlülükleri ile büyük ölçekteki ondülasyon veya yüzey dalgalılığını ayırt etmek gerekmektedir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Süreksizlik yüzeyinde pürüzlülük ve dalgalılık (ISRM, 1981)



Süreksizlik pürüzlülüğünün belirlenmesine ilişkin değişik yöntemler önerilmiştir (ISRM, 1981). Bu çalışmada, pürüzlülük parametreleri bulunurken, ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlerden yararlanılmıştır. Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen küçük ölçekli pürüzlülüğü tanımlamak için telli profilometre ile süreksizlik pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Tünel aynasında pürüzlülük ölçümleri

#### 2.5.4. Süreksizlik Yüzeylerinin Açıklığı ve Dolgu Durumu

Açıklık, bir süreksizlik yüzeyinin karşılıklı iki yüzeyinin arasındaki dik mesafedir. Süreksizlik açıklığı boş olabileceği gibi her hangi bir dolgu malzemesi veya su ile de doldurulmuş olabilmektedir (ISRM, 1981). Eğer süreksizlik yüzeyi temiz ve kapalı ise, diğer süreksizlik parametreleri tanımlama amacıyla yeterli olabilmektedir. Fakat süreksizlik yüzeyi açık ise, bu açıklığın ölçülmesi ve kaydedilmesi gerekmektedir. Açıklığın ölçülebilmesinde en basit ve en pratik çözüm milimetre bölmeli şerit metre veya mikrometre ile yapılmaktadır (Ulusay ve Sönmez, 2007). Ulusay ve Sönmez (2007) süreksizlikler çok düz yüzeylere sahip olmadıkları sürece, 0.1 mm veya 1.0 mm genişliğindeki açıklıkların süreksizliklerin makaslama dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir.

Dolgu malzemesi, süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasını dolduran ve genellikle ana kayaç malzemesinden daha zayıf olan malzemedir. Kum, silt, kil, breş, kalsit, kuvars ve milonit tipik dolgu malzemeleridir. Kalsit, kuvars ve pirit gibi yüksek dayanıma sahip

mineraller hariç tutulursa, dolgu içeren süreksizlikler dolgusuz veya pürüzlü yüzeylere oranla daha düşük kayma dayanımına sahiptirler ve bu nedenle kaya kütlelerinin dayanımı üzerinde daha etkin bir rol oynamaktadırlar.

Bu çalışmada milimetre ölçekli şerit metrelerden yararlanarak, her süreksizlik takımı için açıklıklar ayrı ayrı ölçülmüş ve ortalama açıklık değeri belirlenmiştir. Ortalamanın üzerinde olan değerler ayrıca kaydedilmiştir. Çalışmada süreksizliklerin açıklığı ISRM (1981) tarafından önerilen süreksizlik açıklığı tanımlama ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Tablo 2.7).

Tablo 2.7. Süreksizlik açıklığını tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981)

| Açıklık     | Tanımlama           |                    |
|-------------|---------------------|--------------------|
| <0.1 mm     | Çok sıkı            |                    |
| 0.1–0.25 mm | Sıkı                | ‘Kapalı’ yapılar   |
| 0.25–0.5 mm | Kısmen açık         |                    |
| 0.5–2.5 mm  | Açık                |                    |
| 2.5–10 mm   | Orta derecede geniş | ‘Boşluklu’ yapılar |
| > 10 mm     | Geniş               |                    |
| 1–10 cm     | Çok geniş           |                    |
| 10–100 cm   | Aşırı geniş         | ‘Açık’ yapılar     |
| >100 cm     | Boşluklu            |                    |

### 2.5.5. Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi

Kaya kütleleri yüzeyde ve yüzeye yakın kesimlerde kayacın litolojisine göre ayrışma göstermektedir. Daha derinlerde ise hidrotermal süreçlere bağlı olarak alterasyona uğramış olabilirler. Bu nedenle süreksizlik yüzeylerinin dayanımı, bu yüzeylerin ve yakın civardaki kaya malzemesinin bozunma derecesiyle yakından ilişkili olabilmektedir. Bozunmanın derecesine bağlı olarak, süreksizlik yüzeylerinin dayanımı kaya malzemesinin dayanımından daha düşük olabilir. Bu nedenle kaya kütlelerinin ve kaya malzemesinin bozunma durumunun tanımlanması, süreksizlik yüzeylerinin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Ulusay ve Sönmez, 2007). Süreksizlik yüzeylerinin bozunma derecesinin tayini için ISRM (1981) tarafından arazi çalışmaları sırasında kullanılacak bozunma sınıflaması ölçütleri önerilmiştir. ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre belirlenen kazı aynalarındaki süreksizlik yüzeylerinin bozunma dereceleri Tablo 2.8’de özet olarak verilmiştir. Bu sınıflama, arazi çalışması sırasında kolaylıkla belirlenebilen görsel bir sınıflamadır.

Tablo 2.8. Kaya kütlelerinin bozunma derecesi (ISRM, 1981)

| Tanım                   | Tanımlama ölçütü   | Bozunma derecesi |
|-------------------------|--|------------------|
| Bozunmamış (taze)       | Kayanın bozunduğuna ilişkin gözle ayırt edilebilir bir belirti olmamakla beraber, ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi gözlenebilir.                                       | I                |
| Az bozunmuş             | Kaya malzemesinde ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeniyle tüm kayacın rengi değişmiş ve kaya taze halinden daha zayıf olabilir.                                | II               |
| Orta derecede bozunmuş  | Kayanın yarısından az bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmıştır. Kaya; taze, ya da 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 veya renk değişimine uğramış olup ya bir eklem kütle veya çekirdek taşı halindedir. | IV               |
| Tamamen bozunmuş        | Kayanın tümü toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmıştır. Ancak kaya kütlelerinin yapısı halen korunmaktadır.  | V                |
| Artık zemin             | Kayanın tümü toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlelerinin yapısı ve dokusu kaybolmuştur. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmakla beraber, zemin taşınmamıştır.                             | VI               |

### 2.5.6. Kaya Kalite Göstergesi (RQD)

RQD, ilk olarak Deere (1964) tarafından sondajdan alınan karot boylarından yararlanılarak temel kayaların kalitesini ifade etmek için tanımlanmıştır (Tablo 2.9). RQD, karotlu sondajlarla saptanabileceği gibi, kaya yüzleklerinden, yarma, shaft, galeri ve tünel duvarlarından yararlanılarak da saptanabilmektedir. Palmström (2005), 1 m<sup>3</sup>'lük kaya bloğunun içerdiği süreksizlik sayısından yararlanarak RQD'nin aşağıdaki eşitlikle bulunabileceğini belirtmiştir.

$$RQD = 110 - 2.5 J_v \quad (5)$$

Burada;  $J_v$ : 1 m<sup>3</sup>'lük kaya bloğundaki süreksizlik sayısıdır ( $J_v < 4$  ise  $RQD = 100$  alınır).

Priest ve Hudson (1976), 1 m<sup>3</sup>'teki çatlak sayısı yerine, birim uzunluktaki (1 m.) bir doğru boyunca saptanan süreksizlik sayısını göz önüne alarak aşağıdaki bağıntıyı vermiştir.

$$RQD = 100e^{(-0.1\lambda)}(0.1\lambda+1) \quad (6)$$

Burada;  $\lambda$ : 1 metre uzunluğundaki ölçüm hattını kesen ortalama süreksizlik sayısıdır.

Çambaşı Tünel çalışması kapsamında her bir tünel aynasında ölçüm hattı boyunca birbirine dik yönde yapılan ölçümlerle belirlenen süreksizlik sıklığı ( $\lambda$ ) değerlerinden yararlanılarak kazı aynalarındaki süreksizlikler için RQD değerleri hesaplanmıştır. İnceleme alanında sistematik süreksizliklerin yanı sıra düzensiz süreksizliklerin de zaman zaman gözlenmiş olması nedeniyle RQD'yi belirlemek için Priest ve Hudson (1976) tarafından önerilen 6 numaralı eşitlikten yararlanılmıştır.

Tablo 2.9. RQD sınıflaması (Deere, 1964)

| RQD    | Kaya kalite göstergesi |
|--------|------------------------|
| 0-25   | Çok zayıf              |
| 25-50  | Zayıf                  |
| 50-75  | Orta                   |
| 75-90  | İyi                    |
| 90-100 | Mükemmel               |

## 2.6. Kaya Kütleli Sınıflama Sistemleri

Gözlemsel verilerin ve mevcut deneyimlerin rakamlar ile ifade edilmeye çalışıldığı kaya kütleli sınıflama sistemleri; yeraltı maden işletmelerinde kullanılacak destek sistemlerinin önceden tahmin edilmesi ve planlanmasına duyulan gereksinimden yola çıkılarak oluşturulmuş ve yine özellikle madencilik uygulamalarında destek sistemlerinin belirlenmesi amacıyla yönelik olarak zamana bağlı olarak gelişime uğramıştır.

Kaya kütleli sınıflama sistemleri tünel gibi yeraltı mühendislik yapılarının tasarlanmasında yaygın olarak kullanılan önemli bir araçtır. Günümüzde açılmakta olan tünellerin birçoğunda kaya kütleli sınıflama sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bu sistemler, yaklaşık 70 yıl öncesinden (Terzaghi, 1946) başlayarak günümüze kadar geliştirilmiş, buna paralel olarak ortaya birçok yeni sınıflama sistemleri konmuş ve çeşitli projelerde uygulanmıştır. Kaya kütleli sınıflama sistemlerinden RMR ve Q, bir çok araştırmacı tarafından yüzlerce tünelde başarı ile uygulanmış ve evrensel düzeyde kabul görmüştür (Bieniawski, 1973; Barton vd., 1974; Bieniawski, 1989; Barton, 2002; Ramamurthy, 2004; Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2004; Basarir vd., 2005; Gürocak, 2011;

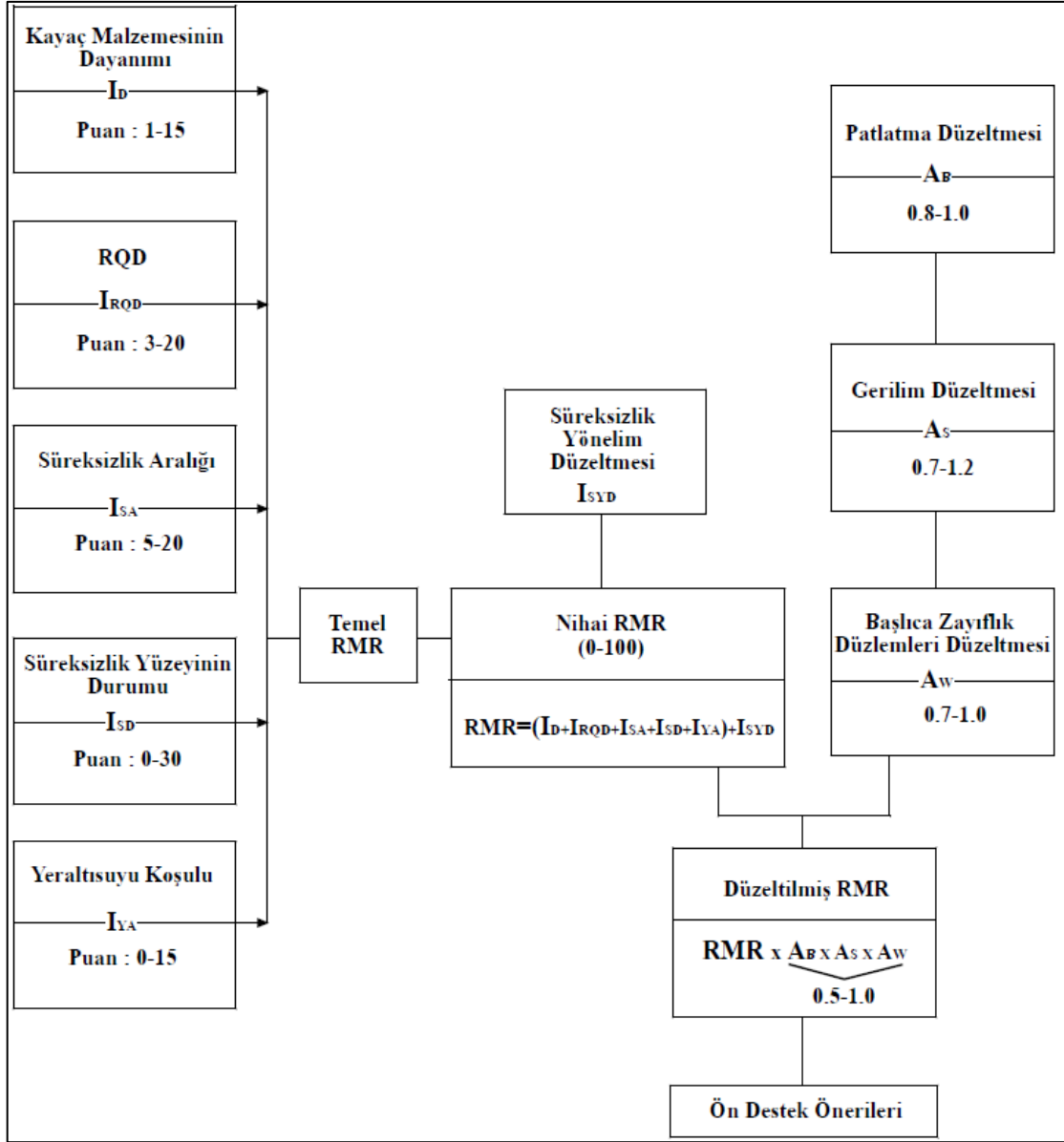
Kaya vd., 2011). Bu sistemler, tünellerin daha ekonomik, daha az riskle ve daha kısa sürede açılmasına büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu tez kapsamında RMR, Q ve RMI kaya kütle sınıflama sistemlerine göre çalışılan tünel güzergahındaki birimler değerlendirilmiştir.

### 2.6.1. RMR (Kaya Kütle Puanlaması) Sınıflama Sistemi

RMR ilk kez 1973 yılında Bieniawski tarafından geliştirilmiş bir kaya kütle sınıflama sistemidir. Sistem daha sonraki yıllarda karşılaşılan mühendislik probleminin özelliklerine göre veya uygulamada karşılaşılan ve sınıflama sisteminin mevcut hali ile değerlendirilemeyen koşullar dikkate alınarak 1974, 1976, 1979, 1989 ve 2014 yıllarında değişimlere uğratılmıştır (Bieniawski, 1989; Celada vd. 2014). RMR<sub>2014</sub>'e eklenen yeni parametrelerden bir tanesi suda dağılma indeksidir. Ancak suda dağılma indeksi zayıf, kil içeren ve suda dağılma özelliği gösteren kayalarda uygulanan bir deney olduğundan (ISRM, 2007), bu çalışmada kullanılan kayalar için uygun değildir. Bu nedenle bu çalışmada RMR sisteminin 1989 yılındaki versiyonu (RMR<sub>89</sub>) kullanılmıştır. RMR sistemi aşağıda sıralanan 6 farklı parametreye sayısal değerler atayarak kaya kütle kalitesini ifade eden tek bir rakama ulaşmak amacını taşımaktadır.

- Kaya malzemesine ait UCS veya PLI parametresi
- RQD
- Süreksizlik ara uzaklığı
- Süreksizliklerin durumu (devamlılık, açıklılık, pürüzlülük, dolgu ve bozunma)
- Süreksizliklerin yönelimi
- Yeraltı suyu durumu

Özellikle yeraltı maden işletmeciliği amacıyla açılan galeri ve tünellerde patlatma, faylara yakınlık ve gerilme değişimlerinin RMR üzerindeki etkilerinin de dikkate alınması amacıyla bir dizi düzeltme faktörünün sisteme eklenmesi ile RMR sisteminin 1989 yılındaki versiyonunda ele alınan önemli bir katkı olmuştur (Ulusay ve Sönmez, 2007). Temel RMR puanına patlatma, gerilim, süreksizlik yönelim ve başlıca zayıflık düzlemleri düzeltmeleri eklenerek düzeltilmiş RMR puanının tayin edilmesinde izlenmiş olan akış şeması Şekil 2.16'da gösterilmiştir (Bieniawski, 1989).



Şekil 2.16. RMR puanının belirlenmesi için akım şeması (Bieniawski, 1989)

Tablo 2.10’da RMR kaya sınıflama sisteminin 1989’daki versiyonu ve bu sisteme göre verilen puanlar görülmektedir. Daha hassas puanlama yapmak amacıyla UCS, % RQD ve süreksizlik ara uzaklığı parametreleri için RMR sisteminin 1989 versiyonunda (RMR<sub>89</sub>) belirtilen parametre–puan grafikleri kullanılmıştır (Şekil 2.17). Herhangi bir değişim aralığına bağlı kalmaksızın, puanlar doğrudan grafiklerden belirlenebilmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2007; Karaman vd., 2013b).

Tablo 2.10. RMR sisteminin 1989 versiyonu (Bieniawski, 1989)

|   |                                  |                                  |              |              |                        |                 |                          |     |
|---|----------------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|------------------------|-----------------|--------------------------|-----|
| 1 | Kaya malzemesinin dayanımı (MPa) | Nokta yük İndeksi, PLI           | > 10         | 4-10         | 2-4                    | 1-2             | Düşük aralıklar için UCS |     |
|   |                                  | Tek eksenli basınç dayanımı, UCS | > 250        | 100-250      | 50-100                 | 25-50           | 5-25                     | 1-5 |
| 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                      |     |
|   |                                  | <b>Puan</b>                      | <b>6</b>     | <b>4</b>     | <b>2</b>               | <b>1</b>        | <b>0</b>                 |     |
|   |                                  | Açıklık (mm)                     | Yok          | <0.1         | 0.1-1                  | 1-5             | >5                       |     |
|   |                                  | <b>Puan</b>                      | <b>6</b>     | <b>5</b>     | <b>4</b>               | <b>1</b>        | <b>0</b>                 |     |
|   |                                  | Pürüzlülük                       | Çok pürüzlü  | Pürüzlü      | Az pürüzlü             | Düz             | Kaygan                   |     |
|   |                                  | <b>Puan</b>                      | <b>6</b>     | <b>5</b>     | <b>3</b>               | <b>1</b>        | <b>0</b>                 |     |
| 4 | Süreksizlik durumu               | Dolgu                            | Yok          | <5 mm (sert) | >5 mm (sert)           | <5 mm (yumuşak) | >5 mm (yumuşak)          |     |
|   |                                  | <b>Puan</b>                      | <b>6</b>     | <b>4</b>     | <b>2</b>               | <b>2</b>        | <b>0</b>                 |     |
|   |                                  | Bozunma                          | Bozunmamış   | Az bozunmuş  | Orta derecede bozunmuş | Bozunmuş        | Çok bozunmuş             |     |
| 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                 |     |
|   |                                  | <b>Puan</b>                      | <b>15</b>    | <b>10</b>    | <b>7</b>               | <b>4</b>        | <b>0</b>                 |     |

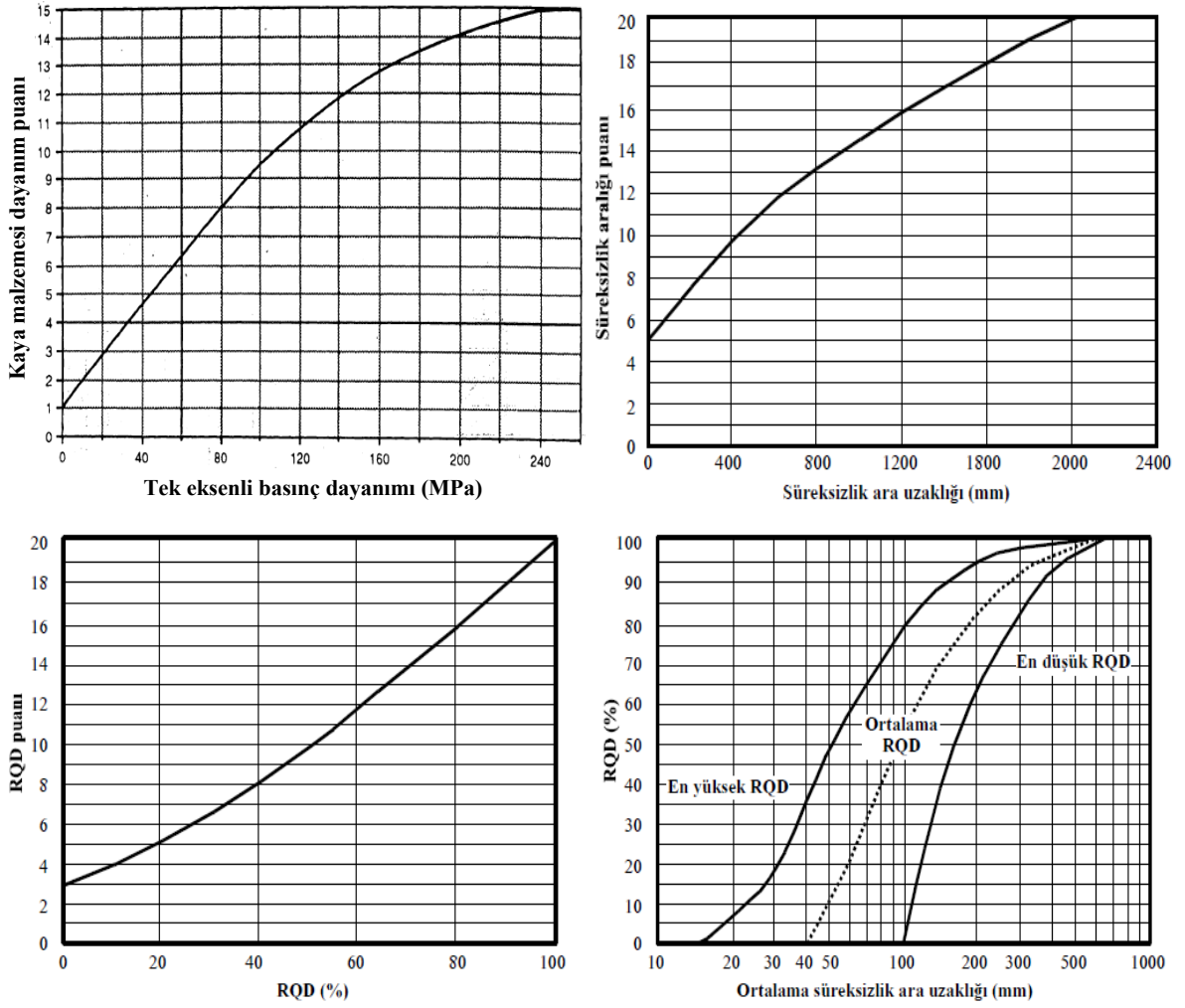
RMR sınıflama sisteminde Bieniawski (1979 ve 1989) tarafından süreksizlik yönelimi düzeltilmesi ortaya atılmıştır. Tablo 2.11'de süreksizlik yöneliminin etkisi, Tablo 2.12'de ise süreksizlik yönelimine göre düzeltme katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 2.11. RMR sisteminde süreksizlik yönelim etkisi (Bieniawski, 1989)

| Doğrultu tünel eksenine dik |                |         |             | Doğrultu tünel eksenine paralel |         | Doğrultuya bakılmaksızın |
|-----------------------------|----------------|---------|-------------|---------------------------------|---------|--------------------------|
| Eğim yönünde ilerleme       | Eğime ilerleme | karşı   | yönde       |                                 |         |                          |
| 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 2.12. RMR sisteminde süreksizlik yönelim düzeltmesi (Bieniawski, 1989)

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



Şekil 2.17. RMR sisteminde parametre-puan grafikleri (Bieniawski, 1989)

Laubscher (1977) ve Kendorski vd. (1983)'e göre RMR sistemi, tünelticilik 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/düzeltilmiş RMR değerinde azaltmaya gidilmelidir. Tablo 2.13'de patlatma ve başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili uygulama koşulları, yöntemler ve düzeltme katsayıları verilmiştir. Kaya kütesinin sınıfı, yukarıda belirtilen işlemlerin yapılmasıyla elde edilen temel RMR puanına göre Tablo 2.14'den belirlenmektedir.



Tablo 2.13. Patlatma ve zayıflık düzlemleri düzeltmesi (Kendorski vd., 1983)

| <b>Patlatma düzeltmesi (A<sub>B</sub>)</b>                            |                                 |                            |                             |
|---|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|   | <b>Koşullar/Yöntem</b>          | <b>Uygulanabilir terim</b> | <b>Düzeltilme katsayısı</b> |
| 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                   |
| <b>Başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme (A<sub>w</sub>)</b> |                                 |                            |                             |
|   | <b>Koşul</b>                    |                            | <b>Düzeltilme katsayısı</b> |
| 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                        |

Tablo 2.14. RMR puanına göre kaya sınıfları (Bieniawski,1989)

| <b>Sınıf No</b> | <b>I</b>     | <b>II</b> | <b>III</b> | <b>IV</b>  | <b>V</b>       |
|-----------------|--------------|-----------|------------|------------|----------------|
| 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, Çambaşı HES Tünel güzergahında yer alan her bir kazı aynası RMR sistemi ile sınıflandırılarak kaya kütle kaliteleri açısından değerlendirilmiştir. RMR puanı hesaplamalarında güvenli tarafta kalmak amacıyla kazı aynaları için değerlendirilen parametrelerin en düşük değerleri göz önüne alınmış ve kaya kütle tanımlamaları temel RMR puanlarına göre yapılmıştır (Tablo 2.15). Bieniawski'ye (1989) göre 37 noktaya ait temel RMR puanları en düşük 43.0 en yüksek 74.4 olarak belirlenmiştir. Çalışılan tünel temel RMR puanına göre (Tablo 2.14) çoğunlukla orta ve iyi kaya sınıfında yer almıştır.

Kaya kütlelerinin karşılaştırılmasında ve kaya kütle deformasyon modülü parametresinin dolaylı olarak belirlenmesinde temel RMR puanı dikkate alınmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada süreksizlik yönelim düzeltmesi ve diğer düzeltmeler (patlatma, zayıflık düzlemleri düzeltmesi, vb.) dikkate alınmamış olup sadece temel RMR puanı hesaplanmıştır.

Tablo 2.15. Çalışılan birimlerin RMR<sub>89</sub> puanları

| No | Km       | Doğrultu | R <sub>s</sub> | S.Ö. | YSD | RMR <sub>T</sub> | Tanım     |
|----|----------|----------|----------------|------|-----|------------------|-----------|
| 1  | 0+495.10 | K35B     | 13.9           | 45.5 | 15  | 74.4             | İyi kaya  |
| 2  | 0+702.00 | K35B     | 12.6           | 45.5 | 15  | 73.1             | İyi kaya  |
| 3  | 0+919.00 | K35B     | 7.0            | 44.5 | 4   | 55.5             | Orta kaya |
| 4  | 1+110.00 | K35B     | 12.0           | 45.6 | 15  | 72.6             | İyi kaya  |
| 5  | 1+325.00 | K35B     | 11.4           | 45.5 | 15  | 71.9             | İyi kaya  |
| 6  | 1+675.00 | K35B     | 9.1            | 40.1 | 15  | 64.2             | İyi kaya  |
| 7  | 1+813.80 | K35B     | 10.4           | 41.1 | 4   | 55.5             | Orta kaya |
| 8  | 2+473.00 | K-G      | 12.3           | 45.7 | 10  | 68.0             | İyi kaya  |
| 9  | 2+677.00 | K-G      | 9.2            | 44.8 | 15  | 69.0             | İyi kaya  |
| 10 | 3+005.00 | K-G      | 10.1           | 45.3 | 15  | 70.4             | İyi kaya  |
| 11 | 3+310.00 | K-G      | 7.4            | 43.1 | 10  | 60.5             | Orta kaya |
| 12 | 3+580.00 | K-G      | 8.1            | 43.8 | 15  | 66.9             | İyi kaya  |
| 13 | 3+743.00 | K-G      | 7.7            | 43.8 | 4   | 55.5             | Orta kaya |
| 14 | 3+901.00 | K-G      | 4.2            | 43.8 | 0   | 48.0             | Orta kaya |
| 15 | 4+090.00 | K-G      | 6.6            | 43.1 | 0   | 49.7             | Orta kaya |
| 16 | 4+300.00 | K-G      | 8.5            | 43.1 | 0   | 51.7             | Orta kaya |
| 17 | 4+427.00 | K-G      | 6.6            | 40.0 | 4   | 50.6             | Orta kaya |
| 18 | 4+572.00 | K-G      | 7.4            | 45.3 | 15  | 67.7             | İyi kaya  |
| 19 | 4+772.00 | K23D     | 7.0            | 43.8 | 4   | 54.8             | Orta kaya |
| 20 | 4+874.00 | K23D     | 6.1            | 43.1 | 15  | 64.2             | İyi kaya  |
| 21 | 4+950.00 | K23D     | 10.5           | 45.1 | 10  | 65.6             | İyi kaya  |
| 22 | 5+052.00 | K23D     | 8.9            | 34.1 | 0   | 43.0             | Orta kaya |
| 23 | 5+235.00 | K23D     | 9.4            | 45.3 | 15  | 69.7             | İyi kaya  |
| 24 | 5+350.00 | K23D     | 8.8            | 43.8 | 4   | 56.6             | Orta kaya |
| 25 | 5+545.30 | K23D     | 7.7            | 39.0 | 15  | 61.7             | İyi kaya  |
| 26 | 5+690.00 | K23D     | 7.8            | 45.3 | 0   | 53.1             | Orta kaya |
| 27 | 5+857.50 | K23D     | 4.9            | 42.0 | 10  | 56.9             | Orta kaya |
| 28 | 6+005.00 | K23D     | 10.7           | 39.8 | 15  | 65.5             | İyi kaya  |
| 29 | 6+171.00 | K6B      | 9.0            | 43.0 | 4   | 56.0             | Orta kaya |
| 30 | 6+300.00 | K25B     | 11.2           | 39.0 | 0   | 50.2             | Orta kaya |
| 31 | 6+400.00 | K25B     | 7.1            | 43.8 | 0   | 50.9             | Orta kaya |
| 32 | 6+403.00 | K25B     | 7.0            | 44.3 | 0   | 51.3             | Orta kaya |
| 33 | 6+560.00 | K25B     | 9.9            | 44.3 | 15  | 69.2             | İyi kaya  |
| 34 | 6+725.00 | K25B     | 11.3           | 44.0 | 4   | 59.3             | Orta kaya |
| 35 | 6+873.00 | K25B     | 8.5            | 43.0 | 0   | 51.5             | Orta kaya |
| 36 | 6+994.00 | K25B     | 10.1           | 43.8 | 15  | 68.9             | İyi kaya  |
| 37 | 7+119.80 | D-B      | 8.8            | 40.0 | 10  | 58.8             | Orta kaya |

Km: Örnekleme noktaları, R<sub>s</sub>: Kaya malzemesi dayanım puanı, S.Ö.: Süreksizlik özellikleri (RQD, süreksizlik ara uzaklığı, devamlılık, açıklık, pürüzlülük, dolgu, bozunma) toplam puanları, YSD: Yeraltı suyu durum puanı, RMR<sub>T</sub>: Temel RMR puanı

## 2.6.2. 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. Destek sisteminin seçimi, en geniş desteksiz açıklığın ve tavan destek basıncının belirlenmesi, kaya saplaması ve ankraj boyutlarının tahmini, desteksiz durma süresinin tahmini ve kaya kütlelerinin deformasyon modülünün tahmini Q sisteminin önemli uygulama alanlarından bazılarıdır (Ulusay ve Sönmez, 2007). Q değeri Barton vd. (1974) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikle belirlenmektedir.

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right) \quad (7)$$

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.

Barton (2002) tarafından sisteme MPa cinsinden kaya malzemesinin UCS parametresi eklenmiş ve  $Q_c$  (normalize Q) olarak Eşitlik 8'de verilen formülle tanımlanmıştır. Q sistemindeki girdi parametreleri Tablo 2.16-2.21'de verilmiştir.

$$Q_c = Q (UCS/100) \quad (8)$$

Tablo 2.16. RQD puanına göre tanımlama (Deere, 1964)

|   | % RQD  | Kaya Kalite Göstergesi Tanımı |
|---|--------|-------------------------------|
| 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.

Tablo 2.17. Süreksizlik takım sayısı -  $J_n$  (Barton vd., 1974)

| Süreksizlik takım sayısı |   | $J_n$   |
|--------------------------|---|---------|
| A                        | Masif, eklem çok az veya hiç yok  | 0.5-1.0 |
| B                        | Bir süreksizlik takımı  | 2       |
| C                        | Bir süreksizlik takımı ve gelişigüzel eklemler  | 3       |
| D                        | İki süreksizlik takımı  | 4       |
| E                        | İki süreksizlik takımı ve gelişigüzel eklemler  | 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 ( $3.0 \times J_n$ ) kullanılır.  
\*Portallar (girişler) için ( $2.0 \times J_n$ ) kullanılır.

Tablo 2.18. Süreksizlik pürüzlülük sayısı -  $J_r$  (Barton vd., 1974)

| Süreksizlik pürüzlülük sayısı  |   | $J_r$ |
|--|---|-------|
| <b>Süreksizlik yüzeyi temasta veya 10 cm'den az makaslama hareketiyle temasta</b>      |   |       |
| <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   |
| <b>Makaslama hareketiyle süreksizlik yüzeylerinin teması sağlanmadığında</b>           |   |       |
| 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   |

**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.

Tablo 2.19. Süreksizlik yüzeyi bozunma sayısı -  $J_a$  (Barton vd., 1974)

| Süreksizlik yüzeyi bozunma sayısı   |  | $J_a$            | $\phi^\circ$ |
|---|--|------------------|--------------|
| <b>a) Süreksizlik yüzeyleri temasta (Mineral dolgu yada kil kaplaması yok)</b>                                      |  |                  |              |
| A   | Sıkıca bağlanmış sert, yumuşamayan, geçirimsiz dolgu (kuvars, epidot vb.)  | 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 sıvımaları, küçük kil fraksiyonu (yumuşak değil)   | 3.0              | 20-25        |
| E   | Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral sıvımaları, örneğin kaolen veya mika. Ayrıca klorit, talk, jips, grafit vs. ve az miktarda şişen killer                | 4.0              | 8-16         |
| <b>b) 10 cm'den az bir kayma hareketiyle süreksizlik yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde (İnce mineral dolgu)</b> |  |                  |              |
| 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         |
| <b>c) Süreksizlik yüzeylerinde kayma durumunda temas yok (İnce mineral dolgu)</b>                                   |  |                  |              |
| 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 2.20. Süreksizlik suyu azaltma faktörü -  $J_w$  (Barton vd., 1974)

| Süreksizlik suyu azaltma faktörü |  | $J_w$    | Yaklaşık su basıncı (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------|--|----------|--|
| 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  $J_w$  artırılır.  
\*Buz oluşumundan kaynaklanan özel problemler dikkate alınmamıştır.

Tablo 2.21. Gerilme azaltma faktörü - SRF (Barton ve Grimstad, 1994)

| Gerilme azaltma faktörü   |   | SRF        |
|---|---|------------|
| <b>a) Kazıyı kesen zayıf zonlar, tünel kazılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilirler</b>   |   |            |
| 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:</i> *Kayma zonları yalnızca kazıyı etkiliyor, ancak kesmiyorsa, SRF için yukarıda verilen değerler %25-50 dolaylarında azaltılmaktadır                      |   |            |
| <b>b) Dayanımlı kaya, kaya gerilmesi sorunları</b>  |   | <b>SRF</b> |
| H   | Düşük gerilme, yüzeye yakın   | 25         |
| I   | Orta derecede gerilme   | 1          |
| J   | Yüksek gerilme, çok sıkı yapı (genellikle duraylı, yan duvar duraylı olmayabilir)                             | 0.5-2      |
| K   | Masif kayada 1 saatlik bir süreden sonra orta derecede dilimlenme   | 5-50       |
| L   | Masif kayada 1 birkaç dakikadan sonra dilimlenme ve kaya patlaması  | 50-200     |
| M   | Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon  | 200-400    |
| <i>Not:</i> *Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarla ilgili birkaç vaka kaydı mevcuttur. Bu tip durumlarda SRF'nin 2,5'den 5'e çıkarılması önerilir. |   |            |

Yukarıda verilen ölçütlere göre Q değerleri bilinen kaya kütlelerinin kalitesi Tablo 2.22'ye göre tanımlanmaktadır. Örnek noktalarına göre Q sınıflamasında kullanılan puanlamalar, Q ve Q<sub>c</sub> değerleri Tablo 2.23'de verilmiştir.

Tablo 2.22. Q değerine göre kaya sınıflaması (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, Çambaşı HES Tünel güzergahındaki kazı aynaları Q sistemi ile sınıflandırılarak kaya kütle kaliteleri açısından değerlendirilmiştir. Q değeri hesaplamalarında güvenli tarafta kalmak amacıyla kazı aynaları için değerlendirilen parametrelerin en düşük değerleri göz önüne alınmıştır. Yapılan hesaplamalarda kazı aynalarına ait Q ve Q<sub>c</sub> değerleri belirlenmiş olup, kaya kütle tanımlamaları ise Q

değerlerine göre yapılmıştır. Kazı aynalarındaki kaya kütlelerine ait Q puanı en düşük 1.75 en yüksek 14.93 olarak elde edilmiştir.  $Q_c$  değerleri ise en düşük 1.58 en yüksek 29.08 olarak bulunmuştur.  $Q_c$  değerlerinin UCS ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. UCS parametresinin Q sistemi üzerindeki etkisi “Bulgular ve İrdeleme” bölümünde tartışılacaktır. Q sistemine göre (Tablo 2.22) 37 noktadan büyük çoğunluğu “sağlam” ve “orta” kaya sınıfına dahil olmuştur (Tablo 2.23).

Tablo 2.23. Çalışma sahasındaki birimlerin Q ve  $Q_c$  puanları

| No | Km       | RQD <sub>Ort</sub> | J <sub>n</sub> | J <sub>r</sub> | J <sub>a</sub> | J <sub>w</sub> | SRF | Q     | Tanımlama | $Q_c$ |
|----|----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|-------|-----------|-------|
| 1  | 0+495.10 | 83                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.76 | Sağlam    | 29.08 |
| 2  | 0+702.00 | 83                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.76 | Sağlam    | 23.32 |
| 3  | 0+919.00 | 83                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.76 | Sağlam    | 9.74  |
| 4  | 1+110.00 | 84                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.93 | Sağlam    | 21.80 |
| 5  | 1+325.00 | 83                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.76 | Sağlam    | 19.63 |
| 6  | 1+675.00 | 76                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.60  | Orta      | 7.22  |
| 7  | 1+813.80 | 76                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.60  | Orta      | 8.74  |
| 8  | 2+473.00 | 84                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.93 | Sağlam    | 22.75 |
| 9  | 2+677.00 | 79                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.04 | Sağlam    | 13.48 |
| 10 | 3+005.00 | 83                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.76 | Sağlam    | 16.38 |
| 11 | 3+310.00 | 76                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.6   | Orta      | 5.40  |
| 12 | 3+580.00 | 79                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.53 | Sağlam    | 8.53  |
| 13 | 3+743.00 | 79                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.53 | Sağlam    | 7.90  |
| 14 | 3+901.00 | 79                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.53 | Sağlam    | 3.58  |
| 15 | 4+090.00 | 76                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.60  | Orta      | 4.64  |
| 16 | 4+300.00 | 76                 | 12             | 1.5            | 1              | 1              | 2.5 | 7.60  | Orta      | 6.61  |
| 17 | 4+427.00 | 70                 | 12             | 3              | 2              | 1              | 2.5 | 3.5   | Zayıf     | 2.14  |
| 18 | 4+572.00 | 83                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.76 | Sağlam    | 10.63 |
| 19 | 4+772.00 | 79                 | 27             | 4              | 1              | 1              | 2.5 | 4.68  | Orta      | 3.07  |
| 20 | 4+874.00 | 76                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.60  | Orta      | 4.26  |
| 21 | 4+950.00 | 81                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.80 | Sağlam    | 12.64 |
| 22 | 5+052.00 | 67                 | 12             | 3              | 3              | 1              | 2.5 | 2.23  | Zayıf     | 2.05  |
| 23 | 5+235.00 | 83                 | 9              | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 14.76 | Sağlam    | 14.76 |
| 24 | 5+350.00 | 79                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.53 | Sağlam    | 9.58  |
| 25 | 5+545.30 | 76                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.13 | Sağlam    | 7.60  |
| 26 | 5+690.00 | 83                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 11.06 | Sağlam    | 8.52  |
| 27 | 5+857.50 | 70                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.00  | Orta      | 2.87  |
| 28 | 6+005.00 | 79                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.53 | Sağlam    | 12.64 |
| 29 | 6+171.00 | 76                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.13 | Sağlam    | 9.52  |
| 30 | 6+300.00 | 76                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.60  | Orta      | 9.50  |
| 31 | 6+400.00 | 79                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 10.53 | Sağlam    | 7.16  |
| 32 | 6+403.00 | 83                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 11.07 | Sağlam    | 7.31  |
| 33 | 6+560.00 | 83                 | 9              | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 11.07 | Sağlam    | 11.84 |
| 34 | 6+725.00 | 76                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.60  | Orta      | 10.03 |
| 35 | 6+873.00 | 76                 | 12             | 3              | 1              | 1              | 2.5 | 7.60  | Orta      | 6.61  |
| 36 | 6+994.00 | 79                 | 12             | 3              | 0.75           | 1              | 2.5 | 10.53 | Sağlam    | 11.58 |
| 37 | 7+119.80 | 70                 | 24             | 3              | 1              | 1              | 5   | 1.75  | Zayıf     | 1.58  |

Km: Örnek noktası, RQD<sub>Ort</sub>: Düşey ve yatay yönde ölçülen RQD değerlerinin ortalaması, J<sub>n</sub>: Süreksizlik takımı sayısı, J<sub>r</sub>: Süreksizlik pürüzlülük değeri, J<sub>a</sub>: Süreksizlik yüzeyi bozunma değeri, J<sub>w</sub>: Süreksizlik suyu azaltma faktörü, SRF: Gerilme azaltma faktörü, Q: Kaya kütle kalitesi ve  $Q_c$ : Normalize Q

### 2.6.3. R<sub>Mi</sub> (Kaya Kütle İndeksi) Sınıflama Sistemi

İlk defa Palmström (1995) tarafından önerilen R<sub>Mi</sub> sistemi, eklemli 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. Eklemli kaya kütlelerinde R<sub>Mi</sub>, aşağıdaki eşitlikler yardımı ile belirlenmektedir.

$$R_{Mi} = UCS * JP \quad (9)$$

$$JP = 0.2\sqrt{jC}(Vb)^{Db} \quad (10)$$

$$jC = jL \frac{jR}{jA} \quad (11)$$

$$Db = 0.37 jC^{-0.2} \quad (12)$$

$$Vb = \beta J_v^{-3} \quad (13)$$

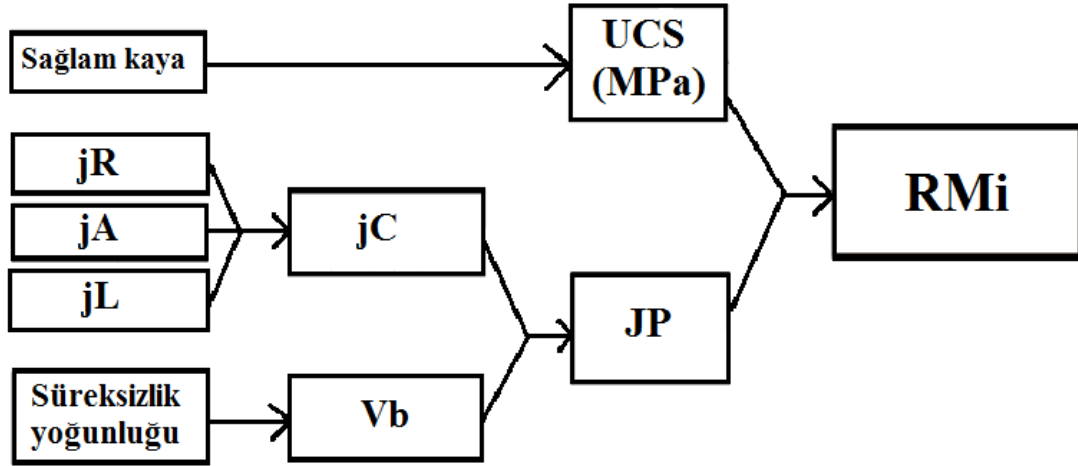
$$\beta = 20 + 7(S1/S3) \quad (14)$$

Burada; UCS: kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), JP: eklem/süreksizlik parametresi, jC: süreksizlik faktörü, jL: süreksizlik uzunluk faktörü, jR: süreksizlik pürüzlülük faktörü, jA: süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü, Vb: blok hacmi (m<sup>3</sup>), J<sub>v</sub>: hacimsel eklem sayısı (eklem/m<sup>3</sup>), Db: blok çapı (m), β: blok şekli faktörü, S1: en büyük süreksizlik ara uzaklığı (cm) ve S3: en küçük süreksizlik ara uzaklığıdır (cm).

Şekil 2.18'den de görüldüğü gibi R<sub>Mi</sub> sistemine etki eden en önemli parametrelerden biri kaya malzemesine ait UCS değeridir. Bu parametrenin sistem üzerindeki etkisi



“Bulgular ve İrdeleme” bölümünde tartışılmıştır. R<sub>Mi</sub> kaya kütle sınıflama sistemindeki süreksizlik faktörünün (j<sub>C</sub>) belirlenmesinde kullanılan j<sub>R</sub> değeri Tablo 2.24’den, j<sub>L</sub> değeri Tablo 2.25’den, j<sub>A</sub> değeri ise Tablo 2.26’dan belirlenmektedir. Kaya kütleleri için belirlenen R<sub>Mi</sub> değerlerinin değerlendirilmesi Tablo 2.27’ye göre yapılmaktadır.



Şekil 2.18. R<sub>Mi</sub> sisteminin girdi parametrelerini gösteren şema

Tablo 2.24. Süreksizlik pürüzlülük faktörü, j<sub>R</sub> (Palmström, 2000)

| Pürüzlülük              | Dalgahlık |           |        |            |                              |
|-------------------------|-----------|-----------|--------|------------|------------------------------|
|                         | 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 j<sub>R</sub>= 1 alınır

Tablo 2.25. Süreksizlik uzunluk faktörü, j<sub>L</sub> (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

Tablo 2.26. Süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü, jA (Palmström, 2000)

| <b>a) Süreksizlik yüzeyleri temasta</b>  |  |   |                                    |
|--|--|---|------------------------------------|
| Süreksizlik yüzeyi özelliği  |  | Tanımlama   | jA                                 |
| Süreksizlik yüzeyi temiz   | Kapalı süreksizlikler                                  | Yumuşamayan, geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot)                    | 0.75                               |
|  | Bozunmamış süreksizlik yüzeyleri                       | 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>b) Süreksizlik yüzeylerinde temas yok yada yer yer dolgulu süreksizlikler</b> |  |   |                                    |
|  |  | 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 2.27. R<sub>Mi</sub> puanına göre tanımlama (Palmström, 2000)

| R <sub>Mi</sub> 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, Çambaşı HES Tünel güzergahındaki kazı aynalarına ait kaya kütleleri için R<sub>Mi</sub> değerleri belirlenmiş ve bu değerlerin sınıflandırmaları yapılmıştır. R<sub>Mi</sub> hesaplamalarında güvenli tarafta kalmak amacıyla kazı aynaları için değerlendirilen parametrelerin en düşük değerleri göz önüne alınmıştır. Palmström'a (2000) göre 37 kazı aynası için hesap edilen R<sub>Mi</sub> değeri "orta" olarak değerlendirilmiştir. Kazı aynaları için hesap edilen R<sub>Mi</sub> değerleri Tablo 2.28'de verilmiştir.

Tablo 2.28. Çalışma sahasındaki birimlerin RMi puanları

| Km       | jR | jA | jL | jC  | Db (m) | $\beta$ | Vb (m <sup>3</sup> ) | JP     | RMi  | Tanım |
|----------|----|----|----|-----|--------|---------|----------------------|--------|------|-------|
| 0+495.10 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 31.38   | 0.0010               | 0.0448 | 8.83 | Orta  |
| 0+702.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 30.11   | 0.0016               | 0.0514 | 8.12 | Orta  |
| 0+919.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0006               | 0.0382 | 2.52 | Orta  |
| 1+110.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 30.5    | 0.0009               | 0.0436 | 6.37 | Orta  |
| 1+325.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 30.5    | 0.0009               | 0.0436 | 5.81 | Orta  |
| 1+675.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 34      | 0.0004               | 0.0350 | 3.32 | Orta  |
| 1+813.80 | 2  | 2  | 2  | 3   | 0.32   | 41      | 0.0011               | 0.0316 | 3.63 | Orta  |
| 2+473.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 30.5    | 0.0024               | 0.0577 | 8.78 | Orta  |
| 2+677.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0005               | 0.0371 | 3.56 | Orta  |
| 3+005.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0006               | 0.0382 | 4.25 | Orta  |
| 3+310.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 34      | 0.0005               | 0.0360 | 2.56 | Orta  |
| 3+580.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0006               | 0.0382 | 3.10 | Orta  |
| 3+743.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 41      | 0.0008               | 0.0421 | 3.16 | Orta  |
| 3+901.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 32      | 0.0006               | 0.0422 | 1.43 | Orta  |
| 4+090.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0006               | 0.0382 | 2.33 | Orta  |
| 4+300.00 | 2  | 4  | 2  | 1   | 0.45   | 41      | 0.0008               | 0.0145 | 1.26 | Orta  |
| 4+427.00 | 3  | 4  | 2  | 1.5 | 0.34   | 41      | 0.0007               | 0.0204 | 1.24 | Orta  |
| 4+572.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 30.5    | 0.0009               | 0.0436 | 3.14 | Orta  |
| 4+772.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 34      | 0.0033               | 0.0637 | 4.17 | Orta  |
| 4+874.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 33.1    | 0.0017               | 0.0522 | 2.92 | Orta  |
| 4+950.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 40      | 0.0014               | 0.0494 | 5.79 | Orta  |
| 5+052.00 | 2  | 4  | 2  | 1   | 0.37   | 34      | 0.0005               | 0.0119 | 1.09 | Orta  |
| 5+235.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 33.1    | 0.0013               | 0.0485 | 4.85 | Orta  |
| 5+350.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 32      | 0.0009               | 0.0435 | 3.95 | Orta  |
| 5+545.30 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0004               | 0.0340 | 2.55 | Orta  |
| 5+690.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 32      | 0.0009               | 0.0435 | 3.35 | Orta  |
| 5+857.50 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0005               | 0.0371 | 1.52 | Orta  |
| 6+005.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0006               | 0.0382 | 4.59 | Orta  |
| 6+171.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0005               | 0.0357 | 3.36 | Orta  |
| 6+300.00 | 2  | 4  | 2  | 1   | 0.37   | 32      | 0.0007               | 0.0139 | 1.74 | Orta  |
| 6+400.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 32      | 0.0007               | 0.0407 | 2.77 | Orta  |
| 6+403.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 32      | 0.0007               | 0.0407 | 2.69 | Orta  |
| 6+560.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 36.8    | 0.0005               | 0.0357 | 3.82 | Orta  |
| 6+725.00 | 3  | 4  | 2  | 1.5 | 0.34   | 41      | 0.0008               | 0.0218 | 2.88 | Orta  |
| 6+873.00 | 3  | 4  | 2  | 1.5 | 0.34   | 41      | 0.0007               | 0.0204 | 1.77 | Orta  |
| 6+994.00 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 30.5    | 0.0016               | 0.0513 | 5.64 | Orta  |
| 7+119.80 | 3  | 2  | 2  | 3   | 0.30   | 41      | 0.0008               | 0.0421 | 3.79 | Orta  |

Km: Örnek noktası, jR: Süreksizlik pürüzlülük faktörü, jA: Süreksizlik yüzeyi bozunma faktörü, jL: Süreksizlik uzunluk faktörü, jC: Süreksizlik faktörü, Db: Blok çapı (m),  $\beta$ : Blok şekli faktörü, Vb: Blok hacmi (m<sup>3</sup>), JP: Süreksizlik parametresi

## 2.7. Kaya Kütlelerinin Deformasyon Modülünün Belirlenmesi

Deformabilite uygulanan gerilme ve ortaya çıkan yer değiştirme arasındaki ilişkiyi açıklayan bir katsayı ile karakterize edilir. Süreksizlik içeren kaya kütlelerinde elastisite modülünden ziyade deformasyon modülü ifadesi kullanılır (Onargan vd., 2004). Kaya kütlelerinin deformasyon modülü ( $E_m$ ) parametresi arazide plaka yükleme, dilatometre ve yassı veren gibi oldukça pahalı deneyler ile belirlenmektedir. Arazi deneylerinin hem çok

pahalı olması hem de güvenilir olmaması (Palmström ve Singh, 2001; Aksoy vd., 2012) nedeniyle araştırmacılar elde edilmesi daha ucuz ve kolay olan parametreler yardımıyla  $E_m$  parametresini tahmin etmektedirler. Clerici (1993) deformasyon modülünün ampirik eşitlikler ile tahmin edilmesi için iki seçenek sunmuştur; a) “eşitlikte kullanılan parametreler düşük maliyetle ve kolay ulaşılabılır olmalı”, b) “eşitliklere literatürde yaygın olarak yer verilmeli” (Kayabaşı vd., 2003). Bu çalışmada kullanılan eşitlikler bu kurallara uymaktadır. Bu çalışmada Tablo 1.6’da verilen eşitliklerden bazıları kullanılarak çalışma sahasındaki kaya kütleleri için  $E_m$  değerleri hesaplanmıştır (Tablo 2.29).

