

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**TÜLÜ AÇIK OCAĞINDA (BİGADIÇ / BALIKESİR)  
YÜZEYLENEN KAYA KÜTLELERİNİN  
MÜHENDİSLİK ÖZELİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YASİN YILDIZ**

**BALIKESİR, NİSAN - 2019**

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**TÜLÜ AÇIK OCAĞINDA (BİGADIÇ / BALIKESİR)**  
**YÜZEYLENEN KAYA KÜTLELERİNİN**  
**MÜHENDİSLİK ÖZELİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YASİN YILDIZ**

**Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Şener CERYAN (Tez Danışmanı)**

**Doç. Dr. Hakan ELÇİ**

**Dr. Öğr. Üyesi Gökhan BÜYÜKKAHRAMAN**


## KABUL VE ONAY SAYFASI

Yasin YILDIZ tarafından hazırlanan “TÜLÜ AÇIK OCAĞINDA (BİGADIÇ / BALIKESİR) YÜZEYLENEN KAYA KÜTLELERİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12.04.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Şener CERYAN



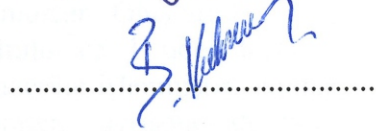
.....

Üye  
Doç. Dr. Hakan ELÇİ



.....

Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan BÜYÜKKAHRAMAN



.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

## ÖZET

**TÜLÜ AÇIK OCAĞINDA (BİGADIÇ / BALIKESİR)  
YÜZEYLENEN KAYA KÜTLELERİNİN  
MÜHENDİSLİK ÖZELİKLERİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
YASİN YILDIZ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ŞENER CERYAN)  
BALIKESİR, NİSAN - 2019**

Bu çalışmada, inceleme alanı olan Tülü açık ocağında yüzeylenen litolojiler belirlenmiştir. Bu litolojiler arasında ekonomik öneme sahip alt boratlı birim arazi gözlemleri neticesinde 6 fasiyese ayrılanmıştır. Fasiyese sınırları GPS yardımıyla koordinat almak suretiyle ve arazi gözlemlerinden faydalanılarak belirlenmiş ve 1:1000 ölçekli açık ocak fiili durum haritası üzerine işlenerek ocak jeoloji haritası oluşturulmuştur. Oluşturulan ocak jeoloji harita üzerinde 1 adet KB-GD doğrultulu ve 1 adet KD-GB doğrultulu enine kesit alınarak birimler kesitler üzerine işlenmiştir. Ayrıca inceleme alanında yüzeylenen litolojik birimler, ayrışma durumu, süreksizlik sıklığı ve kaya türü esas alınarak tahmini mühendislik davranışı benzer olan homojen zonlara ve jeoteknik birimlere ayrılarak 26 jeoteknik birimin her birinin kaya malzeme özellikleri, süreksizlik özellikleri ve kaya kütle özellikleri incelenmiştir. Kaya Kütle Puanı (RMR), Q sistemi, Kaya Kütle İndeksi (RMi), yamaç duraylılığı olasılık sınıflandırma sistemi (SSPC) ve Hoek-Brown yenilme kriterine göre tüm jeoteknik birimlerin tek eksenli basınç dayanımı, deformasyon modülü ve kayma dayanımı parametreleri bulunmuştur.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Tülü açık ocağı (Bigadiç-Balıkesir), alt borat, kaya kütle sınıflamaları, dayanım ve elastide modülü, kayma dayanım parametreleri.

## **ABSTRACT**

**ENGINEERING PROPERTIES OF ROCK MASSES IN THE TÜLÜ  
OPEN PIT MINE (BİGADIÇ - BALIKESİR)  
MSC THESIS  
YASİN YILDIZ  
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
GEOLOGICAL ENGINEERING  
(SUPERVISOR: PROF. DR. ŞENER CERYAN )  
BALIKESİR, APRIL 2019**

In this study, lithologies outcropped in Tl open pit mine are investigated. Among these lithologies, the lower borate unit, which is economically important, is divided into 6 facies as a result of field observations. Facies boundaries were determined by taking the coordinates with the help of GPS and by using the field observations. The facies boundaries were processed on a 1:1000 scale open pit mine actual state map and a geological map of the mine was formed. On the geological map, 1 NW-SE direction and 1 NE-SW direction cross sections were taken and the units were processed on those. In addition, lithological units outcropped in the study area are divided into 26 homogeneous zones and geotechnical units, which are similar to the estimated engineering behavior based on the alteration state, frequency of discontinuity and rock type. Rock material properties, discontinuity properties and rock mass characteristics of each of the 26 geotechnical units were investigated. The uniaxial compressive strength, deformation modulus and shear strength parameters of all geotechnical units were determined according to rock mass rating (RMR), Q system, Rock Mass Index (RMi), Slope Stability Probability classification system (SSPC) and Hoek-Brown failure criterion.

**KEYWORDS:** Tl open pit mine (Bigadiç-Balıkesir), lower borate, rock mass classifications, strength elasticity module, shear strength parameters.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	1
1.2 Çalışma Alanının Tanıtılması.....	1
1.3 Önceki Çalışmalar .....	2
<b>2. ÇALIŞMA YÖNTEMİ</b> .....	<b>6</b>
2.1 Jeolojik Harita ve Kesit Oluşturma .....	6
2.2 Jeoteknik Birimlerin Tanımlanması .....	6
2.3 Süreksizlik Özelliklerinin Ölçümü .....	7
2.4 Kaya Malzemesinin İndeks ve Dayanım Özelliklerinin Ölçümü.....	13
<b>3. GENEL JEOLojİ</b> .....	<b>17</b>
3.1 Litostratigrafi .....	17
3.1.1 Temel Kayaçları .....	22
3.1.2 Taban Volkaniti.....	22
3.1.3 Taban Kireçtaşı Birimi .....	23
3.1.4 Alt Tüf Birimi.....	23
3.1.5 Alt Boratlı Birim .....	25
3.1.5.1 Borlu Seviyeler .....	26
3.1.5.2 Gri Yeşil Laminallı Kiltası - Borlu Kireçtaşı Ardanması.....	28
3.1.5.3 Bor İçeren Slamplı Kireçtaşları .....	28
3.1.5.4 Slamplı Gri Kiltası.....	29
3.1.5.5 Gri Yeşil Kiltası - Marn.....	30
3.1.5.6 Kiltası - Silttaşı Ardanması .....	31
3.1.6 Üst Tüf Birimi .....	32
3.1.7 Üst Boratlı Birim.....	33
3.1.8 Kuvaterner Çökelleri .....	35
3.2 Yapısal Jeoloji .....	36
3.2.1 Kıvrımlı Yapılar .....	36
3.2.2 Kırıklı Yapılar .....	38
3.2.2.1 Çatlaklar .....	38
3.2.2.2 Faylar.....	38
<b>4. MÜHENDİSLİK JEOLojİSİ</b> .....	<b>40</b>
4.1 Ayrışma Durumu .....	40
4.2 Jeolojik Dayanım İndeksi .....	43
4.3 Kaya Kütle Puanı (RMR Sistemi) .....	45
4.4 Kaya Kütle İndeksi (RMi) .....	52
4.5 Q Sınıflama Sistemi.....	56
4.6 SSPC Sistemi.....	63
4.7 Hoek Brown Yenilme Kriteri .....	67

4.8	Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemleri ve Ampirik Yenilme Kriteri Esas Alınarak Elde Edilen Dayanım ve Deformasyon zelliklerinin Karşılaştırılması.....	72
<b>5.</b>	<b>SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>78</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>82</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Yer bulduru haritası.....	2
Şekil 2.1: İncelenen jeoteknik birimlerden görüntüler.....	7
Şekil 2.2: Kaya yüzeylenmelerinde incelenen süreksizlik özellikleri (Tuncay 2012).....	8
Şekil 2.3: a) Doğrusal profil alma yöntemi (ISRM, 1981), b) Pürüzlülüğün kalemlili ve mekanik telli profilometre ile ölçülmesi (Ulusay ve Sönmez 2002), c) Pürüzlülüğün üç boyutlu ölçülmesi (ISRM, 1981).....	10
Şekil 2.4: Pürüzlülük tarağı ile ölçüm alınırken görüntü.....	10
Şekil 2.5: Pürüzlülüğün niteliksel ölçümü (ISRM, 1981) Standart pürüzlülük profilleri ve JRC değerleri (Barton ve Choobey, 1977).....	11
Şekil 2.6: SSPC sisteminde küçük ve büyük ölçekteki pürüzlülüğün tanımlanması (Hack vd. 2003).....	12
Şekil 2.7: Sondaj karot örneklerinden bir görünüm.....	15
Şekil 2.8: İncelenen jeoteknik birimler için elde edilen Schmidt çekici geri tepme sayısı-tek eksenli basınç dayanımı ilişkisi.....	16
Şekil 3.1: Tülü açık ocağı ve yakın çevresinin jeolojik haritası (Baysal vd.1986).....	17
Şekil 3.2: Tülü açık ocağı jeolojik haritası.....	18
Şekil 3.3: Jeolojik enine kesitler.....	19
Şekil 3.4: Çalışma alanının stratigrafik kolon kesiti (Helvacı ve Alaca, 1991'den değiştirilerek).....	21
Şekil 3.5: Küçüktepe ve Uzuntepe bölgesinin Kocadağ Tepe'den görüntüsü (Simav Açık Ocağı).....	24
Şekil 3.6: Tülü açık ocağında alt boratlı birim ile alt tuf biriminin stratigrafik ilişkisi.....	24
Şekil 3.7: Tülü ocağı şev yüzeyinde alt boratlı birimin görüntüsü.....	25
Şekil 3.8: Tülü açık ocağının havadan görüntüsü.....	26
Şekil 3.9: Alt boratlı birimin tabanında yer alan borlu seviyelerin genel görünümü.....	26
Şekil 3.10: Laminallı kilitaşı ve kireçtaşı araldanması ile birlikte oluşmuş kolemanit damarları.....	27
Şekil 3.11: Soldan sağa doğru masif kolemanit ve killi kolemanitin görünümü.....	27
Şekil 3.12: Laminallı kilitaşı-borlu kireçtaşı araldanması.....	28
Şekil 3.13: Bor içeren slampli kireçtaşları.....	29
Şekil 3.14: Kilitaşları içerisindeki yaklaşık 50 cm kalınlığındaki havlit oluşumu.....	30
Şekil 3.15: Gri yeşil kilitaşı-marn araldanması.....	30
Şekil 3.16: Tabandan tavana doğru iri taneliden ince taneliye geçiş ve ayrışmanın görünümü.....	31
Şekil 3.17: Kilitaşı-silttaşı araldanması.....	31
Şekil 3.18: Tülü açık ocağı doğru basamaklarında gözlenen zeolitik tuf birimi.....	32

<b>Şekil 3.19:</b> Üst tüf biriminin üst seviyelerindeki ince taneli tüflerin görünümü (Simav açık ocağı).....	33
<b>Şekil 3.20:</b> Üst boratlı birimin genel görünümü (Uzuntepe bölgesi; Simav açık ocağı).....	33
<b>Şekil 3.21:</b> Üst kısımda kil bantları arasında gelişmiş bor oluşumları; altında ise kil, kireçtaşı, marn ar dalanmasının görünümü.....	34
<b>Şekil 3.22:</b> Üst boratlı zon içerisinde çökemiş olan tüflü seviyenin görünümü (Simav açık ocağı).....	35
<b>Şekil 3.23:</b> Simav açık işletmesindeki Simav Çayı taraça dolguları. (Akarca, 2014).....	35
<b>Şekil 3.24:</b> Simav Çayı taraça çökelleri ve altındaki daha yaşlı birimlerin görünümü. ....	36
<b>Şekil 3.25:</b> Alt boratlı birim içerisinde gelişmiş kayma kıvrımları (slamplar). 37	
<b>Şekil 3.26:</b> Tülü açık ocağında alt boratlı birim içerisinde mevcut kayma kıvrımlarından görünüm.....	37
<b>Şekil 3.27:</b> Zeolitik tüf içerisindeki yoğun makaslama çatlakları. ....	38
<b>Şekil 3.28:</b> Tülü açık ocağı batısında, basamak yüksekliği 10 m olan bir şev yüzeyinde görülen sinsedimanter normal fay.....	39
<b>Şekil 4.1:</b> Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Çalışma Grubu (IAEG) tarafından kaya kütleleri önerilen niteliksel ayrışma sınıflandırılması (IAEG, 1995).....	41
<b>Şekil 4.2:</b> Jeolojik dayanım indeksi' nin bulunması için Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından yeniden düzenlenen abak.....	44
<b>Şekil 4.3:</b> a) Tek eksenli basınç dayanımı (Mpa), b) Süreksizlik ara uzaklığı puanı, c) RQD parametrelerine ait puanları bulmak için kullanılan grafikler (Bieniawski, 1989). ....	46
<b>Şekil 4.4:</b> Jeoteknik birimlerin RMR değerleri. ....	47
<b>Şekil 4.5:</b> Jeoteknik birimlerin RMR değerine bağlı olarak 5 farklı eşitlikle bulunan tek eksenli basınç dayanımları. ....	51
<b>Şekil 4.6:</b> a) Jeoteknik birimler için elde edilen temel RMR-Ayrışma puanı, b) GSI-temel RMR ilişkisi, c)RMR değeri esas alınarak bulunan kaya kütleli tek eksenli basınç dayanımı/kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranının GSI ile değişimi, d)RMR değeri esas alınarak bulunan deformasyon modülünün GSI ile değişimi.....	51
<b>Şekil 4.7:</b> R <sub>Mi</sub> değerinin bulunmasının genel akış şeması (Palmstöm 1995). .	52
<b>Şekil 4.8:</b> Jeoteknik birimlerin R <sub>Mi</sub> değerlerine göre sınıflandırılması ve bu değere göre dayanımlarının nitelenmesi. ....	56
<b>Şekil 4.9:</b> Jeoteknik birimlerin Q ve Q <sub>c</sub> değerleri. ....	61
<b>Şekil 4.10:</b> Jeoteknik birimlerin Q ve Q <sub>c</sub> değerlerine bağlı olarak hesaplanan tek eksenli basınç dayanımı. ....	61
<b>Şekil 4.11:</b> Jeoteknik birimlerin Q ve Q <sub>c</sub> değerlerine bağlı olarak hesaplanan deformasyon modülü.....	61
<b>Şekil 4.12:</b> Jeoteknik birimlerin Q ve Q <sub>c</sub> değerlerine bağlı olarak hesaplanan sürtünme açısı ve kohezyon değerleri. ....	62
<b>Şekil 4.13:</b> Temel RMR değeri ile Q ve Q <sub>c</sub> değerleri (aib) ve GSI ile Q ve Q <sub>c</sub> değerleri arasındaki ilişki. ....	62
<b>Şekil 4.14:</b> Jeoteknik birimlerin SSPC sistemi ile hesaplanan kayma dayanımı parametreleri.....	67
<b>Şekil 4.15:</b> Jeoteknik birimlerin SSPC sistemi ile hesaplanan tek eksenli basınç dayanımı. ....	67

<b>Şekil 4.16:</b> Jeoteknik birimlerin Hoek-Brown kırteri ile hesaplanan tek eksenli basınç dayanımı.....	69
<b>Şekil 4.17:</b> Jeoteknik birimlerin Hoek-Brown kırteri ile hesaplanan elastisite modülü.....	71
<b>Şekil 4.18:</b> Jeoteknik birimlerin Hoek-Brown kırteri ile hesaplanan sürtünme açısı değerleri. ....	71
<b>Şekil 4.19:</b> Jeoteknik birimlerin Hoek-Brown kırteri ile hesaplanan kayma dayanımı parametreleri.....	71
<b>Şekil 4.20:</b> Jeoteknik birimlerin Kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı/Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranı. ....	72
<b>Şekil 4.21:</b> Jeoteknik birimlerin RMR (Em1), RMi (Em2), Q (Em3) sistemi ve Hoek-Brown (Em4) yenilme ölçütü ile elde edilmiş deformasyon modüllerinin karşılaştırılması.....	73
<b>Şekil 4.22:</b> Jeoteknik birimlerin kayma dayanımı parametrelerinin karşılaştırılması. ....	73
<b>Şekil 4.23:</b> Elde edilmiş deformasyon modülü değerlerinin ayrışmaya göre değişimi. ....	76

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Süreksizliğin devamlılığı (ISRM, 1981).....	9
<b>Tablo 2.2:</b> Küçük ölçekli pürüzlülüğün tanımlanması (Palmström, 1996). ....	11
<b>Tablo 2.3:</b> Büyük ölçekli pürüzlülüğün tanımlanması (Palmström, 1996; Cai vd. 2004).....	12
<b>Tablo 2.4:</b> Bozunma indeksine ( $W_c$ ) göre süreksizlik yüzeylerinin bozunma sınıflaması (Gökçeoğlu, 1997). ....	13
<b>Tablo 2.5:</b> Tülü açık ocağında yapılmış sondajlardan alınan farklı kaya türlerine ait karot örneklerinin indeks ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri.....	14
<b>Tablo 4.1:</b> Kaya malzemesinin ayrışma durumuna göre verilen puanlar.....	40
<b>Tablo 4.2:</b> Mağmatik kayalardaki kırıklar ve her tür kayaçtaki kalıntı süreksizlikler için puanlar. ....	42
<b>Tablo 4.3:</b> Kireçtaşı da dahil tortul ve metamorfik kayalardaki kırık, tabakalanma ve foliyasyon düzlemleri için puanlama. ....	42
<b>Tablo 4.4:</b> Kayaçların ayrışma durumuna göre mühendislik çalışmalarında karşılaşılabilecek problemler.....	42
<b>Tablo 4.5:</b> Tülü ocağındaki jeoteknik birimlerin kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı, kaya kütle özelliği, hacimsel çatlaklılık sayısı, Price (1993) ve IAEG (1995)'e göre ayrışma derecesi. ....	43
<b>Tablo 4.6:</b> Süreksizlik yüzey puanını (SCR) bulmak için gerekli pürüzlülük, ayrışma ve dolgu durumu ile ilgili puanlama.....	44
<b>Tablo 4.7:</b> RMR kaya kütle sınıflama sisteminde kullanılan parametreler ve puanları (Bieniawski, 1989). ....	45
<b>Tablo 4.8:</b> Süreksizliklerin yüzey durumu için puanlanlama (Bieniawsk, 1989).....	46
<b>Tablo 4.9:</b> Kaya şevleri için önerilen süreksizlik yönelimi düzeltmesi puanları (Singh ve Gahrooe, 1989).....	47
<b>Tablo 4.10:</b> Jeoteknik birimlerde ölçülen RMR parametrelerin değerleri ve puanları.....	48
<b>Tablo 4.11:</b> Jeoteknik birimler için RMR değerlerini esas alan ampirik formüllerle bulunmuş tek eksenli basınç dayanımı ve deformasyon modülü.....	50
<b>Tablo 4.12:</b> Süreksizlik pürüzlülük faktörü puanlaması. ....	53
<b>Tablo 4.13:</b> Süreksizlik devamlılığının puanlaması. ....	53
<b>Tablo 4.14:</b> Süreksizlik yüzeyi alterasyon puanlaması. ....	54
<b>Tablo 4.15:</b> Jeoteknik birimlerin $RM_i$ parametre değerleri, $RM_i$ değeri ve $RM_i$ ye göre bulunmuş deformasyon modülü. ....	55
<b>Tablo 4.16:</b> Q sisteminde RQD, Eklem takım sayısı ve Eklem alterasyon sayısı için puanlama (Barton 2002).....	57
<b>Tablo 4.17:</b> Q sisteminde Su azaltma faktörü ve Gerilme azaltma faktörü için puanlama (Barton 2002).....	58
<b>Tablo 4.18:</b> Q sisteminde eklem pürüzlülük sayısı ( $J_s$ ) için puanlama (Barton 2002).....	59

<b>Tablo 4.19:</b> Jeoteknik birimlerin Q sınıflama sistemine göre parametre değerleri ve Q değerine göre bulunmuş dayanım ve deformasyon özellikleri.....	60
<b>Tablo 4.20:</b> Süreksizlik koşul faktörü (TC) için, büyük ölçekli pürüzlülük, küçük ölçekli pürüzlülük, dolgu malzemesi türü ve yüzeydeki erime boşluğu varlığı/yokluğu ile ilgili puanlama (Hack vd. 2003).....	64
<b>Tablo 4.21:</b> Jeoteknik birimlerin her birindeki her bir süreksizlik takımının yüzey koşulu parametre puanları.....	65
<b>Tablo 4.22:</b> Jeoteknik birimlerin süreksizlik durumu (CD), süreksizlik takımlarına ait süreksizlik koşul faktörü (TC), Süreksizlik ara uzaklığı faktörü (SPA), kaya kütle kohezyonu, kaya kütle sürtünme açısı Moh-Coloumb kriterine göre bulunmuş kaya kütle dayanımı verileri .....	66
<b>Tablo 4.23:</b> Süreksizlik yüzey puanını (SCR) bulmak için gerekli pürüzlülük, ayrışma ve dolgu durumu ile ilgili puanlama (Sönmez ve Ulusay, 2002).....	68
<b>Tablo 4.24:</b> Hoek-Brown Yenilme kriterine göre bulunan kaya dayanım özellikleri.....	70

## ÖNSÖZ

“Tülü Açık Ocağında (Bigadiç-Balıkesir) Yüzeyleyen Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri” adlı bu çalışma Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı’nda gerçekleştirilen yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasının her aşamasında bana yol gösteren, her türlü bilgi ve desteğini esirgmeden çalışmalarımı yönlendirerek beni cesaretlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şener CERYAN’a çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını her türlü katkıyı sağlayarak destekleyen Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğüne çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımı yardımlarıyla destekleyen Sayın Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN’e ve Sayın Doç. Dr. Nurcihan CERYAN’a çok teşekkür ederim.

Tez yazım aşamasında değerli katkılarını şahsımdan esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan BÜYÜKKAHRAMAN’a çok teşekkür ederim.

Arazi ve laboratuvar çalışmaları sırasında değerli katkılarıyla bana yardımcı olan Sayın Öğr. Gör. Cüneyt BİRCAN’a ve Sayın Arş. Gör. Samet Berber’e çok teşekkür ederim.

Harita ve kesit alımı işlemlerinde yardımlarından dolayı Sayın Orhan KARA’ya ve Sayın Nuri YILDIZ’a çok teşekkür ederim.

Hayat boyu olduğu gibi bu çalışma sırasında da beni destekleyen kıymetli aileme çok teşekkür ederim.

# 1. GİRİŞ

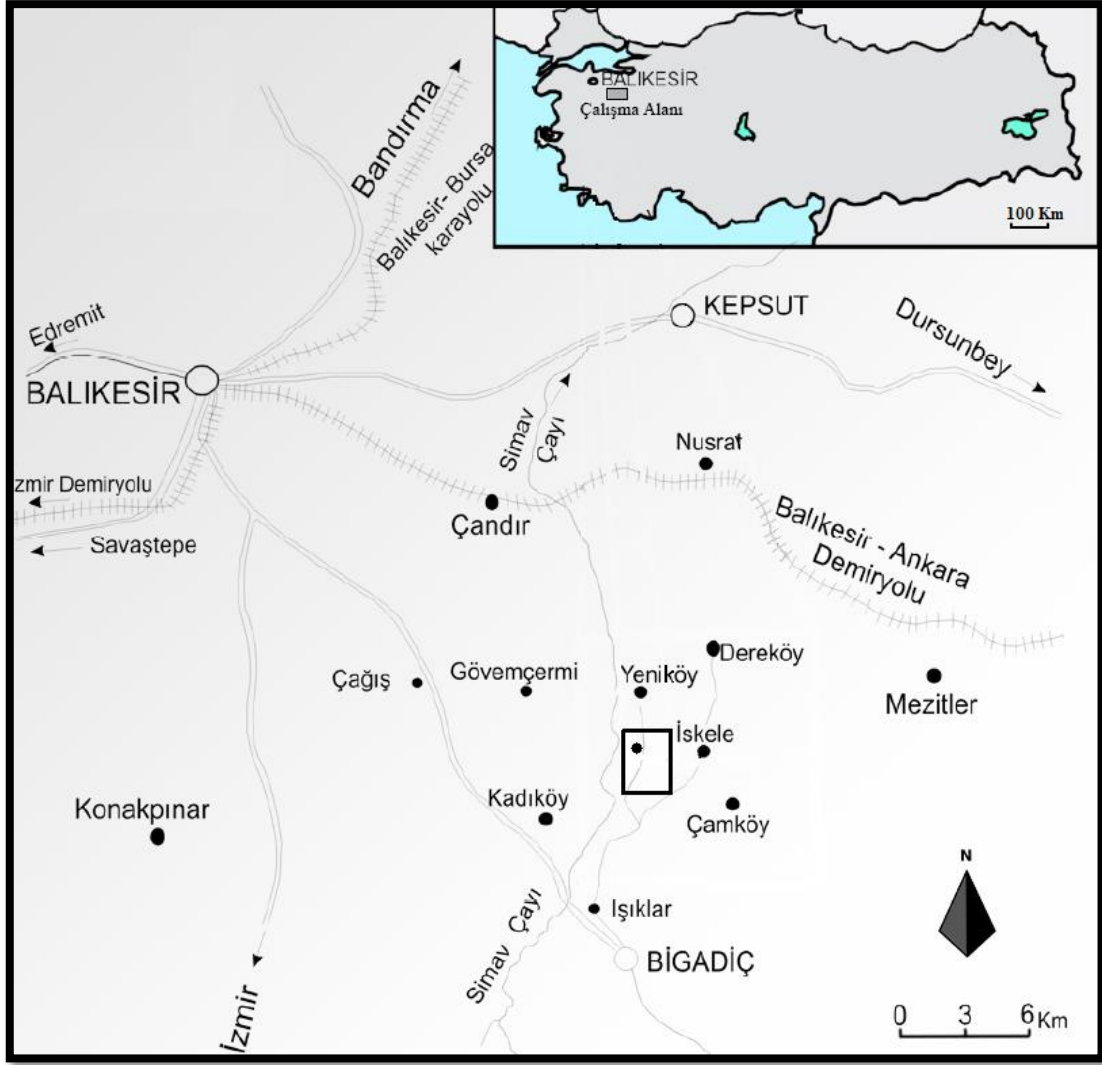
## 1.1 Çalışmanın Amacı

İnceleme alanı olan Tülü açık ocağındaki faaliyetler hali hazırda ruhsat sahibi olan Eti Maden İşletmeleri Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü bünyesinde gerçekleşmektedir. Eti Maden İşletmelerinin % 75'lik pazar payı ile dünya bor pazarındaki lider konumu da göz önüne alındığında, Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü tüvenan kolemanit ihtiyacının % 50'sinin karşılandığı Tülü açık ocağındaki cevher üretim faaliyetlerinin emniyetli ve karlılıkla devam edebilmesi bölge ve ülke menfaatleri açısından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında Tülü açık ocağında yüzeyleyen kaya kütlelerinin kazılabilirliği'nin araştırılması amacıyla inceleme alanında 26 gözlem noktasında, jeoteknik birimlerin tanımlamaları yapılarak süreksizlik unsurlarının ölçümleri alınmış ve bu birimler fotoğraflanmıştır. Laboratuvar çalışmaları ile kaya kütlelerinin mühendislik amaçlı sınıflandırmaları, dayanım ve deformasyon özellikleri incelenmiştir. Bunun yanında Tülü açık ocağının 1: 1000 ölçekli fiili durum haritası üzerine şev yüzeylerinde belirlenen birimler işlenerek ocak jeolojik haritası oluşturulmuştur. 1 adet KD – GB, 1 adet KB – GD doğrultulu enine kesitler alınmıştır.

## 1.2 Çalışma Alanının Tanıtılması

İnceleme alanı olan Tülü açık ocağı, Balıkesir ili Bigadiç ilçesinin yaklaşık 12 km kuzeyinde ve Balıkesir iline 51 km uzaklıkta olup 1: 25000 ölçekli topoğrafik haritada Balıkesir i20 – a1 ve Balıkesir i20 - a2 paftaları içerisinde yer almaktadır. Ulaşım yılın her mevsimi sağlanabilmektedir.



Şekil 1.1: Yer bulduru haritası.

### 1.3 Önceki Çalışmalar

Dünyanın önemli bor havzalarından biri olan Bigadiç bölgesi borat yatakları 1950 yılından beri birçok araştırmacının değişik çalışmalarına konu olmuştur.

Bölgede ilk olarak Meixner 1952 inceleme alanı yakın çevresinde bulunan İskeleköy borat oluşumlarının minerolojik incelemelerini yaparak bölgede kolemanit, üleksit, meyeroferit, hidroborasit varlığını tespit etmiştir.

(Helke 1955), borat yataklarının Üst Tersiyer yaşlı marn ve kireçtaşı aralanmaları ile oluştuğunu belirtmiştir.

(İnan 1975), bor oluşumuna neden olan sıvıların bileşim, ph, sıcaklık değerlerinin çökelimde etkili olduğunu belirterek havzanın derin kesimlerinde Na boratlarının, sığ kesimlerinde ise Na-Ca ya da Ca boratlarının hakim olduğunu söylemiştir.

Çakır ve Dündar (1982), Bigadiç Neojen havzasının sediman çökelimleri ile beraber asidik ve bazik volkaniklerden oluştuğunu belirterek bölgenin 1/ 25.000 ölçekli jeolojik haritasını oluşturmuşlardır. Ayrıca boratlı zonun iki ayrı seviye şeklinde yataklandığını belirlemiştir.

Yılmaz vd. (1982), istifli yaşlıdan gence doğru; Taban volkanitleri, Alt kireçtaşları, Alt tuf, Alt borat zonu, Üst tuf, Üst borat zonu ve Olivinli bazalt olmak üzere yedi birim adı altında incelemiştir. Ayrıca Hacettepe Üniversitesi ile Etibank arasında yapılan proje kapsamında bölgenin 1/ 25.000 ölçekli jeolojik haritasını hazırlamıştır.

Gündoğdu (1982), bölgenin 1/ 25.000 ölçekli jeolojik haritasını yapmıştır. Bölgenin stratigrafik istifini oluşturarak tüm kaya birimlerinin minerolojik ve jeokimyasal incelemesini ayrıntılı olarak yapmıştır.

Gündoğdu ve Gökçen (1982, 1983), Bigadiç formasyonunun Uzun Tepe ve İskele bölgelerinde taban yapıları, kayma oluşukları ve laminasyonlar olarak üç çeşit sedimanter yapılarının olduğunu belirtmiştir.

Helvacı (1983), Kırka yöresi dışında kalan tüm borat yataklarında egemen mineralin kolemanit olduğunu, kolemanitin çökmesinden sonra Na-Ca boratların çökeldiğini açıklamıştır.

Helvacı ve Alaca (1984), Bigadiç bor yataklarının cevher oluşumunun tuf, kil, kireçtaşı, marn ara katkılı oluştuğunu belirtmiştir.

