

**Matriks İçinde Blok İçeren Kayaların Makaslama Dayanımının
Belirlenmesi İçin Fiziksel Model Esaslı Bir Araştırma**

A Physical-based Model Investigation for Determination of Shear Strength
of Block in Matrix Rocks

Hakan Altınsoy

Hacettepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetmeliğinin
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Mayıs, 2006

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Bu çalışma jürimiz tarafından **JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda**
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Vedat DOYURAN

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Harun SÖNMEZ

Üye : Prof. Dr. Reşat ULUSAY

Üye : Doç. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tolga ÇAN

ONAY

Bu tez/...../2006 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu'nca belirlenen jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

...../...../ 2006

Prof. Dr. Ahmet R. ÖZDURAL
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜR

Matriks İçinde Blok İçeren Kayaların Makaslama Dayanımının Belirlenmesi İçin Fiziksel Model Esaslı Bir Araştırma

Hakan Altınsoy

ÖZ

Zayıf matriks tarafından kuşatılan kaya bloklarından oluşan mekanik ve/veya konusal olarak heterojen kaya kütleleri, bimrocks (block-in-matrix-rocks) olarak değerlendirilirler. Bimrocklardan laboratuvar çalışmalarında kullanılmak üzere standart karot örnek hazırlayabilmek çoğu kez olanaksızdır. Bu nedenle bu kayalarda, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımı gibi mekanik parametrelerin belirlenmesi oldukça güçtür. Bimrocklar üzerinde laboratuvar çalışmaları ve ampirik yöntemleri konu alan çalışmalar literatürde az olmasına rağmen, mevcut ampirik ilişkilerin sınırlamaları nedeniyle kaya mekaniği alanında yaygın olarak kabul gören ampirik bir yaklaşım da yoktur. Bu tezde, laboratuvar çalışmalarıyla bir veritabanı oluşturulmuştur. Tek eksenli ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri için yapay bimrock örnekleri hazırlanmıştır. Farklı oranlarda alçı, çimento, bentonit ve su karışımlarıyla farklı dayanımlara sahip matriks malzemeleri hazırlanmıştır. Andezit ve tuf blokları santimetre boyutlarında kırılarak bloklar oluşturulmuş ve matriks ile karıştırılarak yapay bimrock örnekleri hazırlanmıştır. Yapay matriks ve farklı hacimsel blok oranına sahip yapay bimrock örnekleri üzerinde tek eksenli ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Kaya mekaniğinde yaygın olarak kullanılan Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown yenilme ölçütlerini esas alan ampirik eşitliklerin geliştirilmesi için laboratuvar deney sonuçları kullanılarak bir dizi istatistiksel analizler yapılmıştır. Hoek-Brown yenilme ölçütünün dikkate alındığı ampirik eşitliklerle Mohr-Coulomb modeline kıyasla biraz daha iyi bir performans elde edilmiştir. Son aşamada, genel amaçlı kullanımlarda bimrockların dayanımlarının belirlenmesi için bir sınıflama önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bimrock, dayanım, Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Yapay kaya

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Harun SÖNMEZ, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

A Physical-based Model Investigation for Determination of Shear Strength of Block in Matrix Rocks

Hakan Altınsoy

ABSTRACT

Mechanically and/or spatially heterogeneous rock masses are composed of relatively rock inclusions surrounded by weaker matrix, and may be considered bimrocks (block-in-matrix-rocks). It is almost impossible to prepare standard core samples from bimrocks in order to perform laboratory studies. Therefore, for these rocks, determination of the mechanical parameters such as cohesion, friction angle and uniaxial compressive strength is extraordinarily challenging. Although there is sparse literature describing empirical and laboratory studies on bimrocks, there is no widely accepted empirical approach by the rock mechanics community due to the limitations of the existing empirical equations. In this study, an exhaustive database was developed by laboratory studies. Artificial bimrocks were prepared in laboratory for uniaxial and triaxial compression testing. Plaster of Paris, cement, bentonite and water were mixed in different ratios to fabricate matrix types with various strengths. In addition, natural tuff and andesite blocks, fragmented to centimeter sizes to create blocks, were mixed with matrix materials to create artificial bimrocks. Uniaxial and triaxial compression tests were conducted on specimens of pure matrix and artificial bimrock mixes having different volumetric block proportions. A series of regression analyses were performed using laboratory determined strength data to develop an empirical approach for estimating the overall strength of bimrock mass, by incorporating the Mohr-Coulomb strength model and the Hoek-Brown empirical criterion, both of which are widely used in rock engineering. The empirical approach based on the Hoek-Brown empirical equations was found to yield a slightly better predictive performance than the empirical approach based on the Mohr-Coulomb model. In the final stage, a classification is proposed to be used for determination of the strength of bimrocks for general purposes.

Key words : Bimrock, strength, Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, artificial rock

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Harun SÖNMEZ, Hacettepe University, Department of Geological Engineering

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bütün aşamalarında hiçbir zaman bilgi, tecrübe, emek ve ilgisini esirgemeyen, tezin şekillenmesinde ve sonuca ulaşmasında büyük destek ve katkısı olan Sayın Doç. Dr. Harun Sönmez'e (tez danışmanı) içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmanın bazı aşamalarında ve laboratuvar çalışmalarında olan katkısından dolayı Sayın Dr. Ergün Tuncay'a

Çalışmanın laboratuvar aşamasında ki büyük desteğinden dolayı sayın jeoloji mühendisi Betül Algül'e,

Çalışmanın laboratuvar aşamasında ki katkılarından dolayı Sayın Ahmet Bay ve Sayın Özgür Erol'a,

Değerli katkılarından dolayı tez jüri üyelerine,

Ayrıca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme,

İçtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa No.
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Bimrockların Karakterizasyonunu Konu Alan Çalışmalar	4
2.2. Bimrockların Dayanım ve Deformasyon Davranışlarını Konu Alan Çalışmalar..	16
3. YAPAY MATRİKS VE BİMROCK ÖRNEKLERİNİN HAZIRLANMASI	37
3.1. Yapay Matriks Örneklerinin Hazırlanması	39
3.2. Yapay Matriks Üzerinde Gerçekleştirilen Birim Hacim Ağırlık Deneyleri	41
3.3. Yapay Matriks Üzerinde Gerçekleştirilen Tek Eksenli ve Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri	41
3.4. Yapay Bimrock Örneklerinin Hazırlanması	42
3.5. Yapay Bimrock Üzerinde Gerçekleştirilen Birim Hacim Ağırlık Deneyleri	44
3.6. Yapay Bimrock Üzerinde Gerçekleştirilen Tek Eksenli ve Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri	44

4. BİMROCKLARIN YENİLME DAVRANIŞININ MODELENMESİ	47
4.1. Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütünün Dikkate Alındığı Değerlendirmeler	47
4.1.1. A Grubu Örneklerin Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütüyle Değerlendirilmesi	50
4.1.2. B Grubu Örneklerin Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütüyle Değerlendirilmesi	57
4.1.3. Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütüne Göre Önerilen Ampirik Eşitliklerin Performans Değerlendirmesi	65
4.2. Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün Dikkate Alındığı Değerlendirmeler	66
4.2.1. A ve B Grubu Örneklerin Hoek-Brown Yenilme Ölçütüyle Değerlendirilmesi	72
4.3. Ampirik Eşitliklerin Karşılaştırmalı Performans Analizleri	72
5. BİMROCKLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN KESTİRİLMESİNE YÖNELİK GENEL BİR YAKLAŞIM	76
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No.
Şekil 2.1. Ankara (Mamak) bölgesindeki aglomeralara ait gri spektrumdaki fotoğrafın (a) orjinal ve (b) sınıflandırılmış görüntüleri (Sönmez vd. 2005'den).	6
Şekil 2.2. Ankara (Kızılcağöy) bölgesindeki aglomeralara ait RGB formatındaki renkli fotoğrafın (a) orjinal ve (b) sınıflandırılmış görüntüleri (Sönmez vd. 2005'den).....	7
Şekil 2.3. Ankara (Mamak) bölgesindeki aglomera fotoğrafında nokta sayma yöntemi ile bileşen oranlarının belirlenmesi (Sönmez vd., 2005'den).....	8
Şekil 2.4. Bir bloğun en büyük gözlenen boyutu (measured observed dimension, d_{mod}) kavramı (Medley, 2001 ve Medley, 2002'den).....	9
Şekil 2.5. Franciscan melanjında belirli bir alandaki blok boyutu ölçümleri (fotoğraf alanında bütün olarak gözlenen bloklar ölçülmüştür) (Medley and Lindquist, 1995 ve Medley, 2004'den)	10
Şekil 2.6. Franciscan melanjında ölçülen en büyük blok boyutu (d_{mod}) değerlerinin (a) aritmetik histogram ve (b) logaritmik çizgisel dağılımı (Medley and Lindquist, 1994 ve Medley 2004'den)	11
Şekil 2.7. Franciscan melanjında ölçülen en büyük boyut değerlerinin (d_{mod}) farklı ölçüm alanlarının (A) kareköküne bölünmesi ile elde edilen dağılım (Medley, 1994 ve Medley, 2004'den)	13
Şekil 2.8. (a) Franciscan melanjındaki haritalanabilir boyuttaki (d_{mod}) blokların dağılımı, (b) blok boyutlarının (d_{mod}) frekans dağılımı (Medley, 1994'den)	14
Şekil 2.9. Melanjlarda ölçüm alanının karekökü ile normalize edilerek belirlenen ölçekten bağımsız blok boyutu dağılımı (Medley, 1994'den).....	15
Şekil 2.10. Redimüller et al. (2001) tarafından fay kökenli (tektonik) bimrockların sınıflanması için önerilen akış diyagramı.....	16
Şekil 2.11. Lindquist (1994), tarafından hazırlanan 30 cm yüksekliğinde ve 15 cm çapında model Bimrock karot örneği.	17
Şekil 2.12. Blok yönelimi ve oranlarının dayanım üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla Lindquist (1994) tarafından hazırlanan modellerin şematik gösterimi.....	18

Şekil 2.13. Lindquist (1994)'ün hazırladığı model Bimrock'larda hacimsel blok oranı ile (a) içsel sürtünme açısı ve (b) kohezyon arasındaki ilişki.....	20
Şekil 2.14. Model Bimrock karot örneğinde yenilme yüzeyinin gelişimi (Lindquist, 1994'den).....	21
Şekil 2.15. Hacimsel blok oranı ile içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki (Medley, 2001'den).....	21
Şekil 2.16. Medley and Rehmannn (2003) tarafından hipotetik olarak oluşturulan şev profilinin tümüyle matriks malzemesinden oluşması durumunda gerçekleştirilen duraylılık analizi.....	23
Şekil 2.17. Hipotetik şev modeli içerisinde konumlandırılmış dörgen şekilli bloklarla oluşturulan farklı blok oranına sahip modeller (Medley and Rehmannn, 2003'den).....	23
Şekil 2.18. Analiz sırasında denenen yüzeylerin oluşturulması (Medley and Rehmannn, 2003'den)	24
Şekil 2.19. Hipotetik modellerden elde edilen blok oranı ile güvenlik katsayısı arasındaki ilişki (Medley and Rehmannn 2003'den)	24
Şekil 2.20. Gölçeoğlu et al. (1998) tarafından Ankara Aglomasında bileşen içeriğine bağlı olarak (a) Pembe andezit, (b) Siyah andezit ve (c) Tüf matriks ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında belirlenen ilişkiler.....	26
Şekil 2.21. Ankara Aglomasının bileşen içeriğine bağlı olarak dayanımın kestirimine yönelik çoklu regresyon ile belirlenen eşitliğin tahmin performansı (Gökçeoğlu et al., 1998).....	26
Şekil 2.22. Aglomera örneklerinin üçgen petrografik sınıflama abağı üzerindeki dağılımı (Sönmez vd., 2005'den).....	28
Şekil 2.23. Ankara aglomeraları için üçgen petrografik sınıflama abağı (Gökçeoğlu, 2002'den).....	28
Şekil 2.24. Ankara aglomasının tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi için bulanık tabanlı olarak oluşturulan üçgen abak (Sönmez vd., 2005 ve Sönmez et al. 2004'den).....	29

Şekil 2.25. Blok matriks kontağının kaynaşmış olduğu bimrockların tek eksenli sıkışma dayanımı-eşdeğer blok oranı-dayanım kontrastı arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Sönmez et al., 2004 ve Sönmez et al. 2006'den)	31
Şekil 2.26. Ankara aglomerasına ait birleştirilmiş parametre ile elastisite modülü arasındaki ilişki (Sönmez vd., 2005'den)	33
Şekil 2.27. Eş. 1.6a no.lu ampirik ilişkiye göre hazırlanan E_i tahmin abağı (BPI eksenli Gökçeoğlu, 1997'den alınmıştır) (Sönmez vd., 2005'den).....	34
Şekil 2.28. Deere ve Miller (1966)'nın modül oranı abağı ve Eş. 1.6a nolu ampirik ilişki kullanılarak oluşturulan E_i kestirim abağı (BPI eksenli Gökçeoğlu, 1997'den alınmıştır) (Sönmez vd., 2005'den)	35
Şekil 2.29. Deere ve Miller (1966)'nın modül oranı abağı ve Eş. 1.6b nolu ampirik ilişki kullanılarak oluşturulan E_i kestirim abağı (BPI eksenli Gökçeoğlu, 1997'den alınmıştır) (Sönmez vd., 2005)	36
Şekil 3.1. Andezit ve tuf kaya malzemesi örnekleme lokasyonları	38
Şekil 3.2. Yapay matriksin hazırlanmasında kullanılan (a) karışım malzemeleri, (b) karışım harcı, (c) 54 mm çaplı ve 110 mm yüksekliğindeki silindirik kalıbın içerisine karışımın konulması ve (d) havada kurutulmak için kalıplardan dışarı alınan örnekler	40
Şekil 3.3. Alçı-Çimento-Bentonit oranı %45-%0-%5 olan silindirik yapay matriks karot örneğinin zamana bağlı olarak ağırlık değişimi	40
Şekil 3.4. Yapay bimrockın hazırlanmasında kullanılan (a) karışım malzemeleri, (b) matriks karışımı, (c) ve (d) matriks ve blok karışımı, (e) 54 mm çaplı ve 110 mm yüksekliğindeki silindirik kalıbın içerisine karışımın konulması ve (e) havada kurutulmak için kalıplardan dışarı alınan örnekler	43
Şekil 3.5. Yapay bimrock örneklerinin birim hacim ağırlıklarının hacimsel blok oranına göre değişimi	45
Şekil 3.6. Yapay bimrock örnekleri üzerinde uygulanan üç eksenli deneyden bir görünüm.....	46
Şekil 4.1. (a) p-q yönteminin esası ve (b) çok sayıda üç eksenli deney sonuçlarından genelleştirilmiş yenilme zarfının belirlenmesini gösteren tipik p-q grafiği (Fell and Jeffery, 1987'den).....	49

Şekil 4.2. A_A grubu örneklerin hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.....	53
Şekil 4.3. A_T grubu örneklerin hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.....	54
Şekil 4.4. A_A ve A_T grubu örneklerin birlikte değerlendirildiği hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.....	56
Şekil 4.5. B_A grubu örneklerin hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.	58
Şekil 4.6. B_T grubu örneklerin hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.....	61
Şekil 4.7. B_A ve B_T grubu örneklerin birlikte değerlendirildiği hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.....	62
Şekil 4.8. A ve B grubu örneklerin tümünün birlikte değerlendirildiği hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.....	63
Şekil 4.9. Lindquist (1994)'e ait veriler üzerinde tez çalışmasında Mohr-Coulomb parametrelerinin tahmini için önerilen ampirik eşitliklerin (Eş. 4.10) performansı	67
Şekil 4.10. Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown yenilme ölçütlerinin asal gerilmeler türünden grafiksel sunumu (Hoek et al., 1992'den)	69
Şekil 4.11. Matriksin “ m_i ” değerine göre normalleştirilmiş (a) A grubu, (b) B grubu, (c) A ve B grubu örneklerin “ m_i ” parametrelerinin hacimsel blok oranına göre değişimi	73
Şekil 4.12. Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown yenilme ölçütlerini temel alarak önerilen ampirik eşitliklerin hata (%) oranına karşılık kümülatif frekans (%) grafiği	74

Şekil 5.1. Geniş çaplı (15 cm) Ankara aglomerası karotları ve kırılan bir andezit çakılı (bloğu) (Sönmez vd. 2005'den)	77
Şekil 5.2. (a) çimentolanmamış/kaynaşmamış, (b) çimentolanmış/kaynaşmış bimrockların yenilme zarflarının şematik gösterimi	80
Şekil 5.3. Bimrocklar jeomekanik parametrelerinin belirlenebildiği genel bir sınıflama .	81
Şekil 5.4. (a) Temel (Das, 1999), (b) tünel ve (c) şevlerde EKB'nin belirlenmesinde dikkate alınması önerilen alanlar (A)	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No.
Çizelge 2.1. Gökçeoğlu et al. (1998) tarafından gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinin istatistiksel değerlendirmesi	25
Çizelge 2.2. Sonmez vd. (2005) tarafından kaya malzemelerinde E_i 'nin tahminie yönelik olarak geliştirilen ilişkiler.....	32
Çizelge 3.1. Ankara andezit ve tüf matriks malzemesi üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine ilişkin istatistiksel değerlendirme (Sönmez vd. 2005).....	38
Çizelge 3.2. Farklı karışım oranlarına sahip yapay matriks karotlarının birim hacim ağırlık değerleri.....	41
Çizelge 3.3. Farklı karışım oranlarına sahip yapay matriks karotlarının tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri	41
Çizelge 4.1. A_A grubu örneklerle ilişkin deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmesi.....	52
Çizelge 4.2. A_T grubu örneklerle ilişkin deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmesi.....	52
Çizelge 4.3. B_A grubu örneklerle ilişkin deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmesi.....	59
Çizelge 4.4. B_T grubu örneklerle ilişkin deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmesi.....	59
Çizelge 4.5. Lindquist (1994) tarafından yapay bimrocklar üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleriyle belirlenen hacimsel blok oranı (HBO), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve blokların uzun eksenli ile düşey arasındaki açı (α)	65
Çizelge 4.6. Hoek-Brown ampirik yenilme ölçütünün günümüzdeki şekli	70

1. GİRİŞ

Barajlar, tüneller, şevler ve temeller gibi mühendislik yapılarının inşası sırası ve sonrasında jeolojik kütle içerisinde meydana gelen gerilme değişimleri, kimi zaman jeolojik ortamın içerisinde yenilmeyle sonuçlanabilecek boyutlarda deformasyonlar oluştururlar. Bu nedenle, mühendislik yapılarının tasarımında jeolojik kütleyi temsil eden dayanım ve deformasyon parametrelerine gereksinim duyulur. Kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon parametreleri uluslararası standartlarda belirtilen özelliklerdeki yüksek kaliteye sahip karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleriyle belirlenebilmektedir. Jeolojik malzemeler, oluşum süreçlerine bağlı olarak, çeşitlilikler sunarlar. Homojen ve izotrop jeolojik malzemelerden hazırlanan karot örnekleri laboratuvar deneyleri için yeterli olurken, özellikle sık eklemlili, ince tabakalı ve zayıf bir matriks içinde bloklar içeren kaya malzemelerinden temsil edici ve uluslararası standartlarda önerilen boyutlarda örnek hazırlanması çoğu kez mümkün olamamakta veya sınırlı sayıda örnek hazırlanabilmektedir. Dayanım ve deformasyon parametrelerinin belirlenmesi için önerilen laboratuvar deneyleri için gerekli yüksek kalitedeki karot örneklerinin hazırlanamadığı durumlarda plaka yükleme, presiometre, yassı veren ve dilatometre gibi bazı yerinde deneylerin de uygulanması söz konusudur. Ancak bu deneylerin uygulanabilmesi için zaman alan ön hazırlıkların gerekmesi, önem derecesi yüksek mühendislik tasarımları dışında, tercih edilmemelerini de beraberinde getirmektedir.

Kaya kütlelerinin içerdikleri süreksizlik ağıyla birlikte kütleli anlamda dayanım ve deformasyon parametrelerinin belirlenmesine yönelik literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur (Hoek and Brown, 1980; Serafim and Pereira, 1983; Bieniawski, 1989; Nicholson and Bieniawski, 1990; Mitri et al., 1994; Hoek and Brown, 1997; Sönmez and Ulusay, 1999; Barton, 2002; Hoek et al., 2002; Sönmez and Ulusay, 2002; Gökçeoğlu et al., 2003; Kayabaşı et al., 2003; Sönmez et al., 2004; Sönmez et al., 2006; Sönmez and Gökçeoğlu, 2006). Buna karşın zayıf bir bağlayıcı içerisinde bloklar içeren kayaların dayanımlarının belirlenmesi amacıyla kullanılabilecek herhangi bir ölçüt ve/veya genel bir yöntemle ilgili son yıllarda bazı önemli çalışmalar bulunmakla birlikte, bu anlamda kullanılabilecek genel bir sınıflama ve/veya yöntem henüz mevcut değildir.

ISRM (1981) tarafından dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneylerde uygulanması önerilen yöntemde silindirik karot örneğinin çapının NX (54.7 mm) olması ve boyu ile çapı arasındaki oranın da 2.5 ile 3 arasında değişmesi gerektiği belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, silindirik bir karot örneğinin ait olduğu kütleyi temsil edebilmesi için, örnek çapının, süreksizlikler içeriyorsa ortalama süreksizlik aralığının 10 katı, zayıf matriks içinde bloklar/taneler içeriyorsa ortalama tane boyunun 10 katı olması gerekmektedir (ISRM, 1981). Ancak çoğu kez, tez kapsamında yapılacak çalışmaya da konu olan zayıf matriks içinde blok içeren kaya malzemelerinin (**Block-In-Matrix-Rock**, Bimrock) dayanım ve deformasyon parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilecek örneklerin hazırlanması oldukça güç veya tümüyle imkansız olmaktadır. Bu tür problemlerin üstesinden gelebilmek için ampirik (görgül) yaklaşımlar ise, mühendislik jeolojisi pratiğinde yaygın bir biçimde kullanılmakta ve önemli araştırma konuları olarak değerlendirilmektedirler. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında; öncelikle farklı dayanım kontrastına sahip yapay matriksler oluşturulacak ve bloklar kullanılarak yapay bimrock modelleri hazırlanacaktır. Hazırlanan yapay bimrock modelleri üzerinde tek eksenli ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilerek, bimrockların yenilme zarflarının belirlenmesine yönelik ampirik yaklaşımların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çalışma kapsamında, laboratuvarda yapay olarak hazırlanan bimrock modeli ile benzer özellikteki doğal bimrockların dayanımlarının ifade kestiriminde yararlanılabilecek ampirik bir yaklaşım önerilmiştir.

Yukarda verilen amaca bağlı olarak bu yüksek lisans çalışması; literatür, saha, laboratuvar ve büro çalışmaları olmak üzere dört ana başlık altında yürütülmüştür. Literatür çalışması kapsamında, tezin konusuna yönelik yapılmış olan iki adet tez, bir adet araştırma projesi çalışmaları ve çeşitli yayınlara ulaşılmıştır. Saha çalışmaları kısmında ise, yapay bimrock modellerinin hazırlanmasında blok malzemesi olarak kullanılan tuf ve andezit blok örnekleri Ankara kentinin Altındağ ve Topraklık semtlerinden alınmıştır. Laboratuvar çalışmalarında öncelikle; alçı, çimento, bentonit ve su kullanılarak değişik karışımlar hazırlanmış ve bu karışımlardan hazırlanan karot örnekler üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçları dikkate alınarak iki farklı dayanıma sahip matriks karışım oranları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, bu iki farklı matriks içerisine tuf ve andezit blok

örnekleri karıştırılarak yapay bimrock karot örnekleri hazırlanmış ve bu karot örnekler üzerinde tek eksenli ve üç eksenli dayanım deneyleri yapılmıştır. Büro çalışmalarında ise, laboratuvarından elde edilen sonuçlar Mohr-Coulomb ve Hoek ve Brown yenilme ölçütleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve bu iki ölçütü esas alan ampirik ilişkiler önerilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında ise, Reidmüller et al. (2001) tarafından önerilen sınıflama esas alınarak bimrocklar için kullanılabilecek genel bir jeomekanik sınıflama ve buna bağlı olarak bimrockların dayanımlarının tahminine yönelik bir yaklaşım önerilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Zayıf bir bağlayıcı (matriks) malzeme içerisinde blok içeren kayaların dayanım ve deformasyonlarının belirlenmesine yönelik önemli bulgular içeren çalışmaların derlendiği literatür çalışması kapsamında, iki doktora tezi, bir araştırma projesi ile sınırlı sayıda makale ve bildiriye ulaşılmıştır. Bimrockları inceleme malzemesi olarak kullanan mühendislik jeolojisi çalışmaları, blok ve matriks oranının hacimsel olarak belirlenmesi ile dayanım ve deformasyonun belirlenmesine yönelik çalışmalar olmak üzere iki ana konu üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle, tezin bu bölümünde öncelikle bimrockların karakterizasyonuna yönelik çalışmalar verilmiş, daha sonra ise dayanım ve deformasyon davranışını konu alan çalışmalar özetle sunulmuştur.

2.1. Bimrockların Karakterizasyonunu Konu Alan Çalışmalar

Melanj: İç devamlılıklarının olmadığı ve egzotik (karmaşık), yerli ince taneli malzeme veya parçanmış matriksin içine gömülü her boyutta blok ve parçaların katılımıyla karakterize edilen 1:24.000 veya daha küçük ölçekte haritalanabilir bir kaya kütlesidir. (Raymond 1984). Melanjları da kapsayacak bir genel tanımlama olarak, zayıf matriks içinde büyük ve sağlam blokların yer aldığı kayalar bimrock (blok-in-matrix-rock) olarak değerlendirilebilir (Medley, 1994). Ayrıca herhangi bir zayıf matriks içinde blok içeren kayacın jeomekanik anlamda bimrock olarak nitelendirilebilmesi için içerdiği blok ve matriks bileşenlerinin dayanım ve deformasyon modülü oranlarının en az 2 olması gerektiği de Lindquist and Goodman (1994) ve Medley (1994) tarafından belirtilmektedir. Lindquist and Goodman (1994) ile Medley and Goodman (1994) iri taneli piroklastik kayaları (aglomeralar), konglomeraları, breşleri ve fay zonlarındaki makaslamaya maruz kalmış kayaları da diğer bimrock örnekleri olarak göstermektedirler.

Medley (1994) ve Medley and Goodman (1994), melanjlar ve bimrock benzeri kayalarda hacimsel blok oranının belirlenmesinde karşılaşılan problemleri ortaya koyan ve çözüm yaklaşımlarını kapsayan çalışmalarında, sondaj karotlarından (tek boyuttaki değerlendirme) hacimsel blok oranına (üç boyuttaki değerlendirme) geçilmesi için çok sayıda sondaja gereksinim olduğunu vurgulamaktadırlar. Bu nedenle, tek boyutlu

(sondaj veya hat etüdü) değerlendirmelerin önemli bir sınırlamaya sahip olduğu ve pratikte önemini yitirdiğini belirtmektedirler.