Kayaçların UCS ile  $E_i$  parametreleri arasında pozitif bir ilişki olduğu bilinmektedir (Ocak, 2008). Ayrıca, PLI ile UCS arasında benzer bir ilişki mevcut olup literatürde bu konuda oldukça fazla çalışma bulunmaktadır (Singh vd., 2012; Karaman ve Kesimal, 2012; Karaman vd., 2015a). Dolayısıyla PLI ile  $E_i$  arasında da benzer bir ilişki olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle elde edilmesi diğer deneylere (UCS ve  $E_i$ ) göre çok daha kolay ve ucuz olan PLI parametresinin RQD ile birlikte  $E_m$  tahmininde kullanımı üzerinde bir eşitlik üretilmiştir (Eşitlik 15). Laboratuvar çalışmalarından elde edilen nokta yükü indisi değişim aralığı ile saha çalışmalarında yapılan gözlem ve analizler neticesinde elde edilen RQD aralık değerleri birlikte değerlendirilmiştir. Oluşan grafik eğrisi literatürdeki bazı önemli eşitliklerle kıyaslanarak araştırmacıları (literatürdeki eşitliklerden türetilen  $E_m$  ortalamalarına göre) kısmen güvenli tarafta bırakacak şekilde optimize edilmiştir. Çoklu istatistiksel karşılaştırma (Oneway ANOVA) ile de eğrinin kullanılabilirliği teyit edilmiş ve aşağıdaki eşitlik oluşturulmuştur (Karaman vd., 2014).

$$E_m = \text{PLI} \times 10^{(0.01 \cdot \text{RQD} - 0.25)} \quad (15)$$

Bu eşitlik ile  $E_m$  değerleri çalışma sahasındaki kaya kütleleri için en düşük 6.0 en yüksek 37.8 GPa olarak bulunmuştur (Tablo 2.29). RQD ve PLI’nin en düşük ve en yüksek değerleri dikkate alınarak geliştirilen eşitlik ile bulunan  $E_m$ , literatürle uyumlu çıkmaktadır ( $\approx 0.05$ –90 GPa). En yüksek değer ( $\approx 90$  GPa) RQD’nin %100 ve PLI değerinin ise  $>15$  MPa olduğu durum için geçerlidir. Literatürdeki RQD ve PLI değerlerine bakıldığında, üretilen eşitlik ile genellikle 50 GPa’dan daha düşük değerler elde edilmektedir. RQD’nin 0 olduğu durumda kaya kütlelerinin  $E_m$  içerebildiği bilinmektedir. Üretilen eşitlik ile RQD 0 olduğunda PLI değerine bağlı olarak kaya kütlelerine yönelik  $E_m$  değeri 0 olmamakta ve çok düşük bir değer elde edilmektedir. Benzer durum Zhang ve Einstein (2004) eşitliği için

de söz konusudur. Literatürde UCS değerleri genellikle 0–200 MPa arasında  $E_i$  değerleri ise 0–90 GPa arasında değişmektedir. Kayaçların nokta yükü dayanım indeksi değerleri (PLI) ise genellikle 10 MPa'dan daha düşük, nadiren de bu değer üzerinde olduğu literatürden anlaşılmaktadır (Kahraman, 2001). PLI değerlerinin genellikle 0–15 MPa gibi dar bir aralıkta değişmesi ve şekilsiz örnekler üzerinde de deneyin yapılabilmesi eşitlik geliştirme açısından bir avantaj olarak düşünülmüştür. Ayrıca PLI parametresi sık eklemli ve yüksek kaliteli karot alımının zorlaştığı piroklastik kaya ortamlarda da belirlenebilmektedir.

Tablo 2.29. Ampirik eşitlikler yardımıyla hesaplanan  $E_m$  değerleri

| Örnek kodu | Bu çalışma | Bieniawski (1978) | Aydan vd. (1997) | Read vd. (1999) | Barton (2002) | Zhang ve Einstein (2004) |
|------------|------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|--------------------------|
| 1          | 37.8       | 48.8              | 40.9             | 41.2            | 30.8          | 37.1                     |
| 2          | 32.7       | 46.2              | 38.5             | 39.1            | 28.6          | 31.6                     |
| 3          | 14.4       | 11                | 14.5             | 17.1            | 21.4          | 31.2                     |
| 4          | 30.3       | 45.2              | 37.5             | 38.3            | 27.9          | 26.3                     |
| 5          | 27.0       | 43.8              | 36.3             | 37.2            | 27.0          | 15.1                     |
| 6          | 17.2       | 28.4              | 24.3             | 26.5            | 19.3          | 22.8                     |
| 7          | 20.9       | 11                | 14.5             | 17.1            | 20.6          | 23.9                     |
| 8          | 31.5       | 36                | 29.8             | 31.4            | 28.3          | 42.1                     |
| 9          | 21.3       | 38                | 31.4             | 32.9            | 23.8          | 24.1                     |
| 10         | 33.3       | 40.8              | 33.7             | 34.9            | 25.4          | 25.4                     |
| 11         | 15.9       | 21                | 19.7             | 22.1            | 17.5          | 10.0                     |
| 12         | 17.2       | 33.8              | 28.1             | 29.9            | 20.4          | 9.4                      |
| 13         | 18.6       | 11                | 14.5             | 17.1            | 19.9          | 5.6                      |
| 14         | 9.6        | 8.9*              | 8.7              | 11.1            | 15.3          | 4.2                      |
| 15         | 12.2       | 9.8*              | 9.8              | 12.3            | 16.7          | 6.4                      |
| 16         | 13.4       | 3.4               | 11.3             | 13.8            | 18.8          | 16.3                     |
| 17         | 9.6        | 1.2               | 10.5             | 13.0            | 12.9          | 4.9                      |
| 18         | 14.7       | 35.4              | 29.3             | 31.0            | 22.0          | 8.6                      |
| 19         | 12.5       | 9.6               | 13.9             | 16.5            | 14.5          | 16.4                     |
| 20         | 11.1       | 28.4              | 24.3             | 26.5            | 16.2          | 6.2                      |
| 21         | 20.2       | 31.2              | 26.2             | 28.2            | 23.3          | 31.0                     |
| 22         | 13.7       | 6.7*              | 5.9              | 8.0             | 12.7          | 7.0                      |
| 23         | 25.4       | 39.4              | 32.5             | 33.9            | 24.5          | 30.8                     |
| 24         | 19.4       | 13.2              | 15.6             | 18.1            | 21.2          | 19.8                     |
| 25         | 16.8       | 23.4              | 21.1             | 23.5            | 19.7          | 19.9                     |
| 26         | 18.7       | 6.2               | 12.4             | 15.0            | 20.4          | 7.3                      |
| 27         | 6.0        | 13.8              | 15.8             | 18.4            | 14.2          | 3.8                      |
| 28         | 19.7       | 31                | 26.1             | 28.1            | 23.3          | 9.6                      |
| 29         | 19.8       | 12                | 15.0             | 17.6            | 21.2          | 13.1                     |
| 30         | 21.3       | 0.4               | 10.2             | 12.7            | 21.2          | 23.6                     |
| 31         | 11.5       | 1.8               | 10.7             | 13.2            | 19.3          | 6.7                      |
| 32         | 12.5       | 2.6               | 11.0             | 13.5            | 19.4          | 7.3                      |
| 33         | 24.4       | 38.4              | 31.7             | 33.1            | 22.8          | 25.2                     |
| 34         | 21.9       | 18.6              | 18.3             | 20.9            | 21.6          | 11.6                     |
| 35         | 13.7       | 3                 | 11.1             | 13.7            | 18.8          | 6.7                      |
| 36         | 17.4       | 37.8              | 31.2             | 32.7            | 22.6          | 23.0                     |
| 37         | 12.0       | 17.6              | 17.8             | 20.3            | 11.6          | 9.1                      |

\*: Serafim ve Pereira (1983)

Tablo 2.29 incelendiğinde  $E_m$  değerleri; Bieniawski (1978) eşitliği için en düşük 0.4 en yüksek 48.8 GPa, Aydan vd. (1997) eşitliği için en düşük 5.9 en yüksek 40.9 GPa, Read vd. (1999) eşitliği için en düşük 8 en yüksek 41.2 GPa, Barton (2002) eşitliği için en düşük 11.6 en yüksek 30.8 GPa ve Zhang ve Einstein (2004) eşitliği için en düşük 3.8 en yüksek 42.1 GPa olarak bulunmuştur. Bieniawski (1978) eşitliği RMR değerinin  $> 50$  olduğu durumda geçerli iken, Serafim ve Pereira (1983) eşitliği ise RMR değerinin  $\leq 50$  olduğu durumda geçerli olmaktadır. Bu çalışma kapsamında tünel güzergâhındaki 37 farklı kazı aynasından üçüne (14, 15 ve 22) ait RMR değerleri 50'nin altında olmuştur. Verilerde bir bütünlük sağlamak için Bieniawski (1978) ve Serafim ve Pereira (1983) eşitlikleri birlikte kullanılmıştır.

## 2.8. Kullanılan İstatistik Yöntemler

Bu çalışmada regresyon, korelasyon ve tek yönlü varyans (ANOVA) analizleri SPSS v.17.0 paket programı ile yapılmıştır. Ayrıca ölçülen ve tahmini veriler için % tahmin hatası, % VAF (Variance Account For), RMSE (Karekök Ortalama Hata Payı, Root Mean Square Error) ve % MAPE (ortalama mutlak hata yüzdesi, mean absolute percentage error) indisleri belirlenmiştir. Söz konusu analizler tüm değişkenler için geçerli olmayıp, sadece gerekli görülen istatistik yöntemler uygulanmıştır.

Regresyon analizi bir bağımlı değişken (y) ile bir bağımsız (x) değişken arasındaki ilişkilerin bir matematiksel eşitlik ile açıklanması sürecidir (Kalaycı, 2009; Özdamar, 2011). Regresyon analizinde parametre tahmini en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılmış ve bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi en iyi temsil eden yöntem (lineer, üs, üstel vb.) belirlenmiştir. Regresyon denklemi kullanılarak, verilen bir x değeri için y'nin tahmini değeri bulunabilmektedir. Daha iyi tahminlerde bulunmak için yapılması gereken, her yeni veri bulunduğunda regresyon modelinin yeni baştan oluşturulmasıdır (Kalaycı, 2009). Örnek sayısı arttıkça elde edilen tahmin denkleminin hitap ettiği kesim de o derece artacaktır. Regresyon analizinde ilişkinin derecesini gösteren katsayı r şeklinde ifade edilmiştir. Analizlerde y bağımlı değişkenlerin normal dağılım gösterip göstermediğine bakılmıştır. Normal dağılım gösteren x ve y değişkenler arasındaki ikili ilişki düzeyini, yönünü ve ilişkinin önemini belirleyen yönteme korelasyon analizi denilmektedir. Diğer bir ifadeyle korelasyon analizi, bir değişkenin iki veya daha fazla çok değişken ile olan ilişkisini test etmek, varsa bu ilişkinin derecesini ölçmek için kullanılan

istatistiksel yöntemdir (Tüysüz ve Yaylalı–Abanuz, 2005; Kalaycı, 2009; Özdamar, 2011). Korelasyon analizinde amaç; bağımsız değişken (x) değiştiğinde, bağımlı değişkenin (y) ne yönde değişeceğini görmektir. Değişkenlerin normal dağılım gösterdiği veya normale yakın olduğu durumda Pearson korelasyon katsayısı kullanılmaktadır. İki değişken arasındaki Pearson korelasyon katsayısının yorumu Tablo 2.30’da verilmiştir. Regresyon ve korelasyon analizlerinde değişkenler arasında ilişkinin % 95 güven aralığına göre anlamlı olabilmesi için anlamlılık seviyesi (Sig.) <0.05 değerinin altında olması gerekmektedir (Özdamar, 2011).

Tablo 2.30. Pearson korelasyon katsayısına göre değişkenler (Özdamar, 2009)

| r           | İlişki     |
|-------------|------------|
| 0.00 – 0.25 | Çok zayıf  |
| 0.26 – 0.49 | Zayıf      |
| 0.50 – 0.69 | Orta       |
| 0.70 – 0.89 | Yüksek     |
| 0.90 – 1.00 | Çok yüksek |

Varyans analizi (ANOVA, Analysis of variances), iki veya daha fazla verilerin grup ortalamalarının veya işlem ortalamalarının farklılığını test etmek için yararlanılan bir yöntemdir (Kalaycı, 2009). Bu çalışmada ANOVA çeşitlerinden tek yönlü varyans analizi (Oneway ANOVA) kullanılmıştır. Tek yönlü varyans analizi grup verilerinin normal dağılımı koşulunu öne sürdüğünden önce normallik testleri (normality tests) ile verilerin normal dağılıma uygunluğu test edilir. Ayrıca tek yönlü varyans örneğinin sonuçlarını incelemeden önce varsayımların test edilmesi gerekir. Çalışmalarda genellikle varyansların homojenliği testine bakılır. Grupların homojen olması için anlamlılık seviyesi (P) > 0.05 olması gerekmektedir. Grup verileri homojen olduğunda Dunnett 2 yönlü ve Tukey HSD ANOVA analizleri gibi kullanılabilecek yöntemler bulunmaktadır. Gruplar homojen olmadığında ise (P < 0.05) homojen olmayan varyans analizleri (Tamhane’s T2, Dunnett’s T3, Games-Howell) yapılmaktadır. Daha sonra homojenlik durumuna göre bir yöntem seçilerek analiz yapılır ve ilk olarak ANOVA tablosundaki P değerine bakılır. Eğer bu teste göre P < 0.05 ise “grup ortalamaları birbirinden önemli düzeyde farklıdır” veya “grup ortalamalarından en az biri diğerlerinden farklıdır” yorumları yapılmaktadır (Dunnett ve Tamhane, 1992; Özdamar, 2011). P>0.05 ise gruplar birbirinin aynıdır veya grup ortalamaları birbirinden farklı değildir anlamı çıkmaktadır. Test burada bitirilebilir veya

hangi yöntemin seçilen kontrol grubuyla hangi düzeyde örtüştüğüne ilişkin P değerleri dikkate alınarak yorumlar yapılabilir. Regresyon ve korelasyon analizlerinden farklı olarak, ANOVA analizlerinde verilerin normal dağılım göstermesi, homojen olması ve grupların benzer olması koşulu için % 95 güven aralığında  $P > 0.05$  olması gerekmektedir.

Ayrıca bu çalışma kapsamında tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere ne derece yakın olduğunu belirlemek için % tahmin hatası analizleri yapılmıştır (Eşitlik 16). Literatürde bu analizi kullanan araştırmacılar bulunmaktadır (Gökçeoğlu vd., 2003; Karaman ve Kesimal, 2015b). Bu tez kapsamında ayrıca, bağımlı değişkeni tahmin etmede kullanılan yöntemlerin performansını değerlendirmek için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında % VAF, RMSE ve % MAPE analizleri yapılmıştır (Eşitlik 17–19). Eğer VAF % 100, RMSE ve % MAPE 0 ise, model mükemmel olarak tanımlanmaktadır (Gökçeoğlu, 2002; Yılmaz ve Yüksek, 2008; Vardhan ve Bayar, 2014). RMSE ve % MAPE her zaman pozitif değer almakla birlikte ideal değeri sıfıra yakın olmalıdır. Tablo 2.31’de MAPE değerlerine göre tahmin yer almaktadır.

$$\text{Tahmin hatası (\%)} = ((y - y')/y) \times 100 \quad (16)$$

$$\% \text{ VAF} = \left[ 1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)} \right] 100 \quad (17)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad (18)$$

$$\text{MAPE} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y - y'}{y} \right| \right] 100 \quad (19)$$

Burada  $y$  ve  $y'$  ölçülen ve tahmin edilen değerler,  $N$  ise veri sayısıdır.

Tablo 2.31. MAPE değerlerinin sınıflaması (Lewis, 1982)

| % MAPE                           | Değerlendirme           |
|----------------------------------|-------------------------|
| $\text{MAPE} \leq \% 10$         | Çok iyi tahmin          |
| $\% 10 < \text{MAPE} \leq \% 20$ | İyi tahmin              |
| $\% 20 < \text{MAPE} \leq \% 50$ | Kabul edilebilir tahmin |
| $\text{MAPE} > \% 50$            | Yanlış tahmin           |



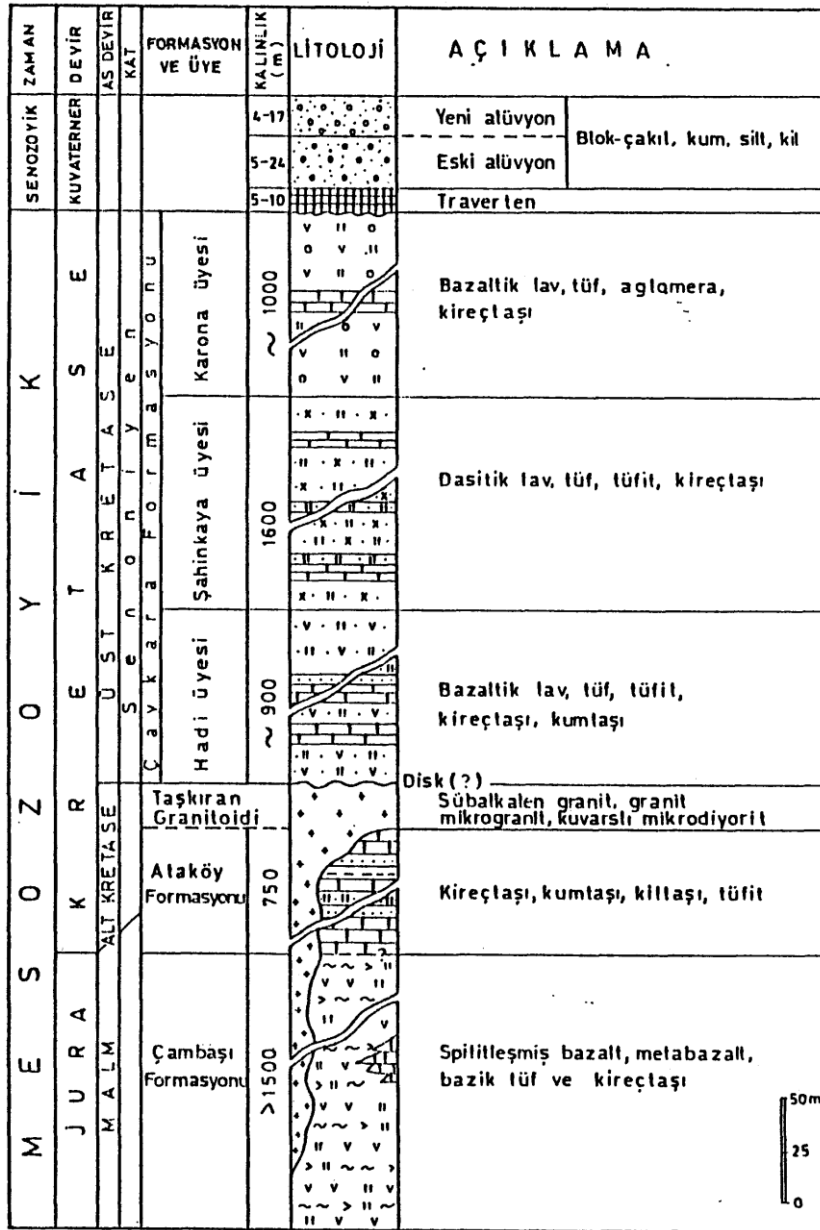
### **3. BULGULAR VE İRDELEME**

#### **3.1. Çalışma Alanı ve Çevresinin Genel Jeolojisi**

Çalışma sahasında litolojik birimler MTA Doğu Karadeniz Bölge Müdürlüğü ve Bulut (1989) tarafından litostratigrafik birimlere ayrılmıştır. MTA tarafından daha genel bir stratigrafik tanımlama yapılmış iken, Bulut (1989) tarafından doğrudan çalışma sahası ve çevresi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu nedenle bu tez kapsamında Bulut (1989) tarafından belirtilen birimlere yer verilmiştir. İnceleme alanı Doğu Pontid Tektonik Ünitesinin kuzey doğusunda yer almaktadır (Ketin, 1966). Çalışma sahasında genel olarak Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı kayalar ile güncel alüvyon ve yamaç molozları gözlenmektedir. Mesozoyik dönemi, Liyas yaşlı volkanitler ile başlar ve Üst Jura–Alt Kretase yaşlı karbonatlar ile devam eder. Üst Kretase dönemi’nde yoğun bir volkanik aktivite görülür. Liyas’ta başlayıp Üst Kretase sonlarına kadar devam eden volkanik faaliyetler denizaltı volkanizması şeklinde olup çökel arakatkılarla birlikte istiflenme gösterirler. Paleosen sonlarında orojenezle birlikte granodiyorit yerleşimi gelişmiştir. Senozoyik döneminde ise eski alüvyon, yeni alüvyon ve yamaç molozları oluşmuştur. Etkinliğini Liyas’tan başlayarak Eosen sonlarına kadar aralıklı olarak sürdüren magmatizma ile volkanik etkinliğin durakladığı veya hızının azaldığı dönemlerde egemen olan tortullaşma sonucunda bölgede volkanik, volkanotortul ve intrüzif kayalar yaygın hale gelmiştir. Gelişen volkanik aktivite, genellikle denizaltı volkanizması şeklinde olduğu için, yastık lavlar sıklıkla gözlenmektedir. Magmatik kayaların egemen olduğu kuzey zonda kaya birimleri en altta Liyas yaşlı metabazalt, bazalt, andezit lav ve piroklastikleri ile killi kireçtaşı, kumtaşı ve marndan oluşan kaya türleri ile başlamaktadır (Bulut, 1989). Bulut (1989) tarafından Şekil 3.1’den de görüldüğü gibi aşağıdaki litostratigrafi birimleri ayırt edilmiştir.

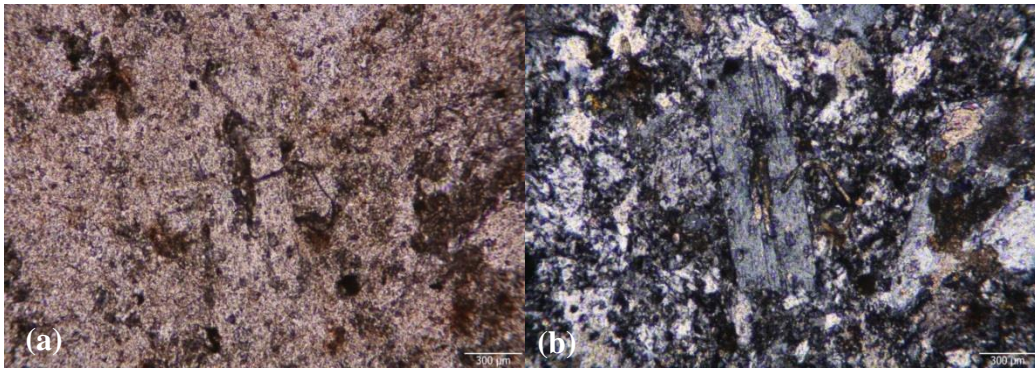
- 1- Çambaşı Formasyonu (Malm–Alt Kretase)
- 2- Ataköy Formasyonu (Alt Kretase)

- 3- Taşkiran Formasyonu (Alt Kretase sonu)
- 4- Çaykara Formasyonu (Üst Kretase)
  - a) Hadi Üyesi
  - b) Şahinkaya Üyesi
  - c) Karona Üyesi
- 5- Lüger Travertenleri (Kuvaterner)
- 6- Alüvyonlar ve Yamaç Döküntüleri (Kuvaterner)

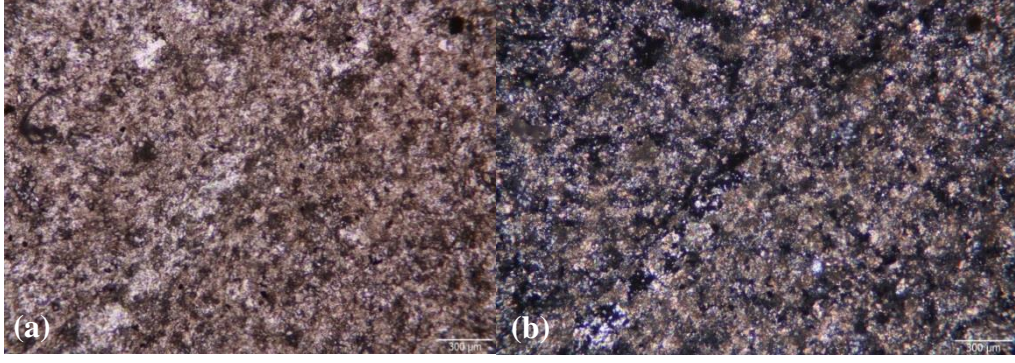


Şekil 3.1. Çalışma sahası ve çevresinin jeolojik dikme kesiti (Bulut, 1989)

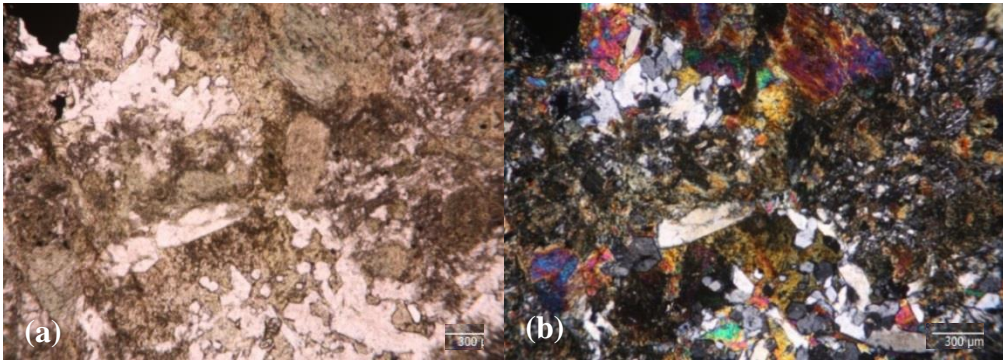
Tünel güzergahı boyunca bazalt, epidotlu metabazalt, dasit, kireçtaşı ve volkanik breş gözlenmiştir. Ayrıca yer yer bazı noktalarda damar şeklinde sınırlı alanlarda gözlenen mikro-diyorit bulunmaktadır. Tünel güzergahındaki kazı aynalarındaki litolojik birimlerden kaya mekaniği deneyleri için alınan temsili örnekler mineralojik analizlerde kullanılmıştır (Şekil 3.2–3.6). Dasit örneklerinde kuvars oranı yaklaşık % 30 ve plajiyoklas ise % 60 civarında iken geriye kalanlar ikincil epidot, hornblend (altere), biyotit (altere), kalsit, epidotlaşmış amfibol ve yaklaşık % 2 oranında pirit gözlenmiştir (Şekil 3.2). Makroskopik olarak gri renkli kireçtaşlarının ince kesit incelemelerinde çoğunlukla kalsit az miktarda plajiyoklas, kalsedon, zeolit, klorit ve çok az epidot eser miktarda opak mineraller gözlenmiştir (Şekil 3.3). Açık yeşilimsi renkte, ince taneli, sert ve yer yer çatlaklı olan metabazaltlarda makroskopik olarak epidot ve pirit mineralleri yoğun olarak gözlenebilmektedir. İnce kesitlerde bol miktarda epidot ve daha az oranda ikincil kuvars mevcuttur. Albitleşmiş plajiyoklas, ikincil klorit, aktinolit ve bol miktarda mikro çatlak gözlenmiştir. Çatlaklarda ayrıca epidot, klorit, kuvars ve pirit olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.4). Bazalt örneklerinde genellikle plajiyoklas, ojit ve olivin daha az miktarda klorit, klinopiroksen ve opak mineraller bulunmakta ayrıca çatlaklarda yer yer silis (kuvars) yerleşiminin olduğu ince kesitlerden anlaşılmaktadır (Şekil 3.5). Tünel içindeki bazı kazı aynalarında dayk şeklinde görülen magmatik sokulumlardan ince kesit analizleri için örnek alınmıştır. Boyutları sınırlı olduğundan kaya blokları alınamamıştır. Yapılan ince kesit analizlerine göre kayaç adı kuvarslı mikro diyorit olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.6). İnce kesitlerde kuvars oranı yaklaşık % 15, opak mineral yaklaşık % 8 ayrıca plajiyoklas, hornblend bol miktarda ikincil serizit, kalsit ve klorit gözlenmiştir.



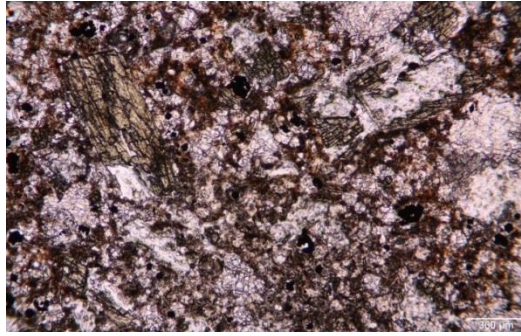
Şekil 3.2. Dasit tek nikol (a) ve çift nikol görünümü (b)



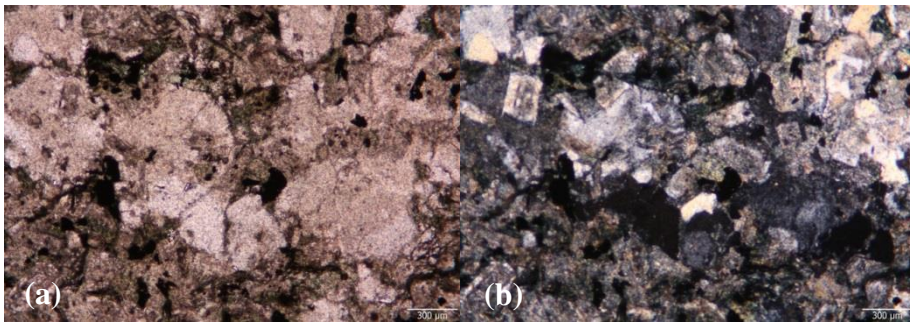
Şekil 3.3. Kireçtaşı tek nikol (a) ve çift nikol görünümü (b)



Şekil 3.4. Metabazalt tek nikol (a) ve çift nikol görünümü (b)



Şekil 3.5. Bazalt örneğinin çift nikol görünümü

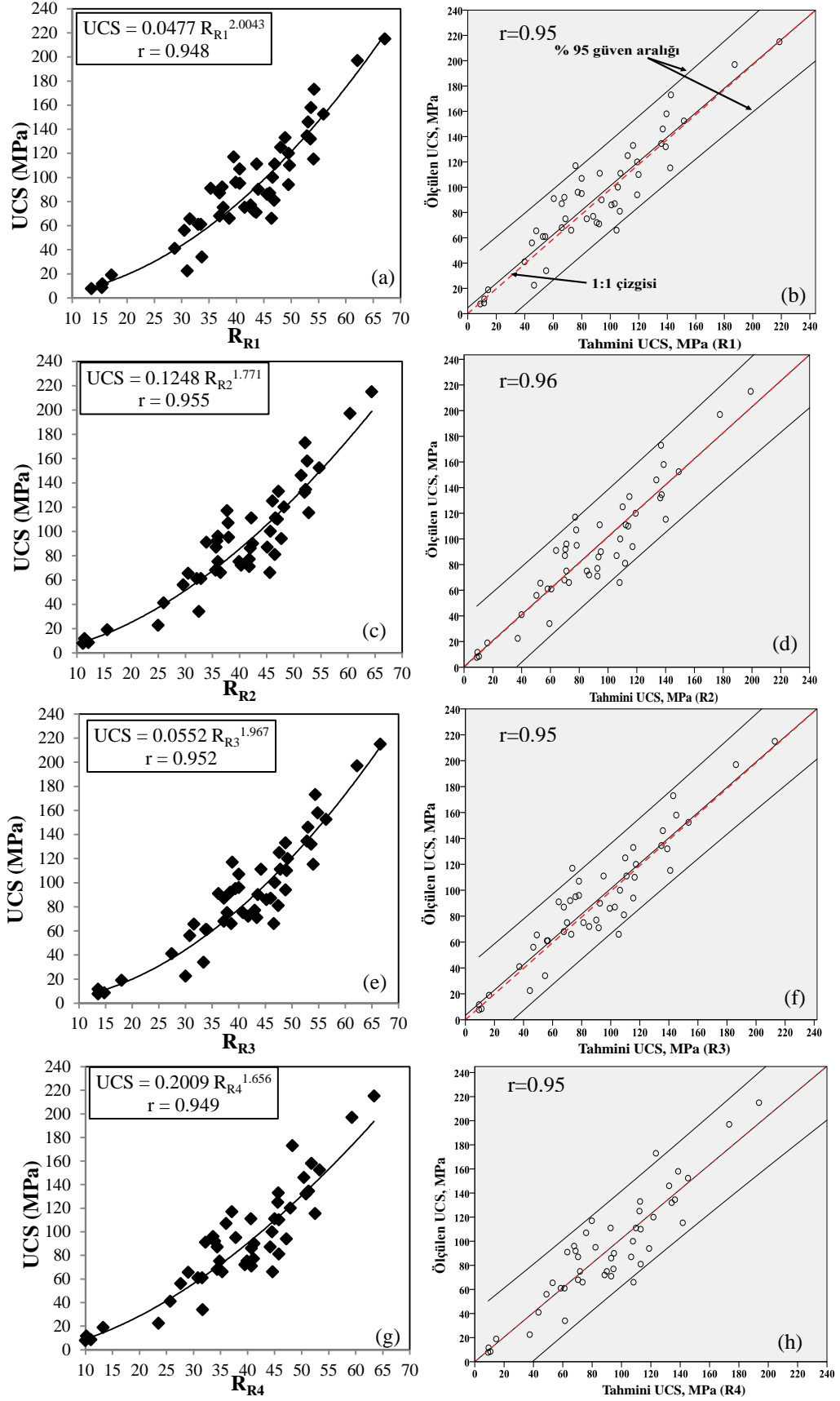


Şekil 3.6. Mikro-diyorit tek nikol (a) ve çift nikol görünümü (b)

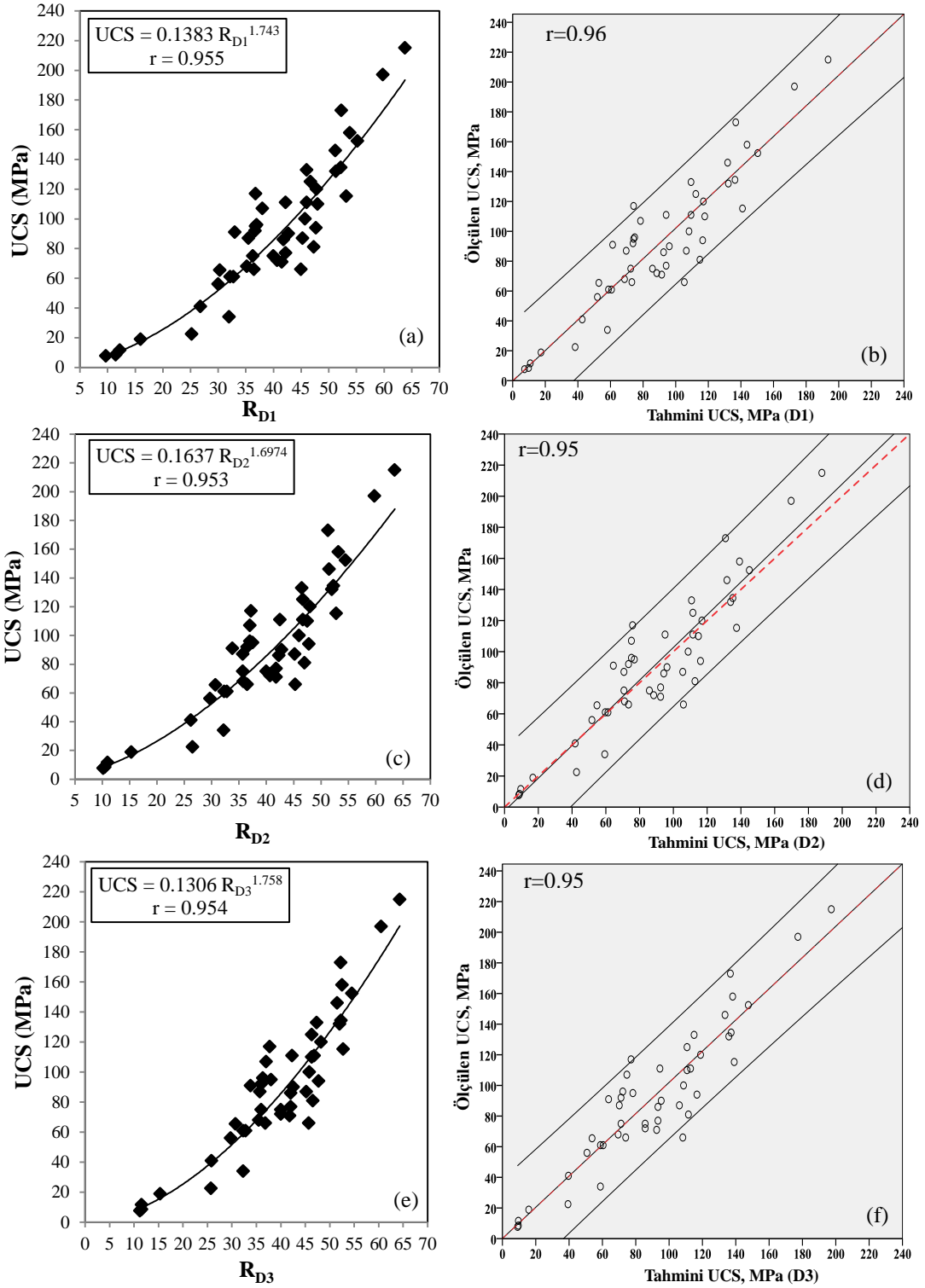
## 3.2. Kaya Malzemesi UCS Parametresinin Dolaylı Yöntemlerle Belirlenmesi

### 3.2.1. Schmidt Çekici Deneyinin UCS Tahmininde Kullanımı

Literatürde araştırmacılar tarafından çeşitli amaçlara yönelik olarak önerilen oldukça fazla Schmidt sertlik belirleme yöntemi bulunmaktadır (Bölüm 1.3.1, Tablo 1.2). Ancak önerilen yöntemlerin Schmidt sertlik değerinin belirlenmesinde fazla okuma gerektirdiği (10–35) görülmüştür. Bu nedenle laboratuvar şartlarında özellikle zayıf örnekler deney esnasında kırılabilmekte, bundan dolayı örnekler deney için yeterli olmamakta ve ilave olarak araziden kaya bloğunun getirilmesi gibi zahmetlere girilebilmektedir (Karaman ve Kesimal, 2015b). Sahadan ilave kaya bloğu alındığında ise, ilk alınan noktanın özelliklerini yansıtmadığından, özellikle tünel gibi süreklilik arz eden çalışmalarda temsili örnek bulmada problemler yaşanmaktadır. Ayrıca problemlili kaya kütlelerinden (sık eklemlili, ince tabakalı, zayıf vb.) laboratuvarda standartlarca önerilen karot boyutu sağlanamamakta veya az sayıda karot örnekleri alınabilmektedir. Bu nedenle Schmidt okuma sayısının azaltılmasına (6–10) yönelik olarak 3 farklı yöntem ( $D_1 - D_3$ ) UCS tahmininde kullanılmak amacıyla önerilmiştir. Önerilen 3 yöntemin sonuçları literatürde sıklıkla kullanılan 4 farklı yöntemle ( $R_1 - R_4$ ) kıyaslanmıştır. Ölçülen UCS ile Schmidt çekici sertlik değerleri (Bölüm 2.4, Tablo 2.2, 2.3) arasındaki regresyon analizleri Şekil 3.7 (a, c, e, g) ve Şekil 3.8 (a, c, e)'de verilmiştir. Regresyon eşitliklerinden elde edilen tahmini UCS ile ölçülen UCS arasındaki ilişkiler de Şekil 3.7 (b, d, f, h) ve Şekil 3.8 (b, d, f)'de gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; bu çalışmada kullanılan yöntemlerin UCS tahmininde güçlü regresyon katsayıları elde edilmiştir ( $r \geq 95$ ). Regresyon ve korelasyon analizleri % 95 güven aralığında anlamlı bulunmuştur ( $P=0.000$ ). Ölçülen ve tahmini UCS değerleri Kolmogorov–Simirnov Z'ye göre normal dağılım (önem düzeyi  $>0.05$ ) göstermiştir. Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin homojen oldukları anlaşılmıştır ( $P = 0.999$ ). P değeri 1'e yaklaştıkça verilerin homojenliği artmaktadır. Benzer durum grupların ortalama değerleri arasında fark olup olmadığının derecesini de göstermektedir. Buna göre, ANOVA analizleri grupların ortalama değerleri arasında fark olmadığını ortaya koymuştur ( $P=1.00$ ). Ölçülen ve tahmini UCS değerleri homojen olduğundan ve ölçülen UCS kontrol grubu olarak değerlendirileceğinden dolayı Dunnett testi çoklu grupların karşılaştırılmasında kullanılmıştır (Şekil 3.9, Tablo 3.1). EK-1'de ANOVA analizi için gerekli olan diğer tablolar (normal dağılım, homojenlik, vb.) verilmiştir.



Şekil 3.7.  $R_{R1}$ – $R_{R4}$  ile UCS arasındaki ilişki (Karaman ve Kesimal, 2015b)



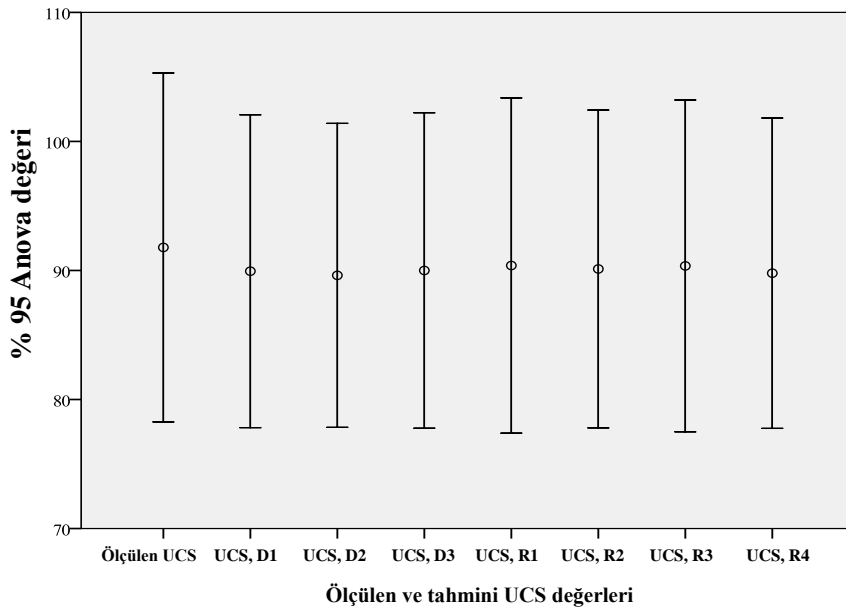
Şekil 3.8. R<sub>D1</sub>–R<sub>D3</sub> ile UCS arasındaki ilişki (Karaman ve Kesimal, 2015b)

Dunnett (2 yönlü) yöntemi birden çok grubun tek bir gruba karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır. Burada ölçülen UCS değeri kontrol grup diğer yöntemlerden elde edilen UCS değerleri ise karşılaştırma grubunu oluşturmuştur. Tablo 3.1'den görüleceği gibi her veri çifti (ölçülen ve tahmini UCS) eşit anlamlılık seviyesi ( $P=1.00$ ), standart hata (8.78) ve çok yakın ortalama farklılıklarına sahiptir. ANOVA (Dunnett), regresyon ve korelasyon analiz bulgularına göre kaya malzemelerinin UCS parametresinin herhangi bir Schmidt sertlik yöntemine ( $(R_{D1}-R_{D3}, R_{R1}-R_{R4})$ ) göre tahmin edilebileceği görülmüştür.

Tablo 3.1. Dunnett testi ile çoklu grupların karşılaştırılması

| Çoklu karşılaştırma                  |                  |                      |               |       |                    |           |
|--------------------------------------|------------------|----------------------|---------------|-------|--------------------|-----------|
| UCS Dunnett t (2-sided) <sup>a</sup> |                  |                      |               |       |                    |           |
| (I)                                  | (J)              | Ortalama farkı (I-J) | Standart hata | P     | % 95 güven aralığı |           |
|                                      |                  |                      |               |       | Alt sınır          | Üst sınır |
| E <sub>UCS</sub> (D <sub>1</sub> )   | M <sub>UCS</sub> | -1.84183             | 8.77595       | 1.000 | -24.8827           | 21.1991   |
| E <sub>UCS</sub> (D <sub>2</sub> )   | M <sub>UCS</sub> | -2.16534             | 8.77595       | 1.000 | -25.2063           | 20.8756   |
| E <sub>UCS</sub> (D <sub>3</sub> )   | M <sub>UCS</sub> | -1.78649             | 8.77595       | 1.000 | -24.8274           | 21.2544   |
| E <sub>UCS</sub> (R <sub>1</sub> )   | M <sub>UCS</sub> | -1.40199             | 8.77595       | 1.000 | -24.4429           | 21.6389   |
| E <sub>UCS</sub> (R <sub>2</sub> )   | M <sub>UCS</sub> | -1.66796             | 8.77595       | 1.000 | -24.7089           | 21.3730   |
| E <sub>UCS</sub> (R <sub>3</sub> )   | M <sub>UCS</sub> | -1.43218             | 8.77595       | 1.000 | -24.4731           | 21.6087   |
| E <sub>UCS</sub> (R <sub>4</sub> )   | M <sub>UCS</sub> | -1.99762             | 8.77595       | 1.000 | -25.0385           | 21.0433   |

a. Dunnett t-test deneysel UCS kontrol grup olup diğer gruplarla kendi verilerini karşılaştırır  
E<sub>UCS</sub>: Tahmini UCS, M<sub>UCS</sub>: Ölçülmüş/deneysel UCS



Şekil 3.9. UCS değerleri arasındaki ANOVA analizi (Karaman ve Kesimal, 2015b)



Korelasyon ve ANOVA analizlerine ilave olarak, ölçülen ve tahmini UCS arasında yüzde hata değerleri araştırılmıştır (Tablo 3.2). Bu bağıl (görelî) hata olup yüzde olarak ifade edilmektedir. Bağıl hata mutlak hatanın (tahmini ve ölçülen değerler arasındaki fark değeri) ölçülen değere bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Yüzde hata değerleri ne kadar küçükse yöntemin ölçülen değerleri tahmini de o derece güçlü olmaktadır.

Tablo 3.2. % 10'dan küçük tahmin hata değerleri (Karaman ve Kesimal, 2015b)

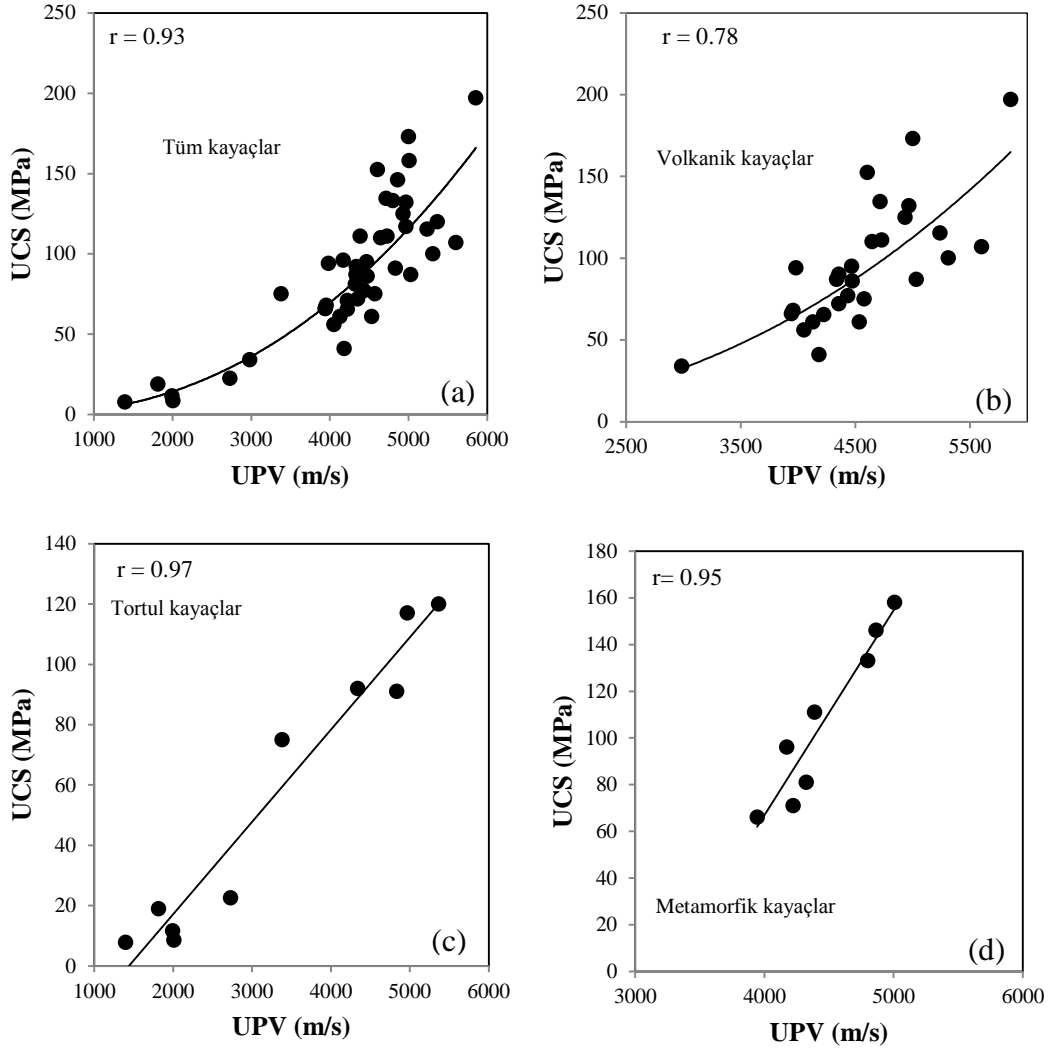
| Yöntemler | Yüzde hata $\leq 10\%$ |                        | $D_1$ ve diğer yöntemler arasındaki farklar (%) |    |
|-----------|------------------------|------------------------|---|----|
|           | Örnek sayısı           | Örneklerin yüzdesi (%) |   |    |
| $D_1$     | 22                     | 47                     |   |    |
| $D_2$     | 18                     | 38                     | $(D_1-D_2)$                                     | 9  |
| $D_3$     | 18                     | 38                     | $(D_1-D_3)$                                     | 9  |
| $R_1$     | 17                     | 36                     | $(D_1-R_1)$                                     | 11 |
| $R_2$     | 19                     | 40                     | $(D_1-R_2)$                                     | 7  |
| $R_3$     | 19                     | 40                     | $(D_1-R_3)$                                     | 7  |
| $R_4$     | 17                     | 36                     | $(D_1-R_4)$                                     | 11 |

Analizlere göre, ölçülen ve tahmini UCS değerleri arasındaki en yüksek yüzde hata değerleri  $R_1$  ve  $R_4$  yöntemlerinde gözlenmiştir.  $D_1$  yönteminde ölçülen ve tahmini UCS değerleri arasındaki yüzde hata değerlerinin diğer yöntemlerden daha az olduğu (% 7 ile % 11 arasında) ortaya çıkmıştır. Bu durumda yüzde hata analiz bulgularına göre  $D_1$  yönteminin diğer yöntemlerden daha güvenilir olduğu anlaşılmıştır.  $D_1$  yönteminin özellikle örnek sayısının yetersiz olduğu ön analizlerde güvenle kullanılabilmesi önerilmiştir.  $R_1$  ve  $R_4$  yöntemlerinin ise diğer yöntemlerden özellikle  $D_1$  yönteminden UCS tahmininde daha az güvenilir oldukları belirlenmiştir. Ancak unutulmamalıdır ki burada elde edilen bulgular ve  $D_1$  yönteminin diğerlerine göre üstünlüğü çalışılan kayaçlar içindir. Veri sayısının artması durumunda sonuç farklı olabileceği düşünülmelidir. Ancak yoğun çatlak içeren ve/veya ince tabakalı kayaç örnekleri üzerinde Schmidt sertliğini belirlemek için uygun sayıda yüksek kaliteli karot örneğinin alınması zor olmaktadır. Bundan dolayı arzu edilen karot boyutunu sağlamak için çalışılan tünelin 4 örnekleme noktasından (sık eklemlî ve piroklastik zonlarda) 2-3 kaya bloğu fazladan laboratuvara getirilmiştir.  $D_1$  yöntemi bu nedenle iş yükünü azaltmak adına da söz konusu kayaçlar için araştırmacılara kolaylık sağlamaktadır. Bununla beraber bilinmelidir ki  $D_1$  yöntemini kullanmadan önce ASTM ve ISRM tarafından önerilen karot hazırlama prosedürlerine önem verilmelidir.