Helvacı ve Dora (1985), Bigadiç borat yataklarının çökme ortamlarının genel özelliklerini araştırarak alt boratlı zonda bazı üleksit seviyelerinin arasında probertit bantlarının olduğunu fakat kolemanit ve üleksitin hakim mineral olduğunu belirtmişlerdir.

Baysal vd. (1986), Bigadiç borat havzası ve yakın çevresindeki litolojileri inceleyerek işletilen ocaklardaki mineral türlerini tayin etmişler ve bölgenin jeolojik haritasını yapmışlardır.

Helvacı ve Alaca (1991), Bigadiç yöresi ve yakın civarındaki birimleri ayırtlayarak miyosen yaşlı birimleri tabandan tavana doğru taban volkaniti birimi, taban kireçtaşı, alt tuf, alt boratlı zon, üst tuf, üst boratlı zon, bazalt ve genç alüvyonlar olarak sıralamışlardır. Borat içeren birimlerin ayrıntılı incelemesini yapmışlar ve her iki borat zonunda da hakim minerallerin kolemanit, üleksit olduğunu belirtmişlerdir.

Helvacı (1995), Bigadiç borat havzasının oluşum koşullarını açıklayarak stratigrafisini, mineralojisini ve oluşumunu depolanma modelleri ile ortaya koymuştur.

Helvacı ve Orti (1998), Batı Anadolu'daki Miyosen yaşlı kolemanit-üleksit içeren çökellerin sedimantolojik incelemesini yaparak havza kenarlarında Ca boratlarının merkezinde ise Na boratlarının oluştuğunu ve nodüler kolemanit, nodüler üleksitin birincil olduğunu açıklamışlardır.

Helvacı (2001), Batı Anadolu borat yataklarının jeolojik konumu, ekonomik önemleri ve bor politikaları ile ilgili bilgiler vermiştir. Ayrıca mineral çökeli mi esnasında ilk olarak Ca boratlarının sonrasında Ca-Na boratlarının daha sonra da Na boratlarının oluştuğunu açıklayarak baskın minerallerin kolemanit, üleksit, boraks olduğunu belirtmiştir.

Erkül vd. (2002a), Bigadiç, Soma ve Sındırgı çevresinde yüzlek veren bor çökelleriyle ilişkili volkanik kayaçların stratigrafisini inceleyerek yaşlıdan genç oluşumlara doğru andezitik-bazik, dasitik volkanosedimanter ve riyolitik olarak üç farklı volkanik serinin birbirini uyumsuzlukla üzerleyerek oluştuğunu açıklamışlardır.

Erkül vd. (2002b), Bigadiç'te Miyosen yaşlı bor içeren volkanosedimanter evaporitik gösel tortulların temelini oluşturan andezitik-bazaltik bileşimli volkanitleri sınıflandırmış, bor mineralleri içeren gösel volkanosedimanter istifin litolojik ve stratigrafik olarak birbirinden ayrılan iki piroklastik seviye ile

ardalandığı, ayrıca gölssel tortullar içerisinde ara düzeyler şeklinde volkanojenik epiklastik tortulların yer aldığını ileri sürmüşlerdir.

Helvacı (2003), Miyosen gölssel ortamında depolanan bor minerallerinin çakıltaşı, kumtaşı, kiltası, şeyl, marn, kireçtaşı ve tuf ardalanmalı istifin içerisinde oluştuğunu belirtmiştir.

Günen ve Varol (2004), alt boratlı düzeylerdeki sinsedimanter deformasyon yapılarının özelliklerini inceleyerek bunların tektonik kökenli olduklarını belirtmişlerdir.

Erkül vd. (2005a), Bigadiç bor havzasındaki volkanizmanın 23 Milyon yıl (My) önce başlayıp 17,8 My'a kadar süren iki evreli bir faaliyet olduğunu belirtmişlerdir. Kocaışkan volkanitleri ve Bigadiç volkano-sedimanter serilerinin bu evrelerin ürünü olduğunu açıklamışlardır.

Gemici vd. (2008), Bigadiç yöresi yer altı sularını inceleyerek Tülü' de suyun Ca-SO<sub>4</sub> ve HCO<sub>3</sub>, Simav ve Acep'te ise Na- HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> karakterli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek SO<sub>4</sub>'ün anhidrit ve jipslerin yıkanması, As'nin ise kireçtaşı ile tüflerin yıkanması sonucu olabileceğini açıklayarak yeraltı suyunun kirlenmesinde yatağın etkili olduğunu belirtmiştir.

Koçak (2009), borat cevherlerinin minerolojisi incelenerek yüksek teknolojide kullanılmasın da gerekli olacak manyetik özellikleri araştırılmış ve kolemanit, üleksit minerallerinin manyetik özellikleri olduğu açıklanmıştır.

Akarca (2014), Bigadiç yöresi çökellerindeki deformasyon yapılarının özelliklerini incelemiş ve bölgede Alt ve Üst boratlı birimde gözlenen yumuşak çökel deformasyon yapılarının gölün derin kısımlarında geliştiğini tespit etmiş ve oluşum mekanizmalarını ortaya koymuştur.

## **2. ÇALIŞMA YÖNTEMİ**

### **2.1 Jeolojik Harita ve Kesit Oluşturma**

Yapılan arazi çalışmaları neticesinde, önceki çalışmacılardan da yararlanarak inceleme alanının 1/1000 ve 1/25000 ölçekli jeoloji haritaları hazırlanmıştır. Önceki çalışmalarda havzada tespit edilen 7 litostratigrafi birimi içerisinden sadece 3'ü Tülü açık ocağının mevcut şev yüzeylerinde görülebilmektedir. Tespit edilen birimler üst tuf, alt boratlı birim ve alt tuf birimleridir. Hazırlanan jeolojik haritada Tülü açık ocağında yüzeyleyen bu 3 birimden biri olan alt boratlı birim, 6 ayrı fasiyes olarak ocak fiili durum haritasına işlenmiştir. Fasiyes sınırları GPS ile koordinat alınarak ve saha gözlemleri yolu ile ocak fiili durum haritası üzerine işlenmiştir.

Ocak fiili durumu üzerine işlenerek oluşturulan jeolojik harita üzerinde 1 adet KD – GB doğrultulu, 1 adet de KB - GD doğrultulu olmak üzere toplam 2 adet 1/1000 ölçekli jeolojik enine kesit çıkartılmıştır.

### **2.2 Jeoteknik Birimlerin Tanımlanması**

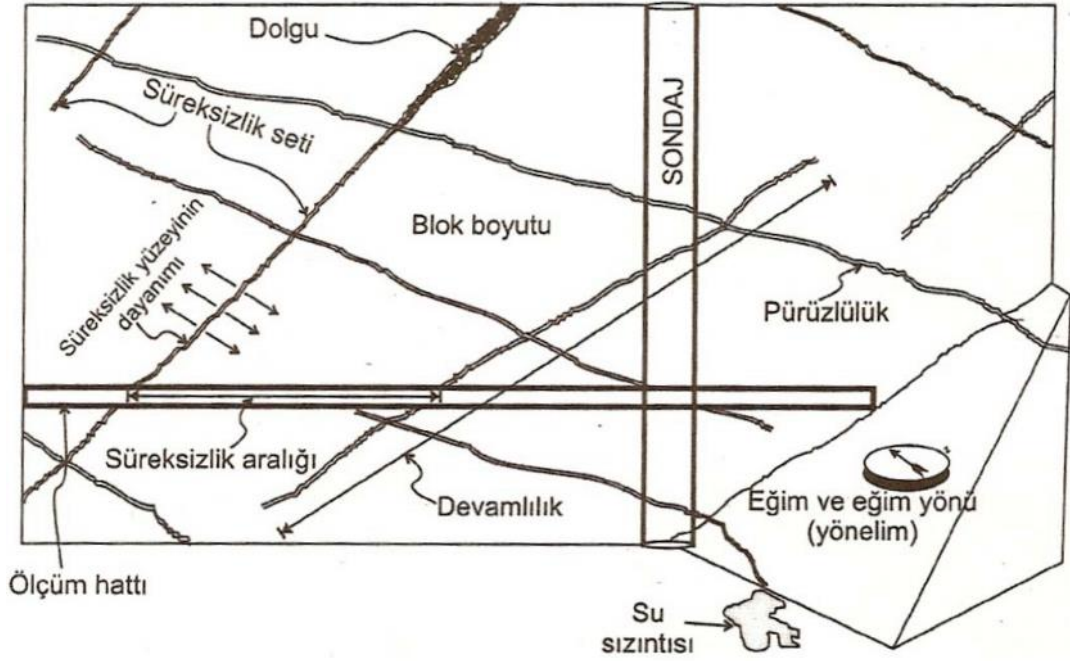
Tülü ocağındaki litolojik birimler, mühendislik özelliklerinin araştırılabilmesi amacıyla kaya türü, ayrışma durumu ve süreksizlik sıklığı esas alınarak tahmini mühendislik davranışı benzer olan homojen zonlara (jeoteknik birimlere) ayrılmıştır. Arazi çalışmaları neticesinde 26 jeoteknik birimin her birinin kaya malzeme özellikleri, süreksizlik özellikleri ve kaya kütle özellikleri incelenmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: İncelenen jeoteknik birimlerden görüntüler.

### 2.3 Süreksizlik Özelliklerinin Ölçümü

Bu çalışmada süreksizliklerin jeoteknik özelliklerinin ölçülmesinde hat etüdü yöntemi uygulanmıştır (Şekil 2.2). Süreksizliklerin jeoteknik özelliklerinin ölçümünde ISRM (1981) ile Ulusay ve Sönmez (2007)'den yararlanılmıştır.



**Şekil 2.2:** Kaya yüzeylemelerinde incelenen süreksizlik özellikleri (Tuncay 2012).

Süreksizlik ara uzaklığı, bir süreksizlik takımındaki süreksizlikler arasında dik uzaklık olarak tanımlanmaktadır. Ölçüm hattı veya sondaj eksenini boyunca iki süreksizlik arasında ölçülen uzaklık “görünür ara uzaklık” olarak alınır. Süreksizlik takımlarında gerçek ara uzaklığı (iki süreksizlik arasındaki dik uzaklığı) bulmak için aşağıdaki (2.1) eşitliği ile düzeltme yapılmıştır (Ulusay 2007).

$$\text{Süreksizlik gerçek ara uzaklığı} = J_{si} \times \sin(\delta_1) \times \sin(\beta_j) \quad (2.1)$$

Eşitlikte;

**J<sub>si</sub>:** Görünür ara uzaklık

**δ<sub>1</sub>:** Süreksizlik doğrultusu ile ölçüm hattı arasındaki açı

**β<sub>j</sub>:** Süreksizliğin eğimidir.

Bu çalışmada süreksizlik ara uzaklığını bulmak için ölçüm hattından yararlanılmış ve ayrıca incelenen yüzeylerde ayırt edilen her bir süreksizlik takımı içinde ortalama süreksizlik aralığı bulunmuştur.

Hacimsel çatlaklılık sayısı ( $J_v$ ) Palmström (1982, 1985 ve 1996) tarafından tanımlanmış olup “birim hacimdeki ( $1m^3$ )teki çatlak sayısını” göstermektedir ve aşağıdaki (2.2) eşitlikle bulunmaktadır.

$$J_v = \sum \left( \frac{1}{S_i} \right) + N/5 \quad (2.2)$$

Eşitlikte;

**J<sub>v</sub>**: Birim hacimdeki (1 m<sup>3</sup>) çatlak sayısı.

**S<sub>i</sub>**: Her bir süreksizlik takımı için ara uzaklık (metre).

**N**: İncelenen alandaki rastgele gelişmiş (random) süreksizlik sayısıdır.

Bu çalışmada blok boyutu J<sub>v</sub>'ye bağlı olarak bulunmuştur.

Kaya kalitesi özelliği (RQD) ilk olarak Deer (1963) tarafından, sondajda alınan karot boylarından yararlanarak temel kayaçların kalitesini ifade etmek için aşağıdaki (2.3) eşitlikle tanımlanmıştır.

$$RQD = \frac{\sum L_{10}}{H} \times 100 \quad (2.3)$$

Eşitlikte; **L<sub>10</sub>**: Uzunluğu 10 cm ve daha fazla olan karotların toplamı, **H**: İlerleme aralığıdır.

RQD değeri, sondajların olmadığı durumlarda kaya yüzeylenmelerinde oluşturulan ölçüm hatlarından yararlanılarak Priest ve Hudson (1976) tarafından önerilen (2.4) eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$RQD = 100 e^{(-0.1\lambda)} \times (0.1\lambda + 1) \quad (2.4)$$

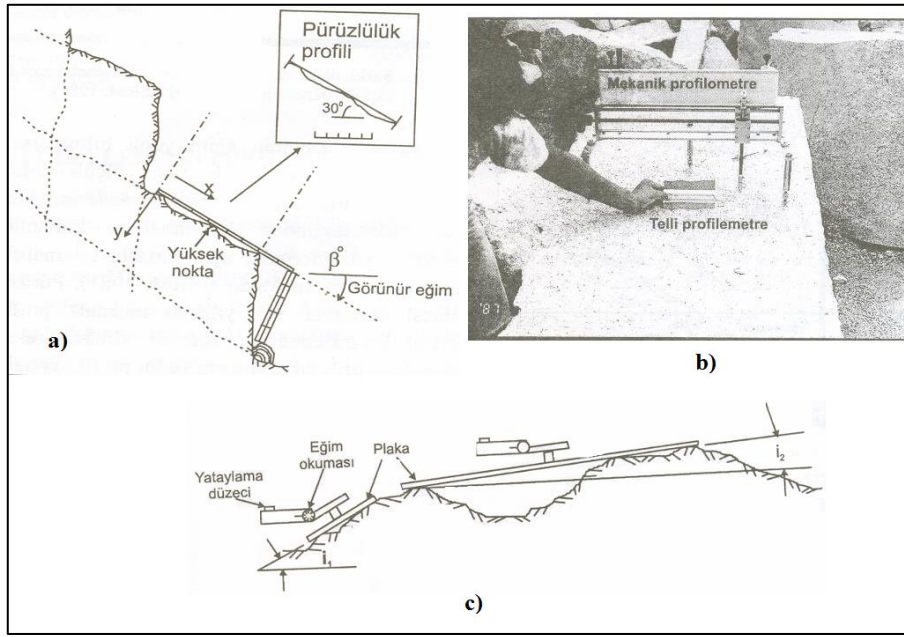
Eşitlikte; **λ**: 1 m uzunluktaki ölçüm hattını kesen ortalama çatlak sayısıdır.

Süreksizliğin devamlılığı (K), kohezyonun olmadığı alanlarının toplam çatlak alanına oranı olarak tanımlanmaktadır (ISRM 1981). Devamlılık bu şekilde tanımlanmasına rağmen, alansal ölçümün zor olmasından dolayı yüzeylenmedeki süreksizlik izinini ölçülmesiyle bulunmaktadır (ISRM, 1981), (Tablo 2.1).

**Tablo 2.1:** Süreksizliğin devamlılığı (ISRM, 1981).

TANIMLAMA	Süreksizlik izin uzunluğu (m)
Çok düşük devamlılık	< 1
Düşük derecede devamlılık	1 – 3
Orta derecede devamlılık	3 – 10
Yüksek devamlılık	10 - 30
Çok yüksek devamlılık	> 30

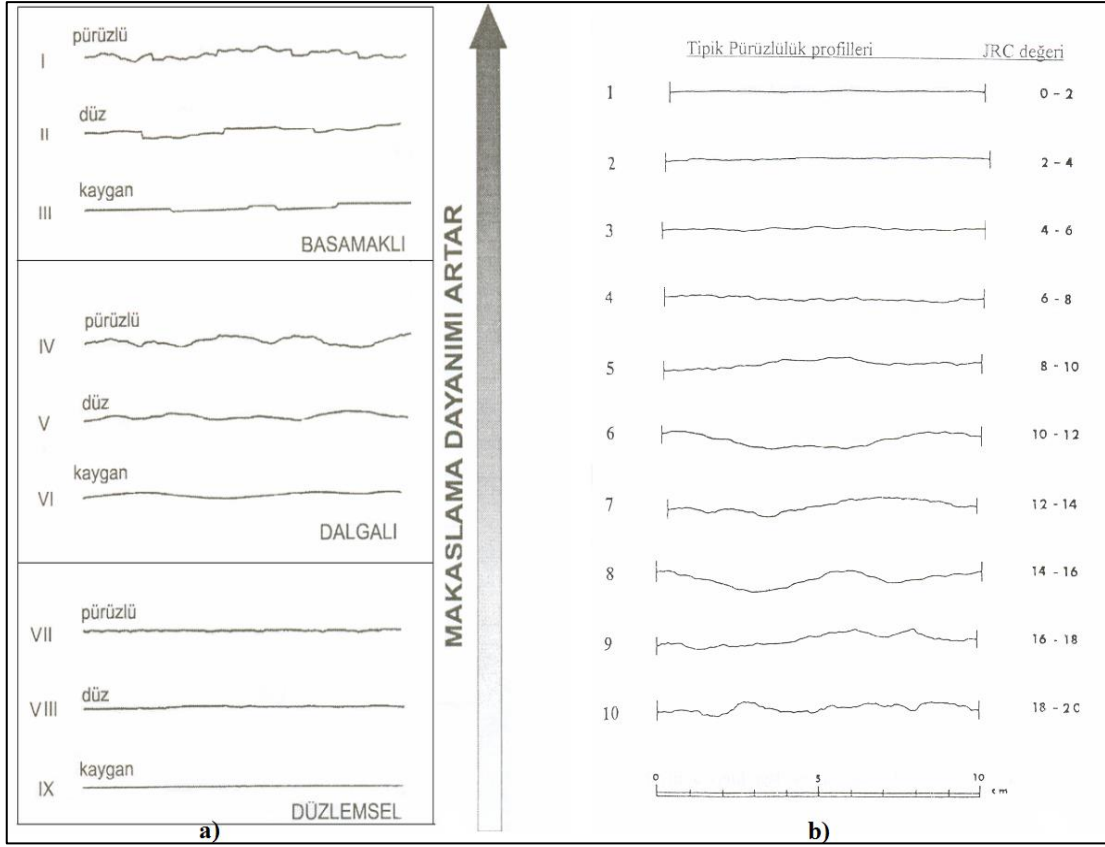
Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğünü ölçmek için değişik yöntemler vardır (ISRM 1981), (Şekil 2.4). Bu çalışmada, RMR ve GSI sınıflamalarında süreksizlik yüzeyi pürüzlülüğünü bulmak için süreksizlik yüzeyinin eğim yönünde pürüzlülük tarağı ile en az üç pürüzlülük ölçümü yapılmış olup (Şekil 2.3), bu profiller Barton ve Choubey (1977) tarafından verilen standart profillerle (Şekil 2.5) karşılaştırarak pürüzlülük sınıflandırması yapılarak JRC (süreksizlik yüzeyi pürüzlülük sayısı) bulunmuş ve bu sayıların ortalaması alınmıştır. Süreksizlik yüzeyi pürüzlülüğü için  $JRC < 8$  ise “Düz”  $JRC$  değeri 8-14 arasındaysa “Az pürüzlü”,  $JRC$  değeri 14-18 arasındaysa “pürüzlü”, ve  $JRC > 18$  ise “Çok pürüzlü” tanımlamaları yapılmıştır.



**Şekil 2.3:** a) Doğrusal profil alma yöntemi (ISRM, 1981)., b) Pürüzlülüğün kalemli ve mekanik telli profilometre ile ölçülmesi (Ulusay ve Sönmez 2002), c) Pürüzlülüğün üç boyutlu ölçülmesi (ISRM, 1981).



**Şekil 2.4:** Pürüzlülük tarağı ile ölçüm alınırken görüntü.



**Şekil 2.5:** Pürüzlülüğün niteliksel ölçümü (ISRM, 1981) Standart pürüzlülük profilleri ve JRC değerleri (Barton ve Choobey, 1977).

“Kaya Kütle İndeksi (RMi)” sistemi kullanılırken küçük ölçekli pürüzlülük için Tablo 2.2’deki gibi tanımlama yapılmıştır. Büyük ölçekli pürüzlülük (pürüzlülüğün genliği/ ölçüm uzunluğu) için ise Tablo 2.3’deki gibi tanımlanmıştır (Palmström, 1996).

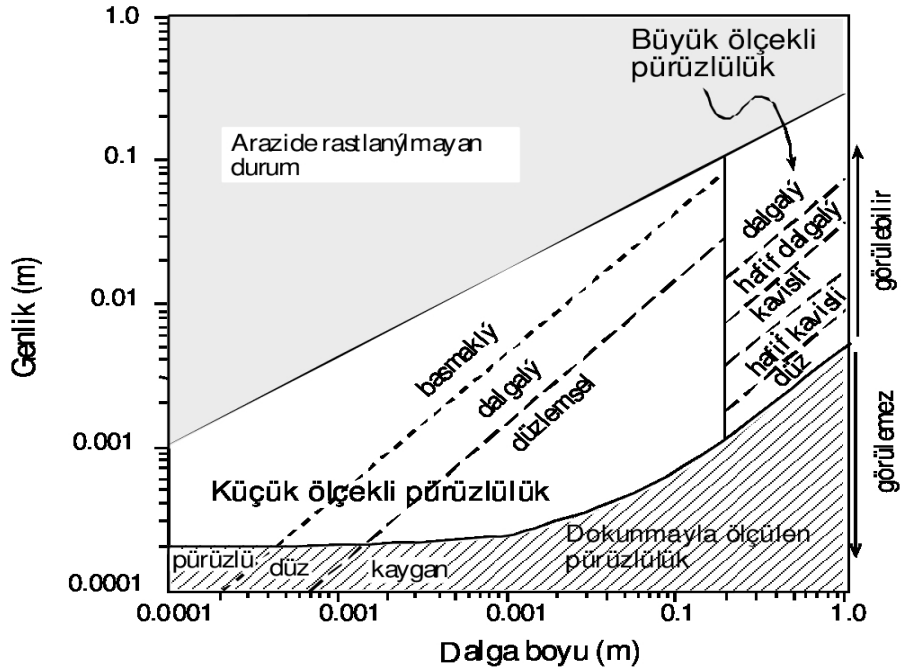
**Tablo 2.2:** Küçük ölçekli pürüzlülüğün tanımlanması (Palmström, 1996).

Sınıf	Tanımlama
Çok pürüzlü	Yaklaşık düşey basamaklar ve çıkıntılar süreksizlik yüzeyinde kenetlenme oluşturur
Pürüzlü	Bazı çıkıntılar ve düşeye yakın basamaklar vardır. Pürüzlülük açıkça görülür. Yüzey oldukça aşındırıcı görünüştedir (30 numaradan büyük zımpara kağıdı )
Hafif pürüzlü	Yüzeydeki girinti ve çıkıntılar ayırt edilebilir ve (dokunulduğunda) hissedilir (Zımpara kağıdı numara 30-300)
Düz	Yüzey düzdür ve dokunulduğunda düzlüğü hissedilebilir (numarası 300 den büyük zımpara kâğıtlarına benzer)
Cıvalı durum (Kaygan)	Yüzeyin cilalı gibi kaygan olduğuna dair görsel kanıtlar vardır; klorit ve özellikle talk gibi minerallerin süreksizlik yüzeyine sıvanması gibi
Sürtünme izli	Fay yüzeylerinde veya diğer blok hareketleri nedeniyle yüzeyde cilalanma ve sürtünme izleri var

**Tablo 2.3:** Büyük ölçekli pürüzlülüğün tanımlanması (Palmström, 1996; Cai vd. 2004).

Dalgalık Tanımı	Dalgalık sayısı
Kenetlenmiş (Büyük ölçekte)	
Basamaklı	
Geniş dalgalanma	> % 3
Küçük ve orta boyutta dalgalanma	% 0.3 - 3
Düz	< % 0.3

SSPC sisteminde küçük ölçekli 0,2 x 0,2 m<sup>2</sup>'lik alanda ölçülen pürüzlülük ile büyük ölçekli (1x1 m<sup>2</sup> alanda ölçülen) pürüzlülük söz konusudur (Hack vd. 2003) (Şekil 2.6).



**Şekil 2.6:** SSPC sisteminde küçük ve büyük ölçekteki pürüzlülüğün tanımlanması (Hack vd. 2003).

Bu çalışmada süreksizlik yüzeyi ayrışma derecesinin tanımlanmasında “bozunma indeksi  $W_c$ ” (Singh ve Gahroee 1989, Gökçeoglu 1997) esas alınmıştır.

$$W_c = R_f / R_w \quad (2.5)$$

Eşitlikte;  $R_f$  taze (ayrışmamış),  $R_w$  ise bozunma sınıflaması yapılacak süreksizlik yüzeyinde ölçülen Schmidt çekici geri tepme sayısıdır.

Gökçeoğlu (1997), Singh ve Gahrooe (1989) tarafından yukarıda verilen bozunma sınıflamasını geliştirerek aşağıda verilen bozunma indeksini önermiştir (Tablo 2.4).

Tablo 2.4: Bozunma indeksine ( $W_c$ ) göre süreksizlik yüzeylerinin bozunma sınıflaması (Gökçeoğlu, 1997).

$W_c$	Sınıf	Tanım (ISRM,1981)
<1.1	1	Bozunmamış (taze)
1.1-1.5	2	Az bozunmuş
1.5-2.0	3	Orta derecede bozunmuş
>2.0	4	Tamamen bozunmuş

Palmström (1996) R<sub>Mi</sub> sınıflamasını oluştururken “süreksizlik alterasyon faktörünü” tanımlayan Q sisteminden büyük ölçüde faydalanmıştır. Arazi çalışmalarında, süreksizlik yüzeylerindeki dolgu malzemesinin türü, kalınlığı, kalınlığın pürüzlülükten büyük olup olmaması, tane boyutu (iri taneli, ince taneli), su içeriği, dolgunun daha önce maruz kaldığı makaslama yer değiştirmesi ve süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğü, dolgunun kalınlığı ve süreksizlik yüzeyini oluşturan kayacın kırılma ve parçalanma özelliği not edilmiştir.

## 2.4 Kaya Malzemesinin İndeks ve Dayanım Özelliklerinin Ölçümü

Kaya malzemesinin indeks özellikleri (fiziksel özellikleri, elastik dalga hızı, Schmidt çekici geri tepme sayısı, suda dayanımı), ayrışma durumu ve dayanım özellikleri, nokta yük dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı kaya kütlesinin mühendislik anlamda sınıflandırılmasında, kaya kütlesi dayanım ve deformasyon özelliklerinin tahmininde ve kazılabilirliğin değerlendirilmesinde kullanılan parametrelerdir. Bu nedenle bu çalışmada incelenen jeoteknik birimlerin ve kaya malzemesinin fiziksel özellikleri, sertliği (Schmidt çekici geri tepme sayısı) ve tek eksenli basınç dayanımı bulunmuştur.

İncelenen jeoteknik birimlerin indeks özelliklerini bulmak için yapılan testle, elastik dalga hızı testleri ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri Balıkesir

Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Prof. Dr. Şerif Saylan Yapı Laboratuvarı ve BAUN Merkez laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deneyler inceleme alanında cevher aramaya yönelik olarak Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü'nün yaptırdığı sondajlardan alınan karot örnekleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7). Kaya malzemesi indeks ve dayanım özelliklerinin bulunmasında ISRM (Ulusay, 2007) esas alınmıştır. İncelenen örneklere ait indeks ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri de verilmiştir (Tablo 2.5).

**Tablo 2.5:** Tülü açık ocağında yapılmış sondajlardan alınan farklı kaya türlerine ait karot örneklerinin indeks ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri.

N	Ör.	$n_e$	$\gamma_k$	$\gamma_d$	$V_{pd}$	$V_{pk}$	$\sigma_{ci}$	N	Ör.	$n_e$	kbha	dbha	$V_{pd}$	$V_{pk}$	$\sigma_{ci}$
1	K-2	17.7	21.56	23.33	1416	1950	11.493	20	Zt-1	27.9	13.87	16.66	1993	1989	8.182
2	K-5	25.6	19.15	21.71	1384	1926	17.126	21	Zt-2	29.1	16.26	19.17	1530	2025	13.202
3	K-9	23.5	19.68	22.03	1048	783	13.096	22	Zt-3	27.5	14.38	17.13	1692	1810	10.478
4	Tr-1	6.7	24.03	24.71	4109	3859	19.785	23	Zt-4	28.9	13.64	16.53	1769	1864	10.466
5	Tr-2	4.7	23.95	24.42	4301	3559	13.776	24	Zt-5	28.5	14.02	16.87	1626	1919	16.969
6	Tr-3	7.2	23.27	23.99	3217	3780	15.596	25	T-1	17	21.51	23.21	1463	1900	20.043
7	Tr-4	8	23.97	24.77	2505	2887	24.276	26	T-2	18.1	21.13	22.94	1697	2231	19.694
8	Tr-5	17.2	20.93	22.66	2434	3481	6.299	27	T-3	22.7	19.95	22.23	1169	1490	16.21
9	Tr-6	15.3	21.62	23.16	2708	3005	11.669	28	T-4	39	19.68	23.58	2453	2857	31.51
10	Kk-1	8.5	23.4	24.24	2474	3098	23.177	29	T-5	4.2	26.5	26.93	4225	3832	59.825
11	Kk-2	19.5	22.13	24.07	2419	1950	4.832	30	T-6	13.6	24.01	25.36	1957	2350	23.73
12	Kk-3	11.6	23.34	24.5	3960	3571	7.709	31	T-8	12.1	23.8	25.01	2385	2849	47.224
13	Kk-4	7.7	24.35	25.12	3921	3873	12.834	32	T-9	19.7	20.71	22.67	1186	1698	17.654
14	Kk-5	7.5	24.32	25.08	3488	3691	15.337	33	T-10	22.7	20.01	22.29	1111	1474	15.475
15	Kk-6	8	24.92	25.72	3287	3179	17.903	34	Zt-1.1	22	17.39	19.59	1671	1936	8.13
16	Kk-7	13.8	22.79	24.17	2409	2872	11.533	35	Zt-2.2	33.5	13.31	16.66	1714	1886	13.202
17	Kk-8	10	24.15	25.15	2277	2444	15.019	36	Zt-3.3	34	13.74	17.14	1687	1774	10.378
18	Kk-9	14.3	22.55	23.98	2010	2528	22.185	37	Zt-4.4	19.3	20.27	22.2	2339	2650	10.466
19	Zt-5.5	32.1	14.1	17.31	1788	1953	16.914	38	Zt-6.6	32.9	13.22	16.51	1714	1778	

N:Örnek numarası, Ör:Örnek, Zt:Zeolitik tuf, Kk: Killi kireçtaşı K: Kireçtaşı, T:Tuf,  $n_e$ :Effektif porozite (%),  $\gamma_k$  ve  $\gamma_d$ : kuru ve doygun birim hacim ağırlıklar (kN/m<sup>3</sup>),  $V_{pk}$  ve  $V_{pd}$ :Örneğin kuru ve doygun durumda ki boyuna dalga hızı (m/sn),  $\sigma_{ci}$ :Tek eksenli basınç dayanımı (MPa),



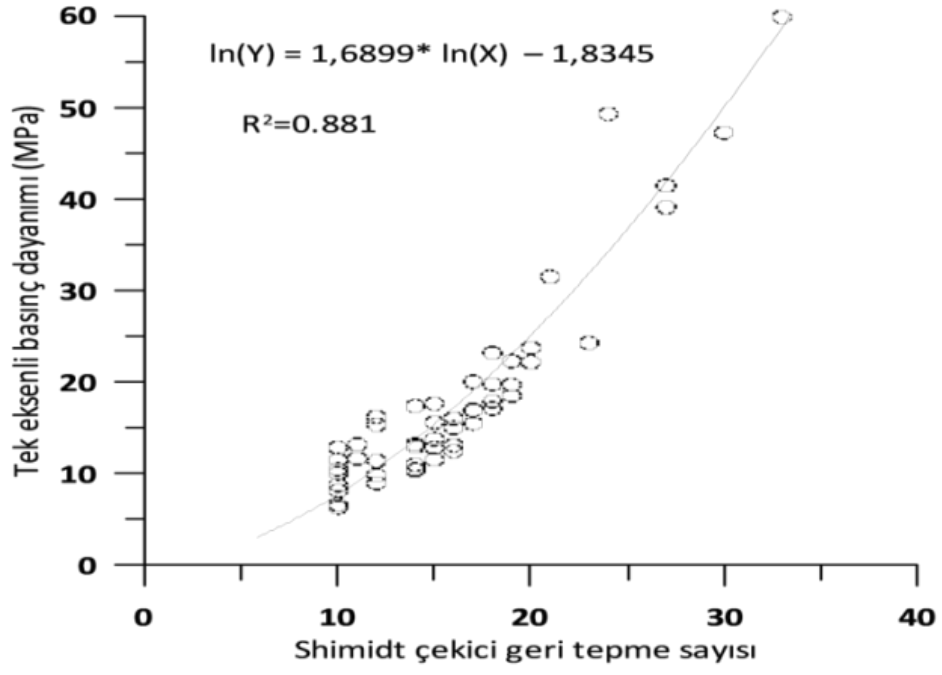
Şekil 2.7: Sondaj karot örneklerinden bir görünüm.