Sönmez et al. (2004) ve Sönmez vd. (2005) Ankara aglomeralarındaki andezit bloklarının belirlenmesine yönelik olarak gri ve renkli (RGB) fotoğraflar üzerinde foto analiz çalışmalarıyla birlikte nokta sayma yöntemini de uygulamışlardır (Şekil 2.1, 2.2 ve 2.3). Bu çalışmalar iki boyutu (2D) çalışmalar olup, ancak blok şekli açısından eş boyutlu blokların matriks içinde bulunması durumunda hacimsel blok oranına eşit olarak alınabileceği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Araştırmacılar aksi durumlarda, aynı bimrock kütlesi için farklı yönlerden alınmış görüntüler üzerinde çalışılması gerektiğini de belirtmişlerdir.

(a)



(b)

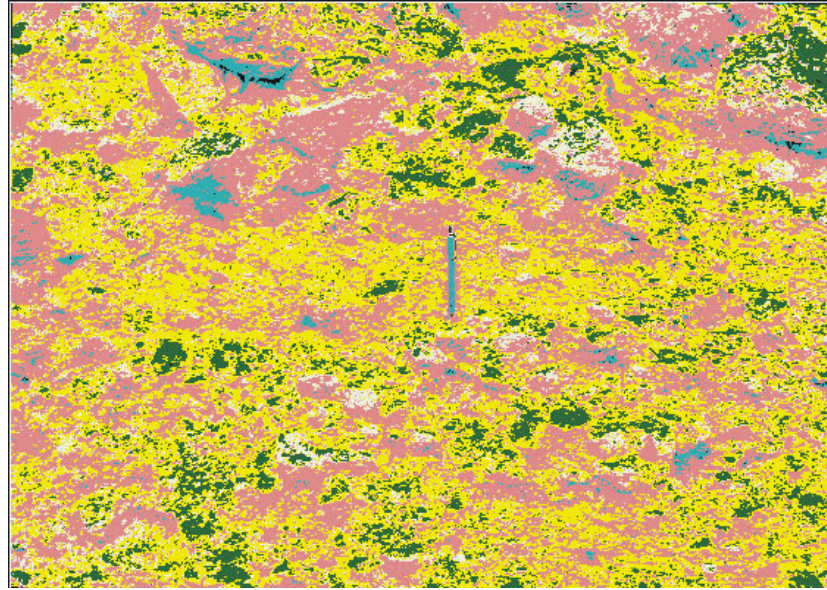


Şekil 2.1. Ankara (Mamak) bölgesindeki aglomeralara ait gri spekturumdaki fotoğrafın (a) orjinal ve (b) sınıflandırılmış görüntüleri (Sönmez vd. 2005'den).

(a)



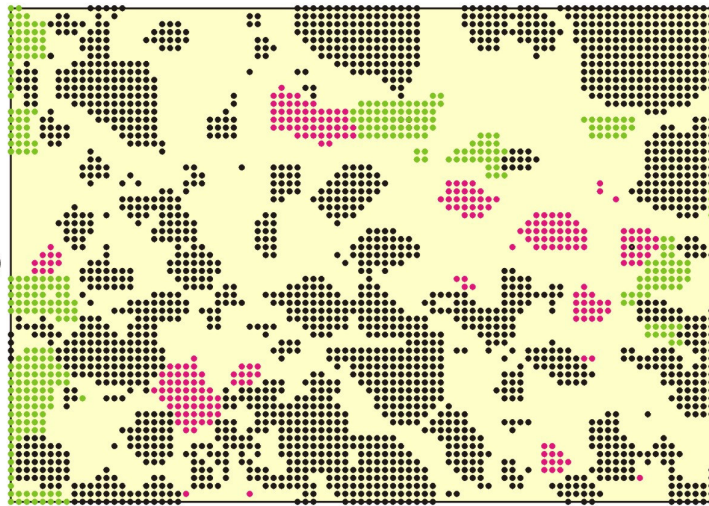
(b)



Şekil 2.2. Ankara (Kızılcaköy) bölgesindeki aglomeralara ait RGB formatındaki renkli fotoğrafın (a) orjinal ve (b) sınıflandırılmış görüntüleri (Sönmez vd. 2005'den).

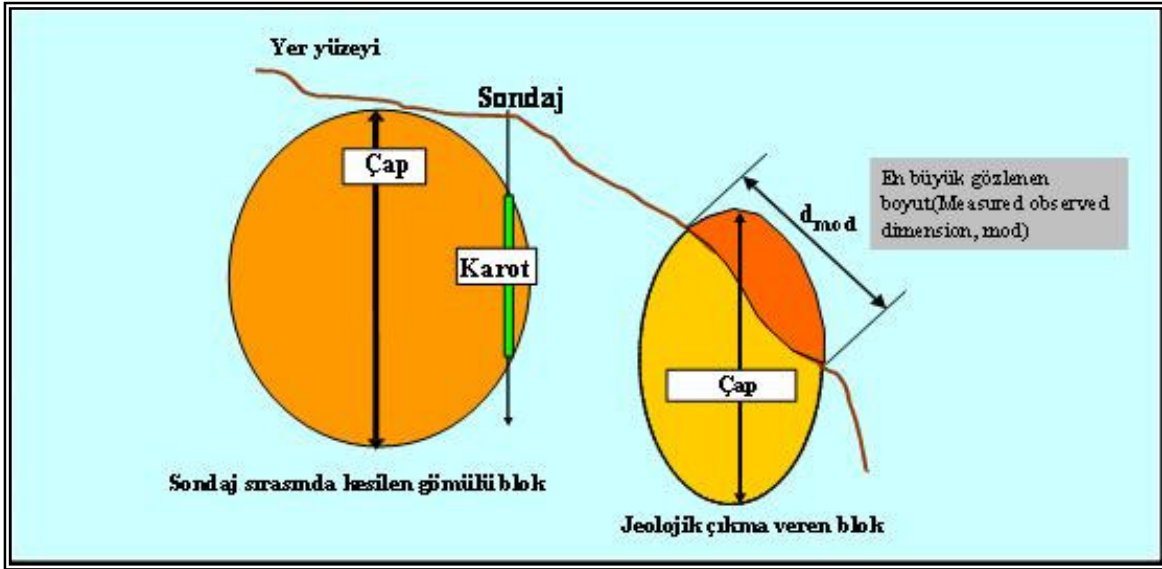


Toplam düğüm sayısı :5733
 Tanımlanamayan düğüm sayısı :351
 Tanımlanan düğüm sayısı :5382
 Pembe andezit üzerindeki düğüm sayısı :253 (%4.7)
 Siyah andezit üzerindeki düğüm sayısı :2205 (%41)
 Tuf matrisi üzerindeki düğüm sayısı :2924 (%54.3)
 • Tanımlanamayan düğüm
 • Siyah andezit üzerindeki düğüm
 • Pembe andezit üzerindeki düğüm

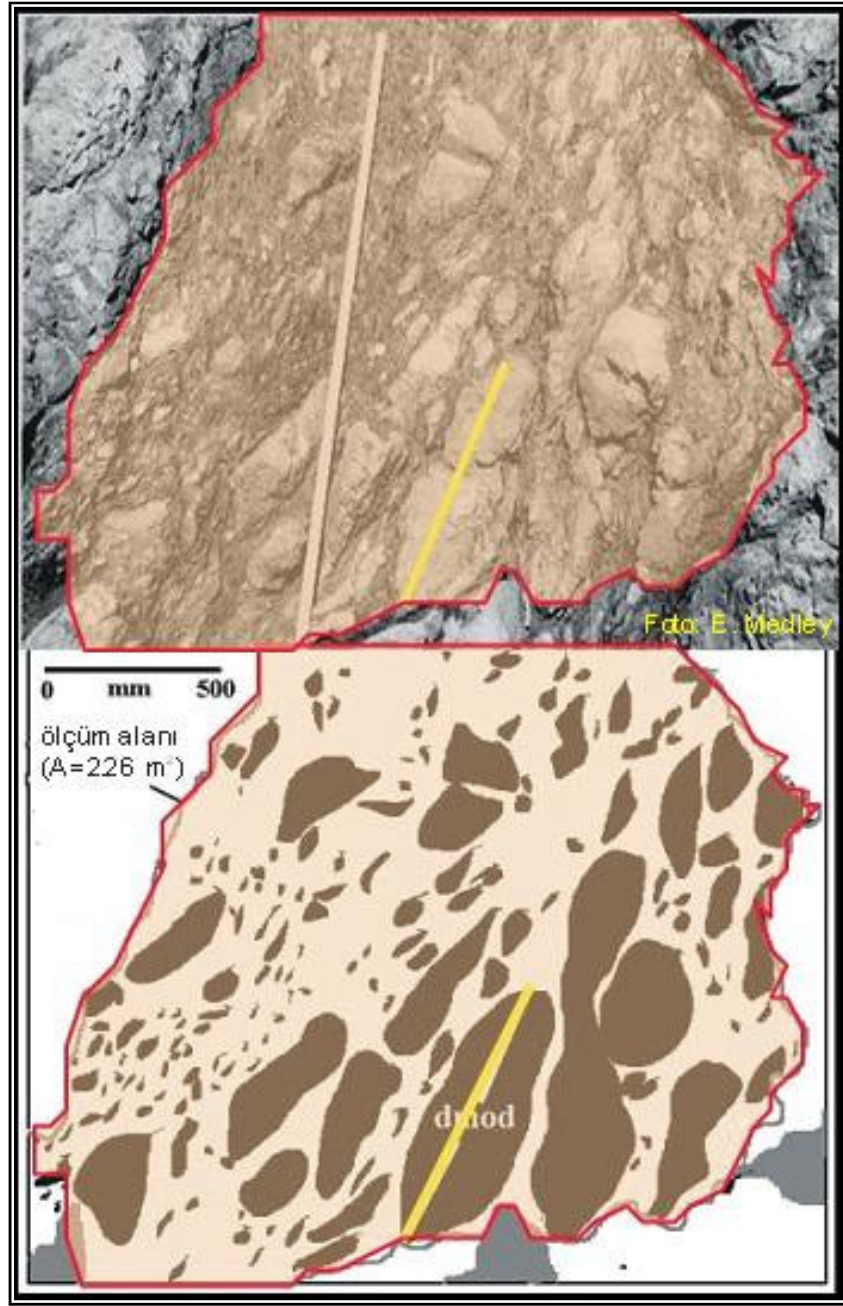


Şekil 2.3. Ankara (Mamak) bölgesindeki aglomera fotoğrafında nokta sayma yöntemi ile bileşen oranlarının belirlenmesi (Sönmez vd., 2005'den).

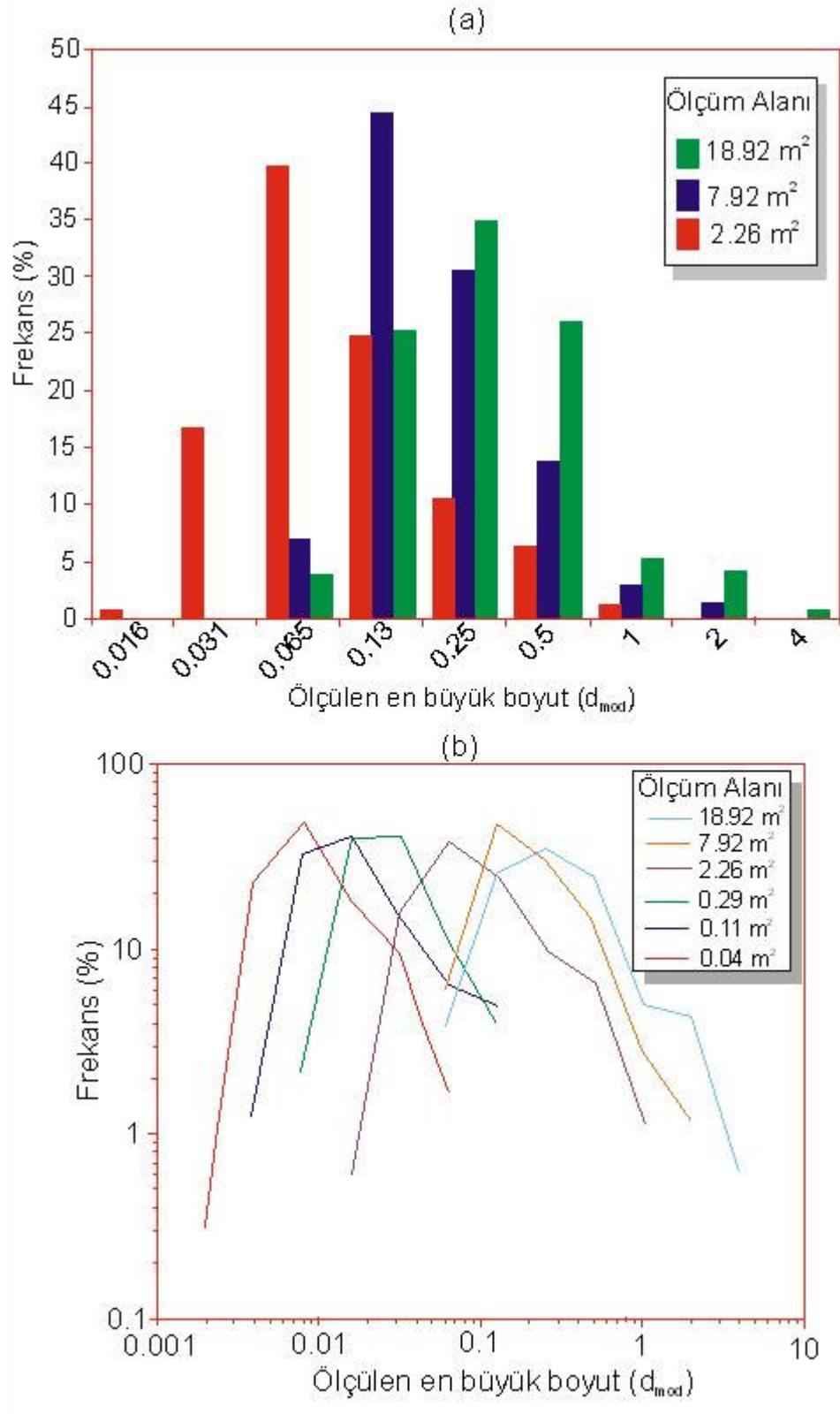
Medley and Lindquist (1995) tarafından ortaya konulan ve bu konuda ilgili literatürde oldukça önemli bir yer tutan çalışmalarında, melanj ve benzeri kaya ortamlarının mühendislik tasarımının boyutlarıyla ifade edilebilen ölçekten bağımsız bir blok dağılımı ve içeriğine sahip olduklarını ortaya koymuşlardır. Medley and Lindquist (1995), Medley (2001) ve Medley (2002), blokların boyutlarının belirlenmesinde, her bloğun sadece gözlenen en büyük boyutunun (measured observed dimension, d_{mod}) ölçülebileceğini belirtmişlerdir (Şekil 2.4). Medley and Lindquist (1995) Franciscan melanjında (ABD) farklı büyüklükteki alanların içinde (Şekil 2.5), blokların gözlenen en büyük boyutlarını (d_{mod}) ölçmüş ve belirli sınıf aralıkları için histogramlarını çizmişlerdir (Şekil 2.6).



Şekil 2.4. Bir bloğun en büyük gözlenen boyutu (measured observed dimension, d_{mod}) kavramı (Medley, 2001 ve Medley, 2002'den).



Şekil 2.5. Franciscan melanjında (ABD) belirli bir alandaki blok boyutu ölçümleri (fotoğraf alanında bütün olarak gözlenen bloklar ölçülmüştür) (Medley and Lindquist, 1995)



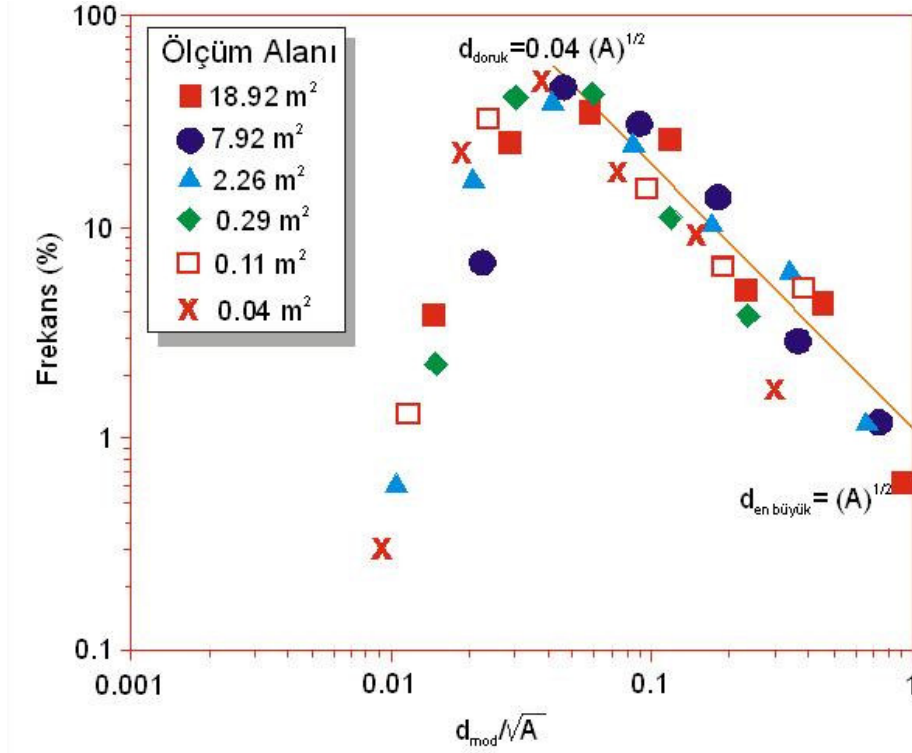
Şekil 2.6. Franciscan melanjında ölçülen en büyük blok boyutu (d_{mod}) değerlerinin (a) aritmetik histogram ve (b) logaritmik çizgisel dağılımı (Medley and Lindquist, 1994)

Medley (1994) ve Medley and Lindquist (1995) blok boyutu dağılımlarının ölçüm alanının artması ile genel karakterini koruyarak ortalama değerinin arttığını belirtmektedirler. Diğer bir ifadeyle, blok boyutu dağılım eğrilerinin ölçüm alanının artmasına koşut olarak, ölçülen blok ekseninde karakterini değiştirmeden sağa doğru kaçtığını ifade etmektedirler. Araştırmacılar, ölçülen en büyük blok değerlerinin ölçüm alanının kareköküne bölünmesi ile tüm dağılım eğrilerinin hemen hemen üst üste çakıştığını belirtmektedirler (Şekil 2.7).

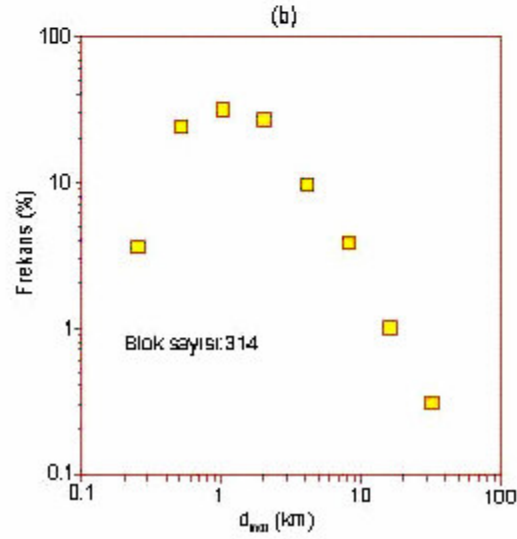
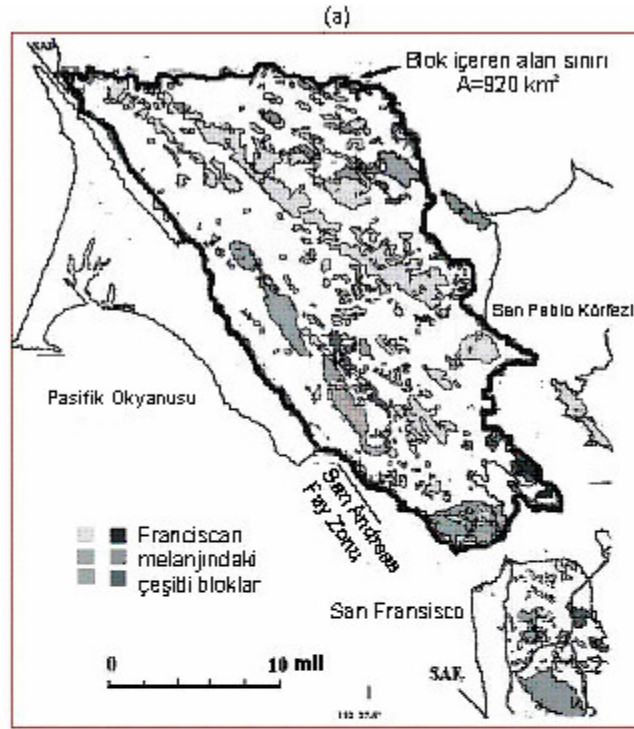
Medley (1994) ve Medley and Lindquist (1995) melanjlarda blok dağılımının genel karakterinin ölçekten bağımsız olduğunu belirtmektedirler (bkz. Şekil 2.6). Bu belirlemelerinin çok daha geniş alanlar içinde geçerli olduğu yönündeki görüşlerini, yaklaşık 920 km²'lik alansal yayılıma sahip Franciscan melanjındaki blokların büyüklüklerini de ölçerek desteklemişlerdir (Şekil 2.8). Şekil 2.8a'da Franciscan melanjının yayılımı ve bu alan içindeki haritalanabilecek boyutlardaki bloklar görülmektedir. Yaklaşık 920 km²'lik bir alan için yapılan değerlendirmede de blok boyutu dağılımının genel karakterinin değişmediğini belirlemişlerdir (Şekil 2.8b).

Medley (1994), 0.01 m²'den 1000 km²'ye kadar değişen alanlardaki blok boyutu ölçümlerini ölçüm alanının kareköküne bölerek normalleştirmiş ve frekans dağılım grafiğini hazırlamıştır. Araştırmacı, küçükten büyüğe doğru bütün ölçüm alanları için elde edilen dağılımların yaklaşık olarak üst üste çakıştığını belirlemiştir (Şekil 2.9). Ayrıca dağılımın $0.05\sqrt{A}$ blok boyutu değerinde en yüksek frekansa ulaştığını gözlemlemiştir. Medley (1994), bu değer ölçüm alanının diğer bir ifadeyle mühendislik yapısının boyutuna bağlı olarak matriks ile blokları birbirinden ayıran eşik değer olarak kabul edilebileceğini belirtmiştir.

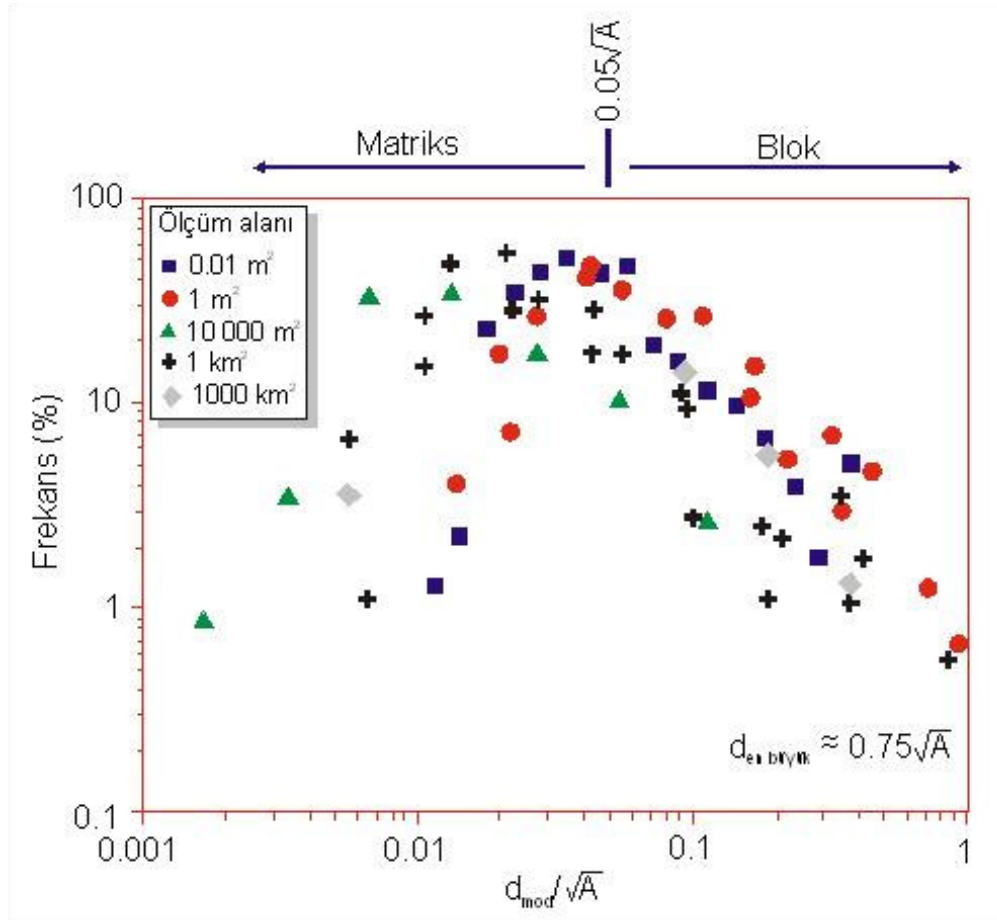
Reidmüller et al. (2001), özellikle tektonik kökenli bimrockların sınıflaması için bir akış diyagramı önermişlerdir (Şekil 2.10). Ancak bu sınıflama jeomekanik anlamda yetersiz kalmıştır.