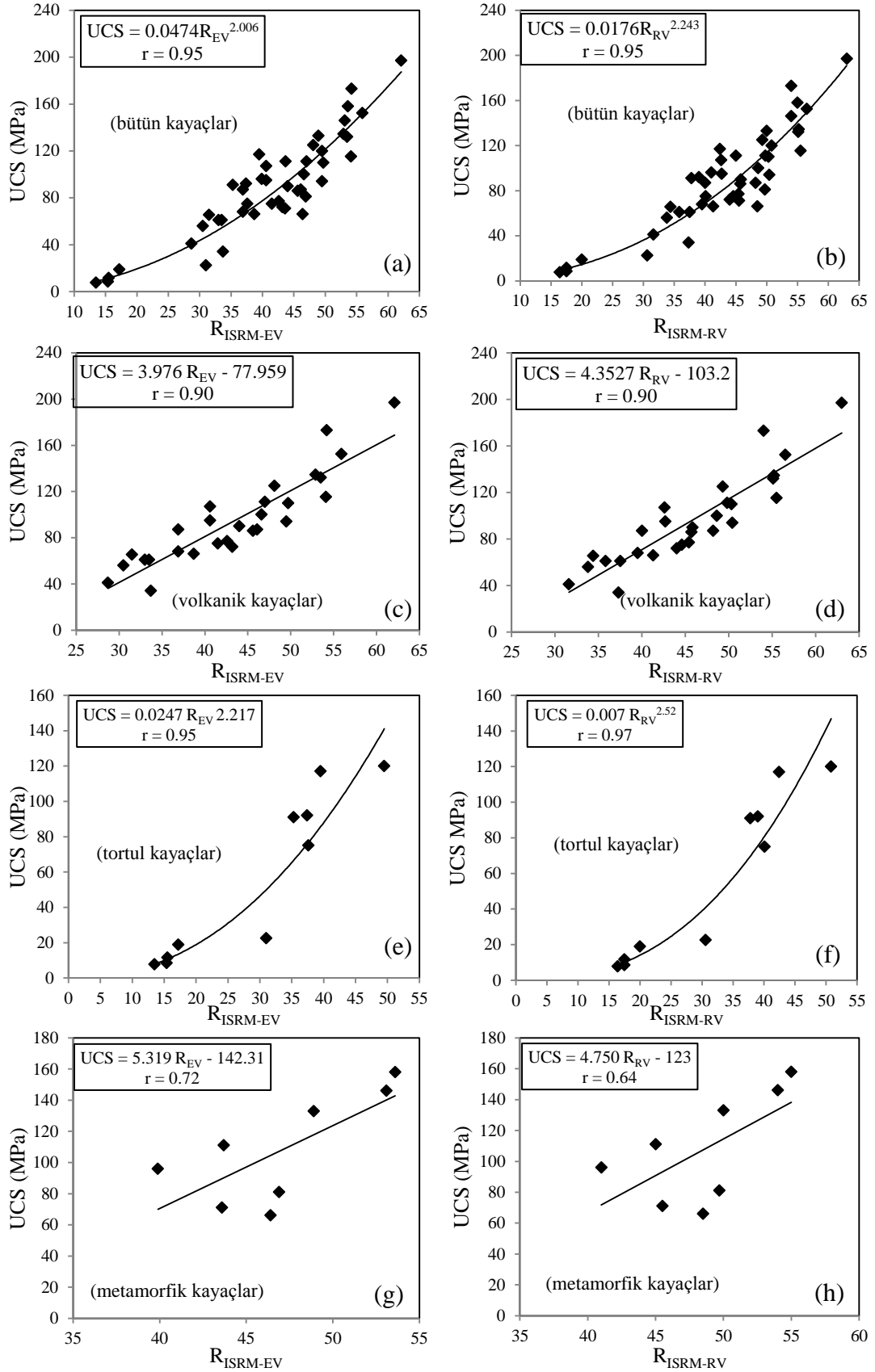
Bilindiği gibi Schmidt sertlik değerlerindeki dalgalanmalar veya tutarsızlıklar, anizotrop ve heterojen özellik göstermeyen kayalarda çoğunlukla deneysel hatadan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, standartlara uymak ve deneylere büyük itina göstermek güvenilirliği artırmaktadır.

### 3.2.2. Schmidt Sertliği ile UPV ve UCS Arasındaki İlişki

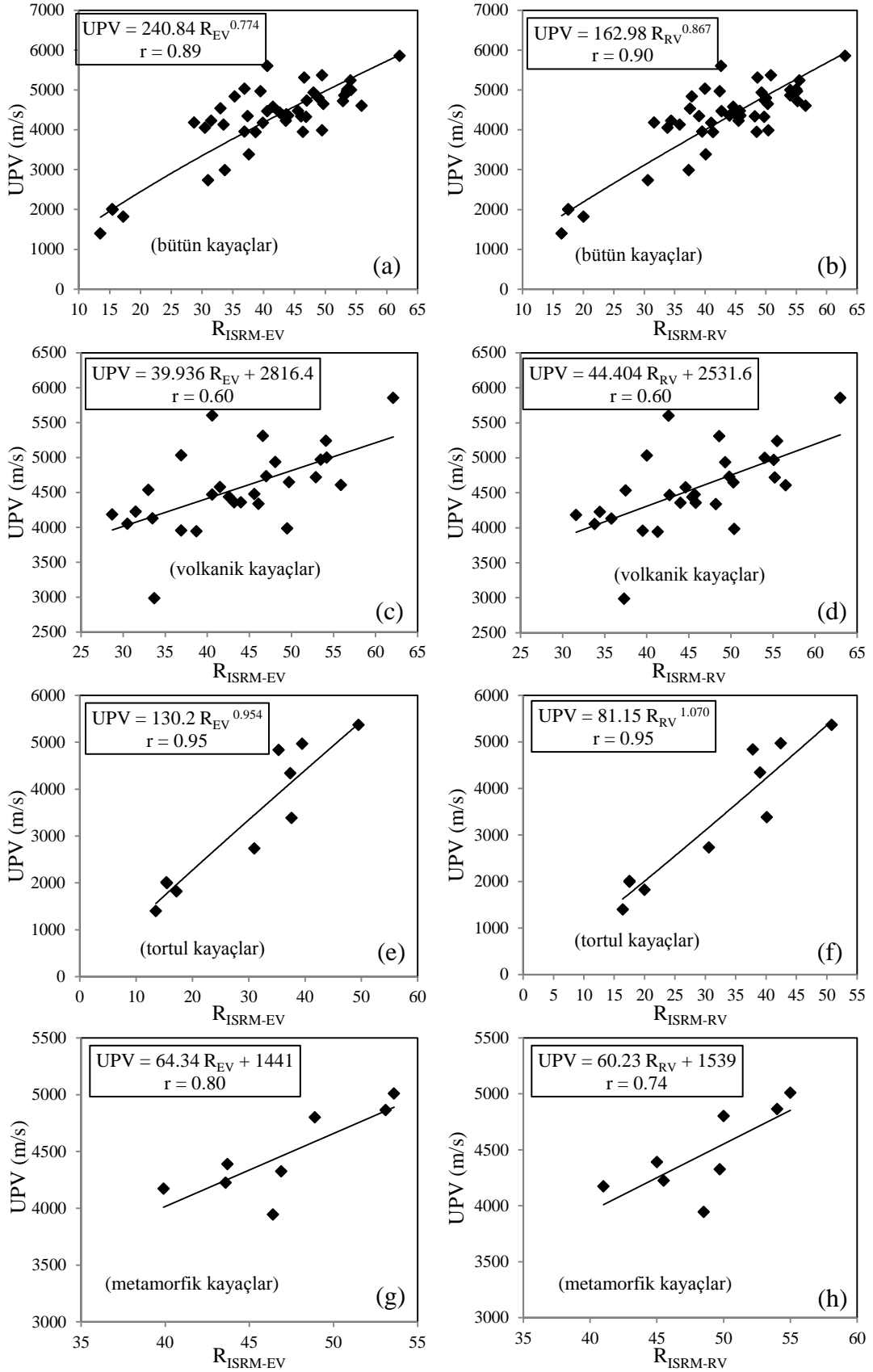
Kaya malzemelerinin sertlik değerlerini belirlemek için ISRM tarafından 1978 yılında (eski yöntem,  $R_{ISRM-EV}$ ) bir yöntem önerilmiştir. ISRM revize versiyon ( $R_{ISRM-RV}$ ) adında bir çalışma aynı amaca yönelik olarak 2009 yılında yayınlanmıştır (ISRM, 2009). Ancak yeni versiyon önerilmesine rağmen bir çok yazarın hala eski yönteme göre Schmidt sertlik değerini belirlediği literatürden görülmektedir (Torabi vd., 2010; Güney, 2011; Şengün vd., 2011; Minaeian ve Ahangari, 2013). Bu nedenle bu bölümde kaya malzemelerinin UCS ve UPV tahmininde kullanmak amacıyla eski ve yeni ISRM yöntemleri kıyaslanmıştır. Yukarıdaki bölümden (Bölüm 3.2.1) ayrı olarak kaya tipine göre korelasyonların nasıl değiştiği volkanik, tortul ve metamorfik kayalar için ayrı ayrı irdelenmiştir. İstatistik olarak % 95 güven aralığı seçilerek SSPS v. 17 paket programı kullanılmıştır. Veriler Kolmogorov–Simirnov Z testine göre (önem düzeyi  $> 0.05$ ) normal dağılım gösterdiğinden parametrik istatistiksel testlere tabi tutulmuştur. İlk olarak UCS ile UPV arasında analizleri yapılmıştır (Şekil 3.10). Yapılan analizlere göre UCS ile UPV arasında % 95 güven aralığında anlamlılık seviyesi 0.000 düzeyinde ( $< 0.05$ ) güvenilir bir ilişki çıkmıştır. Korelasyon katsayıları ise tüm kayalar için  $r=0.93$ , volkanik kayalar için 0.78, tortul kayalar için 0.97 ve metamorfik kayalar için 0.95 olarak bulunmuştur.  $R_{ISRM-EV}$  ve  $R_{ISRM-RV}$  verileri UCS, UPV ve UPV/UCS oranı ile ayrı ayrı analiz edilmiştir (Şekil 3.11-3.13). Şekil 3.11-3.13'ten görüleceği gibi  $R_{ISRM-EV}$  ile metamorfik kayalarda elde edilen korelasyon katsayıları diğer yönteme göre kısmen daha yüksektir (Şekil. 3.11g, 3.11h, 3.12g, 3.12h, 3.13g ve 3.13h).  $R_{ISRM-RV}$  ile tortul kayalarda benzer durum elde edilmiştir (Şekil. 3.11e, 3.11f, 3.13e and 3.13f). Ancak unutulmamalıdır ki, korelasyon katsayılarındaki küçük farklılıklar bir yöntemin diğer yönteme göre daha güvenilir olduğu anlamına gelmemektedir (Karaman ve Kesimal, 2015a).



Şekil 3.10. UCS ve UPV arasındaki ilişki (a–d)



Şekil 3.11.  $R_{ISRM-EV}$  ve  $R_{ISRM-RV}$  ile UCS arasındaki ilişki (a-h)



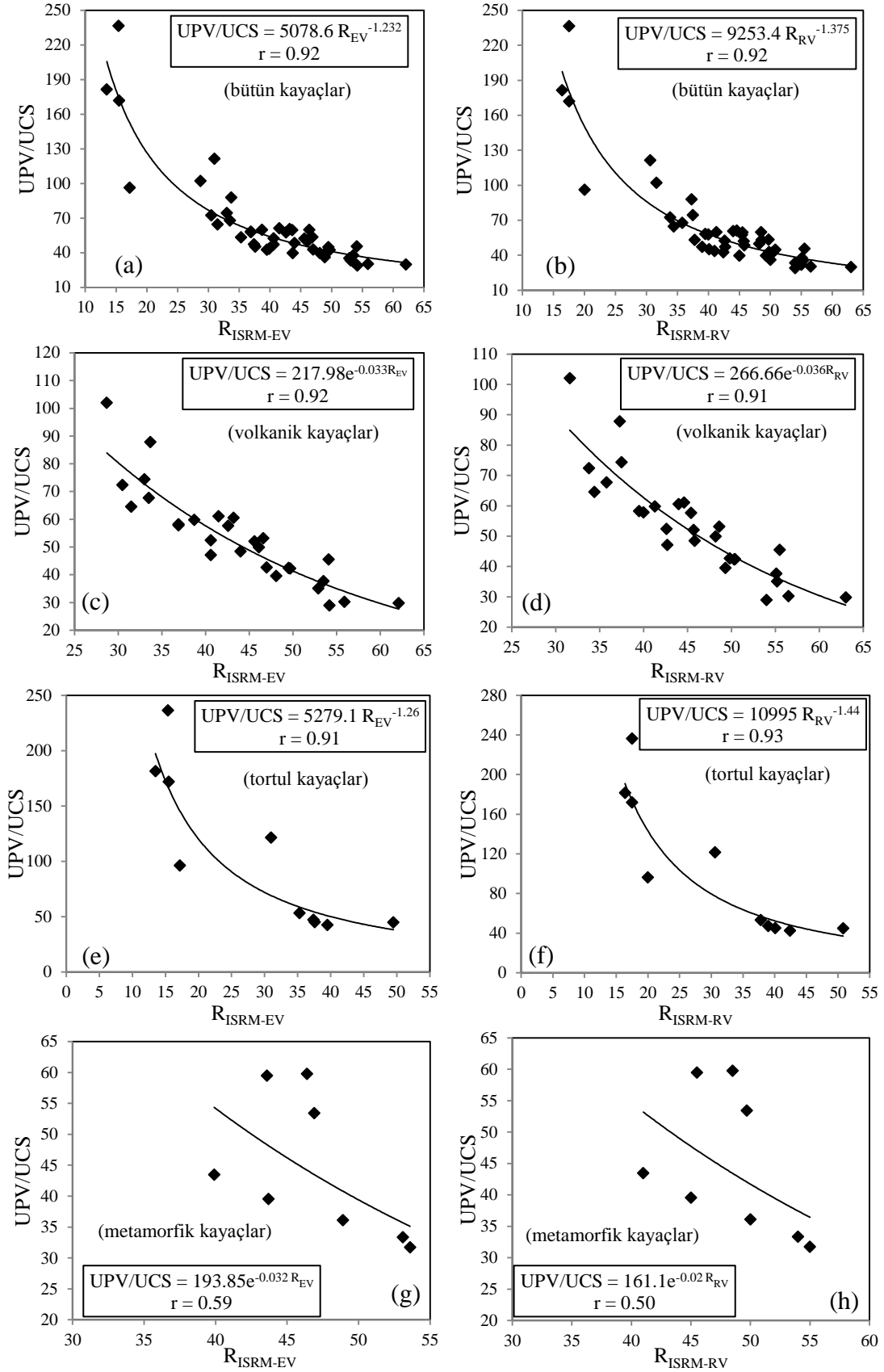
Şekil 3.12.  $R_{ISRM-EV}$  ve  $R_{ISRM-RV}$  ile UPV arasındaki ilişki (a-h)

### 3.2.2.1. Schmidt Sertliği ile UPV/UCS Oranı Arasındaki İlişki

Schmidt sertliğinin kayaçların hem UCS hem de UPV değerleriyle anlamlı ilişkiler verdiği görülmüş ve sonuçlar literatürle paralel çıkmıştır. Yılmaz ve Sendir (2002), Yaşar ve Erdoğan, (2004b), Fener vd. (2005) ve Yağız (2009) Schmidt sertliği ve UCS arasında oldukça yüksek ilişkiler bulmuşlardır. Yağız (2009), Sharma vd. (2011) ve Khandelwal (2013) ise Schmidt sertliği ve UPV arasında yüksek ilişkiler bulmuşlardır.

Bu çalışmada ayrıca  $R_{ISRM-EV}$  ve  $R_{ISRM-RV}$  değerlerinin UPV/UCS oranı ile ilişkide olduğu görülmüş ve buna yönelik detaylı incelemelerde bulunulmuştur (Şekil 3.13). Schmidt sertliği ile UPV/UCS oranı arasında güçlü bir ilişki bütün kayaçlar, volkanik ve tortul kayaçlarda elde edilmiştir.  $R_{ISRM-EV}$  ve  $R_{ISRM-RV}$  değerleri arttıkça UPV/UCS oranının azaldığı gözlenmiştir.

Bilindiği gibi ISRM (1978) tarafından Schmidt sertlik sınıfları ile bunlara karşılık gelen kaya tanımlamaları yapılmıştır. Bu tanımlamada Schmidt sertliği  $<10$  olduğunda kayaç yumuşak olarak tanımlanırken,  $>60$  olduğunda ise kaya son derece sert sınıfına dahil olmaktadır. UPV/UCS oranının Schmidt sertlik sınıf aralığı ile de uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Sınıf aralığı yumuşaktan son derece sert kaya sınıfına geçtikçe UPV/UCS oranı da 236'dan 29'a düşmektedir (Şekil 3.14). UPV/UCS oranının Schmidt sertlik değerlerindeki artışa paralel olarak düşmesinin nedeni UPV değerlerinin genellikle 3500-5500 m/s aralığında değişmesidir. Diğer bir ifadeyle en yüksek UPV ile en düşük UPV değeri arasındaki oran (5855/1397) yaklaşık 4 iken, aynı oran UCS değerleri (197/7.7) için 26 olmaktadır. Şekil 3.14a incelendiğinde “az yumuşak” kaya sınıfının eğilim çizgisi dike yakın iken “çok sert” kaya sınıfının eğilim çizgisi neredeyse yataydır. Diğer bir ifadeyle her bir sınıf aralığı için eğilim çizgisinin eğimi farklı olmaktadır.



Şekil 3.13.  $R_{ISRM-EV}$  ve  $R_{ISRM-RV}$  ile UPV/UCS oranı arasındaki ilişki (a-h)

Tablo 3.3'te verilerin istatistiksel analiz sonuçları ve korelasyon katsayısı değerleri yer almaktadır. Metamorfik kayalarda korelasyon analizleri  $R_{ISRM-RV}$  ile UCS ve UPV/UCS oranı arasında % 95 güven aralığında güvenilir bir ilişki olmadığını göstermiştir. Bununla beraber,  $R_{ISRM-RV}$  ile UCS ve UPV veri çiftleri % 95 güven aralığında güvenilirdir. Ancak,  $R_{ISRM-RV}$  ve UPV/UCS oranı arasında ( $r=0.59$ ) pearson korelasyon katsayısına göre orta derece bir ilişki gibi görünmesine rağmen SPSS korelasyon analizine göre anlamlı bir ilişki elde edilememiştir. Metamorfik kayalar test sonuçlarında yüksek bir dalgalanmaya sahiptir. Örneğin UCS değerleri birbirine komşu iki ölçüm noktası için 66 ve 158 MPa olarak elde edilmiştir. Çalışma alanında tünel temel kayacını oluşturan metamorfik kayalar (metabazalt) aynı zamanda litolojik birimler içinde en yaşlı (Liyas dönemi) kayalardır. Bu nedenle birçok tektonik aktivite geçirmiştir. Örneklerde makroskopik olarak herhangi bir zayıflık düzlemi vb. rastlanmamasına rağmen, ince kesit incelemelerine göre örnekler oldukça yoğun mikro-çatlak yapısına sahiptir. Bu nedenle metamorfik kayalarda diğer kayalara kıyasla nispeten daha düşük ilişkilerin elde edilmesi, muhtemelen test sonuçlarında dalgalanmalara neden olan mikro-çatlak yapılarından kaynaklanmaktadır.

Tablo 3.3. Verilerin istatistik analiz değerleri

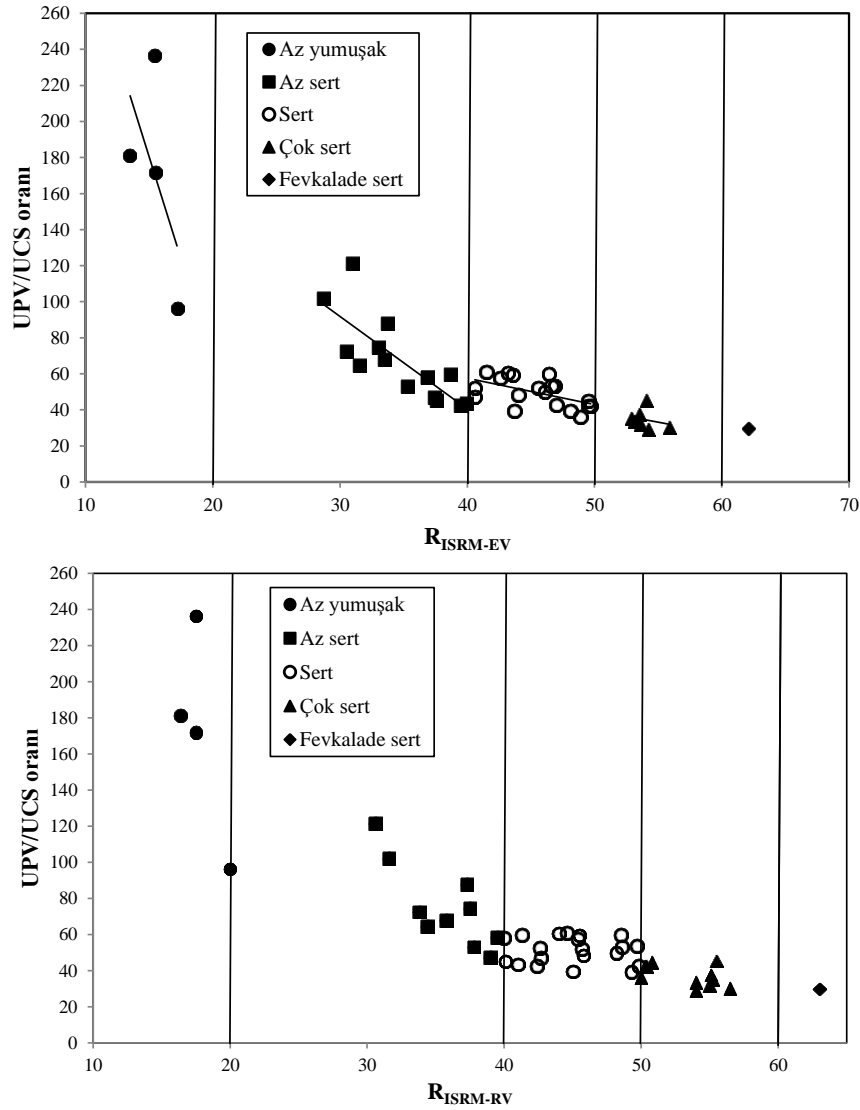
| İlişkili parametreler  | Bütün kayalar<br>(Vol. Tor. Meta.) N=46 |      | Volkanik kayalar<br>N=28 |      | Tortul kayalar<br>N=10 |      | Metamorfik kayalar<br>N=8 |      |
|------------------------|---|------|--------------------------|------|------------------------|------|---------------------------|------|
|                        | Anlamlılık<br>seviyesi                  | r    | Anlamlılık<br>seviyesi   | r    | Anlamlılık<br>seviyesi | r    | Anlamlılık<br>seviyesi    | r    |
| UCS- $R_{ISRM-EV}$     | 0.000                                   | 0.95 | 0.000                    | 0.90 | 0.000                  | 0.95 | 0.044                     | 0.72 |
| UCS- $R_{ISRM-RV}$     | 0.000                                   | 0.95 | 0.000                    | 0.90 | 0.000                  | 0.97 | 0.090                     | 0.64 |
| UPV- $R_{ISRM-EV}$     | 0.000                                   | 0.89 | 0.001                    | 0.60 | 0.002                  | 0.95 | 0.016                     | 0.80 |
| UPV- $R_{ISRM-RV}$     | 0.000                                   | 0.90 | 0.001                    | 0.60 | 0.000                  | 0.95 | 0.035                     | 0.74 |
| UPV/UCS- $R_{ISRM-EV}$ | 0.000                                   | 0.92 | 0.000                    | 0.92 | 0.002                  | 0.91 | 0.167                     | 0.59 |
| UPV/UCS- $R_{ISRM-RV}$ | 0.000                                   | 0.92 | 0.000                    | 0.91 | 0.001                  | 0.93 | 0.272                     | 0.50 |

Vol: volkanik kayalar, Tor: Tortul kayalar, Meta: Metamorfik kayalar, N: örnek sayısı

Schmidt sertlik değerleri ile UPV/UCS oranı arasındaki ilişkiden yararlanarak kaya malzemesinin sertlik tanımlamasında kullanılmak üzere bir sınıflama önerilmiştir (Tablo 3.4). UPV/UCS oranı sayısal bir oran olup çalışılan kayalar için genellikle 30-230 arasında değişmiştir. Önerilen sınıflamanın UPV ve UCS değerlerinin olduğu ve Schmidt çekicinin bulunmadığı veya Schmidt deneyi için yeteri kadar örneğin olmadığı koşullarda Schmidt sertlik sınıfını dolaylı olarak tahmininde araştırmacılara yol göstereceği



düşünülmüştür (Karaman ve Kesimal, 2015a). UCS deneylerinden önce genellikle aynı karot örnekler üzerinde UPV deneyleri yapılmaktadır. Örneğin bir kaya türüne ait temsili 5 adet karot örnekleri UCS ve UPV deneyleri için yeterli olmaktadır. Önerilen sınıflama kullanılarak Schmidt çekici deneyi için ilave 3–4 adet karot kullanımına gerek kalmadan Schmidt sertlik değerlerine bağlı kaya tanımlaması (yumuşak, az yumuşak vb.) kabaca yapılabilmektedir. Bu çalışmada sertlik sınıfı üzerine ayrıca kaya türünün etkisi araştırılmıştır. Tortul ve volkanik kayalar 4 farklı sınıfa (sert, çok sert vb.) dahil olurken, metamorfik kayalar 2 sınıfa dahil olmuştur. Bu nedenle Schmidt sertlik sınıfı ile UPV/UCS oranı arasında kaya tipi yönünden bir ilişki çalışılan kayalar için mümkün görünmemektedir.



Şekil 3.14. UPV/UCS oranının Schmidt sertlik sınıfı üzerindeki değişimi

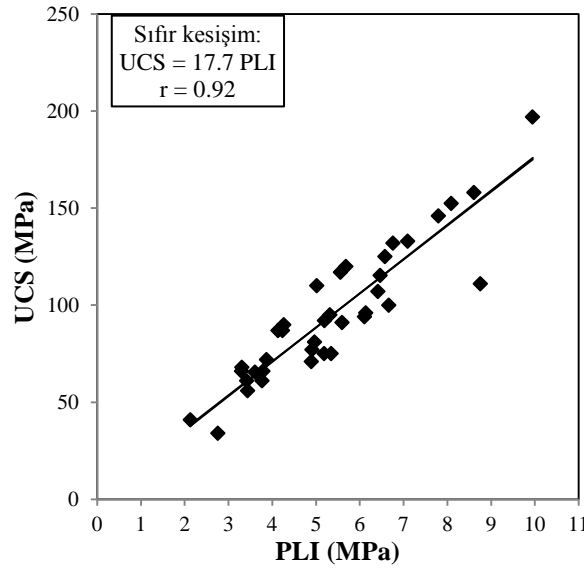
Tablo 3.4. UPV/UCS oranından sertlik sınıfı tahmini (Karaman ve Kesimal, 2015a)

| Schmidt sertlik sınıfları | Tanımlama    | Ortalama UPV/UCS oranı |
|---------------------------|--------------|------------------------|
| 0–10                      | Yumuşak      | > 230 ?                |
| 10–20                     | Az yumuşak   | 100–230                |
| 20–40                     | Az sert      | 60–100                 |
| 40–50                     | Sert         | 45–60                  |
| 50–60                     | Oldukça sert | 30–45                  |
| >60                       | Çok sert     | < 30 ?                 |

?: Yetersiz veri

### 3.2.3. Nokta Yüğü Dayanım İndeksinden UCS Tahmini

Bu çalışmada tünel güzergahındaki 37 farklı noktadan alınan kayaç örnekleri için PLI deneyinden UCS tahminine yönelik istatistiksel analizler yapılmıştır. Bütün kayaçlar için UCS ile PLI arasında yüksek lineer ilişki gözlenmiştir (Şekil 3.15). UCS ile PLI arasındaki ilişki hem sıfır kesişim hem de lineer olarak elde edilmiş ve ilişkinin kuvvetini ifade eden  $r = 0.92$  olarak bulunmuştur. İki farklı eşitlik türetilmesinin nedeni literatürle daha anlamlı kıyaslama yapmak içindir. Ayrıca, kayaçların jeolojik kökeni (magmatik, metamorfik ve tortul) için UCS ve PLI arasındaki ilişkiden elde edilen eşitliklerin değişkenlik arz edebileceği bilinmektedir.



Şekil 3.15. PLI ve UCS arasındaki ilişki (Karaman vd. 2015a)

Bu çalışmada incelenen kayaçların jeolojik kökenlerine yönelik UCS tahmini için değerlendirme yapılmış ve elde edilen değerler Tablo 3.5'te verilmiştir. Metamorfik ve tortul kayaçlarda sıfır kesişim eşitlikleri ile elde edilen korelasyon katsayıları (r) lineer eşitliklerden elde edilen katsayılardan biraz daha düşük çıkmıştır. Burada asıl dikkat edilmesi gereken husus eşitliklerin anlamlı olup olmadığıdır. Bu bağlamda tortul kayaçlar (kireçtaşı) için lineer eşitliğin güvenilir olmadığı bunun dışındaki eşitliklerin anlamlı oldukları ( $P < 0.05$ ) görülmektedir.

Tablo 3.5. Kaya tipine göre korelasyon katsayıları ve regresyon eşitlikleri

| Parametreler   | Kayaç tipleri       | Eşitlikler               | r    | Eşitliğin anlamlılığı |
|----------------|---------------------|--------------------------|------|-----------------------|
| UCS ve PLI     | Bütün kayaçlar      | $UCS = 17.5 PLI + 1$     | 0.92 | 0.000                 |
| UCS ve PLI (*) | Bütün kayaçlar      | $UCS = 17.7 PLI$         | 0.92 | 0.000                 |
| UCS ve PLI     | Volkanik kayaçlar   | $UCS = 18.7 PLI - 3$     | 0.95 | 0.000                 |
| UCS ve PLI (*) | Volkanik kayaçlar   | $UCS = 18.2 PLI$         | 0.95 | 0.000                 |
| UCS ve PLI     | Metamorfik kayaçlar | $UCS = 16.5 PLI^{0.996}$ | 0.91 | 0.002                 |
| UCS ve PLI (*) | Metamorfik kayaçlar | $UCS = 16.6 PLI$         | 0.87 | 0.000                 |
| UCS ve PLI     | Tortul kayaçlar     | $UCS = 62.1 PLI - 239.5$ | 0.77 | 0.129                 |
| UCS ve PLI (*) | Tortul kayaçlar     | $UCS = 18.2 PLI$         | 0.54 | 0.000                 |

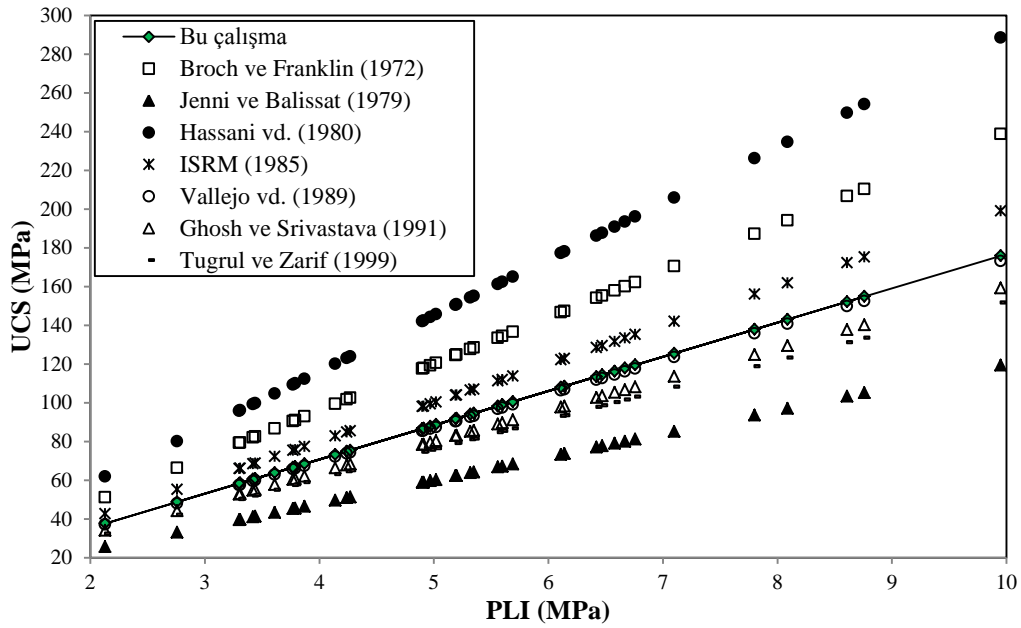
(\*) Sıfır kesişim eşitliği

Tek tip kayaçlardaki korelasyon katsayısı genellikle diğerlerine göre daha düşüktür. Bununla birlikte bu çalışmada kullanılan tortul kayaçlarının sayısı azdır. Tortul kayaçlar için veri sayısı artırıldığında elde edilen ilişkinin anlamlı olabileceği düşünülmüştür. Katsayıların anlamlılığına bakıldığında sabit terimlerin genel olarak anlamsız oldukları anlaşılmaktadır. Sıfır kesişim eşitlikleri ise bütün kaya tipleri için anlamlı çıkmıştır.

### 3.2.3.1. PLI'den Elde Edilen Eşitliğin Literatürle Karşılaştırılması

PLI ve UCS arasındaki bütün kayaçlar için sıfır kesişim analizinden elde edilen eşitlik ( $UCS=17.7 PLI$ ) ile literatürde elde edilen önemli bazı eşitlikler kıyaslanmıştır (Şekil 3.16). Şekilden görüldüğü gibi bu çalışma ile Vallejo vd. (1989) ve Ghosh ve Srivastava (1991) tarafından önerilen eşitliklerin birbirine oldukça yakın oldukları anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, literatürdeki araştırmacılar çalıştıkları değişik bölgelerdeki farklı dokusal ve mineralojik özellikteki kayaçlara yönelik çeşitli eşitlikler önermişlerdir.

Bunların bazıları birbirleriyle uyumlu olabildiği gibi oldukça farklı eğim sunan eşitlikler de mevcuttur. Farklı kayaçların çalışılmış olması, kayaç ismi aynı olsa bile dokusal ve mineralojik bazı özelliklerindeki değişimler, kayaçların dayanım ve farklı ayrışma durumları bu farklılığın nedenlerinden sayılabilir. Jenni ve Balissat (1979) kireçtaşı ve dolomit, Hassani vd. (1980) tortul, Vallejo vd. (1989) kumtaşı, Ghosh ve Srivastava (1991) ve Tuğrul ve Zarif (1999) ise granitik kayaçlar üzerinde çalışmışlardır.



Şekil 3.16. UCS ve PLI arasında elde edilen eşitliğin literatürle karşılaştırılması

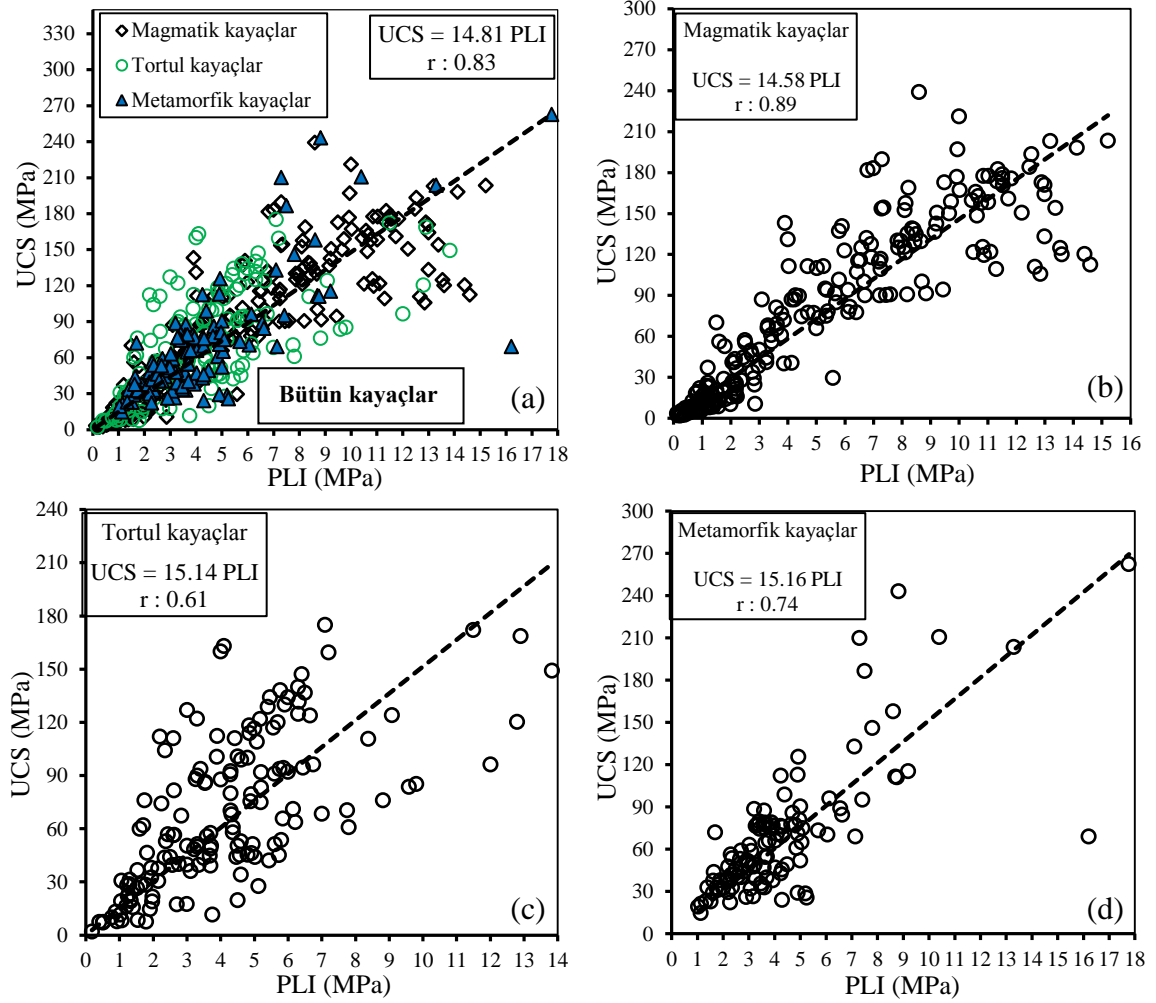
### 3.2.3.2. UCS Tahmininde k Katsayısının Araştırılması

Literatürde UCS'nin pratik tahminine yönelik olarak UCS/PLI oranı veya sıfır kesişim eşitliklerinden ( $UCS=k*PLI$ ) elde edilen "k" değeri üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar PLI'den UCS tahminini oldukça kolaylaştırmış olmasına rağmen tüm kayaç tipleri için tek bir "k" değeri mevcut değildir (Chau ve Wong, 1996; Hawkins, 1998; Romana, 1999). Genel olarak birçok yazar (Broch ve Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; ISRM, 1985), UCS/PLI oranının (k) 20–25 arasında ve genel kümelenmenin 10–30 arasında değiştiğini ifade etmektedir (Al-Jassar ve Hawkins, 1979; Norbury, 1986; Topal, 2000). Hassani vd. (1980) ve Read vd. (1980) k değerlerinin tortul kayaçlar için sırasıyla 29 ve 20 olduğunu önermişlerdir. "k" değerinin, dayanımı yüksek kayaçlarda büyük, düşük kayaçlarda ise küçük değer aldığı bilinmektedir (Karaman ve Kesimal, 2012; Singh vd.,

2012). Topal (2000) tüfler üzerinde yaptığı çalışmada  $k$  değerinin 20'nin altında genelde 13–14 olduğunu ve zayıf kayaçlar için  $k=22-24$  değerinin kullanılmaması gerektiğini vurgulamıştır. Bu çalışmada kullanılan kayaçlar genellikle orta–yüksek kaya sınıfında olduğundan  $k$  değerleri 16.6 ila 18.2 arasında değişmiştir. Rusnak ve Mark (2000) tortul kayaçlar (şeyl, silttaşı kumtaşı ve kireçtaşı) üzerinde yaptığı çalışmada UCS/PLI oranının ( $k$ ) 20 ila 22 arasında değiştiğini göstermiştir. Palchik ve Hatzor (2004) tebeşir taşları için  $k$  değerinin 8–18 arasında değiştiğini, Tsiambaos ve Sabatakakis (2004) ise zayıf tortul kayaçlar için  $k$  değerinin 13 (PLI) $<$ 2 MPa), dayanımı daha yüksek kayaçlar için 28 (PLI) $>$ 5 MPa) olduğunu işaret etmişlerdir. Karaman (2011) dayanımları 7–19 MPa arasında değişen dört farklı biyomikritik kireçtaşları için eksenel, çapsal ve şekilsiz deney yöntemlerine göre  $k=12$  değerinin UCS tahmininde kullanılabileceğini ifade etmiştir. Singh vd. (2012)  $k$  değerlerinin dayanımı yüksek kayaçlarda 21–24 arasında dayanımı daha düşük kayaçlarda ise 14–16 katsayılarının kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Kahraman (2014) özellikle anizotropik kayaçlarda  $k$  değerinin 15–50 arasında değişebileceğini ifade etmiştir.

Literatürde birçok araştırmacı PLI ile UCS arasındaki ilişkiyi bütün jeolojik kökenleri (magmatik, tortul ve metamorfik) birlikte değerlendirerek irdelemişlerdir (Kahraman, 2001; Fener vd., 2005; Karakuş ve Tütmez, 2006; Kılıç ve Teymen, 2008). Daha az araştırmacı tarafından kayaçlar jeolojik oluşumlarına göre magmatik, tortul ve metamorfik şeklinde ayrılarak PLI ve UCS arasındaki ilişkiler ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Kahraman ve Günaydın, 2009; Karaman vd., 2015a). Bunların dışında bazı araştırmacılar da daha özele inerek özellikle bazı kayaçlara yönelik bahsi geçen ilişkiyi araştırmışlardır. Tuğrul ve Zarif (1999) granitik kayaçlar için, Heidari vd. (2012) Jips kayaçları için, Azimian vd. (2014) ise marn kayaçları için PLI ve UCS arasındaki ilişkiyi değerlendirmişlerdir. Ancak petrografik açıdan kayaçların oluşumu dikkate alındığında magmatik kayaçların oluşumu ve özelliklerine göre genel olarak 4 alt sınıfa ayrılacağı düşünülmüştür. Bunlar piroklastik kayaçlar, volkanik (yüzey), plütonik (sokulum) ve yarı derinlik kayaçlarıdır. Benzer şekilde tortul kayaçlar kimyasal, kırıntılı ve evaporitler olmak üzere 3 gruba, metamorfik kayaçlar ise foliasyonlu (yönelimli, anizotrop, şistozite vb.) ve foliasyonsuz (yönelimsiz, izotrop) olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır. Literatürde bu şekilde kayaçların sınıflandırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak çalışma sahasındaki kayaç örneklerinin sayısı önerilen sınıflamalar için PLI ve UCS arasındaki

ilişkiyi incelemeye yetmeyeceğinden ulaşılabilir bütün literatür bu amaç için araştırılmıştır. Literatür taraması sonucunda UCS ve PLI parametrelerini içeren toplam 490 kaya örneği derlenmiş ve değişkenler arasında sıfır kesişim eşitlikleri yapılarak k katsayıları farklı kaya sınıflaması (piroklastik, volkanik, kırıntılı, yönelimsiz vb.) için elde edilmiştir (Tablo 3.6). Evaporitik kayalar hariç diğer sınıflamaların her biri için 30'dan fazla kaya örnekleri regresyon analizlerinde kullanılmıştır. Tablo 3.6'daki bütün regresyon eşitlikleri % 95 güven aralığında anlamlı bulunmuştur. Kimyasal kayaların UCS ve PLI arasındaki zayıf ( $r = 0.39$ ) bir ilişki varlığı ile diğer kayalara nazaran daha az güvenilir olduğu görülmüştür. Bunda muhtemelen birbirinden oldukça farklı özelliklere sahip kireçtaşlarının etkisi büyüktür. Çünkü bu tip kayaların bünyesinde bulunan fosil ve kil içeriğinin yanı sıra çimentolanma tipleri de (mikritik ve sparitik) birbirinden farklıdır. Regresyon analizleri Şekil 3.17 – Şekil 3.20'de verilmiştir. Şekil 3.17a'da kayaların dayanımı arttıkça verilerin en iyi uyum çizgisinden uzaklaştığı anlaşılmaktadır. Şekil 3.18a'da piroklastik kayaların UCS değerleri genellikle  $< 30$  MPa ve PLI değerleri ise genellikle  $< 2$  MPa olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen eşitlikler ve analizlerin anlamlılık seviyeleri Tablo 3.6'da verilmiştir. Kayaç grupları/sınıfları incelendiğinde en düşük k değeri 12.6 ile kırıntılı tortul kayalara, en yüksek ortalama k değeri ise 17.2 ile kimyasal tortul kayalara ait olmuştur. Yüksek dayanımlı kayalarda k değerlerinin de arttığı anlaşılmaktadır. Örneğin piroklastik kayaların UCS ortalaması 17 MPa iken, kimyasal tortul kayaların UCS ortalaması 80 MPa'dır. "k" değerlerinin ortalamaları dikkate alındığında (Tablo 3.6) bütün değerlerin 20 sayısının altında olduğu görülmektedir. Literatüre bakıldığında 1985 yılından önce ISRM (1985) tarafından PLI için yöntem önerilmeden önce) k değerlerinin genellikle 20'nin üzerinde olduğu anlaşılmıştır. Bu tarihten sonra ise k katsayısının nispeten 20 sayısının altında olması gerektiğini vurgulayan çalışmalar mevcuttur (Smith, 1997; Topal, 2000). Bu farklılıkların muhtemelen kaya tipi ve dayanımının yanı sıra araştırmacıların kullandığı test yöntemi ile de alakalı olabileceği düşünülmüştür. ISRM (1985) önerisi ile araştırmacılar aynı test koşullarında deney yapma ve sonuçlarını kıyaslama olanağı bulmuşlardır. Broch ve Franklin (1972) tarafından UCS tahmininde "k" katsayısının 24 olabileceği önerisi literatürde önemli bir etki yapmıştır. Bunun üzerine birçok araştırmacı (Pells, 1975; Greminger, 1982; Smith, 1997; Topal, 2000) 24 katsayısının hatalı sonuçlar verebileceğini belirtmişlerdir.

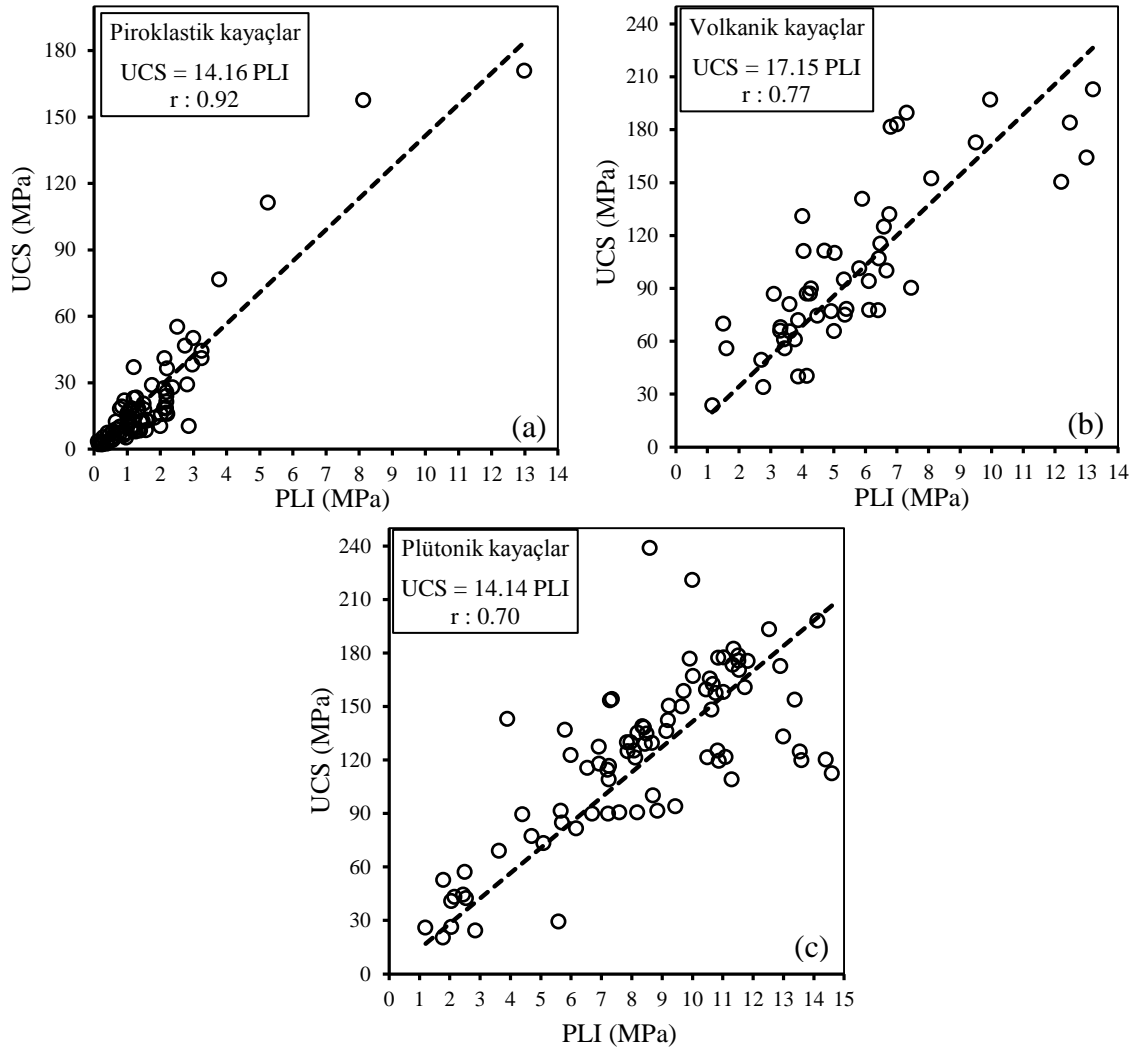


Şekil 3.17. Jeolojik kökene göre UCS ve PLI arasındaki ilişki (a–d)

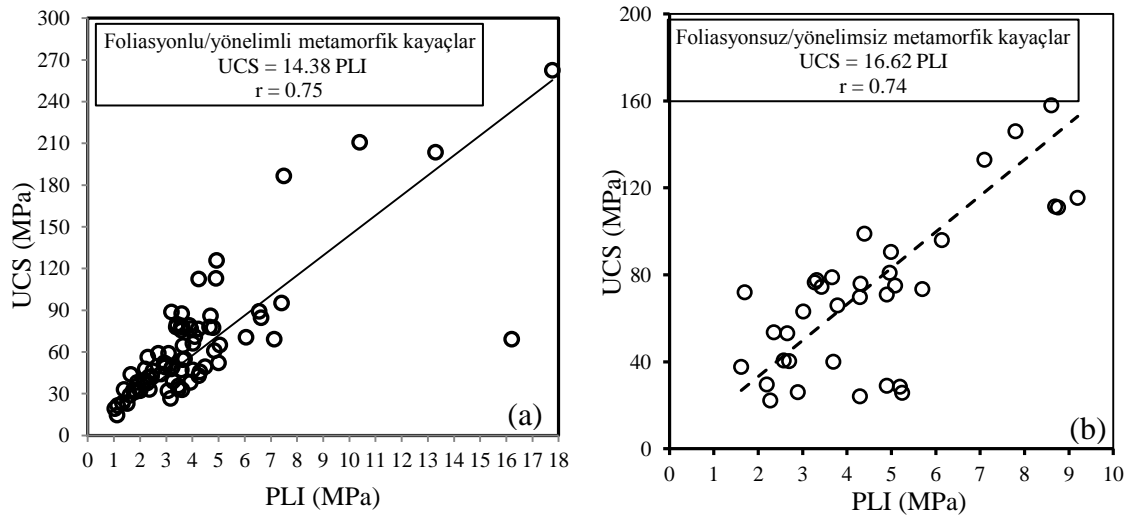
Tablo 3.6. Farklı kökenden kayaçlar için PLI'den UCS tahmini

| Parametreler                 | Eşitlikler      | r    | Eşitliğin anlamlılığı |
|------------------------------|-----------------|------|-----------------------|
| Bütün kayaçlar (N=490)       | UCS = 14.81 PLI | 0.83 | 0.000                 |
| Magmatik kayaçlar (N=225)    | UCS = 14.58 PLI | 0.89 | 0.000                 |
| Tortul kayaçlar (N=153)      | UCS = 15.14 PLI | 0.61 | 0.000                 |
| Metamorfik kayaçlar (N=112)  | UCS = 15.16 PLI | 0.74 | 0.000                 |
| Piroklastik kayaçlar (N=85)  | UCS = 14.16 PLI | 0.92 | 0.000                 |
| Volkanik kayaçlar (N=52)     | UCS = 17.15 PLI | 0.77 | 0.000                 |
| Plütonik kayaçlar (N=88)     | UCS = 14.14 PLI | 0.70 | 0.000                 |
| Kimyasal kayaçlar (N=85)     | UCS = 17.20 PLI | 0.39 | 0.000                 |
| Kırıntılı kayaçlar (N=57)    | UCS = 12.59 PLI | 0.77 | 0.000                 |
| Evaporitler (N=11)           | UCS = 14.24 PLI | 0.71 | 0.000                 |
| Yönelimli (anizotrop) (N=75) | UCS = 14.38 PLI | 0.75 | 0.000                 |
| Yönelimsiz (izotrop) (N=37)  | UCS = 16.62 PLI | 0.74 | 0.000                 |