Karot örneklerinin sertliğini ve süreksizlik yüzeylerinin ayrışma durumunu bulmak için elde edilen geri tepme sayıları Göktaş ve Ayday (1993)'e göre hesaplanmıştır. Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanım direnci, kaya malzemesinin ve kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında, kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri için geliştirilen ampirik yaklaşımlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 55 mm çapa sahip örnekler üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları aşağıdaki (2.6) formül kullanılarak, referans çapa (50 mm ye) göre düzeltilmiştir (Hoek ve Brown 1980).

$$\sigma'_c = \frac{\sigma'_{cd}}{(50 \div D)^{0.18}} \quad (2.6)$$

Eşitlikte;  $\sigma'_c$ : Deneyde bulunan tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma'_{cd}$ : 50 mm çaplı karota göre düzeltilmiş tek eksenli basınç dayanımı, **D (mm)**: Karot çapı.

İncelenen jeoteknik birimlerden Schmidt çekici geri tepme sayısına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımını tahmini için elde edilen bağıntı Şekil 2.8'de verilmiştir.

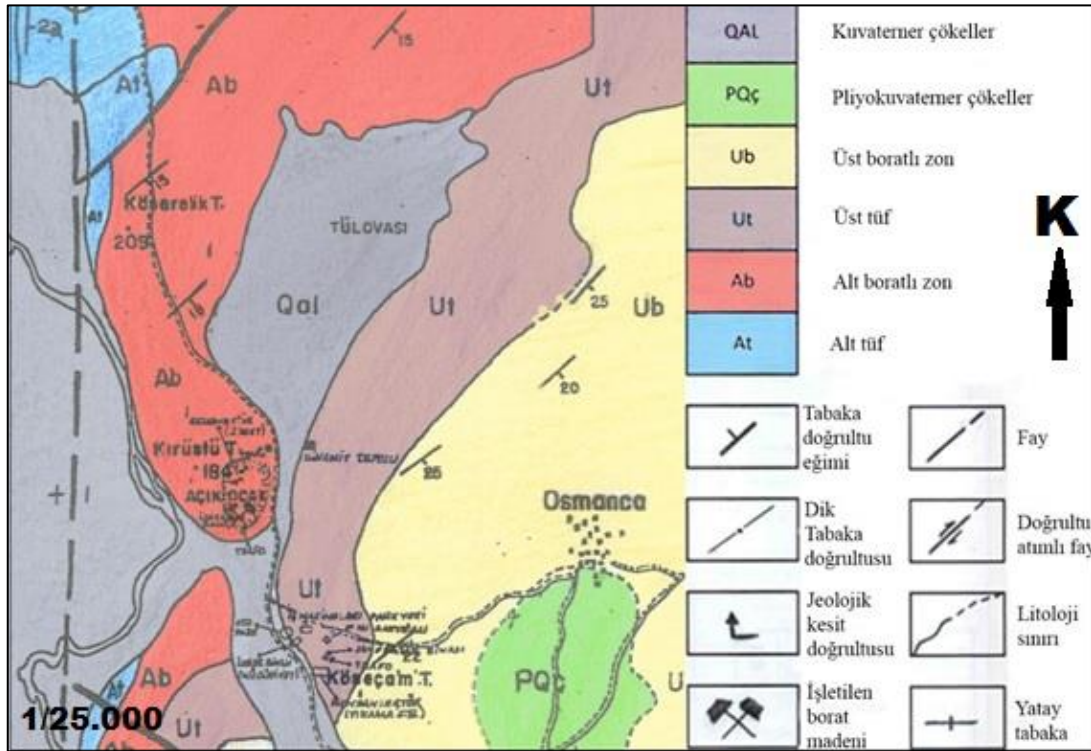


Şekil 2.8: İncelenen jeoteknik birimler için elde edilen Schmidt çekici geri tepme sayısı-tek eksenli basınç dayanımı ilişkisi.

### 3. GENEL JEOLJİ

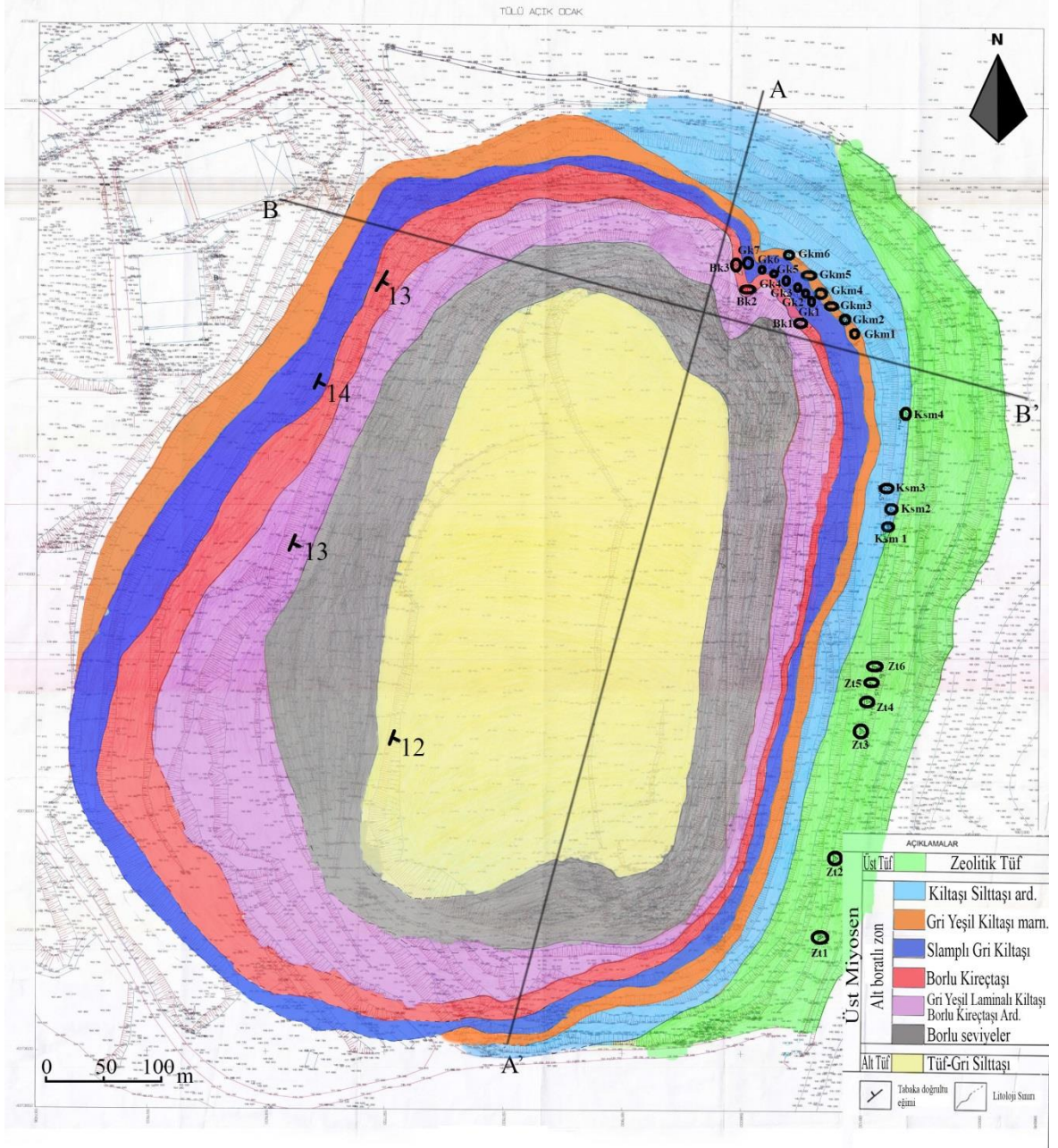
#### 3.1 Litostratigrafi

İnceleme alanında genel olarak Neojen yaşlı volkanik ve volkano-sedimanter birimler, temel kayaçlarını uyumsuzlukla üzerlemektedirler. Kuvaterner yaşlı genç çökeller ise neojen yaşlı birimleri uyumsuzlukla örtmektedirler. İnceleme alanının 1/25.000 ölçekli jeolojik haritası Şekil 3.1’de, Tülü açık ocağının 1/1000 ölçekli jeoloji haritası ise Şekil 3.2’de verilmiştir. Tülü açık ocağı jeolojik haritası üzerinde 1 adet KD-GB, 1 adet de KB-GD yönlü olmak üzere toplam 2 adet jeolojik enine kesit çıkartılarak, birimlerin yayılımları ortaya konmuştur (Şekil 3.3).

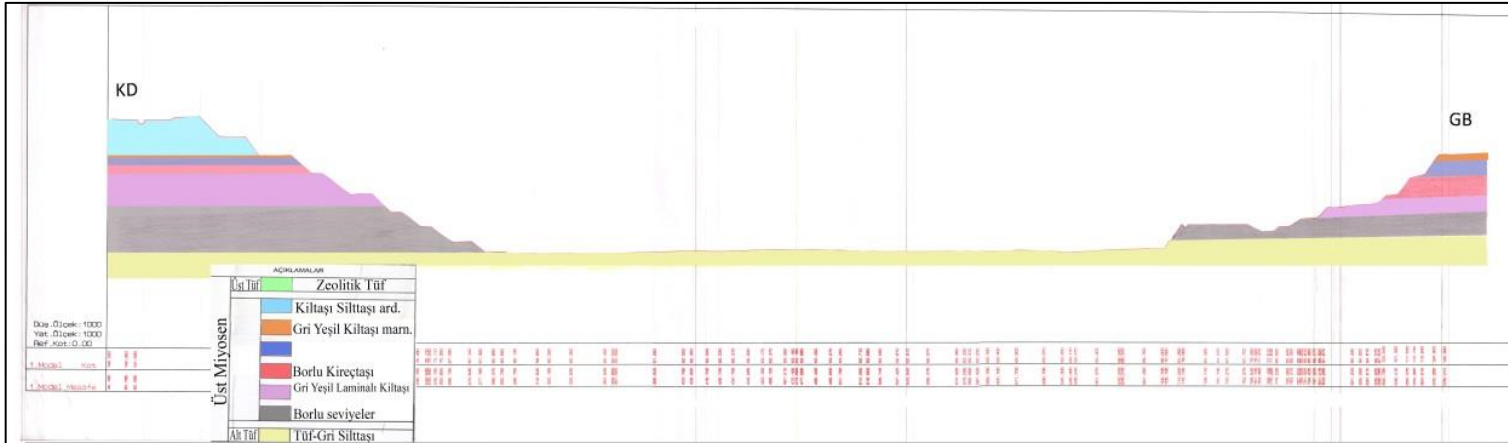


Şekil 3.1: Tülü açık ocağı ve yakın çevresinin jeolojik haritası (Baysal vd.1986).

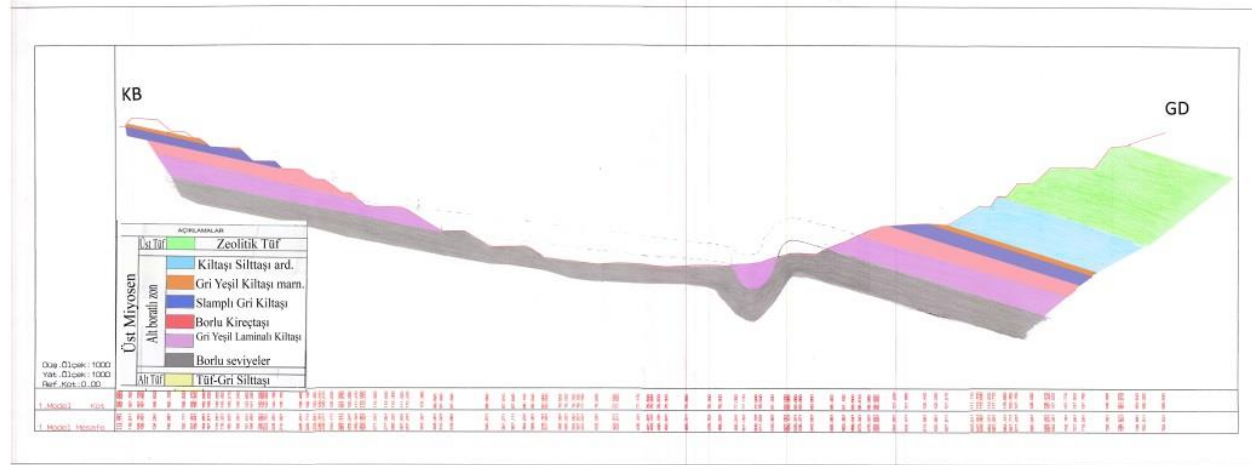
Tülü açık ocağının stratigrafisini oluşturan birimler yaşlıdan gence doğru şu şekildedir; Temel kayaçları birimi, taban volkaniti birimi, taban kireçtaşı birimi, alt tuf birimi, alt boratlı birim, üst tuf birimi, üst boratlı birim, kuvaterner çökelleri (Helvacı ve Alaca 1991), (Şekil 3.4).



Şekil 3.2: Tülü açık ocağı jeolojik haritası.



A-A' KESİTİ



B-B' KESİTİ

Şekil 3.3: Jeolojik enine kesitler.

S E N O Z O Y İ K		E O J E N		Ü S T M İ Y O S E N		LİTOLOJİ		AÇIKLAMALAR		
Eratem	Sistem	Seri	Kat	Birim	Kalınlık					
PALEOZOYİK MESOZOYİK	KUVATERNER			Alüvyon		Çakıl, Kum, Silt				
						Taraça Çökelleri		Zayıf tutturulmuş Konglomera - Kumtaşı		
ALT MİYOSEN	ORTA MİYOSEN		Üst Pannoniye	Üst Pannoniye	Üst Pannoniye Birim	75 m	Orta-İnce Taneli Kumtaşı			
							Üst Pannoniye		Bol Slampli Organik Malzemeli Kilitaşı, Kireçtaşı, Marn.	
ALT MİYOSEN		Taban Kireçtaşı	Pannoniye	Üst Boratlı Birim	70 m	Bor, Kilitaşı - Kireçtaşı				
						Üst Tüf		Tüf - Marn - Kireçtaşı Ardanması		
ALT MİYOSEN		Taban Kireçtaşı	Pannoniye	Alt Boratlı Birim	35-130 m	İnce Taneli Tüf				
						Alt Tüf		Zeolitik Tüf		
ALT MİYOSEN		Taban Kireçtaşı	Pannoniye	Alt Boratlı Birim	200-300 m	Kilitaşı Silttaşı Ardanması				
						Alt Tüf		Gri Yeşil Kilitaşı - Marn Slampli Gri Kilitaşı Bor içeren slampli kireçtaşı Gri yeşil laminalı Kilitaşı Borlu Kireçtaşı ard. Borlu Seviye		
ALT MİYOSEN		Taban Kireçtaşı	Pannoniye	Alt Boratlı Birim	50-90 m	Tüf, Gri Renkli Silttaşı				
						Taban Volkaniti		Kireçtaşı - Marn		
ALT MİYOSEN		Taban Kireçtaşı	Pannoniye	Alt Boratlı Birim	250+ m	Andezit, Bazalt, Dasit, Tüf ve Aglomera				
						Taban Volkaniti		Ofiyolit, Kireçtaşı Radyolarit, Kumtaşı		
ALT MİYOSEN		Taban Kireçtaşı	Pannoniye	Alt Boratlı Birim	250+ m	Şist, Mermer				
						Taban Volkaniti				

Şekil 3.4: Çalışma alanın stratigrafik kolon kesiti (Helvacı ve Alaca, 1991'den değiştirilerek).

### **3.1.1 Temel Kayaçları**

İnceleme alanının temel kayaçlarını şist, mermer, ofiyolit, kireçtaşı, radyolarit ve kumtaşları oluşturmaktadır. Biriminin yaşı, Helvacı ve Alaca (1991) tarafından Paleozoyik olarak verilmiştir.

Temel metamorfitleerin içerisinde bulunan şistler albit-serisit şist ve klorit-epidot-muskovit şist bileşimindedir. Mermerler genel olarak ince kristallidirler ve şistlerle ardalanmalı olarak gözlenmektedir (Helvacı ve Alaca 1991).

Rekristalize kireçtaşları koyu gri, yer yer siyaha yakın renklerde olup, demiroksit, kalsit ve bazen kuvarsla doldurulmuş kırık ve çatlaklar içerir. Tabanı görülmeyen birimin kalınlığı tespit edilememiştir. Birim taban volkanitleri tarafından uyumsuz olarak örtülür (Helvacı ve Alaca 1991).

### **3.1.2 Taban Volkaniti**

İnceleme alanının taban volkaniti birimi andezit, bazalt, trakiandezit, trakit, dasit, aglomera ve tüflerden oluşmaktadır.

Andezitlerin hakim rengi pembemsidir ve makroskobik olarak plajiyoklaz ve biyotit mineralleri içerdiği gözlenir. Kayaçların petrografik çalışmalarda kısmen karbonatlaşmış ve killeşmiş bir hamur içinde biyotit, hornblend ve plajiyoklaz fenokristalleri içerdikleri belirlenmiştir (Helvacı ve Alaca 1991).

Trakiandezitler, yer yer trakitlerle birlikte bulunup, cam matriks içinde yüzen plajiyoklaz, biyotit ve hornblend fenokristalleri ile seyrek olarak bulunan kuvars kristalleri içerirler. Plajiyoklazlar, oligoklaz-andezin bileşimindedir. Hamur içinde yer yer kloritleşmeler, hornblend ve biyotitlerde kısmen opaklaşmalar gözlenir. Seyrek ve küçük boyutlu opak mineraller hamur içinde dağınık olarak bulunur (Helvacı ve Alaca 1991).

Bazaltın taze yüzeyleri yeşilimsi siyah renkli altere olmuş kesimleri ise kırmızımsı kahverenkli. Kocakır Tepe'de gözlenen bazaltın yaşı K-Ar metodu ile 17 My. olarak bulunmuştur (Yılmaz, 1977).

Tüf ve aglomeralarla ardalanmalı dasitler ise kuvars, alkali feldspat ve amfibol içerirler. Tüf ve aglomeralar çoğunlukla ayrıışmışlardır (Helvacı ve Alaca, 1991).

Taban volkaniti birimi, tabanda temel kayaları uyumsuzlukla üzerlerken bu birimin üzerine ise genellikle taban kireçtaşı birimi uyumsuzlukla oturur.

### **3.1.3 Taban Kireçtaşı Birimi**

Birim bol çatlaklı ve kırıklı bir yapıya sahip dolomitik kireçtaşları ile başlar, üste doğru tüf bantlı, plaketli kireçtaşı-marn ardalanmasına, en üst düzeylerinde ise, kıltaşı-kireçtaşı-tüf ardalanmasına geçer (Helvacı ve Alaca 1991).

Birimin alt seviyelerinde görülen kireçtaşları çatlaklı ve erime boşuklu olup, bu boşluklar genellikle ikincil kalsit mineralleri ile doludur. Tüfler sarımsı yeşil renkli olup volkanik küllerden oluşmuşlardır (Helvacı ve Alaca 1991).

Birimin yaşı stratigrafik konumuna göre “Alt Miyosen” olarak verilmiştir (Gündoğdu, 1984).

Taban kireçtaşı birimi, altındaki taban volkaniti birimini uyumsuzlukla üstlerken, bu birimin üzerine ise alt tüf birimi uyumlu bir şekilde oturur (Helvacı ve Alaca 1991).

### **3.1.4 Alt Tüf Birimi**

Alt tüf birimi; bölgede hüküm sürmüş volkanlardan püsküren, baskın olarak kül boyutundaki piroklastik malzemenin göl ortamına düşmesiyle oluşmuştur. Alt tüf birimi, taban kireçtaşı birimini uyumlu olarak örtmektedir. Taban kireçtaşı biriminin görülemediği yerlerde ise birim, ani ve uyumsuz olarak taban volkaniti birimini üstler. Daha yüksek kotlardaki alt tüf ise genellikle taban volkaniti birimi ve temel kayaları üzerine uyumsuz olarak gelir. Tavanda ise birimin üzerine dereceli bir dokanakla alt boratlı birim gelir (Helvacı ve Alaca 1991).

Birimin yaşı, altındaki taban kireçtaşı ve üstündeki alt boratlı birim ile olan ilişkisine göre Orta Miyosen olarak verilmiştir (Gündoğdu, 1984).

Alt tuf birimi, inceleme alanı yakın çevresindeki Simav ocağının doğusunda bulunan Uzuntepe eteklerinde kısmen kendini göstermektedir (Şekil 3.5).

Ayrıca çalışma alanında yer alan Tülü açık ocağının tabanında da karşımıza çıkmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.5: Küçüktepe ve Uzuntepe bölgesinin Kocadağ Tepe'den görüntüsü (Simav Açık Ocağı).



Şekil 3.6: Tülü açık ocağında alt boratlı birim ile alt tuf biriminin stratigrafik ilişkisi.

### 3.1.5 Alt Boratlı Birim

Alt boratlı birim, Bigadiç borat havzası sınırları içerisinde Tülü açık ocağının cevher üretim faaliyetlerinin esasını oluşturur (Şekil 3.7). Simav açık ocağının doğu bölgesinde de kendini net bir biçimde göstermektedir (Şekil 3.5).

Tabanda alt tuf birimini üstleyen alt boratlı birim, tavanında ise üst tuf birimi tarafından örtülmektedir.



**Şekil 3.7:** Tülü ocağı şev yüzeyinde alt boratlı birimin görüntüsü.

Alt boratlı birimin Tülü açık ocağının şev yüzeylerinde gözlenen düzeyleri tabandan tavana doğru; borlu seviyeler, gri yeşil laminalı kıltaşı-borlu kireçtaşı ardalanması, bor içeren slamplı kireçtaşı, slamplı gri kıltaşı, gri yeşil kıltaşı-marn ve kıltaşı siltaşı ardalanması olarak 6 fasiyese ayırtlanarak incelenmiştir. Bu kapsamda Tülü açık ocağının havadan görüntüsü Şekil 3.8’de verilmiştir.



**Şekil 3.8:** Tülü açık ocağının havadan görüntüsü.

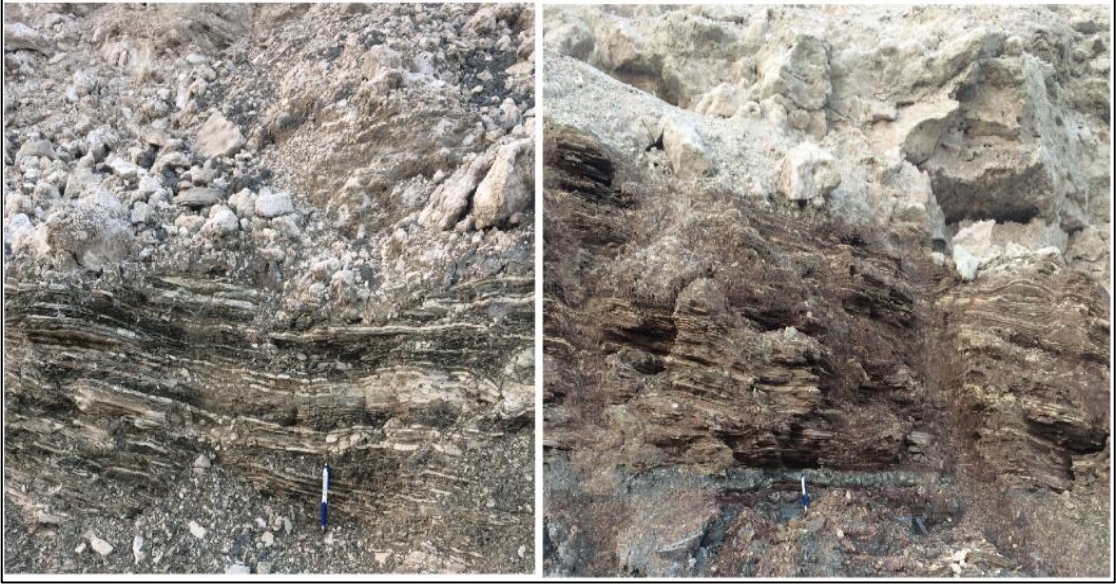
### 3.1.5.1 Borlu Seviyeler

Birimin alt düzeylerinde gözlenen bu cevherli seviyenin kalınlığı 27 m olup alt tuf biriminin üzerine oturur. Net cevher kalınlığı ise 17 m'dir. Cevherli seviyelerde hakim bor minerali kolemanit olup, eser miktarda da üleksit gözlenmektedir (Helvacı ve Alaca 1991). Şu anki faaliyet alanı içerisinde bu minerallerden ekonomik olarak üretilen bor minerali kolemanittir (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9:** Alt boratlı birimin tabanında yer alan borlu seviyelerin genel görünümü.

Borlu seviyeler; kireçtaşı, marn ve çörtlü kireçtaşı ara katkıları ile beraber 3 ayrı seviye olarak bulunur. Birimin alt düzeylerinde 8-10 m kalınlıkta masif kolemanit mevcuttur. Masif kolemanitin üzerinde laminalı kilitaşı ve kireçtaşı arakatkılı olarak 2 seviye daha cevherli zon bulunur (Şekil 3.10). Bu seviyelerin kalınlığı 2,5 m olup genellikle killi ve nodüler kolemanit halinde gözlenmektedir (Helvacı ve Alaca 1991), (Şekil 3.11).



**Şekil 3.10:** Laminalı kilitaşı ve kireçtaşı ardalanması ile birlikte oluşmuş kolemanit damarları.



**Şekil 3.11:** Soldan sağa doğru masif kolemanit ve killi kolemanitin görünümü.

### 3.1.5.2 Gri Yeşil Laminallı Kiltası - Borlu Kireçtaşı Ardalanması

Cevher zonu üzerine gri yeşil laminallı kiltası ile borlu kireçtaşları ardalanmalı olarak gelir (Şekil 3.12). Kireçtaşları içerisinde sekonder kalsit minerallerinin boşluk dolgusu şeklinde yer aldığı görülebilmektedir.



Şekil 3.12: Laminallı kiltası-borlu kireçtaşı ardalanması.

### 3.1.5.3 Bor İçeren Slamplı Kireçtaşları

Birim içinde görülen kireçtaşları, sparit, biyosparit, fosilli sparit, mikrosparit ve mikritten oluşmuştur. Killi kireçtaşları, kalsit ve kil mineralleri içermektedirler (Helvacı ve Alaca, 1991) (Şekil 3.13).

Bu fasiyes içerisinde yoğun olarak kayma kıvrımları mevcuttur. Bu nedenle birime slamplı kireçtaşı adı verilmiştir.



**Şekil 3.13:** Bor içeren slamplı kireçtaşları.

#### **3.1.5.4 Slamplı Gri Kiltası**

Birim içerisinde yeralan slamplı kireçtaşlarını üstleyen gri renkli kiltası bol miktarda slamp içermektedir. Ayrıca fasiyes içerisinde devamlılığı olmamakla birlikte yaklaşık 50 cm kalınlığında bir havlit oluşumu gözlenmektedir (Şekil 3.14).



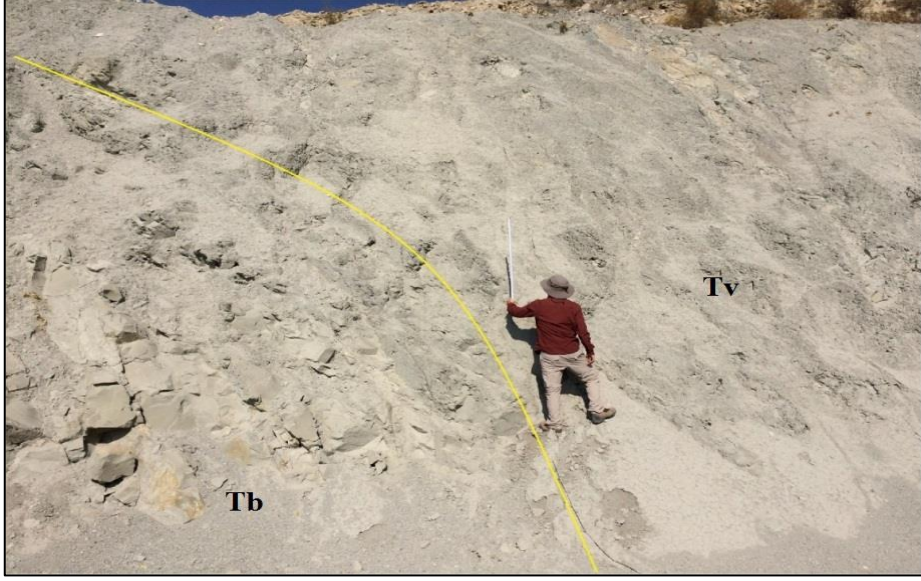
**Şekil 3.14:** Kilitaşları içerisindeki yaklaşık 50 cm kalınlığındaki havlit oluşumu.