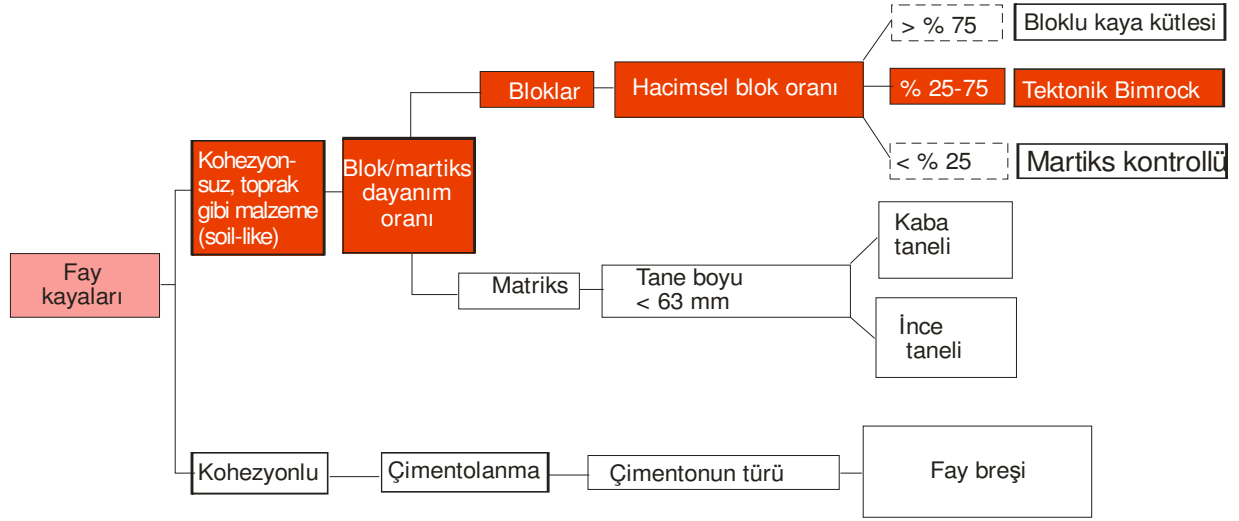
Şekil 2.7. Franciscan melanjında ölçülen en büyük boyut değerlerinin (d_{mod}) farklı ölçüm alanlarının (A) kareköküne bölünmesi ile elde edilen dağılım (Medley, 1994 ve Medley, 2004'den)



Şekil 2.8. (a) Franciscan melanjındaki haritalanabilir boyuttaki (d_{mod}) blokların dağılımı, (b) blok boyutlarının (d_{mod}) frekans dağılımı (Medley, 1994'den)



Şekil 2.9. Melanjlarda ölçüm alanının karekökü ile normalize edilerek belirlenen ölçekten bağımsız blok boyutu dağılımı (Medley, 1994'den)



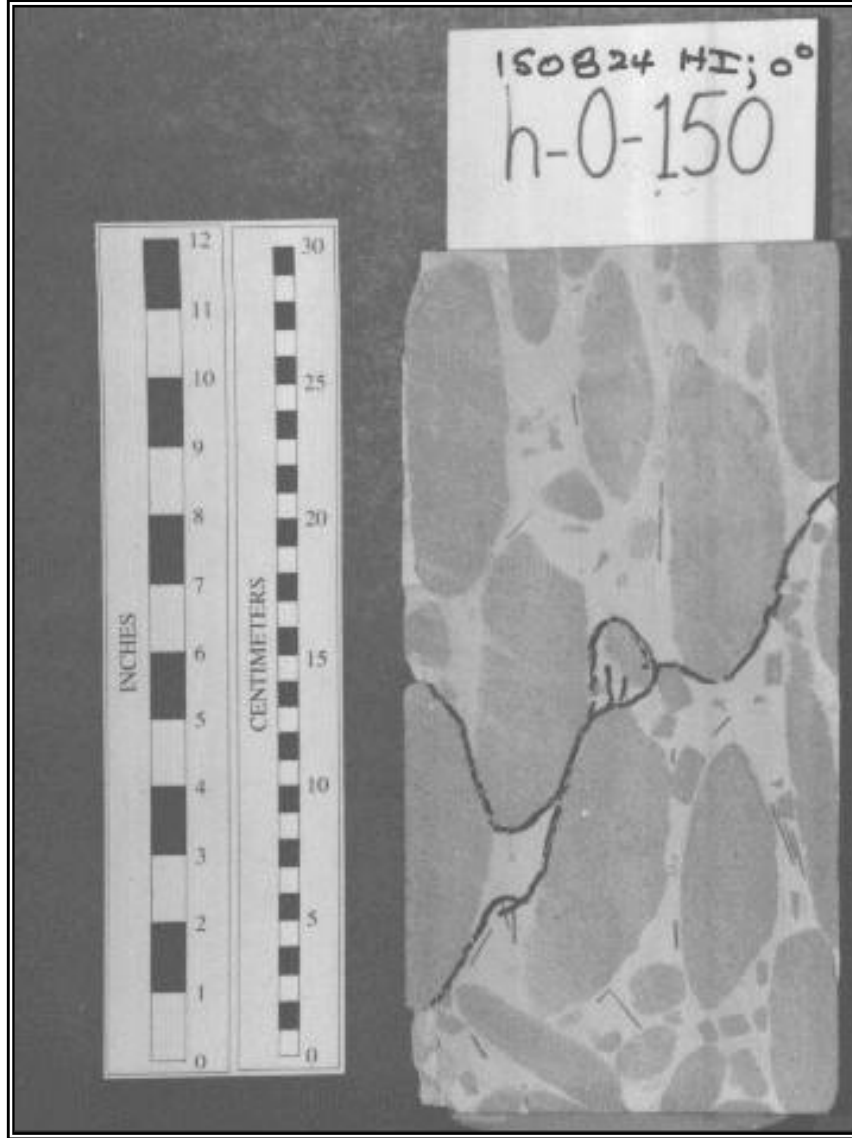
Şekil 2.10. Redimüller et al. (2001) tarafından fay kökenli (tektonik) bimbombların sınıflandırılması için önerilen akış şeması.

2.2. Bimbombların Dayanım ve Deformasyon Davranışlarını Konu Alan Çalışmalar

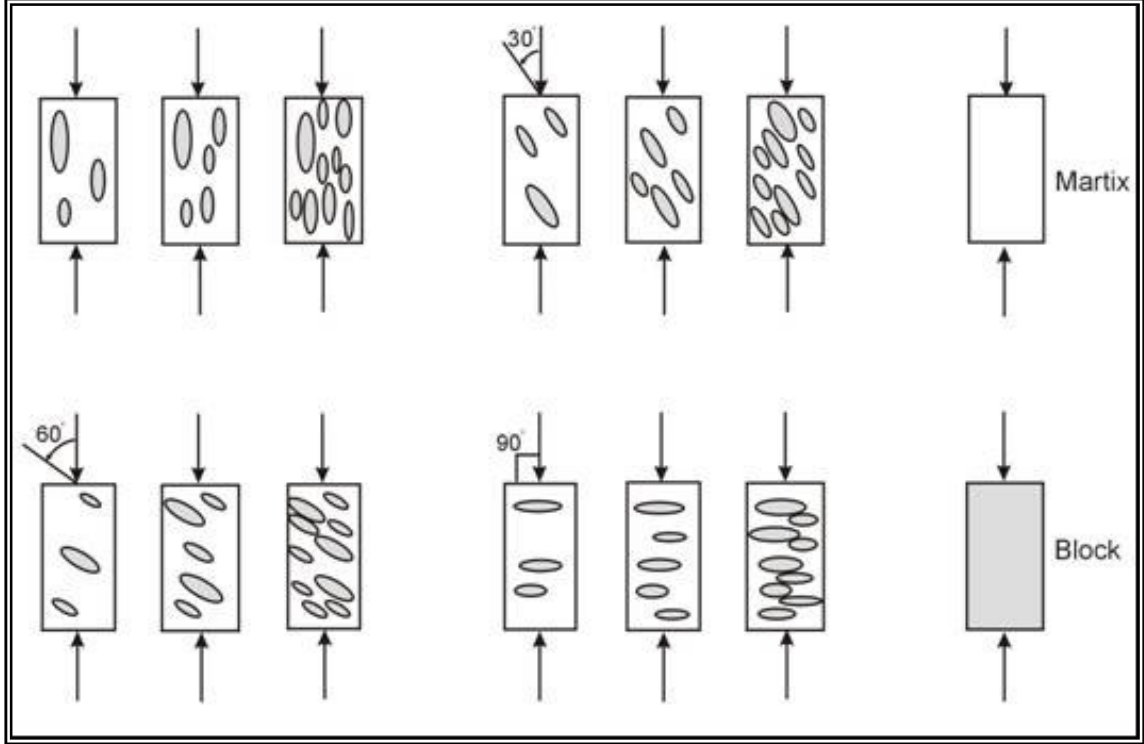
Bedrosian (1978 ve 1980) zayıf bir matriks içerisinde kaya bloklarının bulunduğu jeolojik malzemelerde düşük dayanıma sahip matriksin dayanımının dikkate alınmasının tutucu bir yaklaşım olacağını öne sürmüştür. Bertuccioli and Lanzo (1993), blok/matriks oranının % 20 olduğu Floransa (İtalya)'daki kaya kütlelerinin mekanik davranışının matriks tarafından denetlendiğini ancak, blok/matriks oranının artmasıyla kütlelerin dayanımının da artacağı yönündeki yorumlarını dile getirmişlerdir.

Lindquist (1994) ve Lindquist and Goodman (1994), dayanımı yüksek blokların zayıf bir matriks içinde yer almasından dolayı bu tür kayalardan örselenmemiş karot örnek alınmasının hemen hemen olanaksız olduğunu belirtmektedirler. Bu nedenle, araştırmacılar çalışmalarını model melanjlara üzerine yoğunlaştırmışlardır. Bu amaçla, Lindquist (1994), kum, portland çimentosu ve uçucu kül karışımı ile bloklar hazırlamış ve bağlayıcı (matriks) olarak da bentonit ve portland çimentosu karışımını kullanmıştır (Şekil 2.11). Araştırmacı, dört farklı blok yönelimine sahip modeller oluşturmuş (Şekil 2.12) ve model melanjlardan hazırladığı karot örnekler üzerinde, makaslama dayanımı

parametrelerini (kohezyon, c ve içsel sürtünme açısı, ϕ) belirlemek amacıyla üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ve ayrıca deformasyon karakteristiklerini belirlemek amacıyla elastisite modülü deneyleri yapmıştır.



Şekil 2.11.Lindquist (1994) tarafından hazırlanan 30 cm yüksekliğinde ve 15 cm çapında model Bimrock karot örneği.



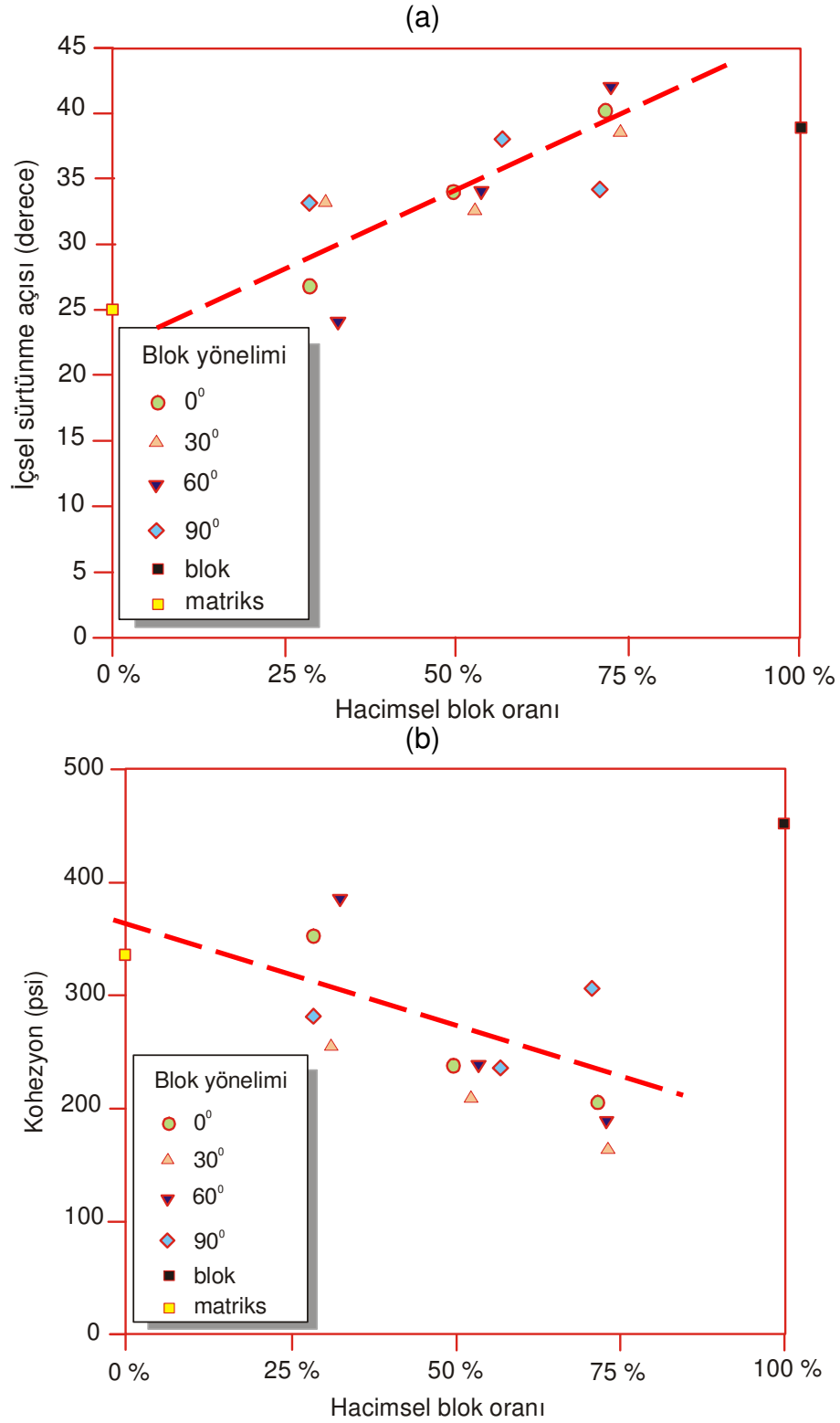
Şekil 2.12. Blok yönelimi ve oranlarının dayanım üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla Lindquist (1994) tarafından hazırlanan modellerin şematik gösterimi.

Lindquist (1994), hacimsel blok oranındaki artışa bağılı olarak, kohezyonda az da olsa bir azalma gözlerken, içsel sürtünme açısının ise arttığını belirlemiştir (Şekil 2.13). Araştırmacı, içsel sürtünme açısındaki benzer bir biçimde hacimsel blok oranındaki artışa koşut olarak elastisite modülünün de arttığını belirlemiştir. En yüksek elastisite modülü değerleri ise, blokların uzun eksenlerinin yükleme yönüne dik yönde olduğu modellerde elde edilmiştir.

Lindquist (1994), içsel sürtünme açısındaki artışın yenilme yüzeyinin pürüzlülüğünün artmasına bağılı olarak geliştiğini belirtmektedir. Yenilme yüzeyi blokların etrafından dolanmakta ve artan hacimsel blok oranına bağılı olarak daha dolambaçlı (pürüzlü) bir yüzey gelişmektedir (Şekil 2.14). Lindquist (1994) tarafından gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki model deneyler ve Scott baraj yerindeki bozunmuş melanja ait içsel sürtünme açısındaki artış (dayanım) ile hacimsel blok oranı arasındaki ilişkide % 25 blok içeriğine kadar dayanımın matriksin dayanımıyla kontrol edildiği, buna karşın dayanımın % 75 blok içeriğine kadar arttığı ve daha fazla blok içeriğinde herhangi bir artışın gözlenmediği belirtilmektedir (Şekil 2.15). Ayrıca, hem model deneyler hem de Scott barajı yerindeki melanj için kabaca dayanım ile hacimsel blok oranı arasındaki ilişkiyi ifade eden doğrular da çizilmiştir. (bkz. Şekil 2.15)

Her ne kadar gerek Lindquist (1994) ve gerekse Medley (2001) tarafından belirtilmese de, iki farklı Bimrock'a (model deneyler ve Scott baraj yerindeki bozunmuş melanj) ait matrikse göre normalleştirilmiş doğrulardaki farklılığın, diğer bir ifadeyle kendi içlerinde uyumlu ancak her iki örnek için farklı doğrularla temsil edilmesinin dayanımın (içsel sürtünme açısının) sadece blok oranına bağılı olarak değil, bu malzemeleri oluşturan bloklar ile matriksin dayanımları arasındaki orandan (kontrast) da kaynaklanabileceği Sönmez vd. (2005) tarafından vurgulanmaktadır.

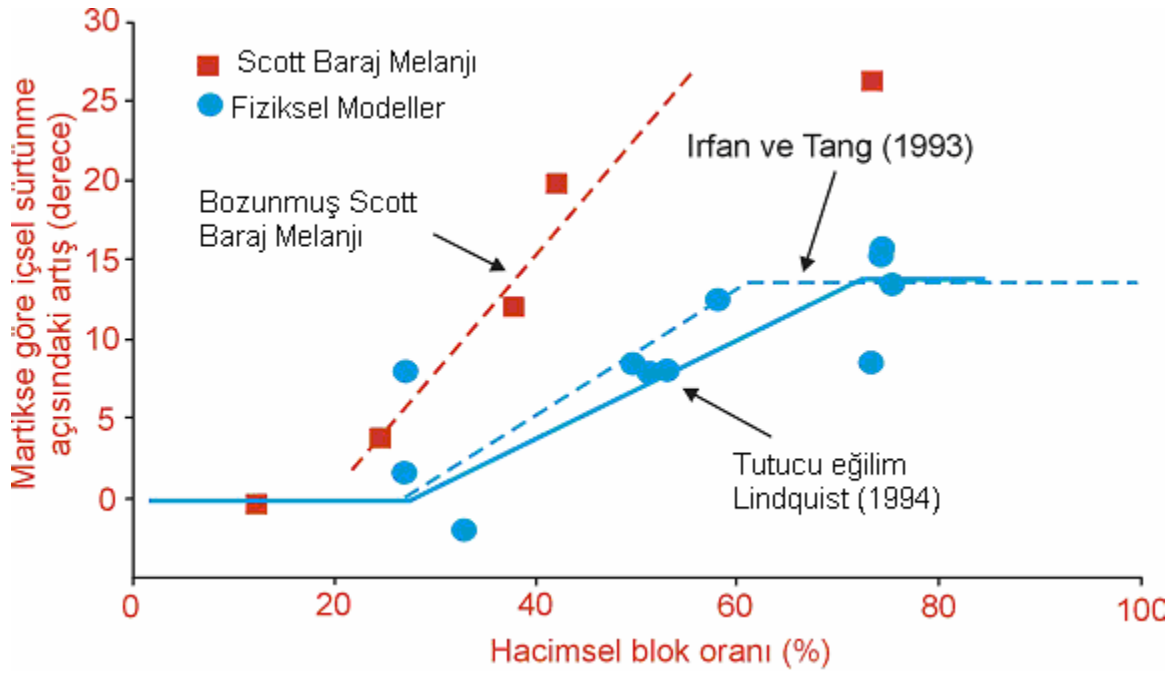
Medley and Rehmann (2003), matriks malzemesi içerisinde dörtgen şeklinde hipotetik bloklardan oluşan hipotetik bir şev modeli için şev duraylılığı analizleri yaparak hacimsel blok oranındaki artışın güvenlik katsayısı üzerindeki etkisini incelemiştir.



Şekil 2.13. Lindquist (1994)'in hazırladığı model Bimrock'larda hacimsel blok oranı ile (a) içsel sürtünme açısı ve (b) kohezyon arasındaki ilişki.



Şekil 2.14. Model bimrock karot örneğinde yenilme yüzeyinin gelişimi (Lindquist, 1994'den).

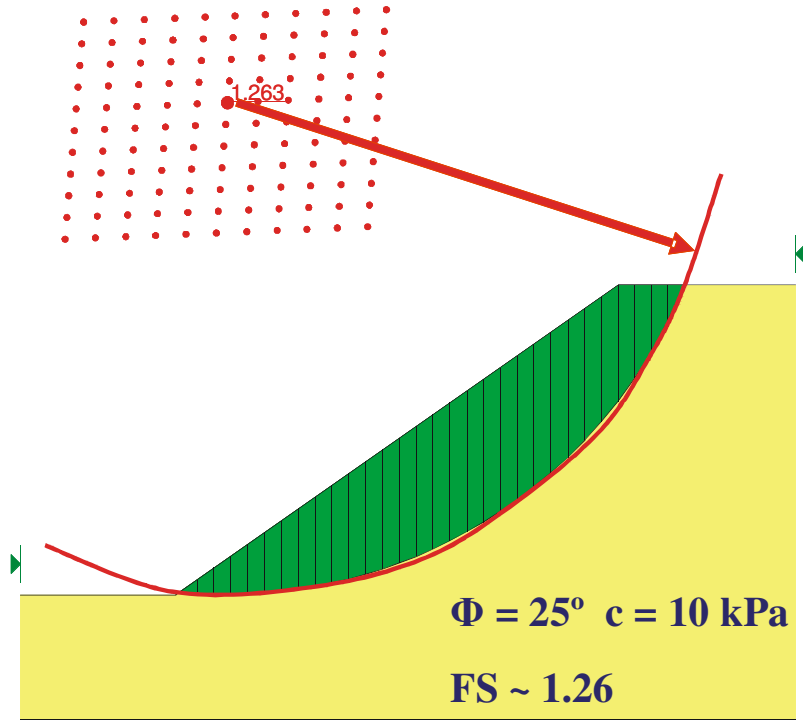


Şekil 2.15. Hacimsel blok oranı ile içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki (Medley, 2001'den)

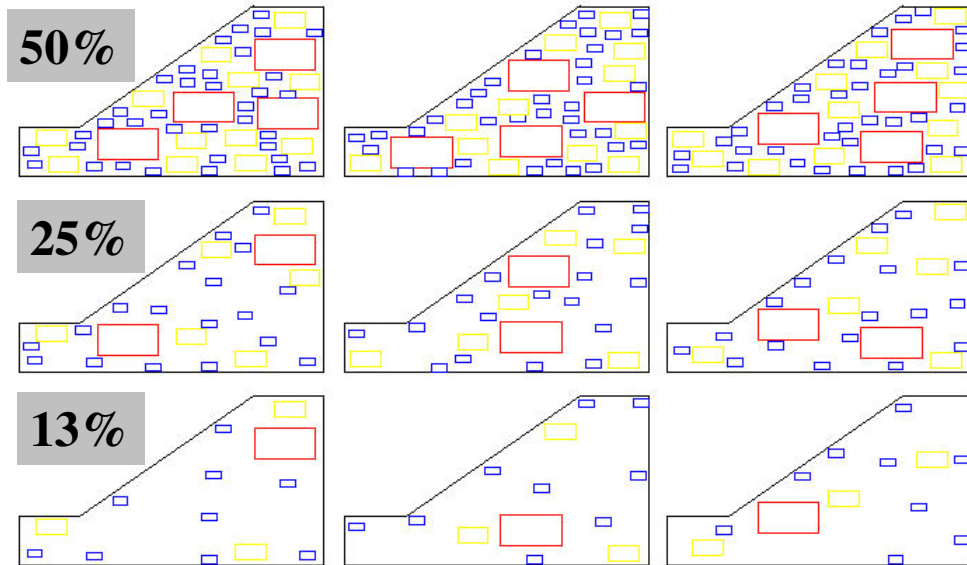
Araştırmacılar matriksin içsel sürtünme açısını 25^0 , kohezyonunu ise 10 kPa olarak kabul etmişlerdir. Blok dayanımı ve blok ile matriks sınırındaki dayanım dikkate alınmamış, şev profili içerisinde her hangi bir su basıncı da tanımlanmamıştır. Araştırmacılar öncelikle, sadece matriks için duraylılık analizini yapmışlar ve dairesel bir yenilme yüzeyi için güvenlik katsayısını (GK) 1.26 olarak hesaplamışlardır (Şekil 2.16). Çalışmalarının sonraki aşamasında %13, %25 ve %50 oranlarında blok içeren şev porfilerinde duraylılık analizlerini tekrarlamışlardır (Şekil 2.17). Analizlerde blokların arasından geçen ve olabildiğince matriks için belirlenen dairesel yüzeye yakın çok sayıda yüzey Janbu (1973) analiz yöntemi ile değerlendirilmiştir (Şekil 2.18). Medley and Rehmann (2003), blok oranındaki artışa bağlı olarak, güvenlik katsayısının diğer bir ifadeyle duraylılığın arttığını belirtmişlerdir (Şekil 2.19). Bu araştırmada incelenen tüm yüzeyler boyunca içsel sürtünme açısı ve kohezyon değeri ($\phi=25^0$, $c=10$ kPa) sabit alınmıştır. Gerçekte, bimrock kütle olarak değerlendirildiğinde yenilme yüzeyindeki dalgalılığa bağlı olarak muhtemelen içsel sürtünme açısında artış, kohezyonda ise azalma gelişecektir. Blok oranındaki artış dayanımı artırır şeklinde tek yönlü bir yaklaşım yapmak hatalı sonuçlar doğurabilir. Bimrocklardaki çeşitliliğe bağlı olarak bu durum değişkenlikler sunacaktır. Bu noktaya ilişkin ayrıntılı değerlendirme ve yorumlar tezin 5.Bölümünde ele alınmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapay olarak hazırlanan bimrock modellerinde blok malzemesi olarak tuf ve andezit blokları kullanılmıştır. Bu nedenle, bir çeşit bimrock olarak nitelendirilebilen Ankara aglomasının ve bileşenlerinin (tuf, siyah ve pembe andezit) dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar aşağıda kronolojik sıra ile verilmiştir.

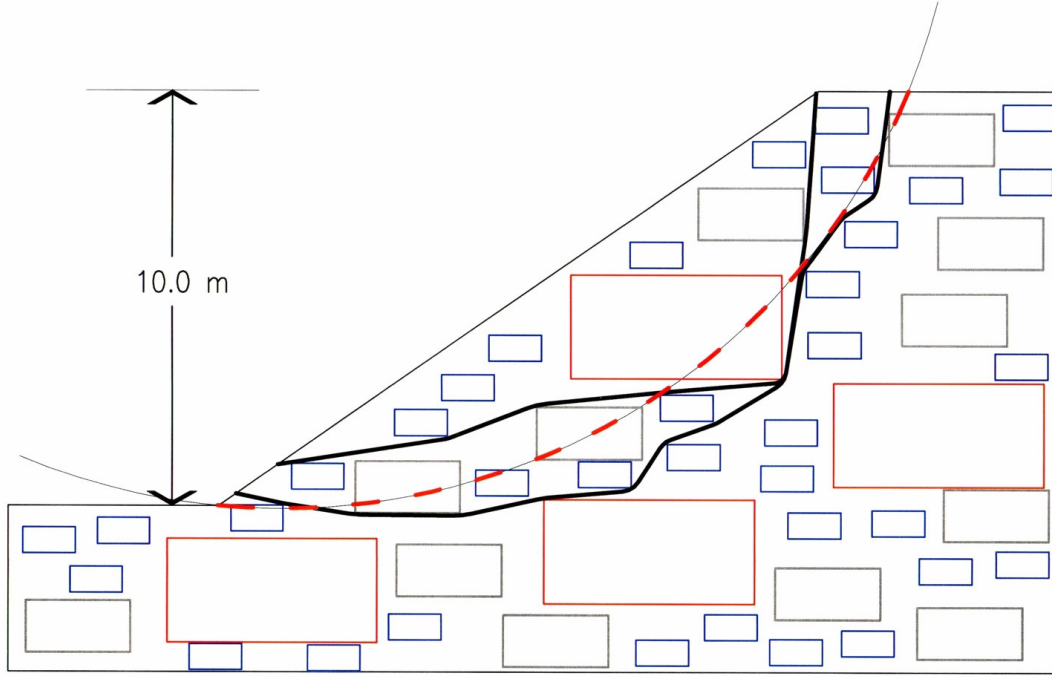
Tuf matriks içinde andezit çakıl/bloklarından oluşan Ankara aglomasının dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesini konu alan bir çalışma Kasapoğlu (1980) tarafından yapılmıştır. Araştırmacı, sınırlı sayıdaki karot örneği üzerinde (7 adet) gerçekleştirdiği deneyler sonucunda, tek eksenli sıkışma dayanımının 22.5 MPa ile 114 MPa, teğetsel elastisite modülünün ise 14.7 GPa ile 34.3 GPa arasında değiştiğini belirlemiştir. Kasapoğlu (1980), örnek hazırlanmasının oldukça güç olduğu Ankara aglomasından sınırlı sayıda örnek hazırlayabilmiş ve bu birimi oluşturan bileşenlerin dayanım ve deformasyon davranışına olan etkileri üzerinde ayrıntılı olarak durmamıştır.