N: Örnek sayısı

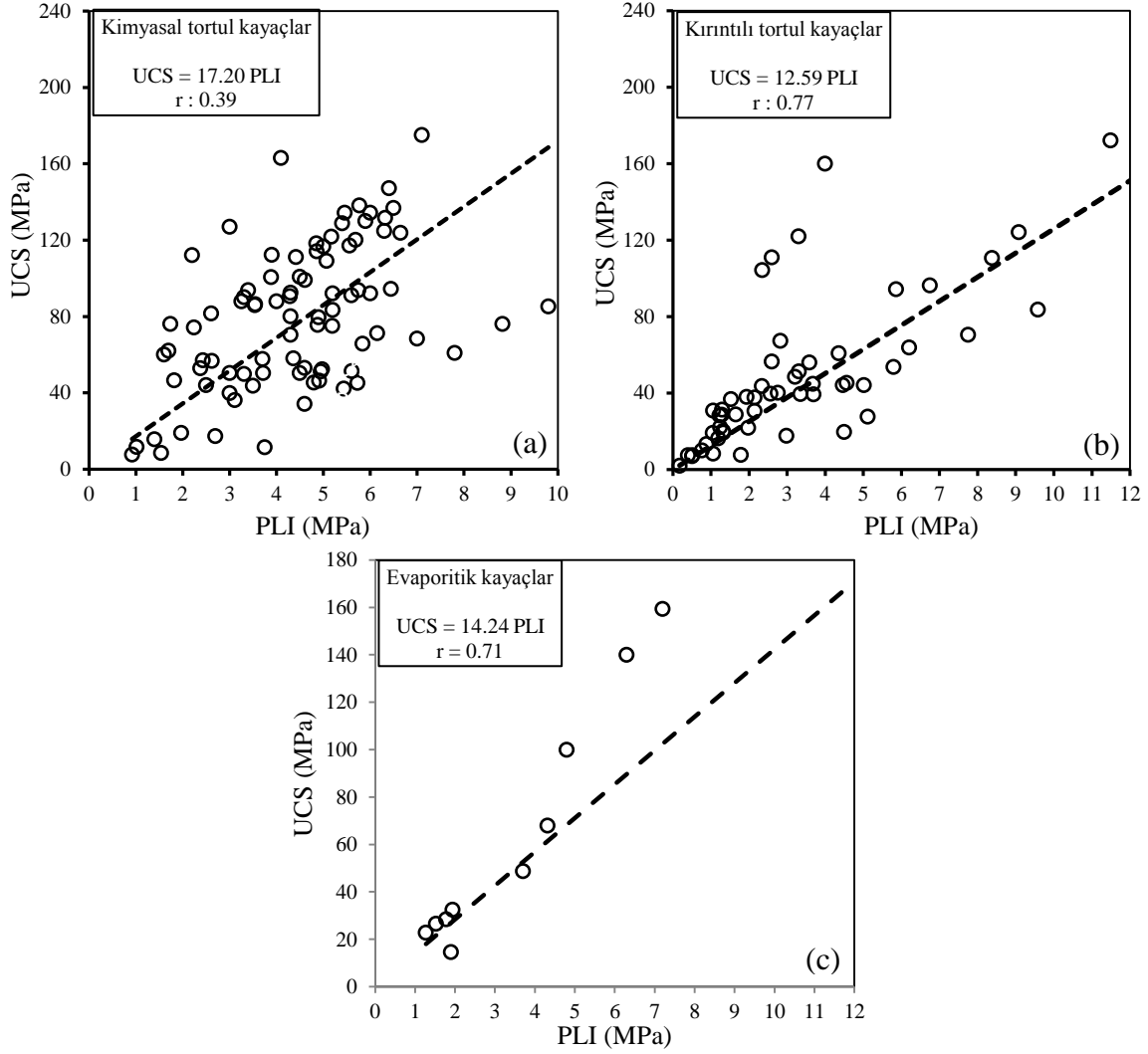


Şekil 3.18. Magmatik kayalarda UCS ve PLI arasındaki ilişki (a-c)



Şekil 3.19. Metamorfik kayalarda UCS ve PLI arasındaki ilişki (a, b)





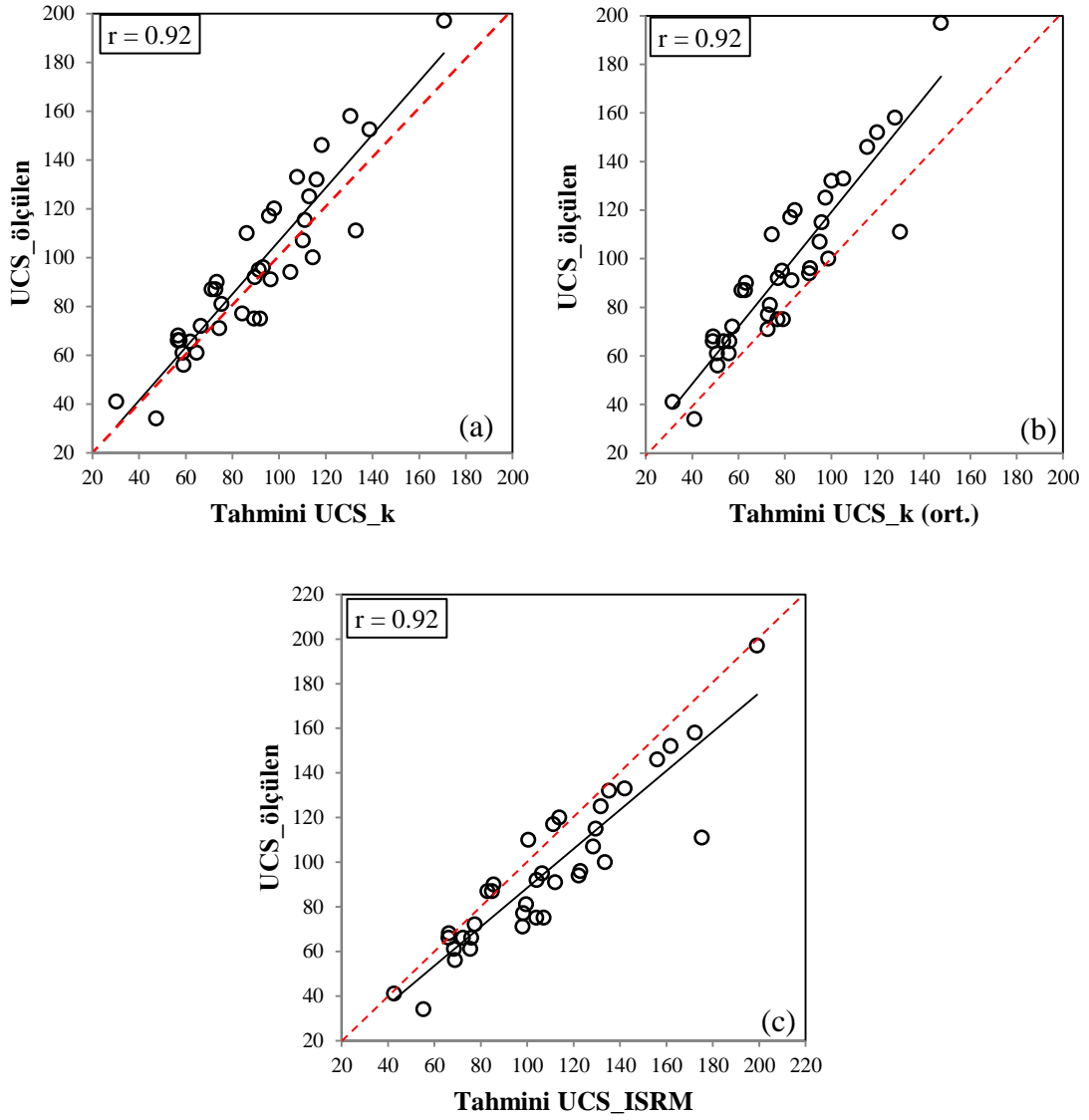
Şekil 3.20. Tortul kayaçlarda UCS ve PLI arasındaki ilişki (a–c)

Bu çalışmanın önemi PLI–UCS veri sayısının oldukça fazla olması ve kayaçların daha önce çalışılmamış jeolojik kökenleri için (kimyasal, kırıntılı vb.) UCS tahminine yönelik araştırmalar yapılmasıdır. Bu nedenle 12 farklı k değeri söz konusu litolojiye uygun olarak önerilmiştir. ISRM (1985) ve Broch ve Franklin (1972) tarafından önerilen 20–25 ve 24 katsayılarının oldukça yüksek oldukları görülmüştür. Aslında bazı bölgelere ait belli kayaçların k değerleri 20–30 arasında olabilir. Örneğin Zarif ve Tuğrul (2003) tarafından İstanbul civarındaki kireçtaşlarında yapılan çalışmada k değerleri genellikle 22'nin üzerinde 30'un altındadır. Ancak bu çalışmada kayaçları bölge bölge ayırarak analiz yapmak mümkün olamayacağından ve veri sayısı bazı bölgeler için yetersiz kalacağından dolayı kayaçları oluşum özelliklerine göre kendi içinde gruplandırma yoluna gidilmiştir. Araştırmacıların spesifik bazı bölgelere ait kayaçlar için önerilen k katsayılarını

kullanmaları neticesinde çalıştıkları kayaçlar hakkında yanlış değerlendirme yapabilecekleri bu çalışmada ortaya çıkmıştır. Özellikle ön analizlerde veya güzergah belirleme çalışmalarında piroklastik kayaçlar gibi dayanımı düşük olan kaya malzemeleri için Broch ve Franklin (1972) tarafından önerilen 24 katsayısının veya ISRM (1985) tarafından önerilen 20–25 katsayısının kullanımı konusunda dikkatli olunmalıdır. ISRM (1985) tarafından önerilen k katsayısı piroklastik kayaçlar için kullanıldığında iki kat daha büyük UCS değeri tahmin edileceğinden hatalı sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada çok sayıda örnek kullanılarak elde edilen k katsayılarının kullanımı önerilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen k katsayıları çalışma sahasındaki 37 noktaya uygulanmıştır. Bunun için 3 farklı yöntem karşılaştırılmıştır. Birinci yöntemde her bir kaya sınıfı için önerilen k değerleri UCS tahmininde kullanılmıştır. Örneğin metabazaltlar için yönelimsiz metamorfik kayaçlar için önerilen k değeri (16.62), kireçtaşları için kimyasal tortul kayaçlar için önerilen k değeri (17.20) kullanılarak UCS tahmininde kullanılmıştır. İkinci yöntemde ise bütün kayaçların ortalama k değeri olan 14.81 sayısı 37 kaya örneği için kullanılmış ve UCS tahmin edilmiştir. Üçüncü yöntemde ise ISRM (1985) tarafından önerilen katsayılardan 20 sayısı kullanılarak UCS tahmin edilmiştir. Her üç yönteme göre elde edilen tahmini UCS ile ölçülen UCS arasında ilişki olup olmadığı araştırılmıştır (Şekil 3.21a-c).

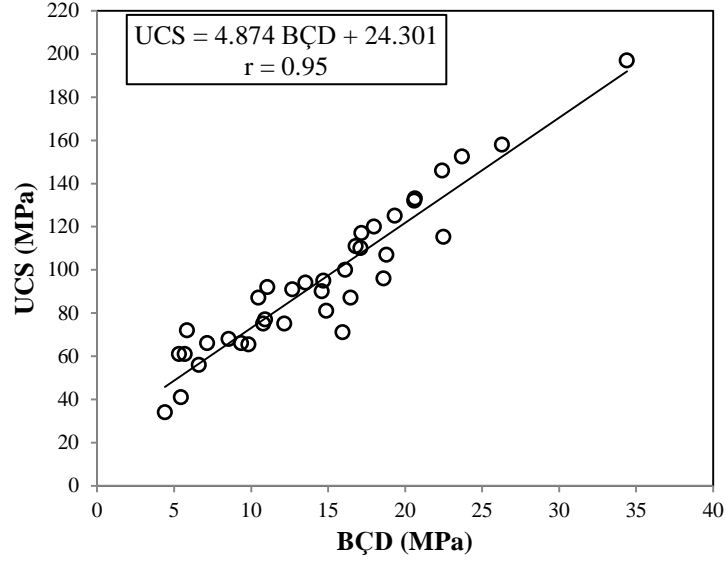
Tahmini UCS ile ölçülen UCS arasındaki en iyi ilişkiyi 1:1 çizgisi dikkate alındığında Şekil 3.21a göstermiştir. Değerler 1:1 çizgisinin etrafına nerdeyse homojen bir şekilde dağılmıştır. Şekil 3.21b’de ise ortalama k değerlerinin kullanımı ile kısmen daha düşük UCS verileri elde edilmekte buna karşın ISRM yöntemi ile daha yüksek UCS değerleri elde edilmektedir (Şekil 3.21c). ISRM (1985) tarafından önerilen yöntemin ölçülen UCS değerlerinden daha yüksek UCS değerleri ürettiği anlaşılmaktadır. 490 kaya örneği analiz edilerek farklı kaya sınıfları için bulunan k ile ortalama k’nın kullanıldığı durumdaki tahmini UCS değerleri araştırmacıları güvende bırakabilecektir. Ancak ISRM (1985) ile hesap edilen UCS’nin ölçülen UCS’den genel olarak daha yüksek olmasından dolayı bu katsayının kullanımı konusunda araştırmacıların dikkatli olmaları gerekmektedir.



Şekil 3.21. Farklı  $k$ 'dan hesaplanan ölçülen ve tahmini UCS arasındaki ilişki (a–c)

### 3.2.4. Diğer İndeks Deneylerin UCS Tahmininde Kullanımı

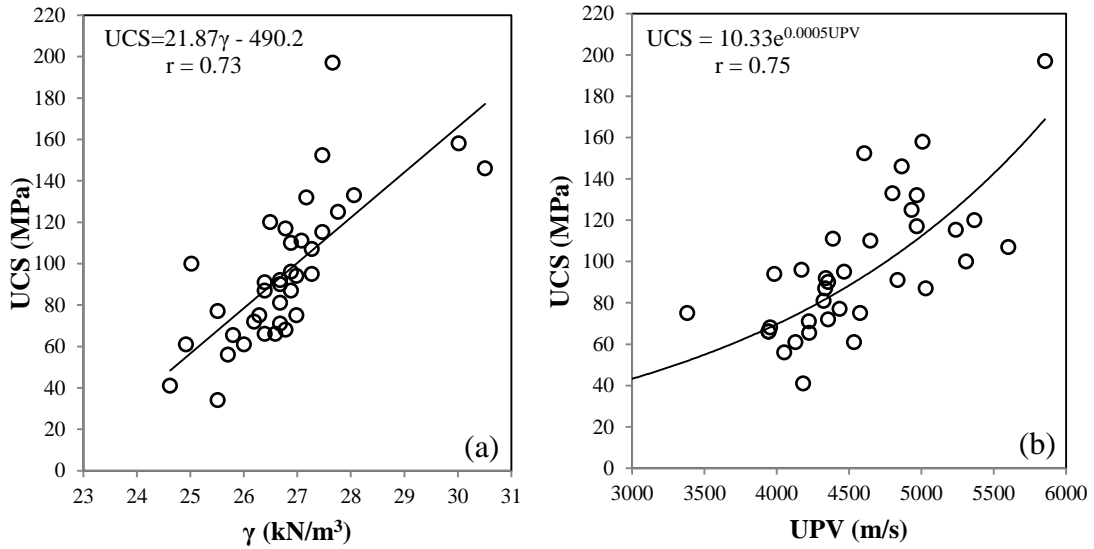
Bu bölümde UCS'nin BÇD, UPV ve BHA parametrelerinden tahminine yönelik regresyon analizleri yapılmıştır. BÇD ile UCS arasındaki ilişki incelenmiş ve güçlü pozitif lineer bir ilişki ( $r = 0.90$ ) elde edilmiştir (Şekil 3.22). İlişkinin % 95 güven aralığında anlamlı olduğu Tablo 3.7'den görülmektedir.



Şekil 3.22. BÇD ve UCS arasındaki ilişki (Karaman vd., 2015b)

Kaya malzemelerinin BHA ve UCS değerleri arasında yapılan regresyon analizi % 95 güven aralığında anlamlı çıkmış olsa da UCS tahmininde kullanılan diğer parametrelere nazaran elde edilen korelasyon katsayısı (r) çok yüksek değildir. Bunun bir nedeni BHA değerlerinin genellikle 25.5 ila 27.5 kN/m<sup>3</sup> arasında kümelenmiş olmasıdır. Diğer bir nedeni de metabazalt örneklerinin diğerlerine kıyasla yüksek çıkan BHA değerleridir. Yukarıdaki analizlere (47 kayaç için UPV–UCS ilişkisi) ilave olarak sadece tünel güzergahındaki kayaçlar için UPV ile UCS arasındaki ilişki ayrıca incelenmiştir (Şekil 3.23b). Bunun nedeni tünel kayaçları için tahmin edilen UCS değerleri kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde kullanılacak ve kıyaslanacaktır. Şekil 3.23b’den görüleceği gibi çalışılan kaya malzemelerinin UPV değerleri belli bir aralıkta (4000–5500 m/s) yoğunlaşmış olduğundan çok yüksek bir ilişki elde edilememiştir. UCS deneylerinden önce aynı karotlar üzerinde UPV deneyleri yapılmış olsa da, kaya malzemelerinin UPV değerlerini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan önemli olanları; kayanın tipi, dokusu, tane boyutu ve şekli, porozitesi, yoğunluğu, su içeriği, sıcaklığı ve anizotropisidir (Karaman vd., 2010). Ayrıca ayrışma etkisiyle kaya malzemelerinin UPV değerlerinde belirgin bir düşüş yaşanabilmektedir (Karaman vd., 2011a). Bundan dolayı tünel güzergahı tespitinde veya ön analizlerde yüzeyden alınan örneklerin UPV değerleri eğer taze değilse tünel içinde ayrışmamış (taze) örneklerin UCS değerlerini tam olarak yansıtmayabilir. Sonuç olarak BHA ve UPV deneylerinden UCS tahmininde anlamlı ilişkiler yakalanmıştır. Ancak her iki deney sonucunun belirli aralıklarda yoğunlaştığı unutulmamalı ve

analizlerde dikkatle kullanılmalıdır. Regresyon analizlerinde Y bağımlı değişkenin (UCS) normal dağılım göstermesi gerekmektedir (Özdamar, 2011). Korelasyon analizlerinde de kullanılacağından dolayı tahmini UCS değerlerinin de normal dağılım gösterip göstermediği araştırılmıştır. Ölçülen ve tahmini UCS değerleri normal dağılım göstermişlerdir (önem düzeyi  $> 0.05$ ). 37 noktaya ait kaya örneklerinin UCS tahmini için yapılan regresyon analiz bulgularına göre kullanılan yöntemler % 95 güven aralığında güvenilirdir (Tablo 3.7). Schmidt çekici, PLI ve BÇD yöntemlerinin diğerlerine (BHA ve UPV) göre daha yüksek korelasyon katsayısına sahip oldukları görülmektedir (Tablo 3.8, EK-2). Korelasyon analizine göre ölçülen ve tahmini UCS arasındaki ilişkiler % 99 güven aralığında bile anlamlı olarak bulunmuştur. Tablo 3.9’da ise ölçülen ve tahmini UCS arasında hesaplanan % VAF, RMSE, % MAPE ve korelasyon katsayı değerleri verilmiştir. VAF değerlerinin % 100’e en çok yaklaştığı değişkenler PLI ve BÇD olmuştur. Aynı değişkenlere (PLI ve BÇD) ait RMSE ve % MAPE değerleri ise diğer değişkenlere (UPV,  $R_{ISRM}$  ve  $\gamma$ ) nazaran 0 değerine daha çok yaklaşmışlardır. RMSE ve % MAPE değerlerinin düşük, % VAF değerlerinin ise yüksek olması durumunda buna paralel olarak korelasyon katsayılarının da yüksek olduğu görülmektedir. MAPE değerleri UPV yöntemi hariç diğerlerinin “iyi tahmin” sınıfına girdiğini göstermiştir.



Şekil 3.23. UCS ile BHA (a) ve UPV (b) arasındaki ilişki

Tablo 3.7. Çalışma kapsamında farklı deneylerden UCS tahmini için üretilen ampirik eşitlikler

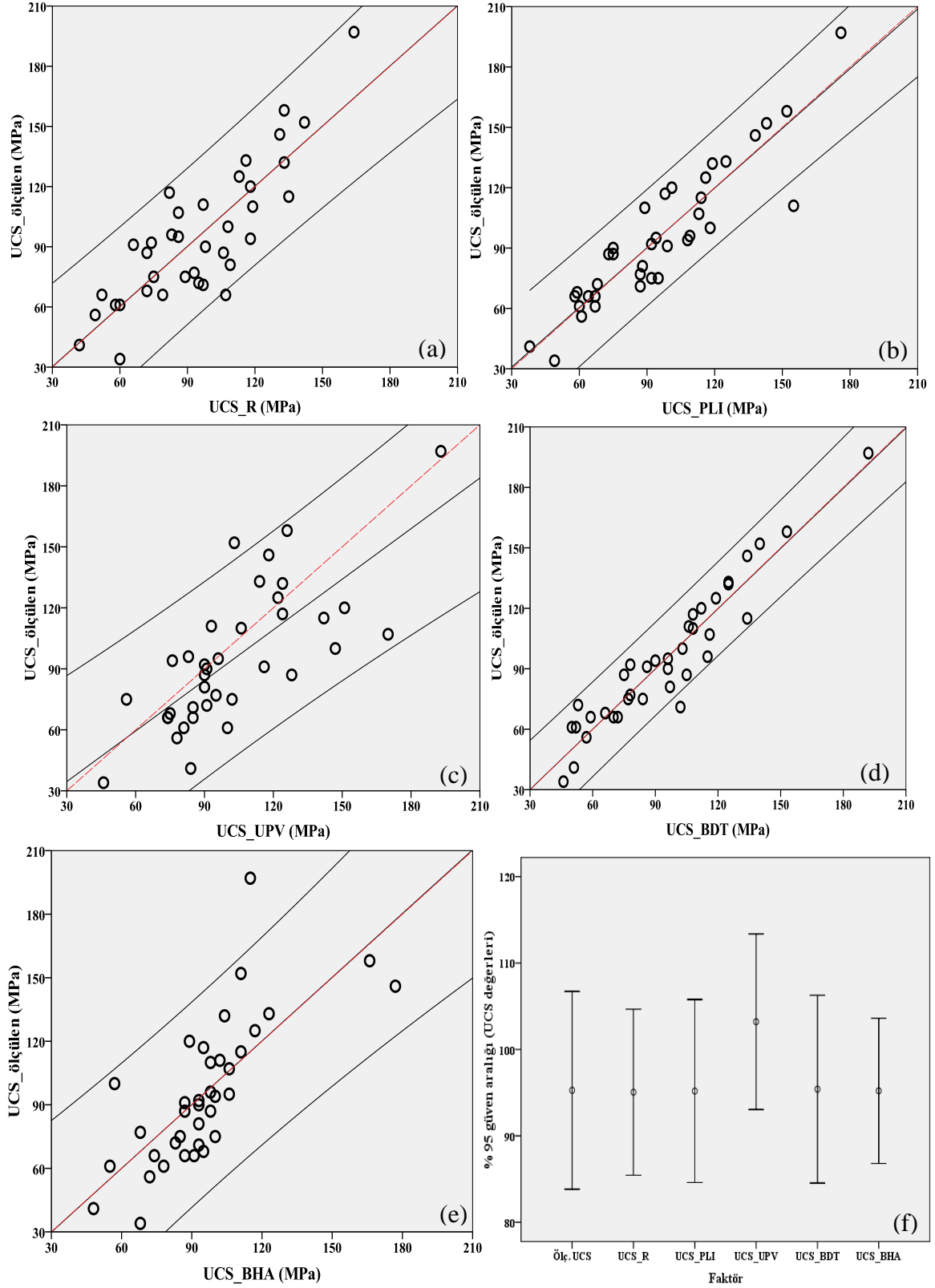
| Parametre               | Eşitlik                              | Anlamlılık seviyesi | r    |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------------|------|
| UCS – R <sub>ISRM</sub> | UCS = 3.66 R <sub>ISRM-EV</sub> – 63 | 0.000               | 0.84 |
| UCS – PLI               | UCS = 17.7 PLI                       | 0.000               | 0.92 |
| UCS – UPV               | UCS = 10.33 e <sup>0.0005UPV</sup>   | 0.000               | 0.75 |
| UCS – BÇD               | UCS = 24.301 + 4.874 BÇD             | 0.000               | 0.95 |
| UCS – $\gamma$          | UCS = 21.87 $\gamma$ – 490.2         | 0.000               | 0.73 |

Tablo 3.8. Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin korelasyon analiz sonuçları

| İlişkili parametreler                           | Örnek sayısı | Anlamlılık seviyesi | r       |
|---|--------------|---------------------|---------|
| UCS_ölçülen ve tahmini UCS_R <sub>ISRM-EV</sub> | 37           | 0.000               | 0.839** |
| UCS_ölçülen ve tahmini UCS_PLI                  | 37           | 0.000               | 0.915** |
| UCS_ölçülen ve tahmini UCS_UPV                  | 37           | 0.000               | 0.737** |
| UCS_ölçülen ve tahmini UCS_BÇD                  | 37           | 0.000               | 0.946** |
| UCS_ölçülen ve tahmini UCS_ $\gamma$            | 37           | 0.000               | 0.736** |

\*\* : Korelasyon 0.01 seviyesinde anlamlıdır.

Şekil 3.24a-e’de tahmini ve ölçülen UCS arasındaki korelasyon analiz grafikleri % 95 güven aralığı eğrileri ve 1:1 çizgisi ile birlikte verilmiştir. UPV hariç diğer yöntemlere ait tahmini ve ölçülen UCS değerlerinin 1:1 çizgisi etrafında dağılım gösterdikleri anlaşılmaktadır. UPV’den elde edilen UCS değerleri oldukça saçınım göstermiştir. Şekil 3.24f’de verilen ANOVA grafiği de UPV değerlerinin ölçülen UCS değerlerine benzediğini ancak % 95 güven aralığında daha yüksek ortalamaya sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak regresyon ve korelasyon analiz bulgularına göre kaya malzemelerine ait UCS parametresi çalışılan 5 farklı deney yöntemi ile de güvenle belirlenebilir. Bununla beraber Schmidt yöntemi, PLI ve BÇD ile daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir.



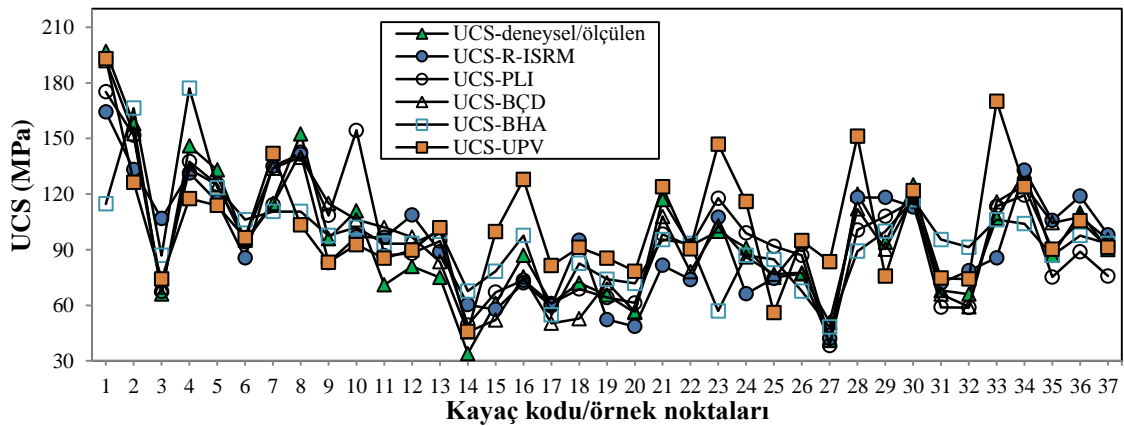
Şekil 3.24. Ölçülen ve tahmini UCS arasındaki ilişki

Tablo 3.9. VAF, RMSE, MAPE ve korelasyon katsayısı değerleri (UCS)

| Değişkenler            | VAF % | RMSE | MAPE % | r    |
|------------------------|-------|------|--------|------|
| UCS-UCS <sub>R</sub>   | 70    | 18.4 | 17.9   | 0.84 |
| UCS-UCS <sub>PLI</sub> | 84    | 13.7 | 12.2   | 0.92 |
| UCS-UCS <sub>UPV</sub> | 52    | 24.8 | 23.6   | 0.75 |
| UCS-UCS <sub>BÇD</sub> | 90    | 10.9 | 10.9   | 0.95 |
| UCS-UCS <sub>γ</sub>   | 54    | 22.9 | 19.1   | 0.73 |

### 3.3. UCS Parametresinin Kaya Kütleli Sınıflama Sistemlerinde Kullanımı

Yukarıda R, PLI, UPV, BÇD ve BHA değerleri ile dolaylı olarak UCS tahmin edilmeye çalışılmıştır. Literatürden farklı olarak bu bölümde ölçülen ve tahmin edilen UCS parametresini jeoteknik uygulamalarda kullanarak karşılaştırmak amaçlanmıştır. Kaya kütleli sınıflama sistemleri (RMR, Q ve R<sub>Mi</sub>) tünel gibi yeraltı çalışmalarında yaygın olarak kullanılan araçlar olduğundan, dolaylı UCS değerleri girdi parametresi olarak bu sistemlerde kullanılarak karşılaştırılmıştır. Tablo 3.7’de tünel kayaçlarından üretilen eşitlikler ve korelasyon katsayıları yer almaktadır. Bu eşitliklerden üretilen dolaylı ve deneysel/ölçülen UCS değerleri Tablo 3.10’da gösterilmiştir. Tahmini ve deneysel UCS değerlerinin örnek noktalarına karşı gösterimi Şekil 3.25’de verilmiştir. UCS tahmininde kullanılan parametrelerin farklı yöntemlerle elde edilmesi neticesinde tahmini değerler arasında belirli ölçüde farklılık olması normal karşılanmıştır. Örneğin, UPV deneyinde P dalgası numune içinden tahribatsız geçmekte ve karot uzunluğunun geçiş süresine oranı ile P dalgasının hızı elde edilmektedir. Schmidt çekici deneyinde ise test örneğinin yüzey sertliği ile ilişkili olarak Schmidt çekicindeki yayın geri sıçrama mesafesi kaydedilmektedir.



Şekil 3.25. Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin örnek noktalarına karşı gösterimi



Tablo 3.10. Ölçülen ve tahmini UCS değerleri

| Kaya kodu | UCS <sub>Ölçülen</sub> | UCS <sub>R-ISM</sub> | UCS <sub>PLI</sub> | UCS <sub>UPV</sub> | UCS <sub>BCD</sub> | UCS <sub>γ</sub> |
|-----------|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 1         | 197                    | 164                  | 176                | 193                | 192                | 115              |
| 2         | 158                    | 133                  | 152                | 126                | 153                | 166              |
| 3         | 66                     | 107                  | 67                 | 74                 | 70                 | 87               |
| 4         | 146                    | 131                  | 138                | 118                | 134                | 177              |
| 5         | 133                    | 116                  | 125                | 114                | 125                | 123              |
| 6         | 95                     | 86                   | 94                 | 96                 | 96                 | 106              |
| 7         | 115                    | 135                  | 114                | 142                | 134                | 111              |
| 8         | 152                    | 142                  | 143                | 103                | 140                | 111              |
| 9         | 96                     | 83                   | 109                | 83                 | 115                | 98               |
| 10        | 111                    | 97                   | 155                | 93                 | 106                | 102              |
| 11        | 71                     | 97                   | 87                 | 85                 | 102                | 93               |
| 12        | 81                     | 109                  | 88                 | 90                 | 97                 | 93               |
| 13        | 75                     | 89                   | 95                 | 102                | 84                 | 100              |
| 14        | 34                     | 60                   | 49                 | 46                 | 46                 | 68               |
| 15        | 61                     | 58                   | 67                 | 100                | 52                 | 78               |
| 16        | 87                     | 72                   | 73                 | 128                | 75                 | 98               |
| 17        | 61                     | 60                   | 60                 | 81                 | 50                 | 55               |
| 18        | 72                     | 95                   | 68                 | 91                 | 53                 | 83               |
| 19        | 66                     | 52                   | 64                 | 85                 | 72                 | 74               |
| 20        | 56                     | 49                   | 61                 | 78                 | 57                 | 72               |
| 21        | 117                    | 82                   | 98                 | 124                | 108                | 95               |
| 22        | 92                     | 74                   | 92                 | 90                 | 78                 | 93               |
| 23        | 100                    | 108                  | 118                | 147                | 103                | 57               |
| 24        | 91                     | 66                   | 99                 | 116                | 86                 | 87               |
| 25        | 75                     | 75                   | 92                 | 56                 | 77                 | 85               |
| 26        | 77                     | 93                   | 87                 | 95                 | 78                 | 68               |
| 27        | 41                     | 42                   | 38                 | 84                 | 51                 | 48               |
| 28        | 120                    | 118                  | 101                | 151                | 112                | 89               |
| 29        | 94                     | 118                  | 108                | 76                 | 90                 | 100              |
| 30        | 125                    | 113                  | 116                | 122                | 119                | 117              |
| 31        | 68                     | 72                   | 59                 | 75                 | 66                 | 95               |
| 32        | 66                     | 79                   | 58                 | 74                 | 59                 | 91               |
| 33        | 107                    | 86                   | 113                | 170                | 116                | 106              |
| 34        | 132                    | 133                  | 119                | 124                | 125                | 104              |
| 35        | 87                     | 106                  | 75                 | 90                 | 105                | 87               |
| 36        | 110                    | 119                  | 89                 | 106                | 108                | 98               |
| 37        | 90                     | 98                   | 75                 | 91                 | 96                 | 93               |

UCS<sub>Ölçülen</sub>: Laboratuvaradan elde edilen değer, UCS<sub>R-ISM</sub>: Schmidt sertlik değerinden ( $R_{ISM-EV}$ ), UCS<sub>PLI</sub>: Nokta yükü dayanım indeksinden, UCS<sub>UPV</sub>: P dalga hızından, UCS<sub>BCD</sub>: Brazilian çekme deneyinden ve UCS<sub>γ</sub>: Birim hacim ağırlık değerlerinden regresyon analizleri ile elde edilen tahmini UCS değerleri

### 3.3.1. UCS Değerlerinin RMI Sisteminde Kullanımı ve Karşılaştırılması

Eşitlik 9'dan görüleceği gibi RMI puanı eklem parametresi (JP) ile kaya malzemesine ait UCS parametresinin çarpımından elde edilmektedir (Şekil 2.19). Söz konusu eşitlikte bulunan UCS için hem doğrudan (deneysel olarak laboratuvarında ölçülen) hem de farklı indeks deneylerden tahmin edilen UCS değerleri kullanılmış ve RMI değerleri elde edilmiştir (Tablo 3.11). Ölçülen UCS'den tahmin edilen RMI değerlerinin hepsi 1–10 arasında değiştiğinden çalışılan kaya kütleleri “orta” sınıfında yer almıştır

(Tablo 2.28). Bu nedenle tahmini değerlerin 1'in altına düşmesi durumunda kaya kütlelerinin sınıfı "düşük", 10'un üzerine çıkması durumunda ise "yüksek" olacaktır.

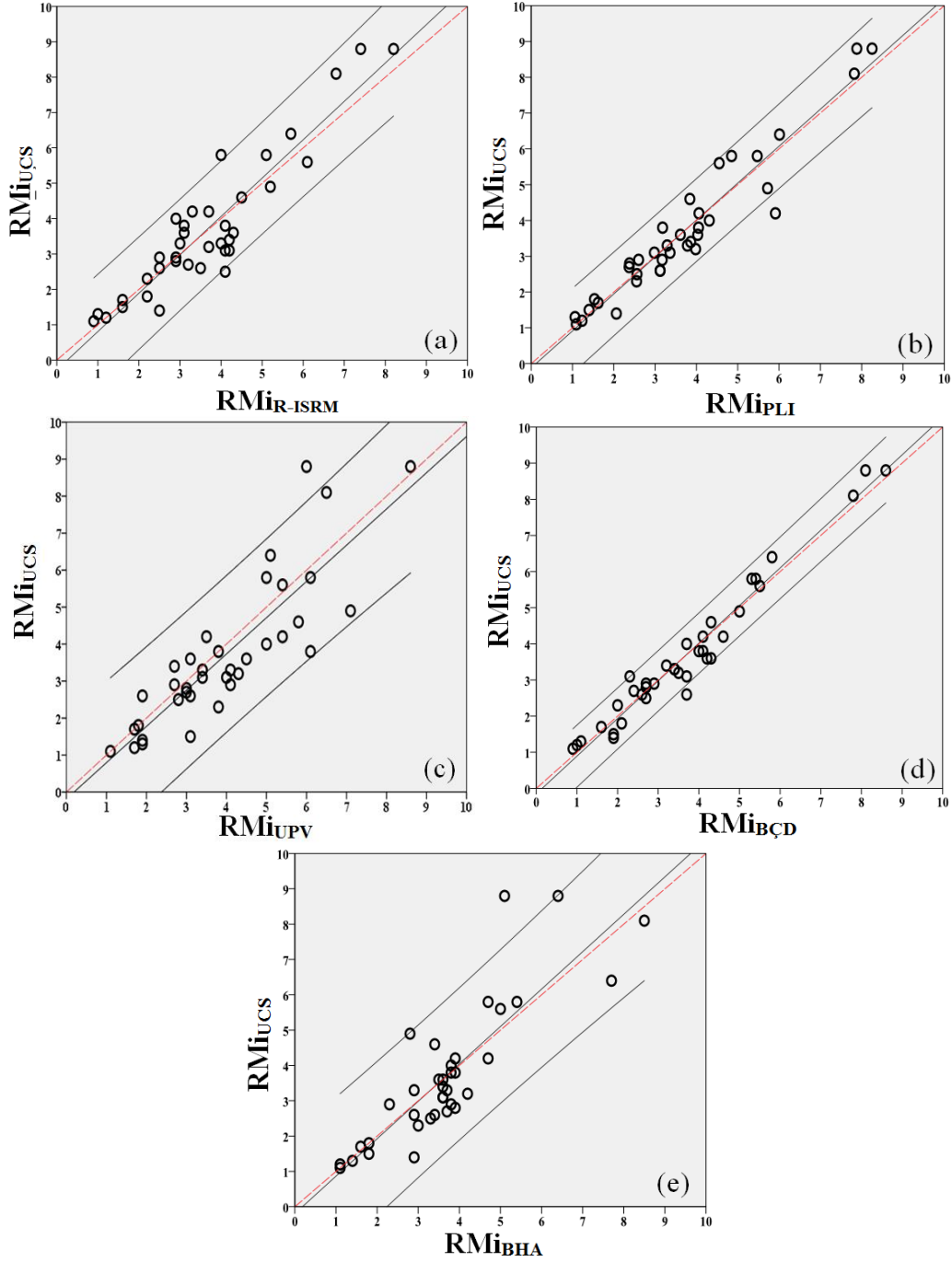
Tablo 3.11. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen R<sub>Mi</sub> değerleri

| Örnek noktası | R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>R-ISR</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>PLI</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>UPV</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>BCD</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>y</sub> |
|---------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1             | 8.83                           | 7.36                             | 7.88                           | 8.65                           | 8.60                           | 5.14                         |
| 2             | 8.12                           | 6.85                             | 7.82                           | 6.50                           | 7.84                           | 8.55                         |
| 3             | 2.52                           | 4.08                             | 2.56                           | 2.84                           | 2.67                           | 3.32                         |
| 4             | 6.37                           | 5.73                             | 6.01                           | 5.13                           | 5.82                           | 7.72                         |
| 5             | 5.80                           | 5.06                             | 5.47                           | 4.96                           | 5.45                           | 5.38                         |
| 6             | 3.33                           | 3.00                             | 3.29                           | 3.37                           | 3.36                           | 3.72                         |
| 7             | 3.63                           | 4.27                             | 3.61                           | 4.48                           | 4.23                           | 3.49                         |
| 8             | 8.79                           | 8.17                             | 8.25                           | 5.96                           | 8.07                           | 6.38                         |
| 9             | 3.56                           | 3.08                             | 4.03                           | 3.09                           | 4.27                           | 3.62                         |
| 10            | 4.24                           | 3.70                             | 5.91                           | 3.54                           | 4.06                           | 3.90                         |
| 11            | 2.56                           | 3.48                             | 3.12                           | 3.07                           | 3.67                           | 3.36                         |
| 12            | 3.09                           | 4.15                             | 3.36                           | 3.43                           | 3.70                           | 3.56                         |
| 13            | 3.16                           | 3.74                             | 3.98                           | 4.29                           | 3.52                           | 4.20                         |
| 14            | 1.43                           | 2.55                             | 2.06                           | 1.94                           | 1.93                           | 2.86                         |
| 15            | 2.33                           | 2.21                             | 2.55                           | 3.81                           | 1.99                           | 3.00                         |
| 16            | 1.26                           | 1.04                             | 1.06                           | 1.85                           | 1.09                           | 1.42                         |
| 17            | 1.24                           | 1.22                             | 1.23                           | 1.66                           | 1.03                           | 1.12                         |
| 18            | 3.14                           | 4.15                             | 2.98                           | 3.98                           | 2.30                           | 3.60                         |
| 19            | 4.17                           | 3.33                             | 4.06                           | 5.44                           | 4.60                           | 4.72                         |
| 20            | 2.92                           | 2.54                             | 3.17                           | 4.09                           | 2.95                           | 3.75                         |
| 21            | 5.78                           | 4.03                             | 4.85                           | 6.12                           | 5.33                           | 4.72                         |
| 22            | 1.09                           | 0.88                             | 1.09                           | 1.08                           | 0.93                           | 1.11                         |
| 23            | 4.85                           | 5.22                             | 5.72                           | 7.13                           | 4.99                           | 2.76                         |
| 24            | 3.96                           | 2.88                             | 4.31                           | 5.04                           | 3.75                           | 3.78                         |
| 25            | 2.55                           | 2.54                             | 3.12                           | 1.91                           | 2.61                           | 2.88                         |
| 26            | 3.35                           | 4.04                             | 3.78                           | 4.13                           | 3.37                           | 2.94                         |
| 27            | 1.52                           | 1.56                             | 1.40                           | 3.10                           | 1.89                           | 1.79                         |
| 28            | 4.58                           | 4.51                             | 3.84                           | 5.77                           | 4.28                           | 3.41                         |
| 29            | 3.36                           | 4.22                             | 3.86                           | 2.70                           | 3.22                           | 3.56                         |
| 30            | 1.74                           | 1.57                             | 1.62                           | 1.69                           | 1.65                           | 1.63                         |
| 31            | 2.77                           | 2.93                             | 2.38                           | 3.04                           | 2.69                           | 3.89                         |
| 32            | 2.69                           | 3.20                             | 2.37                           | 3.02                           | 2.41                           | 3.72                         |
| 33            | 3.82                           | 3.06                             | 4.05                           | 6.07                           | 4.13                           | 3.79                         |
| 34            | 2.88                           | 2.90                             | 2.60                           | 2.70                           | 2.72                           | 2.27                         |
| 35            | 1.77                           | 2.16                             | 1.53                           | 1.84                           | 2.13                           | 1.77                         |
| 36            | 5.64                           | 6.10                             | 4.55                           | 5.41                           | 5.52                           | 5.01                         |
| 37            | 3.79                           | 4.13                             | 3.18                           | 3.84                           | 4.02                           | 3.93                         |

R<sub>Mi</sub><sub>UCS</sub>: Ölçülen UCS'den, R<sub>Mi</sub><sub>R-ISR</sub>: Schmidt sertliğinden (R<sub>ISR</sub>-EV), R<sub>Mi</sub><sub>PLI</sub>: Nokta yükü dayanım indeksinden, R<sub>Mi</sub><sub>UPV</sub>: P dalga hızından, R<sub>Mi</sub><sub>BCD</sub>: Brazilian çekme dayanımı deneyinden ve R<sub>Mi</sub><sub>y</sub>: Birim hacim ağırlığından tahmin edilen UCS değerlerinin R<sub>Mi</sub>'de girdi parametresi olarak kullanımı ile belirlenen tahmini R<sub>Mi</sub> değerleri

Tablo 3.11 incelendiğinde kaya kodu 22'nin temsil ettiği kaya kütlesi için R<sub>Mi</sub><sub>R-ISR</sub> ve R<sub>Mi</sub><sub>BCD</sub> değerleri 1'in kısmen altında (sırasıyla 0.88 ve 0.93) olduğundan "düşük" sınıfına dahil olmuştur. Bu durum aslında kaya kütleleri için daha emniyetli tasarımların yapılmasına neden olacağı ve sadece bir nokta ile sınırlı olduğu için üzerinde durulacak bir konu olmamıştır. Tablo 3.11'de verilen R<sub>Mi</sub> puanlarına göre 10'un üzerinde olan bir değer

hesaplanmamıştır. Tablo 3.11'deki değerleri birbiriyle kıyaslayabilmek için ölçülen ve tahmini UCS'lerden dolayı olarak hesaplanan RMI değerlerinin korelasyon analizleri yapılmıştır (Şekil 3.26, Tablo 3.12). Ayrıca verilerin normal dağılım gösterdiğine dair analiz bulguları ( $P > 0.05$ ) ve korelasyon analiz sonuçları EK-3'te verilmiştir.



Şekil 3.26. Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin RMI sisteminde kullanılması (a-e)

Tablo 3.12. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen R<sub>Mi</sub> değerlerinin korelasyon analizi

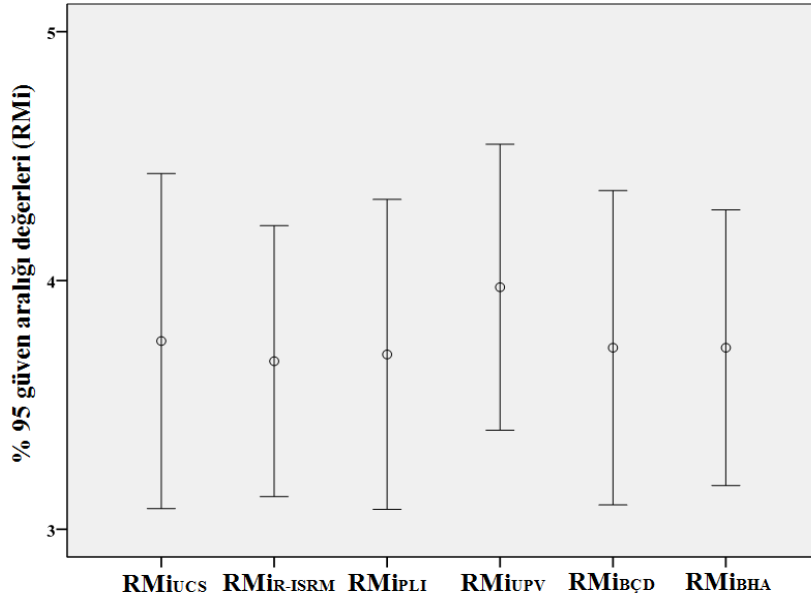
| İlişkili parametreler  | Örnek sayısı | Anlamlılık seviyesi | Korelasyon katsayısı (r) |
|--|--------------|---------------------|--------------------------|
| R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> – R <sub>Mi</sub> <sub>R-ISRM</sub> | 37           | 0.000               | 0.925                    |
| R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> – R <sub>Mi</sub> <sub>PLI</sub>    | 37           | 0.000               | 0.960                    |
| R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> – R <sub>Mi</sub> <sub>UPV</sub>    | 37           | 0.000               | 0.858                    |
| R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> – R <sub>Mi</sub> <sub>BÇD</sub>    | 37           | 0.000               | 0.979                    |
| R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> – R <sub>Mi</sub> <sub>BHA</sub>    | 37           | 0.000               | 0.853                    |

Şekil 3.26a-e'den görüleceği gibi R<sub>Mi</sub><sub>UCS</sub> ve diğer değişkenler (R<sub>Mi</sub><sub>PLI</sub>, R<sub>Mi</sub><sub>UPV</sub>, R<sub>Mi</sub><sub>BÇD</sub>, vb.) arasında oldukça yüksek korelasyon katsayıları ( $r > 85$ ) elde edilmiştir. En yüksek korelasyon katsayısı R<sub>Mi</sub><sub>UCS</sub>–R<sub>Mi</sub><sub>BÇD</sub> değişkenleri arasında elde edilirken ( $r = 0.98$ ), en düşük korelasyon katsayısı ise R<sub>Mi</sub><sub>UCS</sub>–R<sub>Mi</sub><sub>BHA</sub> arasında elde edilmiştir. Bu analizler, hangi yöntemle olursa olsun dolaylı olarak elde edilen UCS'nin R<sub>Mi</sub> tahmininde % 99 güven aralığında güvenle kullanılabileceğini göstermiştir (anlamlılık seviyesi=0.000). Ayrıca R<sub>Mi</sub><sub>UCS</sub> ve diğer değişkenler (R<sub>Mi</sub><sub>PLI</sub>, R<sub>Mi</sub><sub>UPV</sub>, R<sub>Mi</sub><sub>BÇD</sub>, vb.) arasında ANOVA analizleri yapılarak grupların birbirine benzer olup olmadıkları araştırılmıştır (Şekil 3.27, Tablo 3.13). Normal dağılım gösteren grupların aynı zamanda homojen oldukları (P=0.829) anlaşıldığından ANOVA analizlerinde Dunnett 2 yönlü varyans analizi kullanılmıştır (Tablo 3.13). R<sub>Mi</sub><sub>UCS</sub> ve diğer değişkenler (R<sub>Mi</sub><sub>PLI</sub>, R<sub>Mi</sub><sub>UPV</sub>, R<sub>Mi</sub><sub>BÇD</sub>, vb.) arasında ortalama farklılıkları genelde birbirine yakın çıkmıştır. Ancak R<sub>Mi</sub><sub>UPV</sub> puanlarının ortalaması diğerlerine kıyasla daha yüksek çıkmıştır. ANOVA analizine göre ise P= 0.985 yani  $> 0.05$  olduğundan gruplar arasında fark yoktur. Kullanılan indeks deneylerin herhangi birisinden elde edilen tahmini UCS değerlerinin R<sub>Mi</sub>'de girdi parametresi olarak kullanılabilirliği korelasyon ve ANOVA analiz bulgularına göre ortaya çıkmıştır.

Tablo 3.13. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen R<sub>Mi</sub> değerlerinin ANOVA analizi

| Dunnett t (2-yönlü) <sup>a</sup>  |                                | Çoklu karşılaştırmalar  |           |       |                   |           |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------|-------|-------------------|-----------|
| (I) Faktör                        | (J) Faktör                     | Ortalama farkları (I-J) | Std. hata | P     | 95% güven aralığı |           |
|                                   |                                |                         |           |       | Alt sınır         | Üst sınır |
| R <sub>Mi</sub> <sub>R-ISRM</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> | -0.0811                 | 0.4198    | 1.000 | -1.144            | 0.981     |
| R <sub>Mi</sub> <sub>PLI</sub>    | R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> | -0.0541                 | 0.4198    | 1.000 | -1.117            | 1.008     |
| R <sub>Mi</sub> <sub>UPV</sub>    | R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> | 0.2162                  | 0.4198    | 0.981 | -0.846            | 1.279     |
| R <sub>Mi</sub> <sub>BÇD</sub>    | R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> | -0.0270                 | 0.4198    | 1.000 | -1.089            | 1.035     |
| R <sub>Mi</sub> <sub>BHA</sub>    | R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> | -0.0270                 | 0.4198    | 1.000 | -1.089            | 1.035     |

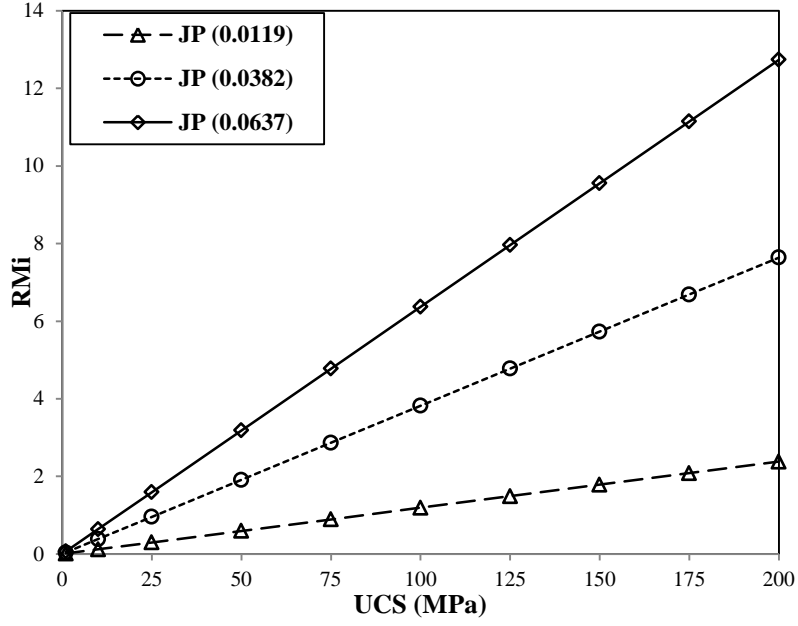
a. Dunnett t-testlerde bir grup kontrol grubu (I) diğerleri ona karşı karşılaştırılır



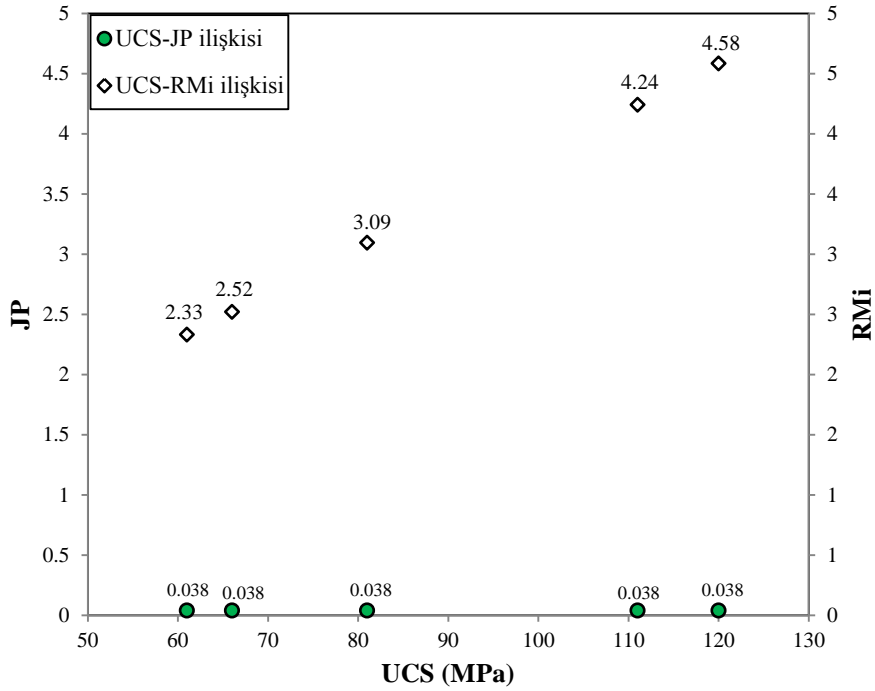
Şekil 3.27. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen RMI verilerinin ANOVA grafiği

### 3.3.1.1. RMI Sisteminde UCS Parametresinin Rolü

RMI sisteminde UCS'nin etkisinin bilinmesi adına farklı yaklaşımlar sunulmuştur. RMI puanı JP ve UCS değerlerinin çarpımından hesaplandığından bu çalışmada kullanılan en düşük, en yüksek ve ortalama JP değerleri sabit tutulmuş ve on adet deneme UCS değerlerinden (1, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200) RMI değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.28). Üç JP değeri için de sonuç aynı olmuştur. Örneğin en yüksek RMI ile en düşük RMI arasında UCS oranı kadar fark vardır (200 kat). Bu durumu daha iyi anlayabilmek için JP–UCS–RMI üçlü grafiği çizilmiştir (Şekil 3.29). Öncelikle tünel güzergahındaki kazı aynalarına ait aynı JP değerine (0.038) karşılık gelen UCS değerleri incelenmiştir. Buna göre; kaya kütlelerinin içerdiği süreksizlik vb. özelliklere göre benzer olan ortamlarda aynı JP değeri elde edilirken, aynı ortamlardan alınan kaya malzemesinin UCS değerleri içsel yapılarına ve petrografik özelliklerine bağlı olarak yaklaşık 60 MPa ile 120 MPa arasında değişim göstermiştir (yaklaşık iki katı). Aynı grafikte aynı JP değeri ile farklı UCS değerlerinin çarpımından elde edilen RMI değerleri (UCS–RMI ilişkisi) görülmektedir. UCS–RMI ilişkisine bakıldığında; UCS değerlerinin artışına paralel olarak aynı JP değeri için yaklaşık iki kat RMI değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak RMI puanı doğrudan UCS değerindeki büyüklük nispetinde etkilendiğinden, UCS parametresinin doğru ve güvenilir tahmin edilmesi RMI sistemine göre büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.28. RMI değerlerinin UCS parametresine bağlı değişimi



Şekil 3.29. UCS parametresinin RMI sınıflaması üzerindeki etkisi

### 3.3.2. UCS Değerlerinin Q Sisteminde Kullanımı ve Karşılaştırılması

RMi ve RMR sisteminde UCS parametresi doğrudan kullanırken, Q sisteminin orijinalinde UCS bir girdi parametresi olarak kullanılmamaktadır (Yılmaz, 2010). Eşitlik

8'den görüleceği gibi Barton (2002) tarafından sisteme MPa cinsinden UCS parametresi ilave edilmiş ve sistem  $Q_c$  (normalize Q) adını almıştır.  $Q_c$ , tünel açma makinalarının performansının ve kaya kütle deformasyon modülünün tahmin edilmesi gibi çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmuştur. Ölçülen ve tahmini UCS değerleri Eşitlik 8'deki  $Q_c$  puanının belirlenmesinde kullanılmış ve hesaplanan  $Q_c$  değerleri Tablo 3.14'de verilmiştir.