### 3.1.5.5 Gri Yeşil Kilitaş - Marn

Gri yeşil kilitaş marn ardalanması slamlı kilitaşlarını üstlerken kilitaş-silttaş ardalanmasının tabanında yer almaktadır (Şekil 3.15). Kilitaşları yer yer laminalı özellik göstermektedir. Marnlar alt seviyelerde daha iri taneliyken, üst seviyelere doğru tane boyu azalmakta ve ayrılmış vaziyette bulunmaktadır (Şekil 3.16).



**Şekil 3.15:** Gri yeşil kilitaş-marn ardalanması.



**Şekil 3.16:** Tabandan tavana doğru iri taneliden ince taneliye geçiş ve ayrışmanın görünümü.

### 3.1.5.6 Kıltaşı - Silttaşı Ardalanması

Bu seviye alt boratlı birimi üst tuf birimine bağlayan seviyedir. Dereceli geçiş göstererek üst tuf birimi tarafından üstlenir (Helvacı ve Alaca, 1991). Alt boratlı birimin oluşumu boyunca oldukça sakin kalan volkanizmanın tekrardan harekete geçmesi sonucu üst tuf biriminin oluşum sürecinin başlaması ile bu fasiyese ait kayaların çökelişi sona ermiştir (Şekil 3.17).



**Şekil 3.17:** Kıltaşı-silttaşı ardalanması.

### 3.1.6 Üst Tüf Birimi

Alt boratlı birimin çökeli mi esnasında sessizliğini koruyan volkanizmanın harekete geçmesi ve aralıksız bir faaliyet göstermesi neticesinde oluşan birim üst tüf birimidir.

Birim alt düzeylerinde, sarımsı yeşil renkleri ile karakteristik olan kaba taneli zeolitik tüflerle başlar. Genelde koyu yeşil renkli olup, gözenekli yapıları sayesinde hafif ve dayanıklı olduklarından, yörede yapı taşı olarak kullanılır.

Üst tüf birimi, tabanda alt boratlı birimi üstlemektedir. Tavanında ise üst boratlı birim tarafından uyumlu olarak üstlenir (Helvacı ve Alaca, 1991).

Yılmaz vd. (1982) ile Gündoğdu (1984) birimin tabanındaki alt boratlı birim ile olan ilişkisine göre birime, Pannoniyen yaşını vermişlerdir.

Üst tüf birimi çalışma alanı olan Tülü açık ocağının doğu basamaklarında kendini çok net göstermektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18: Tülü açık ocağı doğu basamaklarında gözlenen zeolitik tüf birimi.

Birim üst düzeylerinde ise açık gri renkli ve konkoidal kırılmaları tipik olan ince taneli tüflerle temsil edilmektedir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19: Üst tuf biriminin üst seviyelerindeki ince taneli tüflerin görünümü (Simav açık ocağı).

### 3.1.7 Üst Boratlı Birim

Üst boratlı birim, üst tuf birimini oluşturan volkanizma faaliyetinden hemen sonra, çökme ortamına yeniden dolmaya başlayan sedimanların diyajeneziyle meydana gelmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20: Üst boratlı birimin genel görünümü (Uzuntepe bölgesi; Simav açık ocağı).

Birim kireçtaşı, kıltaşı, killi kireçtaşı, marn, tuf ar dalanmalarından ve borat ara katmanlarından oluşmaktadır (Şekil 3.21).



**Şekil 3.21:** Üst kısımda kil bantları arasında gelişmiş bor oluşumları; altında ise kil, kireçtaşı, marn ar dalanmasının görünümü.

Birim, tabanda ince katmanlı kıltaşı-kireçtaşı-marn ar dalanması ile başlarken bu ar dalanmanın üstüne sabunsu plaket kıltaşları ve borlu seviye gelmektedir. Cevher zonu üzerine ise kırmızımsı kahve renkli laminalı kıltaşı gelmektedir. Bunun üstünde ise tuf bantlı kıltaşı-kireçtaşı ar dalanması bulunur. Birim en üstte yer yer çört bantlı kalın katmanlı kireçtaşı ile son bulmaktadır. Kıltaşları cevher zonunun altında ve üstünde klavuz seviye olarak gözlenir (Helvacı ve Alaca, 1991).

Birim içinde bulunan tuf bantları cevherli çözeltilerin çökeli mi esnasında da volkanik faaliyetlerin devam ettiğine işaret etmektedir (Şekil 3.22).

Üst boratlı birim tabanında üst tuf birimini ani ve uyumlu bir şekilde üstlemektedir. Bu birim tavanda ise genç tortullar tarafından uyumsuz olarak örtülür.



**Şekil 3.22:** Üst boratlı zon içerisinde çökelmiş olan tüflü seviyenin görünümü (Simav açık ocağı).

### 3.1.8 Kuvaterner Çökelleri

Bu fasiyes güncel çakıl ve kumlu düzeylerin ardalanmasından oluşur. Çakıllı düzeylerde çok iyi gelişmiş kiremitlenmeler bulunmaktadır. Genellikle tutturulmamış nadiren de gevşek tutturulmuştur. Mermer, şist, çört ve gnays parçalarının oluşturduğu çakıllar iyi yuvarlaklaşmış ve boylanmış olup yer yer çapraz tabakalar içermektedir (Şekil 3.23). Buradaki çakılların taşınma yönünün KD'ya doğru, yani bugünkü Simav Çayı'nın akış yönüne paralel olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 3.23:** Simav açık işletmesindeki Simav Çayı taraça dolguları. (Akarca, 2014).

Simav ayının taraasını oluşturan yatay konumlu çökeller ise kendinden daha yaşlı birimleri açısal uyumsuzlukla üzerler (şekil 3.24).



şekil 3.24: Simav ayı taraça çökelleri ve altındaki daha yaşlı birimlerin görünümü.

## 3.2 Yapısal Jeoloji

Ocak içinde veya yakınında şev duraylılığı açısından önemli bir fay bulunmamaktadır. Fakat alt boratlı birim içerisinde yer alan kiltası-marn, silttaşı, kireçtaşı, tuf fasiyesi içerisinde gelişmiş çok sayıda kayma kıvrımları (slamplar) görölmektedir. Ayrıca üst tuf birimi içerisinde gelişmiş yoğun makaslama çatlakları mevcuttur (Ceryan vd. 2013).

### 3.2.1 Kıvrımlı Yapılar

İnceleme alanındaki kıvrımlı yapılar alt boratlı birim içerisinde yoğunlaşmış bulunmaktadır. Bu alışma kapsamında alt boratlı birimi ayırdığımız 6 fasiyes içerisinde özellikle gri kiltası ile gri yeşil kiltası-marn fasiyesi içerisinde kendini

göstermektedir. Bunun yanında alt boratlı birimin neredeyse tamamını etkilediği söylenebilir. Alt boratlı birim içerisindeki slamlı (kayma kıvrımı) yapıların kıvrım eksenini KD-GB doğrultulu olarak geliştirmiştir. Kıvrım kanatlarının eğimi 10-60° arasında çok değişken olduğundan asimetrik karakterlidir. Kıvrımlı yapıların doğrultularına bakıldığında bölgedeki sıkışmanın çoğunlukla KB-GD doğrultusunda geliştiği görülmektedir (Şekil 3.25 ve Şekil 3.26).



Şekil 3.25: Alt boratlı birim içerisinde gelişmiş kayma kıvrımları (slamlar).



Şekil 3.26: Tülü açık ocağında alt boratlı birim içerisinde mevcut kayma kıvrımlarından görünüm.

### 3.2.2 Kırıklı Yapılar

Çalışma alanında görülen kırıklı yapıların başlıcaları çatlaklardır. Bunun yanında tabakalar arası kaymaya neden olan sinsedimanter faylar mevcuttur.

#### 3.2.2.1 Çatlaklar

Çalışma alanında yüzeyleyen kayaçlarda yoğun çatlakların geliştiği görülür. Bu çatlaklı yapılar hemen hemen tüm fasiyeslerde gözlenebilmektedir. Özellikle üst tuf birimini oluşturan zeolitik tuf fasiyesi, bünyesinde çok sayıda çatlak barındırmaktadır (Şekil 3.27).



Şekil 3.27: Zeolitik tuf içerisindeki yoğun makaslama çatlakları.

#### 3.2.2.2 Faylar

İnceleme alanının bulunduğu havzada normal ve doğrultu atımlı birçok sinsedimanter fay bulunmaktadır; fakat inceleme alanı olan Tülü açık ocağı çalışma sınırları içerisinde sadece tabakalar arası kaymaya neden olan normal faylara rastlanmıştır (Şekil 3.28).



**Şekil 3.28:** Tülü açık ocağı batısında, basamak yüksekliği 10 m olan bir şev yüzeyinde görülen sinsedimanter normal fay.

## 4. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

### 4.1 Ayrışma Durumu

Mineraller, dolayısıyla kayaçlar oluştukları ortamda duraylıdır. Jeolojik süreçte erezyon nedeniyle yüzeyleyen veya yürüzüne yakın derinliklerde bulunan kayaçlar atmosferik etkilerle veya hidrotermal eriyikler ile temasları sonucu dengelerini kaybederler, toprağa doğru dönüşürler. Bu dönüşüme ayrışma denilmekte ve kayaçların mühendislik davranışı ayrışma sonucu değişir; tek eksenli basınç dayanımı azalır, kayma dayanımı azalır ve daha kolay deformasyona uğrarlar. Ayrışmış kayaçların taşıma gücü azalmakta, genel olarak geçirimsizliği artmaktadır.

Bu çalışmada tanımlanan jeoteknik birimlerin ayrışma durumu IAEG (1995) çalışmasında verilen niteliksel sınıflandırma (Şekil 4.1) ve Price (1993) tarafından (Ayrışmanın kırıklarda başladığı ve buradan itibaren kaya malzemesine doğru ilerlediği şeklindeki gözlemlerine dayanarak) önerilen puanlama sistemi ile tanımlanmıştır (Tablo 4.1-5).

**Tablo 4.1:** Kaya malzemesinin ayrışma durumuna göre verilen puanlar.

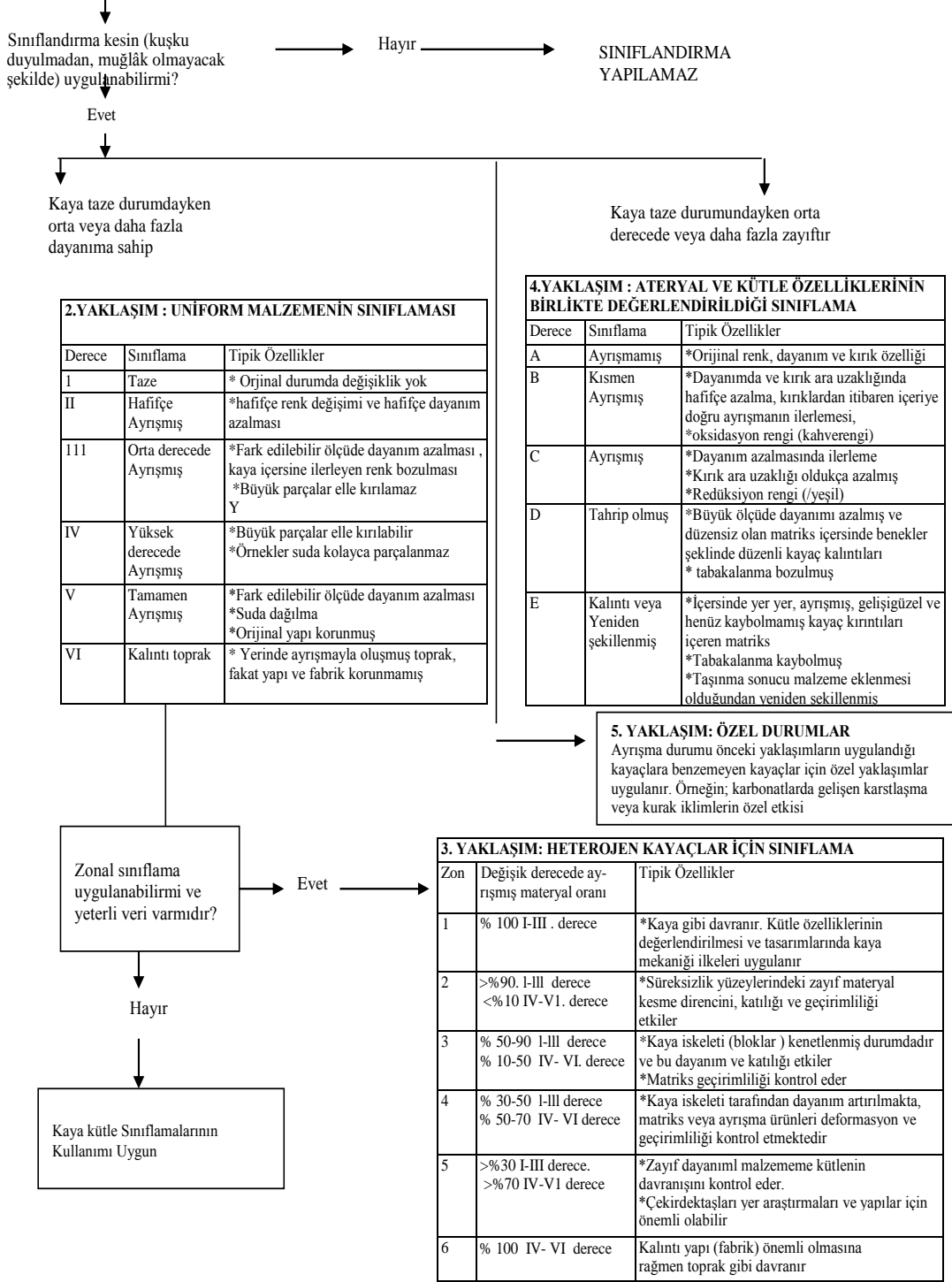
Oran	Taze	Rengi bozulmuş (Dirençte biraz azalma)	Ufalanabilir ve renk bozulması. Farkedilebilir şekilde direnç kaybı, jeoteknik anlamda toprak.	Jeoteknik anlamda topraktaki kalıntı süreksizlik oranı
4/4	20	0	0	-20
3/4	15	5	5	-15
2/4	10	10	10	-10
1/4	5	15	15	-5
0	0	20	20	0

### 1.YAKLAŞIM: AYRIŞMANIN TAM ( TÜM YÖNLERİYLE) TANIMLANMASI

Standart tanımlamalar, her zaman, kaya kütle ve materyalindeki her hangi bir ayrışma etkisinin derecesini, kapsamının (büyüklüğünü) ve karakterini içermelidir. Bu tanımlama daha sonraki aşamada sınıflamanın yapılmasına yeterli olmalı, kaya kütlelerini benzer özellikteki zonlara ayırmak için gerekli verileri sağlamalıdır. Ayrışmanın tipik göstergeleri;

- Renkteki değişim
- Kırık durumundaki değişim
- Dayanımdaki azalma
- Ayrışma ürünlerinin varlığı, miktarı ve özellikleri

Bu özellikler standart terminoloji kullanılarak tanımlanmalı. Ancak standart olmayan terminoloji ile birlikte standart olmayan tanımlayıcılarda kullanılabilir. Kütle ölçeğinde tanımlama yapılırken değişik ayrışma derecesindeki materyallerin dağılımı ve oranları (örneğin matrisin çirkektek taşlarıyla oranı, gibi) kayıt edilmelidir



Şekil 4.1: Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Çalışma Grubu (IAEG) tarafından kaya kütleleri önerilen niteliksel ayrışma sınıflandırılması (IAEG, 1995).

**Tablo 4.2:** Mağmatik kayalarındaki kırıklar ve her tür kayadaki kalıntı süreksizlikler için puanlar.

Oran	Ayrışmamış	Yüzeyi boyanmış	Kaya malzemesi ayrışma derinliği > pürüzlülük	Jeoteknik anlamda topraktaki kalıntı süreksizlik oranı
4/4	20	0	0	-20
3/4	15	5	5	-15
2/4	10	10	10	-10
1/4	5	15	15	-5
0	0	20	20	0

**Tablo 4.3:** Kireçtaşı da dahil tortul ve metamorfik kayalarındaki kırık, tabakalanma ve foliyasyon düzlemleri için puanlama.

Kırık düzlemleri				Tabaka ve foliyasyon düzlemleri		
Oran	Ayrışmamış	Yüzeyi boyanmış veya çözüme ile biçimlendirilmiş	Kaya malzemesi ayrışma derinliği > pürüzlülük veya çözüme ile açılma	Ayrışmamış	Yüzeyi boyanmış veya çözüme ile biçimlendirilmiş	Kaya malzemesi ayrışma derinliği > pürüzlülük veya çözüme ile açılma
4/4	10	0	0	10	0	0
3/4	7	3	3	7	3	3
2/4	5	5	5	5	5	5
1/4	3	7	7	3	7	7
0	0	10	10	0	0	0

**Tablo 4.4:** Kayaların ayrışma durumuna göre mühendislik çalışmalarında karşılaşılabilecek problemler.

Sınıf	Puan ve Tanım	Tortul kayalar	Kireçtaşı
<b>A</b>	Puan: >100 Fiiilen ayrışmamış	Kaya malzemesi ve süreksizlik özelliklerine bağlı olarak mühendislik problemleri, ayrışma etkisi yok	Kaya malzemesi ve süreksizlik özelliklerine bağlı olarak mühendislik problemleri, ayrışma etkisi yok
<b>B</b>	Puan: 100-50 Önemli derecede ayrışmış	Eklem ve tabaka düzlemlerindeki dayanımın azalmasına bağlı olarak şev, tünel ve temellerde problemler	Eklem ve tabaka düzlemlerindeki açılma geçirirliğin ve süreksizlik yüzeyleri dayanım azalmasındaki en önemli parametredir (Yeraltı kazıları için). Patlatmayla yapılan kazılarda problem.
<b>C</b>	Puan: 50-20 Şiddetli derecede ayrışmış	Taşıma gücünde büyük miktarda azalma. Şev duraylılığı kalıntı topraktaki gibi ele alınır. Tüneller için zayıf kaya koşulları.	Kaya kütlelerinde erime boşlukları. Bütün mühendislik çalışmaları için problem. Yersel çökme problemleri.
<b>D2</b>	Puan: 20-0 Kalıntı süreksizlikler içermeyen jeoteknik anlamda toprak	Ayrışmış kaya malzemesi jeoteknik anlamda toprak olarak ele alınmaktadır. Mühendislik problemlerinde zemin parametreleri gibi dizayn edilir.	Kalıntı toprak orijinal kayaktan oldukça farklı, yüksek demir ve kil içerir.
<b>D1</b>	Puan: 0-(-20) Kalıntı süreksizlikler içeren jeoteknik anlamda toprak	Ayrışmış kaya malzemesi jeoteknik anlamda toprak olarak ele alınmaktadır. Mühendislik problemlerinde zemin parametreleri gibi dizayn edilir. Ancak kalıntı süreksizlik şev duraylılığında olumsuzluk oluşturur.	Kristalli kireçtaşlarına uygulama yok. Oldukça yumuşamış (zayıflamış) kalsilüt ve kalsiarenitlerde karbonatlı çamur ile birlikte kalıntı süreksizlikler. Bütün mühendislik çalışmaları için problem.

## 4.2 Jeolojik Dayanım İndeksi

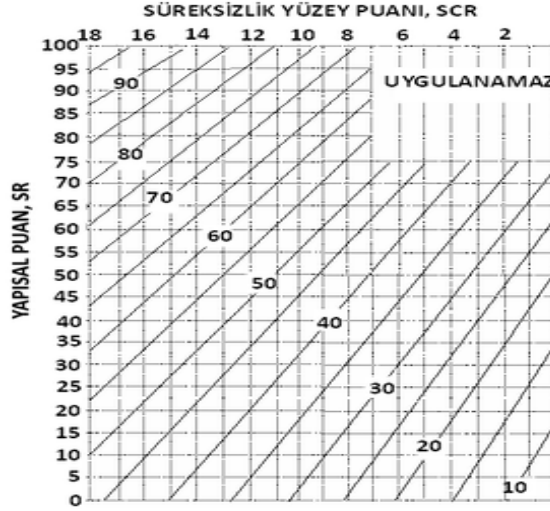
Kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin tahmini için geliştirilen ve ampirik bir bağıntı olan Hoek-Brown (1980) yenilme ölçütünde 1995'e kadar RMR değeri yer almaktaydı. Ancak RMR değerinin 25' ten küçük olduğu zayıf, ayrılmış kaya kütlelerinde yenilme ölçütünün uygulamalarında kaya kütle sabitlerinin bulunmasında sıkıntılar oluşturmuştur. Bu problemi aşmak için Hoek vd. (1995) çalışmasında jeolojik dayanım indeksi' ni (GSI) RMR yerine ikame etmiştir.

**Tablo 4.5:** Tülü ocağındaki jeoteknik birimlerin kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı, kaya kütle özelliği, hacimsel çatlaklılık sayısı, Price (1993) ve IAEG (1995)'e göre ayrışma derecesi.

Jb		$\sigma_{ci}$	RQD	Jv	SCR	SR	GSI	MPn	TPn	SPn	TPn	WDM1	WDM2
1	Zt1	38.21	97.7	8.11	14	43.2	53.5	65	24	24	113	A	F
2	Zt2	34.33	93.8	5.06	16	51.4	64	50	20	24	94	B	SW
3	Zt3	30.66	80.9	11.12	8	37.6	37	40	20	20	80	B	MW
4	Zt4	28.91	77.2	10.49	8	38.7	38	35	20	20	75	B	MW
5	Zt5	38.2	90.4	9.29	16	40.8	58.5	60	20	24	104	A	SW
6	Zt6	32.47	65.5	8.66	16	42	59.5	35	26	20	81	B	MW
7	Ksm1	40.21	86.5	29.35	12	20.7	40.5	65	20	26	111	A	F
8	Ksm2	22.43	19.8	33.81	9	18.2	33	20	10	15	45	C	MW
9	Ksm3	34.33	51.2	21.43	12	26.2	43	40	12	24	76	B	SW
10	Ksm4	13.08	58.2	20.78	9	26.7	36	20	10	10	40	C	HW
11	Gkm1	25.56	67	16.67	12	30.6	44.5	65	12	24	101	A	SW
12	Gkm2	11.95	35.7	29.17	8	20.8	31	20	12	15	47	C	HW
13	Gkm3	16.77	62	24.69	9	23.7	34.5	35	20	16	71	B	MW
14	Gkm4	14.26	65.5	20.57	6	26.9	29	20	12	24	56	B	MW
13B	Gkm5	10.87	54.8	34.45	4	17.9	20	20	10	12	42	C	HW
14	Gkm6	58.22	88.1	17.39	12	29.8	43.5	50	24	24	98	B	SW
15A	Gk1	42.28	95.4	9.68	12	40.1	48	65	24	30	119	A	F
15B	Gk2	34.33	93.6	11.11	14	37.7	52	50	20	16	86	B	SW
15C	Gk3	23.97	81.2	18.75	10	28.5	38	35	12	10	57	B	MW
16a	Gk4	5.49	38	21.31	8	26.3	34	20	12	15	47	C	MW
16B	Gk5	6.26	53.1	15.1	12	32.3	44.5	35	12	15	62	B	SW
16c	Gk6	2.93	34.7	37.5	10	16.4	34.5	20	10	10	40	C	HW
16D	Gk7	7.95	62.3	21.31	8	26.3	34	35	20	26	81	B	SW
17A	Bk1	19.49	66.6	20.24	17	27.2	48.5	50	20	20	90	B	SW
17b	Bk2	25.56	71.7	17.24	14	30	48	65	26	24	115	A	F
17c	Bk3	13.08	46	27.42	10	21.9	36	20	12	15	47	C	MW

Zt: Zeolitik tuf, Ksm: Kilitli siltaşı ard. Gkm: Gri yeşil kilitli marn, Gk: Gri malzemeli kilitli, Bk: Borlu kireçtaşı,  $\sigma_{ci}$ : Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı (MPa), RQD: Kaya kalitesi özelliği (%), Jv: hacimsel çatlaklılık sayısı ( $m^{-3}$ ), SCR: Süreksizlik yüzeyi puanı, SR: Yapısal özellik puanı, MPn: Price (1993) sınıflamasında kaya malzemesi puanı, TPn ve SPn: Price (1993) sınıflamasında tabaka düzlemi ve kırıklar için puan,TPn: toplam puan, WDM1: Price (1993) sınıflamasına göre ayrışma sınıfı, WDM2: IAEG(1995) sınıflamasına göre ayrışma derecesi, F: sağlam, SW: Az ayrılmış, MW: Orta derecede ayrılmış, HW: Yüksek derecede ayrılmış)

İlk zamanlar RMR ve Q sınıflaması puanlarıyla ilişkilendirilen GSI, daha sonra tek başına bir sınıflama sistemi olarak söz konusu yenilme ölçütündeki yerini korumuştur (Ulusay and Sönmez 2002). Bu çalışmada GSI değerini bulmak için Sönmez ve Ulusay, 2002 tarafından önerilen abak kullanılmıştır (Şekil 4.2).



**Şekil 4.2:** Jeolojik dayanım indeksi' nin bulunması için Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından yeniden düzenlenen abak.

Süreksizlik Yüzey Puanı, Tablo 4.6'da verilen süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük, ayrışma ve dolgu durumu puanlarının toplamı olarak bulunmaktadır. Yapısal Özellik Puanı (SR) süreksizlik sıklığının bir ifadesi olup aşağıda hacimsel çatlak sayısına ( $J_v$ ) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Sönmez ve Ulusay 2002).

$$SR = -17.5 \ln(J_v) + 79.8 \quad (4.1)$$

**Tablo 4.6:** Süreksizlik yüzey puanını (SCR) bulmak için gerekli pürüzlülük, ayrışma ve dolgu durumu ile ilgili puanlama.

<b>Pürüzlülük ve puanı (Rr)</b>	Çok pürüzlü 6	Pürüzlü 5	Az pürüzlü 3	Düz 1	Kaygan 0
<b>Ayrışma ve puanı(Rw)</b>	Yok 6	Az ayrışmış 5	Orta derecede ayrışmış 3	Yüksek derecede ayrışmış 1	Tümüyle ayrışmış 0
<b>Dolgu ve puanı (Rf)</b>	Yok 6	Sert <5 mm 4	Sert >5 mm 2	Yumuşak <5 mm 2	Yumuşak >5 mm 0

### 4.3 Kaya Kütle Puanı (RMR Sistemi)

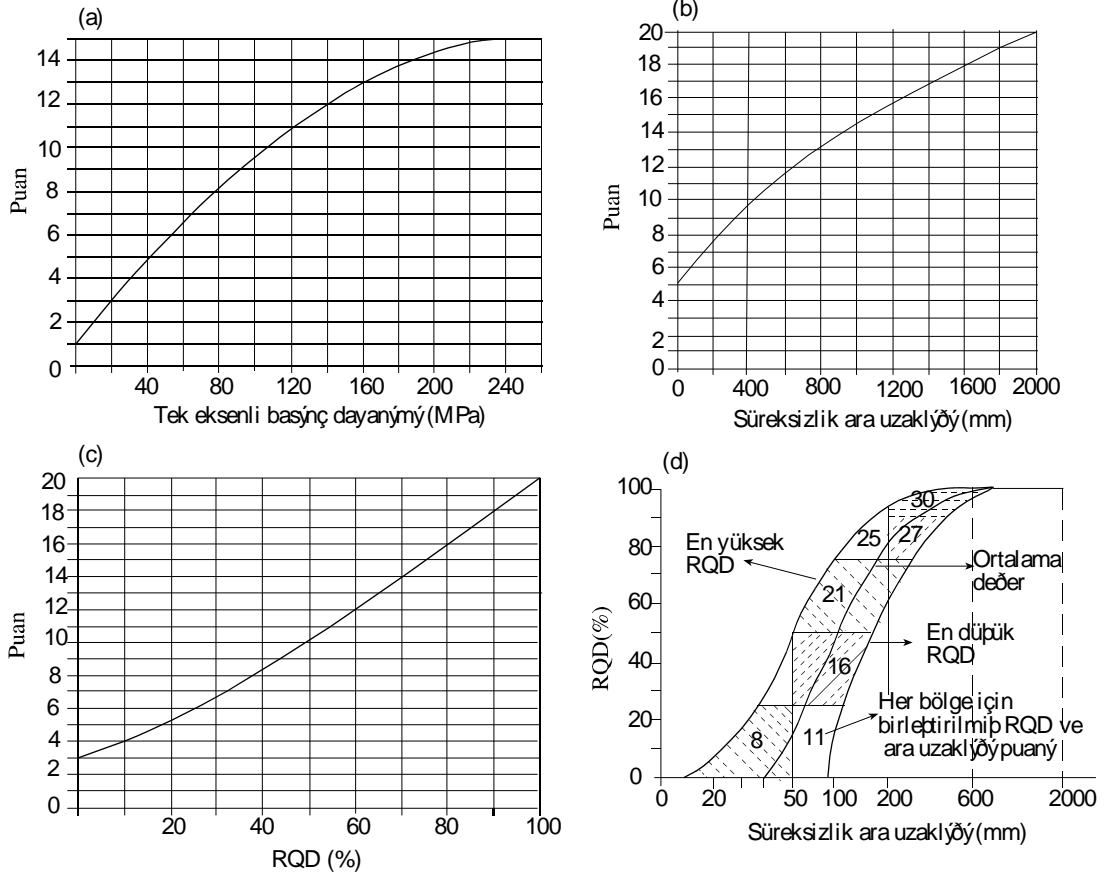
Bieniawski tarafından 1972-1973 arasında önerilmiş olan RMR Sınıflama Sistemi (RMR: Rock Mass Rating), (Bieniawski, 1973) 2014'e kadar yeni verilerle desteklenerek bazı değişikliklere uğramıştır. Bu sisteme göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında aşağıda belirtilen 5 parametre esas alınmaktadır (Tablo 4.7). Bunlar; kayacın tek eksenli basınç dayanımı, RQD, süreksizlik ara uzaklığı, süreksizliklerin durumu (devamlılık, pürüzlülük, dolgu, bozunma, açıklık) ve yeraltı suyu koşuludur. Arazide veya laboratuvarında ölçülen parametre değerlerine göre puanlama (Tablo 4.7), (Tablo 4.8) ve (Şekil 4.3)' e göre yapılmaktadır.