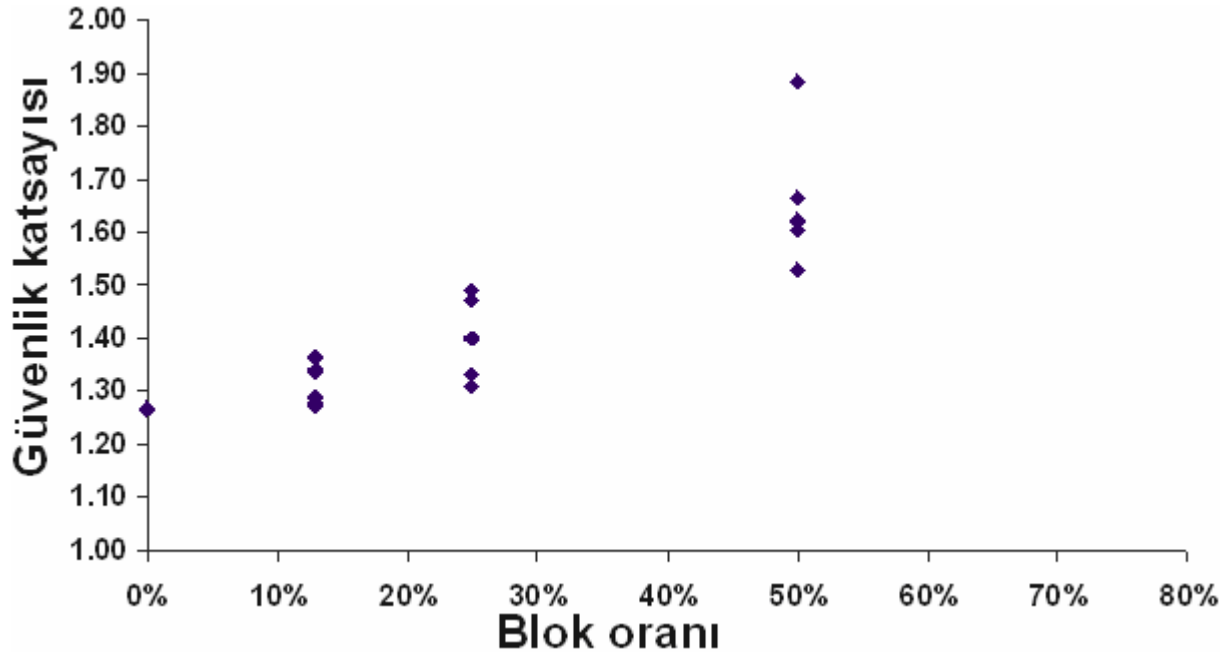
Şekil 2.16. Medley and Rehmannn (2003) tarafından hipotetik olarak oluşturulan şev profilinin tümüyle matris malzemesinden oluşması durumunda gerçekleştirilen duraylılık analizi.



Şekil 2.17. Hipotetik şev modeli içerisinde konumlandırılmış dörgen şekilli bloklarla oluşturulan farklı blok oranına sahip modeller (Medley and Rehmannn, 2003'den)



Şekil 2.18. Analiz sırasında denenen yüzeylerin oluşturulması (Medley and Rehmann, 2003'den)



Şekil 2.19. Hipotetik modellerden elde edilen blok oranı ile güvenlik katsayısı arasındaki ilişki (Medley and Rehmann, 2003'den)

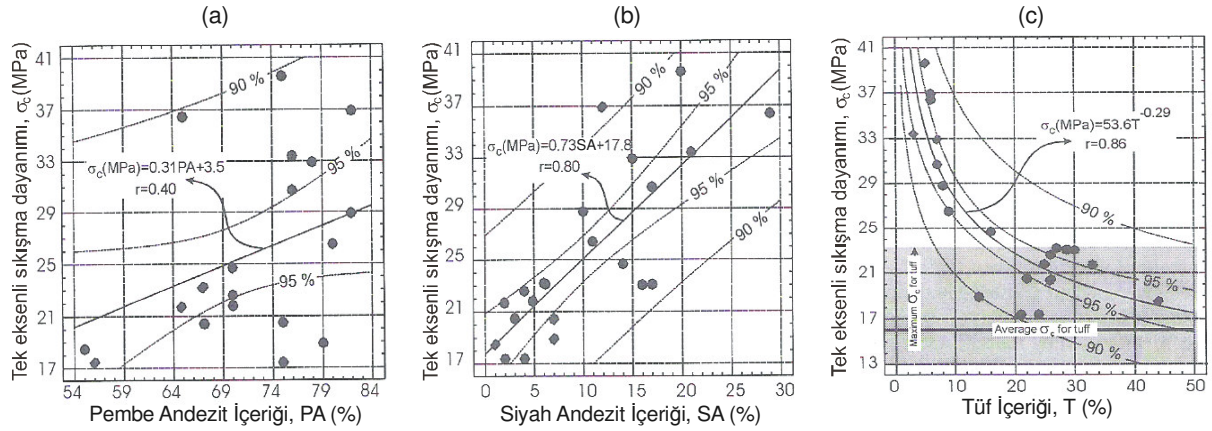
Ankara aglomasının bileşen oranları ile dayanım arasındaki ilişkiyi belirlemeye yönelik ilk kapsamlı çalışma Gökçeoğlu et al. (1998) tarafından yapılmıştır. Gökçeoğlu et al. (1998) tarafından aglomera ve bileşenlerinin herbiri için 23 örnek üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deney sonuçları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Gökçeoğlu et al. (1998) tarafından gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinin istatistiksel değerlendirmesi

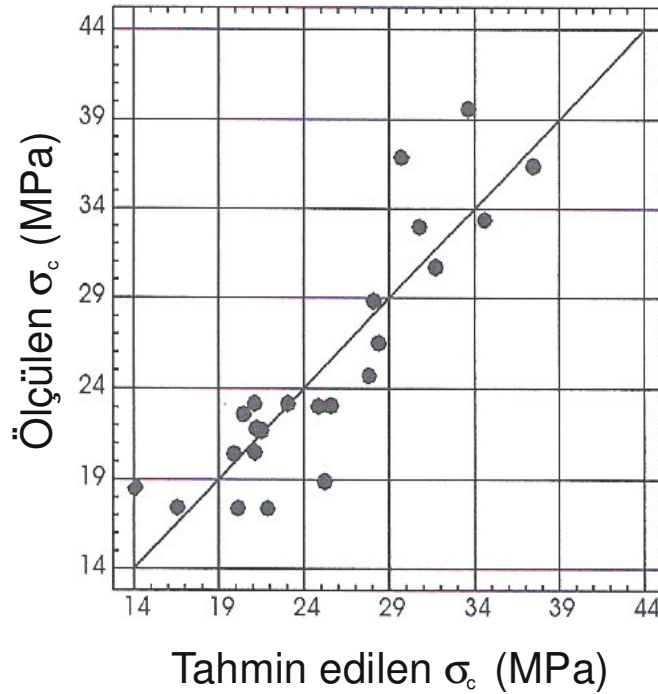
Örnek türü	Veri sayısı	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)		
		En küçük	En büyük	Ortalama
Aglomera	23	17.4	39.6	25.2
Pembe andezit	23	32.4	73.1	51.7
Siyah andezit	23	41.6	102.6	76.3
Tüf matriks	23	9.3	23.4	16.1

Gökçeoğlu et al. (1998), deney öncesinde karot örneklerin alt ve üst yüzeylerinin ve ayrıca deney sonrasında alçı içinde sabitlenen kırılmış karot örneğinin yenilme yüzeyine dik kesilmesi ile elde edilen yüzeyin gri ölçekli fotoğrafları üzerinde görüntü işleme teknikleri ile bileşen oranlarını belirlemişlerdir. Gökçeoğlu et al. (1998)’nin uyguladığı bu yöntem, Gökçeoğlu (2002) tarafından da uygulanmıştır. Gökçeoğlu et al. (1998) ve Gökçeoğlu (2002) Ankara aglomasını oluşturan bileşenlerin gri spektrumda fotoanaliz çalışmaları için yeterli bir renk kontrastına sahip olduklarını belirtmektedirler. Gri ölçekteki fotoğraflar üzerinde görüntü işleme teknikleriyle bileşen oranlarının belirlenmesinin uygulandığı yaklaşımda, öncelikle bileşen oranları ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında basit regresyon analizleri yapılmıştır (Şekil 2.20). Siyah andezit ve tüf matriks oranlarının dikkate alındığı basit regresyon analizi sonuçları daha anlamlı ilişkiler sunmaktadır. Ayrıca Gökçeoğlu et al. (1998), aglomeradaki tüf matriks içeriğinin % 20’yi aşması durumunda dayanımın ağırlıklı olarak tüf matriks tarafından denetlendiğini belirtmektedirler (Şekil 2.20c).

Gökçeoğlu et al. (1998) çalışmalarının ikinci aşamasında her üç bileşeni de girdi olarak kullanmışlar ve yine tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesine yönelik çoklu regresyon analizi yapmışlar ve aşağıdaki ilişkiyi belirlemişlerdir (Şekil 2.21).



Şekil 2.20. Gölçeoğlu et al. (1998) tarafından Ankara aglomerasında bileşen içeriğine bağlı olarak (a) pembe andezit, (b) siyah andezit ve (c) tuf matrisi ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında belirlenen ilişkiler.



Şekil 2.21. Ankara aglomerasının bileşen içeriğine bağlı olarak tek eksenli sıkışma dayanımının (σ_c) kestirimine yönelik çoklu regresyon ile belirlenen eşitliğin tahmin performansı (Gökçeoğlu et al., 1998).

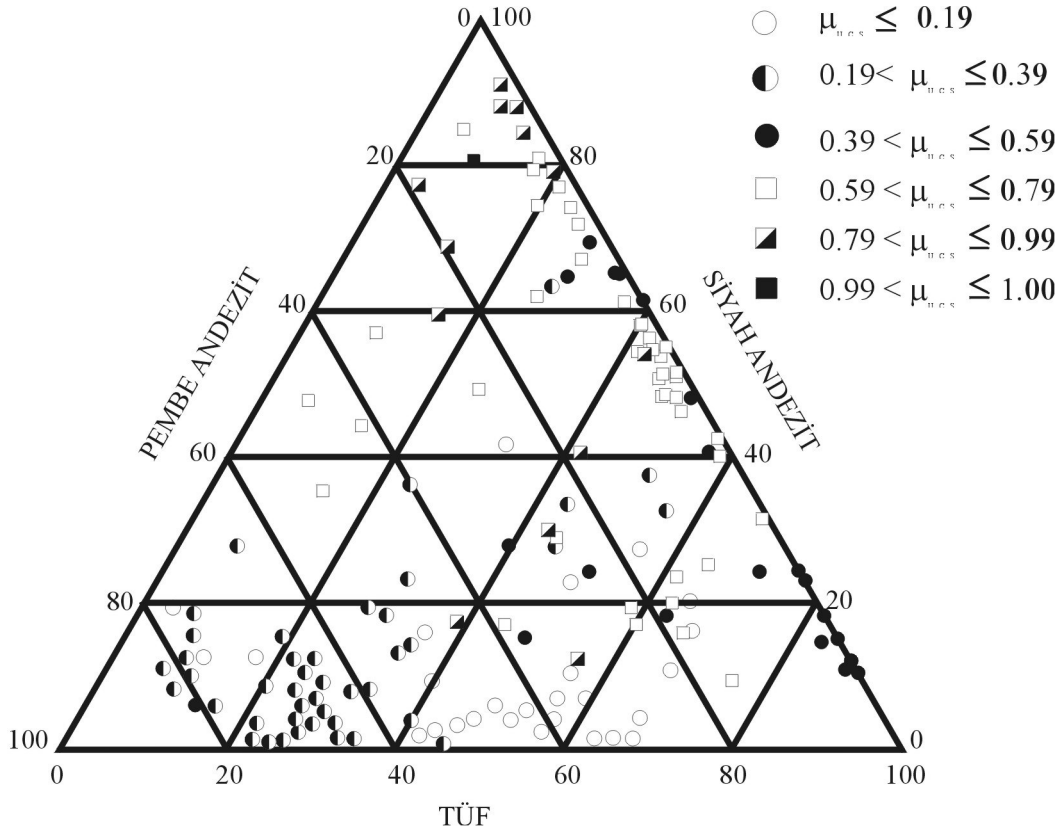
$$\sigma_c = 1976.2 - 19.5(PA) - 19.1(SA) - 19.8(T) \quad (r = 0.87) \quad \text{Eş. (2.1)}$$

Gökçeoğlu (2002), Ankara aglomerası üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ve bileşen oranlarını kullanarak sadece Ankara aglomerasının tek eksenli sıkışma dayanımının tahmin edilmesine yönelik bulanık kural tabanlı üçgen tahmin abağı geliştirmiştir. Bu nedenle, inceleme malzemesini oluşturan Ankara aglomerasının üç ana bileşenden oluşması üçgen sınıflama abağı için uygun bir kaya türü olduğunu göstermektedir. Bu hususu dikkate alan Gökçeoğlu (2002), her bir eksenli bir ana bileşeni temsil eden üçgen sınıflama abağını Ankara aglomerası için önermiştir (Şekil 2.22). Bu abak üzerinde, çalışmada kullanılan karot örneklerinin dağılımı tek eksenli sıkışma dayanımları da sınıflandırılarak Şekil 2.23'de verilmektedir.

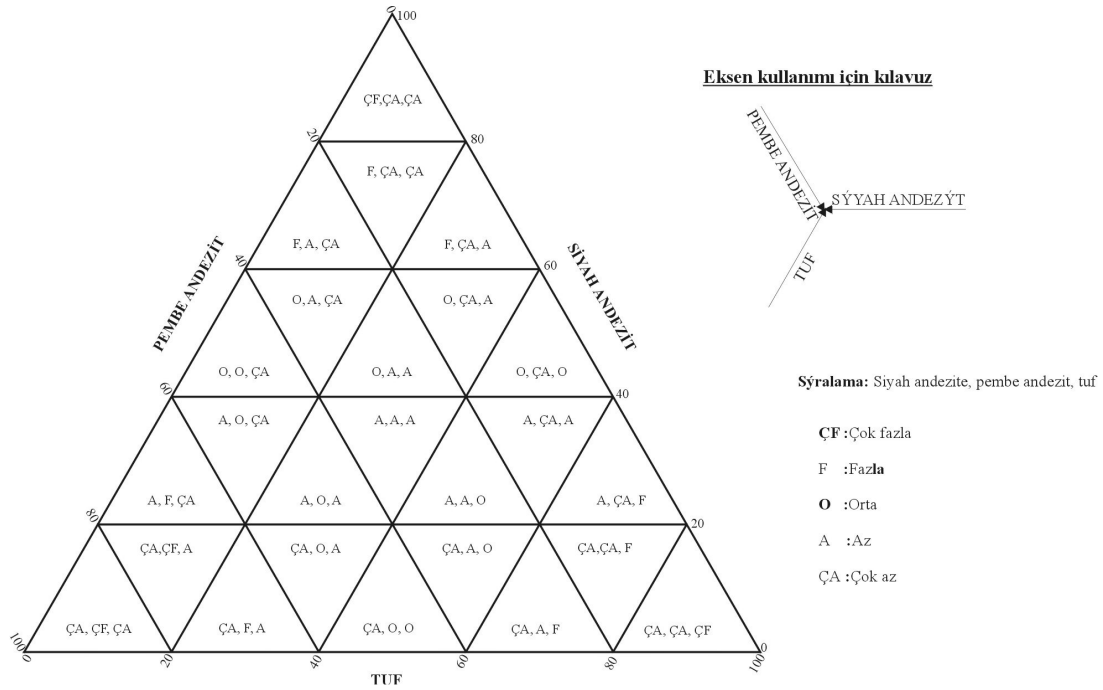
Gökçeoğlu (2002)'nin çalışmasında özellikle eksik verileri olan siyah andezit ve tuf bileşeninden oluşan alt üçgenlerin verileri ise Sönmez vd. (2005) tarafından giderilmeye çalışılmıştır. Gökçeoğlu (2002) tarafından, Ankara aglomerası için [5.7, 55.0] aralığında değişen tek eksenli sıkışma dayanımlarını [0, 1] aralığında ifade edebilmek için, tek eksenli sıkışma dayanımı ile karakteristik üyelik derecesi arasında doğrusal bir eşitlik elde edilmiştir (Eş. 1.2).

$$\mu_{UCS} = 0.02 UCS - 0.0947 \quad \text{Eş. (1.2)}$$

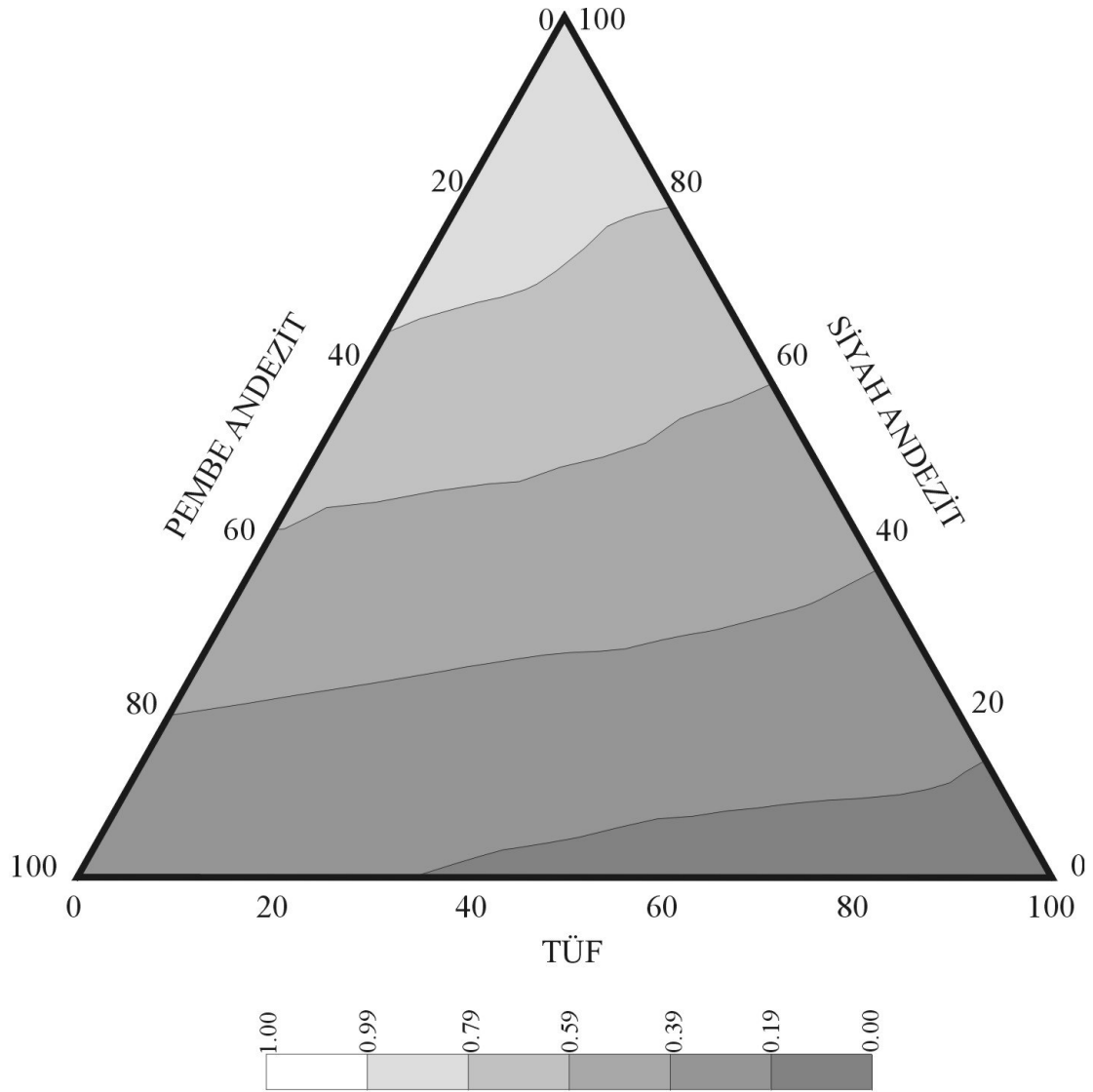
Gökçeoğlu (2002) tarafından uygulanan bulanık mantık yaklaşımı, ilave veriler de kullanılarak, Sönmez vd. (2005) tarafından yenilenmiş ve Ankara aglomerasının içerdiği bileşenlerin oranlarına göre tek eksenli sıkışma dayanımının tahmine yönelik abağına son şekli verilmiştir (Şekil 2.24).



Şekil 2.22. Aglomera örneklerinin üçgen petrografik sınıflama abağı üzerindeki dağılımı (Sönmez vd., 2005'den).



Şekil 2.23. Ankara aglomeraları için üçgen petrografik sınıflama abağı (Gökçeoğlu, 2002'den).



Tek kesenli sıkışmadayınımı için üyelik değeri

Şekil 2.24. Ankara aglomerasının tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi için bulanık tabanlı olarak oluşturulan üçgen abak (Sönmez vd., 2005 ve Sönmez et al. 2004'den).

Gökçeoğlu (2002) tarafından geliştirilen ve Sönmez vd. (2005) tarafından son şekli verilen Ankara aglomeralarının dayanımının bileşen içeriklerine göre tahmin edilebildiği bulanık tabanlı üçgen abak sadece Ankara aglomeraları için kullanılabilir özellikte olup, sadece üç bileşenli jeolojik malzemelerin bulanık mantık kuramı içerisinde modellenmesine ilişkin bir ilk örnek niteliğindedir. Sönmez vd. (2005), Sönmez et al., (2004) ve Sönmez et al. (2006) Ankara aglomerasına ait veri tabanını kullanarak blokların matriks ile bağlanma derecelerinin yüksek olduğu (kaynaşmış), diğer bir ifadeyle blok ile matriks sınırındaki dayanımın matriksin dayanımına eşit olduğu bimrocklar için genel bir yaklaşım sunmuşlardır. Sönmez vd. (2005) ve Sönmez et al. (2006) tarafından önerilen yaklaşımın şematik kurgusu Şekil 2.25'da verilmiştir. Araştırmacılar aynı eşdeğer blok oranı için blok ile matriksin dayanım kontrastına bağlı olarak bimrockın dayanımının da değiştiğini belirtmektedirler. Ancak bu belirlemelerinin sadece aglomera gibi matriks ile blok kontak dayanımının yüksek olduğu bimrocklar için geçerli olacağı unutulmamalıdır. Matriks oranının % 20'nin altında olması durumunda jeolojik kütlenin eklemlili kaya kütlesi olarak değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Sönmez vd., 2005 ve Sönmez et al., 2006). Araştırmacılar, bu tür bimrocklarda kaya bloklarının dayanımlarının da dikkate alınması gerektiğini belirtmekte olup birden fazla türde blok türünden oluşan bimrocklar için eşdeğer blok oranı (EBP)'nın belirlenmesi için aşağıdaki eşitliği önermişlerdir.

$$EBP = \sum_i^n VBP_i \frac{UCS_i}{UCS_{\max_blok}} \quad \text{Eş. (1.3)}$$

burada VBP_i i'inci elemanın hacimsel blok oranı, UCS_i i'inci elemanın tek eksenli sıkışma dayanımı, n blok türü sayısı, $UCS_{\max_blok}$ ise en yüksek dayanımlı blok türünün tek eksenli sıkışma dayanımıdır. Sönmez vd. (2005) ve Sönmez et al. (2006) tarafından önerilen aşağıdaki ampirik eşitlikler dizisi ile matriks-blok kontak dayanımının yüksek olduğu bimrocklar için tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenebilmektedir.

$$UCS_N = \exp(CxEBP) \quad \text{Eş. (1.4a)}$$

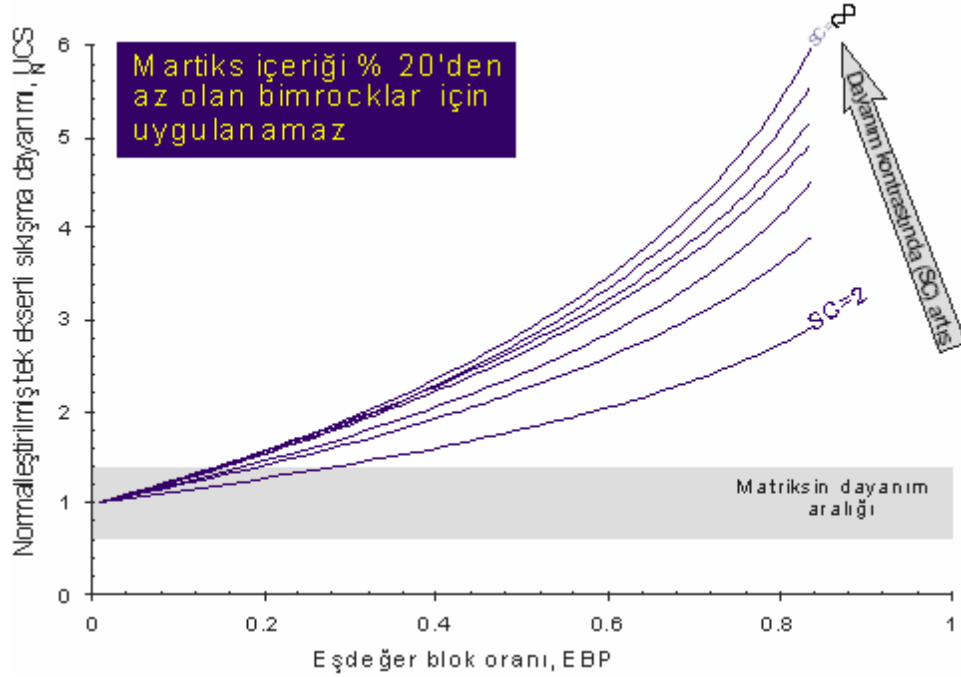
$$C = 0.85 \ln(SC) \quad \text{Eş. (1.4b)}$$

$$SC = \frac{\overline{UCS}_{\text{blok}}}{UCS_{\text{matriks}}} \quad \text{Eş. (1.4d)}$$

$$\overline{UCS}_{\text{blok}} = \frac{\sum_{i=1}^n VBP_{\text{blok } i} \times UCS_{\text{blok } i}}{\sum_{i=1}^n VBP_{\text{blok } i}} \quad \text{Eş. (1.4e)}$$

$$UCS_{\text{Bimrock}} = UCS_N \times UCS_{\text{matriks}} \quad \text{Eş. (1.4f)}$$

burada SC blok ile matriks arasındaki dayanım oranıdır.