Tablo 3.14. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen  $Q_c$  değerleri

| Kaya kodu | UCS (MPa) | Q     | $Q_{c-UCS}$ | $Q_{c-R-ISM}$ | $Q_{c-PLI}$ | $Q_{c-UPV}$ | $Q_{c-BÇD}$ | $Q_{c-BHA}$ |
|-----------|-----------|-------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1         | 197       | 14.76 | 29.08       | 24.25         | 25.96       | 28.48       | 28.34       | 16.93       |
| 2         | 158       | 14.76 | 23.32       | 19.66         | 22.46       | 18.66       | 22.51       | 24.55       |
| 3         | 66        | 14.76 | 9.74        | 15.77         | 9.89        | 10.96       | 10.32       | 12.83       |
| 4         | 146       | 14.93 | 21.80       | 19.61         | 20.58       | 17.55       | 19.93       | 26.43       |
| 5         | 133       | 14.76 | 19.63       | 17.12         | 18.52       | 16.81       | 18.44       | 18.22       |
| 6         | 95        | 7.60  | 7.22        | 6.51          | 7.15        | 7.33        | 7.29        | 8.07        |
| 7         | 115       | 7.60  | 8.74        | 10.26         | 8.69        | 10.78       | 10.18       | 8.40        |
| 8         | 152       | 14.93 | 22.75       | 21.14         | 21.35       | 15.42       | 20.87       | 16.51       |
| 9         | 96        | 14.04 | 13.48       | 11.66         | 15.24       | 11.68       | 16.15       | 13.71       |
| 10        | 111       | 14.76 | 16.38       | 14.31         | 22.85       | 13.69       | 15.68       | 15.06       |
| 11        | 71        | 7.6   | 5.40        | 7.34          | 6.58        | 6.49        | 7.75        | 7.09        |
| 12        | 81        | 10.53 | 8.53        | 11.44         | 9.25        | 9.46        | 10.19       | 9.82        |
| 13        | 75        | 10.53 | 7.90        | 9.36          | 9.96        | 10.72       | 8.79        | 10.51       |
| 14        | 34        | 10.53 | 3.58        | 6.35          | 5.14        | 4.84        | 4.81        | 7.13        |
| 15        | 61        | 7.60  | 4.64        | 4.39          | 5.06        | 7.58        | 3.96        | 5.96        |
| 16        | 87        | 7.60  | 6.61        | 5.48          | 5.56        | 9.71        | 5.73        | 7.42        |
| 17        | 61        | 3.5   | 2.14        | 2.09          | 2.12        | 2.85        | 1.76        | 1.92        |
| 18        | 72        | 14.76 | 10.63       | 14.04         | 10.10       | 13.46       | 7.79        | 12.19       |
| 19        | 66        | 4.68  | 3.07        | 2.45          | 2.99        | 4.00        | 3.38        | 3.47        |
| 20        | 56        | 7.60  | 4.26        | 3.70          | 4.62        | 5.95        | 4.29        | 5.46        |
| 21        | 117       | 10.80 | 12.64       | 8.81          | 10.61       | 13.38       | 11.65       | 10.31       |
| 22        | 92        | 2.23  | 2.05        | 1.65          | 2.05        | 2.02        | 1.74        | 2.08        |
| 23        | 100       | 14.76 | 14.76       | 15.88         | 17.40       | 21.69       | 15.17       | 8.41        |
| 24        | 91        | 10.53 | 9.58        | 6.97          | 10.42       | 12.21       | 9.07        | 9.16        |
| 25        | 75        | 10.13 | 7.60        | 7.56          | 9.29        | 5.68        | 7.78        | 8.59        |
| 26        | 77        | 11.06 | 8.52        | 10.28         | 9.60        | 10.49       | 8.57        | 7.49        |
| 27        | 41        | 7.00  | 2.87        | 2.94          | 2.64        | 5.85        | 3.56        | 3.38        |
| 28        | 120       | 10.53 | 12.64       | 12.44         | 10.59       | 15.91       | 11.79       | 9.39        |
| 29        | 94        | 10.13 | 9.52        | 11.97         | 10.94       | 7.67        | 9.15        | 10.11       |
| 30        | 125       | 7.60  | 9.50        | 8.59          | 8.84        | 9.25        | 9.01        | 8.89        |
| 31        | 68        | 10.53 | 7.16        | 7.59          | 6.16        | 7.86        | 6.95        | 10.05       |
| 32        | 66        | 11.07 | 7.31        | 8.71          | 6.46        | 8.21        | 6.55        | 10.11       |
| 33        | 107       | 11.07 | 11.84       | 9.48          | 12.56       | 18.82       | 12.82       | 11.76       |
| 34        | 132       | 7.60  | 10.03       | 10.09         | 9.08        | 9.41        | 9.48        | 7.90        |
| 35        | 87        | 7.60  | 6.61        | 8.04          | 5.70        | 6.86        | 7.94        | 6.61        |
| 36        | 110       | 10.53 | 11.58       | 12.52         | 9.34        | 11.11       | 11.33       | 10.28       |
| 37        | 90        | 1.75  | 1.58        | 1.72          | 1.32        | 1.60        | 1.67        | 1.63        |

$Q_{c-UCS}$ : Ölçülen UCS'den,  $Q_{c-R-ISM}$ : Schmidt sertliğinden ( $R_{ISM-EV}$ ),  $Q_{c-PLI}$ : Nokta yükü dayanım indeksinden,  $Q_{c-UPV}$ : P dalga hızından,  $Q_{c-BÇD}$ : Brazilian çekme dayanımı deneyinden ve  $Q_{c-BHA}$ : Birim hacim ağırlığından tahmin edilen UCS değerlerinin  $Q_c$ 'de girdi parametresi olarak kullanımı ile belirlenen  $Q_c$  değerleri

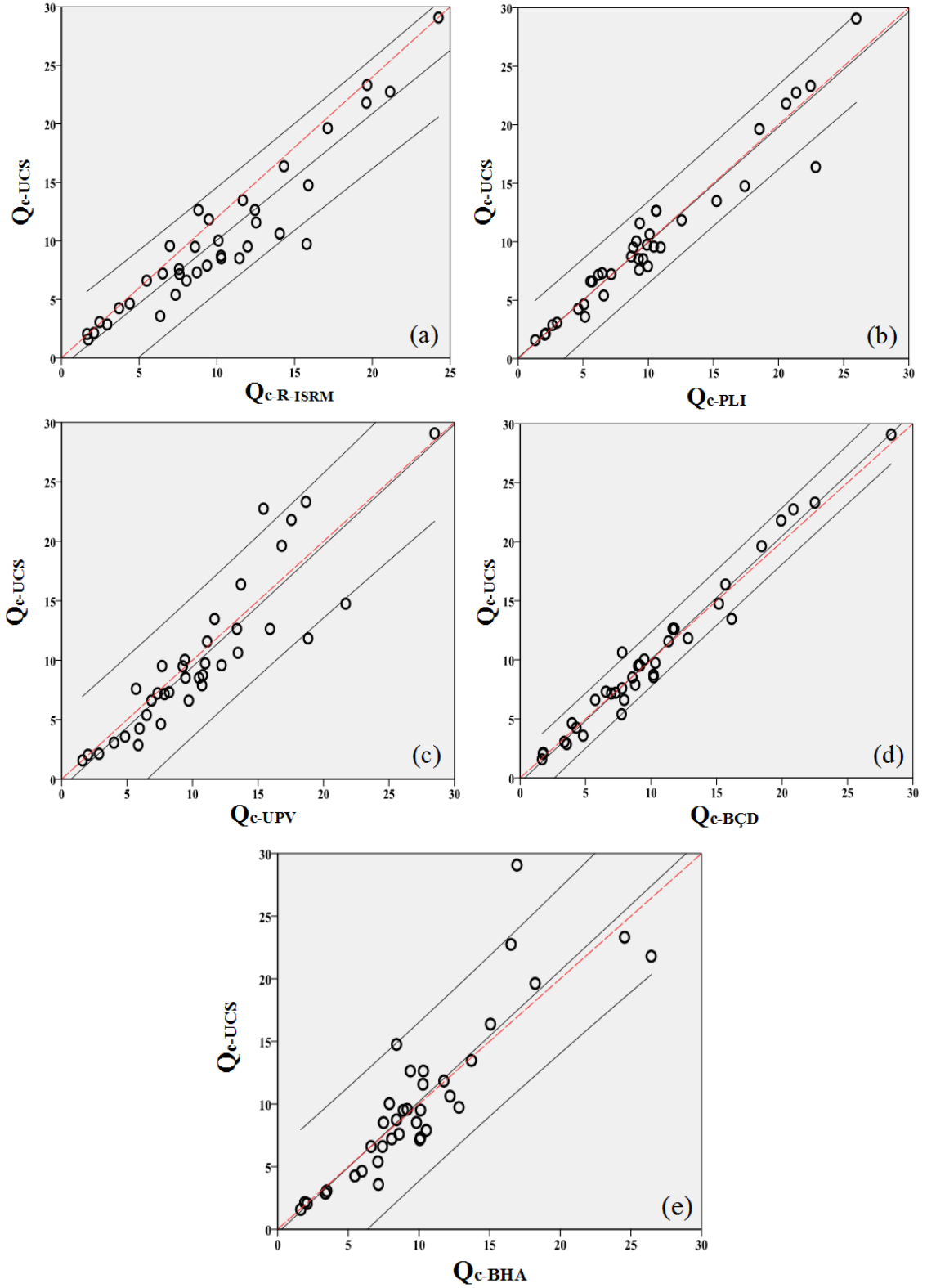
Tablo 3.14'e ayrıca UCS ve Q değerleri de ilave edilmiştir. İki farklı  $Q_c$  değerlerinin olduğu görülmektedir. UCS 100 MPa olduğunda Q ile  $Q_c$  birbirine eşit olmaktadır (Tablo 3.14, kaya kodu 23). Kaya malzemelerine ait UCS 100 MPa değerinden küçük olduğunda  $Q > Q_c$ , büyük olduğunda  $Q < Q_c$  durumu oluşmaktadır. Tablo 3.14'deki değerleri birbiriyle kıyaslayabilmek için  $Q_{c-UCS}$  ile diğer değişkenler ( $Q_{c-R-ISM}$ ,  $Q_{c-PLI}$ , vb.) arasında korelasyon analizleri yapılmıştır (Şekil 3.30a-e, Tablo 3.15). Ayrıca verilerin normal dağılım gösterdiğine dair analiz bulguları (anlamlılık seviyesi  $> 0.05$ ) ve korelasyon analiz sonuçları EK-4'te verilmiştir. Şekil 3.30a-e'den görüleceği gibi  $Q_{c-UCS}$  ile diğer değişkenler ( $Q_{c-R-ISM}$ ,  $Q_{c-PLI}$ , vb.) arasında yüksek korelasyon katsayıları ( $r > 0.88$ ) elde edilmiştir. RMI sisteminde olduğu gibi en yüksek korelasyon katsayısı ( $r = 0.99$ )  $Q_{c-UCS} - Q_{c-BÇD}$  arasında elde edilirken, en düşük korelasyon katsayısı ise ( $r = 0.88$ )  $Q_{c-UCS} - Q_{c-BHA}$  değişkenleri arasında elde edilmiştir. Korelasyon analizleri diğer indeks deneylerden dolayı olarak belirlenen UCS değerlerinin  $Q_c$  puanının tahmininde güvenilir olduğunu göstermiştir.

Tablo 3.15. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen  $Q_c$  değerlerinin korelasyon analizi

| İlişkili parametreler     | Örnek sayısı | Anlamlılık seviyesi | Korelasyon katsayısı (r) |
|---------------------------|--------------|---------------------|--------------------------|
| $Q_{c-UCS} - Q_{c-R-ISM}$ | 37           | 0.000               | 0.943                    |
| $Q_{c-UCS} - Q_{c-PLI}$   | 37           | 0.000               | 0.966                    |
| $Q_{c-UCS} - Q_{c-UPV}$   | 37           | 0.000               | 0.901                    |
| $Q_{c-UCS} - Q_{c-BÇD}$   | 37           | 0.000               | 0.985                    |
| $Q_{c-UCS} - Q_{c-BHA}$   | 37           | 0.000               | 0.883                    |

Varyansların homojenlik testine göre P değeri  $0.937 > 0.05$  olduğundan grupların varyansları homojen/benzer/eşittir. ANOVA tablosuna göre ise  $P = 0.996$  yani  $> 0.05$  olduğundan gruplar arasında fark yoktur. ANOVA analizi normalde gruplar arasında fark yok deyip bitirilebilir ancak bu çalışmada grupların birbirine ne kadar benzediğini veya ne kadar farklı olduğunu görmek için analize devam edilmiştir. Eğer anlam düzeyi değeri  $< 0.05$  olsaydı, "en az 1 grup diğerlerinden farklıdır" anlamı çıkmış olacaktı ve Post. Hoc. Testlerine (homojen olmayan varyans analizlerine) geçilmesi gerekirdi.  $Q_{c-UCS}$  ile diğer değişkenler ( $Q_{c-R-ISM}$ ,  $Q_{c-PLI}$ , vb.) homojen olduğundan RMI sisteminde olduğu gibi  $Q_{c-UCS}$  değişkeninin kontrol grup olarak değerlendirileceği Dunnett analizi (ANOVA) yapılmıştır (Tablo 3.16 ve Şekil 3.31). Kontrol grubuna göre ortalaması en farklı olan değişken  $Q_{c-UPV}$  iken, en az farklı olan değişken ise  $Q_{c-PLI}$  olmuştur (Tablo 3.16). P değerleri bütün gruplar için neredeyse 1.000 olduğundan bütün gruplar birebir aynıdır anlamı çıkmaktadır.



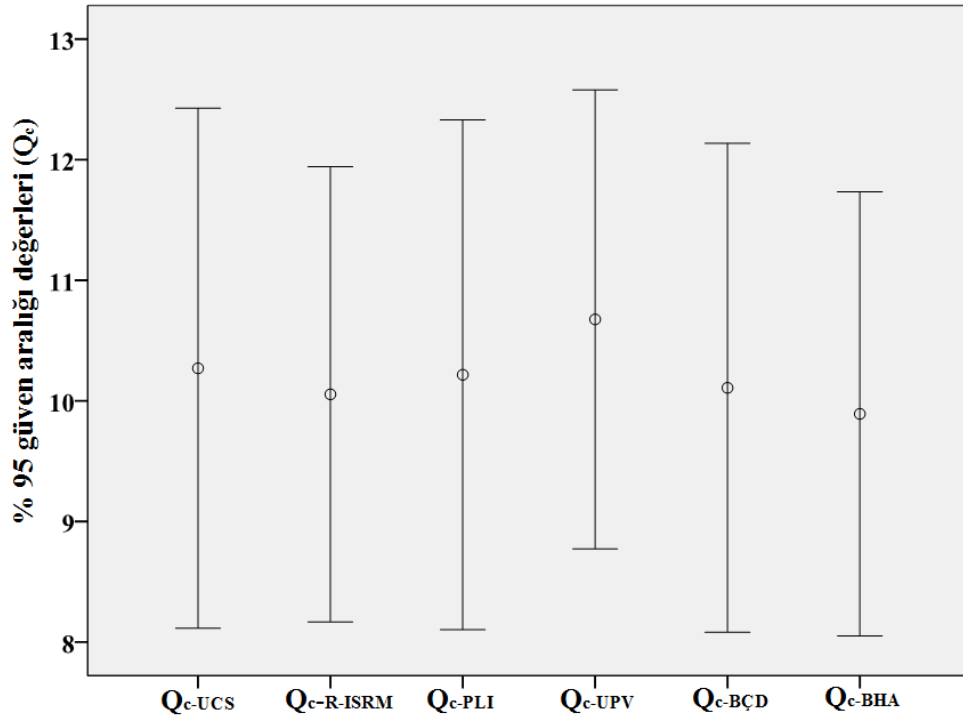


Şekil 3.30. Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin  $Q_c$  sisteminde kullanılması (a-e)

Tablo 3.16. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen  $Q_c$  değerlerinin ANOVA analizi

| Dunnett t (2-yönlü) <sup>a</sup> |             | Çoklu karşılaştırmalar  |           |       |                   |           |
|----------------------------------|-------------|-------------------------|-----------|-------|-------------------|-----------|
| (I) Faktör                       | (J) Faktör  | Ortalama farkları (I-J) | Std. hata | P     | 95% güven aralığı |           |
|                                  |             |                         |           |       | Alt sınır         | Üst sınır |
| $Q_{c-R-ISR}$                    | $Q_{c-UCS}$ | -0.216                  | 1.389     | 1.000 | -3.73             | 3.30      |
| $Q_{c-PLI}$                      | $Q_{c-UCS}$ | -0.054                  | 1.389     | 1.000 | -3.57             | 3.46      |
| $Q_{c-UPV}$                      | $Q_{c-UCS}$ | 0.405                   | 1.389     | 0.999 | -3.11             | 3.92      |
| $Q_{c-BCD}$                      | $Q_{c-UCS}$ | -0.162                  | 1.389     | 1.000 | -3.68             | 3.35      |
| $Q_{c-BHA}$                      | $Q_{c-UCS}$ | -0.378                  | 1.389     | 0.999 | -3.89             | 3.14      |

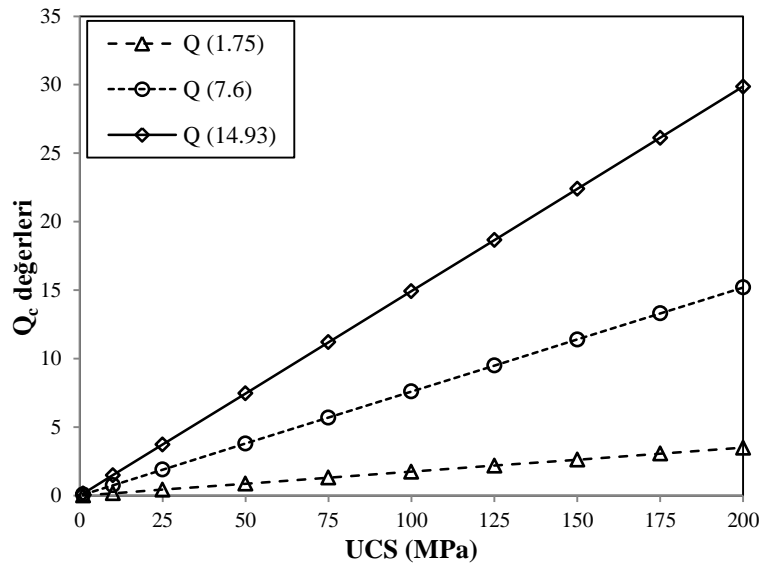
a. Dunnett t-testlerde bir grup kontrol grubu (I) diğerleri ona karşı karşılaştırılır

Şekil 3.31. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen  $Q_c$  verilerinin ANOVA grafiği

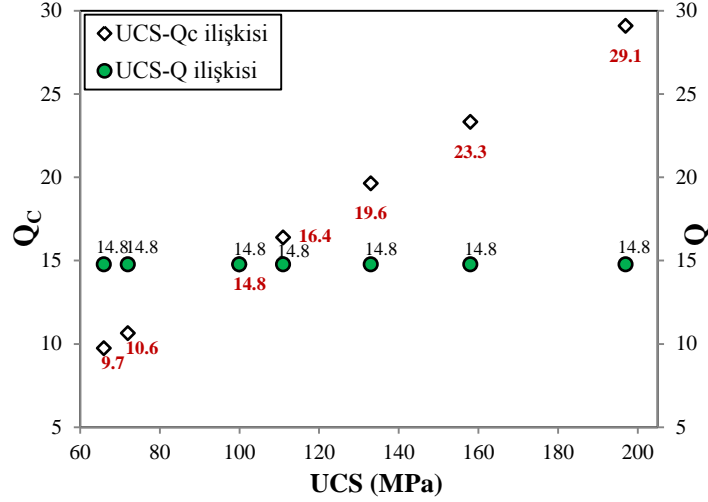
### 3.3.2.1. Q Sisteminde UCS Parametresinin Rolü

RMi sisteminde olduğu gibi kullanılan sınıflamada UCS'nin etkisinin bilinmesi adına farklı yaklaşımlar sunulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama  $Q$  değerleri sabit tutularak yukarıda olduğu gibi (Eşitlik 8) on adet farklı deneme UCS değerleri (1, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200) ile çarpımından  $Q_c$  değerleri elde

edilmiştir (Şekil 3.32). Üç Q değeri için de sonuç aynı olmuştur. Örneğin en yüksek  $Q_c$  ile en düşük  $Q_c$  arasında UCS oranı kadar fark vardır (200 kat). Bu durumu daha iyi anlayabilmek için  $Q_c$ -UCS-Q üçlü grafiği çizilmiştir (Şekil 3.33). Tünel güzergahındaki 7 kazı aynasına ait aynı Q değerine (14.8) karşılık gelen UCS değerleri incelenmiştir. Buna göre; kaya kütlelerinin içerdiği süreksizlik vb. özelliklere göre benzer olan ortamlarda aynı Q değeri elde edilirken, aynı ortamlardan alınan kaya malzemesinin UCS değerleri içsel yapılarına ve petrografik özelliklerine bağlı olarak yaklaşık 65 MPa ila 200 MPa arasında değişim göstermiştir (yaklaşık üç katı). Aynı grafikte aynı Q değeri ile farklı UCS/100 değerlerinin çarpımından elde edilen  $Q_c$  değerleri (UCS- $Q_c$  ilişkisi) görülmektedir. UCS- $Q_c$  ilişkisine bakıldığında; UCS değerlerinin artışına paralel olarak aynı Q değeri için yaklaşık üç kat  $Q_c$  değerleri elde edilmiştir. RMi sisteminden farklı olarak yukarıda da ifade edildiği gibi kaya malzemesinin dayanım değeri 100 MPa'ın altında olduğunda  $Q_c$  değeri Q değerinden daha düşük olmaktadır.  $Q_c$  ve Q değeri kaya malzemesinin dayanımı 100 MPa olduğunda birbirine eşit olmaktadır. Diğer bir ifade ile kaya malzemesi dayanımı 100 MPa olduğunda  $Q_c$  değerine bir etkide bulunmamakta ancak UCS parametresi 100 MPa değerinin altında olduğunda  $Q_c$  sistemini negatif yönde etkilemektedir (37 noktanın 23'ünde (% 62'sinde)). Sonuç olarak  $Q_c$  puanı RMi sisteminde olduğu gibi doğrudan UCS değerindeki büyüklük nispetinde etkilenmektedir. Q sisteminde UCS parametresi olmadığından,  $Q_c$  parametresi Q parametresini açıklayamamaktadır.



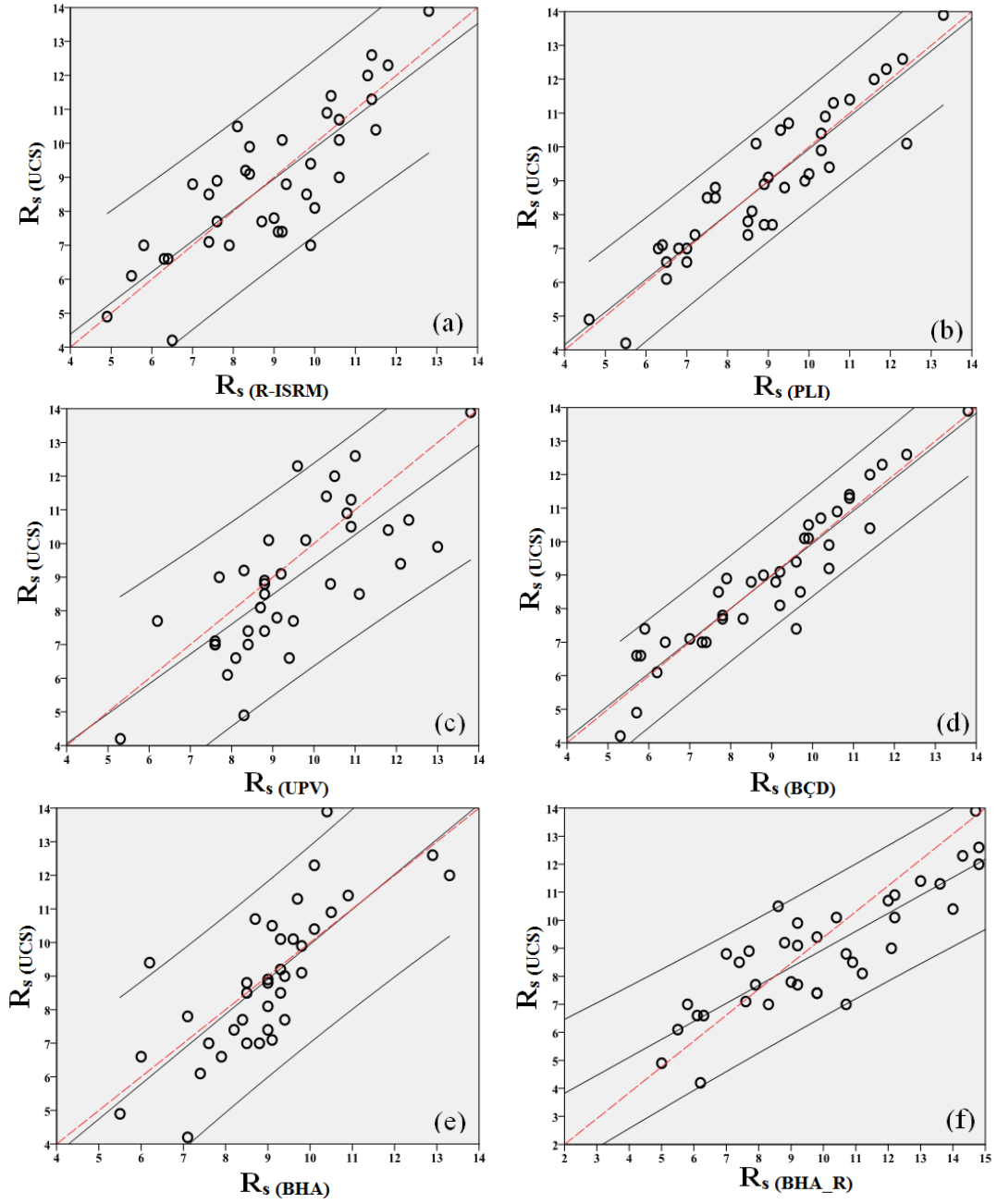
Şekil 3.32.  $Q_c$  değerlerinin UCS parametresine bağlı değişimi



Şekil 3.33. UCS parametresinin Q sınıflaması üzerindeki etkisi

### 3.3.3. RMR Sisteminde Dayanım Puanının Belirlenmesi

Şekil 2.17’de görüldüğü üzere RMR sisteminde önemli girdi parametrelerinden biri olan kaya malzemesi dayanım puanı ( $R_s$ ) UCS parametresinden belirlenmektedir. Bu bölümde  $R_s$ , hem ölçülen hem de indeks deneylerden dolaylı olarak belirlenen UCS değerlerinden elde edilmiştir. Yukarıda (R<sub>M</sub> ve Q) kullanılan indeks deneylere (R, UPV, BÇD vb.) ilave olarak, R ve BHA değerlerini kullanarak Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen abak UCS tahmininde kullanılmıştır. Literatürde söz konusu abağın kullanımı ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır (Karaman vd., 2011b; Anikoh ve Olaleye, 2013; Karaman vd., 2013b). Ölçülen ve tahmini  $R_s$  puanları arasında yapılan korelasyon analizleri bütün yöntemlerin dayanım tahmininde güvenilir olduğunu göstermiştir (Şekil 3.34, Tablo 3.17, EK-5). Ölçülen ve tahmini dayanım puanları Tablo 3.18’de verilmiştir. Varyansların homojenlik testine göre P değeri  $0.003 < 0.05$  olduğundan grupların varyansları homojen değildir. ANOVA tablosuna göre ise  $P=0.283$  yani  $> 0.05$  olduğundan gruplar arasında fark yoktur. Veriler homojen olmadığı için Post. Hoc. Testlerinden Tamhane testi yapılmıştır (Tablo 3.19, Şekil 3.35). Ölçülen ve tahmini değerler arasındaki ortalama farkların en yüksek anlamlılık seviyesinin ise en düşük olduğu değerler Deere ve Miller (1966) abağından elde edilmiştir. Söz konusu abakta belirtilen negatif değerler kadar UCS değerleri düşürüldüğünde araştırmacıların kısmen daha güvenli analizler yapması mümkün olmaktadır (Karaman vd., 2013b). Şekil 3.35, Tablo 3.19’daki bulguları desteklemektedir. P değerlerine göre grupların benzer oldukları anlaşılmıştır (Tablo 3.19).



Şekil 3.34. Ölçülen ve tahmini dayanım puanlarının korelasyon grafikleri (a–f)

Tablo 3.17. Ölçülen ve tahmini dayanım puanı değerlerinin korelasyon analizi

| İlişkili parametreler                   | Örnek sayısı | Anlamlılık seviyesi | Korelasyon katsayısı (r) |
|---|--------------|---------------------|--------------------------|
| $R_s(\text{UCS}) - R_s(\text{R-ISRMM})$ | 37           | 0.000               | 0.821                    |
| $R_s(\text{UCS}) - R_s(\text{PLI})$     | 37           | 0.000               | 0.919                    |
| $R_s(\text{UCS}) - R_s(\text{UPV})$     | 37           | 0.000               | 0.745                    |
| $R_s(\text{UCS}) - R_s(\text{BÇD})$     | 37           | 0.000               | 0.937                    |
| $R_s(\text{UCS}) - R_s(\text{BHA})$     | 37           | 0.000               | 0.763                    |
| $R_s(\text{UCS}) - R_s(\text{BHA-R})$   | 37           | 0.000               | 0.846                    |

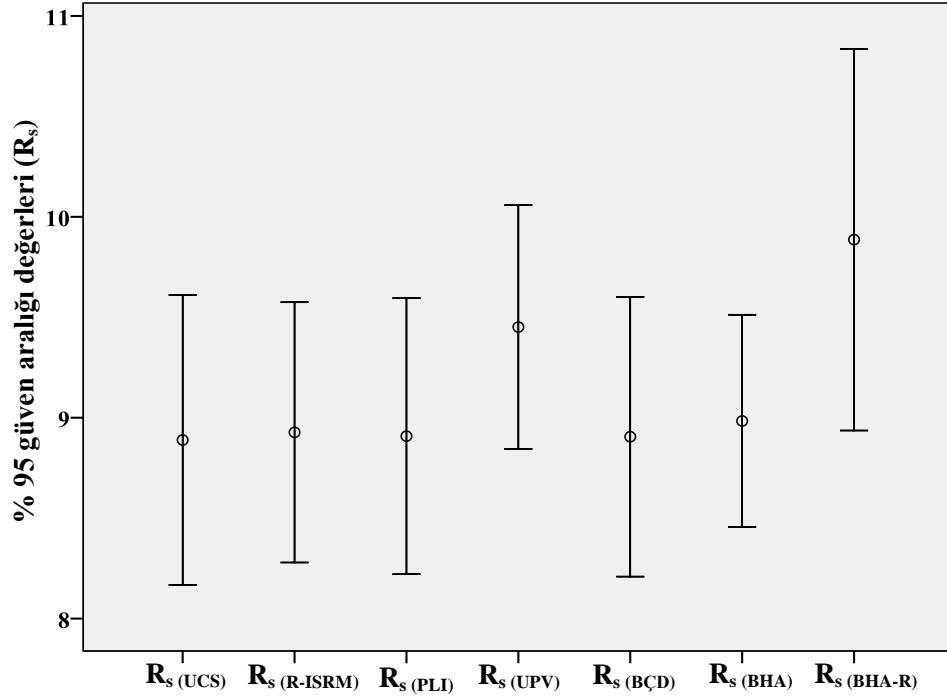
Tablo 3.18. Ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen  $R_s$  değerleri

| Kaya kodu | $R_s$ (UCS) | $R_s$ (R-ISRM) | $R_s$ (PLI) | $R_s$ (UPV) | $R_s$ (BÇD) | $R_s$ (BHA) | $R_s$ (BHA-R) |
|-----------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 1         | 13.9        | 12.8           | 13.3        | 13.8        | 13.8        | 10.4        | 14.7          |
| 2         | 12.6        | 11.4           | 12.3        | 11.0        | 12.3        | 12.9        | 14.8          |
| 3         | 7.0         | 9.9            | 7.0         | 7.6         | 7.3         | 8.5         | 10.7          |
| 4         | 12.0        | 11.3           | 11.6        | 10.5        | 11.4        | 13.3        | 14.8          |
| 5         | 11.4        | 10.4           | 11.0        | 10.3        | 10.9        | 10.9        | 13.0          |
| 6         | 9.1         | 8.4            | 9.0         | 9.2         | 9.2         | 9.8         | 9.2           |
| 7         | 10.4        | 11.5           | 10.3        | 11.8        | 11.4        | 10.1        | 14.0          |
| 8         | 12.3        | 11.8           | 11.9        | 9.6         | 11.7        | 10.1        | 14.3          |
| 9         | 9.2         | 8.3            | 10.0        | 8.3         | 10.4        | 9.3         | 8.8           |
| 10        | 10.1        | 9.2            | 12.4        | 8.9         | 9.8         | 9.6         | 10.4          |
| 11        | 7.4         | 9.2            | 8.5         | 8.4         | 9.6         | 9.0         | 9.8           |
| 12        | 8.1         | 10.0           | 8.6         | 8.7         | 9.2         | 9.0         | 11.2          |
| 13        | 7.7         | 8.7            | 9.1         | 9.5         | 8.3         | 9.4         | 9.2           |
| 14        | 4.2         | 6.5            | 5.5         | 5.3         | 5.3         | 7.1         | 6.2           |
| 15        | 6.6         | 6.3            | 7.0         | 9.4         | 5.8         | 7.9         | 6.3           |
| 16        | 8.5         | 7.4            | 7.5         | 11.1        | 7.7         | 9.3         | 7.4           |
| 17        | 6.6         | 6.4            | 6.5         | 8.1         | 5.7         | 6.0         | 6.1           |
| 18        | 7.4         | 9.1            | 7.2         | 8.8         | 5.9         | 8.2         | 9.8           |
| 19        | 7.0         | 5.8            | 6.8         | 8.4         | 7.4         | 7.6         | 5.8           |
| 20        | 6.1         | 5.5            | 6.5         | 7.9         | 6.2         | 7.4         | 5.5           |
| 21        | 10.5        | 8.1            | 9.3         | 10.9        | 9.9         | 9.1         | 8.6           |
| 22        | 8.9         | 7.6            | 8.9         | 8.8         | 7.9         | 9.0         | 7.7           |
| 23        | 9.4         | 9.9            | 10.5        | 12.1        | 9.6         | 6.2         | 9.8           |
| 24        | 8.8         | 7.0            | 9.4         | 10.4        | 8.5         | 8.5         | 7.0           |
| 25        | 7.7         | 7.6            | 8.9         | 6.2         | 7.8         | 8.4         | 7.9           |
| 26        | 7.8         | 9.0            | 8.5         | 9.1         | 7.8         | 7.1         | 9.0           |
| 27        | 4.9         | 4.9            | 4.6         | 8.3         | 5.7         | 5.5         | 5.0           |
| 28        | 10.7        | 10.6           | 9.5         | 12.3        | 10.2        | 8.7         | 12.0          |
| 29        | 9.0         | 10.6           | 9.9         | 7.7         | 8.8         | 9.4         | 12.1          |
| 30        | 10.9        | 10.3           | 10.4        | 10.8        | 10.6        | 10.5        | 12.2          |
| 31        | 7.1         | 7.4            | 6.4         | 7.6         | 7.0         | 9.1         | 7.6           |
| 32        | 7.0         | 7.9            | 6.3         | 7.6         | 6.4         | 8.8         | 8.3           |
| 33        | 9.9         | 8.4            | 10.3        | 13.0        | 10.4        | 9.8         | 9.2           |
| 34        | 11.3        | 11.4           | 10.6        | 10.9        | 10.9        | 9.7         | 13.6          |
| 35        | 8.5         | 9.8            | 7.7         | 8.8         | 9.7         | 8.5         | 10.9          |
| 36        | 10.1        | 10.6           | 8.7         | 9.8         | 9.9         | 9.3         | 12.2          |
| 37        | 8.8         | 9.3            | 7.7         | 8.8         | 9.1         | 9.0         | 10.7          |

$R_s$  (UCS): Ölçülen UCS'den,  $R_s$  (R-ISRM): Schmidt çekicinden ( $R_{ISRM, EV}$ ),  $R_s$  (PLI): PLI'den,  $R_s$  (UPV): UPV'den,  $R_s$  (BÇD): BÇD'den,  $R_s$  (BHA): BHA'dan ve  $R_s$  (BHA-R): Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen abaktan tahmin edilen UCS'den belirlenen dayanım puanları

Tablo 3.19. Ölçülen dayanım değerleri ile tahmini değerlerin kıyaslanması

| Tamhane     |                | Çoklu karşılaştırma  |               |       |                   |           |
|-------------|----------------|----------------------|---------------|-------|-------------------|-----------|
| (I) Faktör  | (J) Faktör     | Ortalama farkı (I-J) | Standart hata | P     | %95 Güven aralığı |           |
|             |                |                      |               |       | Alt sınır         | Üst sınır |
| $R_s$ (UCS) | $R_s$ (R-ISRM) | -0.0378              | 0.4779        | 1.000 | -1.540            | 1.464     |
|             | $R_s$ (PLI)    | -0.0189              | 0.4911        | 1.000 | -1.562            | 1.524     |
|             | $R_s$ (UPV)    | -0.5622              | 0.4646        | 0.996 | -2.023            | 0.899     |
|             | $R_s$ (BÇD)    | -0.0162              | 0.4942        | 1.000 | -1.569            | 1.537     |
|             | $R_s$ (BHA)    | -0.0946              | 0.4409        | 1.000 | -1.484            | 1.295     |
|             | $R_s$ (BHA-R)  | -0.9973              | 0.5881        | 0.876 | -2.850            | 0.855     |



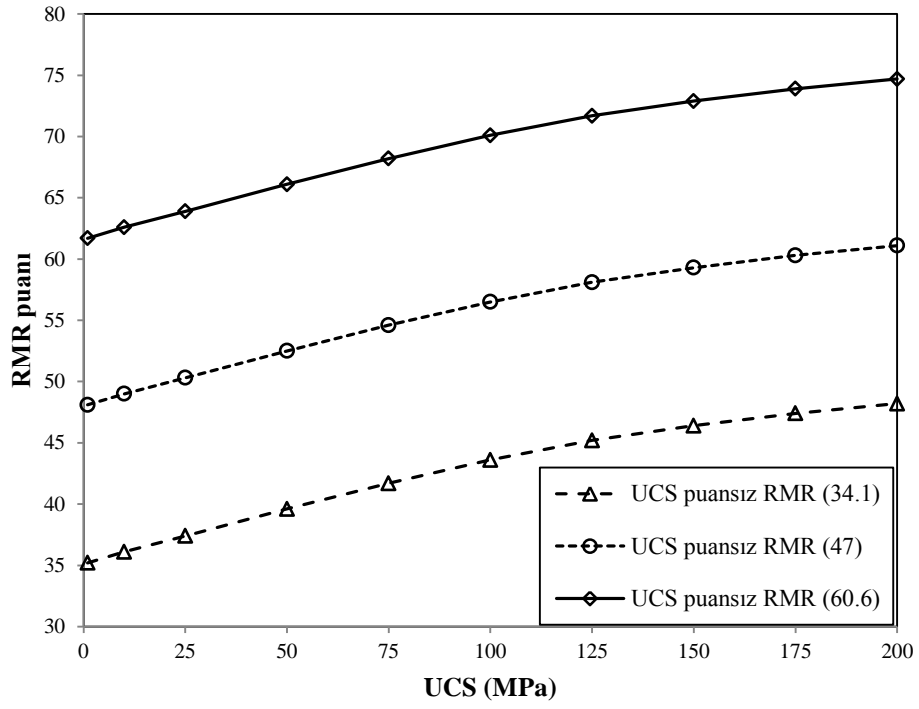
Şekil 3.35. Ölçülen ve tahmini dayanım puanlarının ANOVA analizi

Sülükçü ve Ulusay (2001) ve Yılmaz (2010) tarafından sırasıyla  $BPI_c$  ve CSI parametrelerinden RMR sisteminde dayanım puanının dolaylı olarak belirlenmesine yönelik grafikler önerilmiştir (Şekil 1.3, Şekil 1.4). Sülükçü ve Ulusay (2001) tarafından UCS parametresi için karot alımının mümkün olmadığı problemlili kaya ortamlarında kullanmak üzere dayanım puan grafiği önerilmiştir. Yılmaz (2010) tarafından ise 6 farklı kayaç (granit, andezit, bazalt, kumtaşı, jips ve mermer) verileri (2.4–28.6 kN/cm) kullanılmış ve bütün kayaçlara ve dayanım aralığına göre (0–40 kN/cm) bir abak geliştirilmiştir. Ancak, çalışmada kullanılan UCS değerleri 22–189 MPa aralığında değişmektedir. Dayanım aralığına ve kullanılan kaya tiplerine bakıldığında genellikle UCS için yüksek kalitede karot alımının mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Oysaki doğada yaygın bulunan diğer kayaçlardan kireçtaşı, dasit, tuf, kil taşı ve örnek alımının problem olduğu piroklastik kayaçların da bu çalışmada kullanılması yerinde olacaktır. Yılmaz (2010) tarafından önerilen grafiğin 22–189 MPa aralığının dışındaki dayanıma sahip kayaçları temsil etmeyebileceği anlaşılmaktadır.

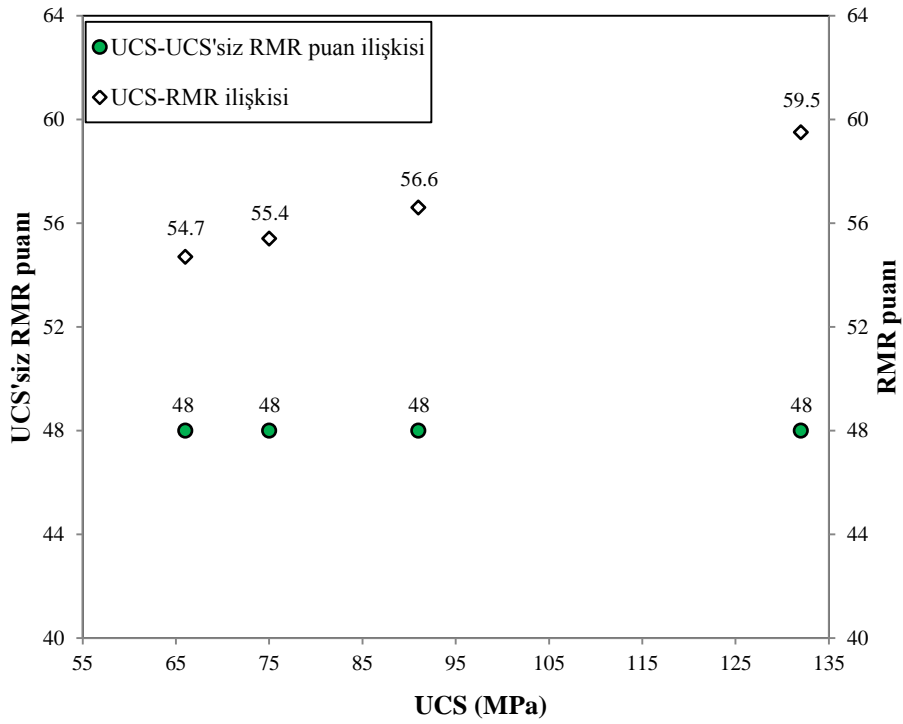
### 3.3.3.1. RMR Sisteminde UCS Parametresinin Rolü

RMR sisteminde UCS etkisi bilinmesine karşın bu çalışmada bu konuda detaylı olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan en düşük, en yüksek ve ortalama kaya kütlelerinin içerdiği süreksizlik özellikleri puanları (UCS'nin dikkate alınmadığı) sabit tutarak on adet farklı deneme UCS değerlerinin (1, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200) dayanım puanları hesaplanarak RMR değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.36). R<sub>Mi</sub> ve Q sisteminde UCS doğrudan etkili olduğundan en yüksek ve en düşük UCS (200 – 1 MPa) oranında R<sub>Mi</sub> ve Q puanları elde edilmekteydi. RMR sisteminde ise UCS toplam puan üzerinde en fazla % 15 etkili olduğundan diğer sistemlerden farklıdır. Ayrıca diğer sistemlerde sabit tutulan 3 parametreye UCS aynı oranda etki ederken RMR sisteminde 60.6 sabiti için en büyük UCS ile en küçük UCS oranı 1.2, 47 sabiti için aynı oran değeri 1.27 ve 34.1 sabiti için ise bu oran 1.37'ye çıkmaktadır (Şekil 3.36). Diğer sistemlerde en küçük puan ile en büyük puan arasında UCS oranı (200/1) olan 200 değeri bulunurken RMR sisteminde bu oran 1.2–1.4 aralığında değişmektedir. Aynı dolaylı yöntem ile elde edilen UCS parametresinin diğer sistemlere (R<sub>Mi</sub> ve Q<sub>c</sub>) etkisi fazla iken RMR sistemine etkisi çok daha azdır. Ayrıca çalışma sahasındaki veriler kullanılarak UCS'siz RMR puanı, UCS ve RMR puanlarını içeren üçlü bir grafik çizilmiştir (Şekil 3.37). Öncelikle tünel güzergahındaki kazı aynalarına ait süreksizlik ve yer altı suyu toplam puanlarının aynı (48) olduğu noktalara karşılık gelen UCS değerleri incelenmiştir. Buna göre; kaya kütlelerinin içerdiği süreksizlik vb. özelliklere göre benzer olan ortamlarda aynı puan elde edilirken, aynı ortamlardan alınan kaya malzemesinin UCS değerleri içsel yapılarına ve petrografik özelliklerine bağlı olarak yaklaşık 66 MPa ila 132 MPa arasında değişim göstermiştir (iki katı). Aynı grafikte aynı puanların farklı UCS değerleri ile toplamından elde edilen temel RMR değerleri (UCS–RMR ilişkisi) görülmektedir. UCS–RMR ilişkisine bakıldığında; UCS değerleri arttıkça RMR puanlarının da arttığı görülmektedir. En büyük RMR ile en düşük RMR oranı 1.24 olmuştur. Aynı oran UCS değerlerinde (132/66) 2'dir. Sonuç olarak RMR üzerindeki UCS etkisi araştırıldığından R<sub>Mi</sub> ve Q<sub>c</sub> sistemlerine kıyasla daha düşük oranda bir fark görülmüştür.





Şekil 3.36. RMR puanının UCS parametresine bağlı değişimi



Şekil 3.37. UCS parametresinin RMR sınıfı üzerindeki etkisi

### 3.3.3.2. PLI'den Dayanım Puanının Belirlenmesi

Ünal (1996) tarafından kil içeren, zayıf ve anizotropik kayalara yönelik önerilen M–RMR sistemine PLI'den dayanım puan grafiği eklenmiştir. Önerilen grafikte PLI değerlerinin en yüksek yaklaşık 10 MPa civarında olduğu ve bu değerden daha yüksek dayanıma sahip kayalar için dayanım puanının 15 olması gerektiği anlaşılmaktadır. Oysaki literatürde PLI değerlerinin 0.1–17.8 MPa aralığında değiştiği bilinmektedir (Kahraman, 2001; Karaman vd., 2015a; Kaya ve Karaman, 2015). Ünal (1996) PLI değerlerinin düşük olduğu zayıf kayalar üzerinde çalıştığı için, bu nedenle önerilen grafik tüm kayaları temsil etmeyebilir. Önerilen grafikte ilgili bir diğer olumsuzluk ise  $k$  (UCS/PLI) değerinin Broch ve Franklin (1972) ve Bieniawski (1989) tarafından önerildiği gibi yaklaşık 24 olarak dikkate alınmasıdır. Hâlbuki  $k$  değerleri çoğunlukla 10–20 arasında değişmektedir (Sülükçü ve Ulusay, 2001; Kahraman, 2014, Kaya and Karaman, 2015). Bu nedenle 24 katsayısına göre oluşturulan grafik daha yüksek dayanım puanının değerlendirmesini gerektireceğinden araştırmacıların güvenli analiz yapmalarını zorlaştıracaktır.