**Tablo 4.7:** RMR kaya kütle sınıflama sisteminde kullanılan parametreler ve puanları (Bieniawski, 1989).

1	Sağlam Kayacın dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	>100 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım		
		Tek eksenli sıkışma dayanımı	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
Puan			15	12	7	4	2	1	0
2	Kayaç kalite göstergesi, RQD		% 90/% 100	% 75-% 90	% 50-% 75	% 25-50	<% 25		
Puan			20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik aralığı		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	600-200 mm	<60 mm		
Puan			20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin durumu		Çok kaba yüzeyler Sürekli değil Ayrılma yok Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma<1mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma<1mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgu..... <5mm veya 1-5 mm açık eklem, süreksizlikler	Yumuşak fay dolgusu >5mm kalınlıkta veya açık eklem >5mm devamlı süreksizlikler		
Puan			30	25	20	10	0		
5	Yer altı suyu	Tünelin 10 m'lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	<25 lt/dk	25-125 lt/dk	>125 lt/dk		
		Oran	Veya		Veya	Veya	Veya		
	Eklemdeki su basıncı	0	0-1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5			
	Ana asal gerilme								
Genel koşullar		Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı			
Puan			15	10	7	4	0		

**Tablo 4.8:** Süreksizliklerin yüzey durumu için puanlanlama (Bieniawsk, 1989).

Parametre	Puanlar				
Süreksizliğin uzunluğu (devamlılık)	<1 m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	>20 m (0)
Süreksizlik açıklığı	Yok (6)	<0,1 mm (4)	0,1-1mm (4)	1-5 mm (1)	>5 mm (0)
Pürüzlülük	Çok pürüzlü (6)	Pürüzlü (5)	Az pürüzlü (3)	Düz (1)	Kaygan (0)
Dolgu	Dolgu	Sert dolgu	Yumuşak dolgu		
	Yok (6)	<5mm (4)	>5mm (2)	<5mm (2)	>5mm (0)
Bozunma	Bozunmamış (6)	Az bozunmuş (5)	Orta derecede bozunmuş (3)	Bozunmuş (1)	Çok bozunmuş (0)



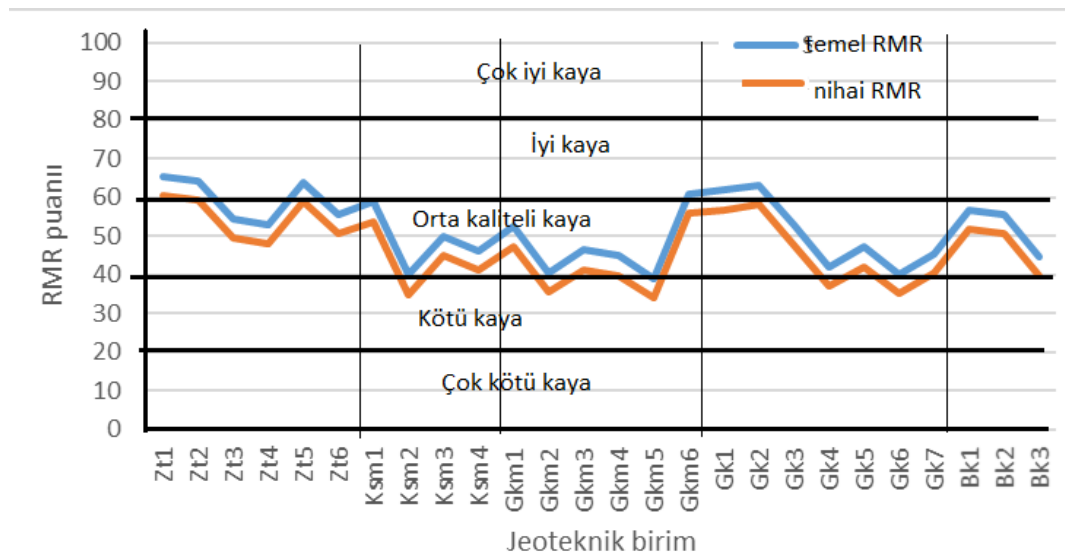
**Şekil 4.3:** a) Tek eksenli basınç dayanımı (Mpa), b) Süreksizlik ara uzaklığı puanı, c) RQD parametrelerine ait puanları bulmak için kullanılan grafikler (Bieniawski, 1989).

İlk 5 parametenin toplanmasıyla elde edilen temel RMR değeri süreksizlik yönelimine göre düzeltilerek nihai RMR elde edilmektedir. Süreksizlik yönelimi için Sing ve Gahroee (1989) tarafından önerilen puanlar dikkate alınmıştır (Tablo 4.8). İncelenen jeoteknik birimler için elde edilen temel RMR ve nihai RMR değerleri Tablo 4.10’ da ve Şekil 4.4’de verilmiştir.

**Tablo 4.9:** Kaya şevleri için önerilen süreksizlik yönelimi düzeltmesi puanları (Singh ve Gahroee, 1989).

Yenilme türleri ve sayısı	Duraysızlık yok	Olası tek duraysızlık modeli	Tek duraysızlık modeli	İki duraysızlık modeli	Çok sayıda duraysızlık modeli
Puan	0	-5	-25	-50	-60

Tablo 4.10’ da bütün jeoteknik birimler için su durumu “kuru” olarak alınmıştır. Arazide jeoteknik birimlerin incelendiği tüm şevlerde olası tek yenilme modeli (düzlemsel kayma, kamasal kayma veya dairesel kaymadan sadece biri) söz konusu olduğundan, jeoteknik birimlerin nihai RMR değerleri (Temel RMR puanı - 5) olarak elde edilmektedir. Şekil 4.4 incelendiğinde; maden ocağında su açısından kötü durum; çatlaklarda suyun olması durumu söz konusu olduğunda zeolitik tüf biriminin ve boşluklu kireçtaşı biriminin “Orta kaliteli kaya”, kıltaşı-silttaşı ard. biriminin, gri yeşil kıltaşı-marn biriminin ve gri malzemeli kıltaşı biriminin “kötü kaya”, sınıfına gireceği görülmektedir.



**Şekil 4.4:** Jeoteknik birimlerin RMR değerleri.

**Tablo 4.10:** Jeoteknik birimlerde ölçülen RMR parametrelerin değerleri ve puanları

Jtb	$\sigma_{ci}$	RQD	Js	JRC	Jr	Jwd.	JL	Jmp	Jap	WCp	RMRtm
Zt1	38,21 (4,8)*	97,7 (19,6)	43 (10,2)	9	Pr2 (3)	Az (5)	13 (1)	6	2 (1)	15	65,6
Zt2	34,33 (4,5)	93,8 (18,7)	25 (8,1)	13	Pr3 (5)	Az (5)	12,5 (1)	6	2 (1)	15	64,3
Zt3	30,66 (4,1)	80,9 (16,1)	12,5 (6,2)	11	Pr2 (3)	Orta(3)	3 (4)	2	3 (1)	15	54,4
Zt4	28,91 (4)	77,2 (15,3)	11,1 (5,7)	13	Pr3 (5)	Yüksek (1)	3 (4)	2	3 (1)	15	53
Zt5	38,20 (4,8)	90,4 (18)	19,2 (7,3)	13	Pr3 (5)	Az (5)	8 (2)	6	2 (1)	15	64,1
Zt6	32,47 (4,3)	65,5 (13)	8,2 (5,4)	13	Pr3 (5)	Az(5)	17 (1)	6	2 (1)	15	55,7
Ksm1	40,21 (5)	86,5 (17,2)	15,6 (6,7)	9	Pr1 (1)	Az (5)	8 (2)	6	1 (1)	15	58,9
Ksm2	22,43 (3,3)	19,8 (5,1)	3,3 (4,6)	10	Pr4 (6)	Yüksek (1)	4 (2)	2	3 (1)	15	40
Ksm3	34,33 (4,5)	51,2 (10,4)	6,1 (5,1)	11	Pr2 (3)	Orta (3)	9 (2)	6	2 (1)	15	50
Ksm4	13,08 (2,3)	58,2 (11,7)	7 (5,2)	17	Pr4 (6)	Yüksek (1)	8 (2)	2	3 (1)	15	46,2
Gkm1	25,56 (3,7)	67 (13,3)	8,5 (5,5)	15	Pr3 (5)	SW (5)	8 (2)	2	3 (1)	15	52,5
Gkm2	11,95 (2,2)	35,7 (7,7)	4,6 (4,8)	15	Pr3 (5)	Yüksek (1)	7 (2)	2	3 (1)	15	40,7
Gkm3	16,77 (2,7)	62 (12,4)	7,6 (5,3)	17	Pr4 (6)	Yüksek (1)	17 (1)	2	2 (1)	15	46,4
Gkm4	14,26 (2,5)	65,5 (13)	8,2 (5,4)	13	Pr2 (3)	Yüksek (1)	9 (2)	2	3 (1)	15	44,9
Gkm5	10,87 (2)	54,8 (11)	6,5 (5,1)	13	Pr2 (3)	Yüksek (1)	4 (2)	0	30 (0)	15	39,1

**Zt:** Zeolitik tüf, **Ksm:** Kilitli silttaşı ard. **Gkm:** Gri yeşil kilitli marn, **Gk:** Gri malzemeli kilitli, **Bk:** Borlu kireçtaşı, **JRC:** Parametre puanı,  $\sigma_{ci}$ : Kaya malzemesi dayanımı (MPa), **Js:** Süreksizlik ara uzaklığı (m), **Jwd:** Süreksizlik yüzeyi bozunma derecesi, **JL:** Devamlılık **Jmp:** Dolgu türü ve kalınlığına göre puanı, **Jap:** Süreksizlik açıklığı, **Jr:** Pürüzlülük, **RMRtm:** Temel RMR değeri **JWtc:** Su durumu, **WCp:** Su durumu puanı.

**Tablo 4.10 devamı:** Jeoteknik birimlerde ölçülen RMR parametrelerin değerleri ve puanları.

Jtb	$\sigma_{ci}$	RQD	Js	JRC	Jr	Jwd.	JL	Jmp	Jap	WCp	Temel RMR
<b>Gkm6</b>	58,22 (6,4)	88,1 (17,5)	16,9 (7)	15	Pr3 (5)	Orta (3)	8 (2)	4	2 (1)	15	60,9
<b>Gk1</b>	42,28 (5,1)	95,4 (19,1)	29,4 (8,7)	11	Pr2 (3)	SW (5)	11 (1)	4	1 (1)	15	61,9
<b>Gk2</b>	34,33 (4,5)	93,6 (18,7)	24,4 (8)	13	Pr3 (5)	Az (5)	7 (2)	4	2 (1)	15	63,2
<b>Gk3</b>	23,97 (3,5)	81,2 (16,1)	12,7 (6,2)	15	Pr3 (5)	Orta (3)	4 (1)	2	3 (1)	15	52,8
<b>Gk4</b>	5,49 (1,3)	38 (8,1)	4,8 (4,8)	11	Pr2 (3)	Orta (3)	3 (4)	2	2 (1)	15	42,2
<b>Gk5</b>	6,26 (1,4)	53,1 (10,7)	6,3 (5,1)	15	Pr3 (5)	Az (5)	4 (2)	2	2 (1)	15	47,2
<b>Gk6</b>	2,93 (0,8)	34,7 (7,5)	4,5 (4,8)	11	Pr2 (3)	Az (5)	15 (1)	2	2 (1)	15	40,1
<b>Gk7</b>	7,95 (1,7)	62,3 (12,4)	7,6 (5,3)	7	Pr1 (1)	Az (5)	8 (2)	2	2 (1)	15	45,4
<b>Bk1</b>	19,49 (3)	66,6 (13,2)	8,4 (5,5)	17	Pr4 (6)	Az (5)	7 (2)	6	2 (1)	15	56,7
<b>Bk2</b>	25,56 (3,7)	71,7 (14,2)	9,5 (5,7)	15	Pr3 (5)	Orta (3)	6 (2)	6	2 (1)	15	55,6
<b>Bk3</b>	13,08 (2,3)	46 (9,5)	5,5 (5)	15	Pr3 (5)	Yüksek (1)	7 (2)	4	2 (1)	15	44,8

**Zt:** Zeolitik tüf, **Ksm:** Kilitli silttaşı ard. **Gkm:** Gri yeşil kilitli marn, **Gk:** Gri malzemeli kilitli, **Bk:** Borlu kireçtaşı, **JRC:** Parametre puanı,  $\sigma_{ci}$ : Kaya malzemesi dayanımı (MPa), **Js:** Süreksizlik ara uzaklığı (m), **Jwd:** Süreksizlik yüzeyi bozunma derecesi, **JL:** Devamlılık **Jmp:** Dolgu türü ve kalınlığına göre puanı, **Jap:** Süreksizlik açıklığı, **Jr:** Pürüzlülük, **RMRtm:** Temel RMR değeri **JWtc:** Su durumu, **WCp:** Su durumu puanı.

İncelenen jeoteknik birimlerin tek eksenli basınç dayanımı  $\sigma_{cm}$  (MPa) ve deformasyon modülünü  $E_m$  (GPa) RMR değerlerine bağlı olarak tahmin etmek için aşağıda verilen görgül bağıntılardan yararlanılmıştır (Eşitlikler (4.2-8), (Şekil 4.5), (Tablo 4.11)). Burada  $\sigma_{ci}$  (MPa) kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımıdır.

$$\sigma_{cm1} \div \sigma_{ci} = \exp.[7.65((RMR-100)/100)] \quad (\text{Yudbir vd. 1983}) \quad (4.2)$$

$$\sigma_{cm2} \div \sigma_{ci} = \exp.[(RMR-100)/24] \quad (\text{Kalamaras ve Bieniawski, 1993}) \quad (4.3)$$

$$\sigma_{cm3} \div \sigma_{ci} = \exp.[(RMR-100)/20] \quad (\text{Sheory, 1997}) \quad (4.4)$$

$$\sigma_{cm4} \div \sigma_{ci} = \left[ \frac{RMR}{RMR+6(100-RMR)} \right] \quad (\text{Aydan ve Dalgıç, 1998}) \quad (4.5)$$

$$\sigma_{cm5} = \sigma_{ci} \exp[(RMR-100)/25] \quad (\text{Ramamurthy, 2004}) \quad (4.6)$$

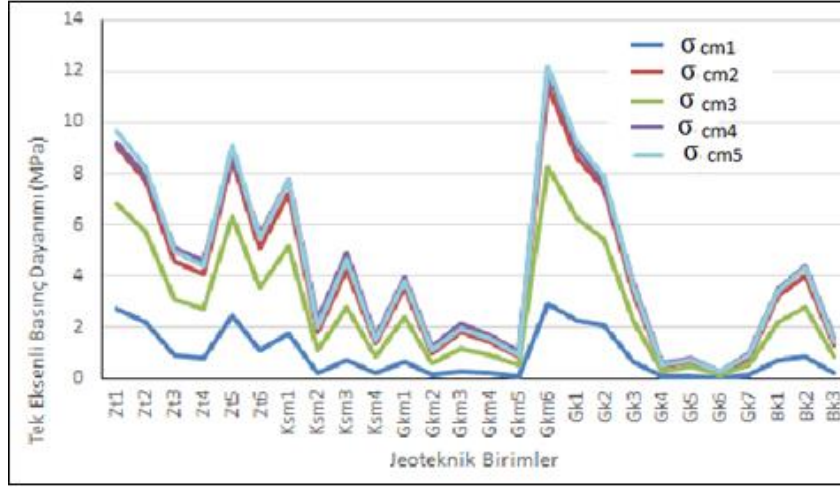
$$E_{m1} = 2RMR - 100 (\text{Gpa}) \quad (RMR > 50 \text{ için}) \quad (\text{Bieniawski, 1978}) \quad (4.7)$$

$$E_{m1} = 10(RMR - 10)/40 (\text{Gpa}) \quad (RMR > 50 \text{ için}) \quad (\text{Sefarim ve Pereira, 1983}) \quad (4.8)$$

**Tablo 4.11:** Jeoteknik birimler için RMR değerlerini esas alan ampirik formüllerle bulunmuş tek eksenli basınç dayanımı ve deformasyon modülü

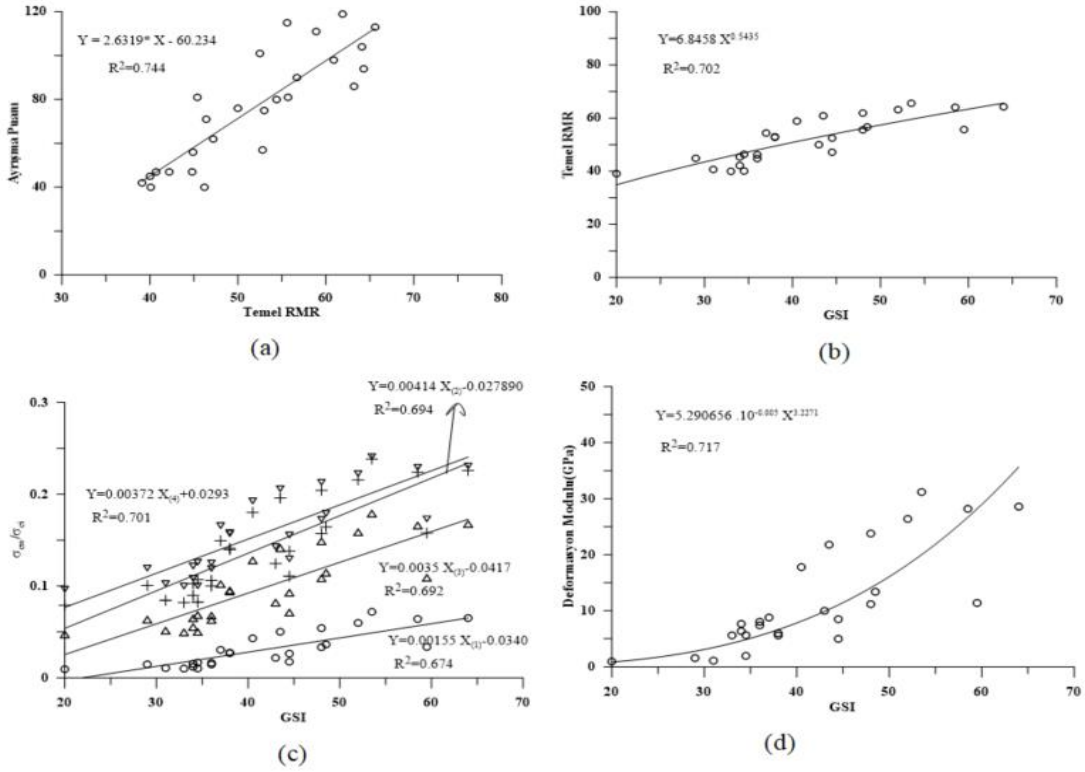
	JTB	RMRt	RMRn	$\sigma_{cm1}$	$\sigma_{ci2}$	$\sigma_{ci3}$	$\sigma_{ci4}$	$\sigma_{ci5}$	$E_{m1}$
1	Zt1	65.6	60.6	2.75	9.114	6.842	9.215	9.651	31.2
2	Zt2	64.3	59.3	2.237	7.756	5.76	7.926	8.232	28.6
3	Zt3	54.4	49.4	0.937	4.586	3.136	5.085	4.948	8.8
4	Zt4	53	48	0.793	4.079	2.757	4.574	4.411	6.0
5	Zt5	64.1	59.1	2.451	8.559	6.346	8.761	9.087	28.2
6	Zt6	55.7	50.7	1.096	5.127	3.544	5.625	5.52	11.4
7	Ksm1	58.9	53.9	1.733	7.254	5.151	7.752	7.769	17.8
8	Ksm2	40	35	0.228	1.841	1.117	2.243	2.035	5.62
9	Ksm3	50	45	0.749	4.275	2.818	4.904	4.646	10.0
10	Ksm4	46.2	41.2	0.213	1.39	0.888	1.638	1.521	8.04
11	Gkm1	52.5	47.5	0.675	3.532	2.377	3.976	3.823	5.00
12	Gkm2	40.7	35.7	0.128	1.01	0.616	1.227	1.115	1.12
13	Gkm3	46.4	41.4	0.278	1.797	1.15	2.114	1.965	1.97
14	Gkm4	44.9	39.9	0.211	1.436	0.907	1.705	1.574	1.57
15	Gkm5	39.1	34.1	0.103	0.859	0.517	1.051	0.951	0.95
16	Gkm6	60.9	55.9	2.924	11.417	8.242	11.999	12.185	21.8
17	Gk1	61.9	56.9	2.293	8.644	6.292	9.009	9.21	23.8
18	Gk2	63.2	58.2	2.056	7.409	5.452	7.64	7.878	26.4
19	Gk3	52.8	47.8	0.648	3.354	2.263	3.767	3.628	5.6
20	Gk4	42.2	37.2	0.066	0.494	0.305	0.596	0.544	6.38
21	Gk5	47.2	42.2	0.11	0.694	0.447	0.812	0.757	8.51
22	Gk6	40.1	35.1	0.03	0.242	0.147	0.294	0.267	5.66
23	Gk7	45.4	40.4	0.122	0.817	0.518	0.968	0.895	7.67
24	Bk1	56.7	51.7	0.71	3.208	2.236	3.492	3.448	13.4
25	Bk2	55.6	50.6	0.856	4.019	2.776	4.413	4.328	11.2
26	Bk3	44.8	39.8	0.192	1.311	0.828	1.558	1.438	7.41

**JTB:** Jeoteknik birim, **Zt:** Zeolitik tüf, **Ksm:** Kilitli silttaşı ard, **Gkm:** Gri yeşil kilitli marn, **Gk:** Gri malzemeli kilitli, **Bk:** Borlu kireçtaşı, **RMRt:** Temel RMR puanı, **RMRn:** Nihai RMR puanı,  $\sigma_{cm}$ : İncelenen jeoteknik birimlerin tek eksenli basınç dayanımı(MPa),  $E_m$ : Deformasyon modülü(MPa),  $\sigma_{ci}$ : Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı,



Şekil 4.5: Jeoteknik birimlerin RMR değerine bağlı olarak 5 farklı eşitlikle bulunan tek eksenli basınç dayanımları.

İncelenen jeoteknik birimler için temel RMR-Ayrışma puanı arasında anlamlı istatistiksel ilişkinin bulunduğu (Şekil 4.6a) ve GSI değeri kullanılarak temel RMR değerinin ve bu RMR değeri esas alınarak bulunan kaya kütleli tek eksenli basınç dayanımı/kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranının ve deformasyon modülü tahmin edileceği belirlenmiştir (Şekil 4.6b-d).



Şekil 4.6: a) Jeoteknik birimler için elde edilen temel RMR-Ayrışma puanı, b) GSI-temel RMR ilişkisi, c) RMR değeri esas alınarak bulunan kaya kütleli tek eksenli basınç dayanımı/kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranının GSI ile değişimi, d) RMR değeri esas alınarak bulunan deformasyon modülünün GSI ile değişimi.

#### 4.4 Kaya Kütle İndeksi (RMi)

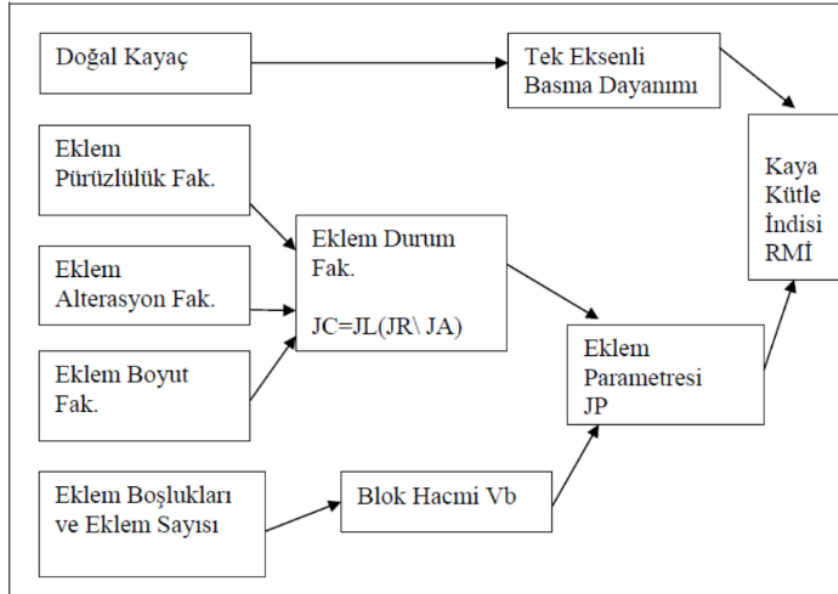
Palmström (1995, 1996) tarafından geliştirilen kaya kütle indeksi “RMi” kaya malzemesi dayanımını ve bu dayanımı azaltan parametreleri esas alarak kaya kütlelerinin dayanımını bulmaya yönelik olarak geliştirilmiştir (Şekil 4.7). RMi esas olarak süreksizlikler tarafından indirgenmiş (azaltılmış) kaya dayanımıdır ve aşağıdaki (4.9) eşitliği ile tanımlanır (Palmström 1996).

$$RMi = \sigma_{ci} JP \quad (4.9)$$

Eşitlikte;

$\sigma_{ci}$  : Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı.

JP : Süreksizlik parametresidir.



Şekil 4.7: RMi değerinin bulunmasının genel akış şeması (Palmström 1995).

JP süreksizlik yüzey durumu ve blok büyüklüğünü (Vb) temsil eden bir azaltma faktörü olup kaya malzemesinde 1, tamamen parçalanmış kaya için 0 değerini alır. Süreksizlik parametresi (JP), blok hacmi (Vb) ve süreksizlik durum faktörüne (JC) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 4.10), (Palmström 1995).

$$JP = 0,2\sqrt{JC} \cdot Vb^D \quad (4.10)$$

Eşitlikte  $D = 0,37JC - 0,2$  olup blok hacmi  $m^3$  olarak verilmiştir. Süreksizlik durumu, pürüzlülük yüzeyinin bozunması ve devamlılığı tarafından belirlenir ve

bloklar arasındaki sürtünmeyi ifade eder. Süreksizlik veya eklem durumu faktörü (JC) aşağıdaki eşitlikteki (4.11) gibi tanımlanmıştır (Palmström).

$$j_C = j_L \left( \frac{j_R}{j_A} \right) = j_L \left( \frac{j_s \cdot j_w}{j_A} \right) \quad (4.11)$$

Eşitlikte;  $j_L$  süreksizliklerin devamlılığını ve büyüklüğünü ifade eden faktördür ve Tablo 4.13'den hesaplanmaktadır. Süreksizlik pürüzlülüğü faktörü  $j_R$  süreksizlik yüzeyinin düzlemsellikten ayrılışını ifade etmektedir ve küçük ölçekteki pürüzlülük faktörü  $j_s$  ile büyük ölçekli pürüzlülük faktörünün  $j_w$  çarpımından elde edilmektedir (Tablo 4.12). Süreksizlik alterasyon faktörü  $j_A$  süreksizlik yüzey malzemesinin dayanımı veya dolgu kalınlığı ve dayanımını ifade etmektedir (Tablo 14). Jeoteknik birimlerin  $R_{Mi}$  değerleri Tablo 4.15' de verilmiştir. Bu değerlere göre sınıflandırılması ve dayanım nitelemesine göre sınıflandırılması verilmiştir (Şekil 4.8).

**Tablo 4.12:** Süreksizlik pürüzlülük faktörü puanlaması.

Küçük ölçekli pürüzlülük ( $j_s$ )	Büyük ölçekli pürüzlülük ( $j_w$ )				
	Düzlemsel	Az dalgalı	Çok dalgalı	Basamaklı	Kenetlenmiş (Büyük ölçüde)
Çok pürüzlü	4	4	6	7,5	9
Pürüzlü	2	3	4	5	6
Az pürüzlü	1,5	2	3	4	4,5
Düz cilalanmış	1- 0,75	1,5 - 1	2 - 1,5	2,5 - 2	3 - 2,5
Kayma izli	0,6 - 1,5	1-2	1,5 - 3	2 - 4	2,5 - 5

**Tablo 4.13:** Süreksizlik devamlılığının puanlaması.

Süreksizlik izi uzunluğu (m)	Tanımlama ve tür		jL puanı	
			Devamlı	Devamsız
<0,1	Çok kısa	Tabakalanma/foliasyon	3	6
0,1 -1	Kısa/Küçük	Çatlak	2	4
1 - 10	Orta	Çatlak	1	2
10 - 30	Uzun/Büyük	Çatlak	0,75	1,5
>30	Çok uzun/Büyük	Dolgulu çatlak/zayıflık zonu	0,5	1

**Tablo 4.14:** Süreksizlik yüzeyi alterasyon puanlaması.

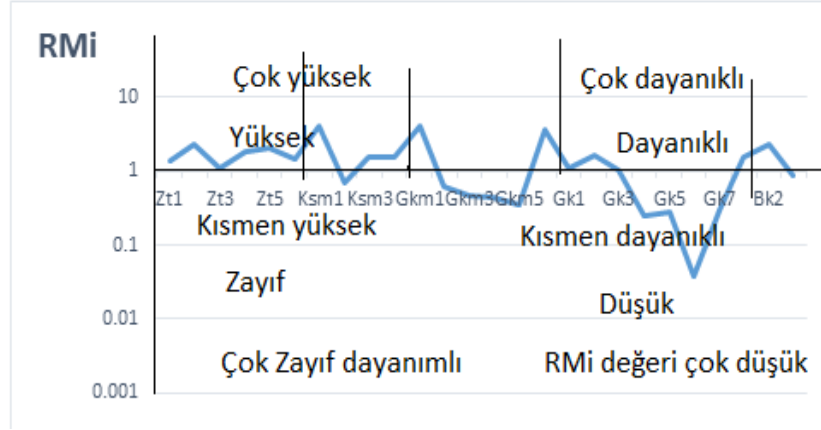
A. Süreksizliğin yüzeyleri arasında temas var		jA	
Yüzey durumu	Tanımlaması		
1. Temiz Süreksizlikler			
a) Sağlamlaştırılmış veya bağlantılı süreksizlikler	Yumuşak değil geçirimsiz dolgu (Kuvars, Epidot vb.)		0,75
b) Taze kaya yüzeyleri süreksizlik yüzeylerinin ayrışması	Süreksizlik yüzeylerinde mineral sıvaması ve dolgu yok, renk bozulması olabilir		1
c) Bir derece daha fazla ayrışmış	Süreksizlik yüzeyleri kayadan bir derece daha fazla ayrışmış		2
d) İki derece daha fazla ayrışmış	Süreksizlik yüzeyleri kayadan bir derece daha fazla ayrışmış		4
2. Mineral sıvamalı veya ince dolgulu süreksizlikler			jA
a) Kum, silt, kalsit vb.	Kohezyonlu malzeme sıvaması		3
b) Kil, klorit, talk vb.	Yumuşak veya kohezyonlu malzeme sıvaması		4
B. Kısmen dolgulu veya yüzeyleri arasında temas olmayan süreksizlikler			
Dolgunun türü	Tanımlama	Kısmen teması olan ince (<5mm) dolgulu yüzey	Temas olmayan kalın dolgulu yüzey
-Kum, silt, kalsit vb.	Kilsiz sürtülmeli materyalli dolgu	4	8
-Sıkıştırılmış kil materyaller	Yumuşayan ve kohezyonlu materyallerin katı (sert) dolgusu	6	10
Yumuşak kil mineralleri	Düşük-orta derecede aşırı konsalide olmuş killer	8	12
Şişen kil mineralleri	Belirgin olarak şişme gösteren dolgu malzemesi	8-12	12-20

**Tablo 4.15:** Jeoteknik birimlerin R<sub>Mi</sub> parametre değerleri, R<sub>Mi</sub> değeri ve R<sub>Mi</sub> ye göre bulunmuş deformasyon modülü.