Şekil 2.25. Blok matriks kontağının kaynaşmış olduğu bimrockların tek eksenli sıkışma dayanımı-eşdeğer blok oranı-dayanım kontrastı arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Sönmez et al., 2004 ve Sönmez et al. 2006'dan)

Sönmez vd. (2005) Ankara aglomasına ait 197 elastisite modülü (E_i), birim hacim ağırlık (γ) ve tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) veri setlerini kullanarak çift aşamalı regresyon analizi ile aşağıdaki eşitlikleri önermişlerdir (Şekil 2.27).

$$BP = (0.5528(UCS)^{0.6337})\gamma \quad (1.5a)$$

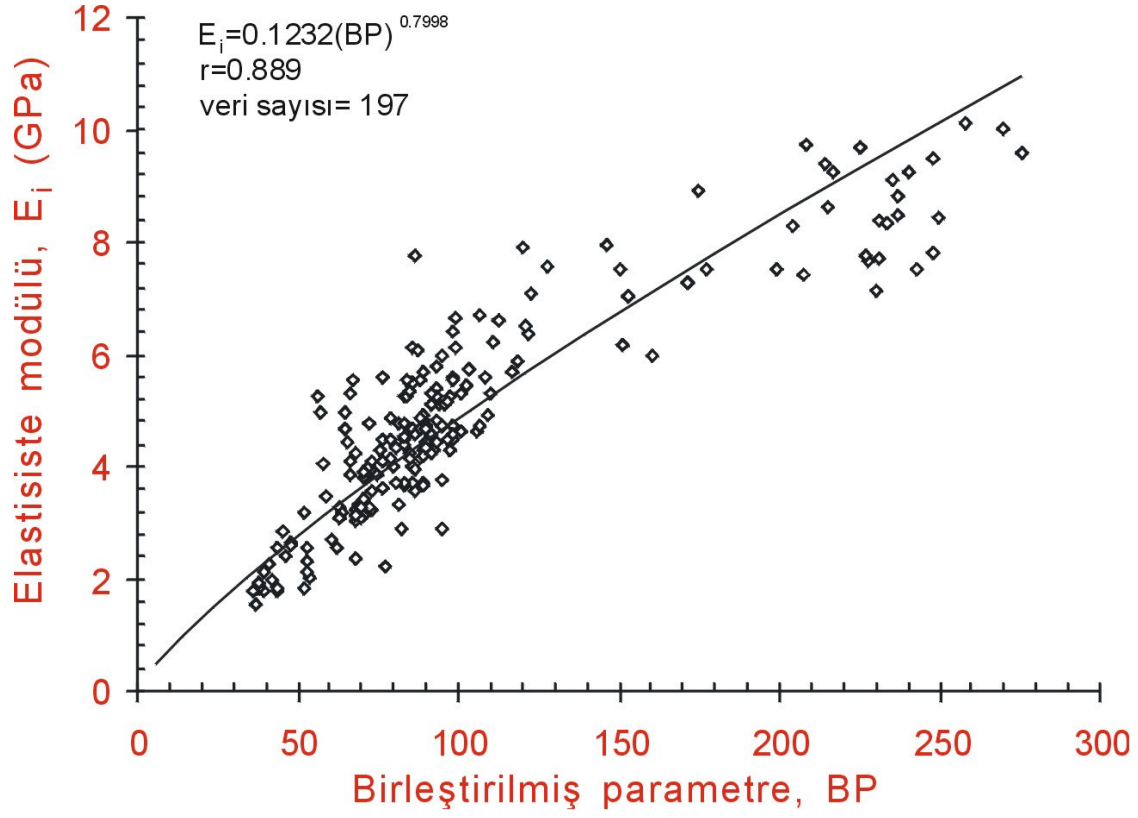
$$E_i = 0.1232(BP)^{0.7998} \quad r=0.889 \quad (1.5b)$$

Sönmez vd. (2005), özel bir bimrock türü olan Ankara aglomasına ait verilerle bimrocklar için bir genellemeden kaçınmak amacıyla sedimanter, magmatik ve metamorfik kayalardan oluşan 319 adet veri setine sahip bir veri tabanı oluşturmuşlardır. Bu veri tabanına, Brazilian deneyiyle dolaylı yoldan belirlenen çekme dayanımı ile tek eksenli sıkışma dayanımı verilerinden Hoek-Brown yenilme ölçütünde girdi olarak kullanılan ve kaya malzemesinin belirtici olan “ m_i ” parametresini de dahil etmişlerdir. Bu veri tabanını kullanarak çift aşamalı regresyon yöntemiyle E_i ’nin tahmin edilmesine yönelik belirlenen ilişkiler Çizelge 2.2.’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Sonmez vd. (2005) tarafından kaya malzemelerinde E_i ’nin tahminine yönelik olarak geliştirilen ilişkiler.

Birleştirilmiş parametreler (BP)	Ampirik İlişki	Korelasyon katsayısı
$BP_1 = UCS \times \sigma_{iB}$	$E_i = 0.7605BP_1^{0.5652}$	0.846
$BP_2 = UCS \times 0.0318 \exp(0.2708\gamma)$	$E_i = 0.2713BP_2^{0.6007}$	0.852
$BP_3 = \sigma_{iB} \times 0.0318 \exp(0.2708\gamma)$	$E_i = 1.235BP_3^{0.5965}$	0.841
$BP_4 = UCS \times 695.03m_i^{-0.331}$	$E_i = 0.0003BP_4^{1.1132}$	0.846
$BP_5 = \sigma_{iB} \times 695.03m_i^{-0.331}$	$E_i = 0.0358BP_5^{0.8554}$	0.713
$BP_6 = UCS \times 695m_i^{-0.331} \times 0.0318 \exp(0.2708\gamma)$	$E_i = 0.0074BP_6^{0.6106}$	0.863
$BP_7 = UCS \times \sigma_{iB} \times 0.0318 \exp(0.2708\gamma)$	$E_i = 0.5303BP_7^{0.4115}$	0.872

UCS: tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa); σ_{iB} : dolaylı çekilme dayanımı (Brazilian) (MPa); γ : birim hacim ağırlık (kN/m^3) ve m_i : Hoek ve Brown yenilme ölçütündeki malzeme sabitidir.



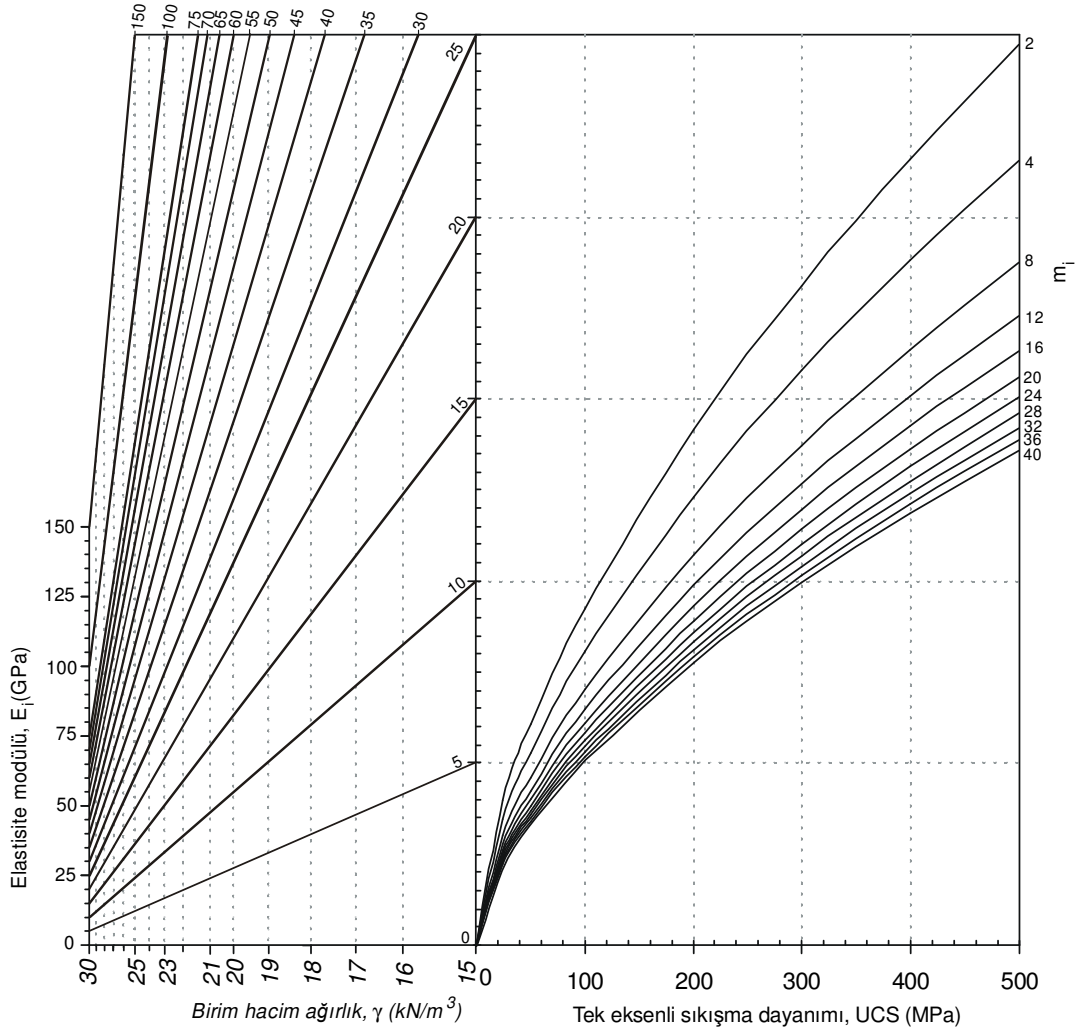
Şekil 2.26. Ankara aglomasına ait birleştirilmiş parametre ile elastisite modülü arasındaki ilişki (Sönmez vd., 2005'den)

En yüksek korelasyon katsayılarının elde edildiği ilişkiler birleştirilmiş parametreleri de yerlerine konularak aşağıdaki şekilde sadeleştirilmiştir (Eş. 1.6a ve Eş.1.6b).

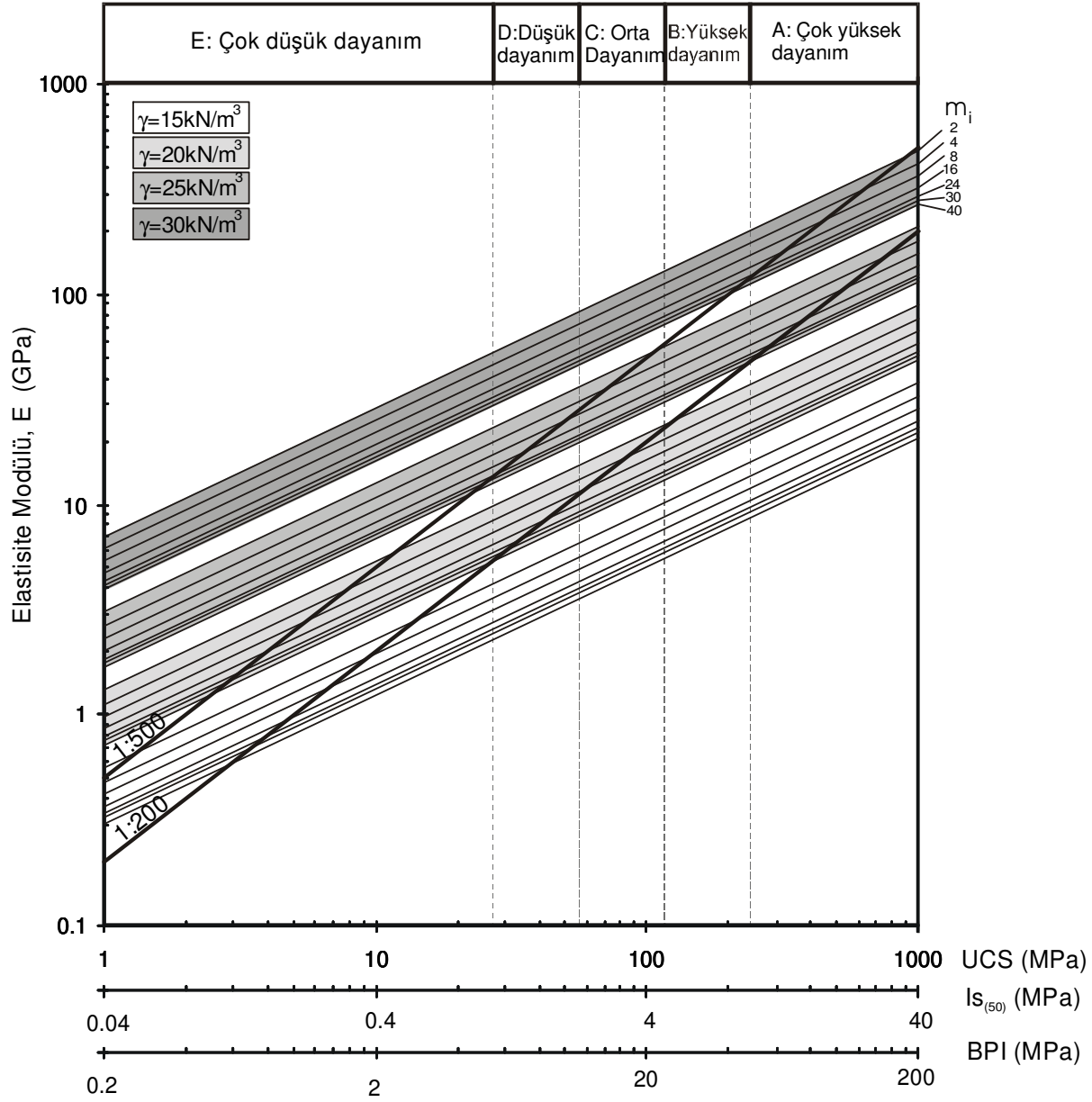
$$E_i = 0.05 \frac{UCS^{0.61} \exp(0.17\gamma)}{m_i^{0.2}} \quad \text{Eş. (1.6a)}$$

$$E_i = \frac{\sqrt{UCS \sigma_{IB}} \exp(\gamma/10)}{10} \quad \text{Eş. (1.6b)}$$

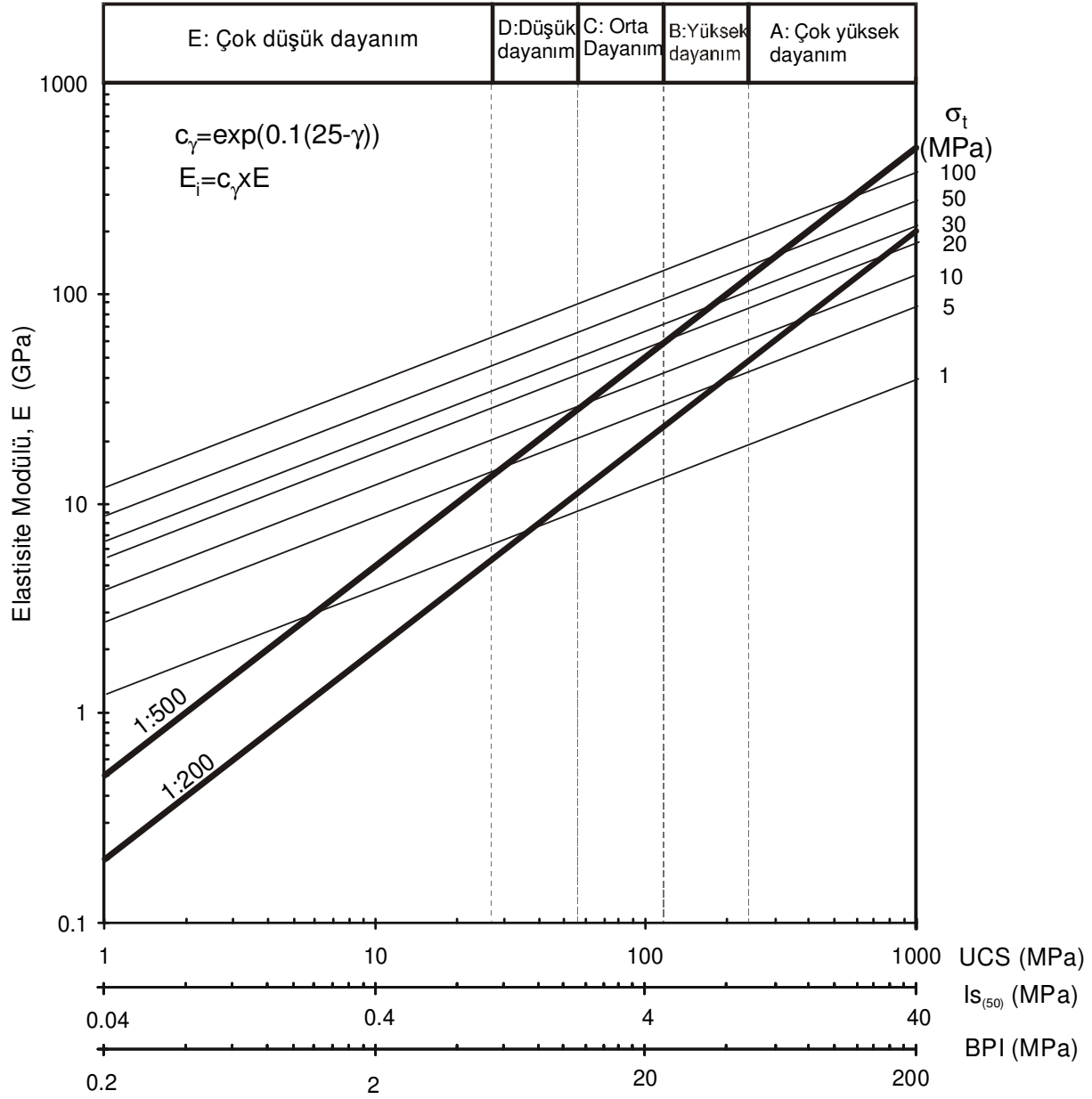
Ayrıca bu iki ilişki genel kullanım amacıyla abak şeklinde de hazırlanmıştır (Şekil 2.27, 2.28 ve 2.29).



Şekil 2.27. Eş. 1.6a no.lu ampirik ilişkiye göre hazırlanan E_i tahmin abağı (BPI eksenli Gökçeoğlu, 1997'den alınmıştır) (Sönmez vd., 2005'den).



Şekil 2.28. Deere ve Miller (1966)'in modül oranı abağı ve Eş. 1.6a'da verilen ampirik ilişki kullanılarak oluşturulan E_i kestirim abağı (BPI eksenini Gökçeoğlu, 1997'den alınmıştır) (Sönmez vd., 2005'den)



Şekil 2.29. Deere ve Miller (1966)'in modül oranı abağı ve Eş. 1.6b'de verilen ampirik ilişki kullanılarak oluşturulan E_i kestirim abağı (BPI eksenini Gökçeoğlu, 1997'den alınmıştır) (Sönmez vd., 2005)

3. YAPAY MATRİKS VE BİMROCK ÖRNEKLERİNİN HAZIRLANMASI

Matriks içinde blok içeren kayaların (bimrock) karmaşık yapısından dolayı bu tür malzemelerden uluslararası standartların öngördüğü şekilde örnek hazırlanması oldukça güçtür. Bu nedenle, bimrockların dayanımlarının pratik, kolay elde edilebilen ve ölçülebilir girdi parametrelerinden itibaren belirlenebileceği ampirik ilişkilerin geliştirilmesinin amaçlandığı bu tez çalışması, laboratuvarda hazırlanan yapay bimrock örnekleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarıyla yönlendirilmiştir. Martiks malzemesinin hazırlanmasında karışım bileşenleri olarak alçı, portland çimento ve bentonit kullanılmıştır. Martiks içindeki blok malzemesi ise, doğal kaya malzemelerinden seçilmiştir. Yapay bimrock örnekleri yapay matriks ve kaya parçalarının (blok) karışımlarıyla hazırlanmıştır. Bimrockların yenilme davranışının farklı gerilme koşullarında yorumlanabilmesi için tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yanı sıra, üç eksenli sıkışma deneyleri de yapılmıştır. Farklı matriks karışımları, farklı blok türleri ve farklı hacimsel oranlarda karışımların hazırlanması ve deneye tabi tutulması çok sayıda modeli ve çok sayıda deneyi de beraberinde getirmektedir. Çeşitliliğe bağlı olarak ve deney sayısındaki geometrik artış da dikkate alınarak dayanım parametreleri açısından iki farklı blok türü ve iki farklı matriks karışımı hazırlanıp ve deneylere tabi tutulmuştur. Bu bölümde matriks malzemesi üzerinde gerçekleştirilen birim hacim ağırlık ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri verilirken, gerek matriks malzemesi, gerekse hazırlanan yapay bimrocklar üzerinde gerçekleştirilen tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerine ilişkin sonuçlar ve değerlendirmeleri 4. Bölüm'de ele alınmıştır.

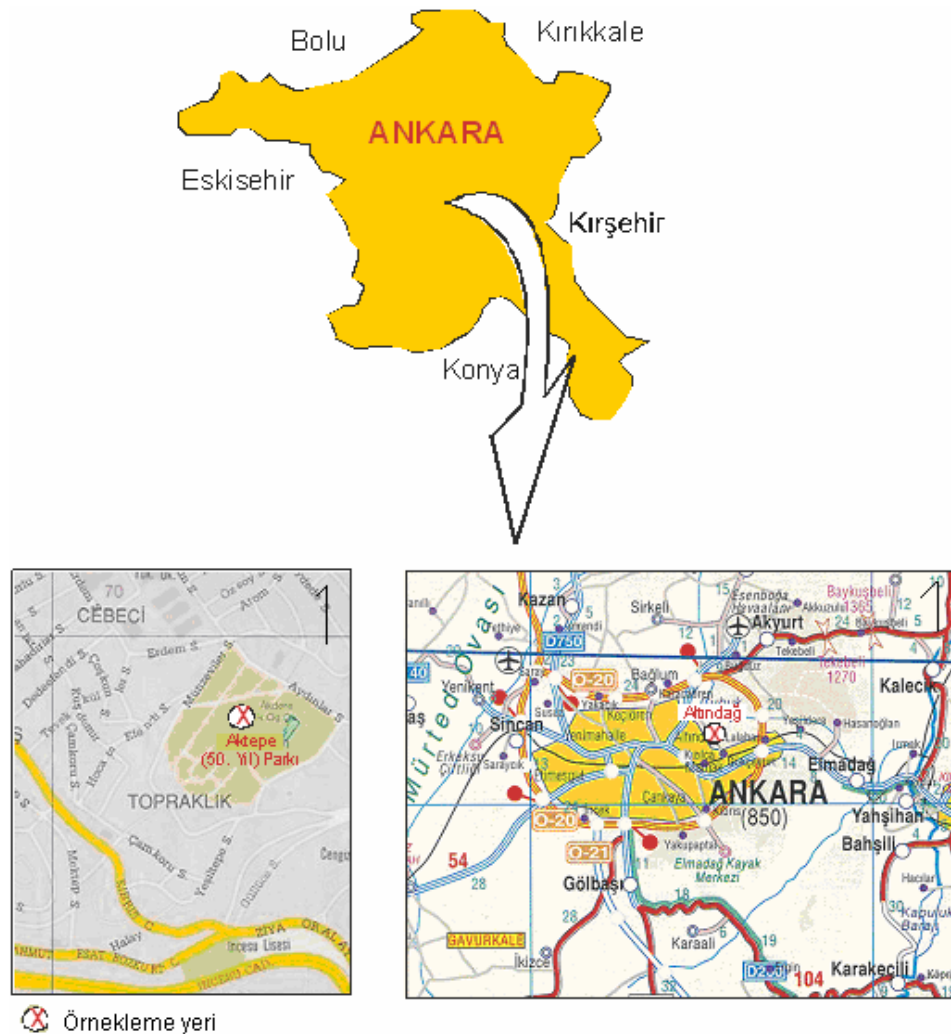
Yapay bimrock modellerinin hazırlanmasında matriks içindeki blok malzemesi olarak doğal kaya malzemelerinin kullanılması öngörülmüştür. Bu amaçla, Sönmez vd. (2005) tarafından tek eksenli sıkışma dayanımı çok sayıdaki örnek üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleriyle belirlenmiş (Çizelge 3.1) olan ve Ankara yakın çevresinde bol miktarda yüzeylenen pembe andezit ve tuf kaya malzemeleri kullanılmıştır. Andezit blok örnekleri Altındağ'dan, tuf blok örnekleri ise Topraklık'tan alınmıştır (Şekil 3.1).

Çizelge 3.1. Ankara andezit ve tuf matriks malzemesi üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine ilişkin istatistiksel değerlendirme (Sönmez vd. 2005).

Pembe Andezit		
İstatistiksel parametre	γ (kN/m ³)	UCS (MPa)
Örnek sayısı	16	16
Ortalama	22.66	49.85
Standart sapma	0.936	11.44
En küçük	21.03	33.99
En büyük	23.35	78.03

Tüf		
İstatistiksel parametre	γ (kN/m ³)	UCS (MPa)
Örnek sayısı	23	21
Ortalama	16.88	10.55
Standart sapma	0.883	1.89
En küçük	15.17	6.41
En büyük	18.23	14.42

Tüf		
İstatistiksel parametre	γ (kN/m ³)	UCS (MPa)
Örnek sayısı	23	21
Ortalama	16.88	10.55
Standart sapma	0.883	1.89
En küçük	15.17	6.41
En büyük	18.23	14.42



Şekil 3.1. Andezit ve tüf kaya malzemesi örnekleme lokasyonları.

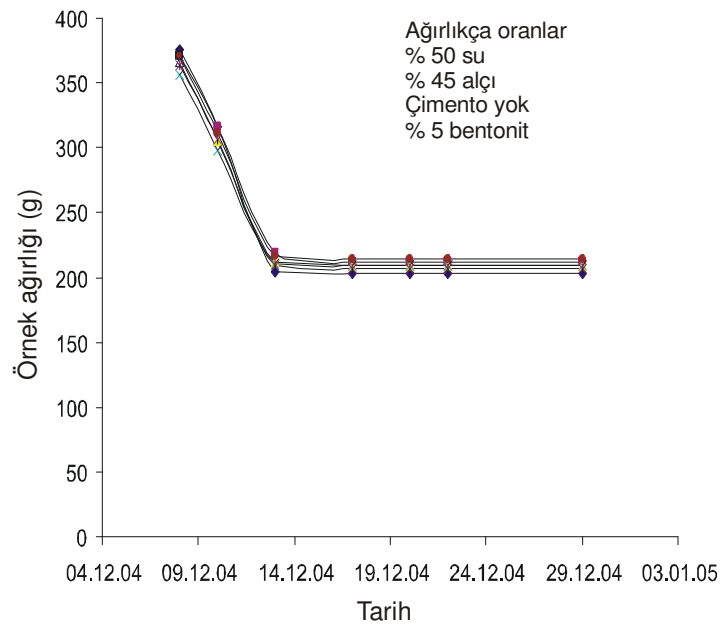
3.1. Yapay Matriks Örneklerinin Hazırlanması

Yapay bimrock örneklerinin hazırlanması sırasında andezit ve tuf kaya parçalarının (bloklarının) kullanılması ön görülmüştür. Andezite oranla dayanımı daha düşük olan tuf kaya malzemesinin ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı Sönmez vd. (2005) tarafından 10.55 MPa (Çizelge 3.1) olarak belirlenmiştir. Literatür çalışmalarının ayrıntılı olarak sunulduğu tezin 2. Bölümünde de belirtildiği üzere, matriks içinde blok içeren kaya malzemelerinin bimrock olarak kabul edilebilmesi için matriks ile içerdiği bloklar arasında bir dayanım kontrastının olması gerekmektedir. Lindquist and Goodman (1994) ve Medley (1994) bimrocklar için bu kontrastı sağlayan en düşük dayanım oranını 2 olarak belirlemişlerdir. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında tuf kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımının yarısından (5 MPa) düşük dayanıma sahip iki farklı matriks malzemesi hazırlanmıştır.

Hazırlanan matriks harcının andezit ve tuf parçalarıyla sağlıklı bir şekilde karıştırılabilmesi ve karışımın boşluksuz bir şekilde silindirik kalıplara dökülebilmesi için işlenebilir bir harç oluşturulmasına özen gösterilmiş ve bu amaçla ağırlıkça % 50 su kullanılmıştır. Yapay matriksin hazırlanmasında, ağırlıkça % 50'si su ve kalan %50'si ise farklı oranlarda alçı, çimento ve bentonitten oluşan matriks karışımları hazırlanmıştır (Şekil 3.2). Hazırlanan karışım, 3 veya 4 parçada 54 mm çaplı 110 cm yüksekliğindeki silindirik kalıpların içine dökülmüş ve boşlukların kalmaması için şişlenmiştir. Hızlı bir kuruma sürecine bağlı olarak örneklerde çatlamaların gelişmemesi için örnekler laboratuvar koşullarında kurumaya bırakılmıştır. Örnekler kuruma süreci boyunca birkaç günde bir tartılmış ve örnekteki nem kaybı durana (ağırlığın sabitlenmesine) kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiştir (Şekil 3.3). Karışım oranlarına da bağlı olarak, 20 ila 25 gün süren bir kuruma süreci yeterli olmuştur. Kuruma sürecini takiben örnekler üzerinde birim hacim ağırlık tayinleri ile tek eksenli ve üç eksenli sıkışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım örneği için en az 5 adet karot örneği hazırlanmıştır. İki farklı dayanıma sahip yapay matriks malzemelerinin karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla hazırlanan karışım oranları Çizelge 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Yapay matriksin hazırlanmasında kullanılan (a) karışım malzemeleri, (b) karışım harcı, (c) 54 mm çaplı ve 110 mm yüksekliğindeki silindirik kalıbın içerisine karışımın konulması ve (d) havada kurutulmak için kalıplardan dışarı alınan örnekler.