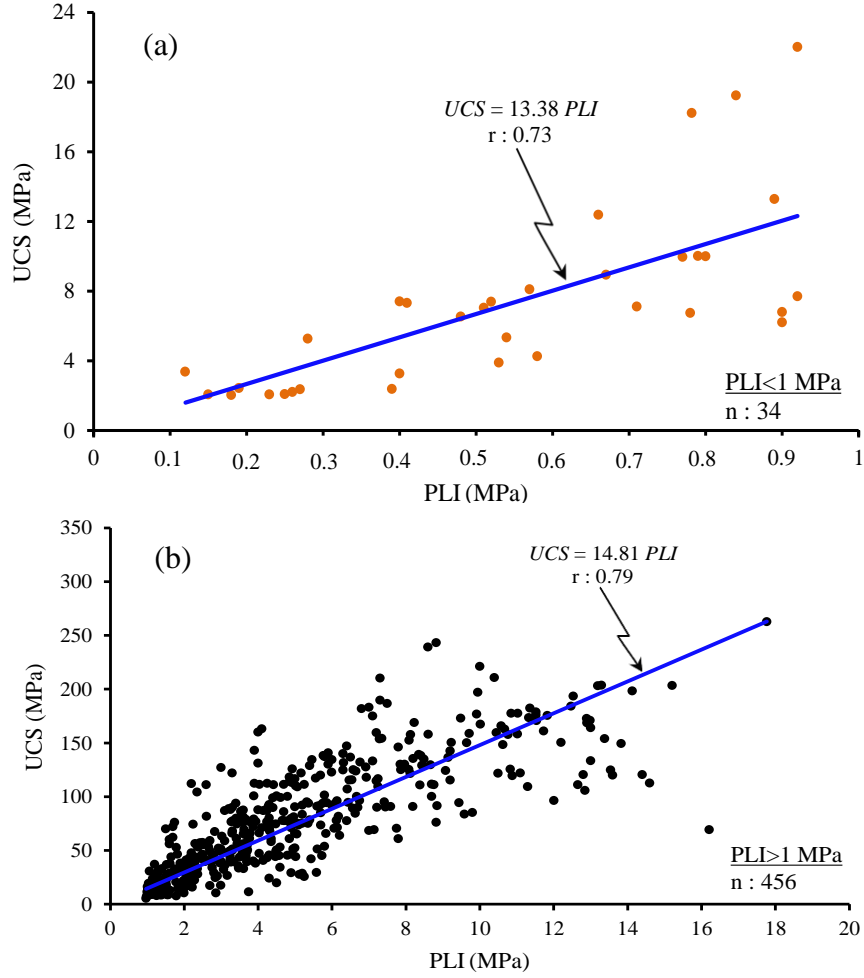
Tablo 1.5'te (Bölüm 1.3.2.1.) UCS değerlerine karşılık gelen PLI değerleri verilmiştir. Tabloya bakıldığında örneğin PLI aralığı 4–10 MPa olduğu zaman buna karşılık gelen UCS ise 100–250 MPa aralığında olmaktadır. Bu durumda UCS/PLI oranı ( $k$ ) 25 olmakta ve bu çalışmada piroklastik ve kırıntılı tortul kayalar için elde edilen  $k$  katsayısının yaklaşık iki katına eşit olmaktadır. Bir diğer konu ise Tablo 1.5'te düşük aralıklar için UCS parametresinin kullanılması gerektiği ifadesidir. Diğer bir ifade ile düşük aralıklar için yani PLI değerinin  $< 1$  MPa olduğu durumda UCS'nin ( $< 25$  MPa) tercih edileceği Bieniawski (1989) tarafından önerilmiştir. Literatürde piroklastik kayalara ait UCS değerlerinin çoğunlukla 25 MPa'nın, PLI değerlerinin ise 1 MPa'nın altında olduğu görülmüştür (Topal, 2000; Quane ve Russell, 2005; Kahraman, 2014; Kaya ve Karaman, 2015). Bu nedenle RMR sınıflamasında 25 MPa'nın altındaki UCS veya 1 MPa'nın altındaki PLI için sadece UCS değerlerinin kullanımının önerilmesi araştırmacıları zor durumda bırakmaktadır. Çünkü söz konusu kayalarda (piroklastik vb.) UCS deneyi için genellikle standartlara uygun yüksek kaliteli karot örneği almada güçlükler yaşanmaktadır. Öte yandan PLI değeri 1 MPa altında olan örneklerin deneyinin sağlıklı olacağına yönelik bir standart da yoktur. Çünkü literatürde PLI değerlerinin 1 MPa'nın altında olduğunu rapor eden oldukça çok sayıda çalışma mevcuttur (Topal, 2000; Grene, 2001; Sülükçü ve

Ulusay, 2001; Quane ve Russell, 2005; Yılmaz, 2010; Kohno ve Maeda, 2012; Singh vd., 2012; Karaman ve Kesimal, 2012; Kahraman, 2014). Tüf, yumuşak killi kireçtaşı ve marn gibi örneklerde bazen nokta yükü deney aletinin konik uçları örnek içine battığından deney geçersiz sayılmaktadır. Bu durumda örnek sayısı artırılabilir. Yukarıdaki sınırlamalar dikkate alındığında PLI değerlerinden hem  $PLI < 1$  MPa hem de  $PLI > 1$  MPa koşulu için doğrudan yararlanılabilecek bir sınıflamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde birçok tezde (Karagöz, 2007; Açıkgozoğlu, 2008; Ensari, 2008) PLI değerlerinin de olduğu RMR tablosu verilmekte, UCS için parametre-puan grafiği mevcut iken PLI için söz konusu grafiğin  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa koşulu için olmaması okuyucunun ve araştırmacıların kafasını karıştırmaktadır. Ayrıca literatürde dayanım değeri olarak birbirine oldukça yakın sonuç veren ancak birbirinden farklı grafikler bulunmaktadır (Bieniawski 1989; Sülükçü ve Ulusay, 2001; Yılmaz, 2010; Kaya, 2012). Bieniawski (1989) RMR<sub>89</sub> versiyonunda dayanım puan grafiği önermiş ancak eğrinin eşitliğini vermemiştir. Söz konusu eşitlik Bieniawski (1995) tarafından verilmiştir. Bu çalışmada veri sayısı fazla olduğundan manuel olarak grafikten dayanım puanının belirlenmesi problem teşkil etmektedir. Bu nedenle Bieniawski (1995) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik dayanım puanlarının belirlenmesinde ve diğer yöntemlerin karşılaştırılmasında kontrol grubu olarak kullanılmıştır. Söz konusu grafiği kullanan sınırlı sayıda araştırmacı mevcuttur (Sülükçü ve Ulusay, 2001; Yılmaz, 2010). Bu bölümde RMR sisteminin daha iyi anlaşılabilmesine katkıda bulunmanın yanı sıra  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa için birleştirilmiş bir grafik önerilecektir.

İlk olarak literatürden ve bu çalışmadan derlenen 490 UCS-PLI veri çiftleri  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa şeklinde sınıflara ayrılmıştır (Tablo 3.20). 490 veri sayısından 34 kayaç verilerine ait PLI dayanım değerlerinin 1 MPa'dan düşük olduğu görülmüştür. Bu çalışmada iki farklı yöntem kullanılarak ortalaması alınmış ve birleştirilmiş dayanım puan grafiği  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa koşulu için önerilmiştir. Birinci metotta sıfır kesişim regresyon analizleri UCS ve PLI arasındaki  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa için yapılmıştır (Şekil 3.38a, b). Korelasyon katsayıları  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa için sırasıyla 0.73 ve 0.79 olarak bulunmuştur. Her iki analiz için elde edilen k değerlerinin de 13.38 ve 14.81 olduğu şekillerden görülmektedir. “k” değerleri Bieniawski (1995) tarafından önerilen aşağıdaki denklemde yerine konularak birinci metot için hem  $PLI < 1$  MPa hem de  $PLI > 1$  MPa için dayanım puanları dolaylı olarak belirlenmiştir (Karaman vd., 2015c).

$$R_s = (UCS/3.67)^{0.65} \quad (20)$$

Burada;  $R_s$ : Ölçülen dayanım puanı ve UCS: birimi MPa



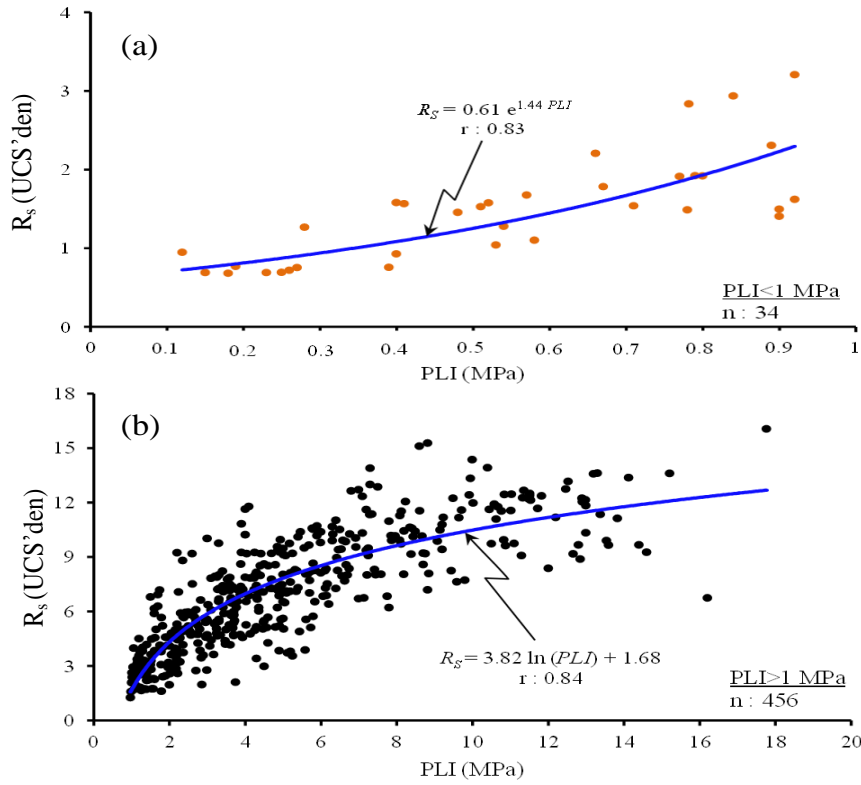
Şekil 3.38. UCS ve PLI arasındaki ilişki PLI<1 (a) ve PLI>1 (b) için (Metot-1)

Tablo 3.20. PLI ve UCS değerlerinin sınıflandırılması

| Veri tipi     | Lokasyon sayısı (n) | PLI (MPa) |      |      |       | UCS (MPa) |       |      |       |
|---------------|---------------------|-----------|------|------|-------|-----------|-------|------|-------|
|               |                     | E.D.      | E.Y. | Ort. | S.sp. | E.D.      | E.Y.  | Ort. | S.sp. |
| Bütün kayalar | 490                 | 0.1       | 17.8 | 4.7  | 3.4   | 2.0       | 262.5 | 74.3 | 53.1  |
| PLI<1 MPa     | 34                  | 0.1       | 0.9  | 0.5  | 0.3   | 2.0       | 22.0  | 7.2  | 5.0   |
| PLI>1 MPa     | 456                 | 1.0       | 17.8 | 5.0  | 3.3   | 5.2       | 262.5 | 79.3 | 51.6  |

E.D.: En düşük, E.Y.: En yüksek, Ort.: Ortalama, S. Sp.: Standart sapma

İkinci yöntem için eşitlik 20 kullanılarak ölçülen UCS parametresinden dayanım puanları ( $R_s$ ) hesaplanmıştır. Daha sonra UCS parametresinden elde edilen  $R_s$  ile PLI arasında regresyon analizleri  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa için ayrı ayrı yapılmıştır (Şekil 3.39). Korelasyon katsayıları her iki analiz için 0.83–0.84 olarak bulunmuştur. Ayrıca Ünal (1996) tarafından önerilen grafik de (Şekil 1.2) incelenmiştir. Ünal (1996) tüm kayalar için denklem önerdiğinden  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa için aynı denklem kullanılmıştır.



Şekil 3.39. UCS ile PLI arasındaki ilişki,  $PLI < 1$  (a) ve  $PLI > 1$  (b) için (Metot-2)

Ölçülen ve tahmini  $R_s$  arasında VAF (%), RMSE ve MAPE (%) analizleri yapılmıştır (Tablo 3.21). % MAPE bulguları bu çalışmada önerilen grafiklerin dayanım puanı tahmininde “kabul edilebilir tahmin” sınıfına dahil olduğunu,  $PLI < 1$  MPa için ise Ünal (1996) tarafından önerilen eşitliğin ise “yanlış tahmin” sınıfına dahil olduğu görülmüştür. VAF değerlerinde Ünal (1996) tarafından önerilen eşitlik ile bu çalışmada önerilen eşitlik arasında yaklaşık % 15’lik, MAPE değerlerinde ise % 20–45 arasında bir fark olduğu görülmüştür. RMSE değerlerinde de yaklaşık iki kat fark bulunmaktadır. Bunun, Ünal (1996) tarafından kullanılan k katsayısının yüksek olmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Tablo 3.21. Ölçülen ve tahmini  $R_s$  arasında VAF, RMSE, MAPE ve r değerleri

| Yöntem      | PLI (MPa) | % VAF | RMSE | % MAPE | r    |
|-------------|-----------|-------|------|--------|------|
| 1           | < 1       | 59.32 | 0.42 | 23.24  | 0.73 |
|             | > 1       | 67.43 | 1.80 | 22.38  | 0.83 |
| 2           | < 1       | 58.21 | 0.43 | 21.95  | 0.79 |
|             | > 1       | 70.32 | 1.70 | 23.40  | 0.84 |
| Ortalama    | < 1       | 59.53 | 0.42 | 22.44  | -    |
|             | > 1       | 70.26 | 1.71 | 22.17  | -    |
| Ünal (1996) | < 1       | 47.47 | 0.98 | 69.92  | -    |
|             | > 1       | 55.04 | 2.93 | 41.80  | -    |

ANOVA analizleri de ayrıca ölçülen ve tahmini  $R_s$  arasında yapılmıştır. İlk olarak her iki metot ile elde edilen tahmini ve ölçülen  $R_s$  arasında  $PLI < 1$  MPa için analizler yapılmıştır. Bieniawski (1995) tarafından önerilen eşitlik ile elde edilen dayanım puanları (ölçülen UCS'den) yani  $R_s$  kontrol grup olarak ele alınmıştır. Ölçülen ve tahmini dayanım puanlarının homojen oldukları görülmüştür ( $P=0.616$ ). Bu nedenle Dunnett 2 yönlü varyans analizleri yapılmıştır (Tablo 3.22). ANOVA bulguları her iki metot arasında fark olmadığını göstermiştir ( $P=0.800$ ). Ayrıca tabloya bakıldığında her iki metot ortalaması ile kontrol grup ortalaması arasındaki farkın oldukça az olduğu ve P değerlerinin 1.00 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bu analiz sonucu her iki metot ile elde edilen dayanım puanının  $PLI < 1$  MPa için RMR'de kullanılabilceğini göstermektedir. Benzer analizler her iki metot kullanılarak  $PLI > 1$  MPa için yapılmıştır. Grupların homojen olmadıkları ( $P=0.000$ ) görülmüş ve bu nedenle Tamhane post-hoc testi grupların benzer olup olmadıklarını araştırmak için kullanılmıştır (Tablo 3.22).

Tablo 3.22.  $PLI < 1$  ve  $PLI > 1$  MPa için ANOVA analizi (yöntemler için)

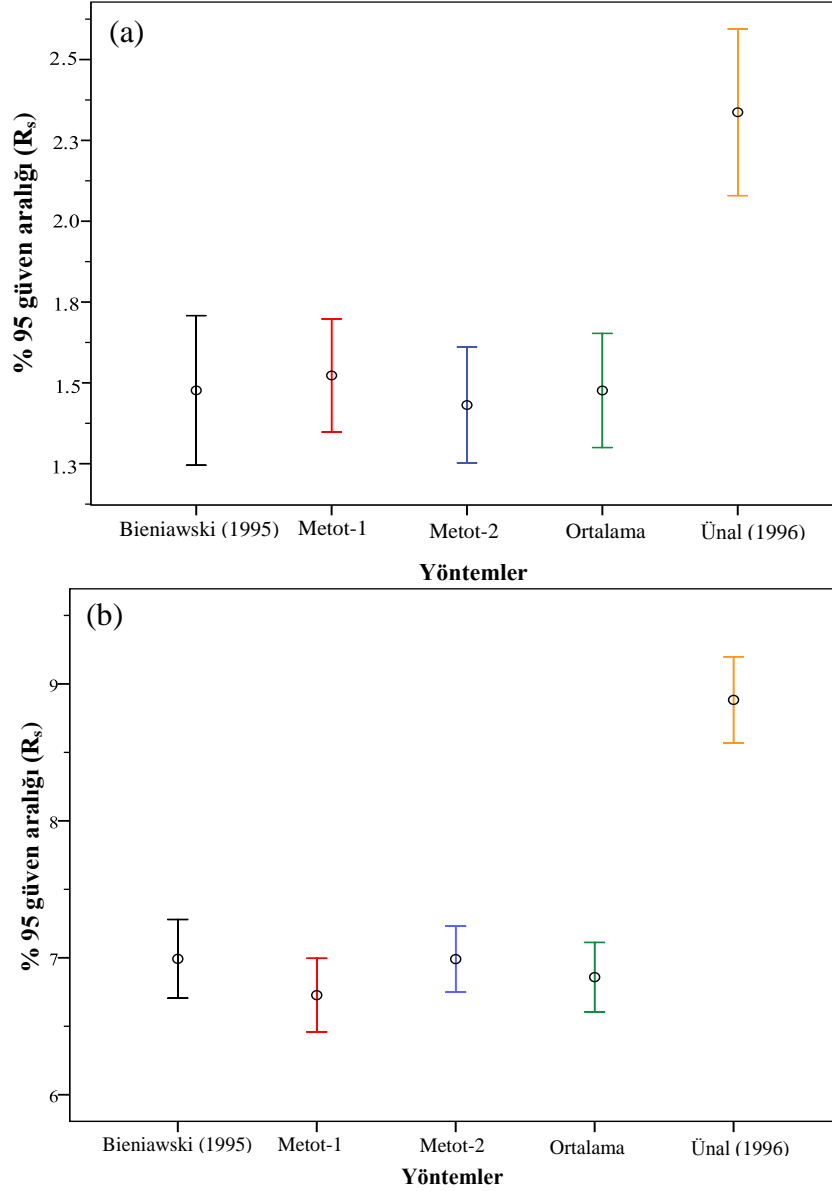
| X  | Y                 | Ortalama farkı<br>(X-Y) | Std.<br>hata. | P     | % 95 Güven aralığı |           |
|--|-------------------|-------------------------|---------------|-------|--------------------|-----------|
|  |                   |                         |               |       | Alt sınır          | Üst sınır |
| <b>*Dunnett t test (2-yönlü) (<math>PLI &lt; 1</math> MPa)</b> |                   |                         |               |       |                    |           |
| Metot-1  | Bieniawski (1995) | 0.04618                 | 0.137         | 0.920 | -0.2610            | 0.3533    |
| Metot-2  | Bieniawski (1995) | -0.04529                | 0.137         | 0.923 | -0.3525            | 0.2619    |
| <b>Tamhane test (<math>PLI &gt; 1</math> MPa)</b>              |                   |                         |               |       |                    |           |
| Bieniawski (1995)  | Metot-1           | -0.26507                | 0.200         | 0.461 | -0.2140            | 0.7441    |
| Bieniawski (1995)  | Metot-2           | -0.00189                | 0.191         | 1.000 | -0.4548            | 0.4586    |

Analiz sonucuna göre,  $PLI > 1$  için kullanılan her iki metot ile kontrol grubu arasında fark olmadığı anlaşılmıştır ( $P=0.283$ ). Ayrıca tabloya bakıldığında metot-2 ile kontrol grubunun birebir aynı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak önerilen metotların her ikisi de dayanım puanlarının tahmininde hem  $PLI < 1$  MPa hem de  $PLI > 1$  MPa için güvenilir oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle her iki metotun/yöntemin ortalaması alınarak tek bir denklem önerilmiştir.

Kontrol grubu ile ortalama ve Ünal'ın eşitlikleri arasında fark olup olmadığı  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa için araştırılmıştır (Tablo 3.23). Gruplar homojen olduklarından (anlam düzeyi=0.094) Dunnett 2 yönlü varyans analizi yapılmış ve en az bir grubun diğerinden farklı olduğu ortaya çıkmıştır ( $P=0.000$ ). Metotların ortalaması ile kontrol grubu arasında fark olmadığı görülmüştür ( $P=1.000$ ) (Tablo 3.23). Ancak Ünal'ın eşitliği ile kontrol grubu arasında benzerlik tespit edilememiştir ( $P=0.000$ ). Aynı analizler  $PLI > 1$  MPa için de gerçekleştirilmiştir. Gruplar homojen olmadıklarından ( $P=0.000$ ) Tamhane post-hoc testi yapılmış ve ANOVA tablosundaki P değeri  $< 0.05$  olduğundan en az bir grubun diğerlerinden farklı olduğu sonucuna varılmıştır ( $P=0.000$ ). Kontrol grup ile metotların ortalaması arasında 0.870 anlamlılık seviyesinde benzerlik görülürken, Ünal'ın eşitliği 0.000 anlamlılık seviyesinde bir benzerlik saptanamamıştır. Sonuç olarak bu çalışmada önerilen metotların dayanım puanlarının tahmininde kullanılabileceği yapılan analizler neticesinde görülmüştür. Dayanım tahmininde kullanılan yöntemler ve kontrol grubu Şekil 3.40a ve b'de sırasıyla  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa için birlikte değerlendirilmiştir. Ortalama, en düşük ve en yüksek değer aralıklarına bakıldığında ortalama ile kontrol grubunun benzer oldukları şekillerden görülmektedir.

Tablo 3.23.  $PLI < 1$  ve  $PLI > 1$  MPa için ANOVA analizi (ortalama için)

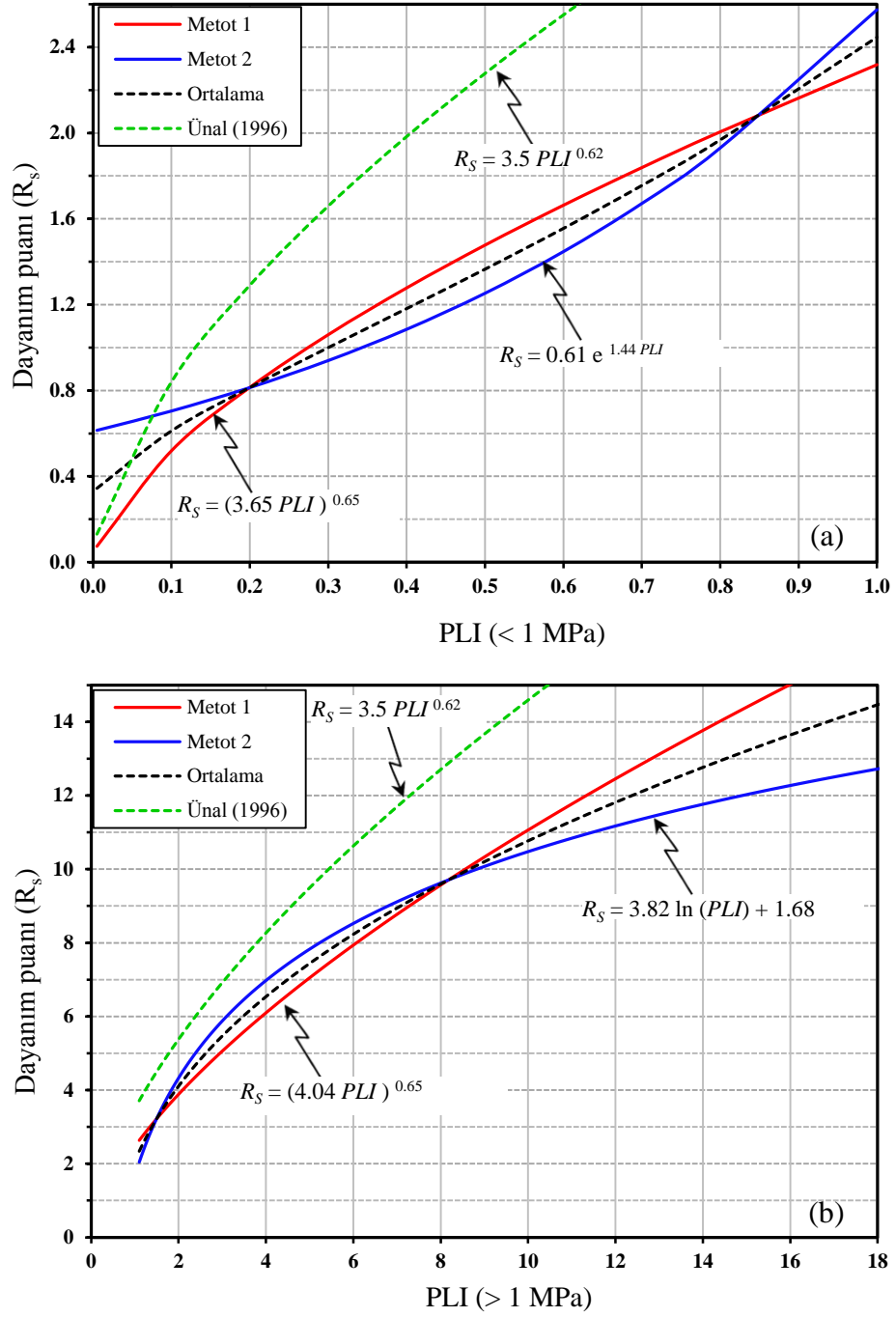
| X  | Y                 | Ortalama farkı<br>(X-Y) | Std.<br>hata. | P     | % 95 Güven aralığı |           |
|--|-------------------|-------------------------|---------------|-------|--------------------|-----------|
|  |                   |                         |               |       | Alt sınır          | Üst sınır |
| <b>*Dunnett t test (2-yönlü) (<math>PLI &lt; 1</math> MPa)</b> |                   |                         |               |       |                    |           |
| Ortalama   | Bieniawski (1995) | -0.00029                | 0.156         | 1.000 | -0.3504            | 0.3498    |
| Ünal (1996)  | Bieniawski (1995) | 0.86029                 | 0.156         | 0.000 | 0.5102             | 1.2104    |
| <b>Tamhane test (<math>PLI &gt; 1</math> MPa)</b>              |                   |                         |               |       |                    |           |
| Bieniawski (1995)  | Ortalama          | 0.13360                 | 0.195         | 0.870 | -0.3326            | 0.5998    |
| Bieniawski (1995)  | Ünal (1996)       | -1.89096                | 0.217         | 0.000 | -2.4102            | -1.3718   |



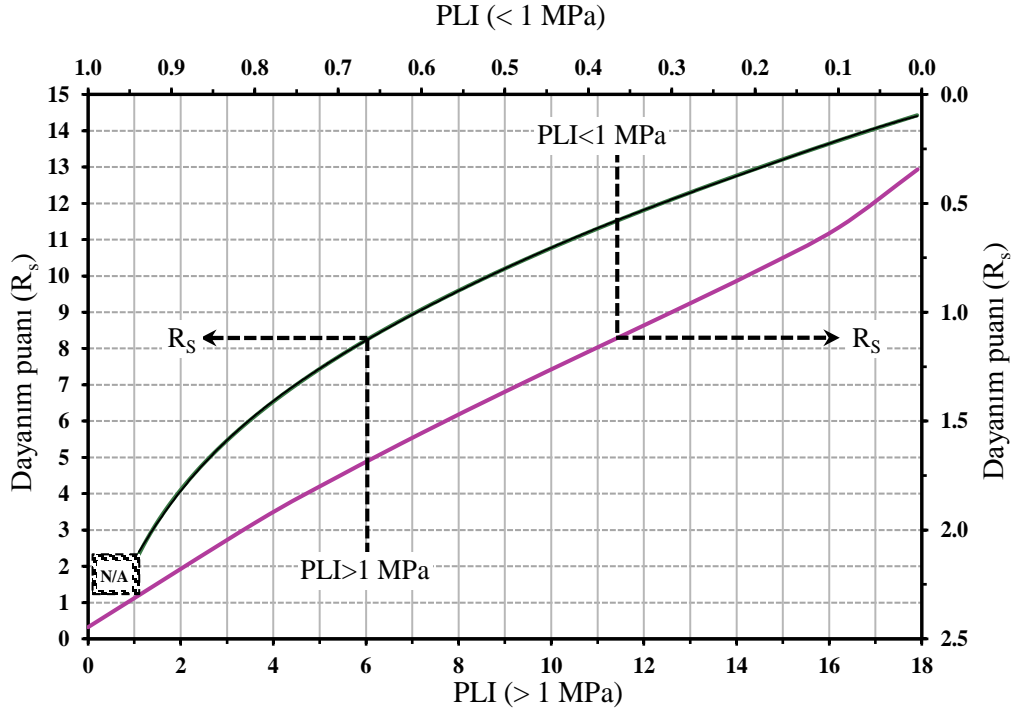
Şekil 3.40. PLI<1 (a) ve PLI>1 (b) için yöntemlerin karşılaştırılması

Şekil 3.41a ve b sırasıyla PLI<1 (a) ve PLI>1 için kullanılan yöntemler ve Ünal'ın eşitliği denklemleriyle birlikte ele almaktadır. Grafiklerde siyah kesikli çizgiler metotların ortalamasını işaret etmektedir. Her iki metoda ait eğrilerin benzer dayanım puanları verebileceği görülmektedir. Ünal'ın eşitliği ise farklı bir eğilim sunmaktadır. Araştırmacıların pratik olarak kullanmasına katkıda bulunması adına Şekil 3.41a ve b'deki grafikler birleştirilerek tek bir grafik elde edilmiştir (Şekil 3.42). Önerilen grafikten PLI değerine bağlı olarak RMR sisteminde kullanılacak dayanım puanı doğrudan kullanılabilir.





Şekil 3.41.  $PLI < 1$  (a) ve  $PLI > 1$  MPa (b) için önerilen dayanım puan grafikleri



Şekil 3.42. Birleştirilmiş dayanım puan grafiği (Karaman vd., 2015c)

### 3.3.3.3. Önerilen Grafiğin Çalışılan Kaya Kütlelerine Uygulanması

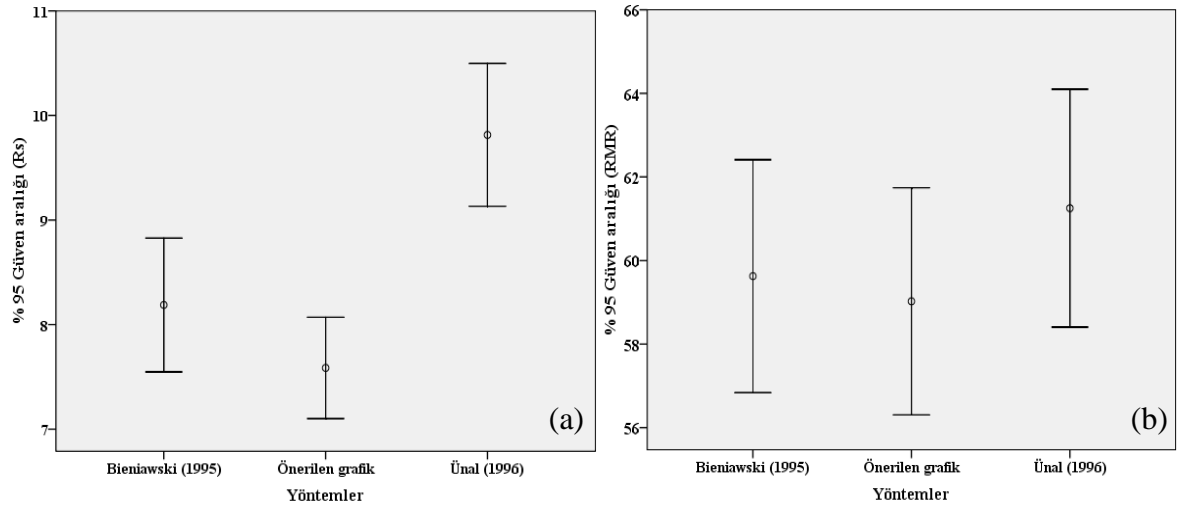
Yukarıdaki bölümde  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa koşulu için birleştirilmiş grafik önerilmiştir. Söz konusu grafiğin türetilmesinde literatürden derlenen 490 UCS-PLI veri çifti kullanılmıştır. Önerilen grafiğin kullanılabilirliği çalışma sahasındaki 37 örnek noktası için denenmiştir. Çalışma sahasındaki kayaçların PLI değerleri  $> 1$  MPa olduğu için önerilen grafikte sadece  $PLI > 1$  MPa eğrisi kullanılmıştır. Çalışma sahasındaki birimlere ait dayanım puanları Bieniawski (1995), önerilen grafik ve Ünal (1996)'a göre elde edilmiş ve kıyaslanmıştır (Tablo 3.24). Öncelikle grupların homojenlik testine göre homojen oldukları belirlenmiştir ( $P = 0.178$ ). Bu nedenle Dunnett 2 yönlü varyans analizi yapılmış ve en az bir grubun diğerinden farklı olduğu önem düzeyine göre tespit edilmiştir ( $P = 0.000$ ). Kontrol grup ile önerilen grafikten elde edilen dayanım puanlarının benzer olduğu bununla beraber Ünal'ın eşitliğinden elde edilen değerlerin kontrol grubunu temsil etmediği görülmüştür. Şekil 3.43a'da bu durum daha net görülmektedir. Önerilen grafik ile kısmen daha güvenli analizlerin yapılacağı anlaşılmaktadır. Burada amaç RMR puanının belirlenmesi olduğu için, tünel güzergahındaki 37 noktanın kaya kütle özelliklerinden elde edilen (dayanım puanı hariç) puanlar (süreksizlik durumu, RQD ve yeraltı suyu durum puanları)

değerlendirilmiştir. Üç yöntemle göre elde edilen dayanım puanları söz konusu puanların üzerine ilave edilerek temel RMR değerleri (ölçülen ve tahmini RMR) elde edilmiştir. Ölçülen ve tahmini RMR puanları arasında % hata analizleri yapılmış ve Şekil 3.44'de verilmiştir. Grafikteki pozitif tarafta kalan noktalar ölçülen RMR'den daha düşük RMR puanlarının elde edildiğini (formülden, Eşitlik 16) gösterirken, negatif tarafta kalan noktalar ise tahmini RMR değerlerinin ölçülenden daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. % hata değerlerine bakıldığında ölçülen ve tahmini (bu çalışmada önerilen grafikten elde edilen dayanım puanı ile oluşturulan) RMR puanları arasında en yüksek % 3.5, genellikle % 2'nin altında hata değerlerinin olduğu görülmektedir. Ayrıca yüzde tahmin hatası bulgularına göre; önerilen grafik ile araştırmacıları kısmen (yaklaşık % 1–3) güvenli tarafta bırakacak RMR puanının elde edilebileceği görülmüştür. Ünal (1996) tarafından önerilen eşitlik ile elde edilen tahmini RMR ile ölçülen RMR arasında ise en yüksek % 6 ve çoğunlukla % 3–5 arasında hata değerleri saptanmıştır. Aslında % tahmin hatası değerlerinin büyük çoğunlukla % 5'in altında olması açısından ölçülen değerlere yakın olduğu düşünülebilir. Ancak Şekil 3.44'den görüldüğü gibi % hata değerlerinin tümü negatif bölgede yer almaktadır. Bu durum araştırmacıların yaklaşık % 3–5 daha güvensiz analiz yapmalarına neden olacağından dikkatli olunmalıdır. Ayrıca dayanım puanlarına ( $R_s$ ) benzer bir şekilde RMR puanları da karşılaştırılmıştır. Gruplar homojen olduklarından ( $P=0.944$ ) Dunnett 2 yönlü varyans analizi yapılmış ve gruplar arasında fark olmadığı ( $P=0.496$ ) görülmüştür. Bunun nedeni RMR sisteminde dayanım puanı dışındaki puanların kıyaslamaya dahil edilmesidir. Bu durum Şekil 3.43b'den daha net görülmektedir. Ayrıca Ünal tarafından önerilen eşitlik ile elde edilen dayanım puanları kontrol grubunu temsil etmemesine rağmen, RMR de kullanılması durumunda hata oranları azalmıştır. Örnek olarak ölçülen dayanım puanının 10, tahmini puanın ise 9 olduğu durumda hata değeri yaklaşık % 10 olmaktadır. Ancak dayanım puanı dahil edilmemiş aynı ortamın süreksizlik ve yeraltı suyu puanı toplamı örneğin 50 olduğu durumda ölçülen ve tahmini dayanım puanları eklenerek ölçülen ve tahmini RMR puanları oluşturulmuş olsun. Ölçülen RMR 60, tahmin edilen RMR ise 59 olacaktır. Her iki RMR sistemi arasındaki hata değeri ise % 1.7 olmaktadır. Görüldüğü gibi dayanım puanları arasında ölçülen hata değerleri % 10 iken, aynı puanların RMR'de kullanımı ile hata değeri % 1.7'ye inmiştir. Ünal (1996) eşitliğinden elde edilen dayanım puanları RMR'de kullanılmasıyla hata değerleri azalmıştır. Buna rağmen Şekil 3.43b ve Tablo 3.24'den anlaşıldığı gibi Ünal'ın eşitliği ile

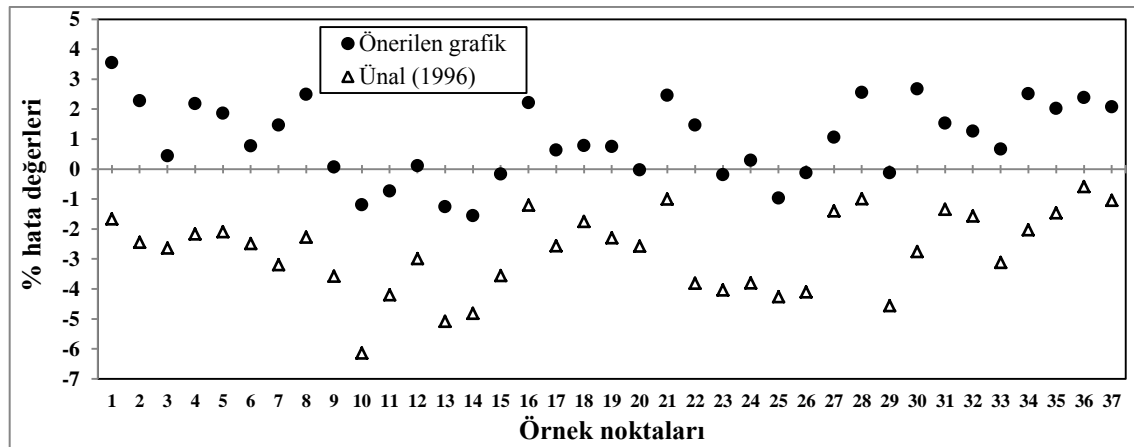
elde edilen RMR puanları kontrol grubuna göre daha yüksektir. Tablo 3.24'deki analizler dayanım puanı ve RMR için ayrı ayrı yapılmış ancak daha iyi anlaşılması açısından tek bir tabloda verilmiştir.

Tablo 3.24. Grupların dayanım puanı ve RMR puanına göre karşılaştırılması

| Dunnett-t<br>(2-yönlü) | (X) Faktör      | (Y) Faktör        | Ortalama farkı<br>(X-Y) | Std. hata. | P     | % 95 Güven aralığı |           |
|------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|------------|-------|--------------------|-----------|
|                        |                 |                   |                         |            |       | Alt sınır          | Üst sınır |
| Dayanım puanı          | Önerilen grafik | Bieniawski (1995) | -0.6016                 | 0.4243     | 0.270 | -1.553             | 0.349     |
| Dayanım puanı          | Ünal (1996)     | Bieniawski (1995) | 1.6262                  | 0.4243     | 0.000 | 0.675              | 2.577     |
| RMR puanı              | Önerilen grafik | Bieniawski (1995) | -0.6016                 | 1.9412     | 0.932 | -4.952             | 3.749     |
| RMR puanı              | Ünal (1996)     | Bieniawski (1995) | 1.6262                  | 1.9412     | 0.613 | -2.725             | 5.977     |



Şekil 3.43. Yöntemlerin karşılaştırılması; dayanım puanı (a) ve RMR (b)



Şekil 3.44. Ölçülen ve tahmini RMR puanları arasındaki % hata değerleri

Ölçülen ve tahmini dayanım puanları ile RMR değerleri arasındaki ilişkiler ayrıca VAF, RMSE ve MAPE analizleri ile araştırılmıştır (Tablo 3.25). VAF değerleri her iki yöntem için de dayanım ve RMR puanları açısından aynı çıkmıştır. RMSE ve MAPE değerleri ise bu çalışmada önerilen grafik için Ünal'ın yöntemine göre yaklaşık iki kat daha düşük çıkmıştır. RMSE ve MAPE değerleri ne kadar küçükse tahmini değerlerin ölçülen değerlere daha yakın olduğu anlamı çıkmaktadır. Bu bağlamda bu çalışmada önerilen grafiğin tahmin kapasitesinin oldukça iyi olduğu görülmüştür. MAPE analizleri ayrıca örnekleme noktasına düşen % hata miktarını yansıtmaktadır. Buna göre önerilen grafikten elde edilen tahmini RMR ile ölçülen RMR değerleri arasında örnek noktası bazında yaklaşık % 1 gibi oldukça düşük hata değerlerinin olduğu anlaşılmaktadır. Yukarıda da bahsedildiği gibi bu tahmini RMR değerlerinin kısmen daha düşük olması da araştırmacıların analizlerinde güvenle kullanılabilceğini göstermektedir. Sonuç olarak çalışma sahasındaki kaya malzemelerine ait k değeri 17.7 (Şekil 3.15) olduğundan dolayı Ünal'ın eşitliği ile % hata değerleri % 2–5 arasında çıkmıştır. Ancak % hata oranlarının zayıf kayalarda daha düşük k değerleri ile söz konusu olduğunda % 5'in üzerine çıkabileceği anlaşılmaktadır.

Tablo 3.25. VAF, RMSE ve MAPE değerleri (dayanım puanı ve RMR)

| Yöntemler                     | Puanlar       | % VAF | RMSE | % MAPE |
|-------------------------------|---------------|-------|------|--------|
| Kontrol grubu–Önerilen grafik | Dayanım puanı | 82    | 1.0  | 9.2    |
| Kontrol grubu–Ünal (1996)     | Dayanım puanı | 82    | 1.8  | 21.0   |
| Kontrol grubu–Önerilen grafik | RMR puanı     | 99    | 1.0  | 1.3    |
| Kontrol grubu–Ünal (1996)     | RMR puanı     | 99    | 1.8  | 2.8    |

### 3.4. Kaya Kütleli Sınıflama Sistemlerinin Karşılaştırılması

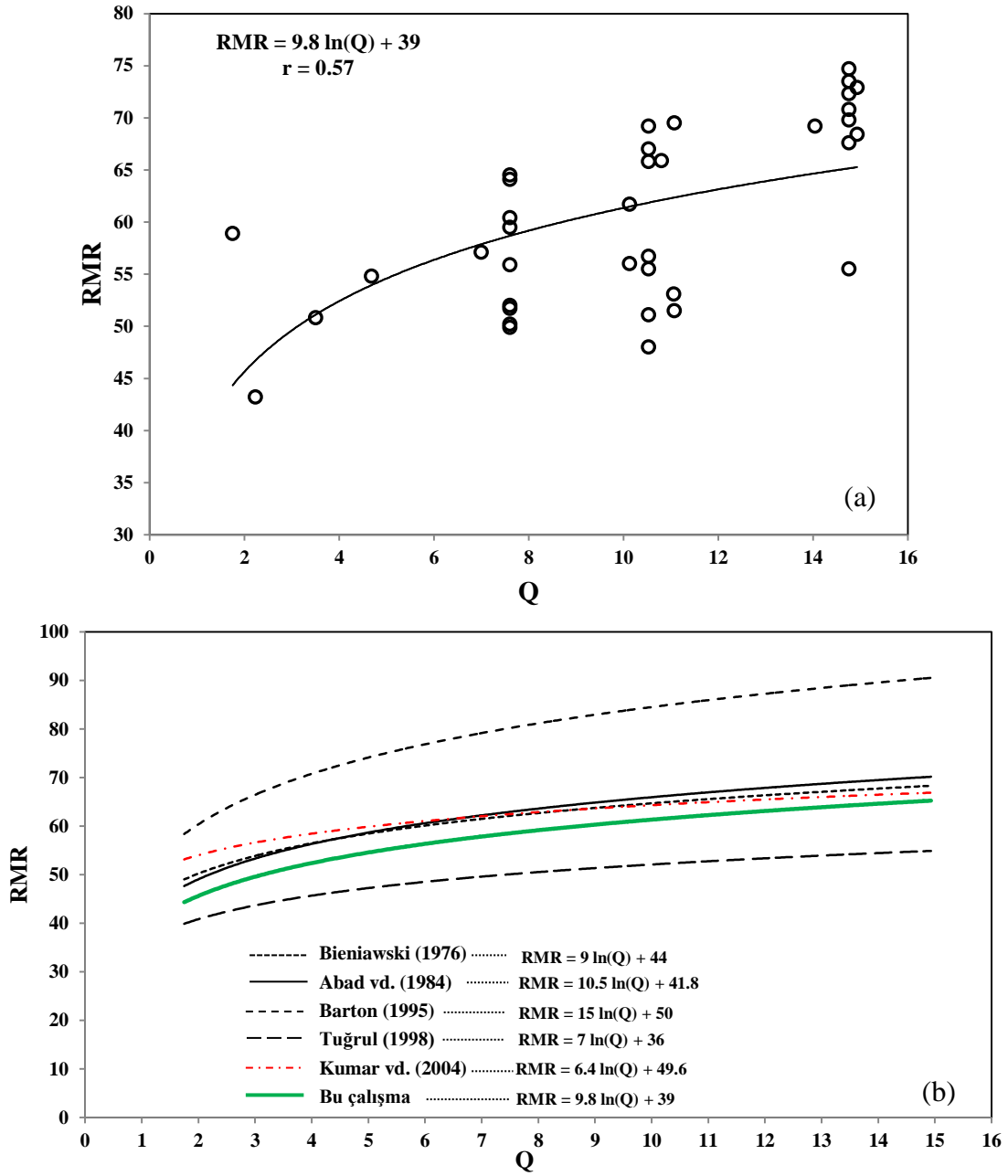
RMR ve Q sistemlerin arasındaki korelasyonu kullanarak birinden diğeri tahmin edilebilir (Laderian ve Abaspoor 2012). Bu amaca yönelik olarak literatürde çeşitli eşitlikler önerilmiştir (Bieniawski 1976; Kaiser ve Gale 1985; Abad vd. 1984; Barton 1995; Tuğrul 1998; Karaman vd. 2014). Literatürde araştırmacıların büyük çoğunluğu RMR ve Q arasında aşağıdaki logaritmik denklem biçiminde eşitlikler önermişlerdir.

$$RMR = A \ln(Q) + B \quad (21)$$

A ve B sırasıyla 5–15 ve 35–60 arasında değişen katsayılardır (Zhang, 2004). Araştırmacılar tarafından Q sisteminden RMR puanını belirlemeye yönelik önerilen ve bu çalışma kapsamında kullanılan ampirik eşitlikler Tablo 3.26’da verilmiştir. Bu çalışma kapsamında RMR ve Q arasında orta derecede ( $r = 0.57$ ) pozitif logaritmik bir ilişki gözlenmiştir (Şekil 3.45a). RMR ve Q sistemi arasında pozitif bir ilişki gözlenmesinin nedeni her iki sistemin benzer kaya kütle özelliklerini girdi parametresi olarak kullanmasından kaynaklanmaktadır (Laderian ve Abaspoor, 2012). Ulusay ve Sönmez (2007) kaya malzemesinin dayanımı ve gerilme için yapılan değerlendirmenin her iki sistemde oldukça farklı olduğunu belirtmişlerdir. RMR ve Q arasında çok yüksek bir ilişki elde edilememesinin nedeni ise iki sistem arasındaki girdi parametrelerinin değerlendirmesindeki farklılıktan kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen ampirik eşitlik ile karşılaştırmada kullanılan eşitliklere (Tablo 3.26) bakıldığında, Eşitlik 19’da belirtilen A ve B katsayıları ile örtüştüğü anlaşılmaktadır. Tablo 3.26’daki eşitlikler ile bu çalışmada elde edilen eşitlik Q sisteminden RMR tahmini açısından karşılaştırılmıştır (Şekil 3.45b). Barton (1995) ve Tuğrul (1998) tarafından önerilen eşitlikler sırasıyla en yüksek ve en düşük RMR değerlerini vermiştir. Bieniawski (1976), Abad vd. (1984) ve Kumar vd. (2004) tarafından önerilen eşitlikler ile bu çalışmada geliştirilen eşitliğin nispeten yakın RMR değerleri verdiği görülmüştür (Şekil 3.45b).

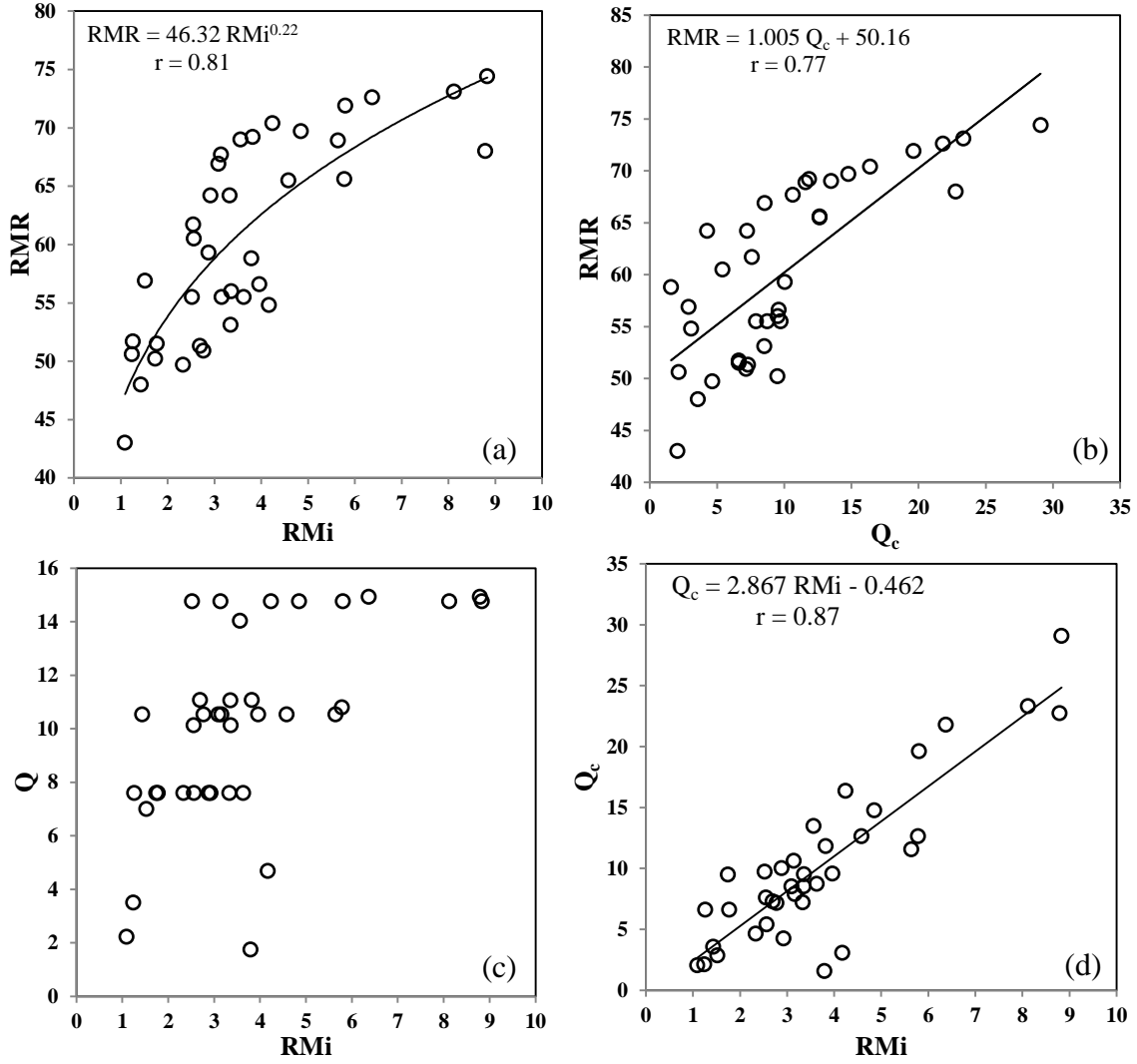
Tablo 3.26. RMR tahmini için Q sisteminden önerilen eşitlikler

| <b>Araştırmacı</b> | <b>Eşitlik</b>            |
|--------------------|---------------------------|
| Bieniawski (1976)  | $RMR = 9 \ln Q + 44$      |
| Abad vd. (1984)    | $RMR = 10.5 \ln Q + 41.8$ |
| Barton (1995)      | $RMR = 15 \ln Q + 50$     |
| Tuğrul (1998)      | $RMR = 7 \ln Q + 36$      |
| Kumar vd. (2004)   | $RMR = 6.4 \ln Q + 49.6$  |



Şekil 3.45. RMR ve Q arasındaki ilişki (a) ve literatürle karşılaştırılması (b)

Bu çalışmada ayrıca RMR, R<sub>Mi</sub>, Q ve Q<sub>c</sub> arasında ilişki olup olmadığı araştırılmıştır (Şekil 3.46). RMR ile R<sub>Mi</sub> ve Q<sub>c</sub> arasında yüksek derecede pozitif ilişkiye (0.77–0.81) rastlanmıştır (Şekil 3.46a, b). R<sub>Mi</sub> ve Q arasında ise bir ilişkiye rastlanmamış ve UCS değerlerinin Q sistemine dahil edilmesiyle elde edilen Q<sub>c</sub> ile R<sub>Mi</sub> arasında ise yüksek bir ilişki (0.87) bulunmuştur (Şekil 3.46d). Hem R<sub>Mi</sub> hem de Q<sub>c</sub> sisteminde UCS etkisinin önemli ölçüde etkili olduğu düşünüldüğünde söz konusu yüksek ilişki şaşırtıcı değildir.



Şekil 3.46. RMR, RMi,  $Q$  ve  $Q_c$  arasındaki ilişki

### 3.5. Kaya Malzemesi Makaslama Dayanım Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu bölümün amacı, çalışılan tünel güzergahının 37 farklı noktasından alınan farklı türde kayaç örneklerinin  $C$  ve  $\phi$  değerlerini üç eksenli basınç dayanım deneyi ile belirlemek ve bu parametrelerin daha kolay elde edilebilmesine yönelik literatürde var olan (üç eksenli basınç dayanım deneyinin yapılma olanağının bulunamadığı durumlarda BÇD ve UCS deneylerinin sonuçlarından yararlanılarak  $C$  ve  $\phi$ 'nin dolaylı olarak belirlenmesi) bir yöntemin güvenilir bir şekilde kullanılıp kullanılmayacağını kontrolünü yapmaktır. Ancak söz konusu yöntem ile ilgili ayrıntılı bir uygulamaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmayı veri sayısının fazla olması ve farklı jeolojik kökenden kayaları içermesi güçlü kılmaktadır.