<b>JTB</b>	<b>jC</b>	<b>Vb</b>	<b>D</b>	<b>JP</b>	<b>R<sub>Mi</sub></b>	<b>E<sub>m2</sub></b>
<b>Zt1</b>	1.5	0.00336	0.341	0.035	1.341	7.871
<b>Zt2</b>	2.25	0.0086	0.315	0.067	2.307	9.779
<b>Zt3</b>	2	0.00149	0.322	0.035	1.066	7.18
<b>Zt4</b>	2	0.01022	0.297	0.065	1.868	8.988
<b>Zt5</b>	3	0.00175	0.297	0.053	2.008	9.252
<b>Zt6</b>	3	0.00103	0.297	0.045	1.458	8.14
<b>Ksm1</b>	6	0.00239	0.259	0.103	4.136	12.352
<b>Ksm2</b>	3	0.00031	0.297	0.031	0.705	6.087
<b>Ksm3</b>	4	0.00041	0.28	0.045	1.541	8.323
<b>Ksm4</b>	12	0.00039	0.225	0.118	1.548	8.338
<b>Gkm1</b>	15	0.00057	0.215	0.155	3.965	12.145
<b>Gkm2</b>	6	0.00017	0.259	0.052	0.621	5.784
<b>Gkm3</b>	3	0.0002	0.297	0.028	0.463	5.144
<b>Gkm4</b>	3	0.00027	0.297	0.03	0.43	4.996
<b>Gkm5</b>	4	0.00012	0.28	0.032	0.346	4.578
<b>Gkm6</b>	6	0.00038	0.259	0.064	3.722	11.842
<b>Gk1</b>	1.5	0.0015	0.341	0.027	1.127	7.342
<b>Gk2</b>	3	0.00125	0.297	0.048	1.633	8.517
<b>Gk3</b>	4	0.00039	0.28	0.044	1.061	7.169
<b>Gk4</b>	3	0.00114	0.297	0.046	0.254	4.047
<b>Gk5</b>	3	0.00092	0.297	0.043	0.272	4.158
<b>Gk6</b>	1.5	0.0002	0.341	0.013	0.039	1.917
<b>Gk7</b>	3	0.0005	0.297	0.036	0.288	4.255
<b>Bk1</b>	8	0.00033	0.244	0.08	1.558	8.358
<b>Bk2</b>	8	0.00056	0.244	0.091	2.325	9.809
<b>Bk3</b>	8	0.00015	0.244	0.066	0.862	6.598

**JTB:** Jeoteknik birim, **Zt:** Zeolitik tuf, **Ksm:** Kıltaşı silttaşı ard. **Gkm:** Gri yeşil kıltaşı marn, **Gk:** Gri malzemeli kıltaşı, **Bk:** Borlu kireçtaşı, **R<sub>Mi</sub>(0σ<sub>cm6</sub>), MPa):** Kaya kütle indeksi =kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı, **JP:** Süreksizlik parametresidir, **Vb (m<sup>3</sup>):** Blok boyutu, **jC:** süreksizlik durum faktörü, **E<sub>m2</sub>:** Kaya kütlesi deformasyon modülü (GPa)

İncelenen jeoteknik birimler için R<sub>Mi</sub> değerlerinin temel RMR, GSI ve ayrışma puanı ile değişimi incelenmiş, ancak bu değişimleri ifade edecek anlamlı istatistiksel bir bağıntı bulunamamıştır.



Şekil 4.8: Jeoteknik birimlerin R<sub>Mi</sub> değerlerine göre sınıflandırılması ve bu değere göre dayanımlarının nitelenmesi.

#### 4.5 Q Sınıflama Sistemi

Q veya NGI (Norveç jeoteknik Enstitüsü) sistemi olarak bilinen sistem Barton vd. (1974) tarafından yeraltı madenciliği için geliştirilmiştir. Bu sistemde RQD, eklem (süreksizlik) takım sayısı, süreksizlik yüzeyi pürüzlülüğü ve alterasyonu, kazı yüzeyinden su geliri veya basıncı, doğal gerilme (kaya türüne bağlı olarak gelişebilecek deformasyon) durumu arazide ölçülerek veya gözlemlenerek sayısal hale getirilir ve aşağıda verilen (4.12) eşitliğinden Q değeri elde edilmektedir.

$$Q=(RQD/J_n)(J_r/J_a)(J_w/SRF) \quad (4.12)$$

Eşitlikte; **RQD** kaya kalite özelliğidir, **J<sub>n</sub>** eklem takım sayısıdır, **J<sub>r</sub>** eklem pürüzlülük sayısıdır, **J<sub>a</sub>** eklem alterasyon sayısıdır, **J<sub>w</sub>** eklem su azaltma sayısıdır, **SRF** ise gerilme azaltma faktörünü ifade etmektedir.

İlk terimin (RQD/J<sub>n</sub>) kaya bloklarının büyüklüğünü, ikinci terimin (J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>) kaya bloklarının kenetlenmesini ve sürtünme açısını, son terimin (J<sub>w</sub>/SRF) ise etkin (efektif) gerilmeyi ifade ettiği düşünülmüştür.

Q sisteminde **RQD**, **J<sub>n</sub>**, **J<sub>a</sub>** için puanlama Tablo (4.16)'da, **J<sub>w</sub>** ile **SRF** için puanlama Tablo (4.17)'de, **J<sub>r</sub>** için puanlama ise Tablo (4.18)'de verilmiştir.

**Tablo 4.16:** Q sisteminde RQD, Eklem takım sayısı ve Eklem alterasyon sayısı için puanlama (Barton 2002).

<b>Kaya Kalite Tanımı (RQD)</b>				
	<b>Tanım</b>	<b>Değerlendirme</b>		<b>Not</b>
A	Çok kötü	0-25		*Q hesaplanırken RQD <10 ise (0 dahil) 10 alınır. *RQD 5 ve katları olarak alınır.
B	Kötü	26-50		
C	Orta	51-75		
D	İyi	76-90		
E	Mükemmel	91-100		
<b>Eklem Takım Sayısı (Jn)</b>				
	<b>Tanım</b>	<b>Değerlendirme</b>		<b>Not</b>
A	Masif, eklem çok az veya hiç yok	05-1		*Kesişme yerlerinde(3*Jn) *Giriş ve çıkışlarda ağızlarında (2*Jn) kullanılmaktadır.
B	Bir eklem takımı	2		
C	Bir eklem takımı ve geliş güzel eklemeler	3		
D	İki eklem takımı	4		
E	İki eklem takımı ve geliş güzel takımlar	6		
F	Üç eklem takımı	9		
G	Üç eklem takımı ve geliş güzel eklemeler	12		
H	Dört veya daha fazla eklem takımı, geliş güzel çok sayıda eklemeler, Küp şeker görünümünde	15		
J	Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20		
<b>Eklem Alterasyon sayısı (Ja)</b>				
	<b>Tanım</b>	<b>Değerlendirme</b>		<b>Not</b>
<b>a)Kaya duvar kontağı</b>		<b>Değer</b>	<b>φr</b>	φr değerleri, eğer varsa alterasyon ürünlerinin mineralojik özelliklerini yaklaşık olarak göstermek için verilmiştir.
A	Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz, geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars, epidot)	0,75	-	
B	Altere olmamış eklem yüzeyleri, sadece yüzeysel paslanım	1	25 ° - 35 °	
C	Hafif altre olmuş eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları	2	25 ° - 35 °	
D	Siltli veya kumlu kil kaplamaları, düşük kil oranı(yumuşamayan)	3	20 ° - 25 °	
E	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplamalı (kaolinit,mika gibi) Ayrıca klorit, talk, jips, grafit ve az miktarda şişen killer (1-2 mm veya daha az kesikli kaplamalar)	4	8 ° - 16 °	
F	Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları	4	25 ° - 30 °	
G	Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil mineral dolguları(kesiksiz kalınlık 5 mm'den az)	6	16 ° - 24 °	
H	Orta ve yüksek derecede konsolide olmuş, yumuşamayan	8	12 ° - 16 °	
J	Ja'nın değeri şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve su etkisinde kalıp kalmayacağına göre değişir	8-12	6 ° - 12 °	
<b>b)Kaya duvar kontağı yok</b>		<b>Değer</b>		
K	Dağılmış veya ezilmiş kaya ve kil zonları veya bantları	6-8 veya 8-12	6 ° - 24 °	
L	Siltli veya kumlu kil zonları veya bantları, küçük kil parçaları(yumuşamayan)	5	-	
M	Sürekli, kalın kil zonları veya bantları (kilin tanımı için G, H, J şıklarına bakınız)	10,13 veya 13-20	6 ° - 24 °	

**Tablo 4.17:** Q sisteminde Su azaltma faktörü ve Gerilme azaltma faktörü için puanlama (Barton 2002).

<b>Eklem suyu indirgeme faktörü (Jw)</b>					
	Tanım	Değerlendirme		Not	
		Değer	Su basıncı kg/ cm <sup>2</sup>		
A	Kuru kazılarda veya su gelişi 5 lt/dk dan az	1	<1.0	*Q hesaplanırken RQD <10 ise (0 dahil) 10 alınır. *RQD 5 ve katları olarak alınır.	
B	Orta derece su gelişi veya basıncı, genellikle eklem dolgularının yıkanması (5lt/dk yerel)	0.66	1-2.5		
C	Dolgunsuz, dayanımlı ve eklemli kayada çok su gelişi veya yüksek su basıncı	0.5	2.5-10.0		
D	Çok miktarda su gelişi veya yüksek su basıncı ile eklem dolgularının fazlaca yıkanması	0.33	2.5-10.0		
E	Patlatma ile çok fazla su gelişi, zamanla azalma	0.2-0.1	>10.0		
F	Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya basıncı	0.1-0.05	>10.0		
<b>Eklem indirgeme faktörü (SRF)</b>					
Tanım			Değerlendirme	Not	
<b>a) Kazıyı kesen ve tünel kazılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek zayıflık zonları</b>					
A	Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan birden fazla zayıflık zonu, çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)	10.0		*Kesişme yerlerinde (3*Jn) *Giriş ve çıkışlarda ağızlarında (2*Jn) kullanılmaktadır	
B	Kil ve kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazi derinliği <50m)	5.0			
C	Kil ve kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazi derinliği <50m)	2.5			
D	Sağlam kayadan çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)	7.5			
E	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre (kazi derinliği <50)	5.0			
F	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre (kazi derinliği >50m)	2.5			
G	Gevşek, açık eklem, çok fazla eklemli veya küp şekeri görünümlü (herhangi bir derinlikte)	5.0			
<b>b) Sağlam kaya, kaya gerilme problem</b>		$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_t / \sigma_1$		
H	Yüzeğe yakın düşük gerilme	>200	>13	2.5	
J	Orta gerilme	200-10	13-0.66	1.0	
K	Yüksek gerilme (çok sıkı yapı)	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0	
L	Orta şid. (masif) kaya patlaması	5-2.5	0.33-0.16	5-10	
M	Yüksek şid. (masif) kaya patlaması	<2.5	<0.16	10-20	
<b>c) Sıkışan kaya, yüksek basınç altında sağlam olmayan kayanın plastik akışı</b>					
N	Orta miktarda sıkışan kaya basıncı	5-10		*Kazi derinliğinin kazi genişliğinden az olduğu durumlarda SRF yi 2.5 ten 5 e çıkartınız.	
O	Yüksek miktarda sıkışan kaya basıncı	10-20			
<b>d) Şişen kaya; Suyun varlığına bağlı kimyasal şişme</b>					
P	Orta miktarda şişen kaya basıncı				
R	Yüksek miktarda şişen kaya basıncı				

**Tablo 4.18:** Q sisteminde eklem pürüzlülük sayısı (Js) için puanlama (Barton 2002).

<b>a) Süreksizlik –kaya dokanağı ve (b) 10 cm’lik bir makaslamadan önceki süreksizlik-kaya dokanağı</b>	
A) Süreksiz eklemeler	4
B) Pürüzlü veya düzensiz, dalgali	3
C) Düz, dalgali	2
D) Kaygan, dalgali	1.5
E) Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5
F) Düz, düzlemsel	1.0
G) Kaygan, düzlemsel	0.5
Not: Bu sıralamada tanımlamalar küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.	
<b>b) Makaslanmış kesimde süreksizlik-kaya dokanağı yok</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 yada parçalanmış zon	1.0

Q sisteminden yararlanılarak kaya kütleleri sınıflandırılmakta ve yeraltı kazılarının en geniş desteksiz kalabileceği açıklığı, destek türü, tavan destek basıncı, ankraj ve bulon aralık ve uzunlukları bulunabilmekte ayrıca kaya kütlelerinin mühendislik davranışı tahmin edilebilmektedir (Ulusay ve Sönmez 2002). İncelenen jeoteknik birimler için bulunan Q sistemi parameter değerleri, Q değeri ve aşağıda verilen görgül bağıntılarla bulunan tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_m$ ), deformasyon modülü ( $E_m$ ) ve kayma dayanımı parametreleri; ( $c_m$ ) kohezyon, ( $\phi_m$ ) sürtünme açısı Tablo 4.19’ da verilmiştir.

$$\sigma_{m7} = 7\gamma(Q\sigma_{ci} 0.001)^{\frac{1}{3}} \text{ Sing vd. (1997)} \quad (4.13)$$

$$\sigma_{m8} = 5\gamma Qc^{\frac{1}{3}} \text{ Barton (2002)} \quad (4.14)$$

$$\sigma_{m9} = (\sigma_{ci}/100)0.7\gamma Q^{\frac{1}{3}} \text{ Bhasin ve Grimstaad (1996)} \quad (4.15)$$

$$c_{m1} = (RQD/Js)(1/SRF)(\sigma_{ci}/100) \text{ ve } \phi_{m1} = \tan^{-1}(J_r J_w/J_a) \text{ Barton (2002)} \quad (4.16)$$

$$\sigma_{m10}=2c_m(NQ)^{0.5} \quad NQ=\tan^2(45+\phi_m/2) \quad (\text{Mohr-Cloumb kriteri}) \quad (4.17)$$

$$E_{m3}=10Q_c^{\frac{1}{3}} \quad \text{Barton (2002)} \quad (4.18)$$

$$Q_c=(\sigma_{ci} \div 100) \quad Q \quad \text{Barton (2002)} \quad (4.19)$$

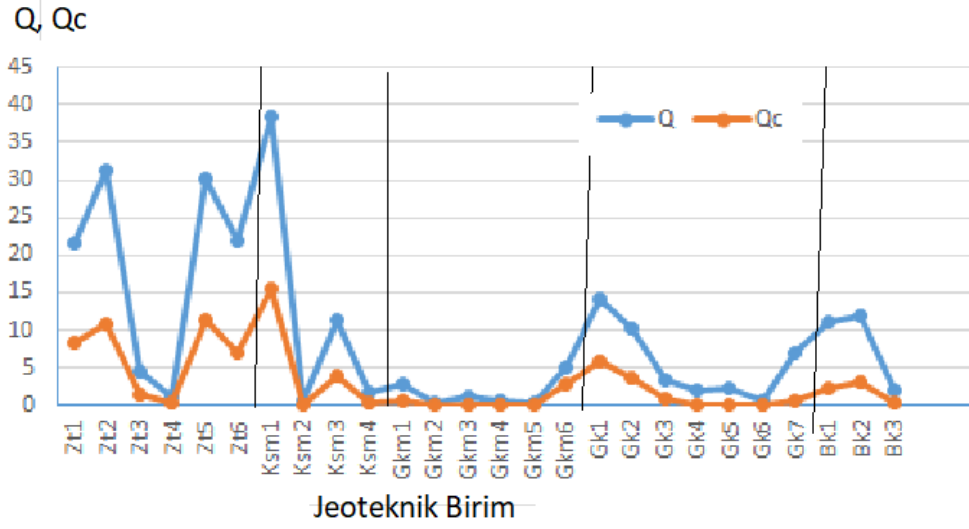
$\sigma_{ci}$  (MPa) burada kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımıdır.

Q değerine bağlı olarak Eşitlik (4.16)' dan bulunan kaya kütlesi kohezyon ( $c_m$ ) ve sürtünme açısı ( $\phi_m$ ) değerleri; çok yüksek kaya malzemesinin f değerlerine benzer çıkmakta, benzer şekilde  $c_{m1}$  ve  $\phi_{m1}$  değerlerinden bulunan kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı da ( $\sigma_{m10}$ ) diğer bağıntılardan bulunan değerlere göre çok yüksek çıkmaktadır (Şekil 4.10), (Şekil 4.12).

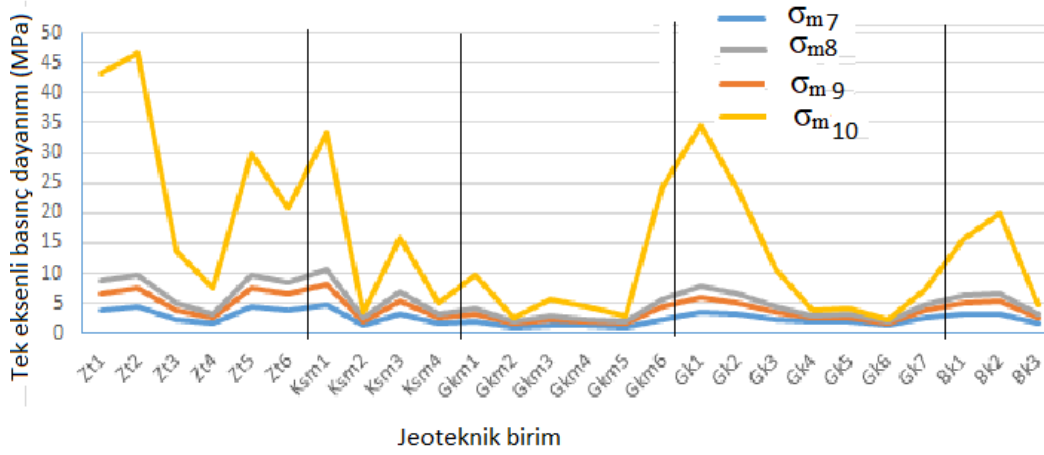
**Tablo 4.19:** Jeoteknik birimlerin Q sınıflama sistemine göre parametre değerleri ve Q değerine göre bulunmuş dayanım ve deformasyon özellikleri.

JTB	RQD	J <sub>n</sub>	J <sub>r</sub>	J <sub>r</sub> /J <sub>a</sub>	Q	Q <sub>c</sub>	$\sigma_{m7}$	$\sigma_{m8}$	$\sigma_{m9}$	$\phi_m$	$c_m$	$\sigma_{m10}$	$E_{m3}$
Zt1	97.7	9	2	2	21.7	8.30	3.906	2.834	2.024	63	4.15	34.57	20.244
Zt2	93.8	9	3	3	31.3	10.73	4.411	3.088	2.206	68	3.577	36.8	22.059
Zt3	80.9	9	2	0.5	4.5	1.38	2.31	1.558	1.113	26.5	2.757	8.91	11.128
Zt4	77.2	12	1.5	0.19	1.2	0.35	1.49	0.985	0.704	10.7	1.859	4.49	7.039
Zt5	90.4	9	3	3	30.1	11.51	4.357	3.161	2.258	48	3.835	19.98	22.579
Zt6	65.5	9	3	3	21.8	7.09	3.913	2.689	1.921	48	2.364	12.32	19.21
Ksm1	86.5	9	3	4	38.4	15.46	4.725	3.488	2.491	52	3.864	22.44	24.911
Ksm2	19.8	12	3	0.38	0.6	0.14	1.193	0.725	0.518	20.8	0.37	1.07	5.177
Ksm3	51.2	9	2	2	11.4	3.91	3.149	2.205	1.575	43	1.953	8.98	15.749
Ksm4	58.2	12	3	0.38	1.8	0.24	1.709	0.867	0.62	20.8	0.634	1.84	6.196
Gkm1	67	9	3	0.38	2.8	0.71	1.971	1.251	0.894	20.8	1.902	5.51	8.936
Gkm2	35.7	12	1.5	0.13	0.4	0.04	1.007	0.496	0.354	7.5	0.356	0.81	3.542
Gkm3	62	9	2	0.17	1.1	0.19	1.466	0.808	0.577	9.6	1.156	2.74	5.774
Gkm4	65.5	9	1	0.08	0.6	0.09	1.185	0.619	0.442	4.5	1.038	2.25	4.422
Gkm5	54.8	12	1.5	0.08	0.4	0.04	1.015	0.484	0.346	4.5	0.497	1.08	3.458
Gkm6	88.1	9	1.5	0.5	4.9	2.85	2.377	1.985	1.418	26.5	5.7	18.42	14.177
Gk1	95.4	9	1	1.33	14.1	5.98	3.385	2.541	1.815	53	4.482	26.79	18.147
Gk2	93.6	9	1	1	10.4	3.57	3.056	2.14	1.528	45	3.57	17.24	15.284
Gk3	81.2	9	1.5	0.38	3.4	0.81	2.102	1.306	0.933	21	2.162	6.29	9.325
Gk4	38	9	2	0.5	2.1	0.12	1.796	0.683	0.488	26.5	0.232	0.75	4.876
Gk5	53.1	12	2	0.5	2.2	0.14	1.824	0.724	0.517	26.5	0.277	0.9	5.174
Gk6	34.7	12	2	0.25	0.7	0.02	1.256	0.387	0.277	14	0.085	0.22	2.767
Gk7	62.3	9	2	1	6.9	0.55	2.668	1.147	0.819	45	0.55	2.66	8.195
Bk1	66.6	9	3	1.5	11.1	2.16	3.123	1.811	1.293	56	1.443	9.44	12.933
Bk2	71.7	9	1.5	1.5	12	3.05	3.201	2.031	1.451	56	2.037	13.33	14.509
Bk3	46	12	1.5	0.5	1.9	0.25	1.739	0.883	0.631	26.5	0.501	1.62	6.305

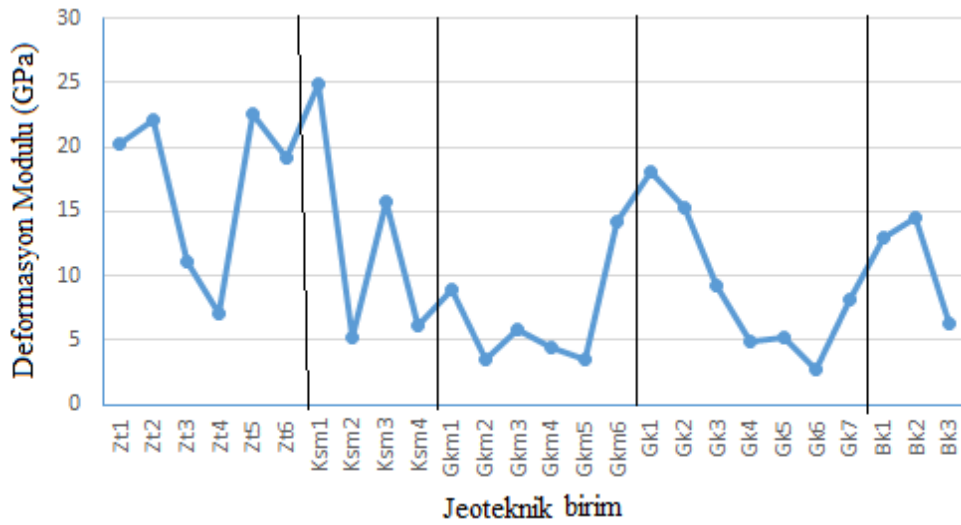
**JTB:** Jeoteknik birim, **Zt:** Zeolitik tuf, **Ksm:** Kıltaşı siltaşı ard. **Gkm:** Gri yeşil kıltaşı marn, **Gk:** Gri malzemeli kıltaşı, **Bk:** Borlu kireçtaşı.  $\sigma_m$ : Kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı (MPa),  $E_{m3}$ : deformasyon modülü (GPa),  $c_m$ : kohezyon (MPa),  $\phi_m$ : sürtünme açısı (derece), ( $J_w=1$  ve  $SRF=1$  dir)



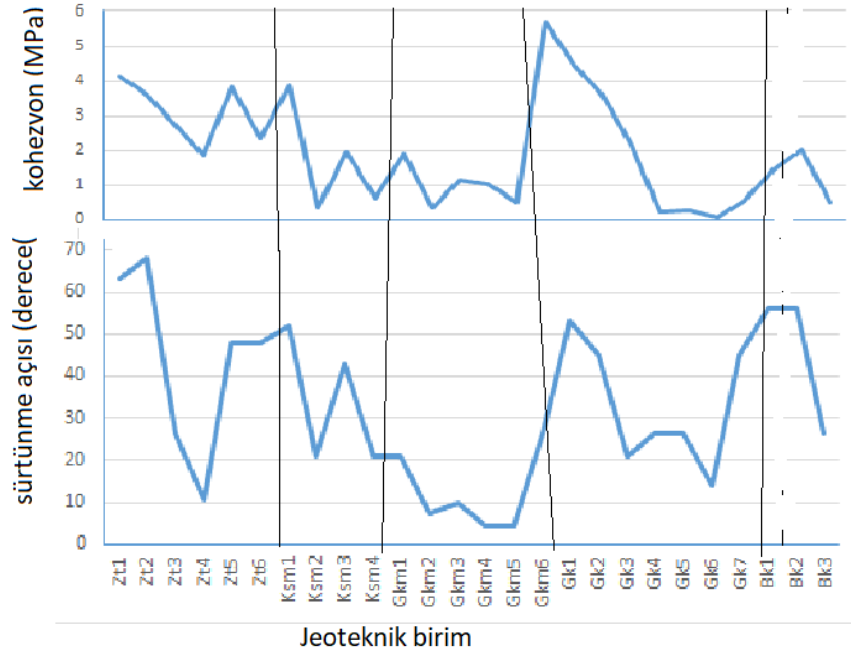
Şekil 4.9: Jeoteknik birimlerin Q ve Qc değerleri.



Şekil 4.10: Jeoteknik birimlerin Q ve Qc değerlerine bağlı olarak hesaplanan tek eksenli basınç dayanımı.

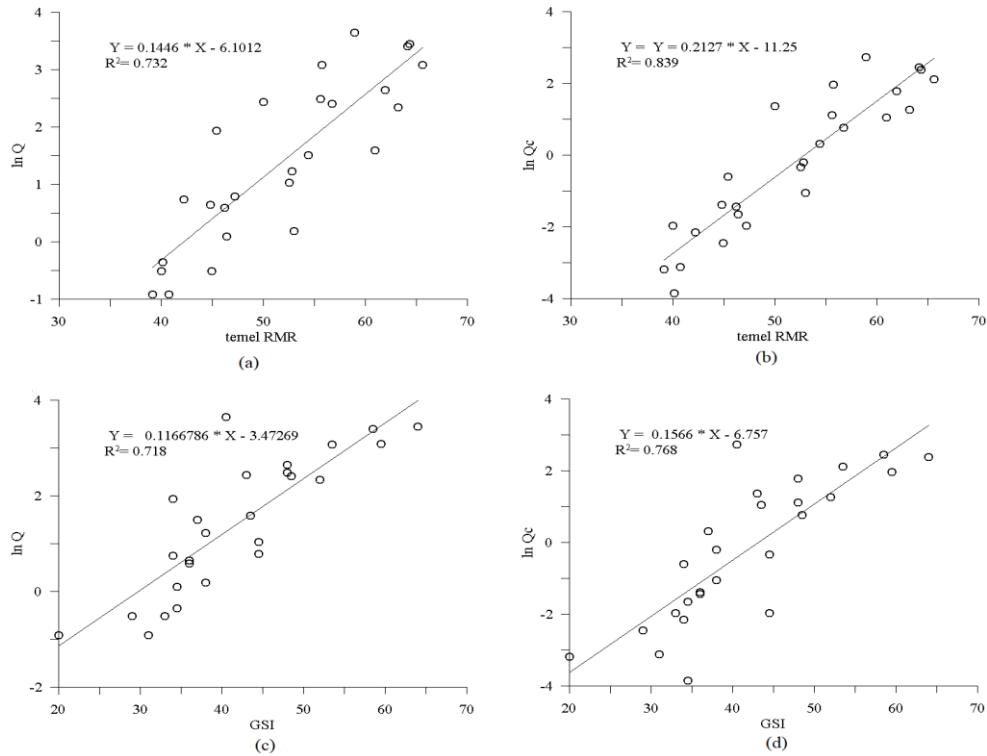


Şekil 4.11: Jeoteknik birimlerin Q ve Qc değerlerine bağlı olarak hesaplanan deformasyon modülü.



Şekil 4.12: Jeoteknik birimlerin Q ve Q<sub>c</sub> değerlerine bağlı olarak hesaplanan sürtünme açısı ve kohezyon değerleri.

İncelenen jeoteknik birimlerin Q ve Q<sub>c</sub> değerlerinin temel RMR ve GIS değerlerinden itibaren tahmin edilemeyeceği araştırılmıştır (Şekil 4.13). Bu araştırma sonunda GIS ile Q ve Q<sub>c</sub> değerleri arasında ve temel RMR değeri ile Q ve Q<sub>c</sub> değerleri arasında anlamlı istatistiksel bağıntılar bulunmuştur.



Şekil 4.13: Temel RMR değeri ile Q ve Q<sub>c</sub> değerleri (aib) ve GSI ile Q ve Q<sub>c</sub> değerleri arasındaki ilişki.

#### 4.6 SSPC Sistemi

Bu jeoteknik çalışmada incelenen jeoteknik birimlerin kayma dayanımı parametrelerini ve serbest basınç dayanımını tahmin etmek için kullanılan yöntemlerden biri de SSPC yöntemidir. SSPC (şev duraylılığı olasılık tanımlama) sistemi Hack (1997, 1998) tarafından kaya kütlelerinin sınıflandırılması ve kaya kütlelerinde açılan veya açılacak kazı şevlerindeki yenilme olasılığının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

SSPC sistemi aşağıda verilen 3 ana özelliğe sahiptir;

- 1) Şev duraylılık olasılığı 3 adımda hesaplanır.
- 2) Tek bir puan vermek yerine farklı yenilme mekanizmalarının meydana gelme olasılığını belirtmek yoluyla duraylılık değerlendirmesi yapılır.
- 3) Arazide basit ve belirli veri toplanır.

SSPC sistemi ile 2 sonuç üretilir;

- 1) Kaya kütlelerinin dayanım özellikleri; kohezyonu, sürtünme açısı ve dayanımı.
- 2) Şev duraylılığının (süreksizliklerin yönelimine bağlı olan ve bağlı olmadan gelişebilecek yenilmelerinin) olasılık olarak tanımlanmasıdır (Hack vd. 2003).