Şekil 3.3. Alçı-Çimento-Bentonit oranı %45-%0-%5 olan silindirik yapay matriks karot örneğinin zamana bağlı olarak ağırlık değişimi.

3.2. Yapay Matriks Üzerinde Gerçekleştirilen Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

Tek eksenli ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden önce farklı karışım oranlarında hazırlanan yapay matriks karotlarının birim hacim ağırlıkları ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemle göre belirlenmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Farklı karışım oranlarına sahip yapay matriks karotlarının birim hacim ağırlık değerleri

Örnek No	Birim hacim ağırlık (kN/m ³) (Ağırlıkça karışım oranları %Alçı-%çimento-%bentonit)							
	40-00-10	45-00-05	50-00-00	30-20-00	20-30-00	00-40-10	00-50-00	25-35-0
M-1	8.58	8.05	8.32	8.47	8.55	9.25	10.32	9.45
M-2	8.72	8.04	8.24	8.51	8.48	9.08	10.63	9.22
M-3	8.85	8.09	8.28	8.57	8.57	9.08	10.18	9.12
M-4	8.61	7.91	8.12	8.45	8.59	9.13	11.36	9.15
M-5	8.67	8.00	8.23	8.30	8.53	8.99	10.61	9.24
M-6	-	8.12	8.13	8.51	8.52	9.05	10.27	9.18
Ortalama (kN/m³)	8.69	8.03	8.22	8.47	8.54	9.10	10.56	9.23

Not: Koyu ve İtalik olan karışım oranları, tek eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçlarına göre yapay bimrock örneklerinin hazırlanmasında kullanılmak üzere seçilen karışım oranlarıdır.

3.3. Yapay Matriks Üzerinde Gerçekleştirilen Tek Eksenli ve Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri

Yapay bimrock modellerinin hazırlanmasında kullanılacak matriks karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla, farklı alçı-çimento-bentonit karışımlarıyla hazırlanan yapay matriks karotları üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemle uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.3. Farklı karışım oranlarına sahip yapay matriks karotlarının tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri

Örnek No	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa) (Ağ. karışım oranları %Alçı-%çimento-%bentonit)							
	40-00-10	45-00-05	50-00-00	30-20-00	20-30-00	00-40-10	00-50-00	25-35-0
M-1	1.08	0.97	0.82	1.8	1.92	3.33	4.54	4.25
M-2	1.26	0.94	0.79	1.75	1.87	2.92	6.98	4.14
M-3	1.27	0.91	0.83	1.84	1.94	2.83	4.92	3.84
M-4	1.19	0.92	0.70	1.58	2.01	2.75	7.35	3.95
M-5	1.05	0.97	0.67	1.74	1.91	2.52	7.04	4.12
M-6	-	1.03	0.73	1.72	1.81	3.10	5.14	4.22
Ortalama (MPa)	1.17	0.96	0.76	1.74	1.91	2.91	5.99	4.09

Not: Koyu ve İtalik olan karışım oranları, tek eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçlarına göre yapay bimrock örneklerinin hazırlanmasında kullanılmak üzere seçilen karışım oranlarıdır.

Pratikte kaya ile toprak zeminin arasındaki dayanım sınırı olarak kabul edilen 1 MPa (Bieniawski, 1989) ve t f blok malzemesinin ortama dayanımının yarısına (~5 MPa) en yakın değerlere sahip olan %45-%0-%5 (0.96 MPa) ve %25-%35-%0 (4.09 MPa) alçı-çimento-bentonit karışım oranlarının bimrock örneklerinin hazırlanması sırasında matriks malzemesi olarak seçilmesine karar verilmiştir. Alçı-çimento-bentonit karışım oranları %45-%0-%5 olan matriks malzemesinin kullanıldığı yapay bimrock  rnekleri A grubu, %25-%35-%0 karışım oranlarıyla hazırlanan matriks malzemesinin kullanıldığı yapay bimrock örnekleri ise B grubu örnekler olarak isimlendirilmiştir.

A ve B grubu matriks örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yanı sıra, bir sonraki bölümde yapılan değerlendirmelerde kullanılmak üzere üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerine de tabi tutulmuştur. Üç eksenli deney sonuçları hem Mohr-Coulomb, hem de Hoek ve Brown yenilme ölçütlerine göre bir sonraki bölümde değerlendirilmiş olup, bütünlüğün sağlanması ve tekrar dan kaçınılması için bu bölümde verilmemiştir.

3.4. Yapay Bimrock  rneklerinin Hazırlanması

Matriks içinde blok içeren kayaların yenilme davranışlarının belirlenmesi amacı ile ampirik yaklaşımların geliştirilmesine yönelik yürütülen tez çalışmasının amacına uygun olarak, tek eksenli sıkışma dayanımları yaklaşık 1 MPa ve 4 MPa olan ve A ve B grubu olarak tanımlanan iki farklı yapay matriks malzemesiyle farklı oranlarda t f ve andezit kaya parçaları karıştırlarak yapay bimrock örnekleri hazırlanmıştır (Şekil 3.4). Saha alışmaları sırasında laboratuvara nakledilen andezit ve t f kaya blokları öncelikle eneci kırıcıda kırılmıştır. Kırma işlemi sırasında köşeli parçalara ayrılan örnekler çok az yuvarlaklaştırılmaları için kısa süreyle Los Angeles aşındırma deney düzeneğine alınmıştır. Yapay karot örneklerinin hazırlanmasında kullanılan 54 mm çapında ve 110 mm y ksekliliğindeki kalıplar dikkate alınarak 1 cm ile 2 cm arasında parça boyutuna sahip andezit ve t f örnekleri ayrılmıştır. Yapay bimrockların hazırlanmasında kullanılan andezit ve t f kaya parçalarının ortalama yığılma açıları (~isel sürtünme açıları) andezit ve t f kaya parçaları için sırasıyla, 36⁰ ve 33⁰ olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4. Yapay bimrockın hazırlanmasında kullanılan (a) karışım malzemeleri, (b) matriks karışımı, (c) ve (d) matriks ve blok karışımı, (e) 54 mm çaplı ve 110 mm yüksekliğindeki silindirik kalıbın içerisine karışımın konulması ve (e) havada kurutulmak için kalıplardan dışarı alınan örnekler.

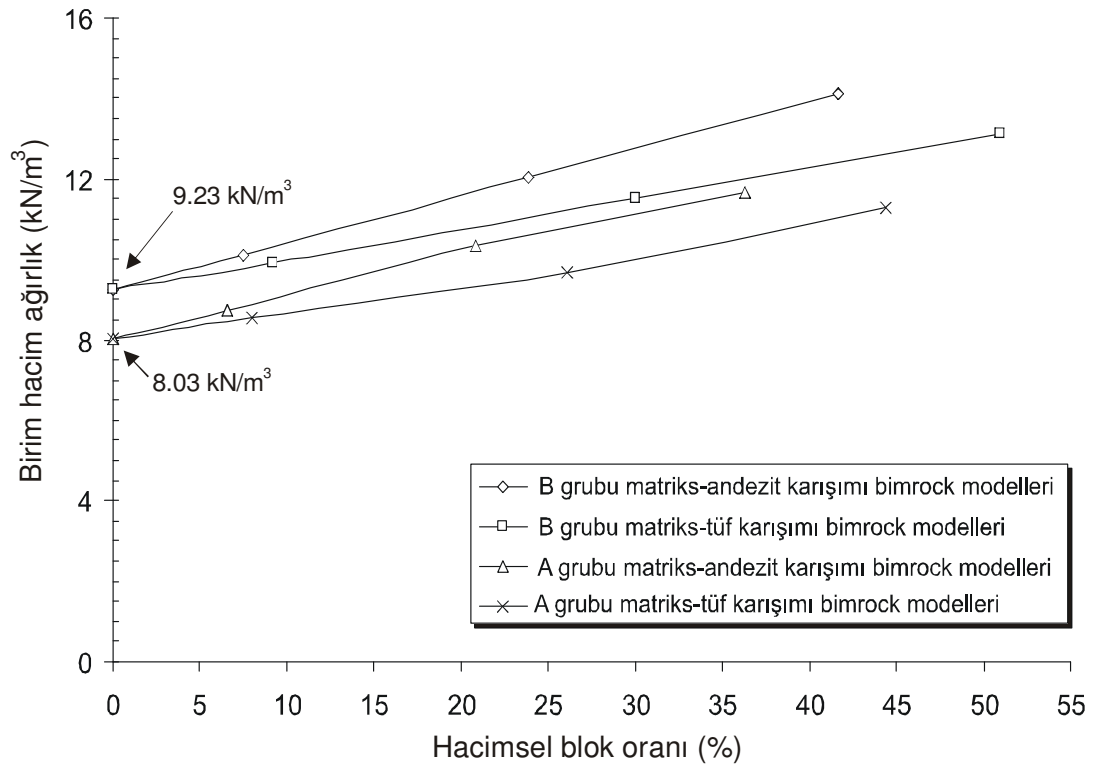
Karışımların hazırlanmasında andezit ve t f kaya parçaları ağırlıkça %10, %30 ve %50 oranında kullanılmıştır. Her bir karışım oranı için 6 adet örnek hazırlanmış olup, iki tanesi tek eksenli sıkışma dayanımı deneyine tabi tutulurken, diğ r 4 örnek ise 75, 100, 150 ve 300 kPa hücre basınçlarında üç eksenli sıkışma dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.

3.5. Yapay Bimrock  zerinde Gerçekleştirilen Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

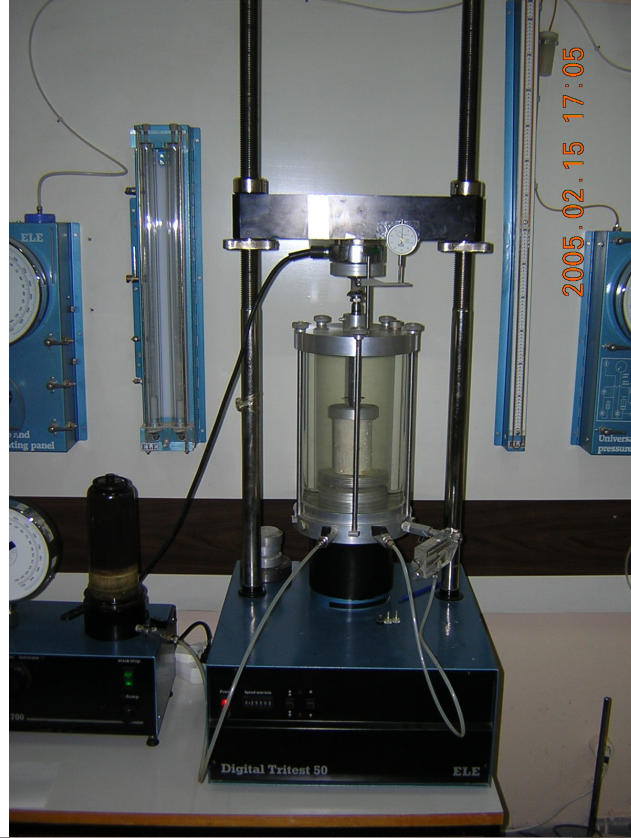
Silindirik kalıplar içerisinde hazırlanan örnekler laboratuvarda kurumaya bırakılmış ve yaklaşık 25 günlük bir süre boyunca birkaç günde bir ağırlıkları ölçülmüştür. Son  l  m değ ri ise, ilgili karışım oranı için yapay bimrockın birim hacim ağırlığının hesaplanmasında kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmaların sunulduğu 2. Bölümde de belirtildiği üzere, bimrockların içerdikleri blok oranları hacimsel olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle, ağırlıkça yapılan karışımlar matriks, andezit ve t f için laboratuvarda belirlenen ortalama birim hacim ağırlık değerleri (A grubu $\gamma_{\text{matriks}}=8.03 \text{ kN/m}^3$, B grubu $\gamma_{\text{matriks}}=9.23 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{andezit}}=21.03 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{t f}}=16.88 \text{ kN/m}^3$) kullanılarak hacimsel oranlara dönüştürülmüştür. Hazırlanan modellerin hacimsel blok oranına bağlı olarak birim hacim ağırlık değişimleri ise, şekil 3.5’de verilmiştir.

3.6. Yapay Bimrock  zerinde Gerçekleştirilen Tek Eksenli ve üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri

Yapay birmrock karot örnekleri üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yanı sıra, 75 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 300 kPa hücre basınçlarında üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri de yapılmıştır (şekil 3.6). Deney sonuçlarına ilişkin değerlendirmeler, bir sonraki bölümde ele alınmış olup, bütünlüğün sağlanması ve tekrardan kaçınılması için bu bölümde verilmemiştir.



Şekil 3.5. Yapay bimrock örneklerinin birim hacim ağırlıklarının hacimsel blok oranına göre değişimi.



Şekil 3.6. Yapay bimrock örnekleri üzerinde uygulanan üç eksenli deneyden bir görünüm.

4. BİMROCKLARIN YENİLME DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Kaya kütlelerinde inşa edilecek baraj, tünel ve şev gibi mühendislik yapılarının tasarımında dayanım ve deformasyon parametreleri girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu parametreler uluslararası standartlara uygun karot örnek hazırlanmasının mümkün olabildiği jeolojik malzemelerde laboratuvar deneyleriyle belirlenirken, eklemlili kaya kütleleri, ince tabakalı (laminalı) kaya malzemeleri ve matriks içinde blok içeren kaya (bimrock) kütleleri gibi jeolojik kütleyi temsil edebilecek boyutlarda örnek hazırlanmasının güç ve çoğu kez olanaksız olduğu jeolojik malzemelerde ise ölçülebilen ve tanımlanabilen parametrelerin kullanıldığı ampirik ilişkiler ve/veya yöntemlerle belirlenmektedir.

Tez çalışması kapsamında, blok ile matriks arasındaki dayanım kontrastı nedeniyle örnek hazırlanmasının güç olduğu bimrockların dayanımlarının belirlenmesi için laboratuvarda hazırlanan yapay bimrock karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli ve üç eksenli deney verileri kullanılarak ampirik yaklaşımların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yanal basınca (σ_3) bağlı olarak bimrockların dayanımının (σ_1) öngörülebilmesi amacıyla jeoteknik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılan ve kabul gören Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown yenilme ölçütleri dikkate alınmıştır. Çalışmaya esas oluşturması nedeniyle, öncelikle ilgili yenilme ölçütü özet olarak verilmiş ve sonra yapay bimrocklara ait tek ve üç eksenli deney verileri değerlendirilmiştir.

4.1. Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütünün Dikkate Alındığı Değerlendirmeler

Jeolojik malzemenin farklı yanal basınçlar altındaki dayanımlarını tanımlayan Mohr çemberlerine ait doğrusal teğet ile malzemenin makaslama dayanımı aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4.1)$$

Burada;

- τ : Makaslama dayanımı
 σ : Yenilme yüzeyine etkiyen normal gerilme
 C : Kohezyon
 ϕ : İçsel sürtünme açısı

Makaslama dayanımının ifade edildiği Eş. 4.1, asal gerilmeler cinsinden Eş. 4.2 ile tanımlanır.

$$\sigma_1 = \sigma_c + \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \sigma_3 \quad (4.2)$$

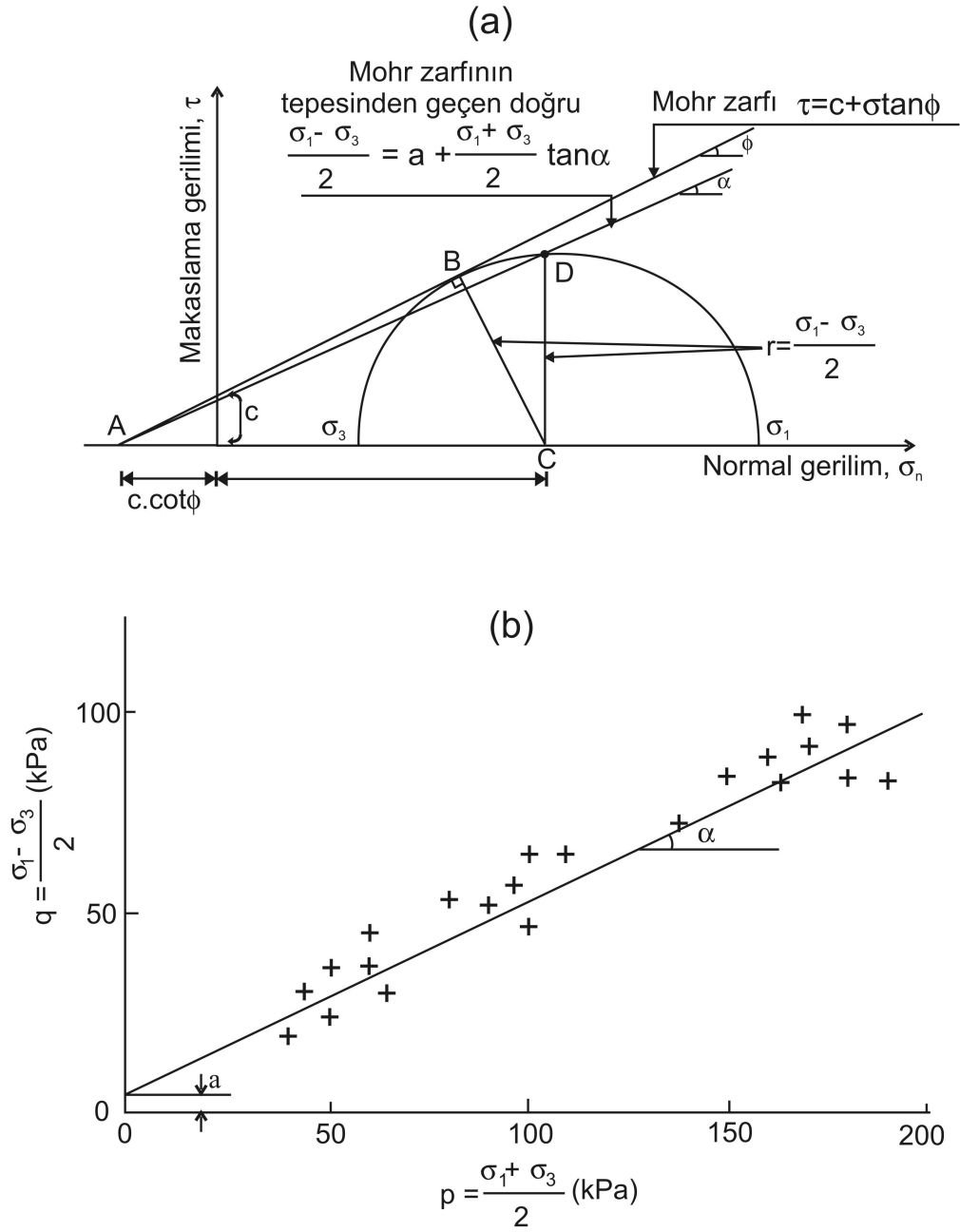
En az üç özdeş örnek üzerinde farklı yanal basınçlarda gerçekleştirilen üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ile belirlenen veri çiftlerine (σ_3 , σ_1) ait Mohr çemberlerine olabildiğince teğet bir doğrunun çizilmesinde bazı hatalar olabilmektedir. Bununla birlikte, bazı kaya malzemelerinin dayanımı, deneyde uygulanan yanal basınç seviyelerinden oldukça büyük olabilmektedir. Bu durumda Mohr çemberlerine teğet doğrunun çizilmesi daha da güçleşir. Bu zorluğun ve subjektif değerlendirmelerin üstesinden gelebilmek için $p = [(\sigma_1 + \sigma_3)/2]$ ve $q = [(\sigma_1 - \sigma_3)/2]$ veri çiftleri kullanılarak makaslama dayanımı parametreleri (c ve ϕ) belirlenir. p ve q veri çiftleri doğrusal regresyon analizi ile değerlendirilir ve elde edilen doğrunun eğimi “ α ” ile bu doğrunun q eksenini kestiği “ a ” değeri esas alınarak, kaya malzemesinin makaslama dayanımı parametreleri aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır (Fell, R., and Jeffery, R. P., 1987) (Şekil 4.1).

$$c = \frac{a}{\cos \phi} \quad (4.3a)$$

$$\phi = \sin^{-1}(\tan \alpha) \quad (4.3b)$$

Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre tek eksenli sıkışma dayanımı ise Eş. 4.4 ile ifade edilmektedir.

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (\text{Eş. 4.4})$$



Şekil 4.1. (a) p-q yönteminin esası ve (b) çok sayıda üç eksenli deney sonuçlarından genelleştirilmiş yenilme zarfının belirlenmesini gösteren tipik p-q grafiği (Fell and Jeffery, 1987'den).

4.1.1. A Grubu Örneklerin Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütüyle Değerlendirilmesi

A grubu bimrock örnekleri; ağırlıkça %45 alçı ve %5 bentonit ile % 50 su bileşenlerinin karışımıyla hazırlanan ve tek eksenli sıkışma dayanımı yaklaşık 1 MPa olan matriks malzemesinin kullanıldığı örnek grubudur. A grubu deney örnekleri de bimrock modellerinin hazırlanmasında kullanılan blok türlerine göre A_A (blok türü andezit) ve A_T (blok türü tuf) şeklinde iki alt gruba ayrılmıştır.

Yapay bimrockların hazırlanmasında matriks ile blok karışım oranları ise, ağırlıkça %10, %30 ve %50 olarak hazırlanmıştır. Literatür çalışmalarında da belirtildiği üzere, ağırlıkça karışımlar bileşenlerinin birim hacim ağırlıklarına bağlı olarak hacimsel bileşen oranlarını yansıtmamaktadır. Matriks, tuf ve andezit malzemelerinin ve yapay bimrock karotunun birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak her bir bileşenin hacimsel oranı hesaplanmıştır. Tezin daha sonraki bölümlerindeki istatistiksel değerlendirmelerde hacimsel bileşen oranları kullanılmıştır. Yapay olarak hazırlanan karot örnekleri üzerinde bir tanesi tek eksenli sıkışma dayanımı olmak üzere diğerleri 75, 100, 150 ve 300 kPa yanal basınçlar altında üç eksenli deneyler yapılmıştır. Çizelge 4.1.'de A_A grubu örneklerine ilişkin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre (Eş. 4.3 ve Eş. 4.4) belirlenmiş kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS_{mc}) ile deneysel olarak belirlenmiş tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS_{lab}) değerleri sunulmuştur.

A_A grubu örneklerin kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin hacimsel blok oranına bağlı olarak boyutsuz değişimlerin izlenebilmesi için matriksin değerlerine göre normalleştirilmiş grafikleri Şekil 4.2'de, değişimleri ifade eden eşitlikler ise Eş. 4.5'de verilmiştir. Klasik regresyon analizlerinde yaygın bir şekilde dikkate alınan doğrusal, logaritmik, üssel ve bazı durumlarda exponansiyel ilişkiler bu çalışmada yeterli düzeyde temsil edici ilişkiler vermemiştir. Bu nedenle, verilerin dağılımına uygun olarak deneme-yanılma yaklaşımıyla eşitlikler aşağıdaki türetilmiştir.

$$c_N = 1.25 - \exp\left(\frac{HBO-100}{75}\right) \quad \text{Eş. (4.5a)}$$

$$\phi_N = \exp\left(\frac{HBO}{100}\right) \quad \text{Eş. (4.5b)}$$

$$UCS_N = \exp\left(\frac{-2.5 \times HBO}{1000}\right) \quad \text{Eş. (4.5c)}$$

burada c_N , ϕ_N ve UCS_N , matriksin değerlerine göre normalleştirilmiş kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımlarını ifade ederken, HBO ise yüzde olarak hacimsel blok oranını ifade etmektedir.

A grubu matriks ile tuf blok malzemesinin ağırlıkça %10, %30 ve %50, karışım oranlarında hazırlanan karot örnekleri (A_T grubu karotlar) üzerinde 75, 100, 150 ve 300 kPa yanal basınç düzeylerinde gerçekleştirilen üç eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüyle değerlendirilmesi sonucunda belirlenen kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS_{mc}) ile deneysel olarak belirlenmiş tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS_{lab}) değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

A_T grubu örneklerin matriksin değerlerine göre normalleştirilmiş kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin hacimsel blok oranına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.3'de bu değişimleri ifade eden eşitlikler ise Eş. 4.6'da verilmiştir.

$$c_N = 1.25 - \exp\left(\frac{HBO-100}{75}\right) \quad \text{Eş. (4.6a)}$$

$$\phi_N = \exp\left(\frac{7 \times HBO}{1000}\right) \quad \text{Eş. (4.6b)}$$

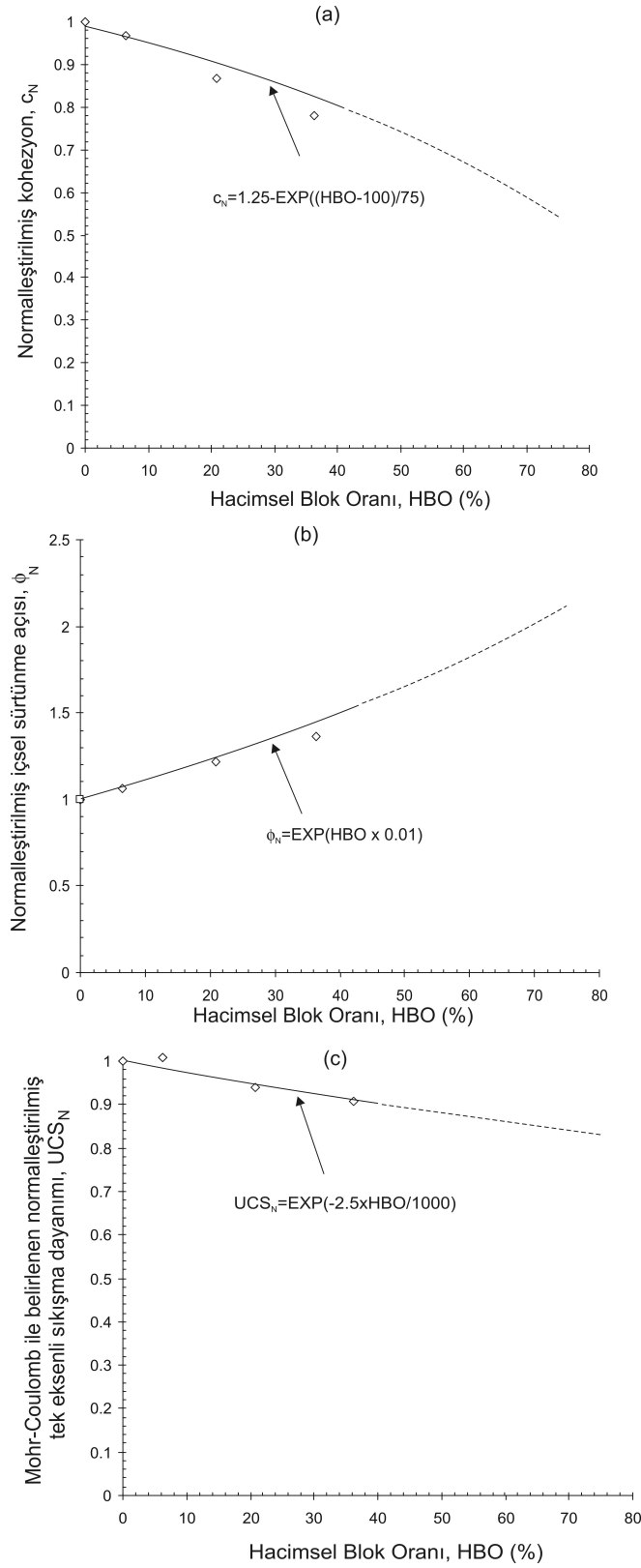
$$UCS_N = 1.01 - \exp\left(\frac{HBO-100}{25}\right) \quad \text{Eş. (4.6c)}$$

Çizelge 4.1. A_A grubu örneklerle ilişkin deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmesi.