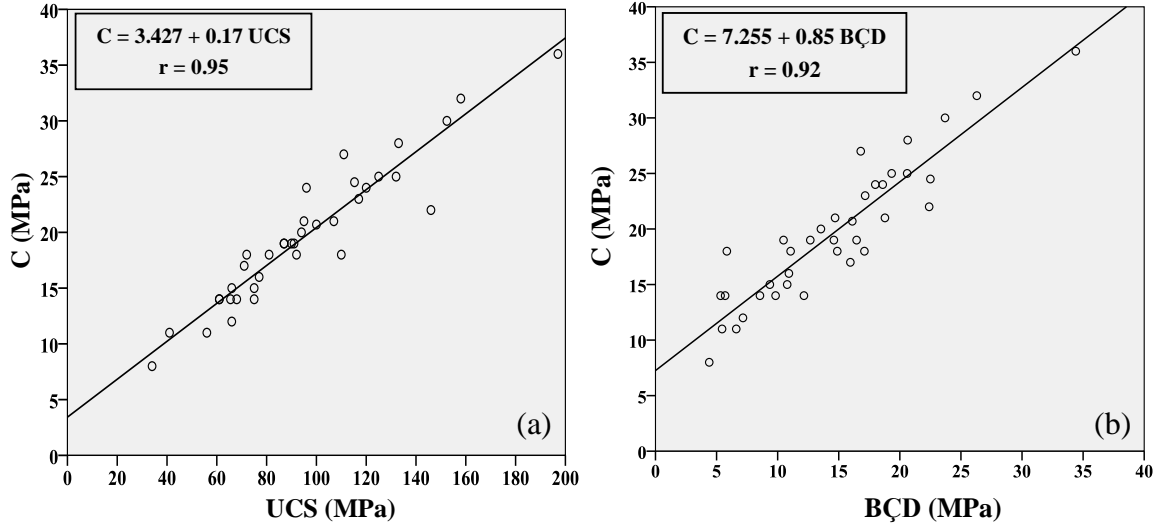


C ve  $\phi$  değerleri ile UCS ve BÇD arasında regresyon analizleri yapılmış ancak sadece C değerleri ile değişkenler (UCS, BÇD) arasında güçlü ilişkiler tespit edilmiştir (Şekil 3.47 ve Tablo 3.27). Bağımlı değişken olan C ve  $\phi$  değerlerinin normal dağılım gösterdikleri (sırasıyla anlamlılık seviyesi = 0.78 ve 0.39) görülmüştür. Hem korelasyon katsayısının yüksek olması ( $r = 0.92-0.95$ ) hem de Şekil 3.47a, b'deki şekillere bakıldığında C değerleri UCS ve BÇD parametrelerinden yüksek güvenilirlikle belirlenebilmektedir. Zoback (2007) yüksek dayanımlı kayaçların düşük dayanımlı olanlara kıyasla daha yüksek kohezyon değerlerine sahip olduğunu bununla beraber neredeyse bütün kayaçların nispeten yüksek içsel sürtünme açısına sahip olduğunu ifade etmiştir. Kahraman ve Alber (2008) ise zayıf fay breşi örneklerinin çapı arttıkça içsel sürtünme açısının artmakta buna karşın kohezyon değerlerinde düşüş olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada kohezyon değerleri arttıkça UCS ve BÇD değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Korelasyon katsayılarının düşük olması ve verilerin saçınım halde bulunması nedeniyle  $\phi$  parametresinin UCS ve BÇD değişkenlerinden tüm kayaçlara yönelik olarak tahmin edilemeyeceği anlaşılmıştır. Çünkü içsel sürtünme açısı kaya dayanımını etkileyen süreksizliklerden etkilenmez, bunun yerine kaya malzemesini oluşturan tanelerin boyutu ve kenetlenmesinden etkilenmektedir. Beyhan (2008) Soma ve Tunçbilek bölgesine ait marn örneklerine ait BÇD ve UCS ile  $\phi$  değerlerini karşılaştırmıştır. Analizlere göre BÇD- $\phi$  ve UCS- $\phi$  veri çiftleri için korelasyon katsayıları sırasıyla çok zayıf/zayıf (0.24-0.30) ve çok zayıf/zayıf (0.17-0.42) olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.27. C ve  $\phi$  ile UCS ve BÇD arasında regresyon analiz bulguları

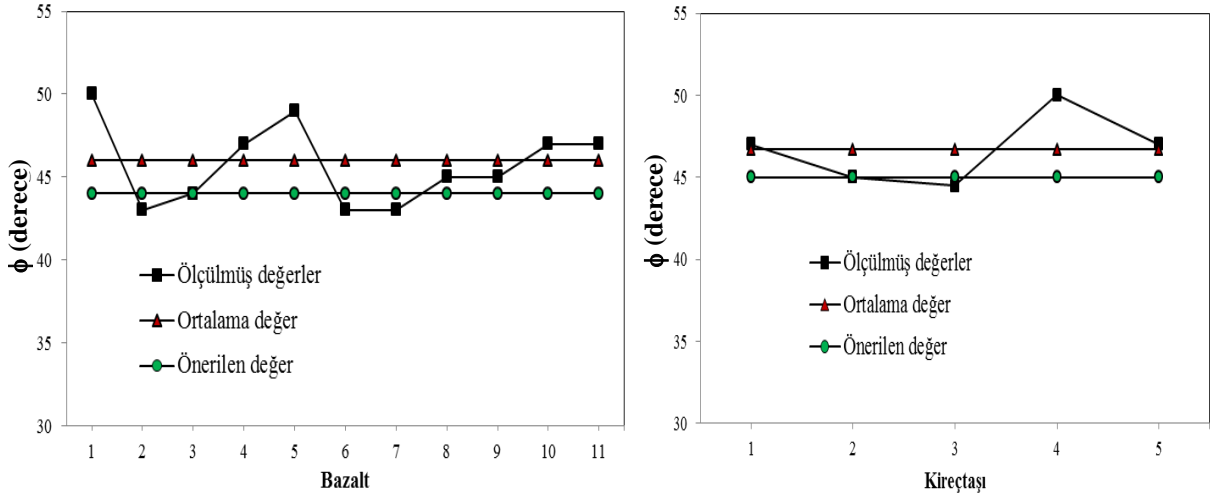
| İlişkili parametreler | Regresyon eşitlikleri             | Anlamlılık seviyesi | r    |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|------|
| C – UCS               | $C_3 = 0.17 \text{ UCS} + 3.427$  | 0.000               | 0.95 |
| C – BÇD               | $C_4 = 0.85 \text{ BÇD} + 7.255$  | 0.000               | 0.92 |
| $\phi$ – BÇD          | $\phi = 0.21 \text{ BÇD} + 41.74$ | 0.025               | 0.37 |
| $\phi$ – UCS          | $\phi = 0.05 \text{ UCS} + 40.23$ | 0.009               | 0.42 |

$C_3$  ve  $C_4$  sırasıyla UCS-C ve BÇD-C arasındaki regresyon analizlerinden elde edilen kohezyondur.



Şekil 3.47. C-UCS (a) ve C-BÇD (b) arasındaki ilişki

Tüm kayaçlar için elde edilen korelasyon katsayıları dikkate alındığında elde edilen eşitliklerin yeterince güvenilir olmadıkları anlaşılmıştır. Bu nedenle her bir kaya tipi için bu çalışmadan elde edilen en düşük, en yüksek, ortalama  $\phi$  ve standart sapma değerleri incelenmiştir (Tablo 3.28).  $\phi$  değerlerindeki değişimler dikkate alınarak ön analizlerde güvenilir tarafta kalma adına ortalama  $\phi$  değerinden standart sapma kadar eksiltilecek önerilen değer elde edilmektedir (Tablo 3.28).  $\phi$  değerlerinin pratik tahminine yönelik elde edilen bulgulardan bazalt ve kireçtaşları için örnek gösterimler Şekil 3.48'de verilmiştir. Tüm kayaçlar için içsel sürtünme açısının pratik tahminine yönelik tek bir değer ( $41^\circ$ ) önerilmiş olsaydı, metabazaltlar için yüksek kireçtaşı ve bazaltlar için ise düşük bir değer önerilmiş olacaktı. İçsel sürtünme açısı gibi diğer parametrelerden tahmin edilmesi zor parametreler için kayaç bazında değerlendirme yapmanın çalışma sahasında ve çevresindeki benzer kayaçlar için daha sağlıklı olduğu düşünülmüştür.



Şekil 3.48.  $\phi$  değerlerinin pratik tahmini (bazalt ve kireçtaşları için örnek gösterim)

Tablo 3.28. İçsel sürtünme açısının tahmini için yaklaşımlar

| $\phi$ için pratik yaklaşımlar |               |   |                          |
|--------------------------------|---------------|---|--------------------------|
| İlişkili parametreler          | Kaya tipi     | $\phi^\circ$ e.d.-e.y.<br>(ortalama $\pm$ std. sp.) | Önerilen<br>$\phi^\circ$ |
| $\phi$ and UCS (N=37)          | Bütün kayalar | 37-56 (45 $\pm$ 4)                                  | 41                       |
| $\phi$ and BT (N=37)           | Bütün kayalar | 37-56 (45 $\pm$ 4)                                  | 41                       |
| $\phi$ and UCS (N=24)          | Volkanik      | 37-54 (45 $\pm$ 4)                                  | 41                       |
| $\phi$ and BT (N=24)           | Volkanik      | 37-54 (45 $\pm$ 4)                                  | 41                       |
| $\phi$ and UCS (N=11)          | Bazalt        | 43-50 (46 $\pm$ 2)                                  | 44                       |
| $\phi$ and BT (N=11)           | Bazalt        | 43-50 (46 $\pm$ 2)                                  | 44                       |
| $\phi$ and UCS (N=11)          | Dasit         | 37-54 (45 $\pm$ 5)                                  | 40                       |
| $\phi$ and BT (N=11)           | Dasit         | 37-54 (45 $\pm$ 5)                                  | 40                       |
| $\phi$ and UCS (N=8)           | Metabazalt    | 37-56 (44 $\pm$ 6)                                  | 38                       |
| $\phi$ and BT (N=8)            | Metabazalt    | 37-56 (44 $\pm$ 6)                                  | 38                       |
| $\phi$ and UCS (N=5)           | Kireçtaşı     | 44.5-50 (47 $\pm$ 2)                                | 45                       |
| $\phi$ and BT (N=5)            | Kireçtaşı     | 44.5-50 (47 $\pm$ 2)                                | 45                       |
| Volkanik breş: yetersiz veri   |               |   |                          |

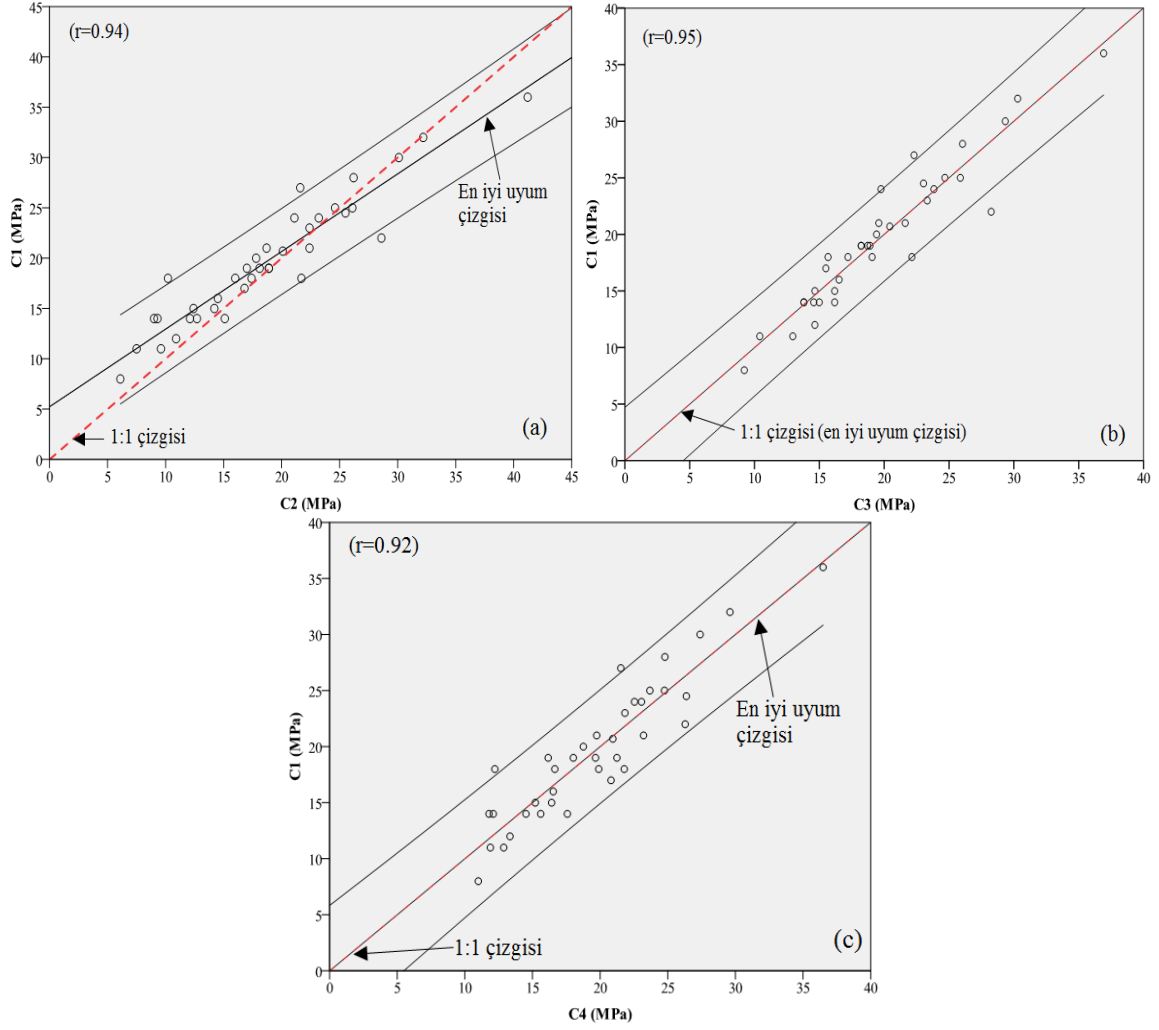
N: Örnek sayısı, e.d.: En düşük, e.y.: En yüksek

### 3.5.1. Ölçülen ve Tahmini Kohezyon Değerlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada deneysel olarak üç eksenli basınç dayanımı deneyinden elde edilen kohezyon değerleri  $C_1$  olarak simgelenmiştir. Karşılaştırmada kullanılacak diğer kohezyon değeri sadece ortalama BÇD ve UCS verilerinin kullanıldığı doğrusal Mohr-zarfi yönteminden elde edilmiş ve  $C_2$  olarak kodlanmıştır. İlaveten,  $C_3$  ve  $C_4$  simgesi ile gösterilen kohezyon değerleri sırasıyla UCS ve BÇD parametresinden regresyon analizi ile elde edilmiştir (Tablo 3.27). Ölçülen ve tahmini C değerleri Tablo 3.29'da verilmiştir.

Ölçülen ve tahmini C değerleri arasında korelasyon analizleri yapılmıştır (Şekil 3.49). Şekillerden görüldüğü gibi  $C_1-C_2$ ,  $C_1-C_3$  ve  $C_1-C_4$  veri çiftleri arasında çok yüksek korelasyon katsayı değerleri elde edilmiştir ( $r > 0.90$ ). Tek yönlü varyans analizi (ANOVA) de ayrıca C değerleri ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ve  $C_4$ ) için yapılmıştır. C değerlerinin hepsi normal dağılım göstermiştir. P değerleri  $C_1$  için 0.78,  $C_2$  için 0.97,  $C_3$  için 0.93 ve  $C_4$  için 0.98'dir. Ayrıca grupların homojen oldukları belirlenmiştir (anlam düzeyi = 0.454).  $C_1$  parametresinin kontrol grup olduğu diğerleri ile arasındaki benzerliği veya farklılığı test etmek için Dunnett 2 yönlü varyans analizi yapılmıştır (Şekil 3.50). Ayrıca ANOVA tablosuna göre de gruplar arasında fark olmadığı ortaya çıkmıştır ( $P = 0.884$ ). Buna göre hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın  $C_1$  parametresi % 95 güven aralığında tahmin edilebilmektedir.

Şekil 3.50'de  $C_2$  parametresinin diğerlerine göre biraz düşük ortalamaya sahip olduğu görülmektedir. Yukarıda bazı analizlerde olduğu gibi küçük farkla değerlerin biraz düşük çıkması aslında araştırmacıların güvenle analiz yapmasına olanak tanınması açısından önemlidir. Tablo 3.30 ve 3.31'de sırasıyla Dunnett 2 yönlü ANOVA analizi ile Tukey HSD analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Normalde veriler homojen olduğunda kullanılacak birçok yöntem vardır. Kayrı (2009) homojen dağılıma sahip ve örneklem sayısının farklı olduğu 4 farklı bölümde (sınıf öğretmenliği, okul öncesi öğretmenliği vb.) okuyan öğrencilerin bilgisayar dersinde gösterdikleri başarı ortalamalarını 4 farklı yöntemle (Tukey HSD, Scheffe, LSD ve Bonferroni) kıyaslamıştır. Yazar LSD hariç diğerlerinin benzer sonuç verdiğini belirtmiştir. LSD yöntemi grup sayısı 3'ten fazla olduğunda önerilmediğinden bu farklılığın nedeni olabileceği yazar tarafından belirtilmiştir. Ancak söz konusu çalışmada örneklem sayısı eşit olmamasına rağmen Tukey HSD yönteminin de kullanıldığı görülmektedir. Bu bölümde kohezyon değerleri Dunnett ve Tukey HSD yöntemleri ile test edilerek kohezyon gruplarının farklı olup olmadıklarının yanında yöntemlerinin bulguları değerlendirmesi konusundaki yaklaşımı da araştırılmıştır.



Şekil 3.49. Ölçülen ve tahmini C arasında korelasyon analizleri

Anlamlılık seviyeleri her iki yöntem için birbirine oldukça yakındır. Neticede her iki analiz yöntemine göre de  $C_2$  parametresinin alt ve üst sınırları diğer kohezyon değerlerinden kısmen daha düşüktür ve her iki yöneme göre gruplar birbirinin aynıdır/benzerdir. Bu bölümde ayrıca ölçülen ve tahmini kohezyon değerleri arasında % VAF, RMSE ve % MAPE analizleri yapılmıştır Tablo 3.32. Tabloya göre en iyi tahmin kapasitesini  $C_3$  yönteminin verdiği anlaşılmaktadır. Bununla beraber diğer yöntemlerinde güvenilir olduğu görülmüştür. % MAPE bulgularına göre  $C_3$  yöntemi “çok iyi tahmin”, diğer yöntemler ise “iyi tahmin” sınıfına dahil olmuşlardır (Tablo 3.32).

Tablo 3.29. Ölçülen ve tahmini C değerleri

| Örnek kodu | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1          | 36             | 41.2           | 35.07          | 36.48          |
| 2          | 32             | 32.2           | 30.03          | 29.60          |
| 3          | 15             | 12.4           | 14.42          | 15.21          |
| 4          | 22             | 28.6           | 28.29          | 26.28          |
| 5          | 28             | 26.2           | 26.31          | 24.79          |
| 6          | 21             | 18.7           | 19.91          | 19.74          |
| 7          | 24.5           | 25.5           | 23.44          | 26.37          |
| 8          | 30             | 30.1           | 29.23          | 27.39          |
| 9          | 24             | 21.1           | 20.09          | 23.06          |
| 10         | 27             | 21.6           | 22.71          | 21.53          |
| 11         | 17             | 16.8           | 15.41          | 20.81          |
| 12         | 18             | 17.4           | 17.33          | 19.90          |
| 13         | 14             | 15.1           | 16.18          | 17.58          |
| 14         | 8              | 6.1            | 7.77           | 10.99          |
| 15         | 14             | 9              | 13.43          | 12.10          |
| 16         | 19             | 18.9           | 18.45          | 16.16          |
| 17         | 14             | 9.3            | 13.43          | 11.78          |
| 18         | 18             | 10.2           | 15.60          | 12.22          |
| 19         | 14             | 12.7           | 14.32          | 15.61          |
| 20         | 11             | 9.6            | 12.41          | 12.87          |
| 21         | 23             | 22.4           | 23.72          | 21.83          |
| 22         | 18             | 16             | 19.37          | 16.65          |
| 23         | 20.7           | 20.1           | 20.80          | 20.94          |
| 24         | 19             | 17             | 19.18          | 18.02          |
| 25         | 15             | 14.2           | 16.18          | 16.41          |
| 26         | 16             | 14.5           | 16.57          | 16.53          |
| 27         | 11             | 7.5            | 9.28           | 11.89          |
| 28         | 24             | 23.2           | 24.22          | 22.54          |
| 29         | 20             | 17.8           | 19.73          | 18.76          |
| 30         | 25             | 24.6           | 25.04          | 23.68          |
| 31         | 14             | 12.1           | 14.82          | 14.52          |
| 32         | 12             | 10.9           | 14.42          | 13.34          |
| 33         | 21             | 22.4           | 22.03          | 23.21          |
| 34         | 25             | 26.1           | 26.15          | 24.76          |
| 35         | 19             | 18.9           | 18.45          | 21.24          |
| 36         | 18             | 21.7           | 22.54          | 21.78          |
| 37         | 19             | 18.1           | 19.00          | 19.66          |

C<sub>1</sub>: Üç eksenli basınç dayanımı testinden, C<sub>2</sub>: Sadece UCS ve BÇD verisinden,  
C<sub>3</sub>: UCS-C regresyon analizinden ve C<sub>4</sub>: BÇD-C regresyon analizden elde edilen kohezyon

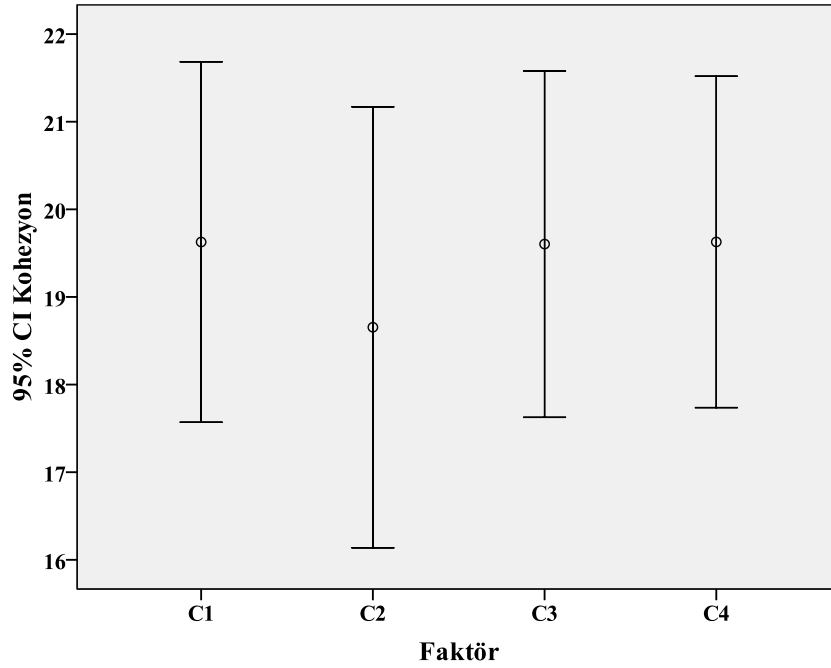
Tablo 3.30. Dunnett yöntemine göre grupların karşılaştırılması

| Dunnett t (2-yönlü) <sup>a</sup> |                | Çoklu karşılaştırmalar  |               |       |                    |           |
|----------------------------------|----------------|-------------------------|---------------|-------|--------------------|-----------|
| (I) Faktör                       | (J) Faktör     | Ortalama farkları (I-J) | Standart hata | P     | % 95 Güven aralığı |           |
|                                  |                |                         |               |       | Alt sınır          | Üst sınır |
| C <sub>2</sub>                   | C <sub>1</sub> | -0.97297                | 1.48125       | 0.850 | -4.4895            | 2.5436    |
| C <sub>3</sub>                   | C <sub>1</sub> | -0.02351                | 1.48125       | 1.000 | -3.5401            | 3.4930    |
| C <sub>4</sub>                   | C <sub>1</sub> | 0.00081                 | 1.48125       | 1.000 | -3.5157            | 3.5174    |

a. Dunnett t-testlerde bir grup kontrol grubu (I) diğerleri ona karşı karşılaştırılır

Tablo 3.31. Tukey HSD yöntemine göre grupların karşılaştırılması

| Tukey HSD      |                | Çoklu karşılaştırmalar  |               |       |                    |           |
|----------------|----------------|-------------------------|---------------|-------|--------------------|-----------|
| (I) Faktör     | (J) Faktör     | Ortalama farkları (I-J) | Standart hata | P     | % 95 Güven aralığı |           |
|                |                |                         |               |       | Alt sınır          | Üst sınır |
| C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | 0.97297                 | 1.48125       | 0.913 | -2.8772            | 4.8232    |
| C <sub>1</sub> | C <sub>3</sub> | 0.02351                 | 1.48125       | 1.000 | -3.8267            | 3.8737    |
| C <sub>1</sub> | C <sub>4</sub> | -0.00081                | 1.48125       | 1.000 | -3.8510            | 3.8494    |



Şekil 3.50. Kohezyon değerlerinin ANOVA grafiği

Tablo 3.32. VAF, RMSE, MAPE ve r değerleri (kohezyon)

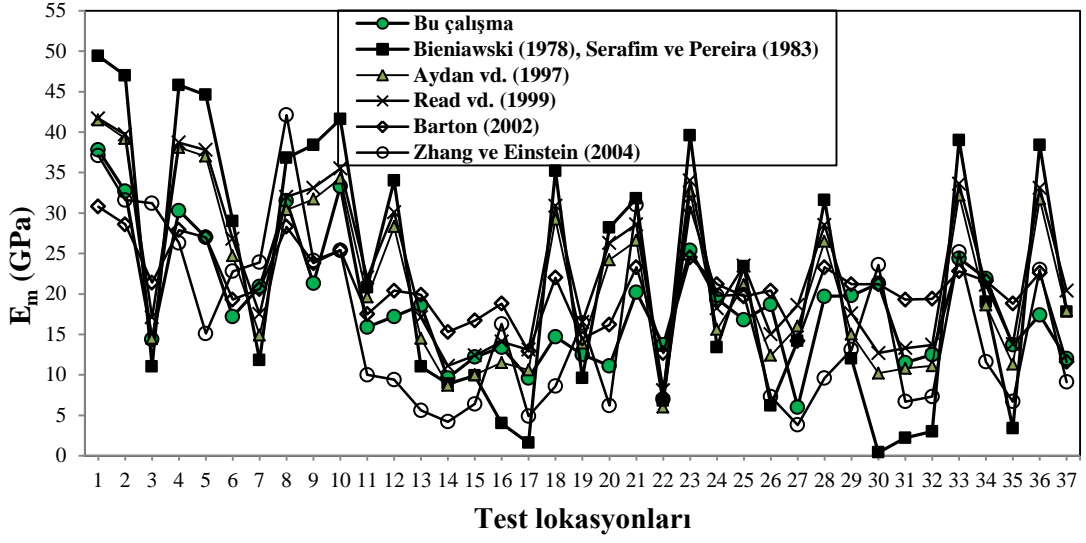
| Değişkenler                    | % VAF | RMSE | % MAPE | r    |
|--------------------------------|-------|------|--------|------|
| C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub> | 81    | 2.8  | 11.8   | 0.94 |
| C <sub>1</sub> -C <sub>3</sub> | 90    | 1.9  | 7.2    | 0.95 |
| C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub> | 85    | 2.4  | 11.0   | 0.92 |

Sadece ortalama BÇD ve UCS verilerinin kullanıldığı doğrusal Mohr-zarfi yönteminden aynı zamanda tahmini  $\phi$  değerleri ölçülmüştür. Ancak kohezyon verilerinin aksine  $\phi$  değerleri ölçülen değerlerden genel olarak daha yüksek çıkmıştır. Bu nedenle yukarıda kaya tipine yönelik önerilen  $\phi$  değerlerinin kullanımı özellikle Doğu Karadeniz Bölgesinde benzer kaya ortam veya formasyonlarda çalışan araştırmacılara yönelik pratik bir çözüm sağlayabilir. Sonuç olarak literatürde önerildiği gibi UCS ve BÇD deneylerinden elde edilen tahmini C değerlerinin kaya mühendisliği projelerinde sağlıklı bir şekilde kullanılabilmesi doğrulanmıştır. Böylece, pratik ve ekonomikliği açısından üç eksenli deneylere üstünlük sağlayan BÇD ve UCS deneylerinin C tahmininde kullanılabilmesi basit korelasyon, ANOVA, VAF, RMSE ve MAPE analizleri ile doğrulanmıştır.

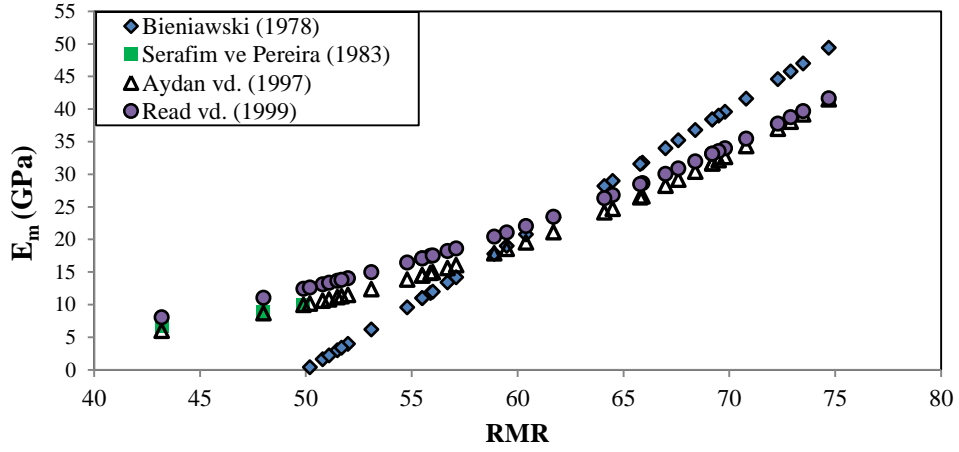
### 3.6. Kaya Kütlesi Deformasyon Modülünün ( $E_m$ ) Belirlenmesi

$E_m$  değerleri birlikte değerlendirildiğinde aynı örnekleme noktası için birbirinden oldukça farklı  $E_m$  değerlerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 3.51). Bieniawski (1978) eşitliği diğerlerine nazaran kısmen farklı olsa da, RMR sisteminden elde edilen eşitliklerin genelde aynı eğilimde olduğu anlaşılmış ve Şekil 3.52’de gösterilmiştir. Aydan vd. (1997) ve Read vd. (1999) tarafından önerilen eşitlikler oldukça yakın  $E_m$  değerleri vermiştir. Şekil 3.53’de bu çalışmadan üretilen eşitlik ile birbirine oldukça yakın  $E_m$  değerleri sunan iki eşitliğin (Aydan vd., 1997; Read vd., 1999) karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 3.53’e göre önerilen eşitlik ile kısmen daha düşük  $E_m$  değerlerinin elde edildiği ve bu nedenle önerilen eşitliğin analizlerde araştırmacıları güvenli tarafta bırakabileceği düşünülmüştür. Khabbazi vd. (2013) süreksizlik özellikleri ve kaya dayanımı kaya kütlelerinin deformasyonuna en çok etki eden iki unsur olduklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmada üretilen eşitliğin hem süreksizlik özellikleri (RQD) hem de kaya dayanımını (PLI) temsil etme özelliği vardır (Eşitlik 15).

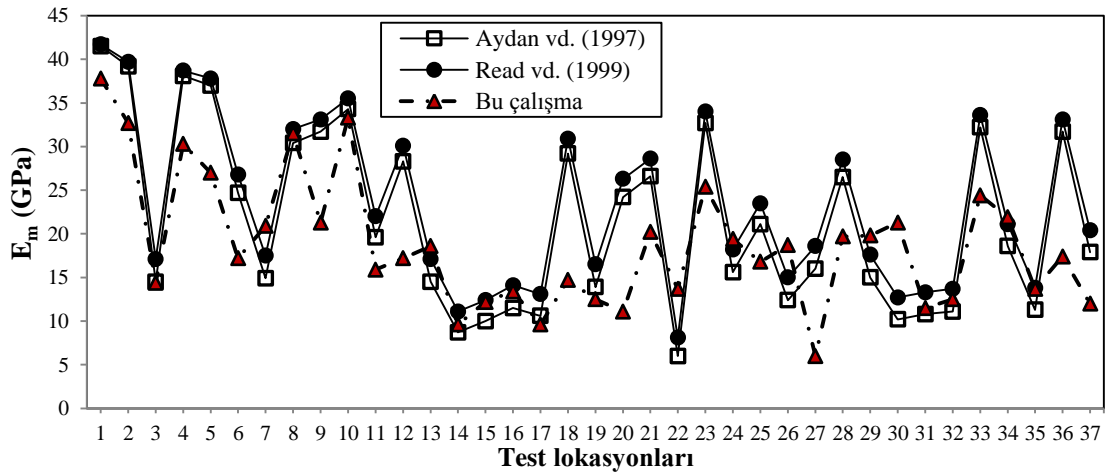




Şekil 3.51.  $E_m$  değerlerinin örnek noktasına göre değişimi



Şekil 3.52. RMR ile  $E_m$  arasındaki ilişki



Şekil 3.53.  $E_m$  değerlerinin karşılaştırılması (Karaman vd., 2014)

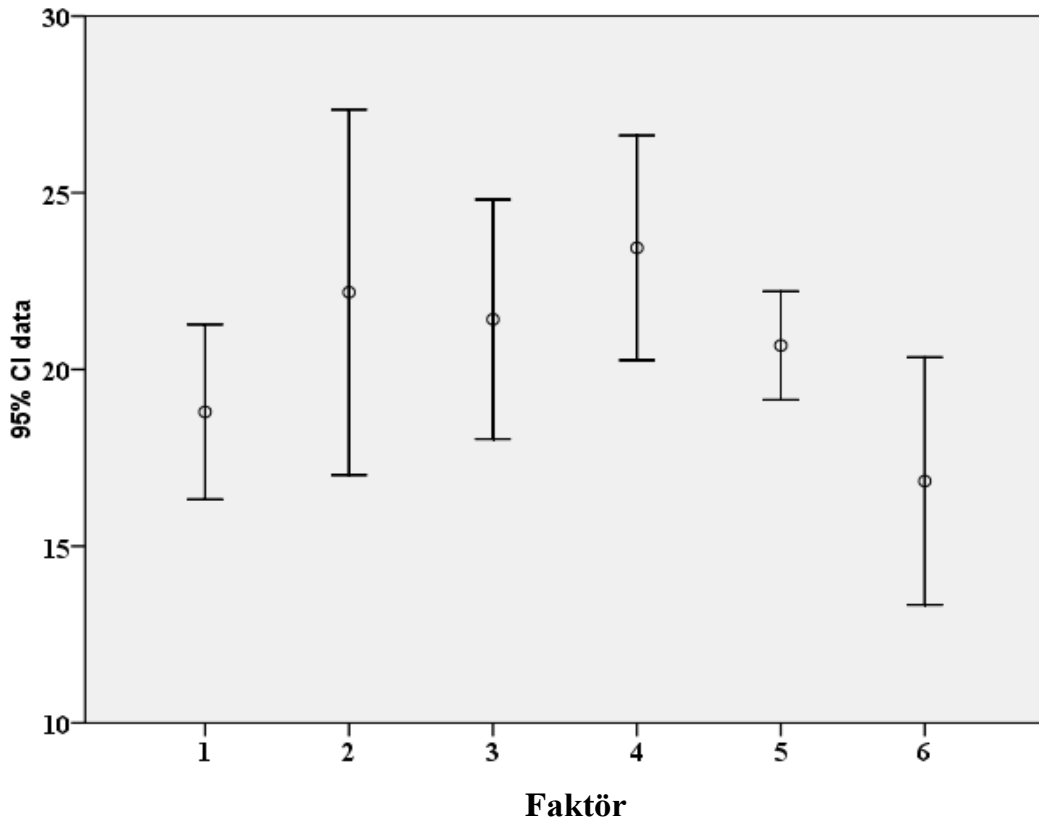
Önerilen eşitlik yardımıyla bulunan  $E_m$  değerlerinin diğer eşitliklerden hesaplanan değerler ile benzerliği veya farkını test etmek için tek yönlü varyans analizi (Oneway ANOVA) yapılmıştır (Şekil 3.54). Tek yönlü varyans analizi grup verilerinin normal dağılımı koşulunu öne sürdüğünden önce normallik testleri (normality tests) ile verilerin normal dağılıma uygunluğu test edilmiştir. Kaya kütlelerinin  $E_m$  değerleri Kolmogorov–Simirnov’a göre normal dağılım göstermiştir (önem düzeyi  $> 0.05$ ). Ayrıca, verilerin normal dağılımlarını gösteren histogram grafikleri Şekil 3.55’te yer almaktadır. Şekil 3.55 incelendiğinde bu çalışma ve Barton (2002) tarafından önerilen eşitliklere ait önem düzeyleri diğer eşitliklerden daha yüksek çıkmıştır. Tek yönlü varyans analiz bulgularını incelemeyen önce varyansların homojenliği test edilmiştir. Grupların homojen olması için anlamlılık seviyesi ( $P$ )  $> 0.05$  olması gerekmektedir. Bu teste göre verilerin homojen olmadığı ( $P=0.000$ ) anlaşılmıştır. Bu nedenle Tamhane’s T2 post-hoc testi grupların benzer olup olmadığını kontrol etmek için kullanılmıştır (Tablo 3.33). Hochberg ve Tamhane (1987), Tamhane’s T2 ve Tamhane’s T3 testlerinin tutucu ve dikkatli karşılaştırmalar yaptığını belirtmektedirler. Bu analizde  $P$  değeri 1.0’e yaklaştıkça grupların benzerliğinin arttığı bilinmektedir.  $P$  değeri 1.0 olduğunda ise grupların birbirine aynı olduğu anlamı çıkmaktadır. Bu çalışmada önerilen eşitlikle hesaplanan  $E_m$  değerleri ile diğer eşitliklerden elde edilen  $E_m$  değerleri arasında fark olmadığı (benzer oldukları) Tamhane’s T2 testi ile anlaşılmıştır ( $P > 0.05$ ). Tablo 3.33 incelendiğinde grup 1 (bu çalışma) ile grup 6’nın (Zhang ve Einstein, 2004) diğer gruplara göre daha çok benzerlik gösterdiği görülmektedir. Kayaçların dayanımı arttıkça  $E_i$  ve PLI değerleri artmaktadır. Ayrıca her iki eşitliğin (grup 1 ve grup 6) RQD parametresini içermesi, iki grup arasındaki benzerliği artırmış olabilmektedir. Grup 1’e en az benzeyen ise  $P$  değerlerine göre (0.289) grup 4 (Read vd. 1999) olmuştur. Ortalama farklılığı açısından grup 1’e en yakın gruplar; grup 5 (Barton, 2002) ve grup 6 (Zhang ve Einstein, 2004) olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer gruplar kendi aralarında değerlendirildiğinde grup 4 (Read vd. (1999)) ve grup 6 (Zhang ve Einstein (2004)) arasında fark olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3.54). Ancak bu çalışmada grup 1 (önerilen eşitlik) ile diğer grupların benzerliği araştırılmıştır. Tablo 3.33 ve Şekil 3.54 incelendiğinde bu çalışmada üretilen eşitliğin ANOVA çoklu karşılaştırma analizlerine göre güvenilir olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca söz konusu eşitliğin diğerlerine göre (UCS,  $E_i$  vb.) daha ucuz ve kolay elde edilebilen parametreleri (RQD ve PLI) içermesi, yüksek kaliteli karota ihtiyaç duymaması ve deneyin arazide yapılabilmesi gibi araştırmacıların

işini kolaylaştırması bakımından oldukça önemli olduğu düşünülmüştür. Söz konusu eşitlik ön analiz ve araştırmalarda  $E_m$  parametresi açısından araştırmacılara bir fikir verebilecektir (Karaman vd., 2014).

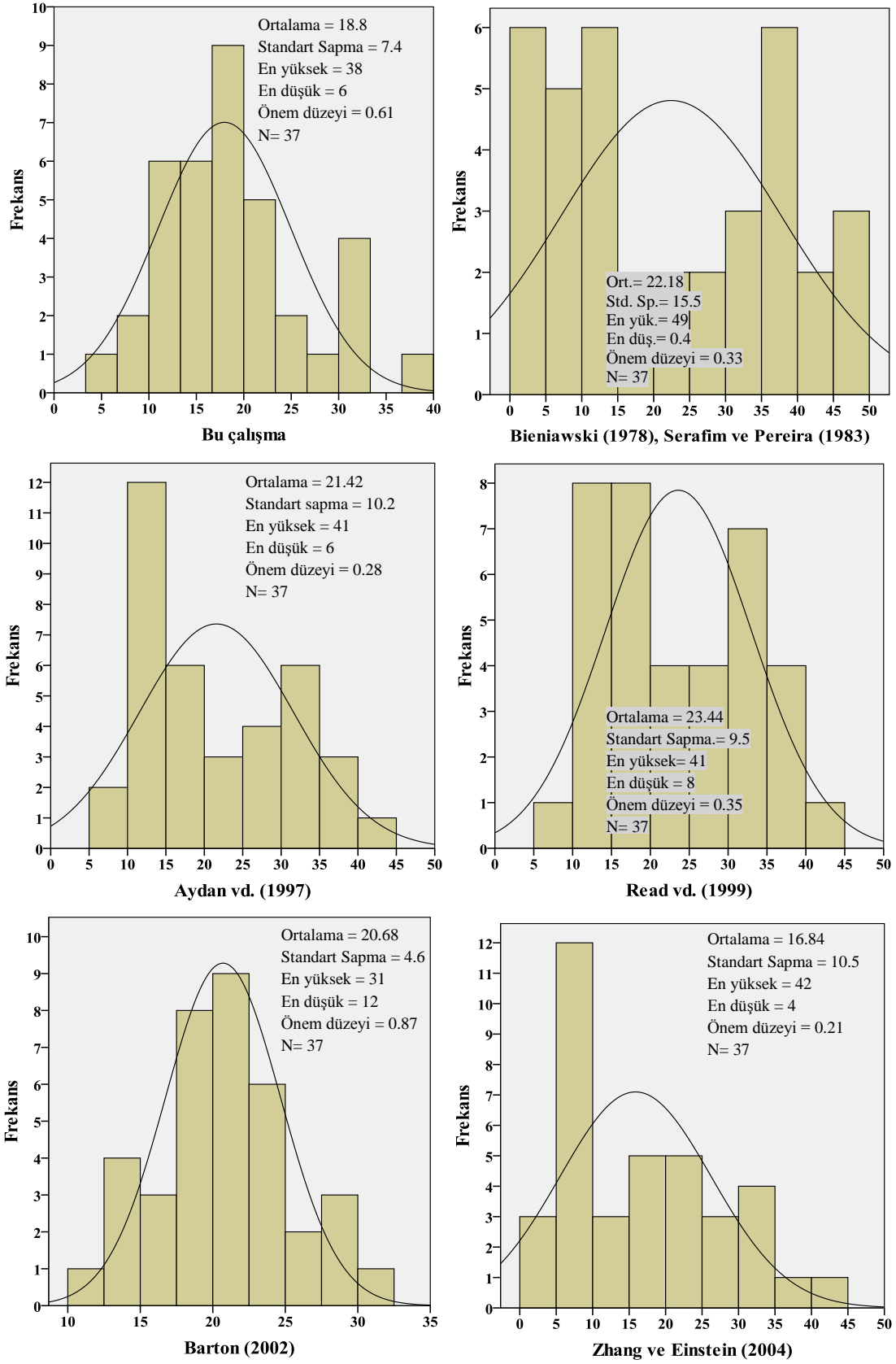
Tablo 3.33. Grupların çoklu karşılaştırması (ANOVA Tamhane's T2 testi)

| (I)<br>Faktör/<br>Grup | (J)<br>Faktör/<br>Grup | Ortalama<br>farklılığı (I-J) | Standart<br>hata | P     | 95% Güven aralığı |           |
|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------|-------|-------------------|-----------|
|                        |                        |                              |                  |       | Alt sınıf         | Üst sınır |
| 1                      | 2                      | -3.3838                      | 2.8259           | 0.983 | -12.058           | 5.290     |
| 1                      | 3                      | -2.6189                      | 2.0688           | 0.971 | -8.903            | 3.666     |
| 1                      | 4                      | -4.6405                      | 1.9868           | 0.289 | -10.669           | 1.388     |
| 1                      | 5                      | -1.8784                      | 1.4359           | 0.962 | -6.256            | 2.499     |
| 1                      | 6                      | 1.9595                       | 2.1145           | 0.999 | -4.468            | 8.387     |

1: Bu çalışma, 2: Bieniawski (1978), Serafim ve Pereira (1983), 3: Aydan vd. (1997), 4: Read vd. (1999), 5: Barton (2002), 6: Zhang ve Einstein (2004).



Şekil 3.54.  $E_m$  değerlerin ANOVA grafiği (Karaman vd., 2014)



Şekil 3.55. Elde edilen deformasyon modülü değerlerinin histogram grafikleri

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Trabzon ili Çaykara İlçesi yakınlarında HES çalışması kapsamında açılan enerji tünelinin litoloji ve/veya kaya kütle özelliklerinin değişiklik gösterdiği 37 farklı aynasında jeoteknik çalışmalar (süreksizlik özellikleri, kaya dayanım parametrelerinin belirlenmesi vb.) yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular maddeler halinde aşağıda verilmiştir;

1- Tünel güzergahı boyunca Çambaşı, Ataköy, Taşkırın ve Çaykara Formasyonlarına ait metabazalt, bazalt, dasit, kireçtaşı, volkanik breş ve yer yer bazı aynalarda sokulum şeklinde/dayk mikrodiorit kayaçlarına rastlanmıştır.

2- Temel RMR puanlarına göre çalışma sahasındaki kaya kütle tanımlamaları “orta kaya” ve “iyi kaya” özelliğindedir. Q sınıflamasına göre kaya kütle tanımlamaları çoğunlukla “orta” ve “sağlam” sınıfındadır. RMI sistemine göre ise çalışılan kaya kütleleri “orta” sınıfına dahil olmuşlardır.

3- Kaya malzemesine ait UCS parametresini dolaylı yöntemlerle (R, PLI, UPV, BÇD, BHA) belirlemeye yönelik istatistik analizler (regresyon, korelasyon, ANOVA, % VAF vb.) yapılmıştır.

Laboratuvarda karot örneklerinin yetersiz olduğu ve ayrıca sağlam karot alımının zor olduğu kaya ortamları için Schmidt sertliği belirleme yöntemi önerilmiştir. % tahmin hatası bulguları önerilen yöntemin % 10 ve altındaki hata değerlerine göre karşılaştırmada kullanılan yöntemlerden % 7–11 arasında daha güvenilir olduğunu göstermiştir.

$R_{ISRM-EV}$  ve  $R_{ISRM-RV}$  ile UCS ve UPV arasında yapılan regresyon analizleri, eski ve yeni versiyon arasında önemli bir fark olmadığını göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca UPV/UCS oranı ve Schmidt sertlik değerleri arasında (metamorfik kayaçlar hariç) çok yüksek korelasyon katsayılarının elde edildiği üstel bir eğilim görülmüştür. Schmidt çekici deneyi için ilave karot örneğinin bulunmadığı veya Schmidt çekicinin olmadığı durumlarda pratik yoldan Schmidt sertlik sınıfına yönelik (sert, çok sert vb.) ortalama UPV/UCS oran değerleri kullanılarak bir sınıflama önerilmiştir.

UCS tahmini için ayrıca PLI değerlerinden yararlanılmıştır. Bütün kayaçlar, volkanik, tortul ve metamorfik kayaçlar için ayrı ayrı UCS tahmini için eşitlikler üretilmiştir. PLI sonuçları literatürle benzerlik gösterdiği ve UCS tahmininde tek bir k (UCS/PLI) değeri olmadığı için kapsamlı literatür taraması sonucunda UCS ve PLI

parametrelerini içeren 6 farklı ülkeden toplam 490 kayaç örneği derlenmiştir. Literatürden farklı olarak bu çalışmada magmatik (piroklastik, volkanik (yüzey), plütonik (sokulum) ve yarı derinlik) tortul (kimyasal, kırıntılı ve evaporitler) ve metamorfik (foliasyonlu (yönelimli, anizotrop, şistozite vb.) ve foliasyonsuz (yönelimsiz, izotrop) kayaçların oluşum özellikleri dikkate alınarak UCS ve PLI arasındaki ilişki irdelenmiştir. Buna göre; yüksek dayanımlı kayaçlarda  $k$  değerlerinin de arttığı görülmüş ve bu sonuç literatürle paralel çıkmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan 20–25 arasındaki katsayının tüm kayaçlar değerlendirildiğinde neredeyse hiçbir kaya grubunu temsil etmediği bununla beraber yüksek  $k$  değerlerinin belli bir bölgeye veya özel bir kaya grubuna ait olabileceği düşünülmüştür.

BÇD ve PLI parametreleri UCS tahmininde diğerlerine (R, UPV ve BHA) nazaran daha yüksek korelasyon katsayısı vermiştir. Bununla beraber, kullanılan bütün yöntemler % 95 güven aralığında UCS tahmininde güvenilir bulunmuştur.

4- Laboratuvarda elde edilen UCS (ölçülen) ile indeks deneylerden tahmin edilen UCS değerleri kaya kütleli sınıflama sistemlerinde (RMi,  $Q_c$  ve RMR) kullanılarak kıyaslanmıştır.

Ölçülen ve tahmin edilen UCS kullanılarak elde edilen RMi puanlarına göre çalışılan kaya kütleleri büyük çoğunlukla aynı sınıfa (orta) dahil olmuştur. RMi sisteminde UCS parametresinin etkisi araştırılmış ve UCS parametresinin RMi sisteminde kullanılan en önemli parametrelerden biri olduğu doğrulanmıştır. Benzer analizler normalize  $Q$  ( $Q_c$ ) puanları için yapılmış ve ölçülen ve tahmini UCS'den belirlenen  $Q_c$  değerleri arasında yüksek korelasyon katsayıları ( $r > 0.88$ ) elde edilmiştir.  $Q_c$  puanına UCS parametresinin etkisi araştırılmıştır. Buna göre UCS 100 MPa olduğunda  $Q$  puanının  $Q_c$  puanına eşit olduğu, 100 MPa değerinden küçük olduğunda  $Q > Q_c$  ve 100 MPa değerinden büyük olduğunda ise  $Q < Q_c$  olduğu görülmüştür.

RMR sisteminde girdi parametresi olan dayanım puanının dolaylı olarak belirlenmesine yönelik olarak tahmini UCS değerleri kullanılmıştır. Dayanım puanlarının pratik olarak başka deneylerden belirlenmesine yönelik literatürde önerilen grafikler de ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Literatür ve bu çalışmadan derlenen 490 kaya malzemesine ait UCS ve PLI veri çiftleri  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa olarak iki ayrı sınıfa ayrılmıştır. Nokta yükü indeksinden dayanım puanının belirlenmesine yönelik  $PLI < 1$  MPa ve  $PLI > 1$  MPa için iki farklı grafik önerilmiştir. ANOVA, % VAF, RMSE ve % MAPE analizleri önerilen grafiklerin RMR'de girdi parametresi olan dayanım puanının tahmin edilmesinde güvenilir

olduğunu göstermiştir. Önerilen grafiklerin güvenilirliği çalışma sahasındaki 37 örnek noktası için denenmiştir. Analiz bulguları, önerilen grafik ile elde edilen RMR puanının güvenilir olduğunu hatta ölçülen RMR'den yaklaşık % 1 daha düşük sonuç verdiği için analizlerde güvenle kullanılabilceğini göstermiştir.

5- Kaya kütlesi sınıflama sistemleri kendi aralarında birinden diğerinin tahmin edilebilirliği konusunda karşılaştırılmış ve literatürle tartışılmıştır. Q puanları ile R<sub>Mi</sub> arasında ilişki gözlenmezken, UCS parametresinin ilave edilmesinden dolayı Q<sub>c</sub> ile R<sub>Mi</sub> arasında yüksek bir ilişkiye rastlanmıştır.

6- Kaya malzemelerinin C ve  $\phi$  parametrelerinin dolaylı yoldan tahminine yönelik çalışmalar yapılmıştır. C ile UCS ve BÇD arasında çok yüksek ilişki gözlenmiştir. Ayrıca C parametresinin dolaylı olarak belirlenmesine yönelik literatürde var olan bir yöntem kullanılmış ve elde edilen C değerleri hem korelasyon hem de ANOVA analizleri ile test edilmiştir. Korelasyon analizlerine göre % 95 güven aralığında anlamlı ilişkiler elde edilirken, ANOVA analizleri de grupların benzer olduğunu göstermiştir. % VAF, RMSE ve % MAPE analizleri de kullanılan yöntemlerin güvenilir olduğunu doğrulamıştır.  $\phi$  ile UCS ve BÇD arasında ise zayıf bir ilişki elde edilmiştir. Bu nedenle kaya türüne göre  $\phi$  değerlerinin değişim aralıkları göz önüne alınarak pratik önerilerde bulunulmuştur.

7- Bu çalışmada ayrıca kaya kütlesi deformasyon modülü ( $E_m$ ) üzerine literatürde önerilen birçok eşitliğe göre daha pratik ve ucuz bir eşitlik önerilmiştir. RQD ve PLI verileriyle oluşturulan eşitlik literatürde yaygın kullanıma sahip 5 diğer yöntemle karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda ANOVA çoklu karşılaştırma analizleri, önerilen eşitlik ile bulunan  $E_m$  değerleri ile diğer eşitliklerden elde edilen  $E_m$  değerleri arasında fark olmadığını göstermiştir.