SSPC sisteminde kaya kütle dayanım özelliklerini veren aşağıdaki eşitlikler Mohr-Coloumb kırılma kriteri esas alınarak oluşturulmuştur (Hack vd. 2003).

$$\phi'_m = 0,2417\sigma_{ci} + 52,12SPA + 5,779CD \quad (4.20)$$

$$c'_m = 94,27\sigma_{ci} + 28629 SPA + 3593 CD \quad (4.21)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;  $\phi'_m$ : kaya kütleleri içsel sürtünme açısı,  $c'_m$ : kaya kütleleri kohezyonu,  $\sigma_{ci}$ : kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı, SPA: süreklilik ara uzaklığı faktörü, CD: süreksizlik durumudur.

$$SPA = \text{Faktör1} \times \text{Faktör2} \times \text{Faktör3} \quad (4.22)$$

$$\text{Faktör1} = 0,30 + 0,259 \times \log 10 \text{ (en küçük ara uzaklık)} \quad (4.23)$$

$$\text{Faktör2} = 0,20 + 0,296 \times \log 10 \text{ (orta büyüklükteki ara uzaklık)} \quad (4.24)$$

$$\text{Faktör } 3=0,10+0,333 \times \log_{10} (\text{en büyük ara uzaklık}) \quad (4.25)$$

Kaya kütlesi için tanımlanan süreksizlik durumu (*CD*) her bir süreksizlik için tanımlanan süreksizlik ara uzaklığına (*JS*) ve süreksizlik koşul faktörüne bağlı olarak (4.26) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$CD = \frac{\frac{TC_1}{JS_1} + \frac{TC_2}{JS_2} + \frac{TC_3}{JS_3}}{\frac{1}{JS_1} + \frac{1}{JS_2} + \frac{1}{JS_3}} \quad (4.26)$$

Süreksizlik koşul faktörü (*TC*) küçük ölçekli pürüzlülüğü, büyük ölçekli pürüzlülüğü, dolgu durumu ve yüzeyde karstlaşma (erime boşluklarının) olup olmadığı dikkate alınarak yapılan puanlamaya göre hesaplanmaktadır (Tablo 4.20).

$$TC = R_l \times R_s \times I_m \times K_d \quad (4.27)$$

Eşitlikte; **R<sub>l</sub>**: Büyük ölçekli pürüzlülüğü, **R<sub>s</sub>**: Küçük ölçekli pürüzlülük, **I<sub>m</sub>**: Dolgu malzemesi türü, **K<sub>d</sub>**: Yüzeydeki erime boşluğu varlığı/yokluğu' dur.

**Tablo 4.20:** Süreksizlik koşul faktörü (*TC*) için, büyük ölçekli pürüzlülük, küçük ölçekli pürüzlülük, dolgu malzemesi türü ve yüzeydeki erime boşluğu varlığı/yokluğu ile ilgili puanlama (Hack vd. 2003).

Büyük ölçekte pürüzlülük R <sub>l</sub> (0,2*0,2 den 1*1 m <sup>2</sup> Kadar.	Dalgali hafif dalgali	1,00-0,95	Dolgu malzemesi (I <sub>m</sub> )	Çimento/Çimentolu dolgu Dolguyok/Yüzeyboyanımı		1,07 1,00
	Kavisli hafif kavisli	0,85-0,80		Yumuşamayan ve makaslanmamış	Iri	0,95
	Düz pürüzlü basamaklı	0,75-0,95			Orta	0,90
	Düz basamaklı kaygan basamaklı	0,90-0,85		Yumuşak ve makaslanmış	Ince	0,85
					Iri	0,75
					Orta	0,65
			Ince	0,55		
Küçük ölçekteki pürüzlülük (R <sub>s</sub> ) 0,2*0,2 m <sup>2</sup> alan	Pürüzlü dalgali düz dalgali	0,80-0,75		Dolgu kalınlığı>pürüzlülük		0,42
	Kaygan dalgali pürüzlü düzlemsel	0,70-0,65		Dolgu kalınlığı<pürüzlülük		0,17
				Malzeme akıcı		0,05
	Düz düzlemsel	0,60	Karstik boşluk	Yok		1,00
	Kaygan düzlemsel	0,55		Var		0,92

Jeoteknik birimlerin her birindeki her bir süreksizlik takımının yüzey koşulu parametre puanları Tablo 4.21'de verilmiştir. Jeoteknik birimlerin süreksizlik

durumu (CD), süreksizlik takımlarına ait süreksizlik koşul faktörü (TC), süreksizlik ara uzaklığı faktörü (SPA), kaya kütle kohezyonu, kaya kütle sürtünme açısı Moh-Coloumb kriterine göre bulunmuş kaya kütle dayanımı Tablo 4.22’de verilmiştir.

**Tablo 4.21:** Jeoteknik birimlerin her birindeki her bir süreksizlik takımının yüzey koşulu parametre puanları.

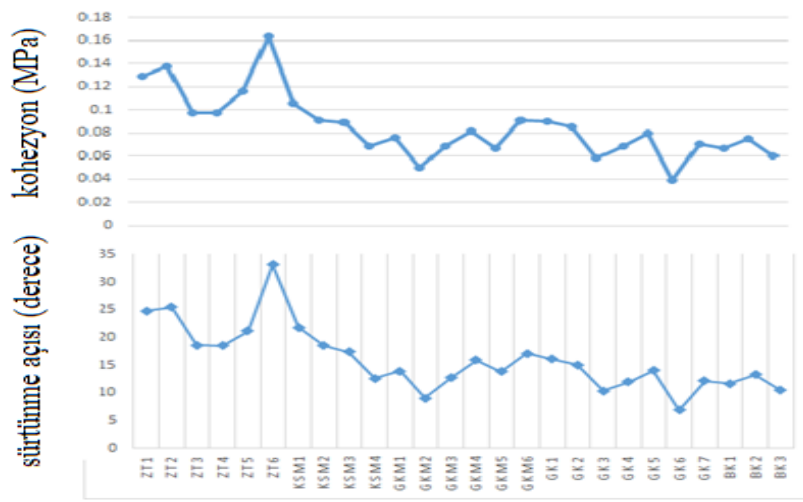
	JTB	1.Süreksizlik takımı					2.Süreksizlik takımı					3.Süreksizlik takımı				
		S <sub>1</sub>	RI	Rs	Im	Kd	S <sub>2</sub>	RI	Rs	Im	Kd	S <sub>3</sub>	RI	Rs	Im	Kd
1	Zt1	41	0.85	0.65	1	1	37	0.85	0.65	1	1	35	0.85	0.65	1	1
2	Zt2	63	0.95	0.65	0.55	0.92	60	0.95	0.65	0.55	0.92	58	1	0.8	1	0.9
3	Zt3	32	0.85	0.8	0.55	0.92	29	0.85	0.6	0.55	0.92	22	0.85	0.65	0.55	0.9
4	Zt4	37	0.8	0.65	0.55	0.92	33	0.8	0.65	0.55	0.92	21	0.8	0.65	0.55	0.9
5	Zt5	42	1	0.8	1	0.92	30	1	0.8	1	0.92	28	1	0.8	1	0.9
6	Zt6	51	1	0.8	0.95	0.92	32	1	0.8	0.9	0.92	28	1	0.8	0.95	0.9
7	Ksm1	23	1	0.75	1	1	12	1	0.75	0.9	1	6	1	0.8	0.85	1
8	Ksm2	14	1	0.75	1	0.92	10	1	0.75	1	0.92	6	1	0.75	1	0.9
9	Ksm3	21	0.85	0.8	0.55	1	12	0.85	0.8	0.95	1	12	0.85	0.8	1	1
10	Ksm4	22	1	0.8	0.55	1	14	1	0.8	0.55	1	11	1	0.8	0.55	1
11	Gkm1	18	0.75	0.6	0.55	1	18	0.75	0.6	0.55	1	18	0.95	0.95	1	1
12	Gkm2	12	0.75	0.6	0.55	1	12	0.75	0.6	0.55	1	8	1	0.8	0.55	1
13	Gkm3	17	0.95	0.8	0.9	1	13	1	0.75	0.55	1	9	1	0.75	0.55	1
14	Gkm4	22	0.75	0.65	1	0.92	13	1	0.8	0.55	0.92	12	1	0.8	0.55	0.9
15	Gkm5	17	0.75	0.65	0.55	0.92	7	0.75	0.6	0.55	0.92	7	0.75	0.65	0.55	0.9
16	Gkm6	37	1	0.8	0.55	1	28	1	0.8	0.9	0.92	9	0.75	0.65	0.9	0.9
17	Gk1	31	0.75	0.6	0.95	1	31	0.75	0.6	0.9	1	31	0.75	0.6	0.9	1
18	Gk2	27	0.8	0.65	0.9	0.92	27	0.8	0.65	0.9	0.92	27	0.8	0.65	0.95	0.9
19	Gk3	16	0.8	0.65	0.55	0.92	16	0.8	0.65	0.55	0.92	16	0.8	0.65	0.55	0.9
20	Gk4	18	0.85	0.8	1	0.92	15	0.85	0.8	1	0.92	11	0.85	0.8	1	0.9
21	Gk5	22	0.85	0.8	1	0.92	20	0.85	0.8	1	0.92	18	0.85	0.8	1	0.9
22	Gk6	8	0.75	0.6	0.55	0.92	8	0.85	0.75	0.55	0.92	8	0.85	0.8	0.55	0.9
23	Gk7	18	0.85	0.8	1	0.92	15	0.85	0.8	1	1	11	0.85	0.8	1	0.9
24	Bk1	17	1	0.8	1	0.92	15	0.75	0.65	1	0.92	13	0.75	0.65	1	0.9
25	Bk2	22	1	0.8	1	0.92	18	0.75	0.65	1	0.92	14	0.75	0.85	1	0.9
26	Bk3	12	1	0.8	0.95	0.92	11	0.75	0.8	0.95	0.92	10	0.75	0.85	1	0.9

**JTB:** Jeoteknik birim, **Zt:** Zeolitik tüf, **Ksm:** Kıltaşı silttaşı ard. **Gkm:** Gri yeşil kıltaşı marn, **Gk:** Gri malzemeli kıltaşı, **Bk:** Borlu kireçtaşı, **RI:** Büyük ölçekli pürüzlülüğü, **Rs:** Küçük ölçekli pürüzlülük, **Im:** Dolgu malzemesi türü, **Kd:** Yüzeydeki erime boşluğu varlığı/yokluğu

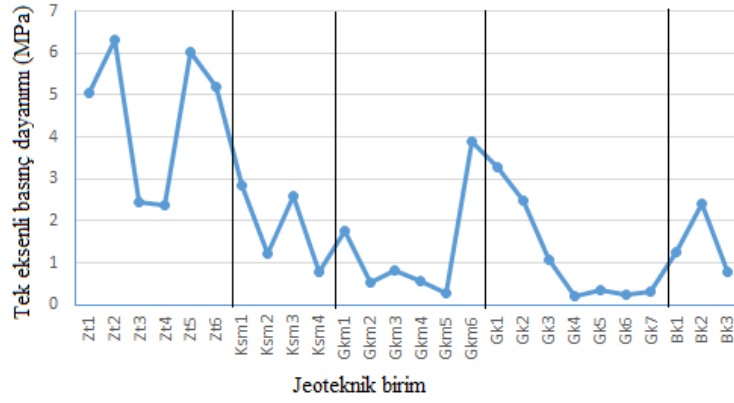
**Tablo 4.22:** Jeoteknik birimlerin süreksizlik durumu (CD),süreksizlik takımlarına ait süreksizlik koşul faktörü (TC), Süreksizlik ara uzaklığı faktörü (SPA), kaya kütle kohezyonu, kaya kütle sürtünme açısı Moh-Coloumb kriterine göre bulunmuş kaya kütle dayanımı verileri

	JTB	TC1	TC2	TC3	CD	SPA	$c_m$	$\theta_m$	$\sigma_{cm11}$
1	Zt1	0.5525	0.5525	0.5525	0.5525	0.2962	0.129	24.8	5.0635
2	Zt2	0.3125	0.3125	0.736	0.4475	0.3843	0.137	25.5	6.3347
3	Zt3	0.3441	0.2581	0.2796	0.2993	0.2464	0.097	18.6	2.4366
4	Zt4	0.2631	0.2631	0.2631	0.2631	0.2596	0.097	18.5	2.372
5	Zt5	0.736	0.736	0.736	0.736	0.2754	0.116	21.2	6.0126
6	Zt6	0.6992	0.6624	0.6992	0.6859	0.2913	0.163	33.2	5.2084
7	Ksm1	0.75	0.675	0.68	0.6991	0.1442	0.106	21.8	2.8496
8	Ksm2	0.69	0.69	0.69	0.69	0.1198	0.091	18.5	1.2072
9	Ksm3	0.374	0.646	0.68	0.5478	0.1626	0.089	17.4	2.5948
10	Ksm4	0.44	0.44	0.44	0.44	0.1681	0.069	12.6	0.7842
11	Gkm1	0.2475	0.2475	0.9025	0.4658	0.1851	0.076	13.9	1.7633
12	Gkm2	0.2475	0.2475	0.44	0.3025	0.1274	0.05	9.1	0.5168
13	Gkm3	0.684	0.4125	0.4125	0.5347	0.1477	0.069	12.7	0.8239
14	Gkm4	0.4485	0.4048	0.4048	0.4225	0.1679	0.082	15.9	0.5705
15	Gkm5	0.2467	0.2277	0.2467	0.2388	0.1191	0.067	13.8	0.289
16	Gkm6	0.44	0.6624	0.4037	0.48	0.2139	0.091	17.1	3.8779
17	Gk1	0.4275	0.405	0.405	0.4125	0.2626	0.09	16.1	3.2644
18	Gk2	0.4306	0.4306	0.4545	0.4385	0.2412	0.085	15.1	2.4921
19	Gk3	0.2631	0.2631	0.2631	0.2631	0.1706	0.058	10.4	1.0854
20	Gk4	0.6256	0.6256	0.6256	0.6256	0.1618	0.069	12	0.2203
21	Gk5	0.6256	0.6256	0.6256	0.6256	0.2001	0.08	14	0.3552
22	Gk6	0.2277	0.3226	0.3441	0.2981	0.1	0.039	6.9	0.2559
23	Gk7	0.6256	0.68	0.6256	0.6488	0.1618	0.07	12.2	0.3133
24	Bk1	0.736	0.4485	0.4485	0.5432	0.1644	0.067	11.7	1.2603
25	Bk2	0.736	0.4485	0.6256	0.6121	0.1866	0.075	13.3	2.3996

**JTB:** Jeoteknik birim, **Zt:** Zeolitik tüf, **Ksm:** Kıltaşı silttaşı ard. **Gkm:** Gri yeşil kıltaşı marn, **Gk:** Gri malzemeli kıltaşı, **Bk:** Borlu kireçtaşı, **CD:** Jeoteknik birimlerin süreksizlik durumu, **TC:** Süreksizlik takımlarına ait süreksizlik koşul faktörü, **SPA:** Süreksizlik ara uzaklığı faktörü,  $c_m$ : Kaya kütle kohezyonu (MPa),  $\theta_m$ : Kaya kütle sürtünme açısı (Derece),  $\sigma_{cm11}$ : Moh-Coloumb kriterine göre bulunmuş kaya kütle tek eksenli basınç dayanımı (MPa).



Şekil 4.14: Jeoteknik birimlerin SSPC sistemi ile hesaplanan kayma dayanımı parametreleri.



Şekil 4.15: Jeoteknik birimlerin SSPC sistemi ile hesaplanan tek eksenli basınç dayanımı.

#### 4.7 Hoek Brown Yenilme Kriteri

Hoek–Brown yenilme kriteri ölçütünün genelleştirilmiş şekli aşağıda (4.28) eşitliği ile verilmiştir (Hoek vd. 2002).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right)^a \quad (4.28)$$

Eşitlikte;  $\sigma'_1$  ve  $\sigma'_3$  sırasıyla kırılma anındaki en büyük ve en küçük efektif asal gerilmeler,  $\sigma'_{ci}$  kaya malzemesi serbest basınç dayanımı,  $m_b$  kaya malzemesine ait olan  $m_i$  sabitinin azaltma sayısıdır ve (4.29) eşitliği ile tanımlanmıştır,  $m_i$  Kaya malzemesini üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinden belirlenen, büyük ölçüde kayaç litolojisine bağlı ampirik, a ve s ise kaya kütesine bağlı katsayılardır (Eşitlik 4.30 ve 4.31).

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (4.29)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (4.30)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4.31)$$

Yukarıdaki eşitliklerde **D** kaya kütlesi için örselenme sayısı olup doğal yamaç ve kazı şevleri için 0,7 ile 1,0 değerlerini almaktadır (Hoek vd. 2002). GSI ise kaya kütlesinin süreksizlik sıklığına ve süreksizlik yüzeylerinin durumuna bağlı olarak tanımlanmış “**Jeolojik Dayanım İndeksi**” dir. Bu çalışmada GSI değerini bulmak için Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen abak kullanılmıştır (bkz. Şekil 4.2). Süreksizlik yüzey puanı Tablo 4.23’ de verilen süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük, ayrışma ve dolgu durumu puanlarının toplamı olarak bulunmaktadır. Yapısal özellik puanı (SR) süreksizlik sıklığının bir ifadesi olup aşağıda hacimsel çatlak sayısına ( $J_v$ ) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Sönmez ve Ulusay, 2002).

$$SR = -17.5 \ln(J_v) + 79.8 \quad (4.32)$$

**Tablo 4.23:** Süreksizlik yüzey puanını (SCR) bulmak için gerekli pürüzlülük, ayrışma ve dolgu durumu ile ilgili puanlama (Sönmez ve Ulusay, 2002)

Pürüzlülük ve Puanı(Rv)	Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Düz	Kaygan
	6	5	3	1	0
Ayrışma ve Puanı(Rw)	Yok	Az ayrışmış	Orta derecede ayrışmış	Yüksek derecede ayrışmış	Tümüyle Ayrışmış
	6	5	3	1	0
Dolgu ve Puanı(Rf)	Yok	Sert	Sert	Yumuşak	Yumuşak
	6	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm
		4	2	2	0

Hoek ve Brown yenilme kriterin de kaya kütlesinin kayma zarfını bulmak için aşağıdaki (Eşitlik 4.33-35) bağıntılardan yararlanılmaktadır.

$$\sigma'_n = \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \times \left( \frac{d\sigma_1/d\sigma_3 - 1}{d\sigma_1/d\sigma_3 + 1} \right) \quad (4.33)$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad (4.34)$$

$$d\sigma'_1/d\sigma'_3 = 1 + am_b (m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^{a-1} \quad (4.35)$$

Hoek-Brown yenilme kriteri kaya kütlesinin kesme parametrelerini bulmak için Mohr-Coulomb kriterini dikkate alan çözümleri de sunmaktadır.

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (4.36)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}} \quad (4.37)$$

$$\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ci} \quad (4.38)$$

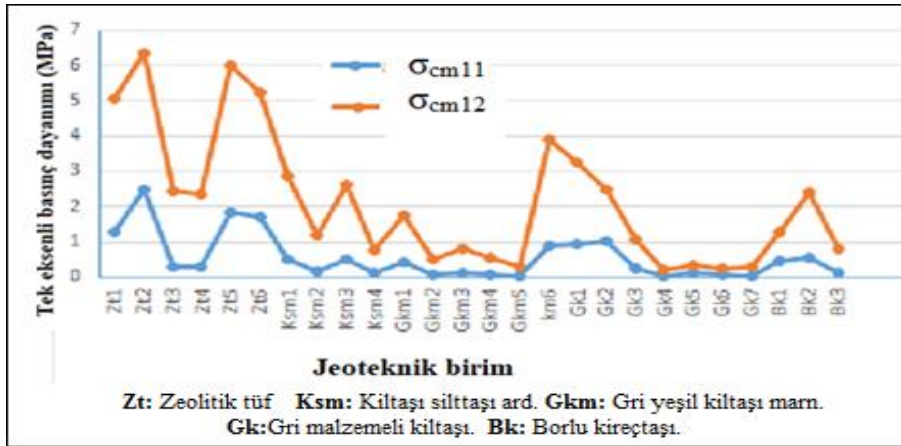
$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \times \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b / 4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (4.39)$$

Söz konusu yenilme ölçütünde kaya kütlesinin deformasyon modülü  $E_m$  (GPa) aşağıdaki eşitliklerle bulunmaktadır.

$$\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa ise } E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (4.40)$$

$$\sigma_{ci} \geq 100 \text{ MPa ise } E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (4.41)$$

İnceleme alanında tanımlanan jeoteknik birimlerin Hoek-Brown yenilme kriteri (Hoek vd. 2002) ile bulunmuş dayanım özellikleri Tablo 4.24 verilen kohezyon ve sürtünme açısı değerleri Mohr-Coulomb kriteri dikkate alınarak hesaplanmış değerlerdir.

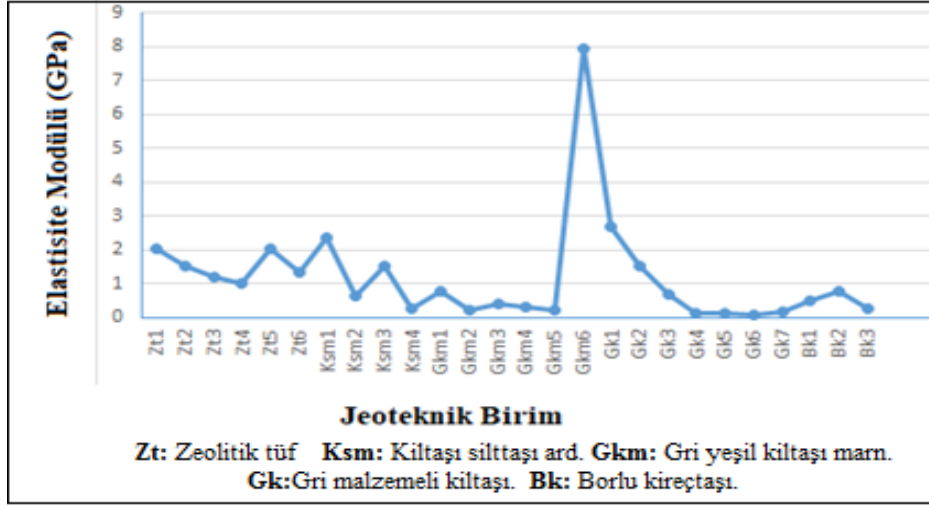


Şekil 4.16: Jeoteknik birimlerin Hoek-Brown kriteri ile hesaplanan tek eksenli basınç dayanımı.

**Tablo 4.24:** Hoek-Brown Yenilme kriterine göre bulunan kaya dayanım özellikleri.

	<b>JTB</b>	<b><math>\sigma_{ci}</math></b>	<b>GSI</b>	<b><math>m_i</math></b>	<b><math>c_{m3}</math></b>	<b><math>\phi_{m3}</math></b>	<b><math>\sigma_{cm12}</math></b>	<b><math>\sigma_{cm13}</math></b>	<b><math>E_m</math></b>
1	Zt1	38.21	53.5	13	1.582	26	1.275	5.063458	2038.2
2	Zt2	34.33	64	13	1.792	31	2.5	6.334699	1545.3
3	Zt3	30.665	37	13	0.861	19.5	0.281	2.436574	1182.7
4	Zt4	28.912	38	13	0.832	19.9	0.288	2.37203	1038.1
5	Zt5	38.198	58.5	13	1.785	28.6	1.853	6.012565	2036.5
6	Zt6	32.47	59.5	13	1.534	29	1.696	5.20843	1350.2
7	Ksm1	40.213	40.5	8	1.039	17.8	0.511	2.849649	2346.5
8	Ksm2	22.425	33	8	0.464	14.9	0.146	1.20721	629.4
9	Ksm3	34.327	43	8	0.934	18.5	0.511	2.594816	1544.9
10	Ksm4	13.076	36	8	0.296	15.9	0.11	0.784186	280.6
11	Gkm1	25.564	44.5	6	0.65	17.2	0.429	1.763277	805.1
12	Gkm2	11.948	31	6	0.207	12.6	0.07	0.516756	251.3
13	Gkm3	16.772	34.5	6	0.323	13.8	0.125	0.823874	393.1
14	Gkm4	14.256	29	6	0.231	12	0.08	0.570522	313.6
15	Gkm5	10.871	20	6	0.123	9.2	0.03	0.289049	225.3
16	Gkm6	58.224	43.5	6	1.44	16.8	0.902	3.877923	7962.8
17	Gk1	42.28	48	4	1.175	18.5	0.932	3.264356	2710.1
18	Gk2	34.327	52	4	0.917	17.3	1.022	2.492127	1544.9
19	Gk3	23.969	38	4	0.434	12.7	0.229	1.085381	711.2
20	Gk4	5.491	34	4	0.09	11.5	0.05	0.220309	117.5
21	Gk5	6.26	44.5	4	0.137	14.7	0.106	0.355155	131.1
22	Gk6	2.926	34.5	4	0.104	11.8	0.09	0.255944	74
23	Gk7	7.95	34	4	0.128	11.5	0.052	0.313328	162.9
24	Bk1	19.495	48.5	4	0.474	16.1	0.445	1.260325	495.7
25	Bk2	25.564	48	9	0.82	21.3	0.546	2.399649	805.1
26	Bk3	13.076	36	9	0.308	14.7	0.11	0.79845	280.6

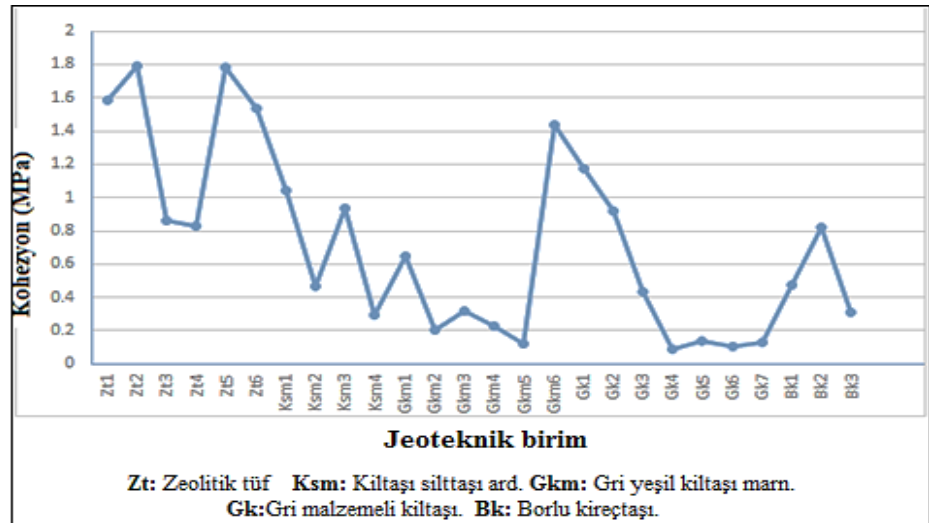
**JTB:** Jeoteknik birim, **Zt:**Zeolitik tuf birimi, **Ksm:** Kiltası silttaşı ardalanması, **Gkm:** Gri yeşil kiltası marn, **Gk:** Gri malzemeli kiltası, **Bk:** Borlu kireçtaşı  **$\sigma_{ci}$ :** Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı,  **$\phi'_{m2}$ :** kaya kütlesi içsel sürtünme açısı,  **$c_{m2}$ :** kaya kütlesi kohezyonu,  **$E_m$ :** kaya kütlesideformasyon modülü,  **$\sigma_{cm12}$ :** Hoek-Brown kriteri ile elde edilmiş kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı,  **$\sigma_{cm13}$ :** Hoek-Brown kriteri ile elde edilmiş  $\phi'$  ve c değerlerinden itibaren bulunmuş kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı.



Şekil 4.17: Jeoteknik birimlerin Hoek-Brown kırteri ile hesaplanan elastisite modülü.



Şekil 4.18: Jeoteknik birimlerin Hoek-Brown kırteri ile hesaplanan sürtünme açısı değerleri.

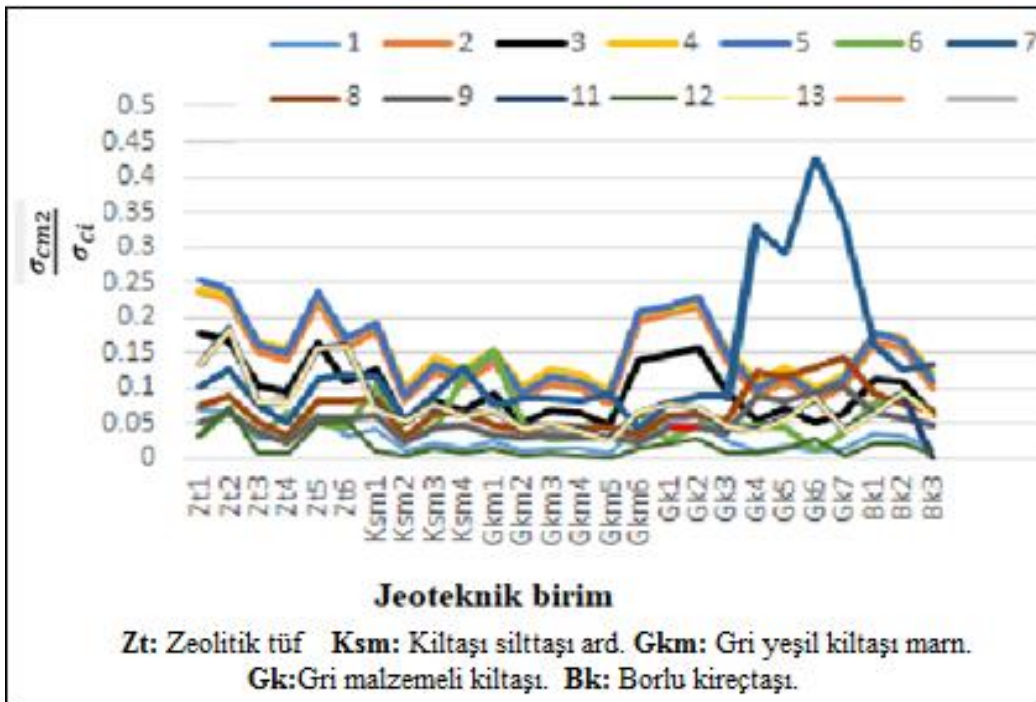


Şekil 4.19: Jeoteknik birimlerin Hoek-Brown kırteri ile hesaplanan kayma dayanımı parametreleri.

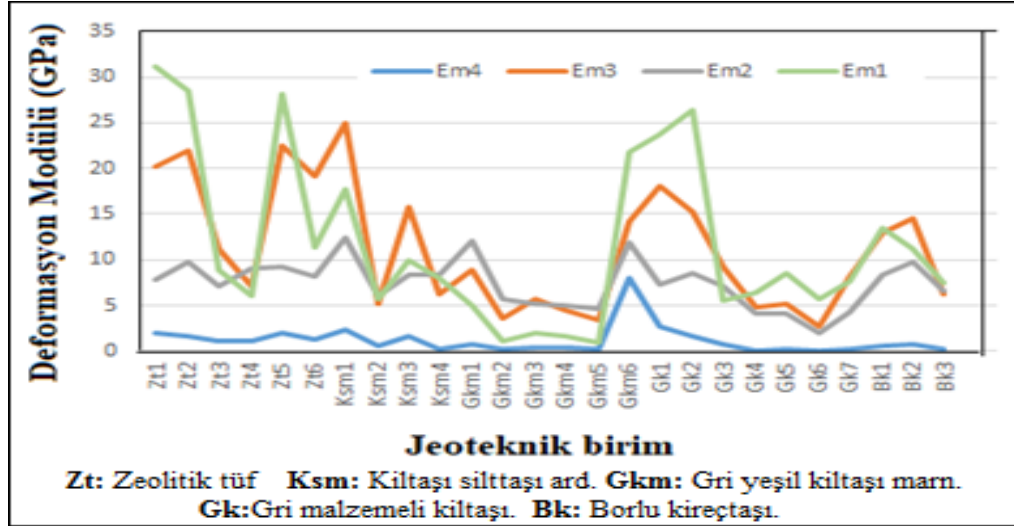
#### 4.8 Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemleri ve Ampirik Yenilme Kriteri Esas Alınarak Elde Edilen Dayanım ve Deformasyon Özelliklerinin Karşılaştırılması

İncelenen jeoteknik birimlerin dayanım ve deformasyon özelliklerinin tahmin edilmesinde RMR, R<sub>Mi</sub> Q sistemi, SSPC ve Hoek - Brown yenilme kriteri kullanılmıştır. Bu sınıflama sistemleri ve yenilme ölçütlerinin her biri farklı parametreleri kullanmakta ve ortak olan parametrelerinde ağırlıkları farklıdır. Bu nedenle farklı yöntemle elde edilen dayanım ve deformasyon değerleri farklılık göstermektedir (Şekiller 4.20-4.23).