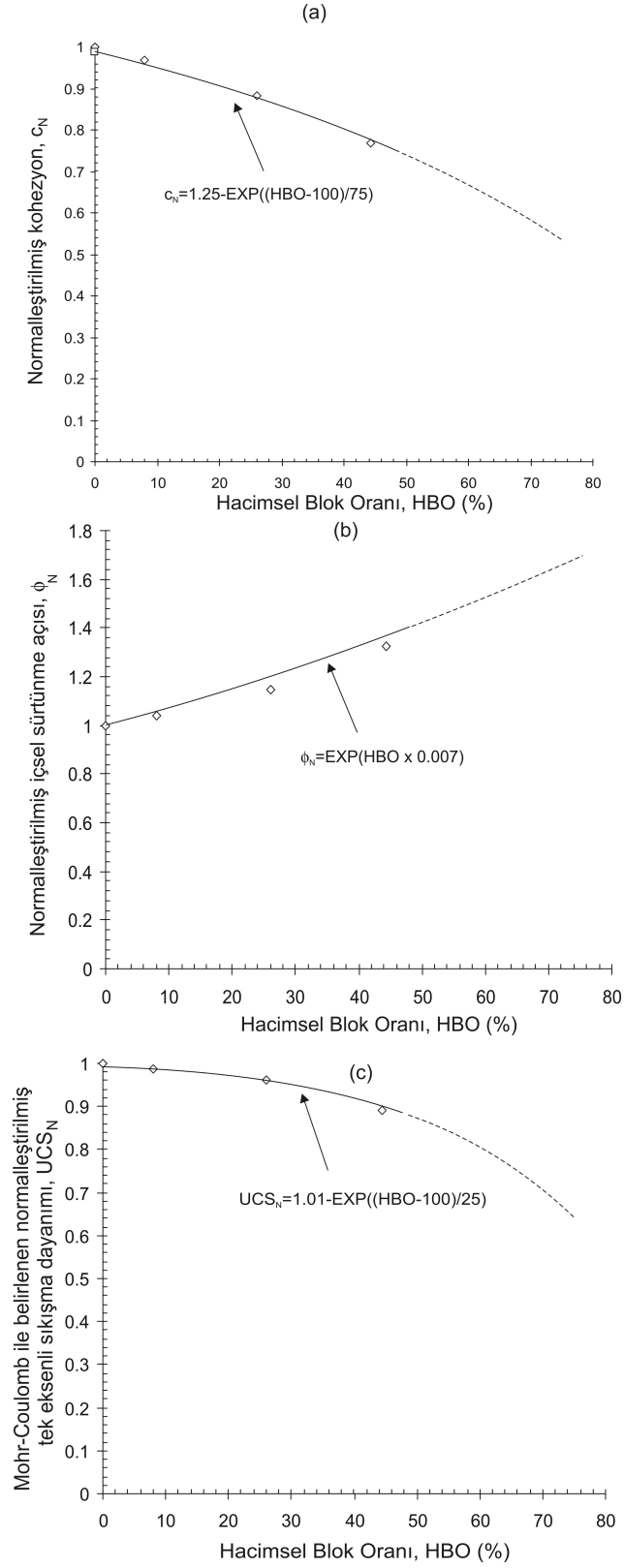
Ağırlıkça andezit blok oranı (%)	Hacimsel andezit blok oranı (%)	Kohezyon, c (kPa)	İçsel sürtünme açısı, ϕ (derece)	Mohr-Coulomb ölçütü ile belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, UCS_{mc} (kPa)	Laboratuvar da belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, UCS_{lab} (kPa)
0	0	285.2	24.8	891.3	897.6
10	6.5	276.2	26.3	889.6	906.5
30	20.8	247.8	30.2	862.0	842.1
50	36.3	222.2	33.7	831.3	815.7

Çizelge 4.2. A_T grubu örneklerle ilişkin deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmesi.

Ağırlıkça andezit blok oranı (%)	Hacimsel andezit blok oranı (%)	Kohezyon, c (kPa)	İçsel sürtünme açısı, ϕ (derece)	Mohr-Coulomb ölçütü ile belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, UCS_{mc} (kPa)	Laboratuvar da belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, UCS_{lab} (kPa)
0	0	285.2	24.8	891.3	897.6
10	8.0	275.8	25.8	879.1	885.5
30	26.1	251.7	28.4	840.7	862.1
50	44.4	218.8	32.8	802.7	798.4



Şekil 4.2. A_A grubu örneklerin hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımının değişimi.



Şekil 4.3. A_T grubu örneklerin hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.

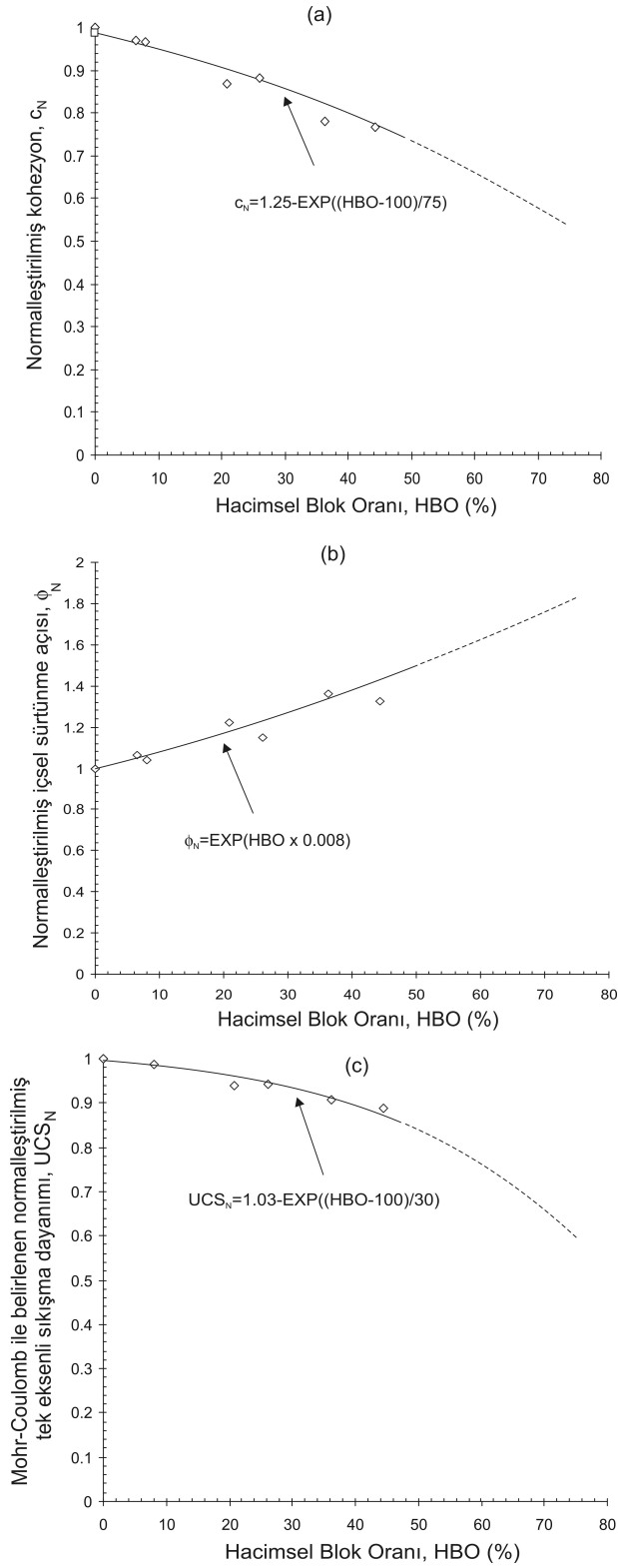
Tek eksenli sıkışma dayanımı yaklaşık 1 MPa düzeyinde olan ve A grubu örneklerin hazırlanmasında kullanılan matriks karışımı içerisinde farklı oranlarda andezit kaya parçalarının bulunduğu A_A grubu ve tüf kaya parçalarının bulunduğu A_T grubu örneklerinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmeleri sonucunda belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açılarının matrikse göre normalleştirilmiş değerlerinin hacimsel blok oranı ile olan ilişkileri (bkz. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3; Eş. 4.5 ve Eş. 4.6) oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Bu benzerlikten dolayı her iki gruba ait veriler birlikte değerlendirilmiş (Şekil 4.4) ve elde edilen eşitlikler Eş. 4.7’de verilmiştir.

$$c_N = 1.25 - \exp\left(\frac{HBO-100}{75}\right) \quad \text{Eş. (4.7a)}$$

$$\phi_N = \exp\left(\frac{8 \times HBO}{1000}\right) \quad \text{Eş. (4.7b)}$$

$$UCS_N = 1.03 - \exp\left(\frac{HBO-100}{30}\right) \quad \text{Eş. (4.7c)}$$

Dayanım kontrastı ($UCS_{andezit}/UCS^{matriks} \sim 50$ ve $UCS_{tüf}/UCS^{matriks} \sim 10$) bir birlerinden oldukça farklı olan iki model bimrock örneğinde yenilme yüzeyinin matriks içinde ve/veya blok ile matriks dokanağı boyunca gelişmesi nedeniyle, blokların dayanımının bimrockın dayanımında önemli düzeyde etkili olmadığı görülmektedir. Bu noktada hacimsel blok oranı artışına bağlı olarak kohezyon ve tek eksenli sıkışma dayanımının azaldığı, buna karşın içsel sürtünme açısının ise arttığı görülmektedir. Bu durum Goodman, Lindquist ve Medley tarafından gerçekleştirilen çalışmaların sonuçlarıyla uyum gösterirken Ankara aglomeralarında yapılan çalışmaların (Gökçeoglu, 2002; Sönmez vd. 2005; Sönmez et al., 2006) sonuçlarıyla farklılık göstermektedir. Bu duruma ilişkin değerlendirmeler tezin bir sonraki bölümünde ayrıntılarıyla yer verilmiştir.



Şekil 4.4. A_A ve A_T grubu örneklerin birlikte değerlendirildiği hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.

4.1.2. B Grubu Örneklerin Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütüyle Değerlendirilmesi

Tek eksenli sıkışma dayanımı yaklaşık 4 MPa olan, ağırlıkça %25 alçı, %35 çimento ile % 50 su karışımıyla hazırlanan B grubu matriks malzemesi kullanılarak yapay bimrock örnekleri hazırlanmıştır. Bu örnek grubunda da A grubu örneklerde olduğu gibi kullanılan blok türlerine göre B_A (blok türü andezit) ve B_T (blok türü tüf) şeklinde iki alt gruba ayrılmıştır.

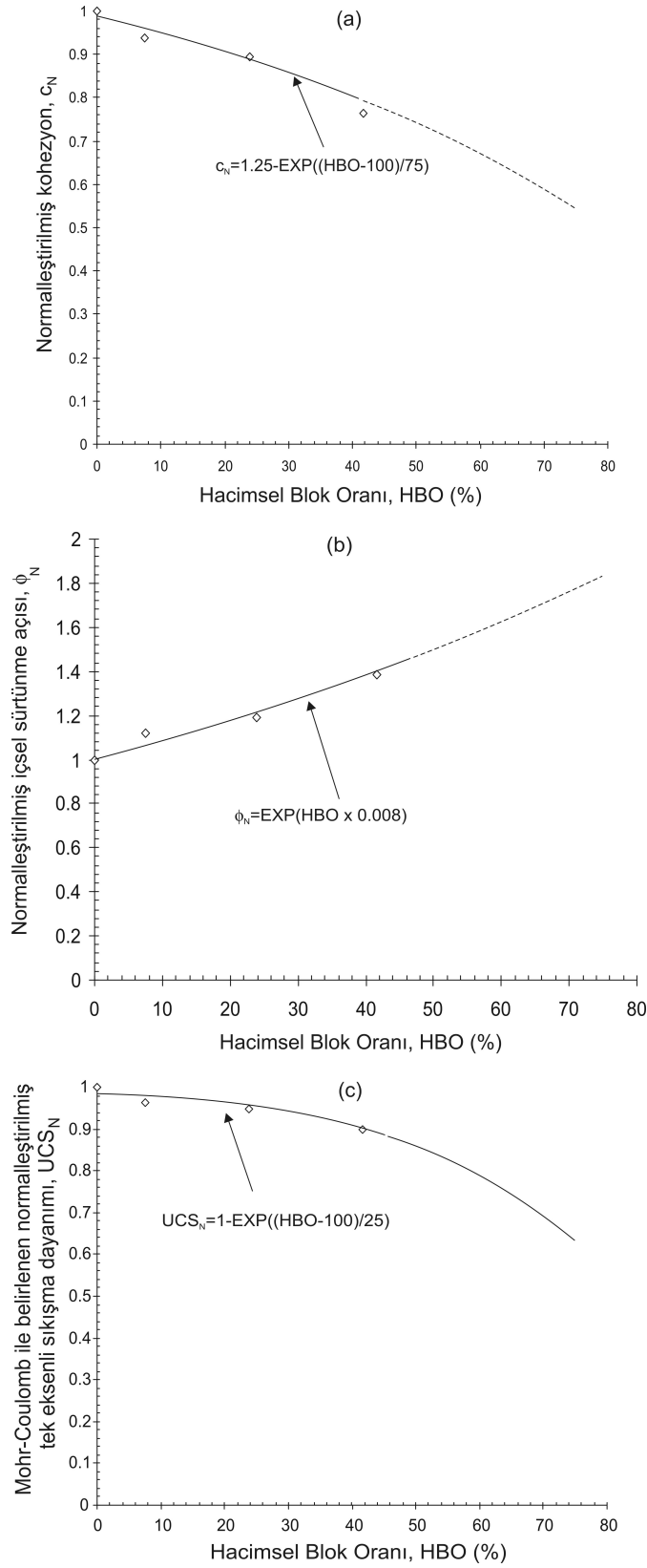
B grubu örneklerde de matriks ile blok karışım oranları ağırlıkça %10, %30 ve %50 olarak seçilmiş ve değerlendirme aşamasında bileşenlerin birim hacim ağırlıklarına bağlı olarak hacimsel karışım oranları hesaplanmıştır. Farklı hacimsel blok oranına sahip yapay bimrock karot örnekleri üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinin yanı sıra, 75, 100, 150 ve 300 kPa yanal basınçlar altında üç eksenli deneyler de uygulanmıştır. B_A grubu örneklerinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüyle değerlendirilmesiyle elde edilen (Eş. 4.3 ve Eş. 4.4) kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS_{mc}) ile deneysel olarak belirlenmiş tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS_{lab}) değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

B_A grubu örneklerin matrikse ait kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri kullanılarak normalleştirilen parametrelerin hacimsel blok oranına bağlı değişimlerini ifade eden grafikler ise Şekil 4.5'de sunulmuştur. Hacimsel blok oranına bağlı olarak elde edilen eşitlikler ise A grubu örnekler için belirlenenlerle oldukça benzer bazıları ise aynıdır (Eş. 4.8)

$$c_N = 1.25 - \exp\left(\frac{HBO-100}{75}\right) \quad \text{Eş. (4.8a)}$$

$$\phi_N = \exp\left(\frac{8 \times HBO}{1000}\right) \quad \text{Eş. (4.8b)}$$

$$UCS_N = 1 - \exp\left(\frac{HBO-100}{25}\right) \quad \text{Eş. (4.8c)}$$



Şekil 4.5. B_A grubu örneklerin hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.

Çizelge 4.3. B_A grubu örneklerle ilişkin deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmesi.

Ağırlıkça andezit blok oranı (%)	Hacimsel andezit blok oranı (%)	Kohezyon, c (kPa)	İçsel sürtünme açısı, ϕ (derece)	Mohr-Coulomb ölçütü ile belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, UCS_{mc} (kPa)	Laboratuvarda belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, UCS_{lab} (kPa)
0	0	1248.6	26.2	4010.2	4102.2
10	7.5	1171.6	29.3	4003.8	3954.5
30	23.9	1117.3	31.1	3958.4	3894.3
50	41.7	954.5	36.2	3760.7	3686.6

B grubu örneklerin hazırlanmasında kullanılan ve ortalama dayanımı yaklaşık 4 MPa olan matriks ile tuf kaya parçalarının karıştırılmasıyla hazırlanan B_T grubu örneklerin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre belirlenen kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımlarıyla, laboratuvarda belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Hacimsel blok oranları tuf ve matriksin birim hacim ağırlıkları kullanılarak ağırlıkça karışım oranlarından itibaren hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. B_T grubu örneklerle ilişkin deney sonuçlarının Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmesi.

Ağırlıkça tuf blok oranı (%)	Hacimsel tuf blok oranı (%)	Kohezyon, c (kPa)	İçsel sürtünme açısı, ϕ (derece)	Mohr-Coulomb ölçütü ile belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, UCS_{mc} (kPa)	Laboratuvarda belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, UCS_{lab} (kPa)
0	0	1248.6	26.2	4010.2	4102.2
10	9.2	1200.1	27.2	3933.1	4004.2
30	30	1057.8	31.9	3811.8	3854.3
50	51	926.7	37.4	3749.3	3626.4

B_T grubu örneklerinin de hacimsel blok oranı ile normalleştirilmiş parametreleri arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Bu amaçla elde edilen grafikler Şekil 4.6'da görülmektedir. B_A grubu örnekler de olduğu gibi hacimsel blok oranı ile normalleştirilmiş kohezyon ve tek eksenli sıkışma dayanımları arasında elde edilen eşitlikler de daha önceki eşitliklerle benzer elde edilmiştir (Eş. 4.9).

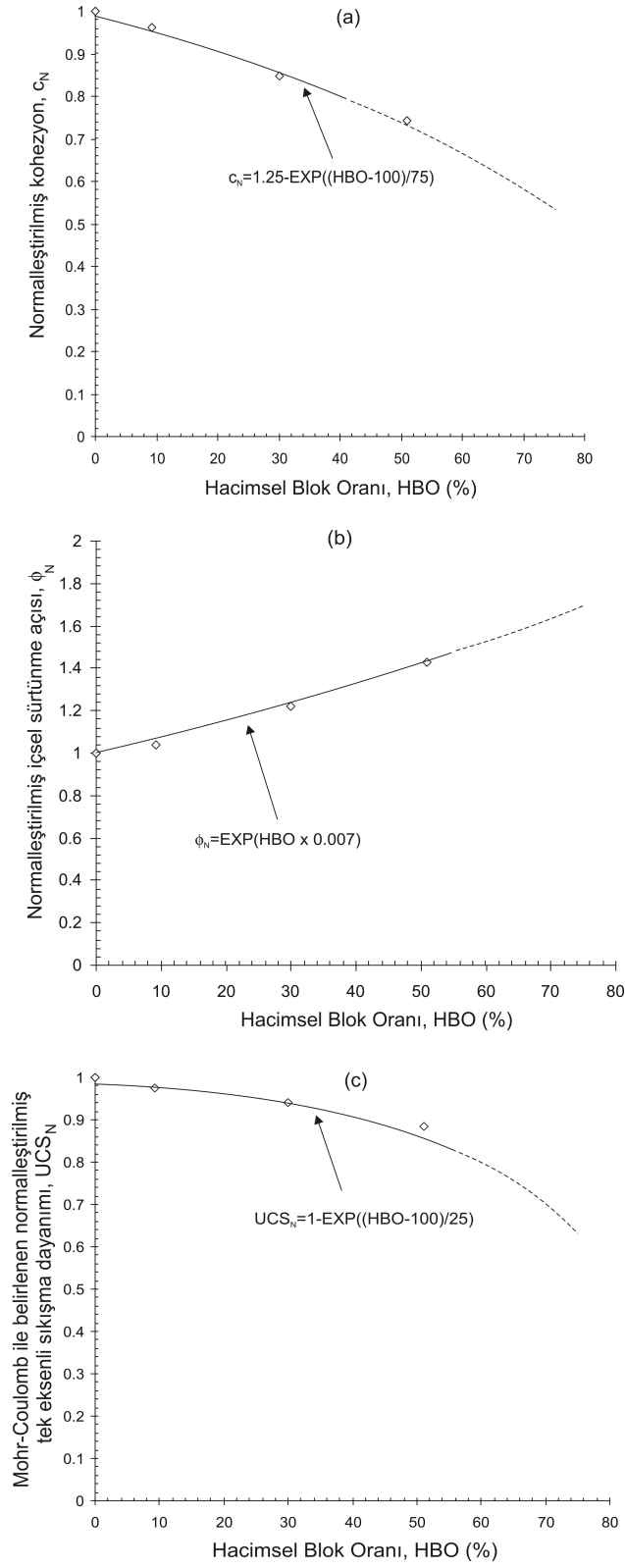
$$c_N = 1.25 - \exp\left(\frac{HBO-100}{75}\right) \quad \text{Eş. (4.9a)}$$

$$\phi_N = \exp\left(\frac{7 \times HBO}{1000}\right) \quad \text{Eş. (4.9b)}$$

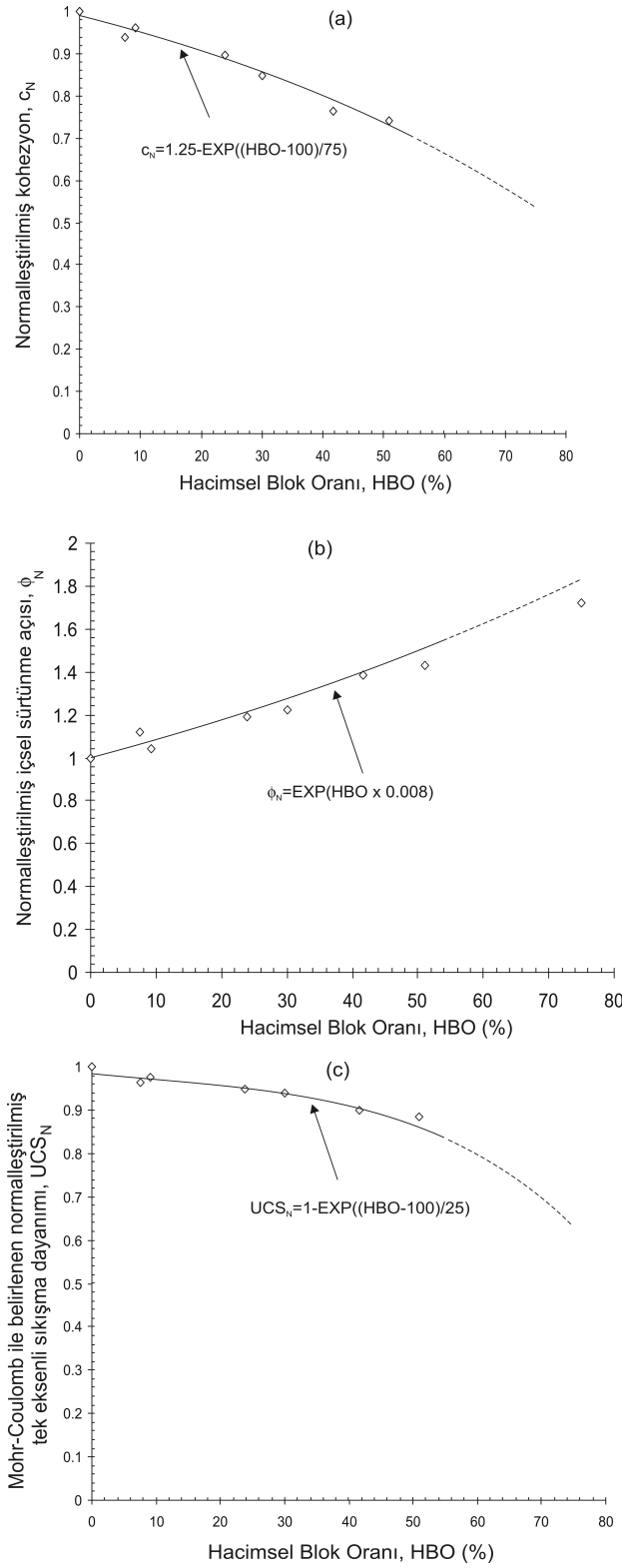
$$UCS_N = 1 - \exp\left(\frac{HBO-100}{25}\right) \quad \text{Eş. (4.9c)}$$

Tek eksenli sıkışma dayanımları arasında yaklaşık 5 kat bir farklılık bulunan andezit ve tuf kaya malzemelerinin blok olarak kullanıldığı B grubu örnekleri de A grubu örneklerinde yapıldığı gibi toplu olarak değerlendirilmiş (Şekil 4.7) ve B_A grubu için belirlenen eşitliklerle (Eş. 4.9) B_A ve B_T grubu örneklerin tümü için yapılan değerlendirmede de korunmaktadır.