8- Sonuç olarak, bu çalışma tünel uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kaya dayanım parametrelerinin (UCS, C,  $\phi$  ve  $E_m$ ) dolaylı yöntemlerden tahmininde yenilikler içermektedir. Ayrıca, bu çalışmada geliştirilen tahmin modelleri ile tünel gibi jeoteknik uygulamaların ayrılmaz bir parçası olan kaya kütlesi sınıflama sistemleri (RMR, Q<sub>c</sub> ve R<sub>Mi</sub>) daha kolay ve pratik olarak kullanılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

- Abad, J., Caleda, B., Chacon, E., Gutierrez, V. ve Hidlgo, E., 1984. Application of Geomechanical Classification to Predict the Convergence of Coal Mine Galleries and to Design Their Supports, In: 5th Inter. Cong. Rock Mech., Melbourne, 15–19.
- Açıkgözoğlu, R., 2008. Bursa-Ulubat Kuvvet Tünelinin Jeoteknik İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü Dergisi, 133 s.
- Adebayo, B., Opafunso, Z.O. ve Akande, J.M., 2010. Drillability and Strength Characteristics of Selected Rocks in Nigeria, Assumption University Journal of Technology, 14, 1, 56-60.
- Agustawijaya, D.S. 2007. The Uniaxial Compressive Strength of Soft Rock, Civil Engineering Dimension, 9, 1, 9–14.
- Aksoy, C.O., Onargan, T., Yenice, H., Küçük, K. ve Köse H. 2006. Determining the stress and convergence at Beypazari trona field by three-dimensional elastic–plastic finite element analysis: A case study, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 166–178.
- Aksoy, C.O., Geniş, M., Aldaş, G.U., Özacar, V., Özer, S.C. ve Yılmaz, Ö., 2012. A Comparative Study of the Determination of Rock Mass Deformation Modulus by Using Different Empirical Approaches, Engineering Geology, 131-132, 19–28.
- Al-Jassar, S.H., ve Hawkins, A.B. 1979. Geotechnical Properties of the Carboniferous Limestones of the Bristol Area; the Influence of Petrography and Chemistry, ISRM Proc. 4th. Congress. Montreaux, 3–13.
- Alemdağ, S., Kaya, A., Gürocak, Z. ve Dağ, S., 2011. Excavatability Properties of Rock Masses Having Different Weathering Degrees: An Example of Gumushane Granitoid, Gumushane, NE Turkey (In Turkish), Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 35, 2, 135-152.
- American Society for Testing and Materials (ASTM)., 2001. Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method, 04.09 (D 5873-00).
- ASTM., 2004. Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens without Pore Pressure Measurements, D2664.
- Anikoh, G.A., ve Olaleye, B.M., 2013. Estimation of Strength Properties of Shale from Some of Its Physical Properties Using Developed Mathematical Models, The International Journal Of Engineering And Science (IJES), 2, 4, 01-05.
- Aydan, Ö., Ulusay, R. ve Kawamoto, T., 1997. Assessment of Rock Mass Strength for Underground Excavations, In: Proceedings of the 36th US rock mechanics symposium, New York, June/July, 777–786.



- Aydın, A. ve Basu, A., 2005. The Schmidt Hammer in Rock Material Characterization, Engineering Geology, 81, 1–14.
- Azimian, A., Ajalloeian, R. ve Fatehi, L., 2014. An Empirical Correlation of Uniaxial Compressive Strength with P-wave Velocity and Point Load Strength Index on Marly Rocks Using Statistical Method, Geotechnical and Geological Engineering, 32, 205-214.
- 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., 1995. The Influence of Joint Properties in Modelling Jointed Rock Masses. Keynote Lecture. In: 8th Cong. ISRM, Tokyo.
- Barton, N.R., 2002. Some New Q-value Correlations to Assist in Site Characterization and Tunnel Design, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, 1, 185-216.
- Basu, A. ve Aydın, A., 2006. Predicting Uniaxial Compressive Strength by Point Load Test: Significance of Cone Penetration, Rock Mechanics and Rock Engineering, 39, 483–490.
- Başarır, H., Özsan, A. ve Karakus M., 2005. Analysis of Support Requirements for a Shallow Diversion Tunnel at Guledar Dam Site, Turkey, Engineering Geology, 81,2, 131-145.
- Beyhan, S., 2008. G.L.İ. ve E.L.İ. Marn Kaya Malzemelerinin Üç Eksenli Basınç Dayanımına Bağlı Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 224 s.
- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Transactions of South African Institute of Civil Engineering, 15, 12, 335–344.
- Bieniawski, Z.T., 1975. Point Load Test in Geotechnical Practice, Engineering Geology, 9, 1, 1-11.
- Bieniawski, Z.T., 1976. Rock Mass Classification in Rock Engineering Applications. Proc. Symp. On Exploration for Rock Eng., South Africa, Balkema, Rotterdam, 97–106.
- Bieniawski, Z.T., 1978. Determining Rock Mass Deformability, Experience from Case Histories, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, 15, 237–247.

- Bieniawski, Z.T. ve Hawkes, I., 1978. Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 15, 99-103.
- 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.
- Broch, E. ve Franklin, J.A., 1972. The Point-load Strength Test, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, 9, 6, 669-676.
- Bulut, F., 1989. Çambaşı (Trabzon-Çaykara) Barajı ve Uzungöl HES Santral Yerlerinin Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 189 s.
- Bulutlar, E., 1983. Tünel Güzergahı Seçimi ve Tünel İnşasına Kadar Yapılan Araştırmalar, Tünelcilik semineri, Ankara, 20-43.
- Büyüksağış, I.S. ve Göktaş, R.M., 2007. The Effect of Schmidt Hammer Type on Uniaxial Compressive Strength Prediction of Rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44, 299–307.
- Cargill, J.S. ve Shakoor, A., 1990. Evaluation of Empirical Methods for Measuring the Uniaxial Strength of Rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 27, 495–503.
- Catallini, L.E., 1986. Rock Mass Classification for Preliminary Tunnel Design: Sterrita site. The University of Arizona, MSc Thesis, Arizona.
- Celada, B., Tardaguila, I., Varona, P., Rodriguez, A. ve Bieniawski, Z.T., 2014. Innovating Tunnel Design by an Improved Experience-based RMR System. Proceedings of the World Tunnel Congress, Tunnels for a better Life, Foz do Iguaçu, Brazil, 9 s.
- Chau, K.T. ve Wong, R.H.C., 1996. Uniaxial Compressive Strength and Point Load Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 33, 183–188.
- 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.
- Clerici, A., 1993. Indirect Determination of Rock Masses—case Histories. In: L.M. Riberio Sousa and N.F. Grossman, eds. Proceedings of the Symposium EUROCK '93. Rotterdam: AA Balkema, 509–517.
- Coviello, A., Lagioia, R., ve Nova, R. 2005. On the Measurement of the Tensile Strength of Soft Rocks, Rock Mechanics and Rock Engineering, 38, 4, 251–273.

- D'Andrea, D.V., Fisher, R.L. ve Fogelson, D.E., 1964. Prediction of Compression Strength from Other Rock Properties, Colorado School of Mines Quarterly, 59, 4b, 623-640.
- 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. Engineering Classifications and Index Properties of Intact Rock. Technical report no. AFWL-TR 65-116, University of Illinois: p.300
- Diamantis, K., Gartzos, E. ve Migiros, G., 2009. Study on Uniaxial Compressive Strength, Point Load Strength Index, Dynamic and Physical Properties of Serpentinities from Central Greece: Test Results and Empirical Relations, Engineering Geology, 108, 199-207.
- Dunnett, C.W., ve Tamhane, A.C., 1992. A Step-up Multiple Test Procedure, Journal of the American Statistical Association, 87, 162-170.
- Ensari, B., 2008. Kuskunkıran Tünelinin Jeolojik-jeoteknik Özellikleri, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 35 s.
- Ersoy, H. ve Kanik, D., 2012. Multicriteria Decision-making Analysis Based Methodology for Predicting Carbonate Rocks' Uniaxial Compressive Strength, Earth Sciences Research Journal, 16, 1, 65-74.
- Farah, R., 2011. Correlations Between Index Properties and Unconfined Compressive Strength of Weathered Ocala Limestone. Master Thesis in Civil Engineering. University of North Florida School of Engineering, 83.
- Fener, M., Kahraman, S., Bilgil, A. ve Gunaydin, O., 2005. A Comparative Evaluation of Indirect Methods to Estimate the Compressive Strength of Rocks, Rock Mechanics and Rock Engineering, 38, 4, 329-343.
- Fowell, R.J. ve McFeat, Smith, I., 1976. Factors Influencing the Cutting Performance of a Selective Tunnelling Machine. Tunelling' 76, Proceedings of the international symposium IMM, London, 301-9.
- Funatsu, T., Hoshino, T., Sawae, H. ve Shimizu N., 2008. Numerical Analysis to Better Understand the Mechanism of the Effects of Ground Supports and Reinforcements on the Stability of Tunnels Using the Distinct Element Method, Tunnelling and Underground Space Technology, 23, 561-573.
- Genç, D., 1983. Tünel Açımı Esnasında Karşılaşılan Jeolojik Sorunlar, Tünelcilik Semineri, Ankara, 143-163.
- Ghosh, D.K. ve Srivastava, M., 1991. Point Load Strength: An Index for Classification of Rock Material, Bulletin of International Associated Engineering Geology, 44, 27-33.

- Gökçeoğlu, C., 1996. Schmidt Sertlik Çekici Kullanılarak Tahmin Edilen Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Verilerinin Güvenilirliği Üzerine bir Değerlendirme, Jeoloji Mühendisliği, 48,78–81.
- Gökçeoğlu, C., 2002. A Fuzzy Triangular Chart to Predict the Uniaxial Compressive Strength of the Ankara Agglomerates from Their Petrographic Composition, Engineering Geology, 66, 39–51.
- Gökçeoğlu, C., Sönmez, H. ve Kayabaşı, A., 2003. Predicting the Deformation Moduli of Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, 701–710.
- Göktan, R.M. ve Ayday, C.A., 1993. Suggested Improvement to the Schmidt Rebound Hardness ISRM Suggested Method with Particular Reference to Rock Machineability, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 30, 321–2.
- Göktan, R.M. ve Güneş, N., 2005. Acomparative study of Schmidt hammer testing procedures with reference to rock cutting machine performance prediction, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42, 466–472.
- Grasso, P., Xu, S. ve Mahtab, A., 1992. Problems and Promises of Index Testing of Rocks. In: Tillerson, J.R., Wawersik, W.R. (Eds.), Proceedings of the 33rd US Symposium on Rock Mechanics. Balkema, Rotterdam, 879–888.
- Greminger, M., 1982. Experimental Studies of the Influence of Rock Anisotropy on Size and Shape Effects in Point-load Testing, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 19, 24-246.
- Greene, B.H., 2001. Predicting the Unconfined Compressive Strength of Mudrocks for Design of Structural Foundations. Kent State University, PhD Thesis, Kent
- 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.
- Gül, Y. ve Ceylanoğlu, A., 2013. Evaluation of Plate Loading Tests on Some Rock Formations for Assessing the Ground Bearing Capacity, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72, 131-136.
- Güney, A., 2011. Performance Prediction of Large-diameter Circular Saws Based on Surface Hardness Tests for Mugla (Turkey) marbles, Rock Mechanics and Rock Engineering, 44, 357–366.
- Gürocak, Z., Solanki, P. ve Zaman, M.M., 2007. Empirical and Numerical Analyses of Support Requirements for a Diversion Tunnel at the Boztepe Dam Site, Eastern Turkey, Engineering Geology, 91, 194-208.

- Gürocak, Z., Alemdağ, S. ve Zaman, M.M. 2008. Rock Slope Stability and Excavatability Assessment of Rocks at the Kapikaya Dam Site, Turkey, Engineering Geology, 96, 17-27.
- Gürocak, Z., 2011. Analyses of Stability and Support Design for a Diversion Tunnel at the Kapikaya Dam Site, Turkey, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 1, 41-52.
- Gunsallus, K.L. ve Kulhawy, F.H., 1984. A Comparative Evaluation of Rock Strength Measures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 21, 233-248.
- Haramy, K.Y. ve De Marco, M.J., 1985. Use of Schmidt Hammer for Rock and Coal Testing. In: Proc 26th US symp rock mech, 26–28 June, Rapid City, SD. Rotterdam: Balkema, 549–555.
- Hashemi, M., Moghaddas, S. ve Ajalloeian, R., 2010. Application of Rock Mass Characterization for Determining the Mechanical Properties of Rock Mass: a Comparative Study, Rock Mechanics and Rock Engineering, 43, 305–320.
- Hassani, F.P, Scoble, J.J. ve Whittaker, B.N., 1980. Application of Point-load Index Test to Strength Determination of Rock and Proposals for New Size-correction Chart. In: Summers, D. A. (ed.) Proc. 21st US Symp. Rock Mech., Rolla, Missouri, 543–553
- Hawkins, A.B., 1998. Aspects of Rock Strength, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57, 17–30.
- Heidari, M., Khanlari, G.R., Kaveh, M.T. ve Kargarian, S., 2012. Predicting the Uniaxial Compressive and Tensile Strengths of Gypsum Rock by Point Load Testing, Rock Mechanics and Rock Engineering, 45, 265–273.
- Hobbs, D.W., 1964. The Strength and the Stress-Strain Characteristics of Coal in Triaxial Compression, Journal of Geology, 72, 214-231.
- Hochberg, Y., ve Tamhane, A.C., 1987. Multiple Comparison Procedures, New York: John Wiley.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. ve Bawden, W.F., 1993. Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema, Rotterdam, 235.
- Hoek, E. ve Brown, E.T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 8, 1165–1186.
- Hoek, E. ve Diederichs, M.S., 2006. Empirical Estimation of Rock Mass Modulus, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 203–215.
- Hucka, V., 1965. A Rapid Method for Determining the Strength of Rocks In-situ, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2, 127–34.

- Hudson, J.A., Rummel, F. ve Brown, E.T., 1972. The Controlled Failure of Rock Disks and Rings Loaded in Diametral Compression, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9, 241-248.
- 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., 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring, Pergamon Press, London, 211 s.
- ISRM., 1985. Suggested Method for Determining Point Load Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstract, 22, 2, 53-60.
- ISRM., 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, Hudson (Eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628.
- ISRM., 2009. ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46, 627–634.
- 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.
- 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.
- Jenni, J.P. ve Balissat, M., 1979. Rock Testing Methods Performed to Predict the Utilization Possibilities of a Tunnel Boring Machine. In: Proceedings of 4th Congress International of the Society Rock Mechanics, Montreaux 267–273.
- Kahraman, S., 2001. Evaluation of Simple Methods for Assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, 991-994.
- Kahraman, S., Gunaydin, O. ve Fener, M., 2005. The Effect of Porosity on the Relation Between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Index, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42, 584–589.
- Kahraman, S. ve Alber, M., 2008. Triaxial Strength of a Fault Breccia of Weak Rocks in a Strong Matrix, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67, 435–441.

- Kahraman, S. ve Günaydın, O., 2009. The Effect of Rock Classes on the Relation Between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Index, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68, 345-353.
- Kahraman, S., Fener, M. ve Kozman, E. 2012. Predicting the Compressive and Tensile Strength of Rocks from Indentation Hardness Index, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112, 331–339.
- Kahraman, S., 2014. The Determination of Uniaxial Compressive Strength from Point Load Strength for Pyroclastic Rocks, Engineering Geology, 170, 33-42.
- Kaiser, T.K. ve Gale, A.D., 1985. Evaluation of Cost and Empirical Support Design at B.C. Rail Tumbler Ridge Tunnels. Canadian Tunnelling, Tunnelling Association of Canada, Wiley, New York, 77–106.
- Kalaycı, Ş., 2009. SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri. Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti. 4. Baskı, 426 s.
- Karagöz, S.D., 2007. Kağıthane Piyalepaşa Tünelleri Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 77 s.
- Karaman, K., Cihangir, F., Erçikdi, B. ve Kesimal, A., 2010. Killi-karbonatlı Kayaçalarda Numune Uzunluğunun Ultrasonik P Dalga Hızı Üzerindeki Etkisi, Madencilik Dergisi, 49, 4, 37–45.
- Karaman, K., 2011. Taşönü (Trabzon–Araklı) Kalker Ocağındaki Şevlerin Duraylılık Açısından İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Haziran, 123 sayfa.
- Karaman, K., Cihangir, F., Erçikdi, B. ve Kesimal, A., 2011a. Kireçtaşlarının Ağırlıkça Su Emme Yüzdelere Göre Bir Ayırışma Sınıflaması, İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 24, 2, 119–128.
- Karaman, K., Erçikdi, B., Cihangir, F. ve Kesimal, A., 2011b. Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmininde Schmidt Çekici Sertlik Tayini Değerlendirme Yöntemlerinin İncelenmesi, 22. Dünya Madencilik Kongresi, Mayıs, Ankara, Bildiriler Kitabı: 87-94.
- Karaman, K. ve Kesimal, A., 2012. Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmininde Nokta Yüğü Deney Yöntemleri ve Porozitenin Değerlendirilmesi, Madencilik Dergisi, 51, 4, 3–14.
- Karaman, K. ve Kesimal, A., 2013. Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımı ile Ultrasonik Dalga Hızı Arasındaki İlişkinin Değerlendirilmesi, MT Bilimsel-Yer Altı Kaynakları Dergisi, 2, 4, 9–17.
- Karaman, K., Erçikdi, B. ve Kesimal, A., 2013a. The Assessment of Slope Stability and Rock Excavatability in a Limestone Quarry, Earth Sciences Research Journal, 17, 2, 169–181.

- Karaman, K., Kesimal, A., Kaya, A. ve Demirel, S., 2013b. Dolaylı Yöntemlerle Belirlenen Kaya Malzemesine Ait Tek Eksenli Basınç Dayanımı Parametresinin RMR<sub>89</sub> Puanı Hesaplamalarında Kullanılabilirliği, 3. Uluslararası Ulaşımında Yeraltı Kazıları Sempozyumu, Kasım, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 361–368.
- Karaman, K., Cihangir, F., Demirel, S. ve Kesimal, A., 2014. Kaya Kütlesi Deformasyon Modülünün Farklı Yöntemlerle Belirlenmesi, Yerbilimleri, 35, 3, 253–270.
- Karaman, K. ve Kesimal, A., 2015a. Correlation of Schmidt Rebound Hardness with Uniaxial Compressive Strength and P-wave Velocity of Rock Materials, Arabian Journal for Science and Engineering, 40, 1897–1906.
- Karaman, K. ve Kesimal, A., 2015b. A Comparative Study of Schmidt Hammer Test Methods for Estimating the Uniaxial Compressive Strength of Rocks, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74, 2, 507–520.
- Karaman, K. ve Kesimal, A., 2015c. Evaluation of the Influence of Porosity on the Engineering Properties of Rocks from the Eastern Black Sea Region: NE Turkey, Arabian Journal of Geosciences, 8, 557–564.
- Karaman, K., Kesimal, A. ve Ersoy, H., 2015a. A Comparative Assessment of Indirect Methods for Estimating the Uniaxial Compressive and Tensile Strength of Rocks, Arabian Journal of Geosciences, 8, 2393–2403.
- Karaman, K., Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A. ve Demirel, S., 2015b. Utilization of Brazilian Test for Estimating the Uniaxial Compressive Strength and Shear Strength Parameters, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115, 185–192.
- Karaman, K., Kaya, A. ve Kesimal, A., 2015c. Use of the point load index in estimation of the strength rating for the RMR system, Journal of African Earth Sciences, 106, 40–49.
- Karakus, M. ve Tütmez, B., 2006. Fuzzy and Multiple Regression Modelling for Evaluation of Intact Rock Strength Based on Point Load, Schmidt Hammer and Sonic Velocity, Rock Mechanics and Rock Engineering, 39, 1, 45-57.
- Katz, O., Reches, Z. ve Roegiers, J.C., 2000. Evaluation of Mechanical Rock Properties Using a Schmidt Hammer, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, 723–728.
- Kaya, A., Bulut, F., Alemdağ, S. ve Sayın A., 2011. Analysis of Support Requirements for a Tunnel Portal in Weak Rock: A Case Study from Turkey, Scientific Research and Essays, 6, 31, 6566-6583.
- Kaya, A., 2012. Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tünel Güzergahının ve Çevresinin Jeoteknik Açından İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 185.



- Kaya, A. ve Karaman, K., 2015. Utilizing the Strength Conversion Factor in Estimation of the Uniaxial Compressive Strength from the Point Load Index, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, DOI: 10.1007/s10064-015-0721-1
- Kayabaşı, A., Gökçeoğlu, C. ve Ercanoğlu, M., 2003. Estimating the Deformation Modulus of Rock Masses: a Comparative Study, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, 55–63.
- Kayri, M., 2009. Araştırmalarda Gruplar Arası Farkın Belirlenmesine Yönelik Çoklu Karşılaştırma (Post-hoc) Teknikleri, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 19, 1, 51–64.
- Kazi, A. ve Al-Mansour, Z.R., 1980. Empirical Relationship Between Los Angeles Abrasion and Schmidt Hammer Strength Tests with Application to Aggregates Around Jeddah, Quarterly Journal of Engineering Geology London, 13, 45–52.
- 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, I., 1966. Tectonic Units of Anatolia, Bulletin of The Mineral Research and Exploration, 66, 22–34.
- Khabbazi, A., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R. ve Cheshomi, A., 2013. Estimation of the Rock Mass Deformation Modulus Using a Rock Classification System, Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 46–52, 8/1.
- Khandelwal, M., 2013. Correlating P-wave Velocity with the Physico-mechanical Properties of Different Rocks, Pure Applied Geophysics, 170, 507-514.
- Kılıç, A. ve Teymen, A., 2008. Determination of Mechanical Properties of Rocks Using Simple Methods, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67,237-244.
- Kohno, M. ve Maeda, H., 2012. Relationship between Point Load Strength Index and Uniaxial Compressive Strength of Hydrothermally Altered Soft Rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 50, 147-157.
- Kumar, N., Samadhiya, N.K. ve Anbalagan, R., 2004. Application of Rock Mass Classification System for Tunneling in Himalaya, India Paper 3B 14, SINOROCK2004 Symposium, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 3, 531.
- Laderian, A. ve Abaspoor, M.A., 2012. The Correlation Between RMR and Q systems in Parts of Iran, Tunneling and Underground Space Technology, 27, 149–158.
- Laubscher, D., H., 1977. Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses-Mining Applications, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 86, A,1-8.
- Lewis, C.D., 1982. International and Business Forecasting Methods. Butterworths, London.

- Li, D., Ngai, L. ve Wong, Y. 2013. The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights, Rock Mechanics and Rock Engineering, 46, 269-287.
- Mair R.J., 1998. Geotechnical Aspects of Design Criteria for Bored Tunnelling in Soft Ground. World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metropolises. Balkema, Sao Paulo, Brazil, 183–199.
- Mellor, M. ve Hawkes, I. 1971. Measurement of Tensile Strength by Diametral Compression of Discs and Annuli, Engineering Geology, 5, 173-225.
- Minaeian, B. ve Ahangari, K. 2013. Estimation of Uniaxial Compressive Strength Based on P-wave and Schmidt Hammer Rebound Using Statistical Method, Arabian Journal of Geosciences, 6, 1925-1931.
- Mishra, D.A. ve Basu, A., 2012. Use of the Block Punch Test to Predict the Compressive and Tensile Strengths of Rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 51, 119–127.
- Mishra, D.A. ve Basu, A., 2013. Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials by Index Tests Using Regression Analysis and Fuzzy Inference System, Engineering Geology, 160, 54–68.
- Nazir, R., Momeni, E., Armaghani, D.J. ve Mohd Amin, M.F. 2013. Correlation Between Unconfined Compressive Strength and Indirect Tensile Strength of Limestone Rock Samples, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 18, I, 1737–1746.
- Nejati, H.R., Ghazvinian, A., Moosavi, S.A. ve Sarfarazi, V., 2014. On the Use of the RMR System for Estimation of Rock Mass Deformation Modulus, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, DOI 10.1007/s10064-013-0522-3.
- Norbury, D.R., 1986. The point load test. In A.B. Hawkins (Ed.) Site Investigation Practice: Accessing BS 5930, Geological Society, London, 325–329.
- Ocak, İ., 2008. Estimating the Modulus of Elasticity of the Rock Material from Compressive Strength and Unit Weight, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108, 621–626.
- Onargan, T. ve Kun, M., 2002. Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan Batı Anadolu Andezitlerinin Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması, Yerbilimleri, 40-41, 163–176.
- Onargan, T., Koca, M.Y., Küçük, K., Deliormanlı, A. ve Saydam, S., 2004. Impact of the Mechanical Characteristics of Weak Rocks and Trona Ore Beds on the Main Drift Deformation at the Beypazari Mine, Turkey, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 641–654.

- Onargan, T., Kun, M., Pamukçu, Ç. ve Aksoy, C.O., 2009. Yeni İtalyan Tünel Açma Yönteminin Gelişim Süreci ve İzmir Metrosu Bornova Tünel İnşaatı Ön Destek Tasarımında Uygulanması, Madencilik, 48, 2, 21–34.
- O'Rourke, J.E., 1989. Rock Index Properties for Geoengineering in Underground Development, Minerals Engineering, 41, 106–110.
- Özdamar, K., 2011. Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi. Kaan Kitabevi, 8. Baskı, 624 s.
- Özdemir, A., 2011. Çambaşı Regülatörü ve HES Tünel Güzergahındaki Kayaların Bazı Mühendislik Özellikleri ile Delinebilirlikleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 119.
- Palchik, V. ve Hatzor, Y.H., 2004. The Influence of Porosity on Tensile and Compressive Strength of Porous Chalks, Rock Mechanics and Rock Engineering, 37, 4, 331-341.
- 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., 2000. Recent Developments in Rock Support Estimates by the RMI, Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, 6, 1, 1-19.
- Palmstrom, A. ve Singh, R., 2001. The Deformation Modulus of Rock Masses-comparisons Between In Situ Tests and Indirect Estimates, Tunneling and Underground Space Technology, 16, 115–131.
- Palmström, A., 2005. Measurements of and Correlations Between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), Tunnelling and Underground Space Technology, 20, 362-377.
- Pells, P.J.N., 1975. The Use of Point Load Test in Predicting the Compressive Strength of Rock Material, Aust Geomechanics, G5 (N1), 54-56.
- 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.
- Poole, R.W. ve Farmer, I.W., 1980. Consistency and Repeatability of Schmidt hammer Rebound Data During Field Testing, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanic Abstracts, 17, 167–171.
- 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.

- Quane, S.L. ve Russel, J.K., 2005. Ranking Welding Intensity in Pyroclastic Deposits, Bulletin of Volcanology, 67, 129-143.
- Ramamurthy, T., 2004. A Geo-engineering Classification for Rocks and Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 89–101.
- Read, J.R.L., Thornten, P.N. ve Regan, W.M., 1980. A Rational Approach to the Point Load Test. Proc. 3rd Australian-New Zealand Geomechanics Conference, 2, 35–39.
- Read, S.A.L., Richards, L.R. ve Perrin, N.D., 1999. Applicability of the Hoek–Brown Failure Criterion to New Zealand Greywacke Rocks, Proc. 9th Int. Cong. on Rock Mech. Paris, 2, 655–660.
- Romana, M., 1999. Correlation Between Uniaxial Compressive and Point-load (Franklin test) Strengths for Different Rock Classes, 9th ISRM Con. Balkema, Paris, 673–676.
- Rusnak, J. ve Mark, C., 2000. Using the Point Load Test to Determine the Uniaxial Compressive Strength of Coal Measure Rock. In: Peng, S.S., Mark, C. (Eds.), Proceedings of the 19th International Conference on Ground Control in Mining, August, Morgantown, West Virginia, 362–371.
- Sachpazis, C.I., 1990. Correlating Schmidt Hardness with Compressive Strength and Young's Modulus of Carbonate Rocks, Bulletin of International Associated Engineering Geology, 42, 75–83.
- Sarı, D. ve Paşamehmetoğlu A.G., 2004. Proposed Support Design, Kaletepe Tunnel, Turkey, Engineering Geology, 72, 201-216.
- Schmidt, E., 1951. A Non-destructive Concrete Tester. Concrete, 59, 8, 34–5.
- Serafim, J.L. ve Pereira, J.P., 1983. Consideration of the Geomechanics Classification of Bieniawski, Proc. Int. Sym. on Eng. Geol. Undergr. Const., Lisbon, Portugal, 1133–1144.
- Shalabi, F. Cording, E.J. ve Al-Hattamleh, O.H. 2007. Estimation of Rock Engineering Properties Using Hardness Tests, Engineering Geology, 90, 138–147.
- Sharma, P.K., Khandelwal, M. ve Singh T.N., 2011. A Correlation between Schmidt Hammer Rebound Numbers with Impact Strength Index, Slake Durability Index and P-wave Velocity, International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch), 100, 189–195.
- Shen, J., Karakus, M. ve Chaoshui, X., 2012. A Comparative Study for Empirical Equations in Estimating Deformation Modulus of Rock Masses, Tunneling and Underground Space Technology, 32, 245–250.
- Shorey, P.R., Barat, D., Das, M.N., Mukherjee, K.P. ve Singh, B., 1984. Schmidt Hammer Rebound Data for Estimation of Large Scale In Situ Coal Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanic Abstracts, 21, 39–42.

- Singh, D.P., 1981. Determination of Some Engineering Properties of Weak Rocks. In: Akai, K. (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Weak Rock. Balkema, Rotterdam, 21–24.
- Singh, R.N., Hassani, F.P. ve Elkington, P.A.S., 1983. The Application of Strength and Deformation Index Testing to the Stability Assessment of Coal Measures Excavations. In: Proceedings 24th US Symposium on Rock Mechanics Texas A&M Univ. AEG pp. 599–609.
- Singh, V.K. ve Singh, D.P., 1993. Correlation between Point Load Index and Compressive Strength for Quartzite Rocks, Geotechnical Geological Engineering, 11, 269–272.
- Singh, T.N., Kainthola, A. ve Venkatesh, A., 2012. Correlation between Point Load Index and Uniaxial Compressive Strength for Different Rock Types, Rock Mechanics and Rock Engineering, 45, 2, 259–264.
- Smith, H.J., 1997. The Point Load Test for Weak Rock in Dredging Applications, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 3-4.
- Soiltest, Inc., 1976. Operating Instructions- concrete Test Hammer. Evanston, IL.
- Sozio, L.E., 1998. General Report: Urban Constraints on Underground Works. World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metropolises, Balkema, Sao Paulo, Brazil, 879–897.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., ve Kayabaşı, A., 2006. Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 224-235.
- Sumner, P. ve Nel, W., 2002. The Effect of Rock Moisture on Schmidt Hammer Rebound: Tests on Rock Samples from Marion Island and South Africa. Earth Surf Processes Landf, 27, 1137–1142.
- Sülükçü, S. ve Ulusay, R., 2001. Evaluation of the Block Punch Index Test with Particular Reference to the Size Effect, Failure Mechanism and Its Effectiveness in Predicting Rock Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, 1091–1111.
- Şengün, N., Altındağ, R., Demirdağ, S. ve Yavuz, H. 2011. P-wave Velocity and Schmidt Rebound Hardness Value of Rocks under Uniaxial Compressional Loading, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48, 4, 693-696.
- Terzaghi, K., 1946. Rock Tunneling with Steel Supports, R.V. Practor and T. White (ed), Commercial Sheving Co., Youngstown, Ohio. 296 p.
- Topal, T., 2000. Nokta yükleme deneyi ile ilgili uygulamada karşılaşılan problemler, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 24, 1, 73-86.

- Torabi, S.R., Ataei, M. ve Javanshir, M., 2010. Application of Schmidt Rebound Number for Estimating Rock strength Under Specific Geological Conditions, Journal of Mining and Environment, 1, 2, 1-8.
- Tsiambaos, G. ve Sabatakakis, N., 2004. Considerations on Strength of Intact Sedimentary Rocks, Engineering Geology, 72, 261–273.
- Tuğrul, A., 1998. The Application of Rock Mass Classification Systems to Underground Excavation in Weak Limestone, Ataturk Dam Turkey, Engineering Geology, 50, 337–345.
- Tuğrul, A. ve Zarif, I.H., 1999. Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Selected Granitic Rocks from Turkey, Engineering Geology, 51, 303–317.
- Tüysüz, N. ve Yaylalı-Abanuz, G., 2005. Jeostatistik Kavramlar ve Bilgisayarlı Uygulamalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları, No:220, Trabzon, 382 s.
- Ulusay, R., Tureli, K. ve Ider, M.H., 1994. Prediction of Engineering Properties of a Selected Litharenite Sandstone from Its Petrographic Characteristics Using Correlation and Multivariate Statistical Techniques, Engineering Geology, 38, 135–157.
- Ulusay, R. ve Gökçeoğlu C., 1999. A New Test Procedure for the Determination of the Block Punch Index and Its Possible Uses in Rock Engineering. ISRM News Journal, 6(1), 50–4.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C. ve Sülükçü S., 2001. Draft ISRM Suggested Method for Determining Block Punch Strength Index (BPI), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, 1113–1119.
- Ulusay, R. ve Sönmez, H., 2007. Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, 2. Baskı, Jeoloji Mühendisleri Odası, 292s., Ankara.
- USB., 1998. Engineering Geology Field Manual. Field Index Tests, 1, 111–2.
- Uzlu, E., Filiz, M., Komurcu, M., Akpınar, A. ve Yavuz, O., 2008. Doğu Karadeniz Havzası'ndaki Küçük Hidroelektrik Santrallerin Durumu. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Aralık, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 459–466.
- Ünal, E., 1996. Modified Rock Mass Classification: M-RMR System, Milestones in Rock Engineering: A Jubilee Collection; Z.T. Bieniawski, Balkema, 203-223.
- Vallejo, L.E. Welsh, R.A. ve Robinson, M.K., 1989. Correlation between Unconfined Compressive and Point Load Strength for Appalachian Rocks. Proc. 30th US Symp. Rock Mechanics Morgantown, 461-468.
- Vardhan, H. ve Bayar, R.K., 2014. Rock Engineering Design; Properties and Applications of Sound Level. New York: Taylor and Francis CRC Press, 170 p.

- Verma, A.K. ve Singh T.N., 2010. Assessment of Tunnel Instability—a Numerical Approach, Arabian Journal of Geosciences, 3, 181–192.
- Yaşar, E. ve Erdoğan, Y., 2004a. Correlating Sound Velocity with Density, Compressive Strength and Young Modulus of Carbonate Rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 5, 871–875.
- Yaşar, E. ve Erdogan, Y., 2004b. Estimation of Rock Physiomechanical Properties Using Hardness Methods, Engineering Geology, 71, 281–288.
- Yağız, S., 2008. Utilizing Rock Mass Properties for Predicting TBM Performance in Hard Rock Condition, Tunneling and Underground Space Technology, 23, 326–339.
- Yağız, S., 2009. Predicting Uniaxial Compressive Strength, Modulus of Elasticity and Index Properties of Rocks using the Schmidt Hammer, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68, 55–63.
- Yang, S.Q., Jing, H.W., Li, Y.S., ve Han, L.J. 2011. Experimental Investigation on Mechanical Behavior of Coarse Marble Under Six Different Loading Paths, Experimental Mechanics, 51, 315–334.
- Yılmaz, I. ve Sendir, H., 2002. Correlation of Schmidt Hardness with Unconfined Compressive Strength and Young's Modulus in Gypsum from Sivas (Turkey), Engineering Geology, 66, 211–219.
- Yılmaz, I. ve Yüksek, A.G. 2008. An Example of Artificial Neural Network Application for Indirect Estimation of Rock Parameters, Rock Mechanics and Rock Engineering, 41, 5, 781–795.
- Yılmaz, I., 2009. New Testing Method for Indirect Determination of Unconfined Compressive Strength of the Rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46, 342–7.
- Yılmaz, I., 2010. Use of the Core Strangle Test for Tensile Strength Estimation and Rock Mass Classification, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47, 845–850.
- Zarif, I.H. ve Tuğrul, A., 2003. Aggregate Properties of Devonian Limestones for Use in Concrete in Istanbul, Turkey, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 62, 379–388.
- Zhang, L., 2004. Drilled Shafts in Rock Analysis and Design, A. A. Balkema Pub., Taylor & Francis Group Plc., 383 p.
- Zhang, L. ve Einstein, H.H., 2004. Using RQD to Estimate the Deformation Modulus of Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 337–41.
- Zoback, M.D. 2007. Reservoir seomechanics: Earth Stress and Rock Mechanics Applied to Exploration, Production and Wellbore Stability, Cambridge Press, p. 449.

## 6. EKLER

### Ek 1. Schmidt çekici yöntemleri için diğer ANOVA grafikleri

#### Descriptives

UCS

|                   | N   | Mean    | Std. Deviation | Std. Error | 95% Confidence Interval for Mean |             | Minimum | Maximum |
|-------------------|-----|---------|----------------|------------|----------------------------------|-------------|---------|---------|
|                   |     |         |                |            | Lower Bound                      | Upper Bound |         |         |
| UCS               | 47  | 91,7851 | 46,04137       | 6,71582    | 78,2669                          | 105,3034    | 7,70    | 215,00  |
| UCS <sub>D1</sub> | 47  | 89,9433 | 41,29074       | 6,02287    | 77,8199                          | 102,0667    | 7,26    | 193,47  |
| UCS <sub>D2</sub> | 47  | 89,6198 | 40,11609       | 5,85153    | 77,8412                          | 101,3983    | 8,43    | 187,96  |
| UCS <sub>D3</sub> | 47  | 89,9986 | 41,63795       | 6,07352    | 77,7733                          | 102,2240    | 9,13    | 197,31  |
| UCS <sub>R1</sub> | 47  | 90,3831 | 44,25315       | 6,45499    | 77,3899                          | 103,3763    | 8,79    | 218,68  |
| UCS <sub>R2</sub> | 47  | 90,1172 | 41,93451       | 6,11678    | 77,8047                          | 102,4296    | 8,85    | 199,08  |
| UCS <sub>R3</sub> | 47  | 90,3529 | 43,78409       | 6,38657    | 77,4974                          | 103,2084    | 9,36    | 212,90  |
| UCS <sub>R4</sub> | 47  | 89,7875 | 40,95881       | 5,97446    | 77,7615                          | 101,8134    | 9,10    | 193,67  |
| Total             | 376 | 90,2484 | 42,14880       | 2,17366    | 85,9743                          | 94,5225     | 7,26    | 218,68  |

#### One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

|                                       | UCS         | D1          | D2          | D3          | R1          | R2          | R3          | R4          |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| N                                     | 47          | 47          | 47          | 47          | 47          | 47          | 47          | 47          |
| Normal Parameters <sup>a,b</sup> Mean | 91,7851     | 89,9434     | 89,6196     | 89,9987     | 90,3830     | 90,1164     | 90,3528     | 89,7874     |
| Std. Deviation                        | 46,04137    | 41,29121    | 40,11563    | 41,63869    | 44,25240    | 41,93485    | 43,78486    | 40,95792    |
| <b>Asymp. Sig. (2-tailed)</b>         | <b>,913</b> | <b>,981</b> | <b>,970</b> | <b>,998</b> | <b>,994</b> | <b>,997</b> | <b>,942</b> | <b>,992</b> |

a. Test distribution is Normal.

#### Test of Homogeneity of Variances

UCS

| Levene Statistic | df1 | df2 | Sig.        |
|------------------|-----|-----|-------------|
| 078              | 7   | 368 | <b>,999</b> |

#### ANOVA

UCS

|                | Sum of Squares | df  | Mean Square | F    | Sig.         |
|----------------|----------------|-----|-------------|------|--------------|
| Between Groups | 149,031        | 7   | 21,290      | ,012 | <b>1,000</b> |
| Within Groups  | 666046,326     | 368 | 1809,908    |      |              |
| Total          | 666195,357     | 375 |             |      |              |



## Ek 2. Ölçülen ve tahmini UCS değerlerinin normal dağılım ve korelasyon analizleri

## One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

|                                  | UCS_ölçülen    | UCS_R  | UCS_PLI | UCS_UPV | UCS_BÇD | UCS_BHA |        |
|----------------------------------|----------------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|
| N                                | 37             | 37     | 37      | 37      | 37      | 37      |        |
| Normal Parameters <sup>a,b</sup> | Mean           | 95,27  | 95,05   | 95,19   | 103,22  | 95,41   | 95,22  |
|                                  | Std. Deviation | 34,327 | 28,821  | 31,756  | 30,486  | 32,599  | 25,203 |
| Most Extreme Differences         | Absolute       | ,113   | ,056    | ,089    | ,134    | ,082    | ,145   |
|                                  | Positive       | ,113   | ,056    | ,089    | ,134    | ,082    | ,145   |
|                                  | Negative       | -,078  | -,056   | -,067   | -,115   | -,065   | -,102  |
| Kolmogorov-Smirnov Z             |                | ,688   | ,341    | ,541    | ,816    | ,497    | ,883   |
| Asymp. Sig. (2-tailed)           |                | ,731   | 1,000   | ,932    | ,519    | ,966    | ,416   |

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

## Correlations

|             | UCS_ölçülen         | UCS_R  | UCS_PLI | UCS_UPV | UCS_BÇD | UCS_BHA |   |
|-------------|---------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---|
| UCS_ölçülen | Pearson Correlation | 1      |         |         |         |         |   |
|             | Sig. (2-tailed)     |        |         |         |         |         |   |
|             | N                   | 37     |         |         |         |         |   |
| UCS_R       | Pearson Correlation | ,839** | 1       |         |         |         |   |
|             | Sig. (2-tailed)     | ,000   |         |         |         |         |   |
|             | N                   | 37     | 37      |         |         |         |   |
| UCS_PLI     | Pearson Correlation | ,915** | ,777**  | 1       |         |         |   |
|             | Sig. (2-tailed)     | ,000   | ,000    |         |         |         |   |
|             | N                   | 37     | 37      | 37      |         |         |   |
| UCS_UPV     | Pearson Correlation | ,737** | ,555**  | ,637**  | 1       |         |   |
|             | Sig. (2-tailed)     | ,000   | ,000    | ,000    |         |         |   |
|             | N                   | 37     | 37      | 37      | 37      |         |   |
| UCS_BÇD     | Pearson Correlation | ,946** | ,854**  | ,898**  | ,715**  | 1       |   |
|             | Sig. (2-tailed)     | ,000   | ,000    | ,000    | ,000    |         |   |
|             | N                   | 37     | 37      | 37      | 37      | 37      |   |
| UCS_BHA     | Pearson Correlation | ,736** | ,642**  | ,690**  | ,373*   | ,706**  | 1 |
|             | Sig. (2-tailed)     | ,000   | ,000    | ,000    | ,023    | ,000    |   |
|             | N                   | 37     | 37      | 37      | 37      | 37      |   |

\*\*. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Ek 3. Ölçülen ve diğer indeks deneylerden elde edilen UCS parametresi kullanılarak belirlenen R<sub>Mi</sub> değerlerinin normal dağılım ve korelasyon analizleri

**One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test**

|                                  |                | R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>R-ISR</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>PLI</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>UPV</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>BCD</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>BHA</sub> |
|----------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| N                                |                | 37                             | 37                               | 37                             | 37                             | 37                             | 37                             |
| Normal Parameters <sup>a,b</sup> | Mean           | 3,695                          | 3,662                            | 3,693                          | 3,959                          | 3,689                          | 3,670                          |
|                                  | Std. Deviation | 1,9775                         | 1,6851                           | 1,8391                         | 1,7310                         | 1,8586                         | 1,5923                         |
| Most Extreme Differences         | Absolute       | ,156                           | ,136                             | ,151                           | ,096                           | ,128                           | ,199                           |
|                                  | Positive       | ,156                           | ,136                             | ,151                           | ,096                           | ,128                           | ,199                           |
|                                  | Negative       | -,095                          | -,058                            | -,076                          | -,069                          | -,068                          | -,103                          |
| Kolmogorov-Smirnov Z             |                | ,948                           | ,829                             | ,917                           | ,582                           | ,778                           | 1,213                          |
| Asymp. Sig. (2-tailed)           |                | ,330                           | ,498                             | ,370                           | ,887                           | ,580                           | ,105                           |

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

**Correlations**

|                                  |                     | R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>R-ISR</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>PLI</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>UPV</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>BCD</sub> | R <sub>Mi</sub> <sub>BHA</sub> |
|----------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| R <sub>Mi</sub> <sub>UCS</sub>   | Pearson Correlation | 1                              |                                  |                                |                                |                                |                                |
|                                  | Sig. (2-tailed)     |                                |                                  |                                |                                |                                |                                |
|                                  | N                   | 37                             |                                  |                                |                                |                                |                                |
| R <sub>Mi</sub> <sub>R-ISR</sub> | Pearson Correlation | ,925**                         | 1                                |                                |                                |                                |                                |
|                                  | Sig. (2-tailed)     | ,000                           |                                  |                                |                                |                                |                                |
|                                  | N                   | 37                             | 37                               |                                |                                |                                |                                |
| R <sub>Mi</sub> <sub>PLI</sub>   | Pearson Correlation | ,960**                         | ,900**                           | 1                              |                                |                                |                                |
|                                  | Sig. (2-tailed)     | ,000                           | ,000                             |                                |                                |                                |                                |
|                                  | N                   | 37                             | 37                               | 37                             |                                |                                |                                |
| R <sub>Mi</sub> <sub>UPV</sub>   | Pearson Correlation | ,858**                         | ,779**                           | ,830**                         | 1                              |                                |                                |
|                                  | Sig. (2-tailed)     | ,000                           | ,000                             | ,000                           |                                |                                |                                |
|                                  | N                   | 37                             | 37                               | 37                             | 37                             |                                |                                |
| R <sub>Mi</sub> <sub>BCD</sub>   | Pearson Correlation | ,979**                         | ,925**                           | ,956**                         | ,861**                         | 1                              |                                |
|                                  | Sig. (2-tailed)     | ,000                           | ,000                             | ,000                           | ,000                           |                                |                                |
|                                  | N                   | 37                             | 37                               | 37                             | 37                             | 37                             |                                |
| R <sub>Mi</sub> <sub>BHA</sub>   | Pearson Correlation | ,853**                         | ,812**                           | ,839**                         | ,678**                         | ,842**                         | 1                              |
|                                  | Sig. (2-tailed)     | ,000                           | ,000                             | ,000                           | ,000                           | ,000                           |                                |
|                                  | N                   | 37                             | 37                               | 37                             | 37                             | 37                             | 37                             |

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Ek 4. Ölçülen ve diğer indeks deneylerden elde edilen UCS parametresi kullanılarak belirlenen  $Q_c$  değerlerinin normal dağılım ve korelasyon analizleri

**One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test**

|                                  |                | $Q_c$ -UCS | $Q_c$ -R-ISRM | $Q_c$ -PLI | $Q_c$ -UPV | $Q_c$ -BCD | $Q_c$ -BHA |
|----------------------------------|----------------|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| N                                |                | 37         | 37            | 37         | 37         | 37         | 37         |
| Normal Parameters <sup>a,b</sup> | Mean           | 10,127     | 10,059        | 10,191     | 10,661     | 10,065     | 9,941      |
|                                  | Std. Deviation | 6,4823     | 5,6513        | 6,3453     | 5,7268     | 6,1292     | 5,4655     |
| Most Extreme Differences         | Absolute       | ,155       | ,106          | ,210       | ,117       | ,159       | ,188       |
|                                  | Positive       | ,155       | ,106          | ,210       | ,117       | ,159       | ,188       |
|                                  | Negative       | -,094      | -,068         | -,084      | -,057      | -,085      | -,085      |
| Kolmogorov-Smirnov Z             |                | ,940       | ,645          | 1,276      | ,714       | ,968       | 1,145      |
| Asymp. Sig. (2-tailed)           |                | ,339       | ,800          | ,077       | ,688       | ,306       | ,145       |

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

**Correlations**

|               |                     | $Q_c$ -UCS | $Q_c$ -R-ISRM | $Q_c$ -PLI | $Q_c$ -UPV | $Q_c$ -BCD | $Q_c$ -BHA |
|---------------|---------------------|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| $Q_c$ -UCS    | Pearson Correlation | 1          |               |            |            |            |            |
|               | Sig. (2-tailed)     |            |               |            |            |            |            |
|               | N                   | 37         |               |            |            |            |            |
| $Q_c$ -R-ISRM | Pearson Correlation | ,943**     | 1             |            |            |            |            |
|               | Sig. (2-tailed)     | ,000       |               |            |            |            |            |
|               | N                   | 37         | 37            |            |            |            |            |
| $Q_c$ -PLI    | Pearson Correlation | ,966**     | ,922**        | 1          |            |            |            |
|               | Sig. (2-tailed)     | ,000       | ,000          |            |            |            |            |
|               | N                   | 37         | 37            | 37         |            |            |            |
| $Q_c$ -UPV    | Pearson Correlation | ,901**     | ,859**        | ,874**     | 1          |            |            |
|               | Sig. (2-tailed)     | ,000       | ,000          | ,000       |            |            |            |
|               | N                   | 37         | 37            | 37         | 37         |            |            |
| $Q_c$ -BCD    | Pearson Correlation | ,985**     | ,936**        | ,966**     | ,898**     | 1          |            |
|               | Sig. (2-tailed)     | ,000       | ,000          | ,000       | ,000       |            |            |
|               | N                   | 37         | 37            | 37         | 37         | 37         |            |
| $Q_c$ -BHA    | Pearson Correlation | ,883**     | ,868**        | ,871**     | ,738**     | ,869**     | 1          |
|               | Sig. (2-tailed)     | ,000       | ,000          | ,000       | ,000       | ,000       |            |
|               | N                   | 37         | 37            | 37         | 37         | 37         | 37         |

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Ek 5. Ölçülen ve diğer indeks deneylerden elde edilen UCS parametresi kullanılarak belirlenen dayanım puanlarının ( $R_s$ ) normal dağılım ve korelasyon analizleri

**One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test**

|                                  |                | $R_s$ (UCS) | $R_s$ (R-ISRM) | $R_s$ (PLI) | $R_s$ (UPV) | $R_s$ (BCD) | $R_s$ (BHA) | $R_s$ (BHA R) |
|----------------------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| N                                |                | 37          | 37             | 37          | 37          | 37          | 37          | 37            |
| Normal Parameters <sup>a,b</sup> | Mean           | 8,889       | 8,927          | 8,908       | 9,451       | 8,905       | 8,984       | 9,886         |
|                                  | Std. Deviation | 2,1624      | 1,9427         | 2,0609      | 1,8193      | 2,0886      | 1,5863      | 2,8500        |
| Most Extreme Differences         | Absolute       | ,071        | ,079           | ,072        | ,106        | ,090        | ,114        | ,082          |
|                                  | Positive       | ,071        | ,056           | ,072        | ,106        | ,074        | ,114        | ,082          |
|                                  | Negative       | -,064       | -,079          | -,070       | -,100       | -,090       | -,113       | -,068         |
| Kolmogorov-Smirnov Z             |                | ,433        | ,479           | ,441        | ,642        | ,546        | ,695        | ,497          |
| Asymp. Sig. (2-tailed)           |                | ,992        | ,976           | ,990        | ,804        | ,927        | ,720        | ,966          |

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

**Correlations**

|                |                     | $R_s$ (UCS) | $R_s$ (R-ISRM) | $R_s$ (PLI) | $R_s$ (UPV) | $R_s$ (BCD) | $R_s$ (BHA) | $R_s$ (BHA R) |
|----------------|---------------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| $R_s$ (UCS)    | Pearson Correlation | 1           |                |             |             |             |             |               |
|                | Sig. (2-tailed)     |             |                |             |             |             |             |               |
|                | N                   | 37          |                |             |             |             |             |               |
| $R_s$ (R-ISRM) | Pearson Correlation | ,821**      | 1              |             |             |             |             |               |
|                | Sig. (2-tailed)     | ,000        |                |             |             |             |             |               |
|                | N                   | 37          | 37             |             |             |             |             |               |
| $R_s$ (PLI)    | Pearson Correlation | ,919**      | ,773**         | 1           |             |             |             |               |
|                | Sig. (2-tailed)     | ,000        | ,000           |             |             |             |             |               |
|                | N                   | 37          | 37             | 37          |             |             |             |               |
| $R_s$ (UPV)    | Pearson Correlation | ,745**      | ,531**         | ,642**      | 1           |             |             |               |
|                | Sig. (2-tailed)     | ,000        | ,001           | ,000        |             |             |             |               |
|                | N                   | 37          | 37             | 37          | 37          |             |             |               |
| $R_s$ (BCD)    | Pearson Correlation | ,937**      | ,834**         | ,901**      | ,698**      | 1           |             |               |
|                | Sig. (2-tailed)     | ,000        | ,000           | ,000        | ,000        |             |             |               |
|                | N                   | 37          | 37             | 37          | 37          | 37          |             |               |
| $R_s$ (BHA)    | Pearson Correlation | ,763**      | ,667**         | ,710**      | ,403*       | ,736**      | 1           |               |
|                | Sig. (2-tailed)     | ,000        | ,000           | ,000        | ,013        | ,000        |             |               |
|                | N                   | 37          | 37             | 37          | 37          | 37          | 37          |               |
| $R_s$ (BHA_R)  | Pearson Correlation | ,846**      | ,979**         | ,781**      | ,520**      | ,852**      | ,756**      | 1             |
|                | Sig. (2-tailed)     | ,000        | ,000           | ,000        | ,001        | ,000        | ,000        |               |
|                | N                   | 37          | 37             | 37          | 37          | 37          | 37          | 37            |

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

## ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Ordu/Ünye’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ünye’de tamamladı. 2003 yılında lise eğitimini bitirip aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2003–2004 tarihleri arasında bir yıl yabancı dil hazırlık okudu. 2008 yılında Jeoloji Mühendisliği Bölümünü ikincilikle bitirdi. Aynı yıl Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisansa başladı ve 2011 yılında tamamladı. 2011 yılında başladığı doktora çalışmasını 2015 yılında tamamladı. Şubat 2009 tarihinde Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’na Araştırma Görevlisi olarak atandı. İyi derecede İngilizce bilen Kadir Karaman evli ve bir çocuk babasıdır.

Tezden üretilmiş SCI kapsamındaki dergilerde yayınlanmış makaleler aşağıda verilmiştir.

- 1) Karaman, K. ve Kesimal, A., 2015. Correlation of Schmidt Rebound Hardness with Uniaxial Compressive Strength and P-wave Velocity of Rock Materials, Arabian Journal for Science and Engineering, 40, 1897–1906.
- 2) Karaman, K. ve Kesimal, A., 2015. A Comparative Study of Schmidt Hammer Test Methods for Estimating the Uniaxial Compressive Strength of Rocks, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74, 507–520.
- 3) Karaman, K., Kesimal, A. ve Ersoy, H., 2015. A Comparative Assessment of Indirect Methods for Estimating the Uniaxial compressive and Tensile Strength of Rocks, Arabian Journal of Geosciences, 8, 2393–2403.
- 4) Karaman, K., Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A. ve Demirel, S., 2015. Utilization of Brazilian Test for Estimating the Uniaxial Compressive Strength and Shear Strength Parameters, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115, 185–192.
- 5) Karaman, K. ve Kesimal, A., 2015. Evaluation of the Influence of Porosity on the Engineering Properties of Rocks from the Eastern Black Sea Region: NE Turkey, Arabian Journal of Geosciences, 8, 557-564
- 6) Karaman, K., Kaya, A. ve Kesimal, A., 2015. Use of the Point Load Index in Estimation of the Strength Rating for the RMR System, Journal of African Earth Sciences, 106, 40–49.