Şekil 4.20' de ve Eşitlik (4.42 - 4.54)' de 1 - 5 değerleri ve indeksleri RMR, 6 değeri R<sub>Mi</sub>, 7 - 10 değerleri Q sistemi, 11 değeri SSPC sistemi ve 12 - 13değerleri de Hoek-Brown yenilme kriteri esas alınarak bulunmuştur. Kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı/ Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranının en büyük değeri RMR, en küçük değerleri ise Hoek-Brown yenilme kriteri ile bulunmuştur. Göreceli olarak en büyük değişim Q sistemi ile elde edilen değerlerde görülmüştür.

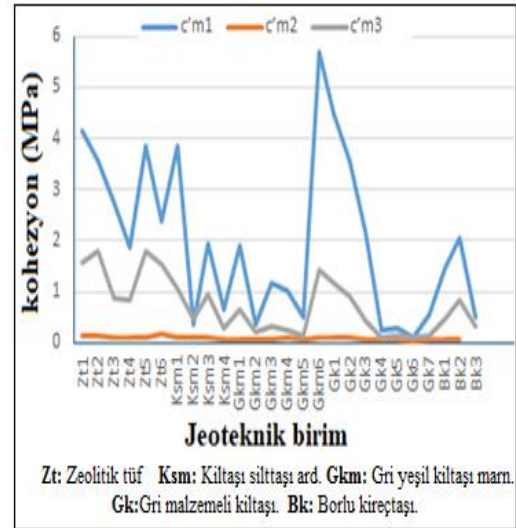
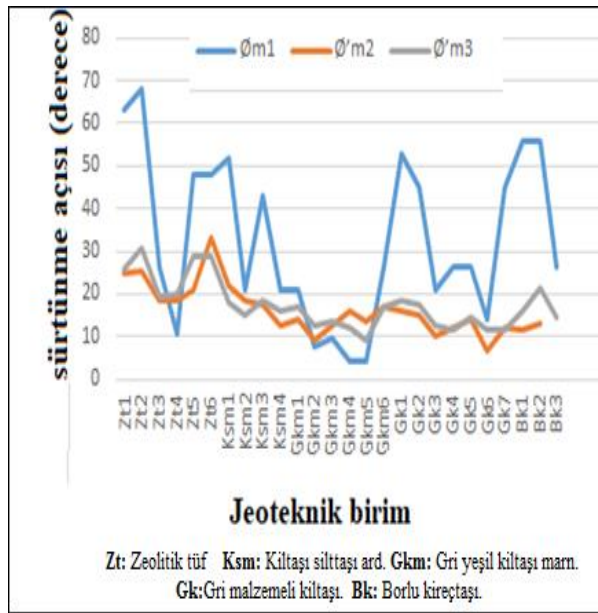


Şekil 4.20: Jeoteknik birimlerin Kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı/Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranı.



Şekil 4.21: Jeoteknik birimlerin RMR (Em1), RMi (Em2), Q (Em3) sistemi ve Hoek-Brown (Em4) yenilme ölçütü ile elde edilmiş deformasyon modüllerinin karşılaştırılması.

Jeoteknik birimler için farklı ölçütler ve sınıflandırma sistemleri ile elde edilen deformasyon modülü değerlerini veren grafik incelendiğinde (Şekil 4.21) en küçük değerlerin Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edildiği, RMR ve Q sistemi ile elde edilen değerlerin göreceli olarak birbirine yakın olduğu görülmektedir. RMR ile elde edilen  $E_m$  değerleri Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilen değerlerin 4-76 kat büyüktür. Q sistemi ile elde edilen  $E_m$  değerlerin Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilen değerlerine göre 2- 50 kat, RMi ile elde edilen  $E_m$  değerlerinin 4-34 kat daha büyüktür.



Şekil 4.22: Jeoteknik birimlerin kayma dayanımı parametrelerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.22 de  $c'm1$  (Q sistemi),  $c'm2$  (SSPC sınıflama sistemi) ve  $c'm3$  (Hoek-Brown yenilme ölçütü) ile elde edilmiş kohezyon değerleridir. Sürtünme açısı içinde (1-3) indisleri  $c$  ile aynıdır.

Jeoteknik birimlerin sürtünme açısını veren grafik incelendiğinde (Şekil 4.22); SSPC sınıflama sistemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş sürtünme açısı değerlerinin birbirine yakın olduğu, Q sistemi ile elde edilen sürtünme değerlerinin ise diğer iki yöntemle elde edilen değerlere göre çok yüksek olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Q sistemi ile elde edilen kohezyon değerleri de diğer iki yöntemle elde edilen değerlere göre çok yüksek, Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş kohezyon değerlerinin de çok düşük olduğu görülmektedir.

Yüzeysel ayrışma kaya kütlelerinde tek eksenli basınç dayanımını, deformasyon modülünün azalmasını sonuçlamakta ve genel olarak kayma dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Jeolojik dayanım indeksi süreksizlik yüzey durumuna ve süreksizlik sıklığına (blok boyutuna) bağlı olarak tanımlanmaktadır. Süreksizlik yüzey puanı süreksizliklerin kayma dayanımı ile doğru orantılıdır ve genel olarak kayma dayanımı arttıkça süreksizlik yüzey puanının artması beklenir. Blok boyutu ve süreksizlik yüzey puanı arttıkça GSI artmakta aksi durumda azalmaktadır. Bu nedenlerle GSI değeri azaldıkça, jeoteknik birimlerin tek eksenli basınç dayanımını, deformasyon modülü ve kayma dayanımının azalması beklenir. Bu durum dikkate alınarak jeoteknik birimlerin tek eksenli basınç dayanımını, deformasyon modülü ve kayma dayanımı parametrelerinin GSI ve Price (1993)'e göre bulunan ayrışma puanı ( $W_d$ ) ile değişimi incelenmiştir (Eşitlikler 4.42-4.70 ve Şekil 4.23).

Kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımının kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımına oranının ( $\sigma_{cm}/\sigma_{ci}$ ) GSI ile değişimi tahmin etmek için (4.43 - 4.55) Eşitliğin'de verilen istatistiksel ilişkiler elde edilmiştir. Bu istatistiksel modellere göre R<sub>Mi</sub> ve Q sistemi ile bulunan söz konusu oran ile GSI arasında anlamlı bir ilişki yokken, RMR, SSPC ve Hoek-Brown yenilme kriteri ile bulunan oran ile GSI ve ayrışma derecesi arasında anlamlı istatistiksel ilişki vardır. Bu ilişkilere göre kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımının kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımına oranının, GSI ve ayrışma derecesinin artmasıyla azalmaktadır.

$$\frac{\sigma_{cm1}}{\sigma_{ci}}=0.0027597e^{0.05293GSI} \quad R^2=0.703 \quad (4.42)$$

$$\frac{\sigma_{cm2}}{\sigma_{ci}}=0.040365e^{0.028837GSI} \quad R^2=0.704 \quad (4.43)$$

$$\frac{\sigma_{cm3}}{\sigma_{ci}}=0.0212409e^{0.0346061GSI} \quad R^2=0.704 \quad (4.44)$$

$$\frac{\sigma_{cm4}}{\sigma_{ci}}=0.0561354e^{0.023763GSI} \quad R^2=0.704 \quad (4.45)$$

$$\frac{\sigma_{cm5}}{\sigma_{ci}}=0.045896e^{0.0276825GSI} \quad R^2=0.714 \quad (4.46)$$

$$\frac{\sigma_{cm6}}{\sigma_{ci}}=0.0270338e^{0.014147GSI} \quad R^2=0.075 \quad (4.47)$$

$$\frac{\sigma_{cm7}}{\sigma_{ci}}=0.1150197e^{0.0235GSI} \quad R^2=0.00304 \quad (4.48)$$

$$\frac{\sigma_{cm8}}{\sigma_{ci}}=0.038858e^{0.012552GSI} \quad R^2=0.0942 \quad (4.49)$$

$$\frac{\sigma_{cm9}}{\sigma_{ci}}=0.027772e^{0.0125454GSI} \quad R^2=0.0902 \quad (4.50)$$

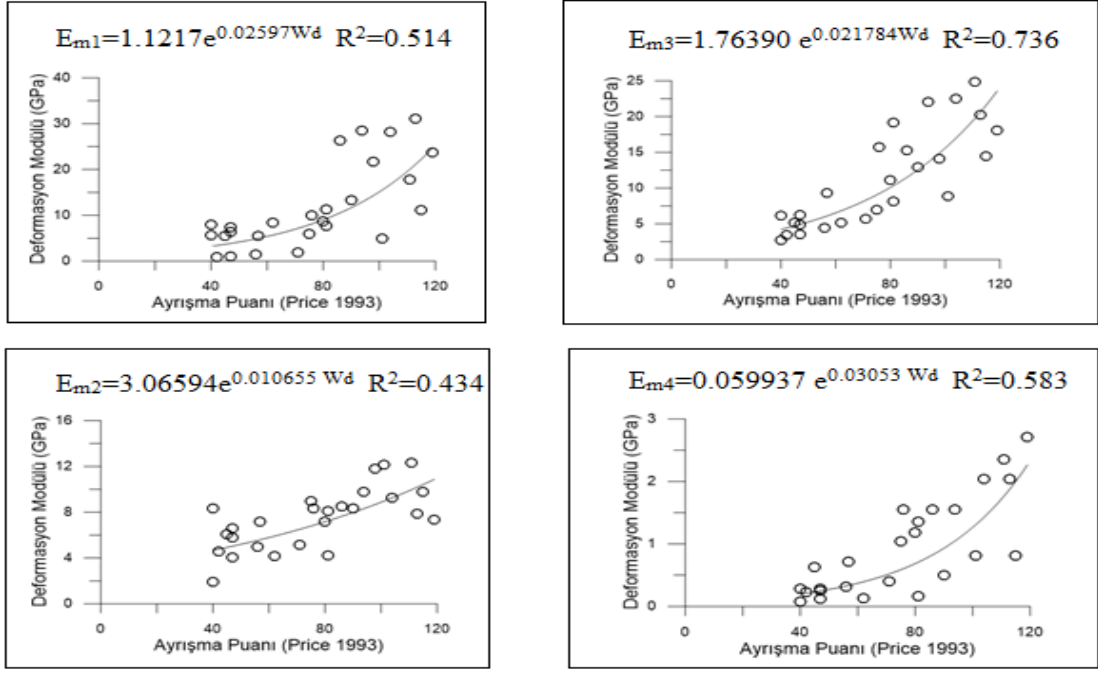
$$\frac{\sigma_{cm10}}{\sigma_{ci}}=0.018654e^{0.0618133GSI} \quad R^2=0.613 \quad (4.51)$$

$$\frac{\sigma_{cm11}}{\sigma_{ci}}=0.012643e^{0.0404533GSI} \quad R^2=0.782 \quad (4.52)$$

$$\frac{\sigma_{cm12}}{\sigma_{ci}}=0.007039e^{0.072037GSI} \quad R^2=0.881 \quad (4.53)$$

$$\frac{\sigma_{cm13}}{\sigma_{ci}}=0.0128359e^{0.040199GSI} \quad R^2=0.782 \quad (4.54)$$

RMR, R<sub>Mi</sub>, Q sistemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş deformasyon modülü değerlerinin ayrışmayla değişimi araştırılmıştır (Şekil 4.23). Şekil 4.23' de görüldüğü gibi jeoteknik birimlerin deformasyon modülü (E<sub>m</sub>) ayrışmayla birlikte azalmaktadır. E<sub>m</sub> ile Price (1993)'e göre bulunan ayrışma puanı (W<sub>d</sub>) arasındaki en iyi korelasyon R<sub>Mi</sub> sistemi için elde edilmiştir. Jeoteknik birimlerin deformasyon modülünün GSI ile değişimi tahmin etmek için (4.42- 4.54) eşitliğinde verilen istatistiksel ilişkiler elde edilmiştir.



Şekil 4.23: Elde edilmiş deformasyon modülü değerlerinin ayrışmaya göre değişimi.

RMR, RMI, Q sistemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş deformasyon modülünün (sırasıyla  $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$ ,  $E_{m3}$  ve  $E_{m4}$ ) kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{ci}$ ) ve jeolojik dayanım indeksi (GSI) ile tahmin edilebilirliğini araştırmak için aşağıda verilen istatistiksel modeller kurulmuştur. Eşitlik (4.56 - 4.59). Bu modellere göre; jeoteknik birimlerin deformasyon modülü kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{ci}$ ) ve jeolojik dayanım indeksi (GSI) ile tahmin edilebilir. En iyi tahmin modeli Hoek-Brown yenilme ölçütü için elde edilmiştir.

$$E_{m1} = 0.000079\sigma_{ci}^{0.14}GSI^{3.006} \quad R^2 = 0.725 \quad (4.55)$$

$$E_{m2} = 1.047\sigma_{ci}^{0.483}GSI^{0.120} \quad R^2 = 0.783 \quad (4.56)$$

$$E_{m3} = 0.01588\sigma_{ci}^{0.477}GSI^{1.345} \quad R^2 = 0.859 \quad (4.57)$$

$$E_{m4} = 0.0024\sigma_{ci}^{0.094}GSI^{0.348} \quad R^2 = 0.942 \quad (4.58)$$

Jeoteknik birimlerin kayma dayanımı parametrelerinin; kohezyon (cm) ve sürtünme açısı değerlerinin ( $\phi_m$ ) ayrışmayla değişimi incelenmiştir (Eşitlik 4.60-4.65). SSPC ile elde edilen kayma dayanımı parametreleri ( $\phi_{m2}$ ,  $c_{m2}$ ) ile Price (1993) ayrışma puanı ( $W_d$ ) arasında anlamlı korelasyon bulunamamıştır (Eşitlikler 4.61, 4.64). Q sistemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş kayma dayanımı

parametreleri ( $\phi_{m1}$ ,  $\phi_{m3}$  ve  $c_{m1}$ ,  $c_{m3}$ ) ile Price (1993) ayrışma puanı ( $W_d$ ) arasında anlamlı istatistiksel bağıntı bulunmuş olup bu değerler ayrışma puanı ile güvenilir şekilde tahmin edilebilir. Bu durum jeoteknik birimlerin kayma dayanımı parametrelerinin jeolojik dayanım indeksi (GSI) değişimi arasında da aynen geçerlidir (Eşitlikler 4.66 - 4.71).

$$\phi_{m1}=45.766e^{0.01379 W_d} \quad R^2=0.535 \quad (4.59)$$

$$\phi_{m2}=44.882e^{0.02984 W_d} \quad R^2=0.229 \quad (4.60)$$

$$\phi_{m3}=35.723e^{0.0399 W_d} \quad R^2=0.401 \quad (4.61)$$

$$c_{m1}=49.95e^{0.1824 W_d} \quad R^2=0.401 \quad (4.62)$$

$$c_{m2}=39.738e^{7.00 W_d} \quad R^2=0.291 \quad (4.63)$$

$$c_{m3}=50.613e^{0.483 W_d} \quad R^2=0.545 \quad (4.64)$$

$$\phi_{m1}=28.62e^{0.01066 GSI} \quad R^2=0.639 \quad (4.65)$$

$$\phi_{m2}=26.884e^{0.0253 GSI} \quad R^2=0.318 \quad (4.66)$$

$$\phi_{m3}=21.094e^{0.03736 GSI} \quad R^2=0.708 \quad (4.67)$$

$$c_{m1}=33.04e^{0.102 GSI} \quad R^2=0.399 \quad (4.68)$$

$$c_{m2}=24.03e^{6.063 GSI} \quad R^2=0.419 \quad (4.69)$$

$$c_{m3}=0.0884e^{0.0348 GSI} \quad R^2=0.665 \quad (4.70)$$

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tülü açık ocağında yüzeylenen kayaçların ayrışma durumu, dayanım ve deformasyon özellikleri araştırılmış elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Bu çalışma sırasında Tülü açık ocağının şev yüzeylerinde görülebilen formasyonlar 3 birim olarak incelenmiştir. Bu 3 birim alt tuf birimi, alt boratlı birim ve üst tuf olarak kabul edilmiştir. Alt boratlı birim ise arazi gözlemleri sonucunda 6 ayrı fasiyese ayrılarak boratlı birim, gri yeşil laminalı kıltaşı borlu kireçtaşı ar dalanması, borlu kireçtaşları, gri malzemeli kıltaşı, gri yeşil kıltaşı marn ar dalanması, kıltaşı silttaşı ar dalanması olarak belirlenmiştir. Boratlı birim içerisinde bor minerallerinden sadece kolemanit damarları mevcut olduğu görülmüştür. Bunun yanında gri malzemeli kıltaşı fasiyesinin içerisinde, ocağın kuzey doğu tarafındaki şevlerinde +60 kotunda, yaklaşık 50 cm kalınlığında cevherleşme görülmüştür. Alınan örneklere göre bu damarın bor minerallerinden havlit olduğuna karar verilmiştir.

2. İnceleme alanı olan Tülü açık ocağında yapısal unsurlardan antiklinal-senklin al oluşumlarına çok sıkça rastlanmıştır. Bu yapılar incelenmiş ve senklin al ekseninin KD-GB doğrultulu olduğu ve çoğunlukla asimetrik yapıda olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra tabakalar içerisinde sedimasyon sırasında oluştuğu anlaşılan kayma kıvrımları mevcuttur. İnceleme alanı içerisinde tabakalar arası küçük ölçekli normal faylar haricinde büyük çapta fay oluşumlarına rastlanamamıştır. Ancak Tabaka eğimleri ocak içine doğru olduğunda batı bölgesindeki şev kayması riskleri mevcuttur. 2013 yılı içerisinde batı bölgedeki şevlerden ocak içine doğru krip (yavaş akma) hareketinin olduğu ve yaklaşık 2 milyon ton kütle nin hareket ettiği belirlenmiştir.

3. Tülü açık ocağında ayırtılan jeoteknik birimlerin jeolojik dayanım İndeksi değerleri, temel kaya kütle puanı (RMR), Q değeri ve Kaya kütle İndeksi (RMi) değerleri bulunmuş ve bunlar aralarında ilişki olup olmadığı ve bu değerlerin ayrışmayla değişimi incelenmiştir.

a) İncelenen jeoteknik birimler için temel RMR- Price (1993) ayrışma puanı arasında anlamlı istatistiksel ilişki vardır.

b) GSI değeri kullanılarak temel RMR değerinin ve bu RMR değeri esas alınarak bulunan kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı/kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranının ve deformasyon modülü tahmin edilebilir.

c) İncelenen jeoteknik birimler için R<sub>Mi</sub> değerlerinin temel RMR, GSI ve ayrışma puanı ile değişimi incelenmiş, ancak bu değişimleri ifade edecek anlamlı istatistiksel bağıntılar bulunamamıştır.

d) GSI ile Q ve Q<sub>c</sub> değerleri arasında ve temel RMR değeri ile Q ve Q<sub>c</sub> değerleri arasında anlamlı istatistiksel bağıntılar bulunmuştur.

4. Tülü açık ocağında (Bigadiç, Balıkesir) yüzeylenen kaya kütleleri litoloji/fasiyes özellikleri, süreksizlik sıklığı ve ayrışma durumu dikkate alınarak 26 jeoteknik birime ayrılmış ve her jeoteknik birimin tek eksenli basınç dayanımı, deformasyon modülü ve kayma dayanımı parametreleri Kaya kütle puanı (RMR), Q sistemi, Kaya kütle İndeksi (R<sub>Mi</sub>), yamaç duraylılığı olasılık sınıflandırma sistemi (SSPC) ve Hoek-Brown yenilme kriteri ile elde edilmiştir;

a) Jeoteknik birimlerin jeolojik dayanım indeksleri.

b) Jeoteknik birimlerin temel RMR değerleri.

5. Hoek-Brown yenilme kriteri ile elde edilen tek eksenli basınç dayanımı değerleri;

a) Deformasyon modülü değerleri.

b) Kaya kütlesi sürtünme açısı değerleri.

c) Kaya kütlesi kohezyon değerleri.

6. Jeoteknik birimlerin kaya kütle puanı (RMR), Q sistemi, kaya kütle indeksi (R<sub>Mi</sub>), yamaç duraylılığı olasılık sınıflandırma sistemi (SSPC) ve Hoek-Brown yenilme kriteri ile bulunan tek eksenli basınç dayanımı, deformasyon modülü ve kayma dayanımı parametrelerinin karşılaştırılması ayrışma puanı, jeolojik dayanım indeksi ve kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı ile değişimi aşağıda verilmiştir;

a) Kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı/Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranının en büyük değeri RMR, en küçük değerleri ise Hoek-Brown yenilme kriteri ile bulunmuştur. Göreceli olarak en büyük değişim Q sistemi ile elde edilen değerlerde görülmüştür.

b) Jeoteknik birimler için en küçük deformasyon modülü değerlerinin Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edildiği, RMR ve Q sistemi ile elde edilen değerlerin göreceli olarak birbirine yakın olduğu görülmektedir. RMR ile elde edilen  $E_m$  değerleri Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilen değerlerden 4-76 kat büyüktür. Q sistemi ile elde edilen  $E_m$  değerleri Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilen değerlere göre 2- 50 kat, RMi ile elde edilen  $E_m$  değerlerininde 4-34 kat daha büyüktür.

c) SSPC sınıflama istemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş sürtünme açısı değerlerinin birbirine yakın olduğu, Q sistemi ile elde edilen sürtünme değerlerinin ise diğer iki yöntemle elde edilen değerlere göre çok yüksek olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Q sistemi ile elde edilen kohezyon değerleri de diğer iki yöntemle elde edilen değerlere göre çok yüksek, Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş kohezyon değerlerinin de çok düşük olduğu görülmektedir.

d) Kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımının kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımına oranı ( $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}}$ ) GSI ile değişimi incelenmiştir. RMi ve Q sistemi ile bulunan söz konusu oran ile GSI arasında anlamlı bir ilişki yok iken, RMR, SSPC ve Hoek-Brown yenilme kriteri ile bulunan oran ile GSI ve ayrışma derecesi arasında anlamlı istatistiksel ilişki bulunmaktadır. Bu ilişkilere göre kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı/Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı oranının GSI' nin ve ayrışma derecesinin artmasıyla azalmaktadır.

e) Jeoteknik birimlerin deformasyon modülü ( $E_m$ ) ayrışmayla birlikte azalmaktadır.  $E_m$  ile Price (1993)'e göre bulunan ayrışma puanı ( $W_d$ ) arasındaki en iyi korelasyon RMi sistemi için elde edilmiştir. Jeoteknik birimlerin deformasyon GSI ile değişimi tahmin etmek için Eşitlikler (4.42-4.54)'de verilen istatistiksel ilişkiler elde edilmiştir.

f) RMR, RMi, Q sistemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş deformasyon modülü kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{ci}$ ) ve jeolojik dayanım indeksi (GSI) ile tahmin edilebilir. En iyi tahmin modeli Hoek-Brown yenilme ölçütü için elde edilmiştir.

g) SSPC ile elde edilen kayma dayanımı parametreleri ile Price (1993) ayrışma puanı ( $W_d$ ) arasında anlamlı korelasyon bulunamamıştır. Q sistemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütü ile elde edilmiş kayma dayanımı parametreleri ile Price (1993) ayrışma puanı ( $W_d$ ) arasında anlamlı istatistiksel bağıntı bulunmuş olup bu değerler

ayrışma puanı ile güvenli bir şekilde tahmin edilebilir. Bu durum jeoteknik birimlerin kayma dayanımı parametrelerinin jeolojik dayanım indeksi (GSI) değişimi arasında da aynen geçerlidir.

## 6. KAYNAKLAR

Akarca, C.D., (2014), Bigadiç (Balıkesir) Yöresi Neojen Çökellerindeki Yumuşak Sediment Deformasyon Yapılarının Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.,18.

Barton, N., (2002). Some new Q value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39, 185–216.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J., (1974). Classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 6, 45, 189-236.

Bhasin, R., Grimstaad, E. (1996). The use of stress–strength relationship in the assessment of tunnel stability. *Tunnel Under Space Tech.*, 11(1):93–98.

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classification. *John Wiley & Sons.*, New York, 251 p.

Bieniawski, Z.T. (1978). Determining rock mass deformability, experience from case histories. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, Abstr., 15, 237–247.

Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *The Civil Engineer in South Africa.*, 15, 335-343.

Ceryan, Ş., Türkmen, İ., Bölücek, C., Ceryan, N., Sönmez, H., Ercanoğlu, M., Özyurt, N.N., (2013). Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü Simav Açık Ocağının Mevcut Durumunun, Gelecekteki Fiziki Şartlarının ve Fiziki Şartlardaki Değişikliklerin Ocak Derivasyon Kanalına Olası Etkilerini Araştırma Çalışmalarını İçeren Jeolojik ve Jeoteknik Etüt Projesi, Etimaden. Final Raporu. 2-18.

Deere, D. U., (1963), Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1, p. 16-22.

Gündoğdu, M. N. (1982). Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi. Doktora Tezi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 286.

Gokceoglu, C., Sonmez, H., Kayabasi, A., (2003). Predicting the deformation moduli of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, 701–710.

Gökçeoğlu, C., (1997). Killi Yoğun Süreksizlik İçeren ve Zayıf Kaya Kütlelerinin Mühendislik Sınıflamalarında Karşılaşılan Güçlüklerin Giderilmesine Yönelik Yaklaşımlar., Doktora Tezi, *Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Müh. Böl.*, 214

Göktan, R.M., Ayday, C., (1989). Kazılabilirlik sınıflama sistemlerinin kazı hızı kestirimi amacıyla GLİ Tunçbilek açık ocaklarına uygulanması. *11. Türkiye Madencilik Bilimsel ve 16 Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı*, 175-185.

Hack, R., Price, D., Rengers, N., (2003). A new approach to rock slope stability a probability classification (SSPC). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.*, 62, 167-184.

Hack, R., (1998). Slope stability probability classification, SSPC. 2<sup>nd</sup> edition publ. ITC, Enschede, The Netherlands. ISBN 90 6164 154 3. 258 pp.

Helvacı, C. (2004). Bor yatakları ve oluşum modelleri, Evaporitler – Tuzlar Semineri, 19-23 Ocak 2004, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*, 81, 10-19.

Helvacı, C. (1995). Stratigraphy, mineralogy, and genesis of the Bigadiç borate deposits, western Turkey. *Economic Geology*, 90, 1237-1260.

Helvacı, C., Alaca, O. (1991). Bigadiç Borat yatakları ve çevresinin jeolojisi ve mineralojisi. *MTA Dergisi*, 113, 61-92.

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, In: Bawden HRW, Curran J, Telsenicki M (eds) Proceedings of the fifth North American rock mechanics Society (NARMS-TAC 2002) symposium, *Mining Innovation and Technology*, Toronto, Canada, pp 267–273.

Hoek, E., Brown, E.T., (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech.Min. Sci.* 34 (8), 1165–1186.

Hoek, E., Brown, E. T., (1980). *Underground Excavations in Rock Institution of Mining and Metallurgy*, Stephen Austin and Sons, London, 527 pp.

IAEG, (1995). The description and classification of weathered for engineering purposes (Geological Society Engineering Group Working Party Report. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1995, 28, 207-242.

ISRM., (1981). ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211 pp.

Kalamaras, G.S., Bieniawski, Z.T. (1993). A rock mass strength concept for coal seams, In: Peng SS (ed) 12th Conf. *Ground Control in Mining, Morgantown*, pp 274–283.

Palmstrom, A., (1974). Characterization of jointing density and the quality of rock masses (in Norwegian). *Internal report., A.B. Berdal*, Norway, 26 p.

Palmstrom, A., Stille, H., (2007). Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations. *Tunnell Undergr Space Technol.* 22, 363–376.

Palmstrom, A., Singh, R., (2001). The deformation modulus of rock masses-comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnell Undergr Space Technol.*, 16, 115–131.

Palmström, A., (1996). Characterizing rock masses by the RMi for use in practical rock engineering, Part2: some practical applications of the rock mass index (RMi). *Tunnell Undergr Space Technol.*, 11, 287–303.

Palmström, A., (1995). RMi-a Rock Mass Characterization System For Rock EngineeringPurposes. *Ph.D. thesis. Univ. of Oslo*.

Ramamurthy, T. (2004). A geo-engineering classification for rocks and rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci.* 41:89–101.

Sefarim, J.L., Pereira, J.P., (1983). Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proc. Int. Sym. on Eng. Geol. Undergr. Const.*, Lisbon, Portugal, pp. 1133–1144.

Sheory, P.R. (1997). Empirical rock failure criterion. *Oxford IBH Publishing co. and A.A. Balkema*, Rotterdam, Netherlands, p 176.

Singh, S. (1997). Time-dependent deformation modulus of rocks in tunnels. M. E. Thesis, *Civil Engineering Department, University of Roorkee, India*, p 180.

Singh, B., Viladkar, M.N., Samadhiya, N.K. and Mehrotra, V.K., (1997). Rock mass strength parameters mobilized in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 12(1), 47–54.

Singh, R. N., Gahrooe, D. R. (1989). Application of rock mass weakening coefficient for stability assessment of slopes in heavily jointed rock masses. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 3, 207-2019.

Sonmez, H., Ulusay, R., (2002). A discussion on the Hoek–Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies, *Yer bilimleri*. 26, 77–99.

Ulusay, R. ve Sönmez, H., (2002). Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları* No: 60, Ankara, 243s.

Yılmaz, O., Gündoğdu, M. ve Gümüş, S. (1982). Neojen Yaşlı Bigadiç Volkanosedimanter Havzasının Jeolojisi, *Etibank Proj.* (Yayımlanmamış).

Yılmaz, İ. (1977). Bigadiç bölgesi bazaltik volkanizmasının mutlak yaşı: *Doğa Tem. Bil.* 1, 210-212.

Yudbir, F., Lemanza, W., Prinzel, F. (1983). An empirical failure criterion for rock masses. *In: Proc. 5th Int. Cong. ISRM, Melbourne*, vol 1. Balkema, Rotterdam, pp 131–138.