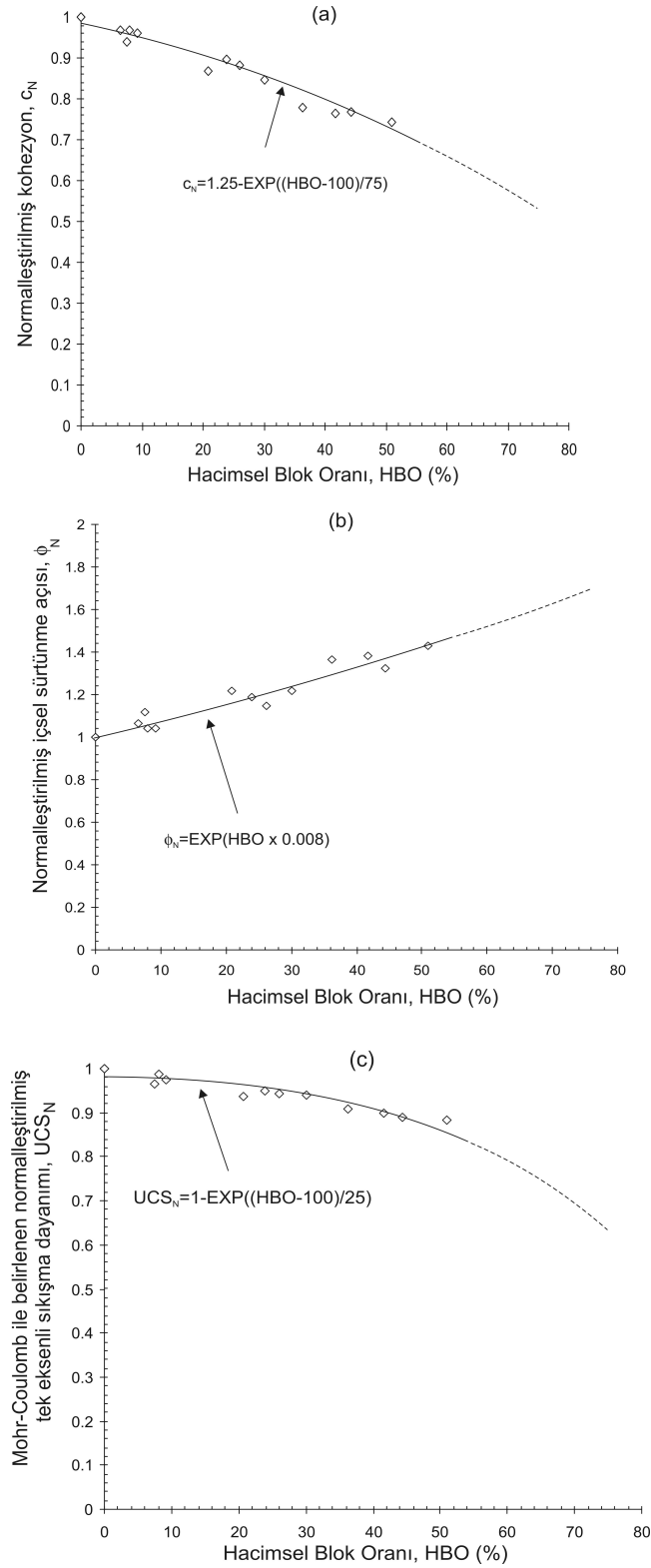
A ve B grubu örneklerinde kullanılan blok türüne göre ayrımlanan alt grupların ayrı ayrı ve birlikte yapılan yukarıdaki değerlendirmelerinde verilerin benzer dağılımlar gösterildiği ve benzer eşitliklerle temsil edildiği belirlenmiştir. Deneme yanılma yöntemiyle uyarlanan eğrisel fonksiyonlarında oldukça benzer ve hatta bazı veri gruplarında aynı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, A ve B grubu örneklerin tümüne ait ve kullanılan matriks malzemelerinin değerlerine göre normalleştirilmiş kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri ve hacimsel blok oranları ile birlikte yorumlanmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.6. B_T grubu örneklerin hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.



Şekil 4.7. B_A ve B_T grubu örneklerin birlikte değerlendirildiği hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.



Şekil 4.8. A ve B grubu örneklerin tümünün birlikte değerlendirildiği hacimsel blok oranına bağlı olarak normalleştirilmiş (a) kohezyon, (b) içsel sürtünme açısı, (c) tek eksenli sıkışma dayanımı değişimi.

Çalışmanın bu aşamasında iki farklı dayanıma sahip matriks ($UCS_{A_grubu} \sim 1 \text{ MPa}$; $UCS_{B_grubu} \sim 4 \text{ MPa}$) ve iki farklı dayanıma sahip blok ($UCS_{andezit} \sim 50 \text{ MPa}$; $UCS_{tuf} \sim 11 \text{ MPa}$), blok ile matriks dayanım oranı yaklaşık 2.5 ile 50 arasında değişen (A_A için ~ 50 , A_T için ~ 10 , B_A için ~ 12.5 ve B_T için 2.5) 4 farklı model Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre değerlendirilmiştir. Buna göre hacimsel blok oranındaki artışa bağlı olarak, kohezyon ve tek eksenli sıkışma dayanımı azalırken, içsel sürtünme açısı ise artmaktadır. Bu duruma ilişkin ayrıntılı değerlendirme ve yorumlar bir sonraki bölümde verilmiştir.

Hacimsel blok oranına bağlı olarak bimrockın makaslama dayanım parametreleri ile tek eksenli sıkışma dayanımlarının belirlenmesine yönelik bu çalışmada önerilen eşitlikler bütünlük sağlaması amacıyla aşağıda sunulmuştur.

$$c_N = 1.25 - \exp\left(\frac{HBO-100}{75}\right) \quad \text{Eş. (4.10a)}$$

$$c = c_N \times c_{\text{matriks}} \quad \text{Eş. (4.10b)}$$

$$\phi_N = \exp\left(\frac{8 \times HBO}{1000}\right) \quad \text{Eş. (4.10c)}$$

$$\phi = \phi_N \times \phi_{\text{matriks}} \quad \text{Eş. (4.10d)}$$

$$UCS_N = 1 - \exp\left(\frac{HBO-100}{25}\right) \quad \text{Eş. (4.10e)}$$

$$UCS = UCS_N \times UCS_{\text{matriks}} \quad \text{Eş. (4.10f)}$$

burada c_N , ϕ_N ve UCS_N , matriksin değerlerine göre normalleştirilmiş kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımlarını ifade ederken, c kohezyon, ϕ içsel sürtünme açısı, UCS tek eksenli sıkışma dayanımı ve HBO ise yüzde olarak hacimsel blok oranını ifade etmektedir.

4.1.3. Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütüne Göre Önerilen Ampirik Eşitliklerin Performans Değerlendirmesi

Blok ile matriks dayanım oranı 2.5 ile 50 arasında değişen 4 farklı yapay bimrock örneği ve 2 farklı yapay matriks malzemesi üzerinde yapılan tek eksenli ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin sonuçlarına göre geliştirilen ampirik eşitliklerin (Eş. 4.10) performansı, Lindquist (1994) tarafından yine yapay örnekler üzerinde uygulanan deneylerden elde edilmiş ve Şekil 2.13 a ve b'de sunulan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri kullanılarak sınanmıştır. Bir tanesi matriks malzemesine ait olmak üzere, toplam 13 adet kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerinin hacimsel blok oranına bağlı değişimleri Şekil 2.11'den belirlenmiş ve matrikse göre normalleştirilmiş değerleriyle birlikte Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Lindquist (1994) tarafından yapay bimrocklar üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleriyle belirlenen hacimsel blok oranı (HBO), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve blokların uzun eksenli ile düşey arasındaki açı (α)

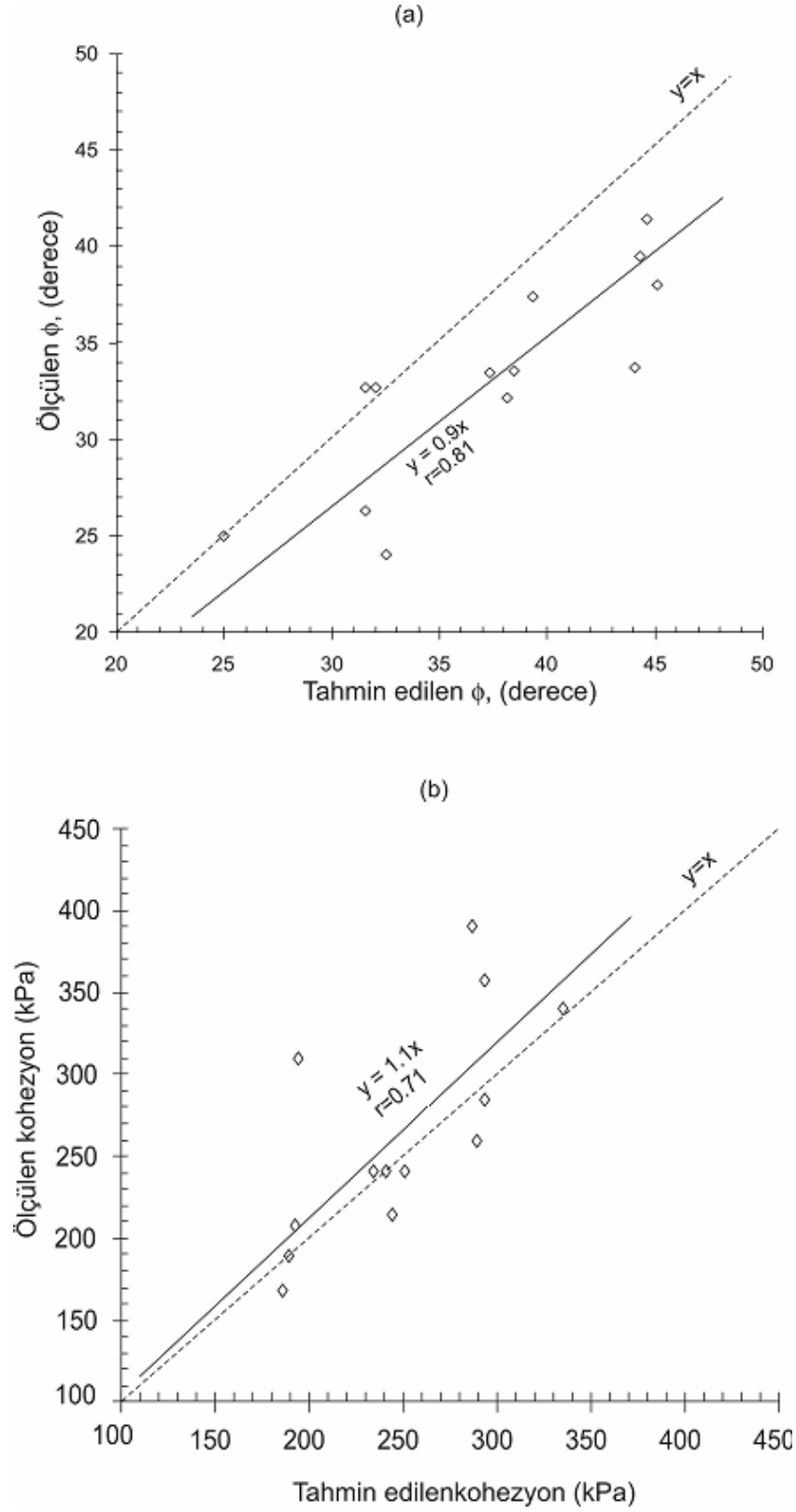
HBO (%)	ϕ (derece)	ϕ_N	c (kPa)	c_N	α (derece)
0	25.0	1	340	1	0
29	26.3	1.052	357	1.050	0
29	32.7	1.308	285	0.838	90
31	32.7	1.308	260	0.765	30
32.7	24.0	0.960	390	1.147	60
50	33.5	1.340	241	0.709	0
52.7	32.2	1.288	214	0.629	30
53.9	33.6	1.344	241	0.709	60
56.7	37.4	1.496	241	0.709	90
70.9	33.7	1.348	310	0.912	90
71.6	39.5	1.580	208	0.612	0
72.5	41.4	1.656	189	0.556	60
73.7	38.0	1.52	168	0.494	30

Yukarıdaki çizelgedeki normalleştirilmiş değerler, hacimsel blok oranı ve matriks malzemesinin kohezyon ve içsel sürtünme açıları Eş.4.10 a, b, c ve d önerilen ampirik eşitliklerde değerlendirilerek kohezyon ve içsel sürtünme açıları tahmin edilmiştir. Tahmin edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısına karşılık ölçülmüş değerler çapraz korelasyona tabi tutulmuş ve $y=x$ doğrusuna oldukça yakın ve 0.7'nin korelasyon katsayısının üzerinde korelasyonlar belirlenmiştir (Şekil 4.9). Lindquist (1994) blok yönelimlerinin birmcokların dayanımı üzerindeki etkisini de araştırmış ve bu amaçla blokların uzun eksenleri ile düşey eksen arasında 0^0 , 30^0 , 60^0 ve 90^0 'lik açılar olan yapay bimrock örnekleri hazırlamışlardır. Bu tez çalışmasında blok yönelimi dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, blok yöneliminin de dikkate alınması durumunda önerilen ampirik ilişkilerin Lindquist (1994)'e ait veriler üzerindeki performansın daha yüksek olacağı söylenebilir.

4.2. Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün Dikkate Alındığı Değerlendirmeler

Lindquist,(1994); Lindquist and Goodman, (1994) ve Medley, (2001) tarafından yapılmış olan çalışmalarda hacimsel blok oranının %75'in üzerinde olması durumunda jeolojik kütlenin bimrock olarak değerlendirilmesinin mümkün olamayacağı, dayanım ve deformasyon özellikleri açısından kaya kütlesi prensiplerinin geçerli olacağı belirtilmektedir. Bu nedenle, Mohr-Coulomb yenilme ölçütünü dikkate alan ve bir önceki bölümde verilen değerlendirmelerin yanı sıra, matiks malzemesi ve farklı oranlarda blok karıştırılarak hazırlanan yapay bimrock örnekleri, kaya kütlelerinin dayanımlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan Hoek-Brown ampirik yenilme ölçütüyle değerlendirilmiştir (Hoek et al. 2002).

Kaya kütlelerinden içerdikleri süreksizliklerle birlikte kütleyi temsil edebilecek boyutlarda örnek alınması ve bunların üzerinde uluslararası standartlara uygun olarak laboratuvar deneylerinin yapılması özel donanımlı az sayıdaki laboratuvar olanakları dışında neredeyse olanaksızdır. Bu nedenle, kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenebilmesine yönelik sınıflamalar ve ampirik ölçütlerin geliştirilmesine yönelik çok sayıda araştırma yapılmıştır.



Şekil 4.9. Lindquist (1994)'e ait veriler üzerinde tez çalışmasında Mohr-Coulomb parametrelerinin tahmini için önerilen ampirik eşitliklerin (Eş. 4.10) performansı

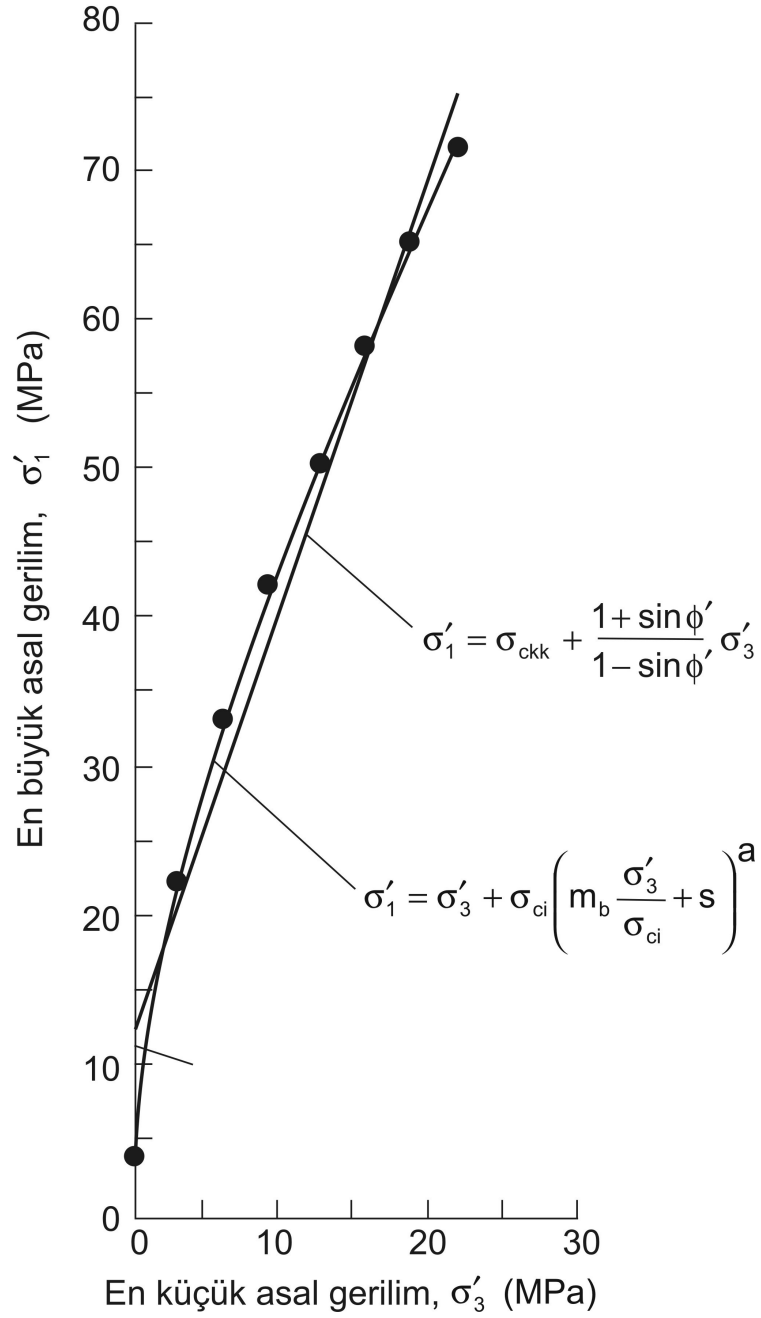
Hoek-Brown ampirik yenilme ölçütü önerildiği günden (Hoek and Brown, 1980) bu yana kaya malzemesinin ve kaya kütlelerinin dayanımlarının belirlenmesinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılan bir ölçüt olmuştur. Her ampirik yaklaşım gibi, Hoek-Brown yenilme ölçütü de artan uygulama sayısına bağlı olarak bazı modifikasyonlar geçirmiştir (Hoek and Brown, 1980; Hoek and Brown, 1988; Hoek and Brown, 1997; Sönmez and Ulusay, 1999; Sönmez 2001; Sönmez and Ulusay, 2002; Hoek et al., 2002; Sönmez and Gökçeoğlu, 2006). Tez çalışması kapsamında, ölçütün sadece kaya malzemesi için geçerli olan karekök parabolü şekli kullanılmıştır. Tez kapsamında, ölçütün tarihsel gelişimine girilmeden sadece uygulamayla ilgili güncel önerileri, (Hoek et al., 2002; Sönmez and Ulusay, 2002; Sönmez and Gökçeoğlu, 2006) Çizelge 4.6'da verilmiş olup ölçütün genelleştirilmiş ifadesi Eş. 4.11'de verilmiştir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Eş. (4.11)}$$

burada σ'_1 ve σ'_3 asal efektif gerilmeler, σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı, “ m_i ” kaya malzemesine ait “ m ” parametresi, s ve a GSI'ya bağlı Hoek- Brown sabitleridir.

Asal gerilmeler cinsinden ifade edilen ve yukarıda tanımlanan ölçüt eğrisel bir yenilme zarfı sunar (Şekil 4.10). Kaya kütleleri için önerilmiş olan ölçüt, yanal basıncın artmasına paralel olarak, süreksizlik yüzeyleri üzerindeki normal gerilmelerin artacağını ve kütlenin daha kenetlenmiş bir kütle yapısına sahip olacağını ifade eder. Bu durumda kaya malzemesinin özellikleri kütle dayanımı ve deformasyonu üzerinde daha etkin olmaya başlar. Bunun sonucu olarak, artan yanal basınçla birlikte anlık kohezyon artarken, anlık içsel sürtünme açısı ise azalır.

En genel tanımıyla martiks içinde blok içeren kayalar olarak tanımlanan bimrocklar %75'den daha fazla oranda blok içermeleri durumunda kaya kütlesi olarak değerlendirilmektedirler (Lindquist,1994; Lindquist and Goodman, 1994, Medley, 2001, Reidmüller et al., 2001).



Şekil 4.10. Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown yenilme ölçütlerinin asal gerilmeler türünden grafiksel sunumu (Hoek et al., 1992'den)

Çizelge 4.6. Hoek-Brown ampirik yenilme ölçütünün günümüzdeki şekli

Hoek et al. (2002)	Sönmez and Ulusay (2002)	Sönmez and Gökçeoğlu (2006)
$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$ $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{b_m}\right)$ $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{b_s}\right)$ $b_m = 3.14 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1-d_f)}\right) + 28$ $b_s = 0.67 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1-d_f)}\right) + 9$ GSI>30 için $a=0.5$ GSI<30 için $a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI_d-100}{28}\right)$ $s = \exp\left(\frac{GSI_d-100}{9}\right)$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$ $GSI_d = GSI \times r_f$ $r_f = f(D)$

m_b : kaya kütlelerinin m sabiti, m_i : kaya malzemesinin m sabiti, GSI: kaya kütlelerinin Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index), GSI_d : örselenme sonrası GSI puanı, D: örselenme faktörü, r_f : indirgeme faktörüdür.

Hoek-Brown yenilme ölçütünde kaya malzemesine ait “m” parametresi (m_i) ve kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı temel girdi parametreleridir. Bimrockların (matriks ve bloklarıyla birlikte) tek eksenli sıkışma dayanımı ölçütte girdi olarak kullanılmış ve kaya kütlelerinin süreksizlik yoğunluğunun dolaylı bir göstergesi olan “s” parametresi ise 1 olarak alınmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımının hacimsel blok oranına bağlı olarak belirlenmesine yönelik değerlendirmeler bir önceki alt bölümde yapılmış olup, Hoek-Brown yenilme ölçütünde girdi olarak kullanılması gereken bimrockın tek eksenli sıkışma dayanımı, matriksin tek eksenli sıkışma dayanımı ve bimrockın hacimsel blok oranına bağlı olarak bir önceki alt bölümde önerilen Eş. 4.10e ve Eş. 4.10f kullanılarak belirlenebilir.

Kaya malzemesinin “m” parametresi en az üç farklı hücre basıncı için gerçekleştirilen üç eksenli sıkışma deneylerinden elde edilen (σ_3 , σ_1) veri çiftleri kullanılarak, Eş. 4.10'da verilen Hoek-Brown yenilme ölçütü eşitliğinden belirlenebilmektedir. Hoek-Brown

yenilme ölçütü eşitliği ile doğrusal regresyon analizi yapılabilmesi için ($y=a+bx$) biçiminde bir ilişkiye dönüştürülebilir. Bu durumda Eşitlik 4.11'de verilen ölçüte ait eşitlik,

$$y = m\sigma_c x + s\sigma_c^2 \quad (4.12)$$

biçimde yazılabilir. Burada,

$$y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad \text{ve} \quad x = \sigma_3$$

olup, kaya malzemesi için $s=1$ 'dir. Buna göre, tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c) ve kaya malzemesinin “m” sabiti aşağıda verilen regresyon eşitliklerinden hesaplanır.

$$\sigma_c^2 = \frac{\sum y_i}{n} - \left[\frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \right] \frac{\sum x_i}{n} \quad (4.13a)$$

$$m = \frac{1}{\sigma_c} \left[\frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \right] \quad (4.13b)$$

Yukarıdaki ifadelerde; $x_i \rightarrow (\sigma_3)$ ve $y_i \rightarrow (\sigma_1 - \sigma_3)^2$ birbirini izleyen üç eksenli deneylere ait veriler, n ise veri çiftlerinin (σ_1 ve σ_3) sayısıdır. Tez kapsamında her bir yapay matris ve bimrock örnek grubu için en az bir adet tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi ile 75, kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 300 kPa hücre basınçlarında üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş ve ilgili örneğe ait “m_i” parametresi yukarıdaki eşitliklerden hesaplanmıştır.

4.2.1. A ve B Grubu Örneklerin Hoek-Brown Yenilme Ölçütüyle Değerlendirilmesi

Hoek-Brown yenilme ölçütündeki kaya malzemesinin “m” parametresi (m_i) normal gerilme-makaslama dayanımı zarfının ortalama eğimini ağırlıklı olarak kontrol eder. Diğer bir ifadeyle, “ m_i ” parametresi artarken, aynı normal gerilme değeri için anlık içsel sürtünme açısı da artar. Öncelikle A ve B grubu bimrock örneklerinin m_i parametreleri, ilgili matriks malzemesinin “ m_i ” parametresine göre normalleştirilmiş ve hacimsel blok oranı ile olan değişimi belirlenmiştir (Şekil 4.11a ve Şekil 4.11b). A ve B grubu için elde edilen eşitlikler ise sırasıyla Eş. 4.14a ve Eş. 4.14b’de verilmiştir.

$$m_{i_N} = \exp(0.017 \times HBO) \quad \text{Eş. 4.14a}$$

$$m_{i_N} = \exp(0.013 \times HBO) \quad \text{Eş. 4.14b}$$

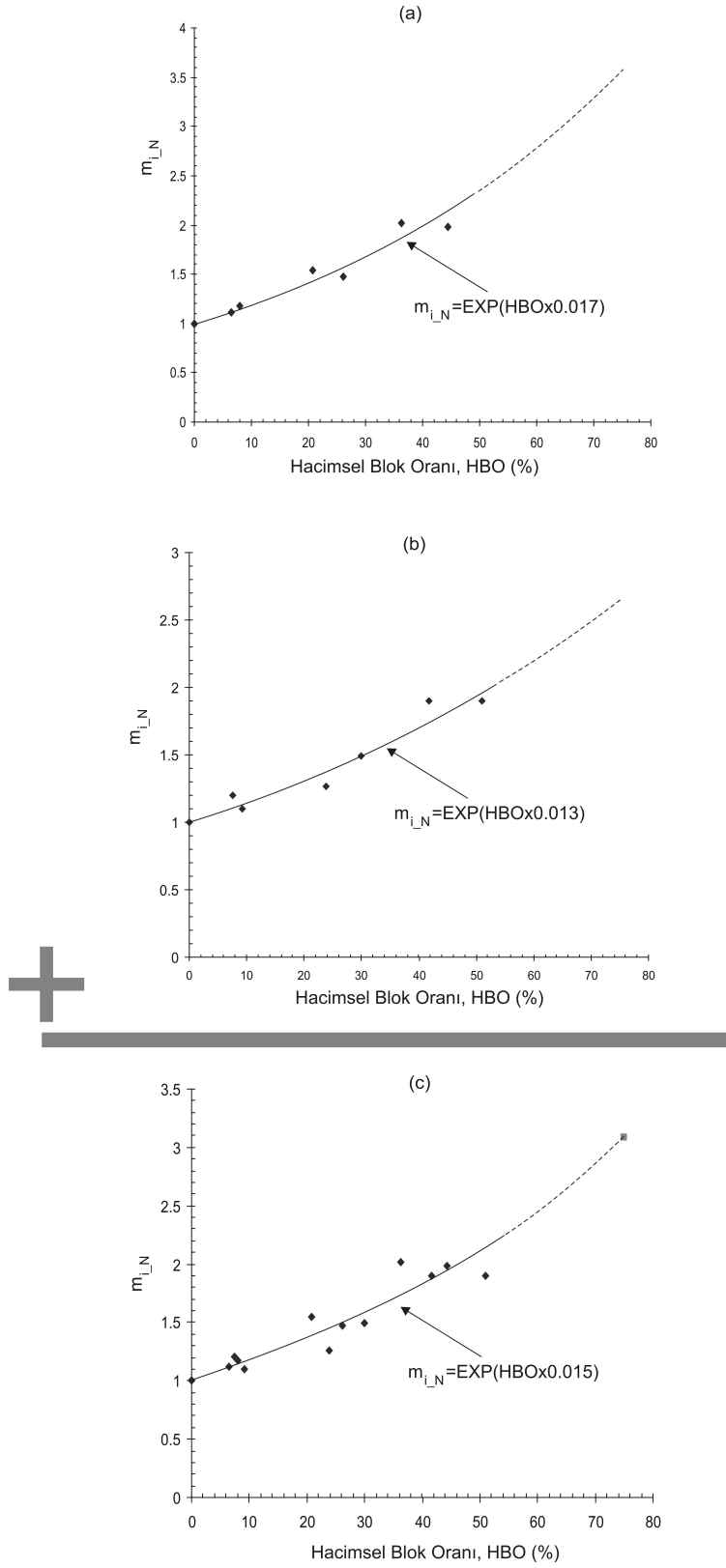
A ve B grubu örneklerinin “ m_i ” parametresi için yapılan değerlendirme Şekil 4.11c’de, hacimsel blok oranına bağlı değişimi ifade eden eşitlik ise aşağıda verilmiştir.

$$m_{i_N} = \exp(0.015 \times HBO) \quad \text{Eş. 4.15a}$$

$$m_{i_bimrock} = m_{i_N} \times m_{i_matriks} \quad \text{Eş. 4.15b}$$

4.3. Ampirik Eşitliklerin Karşılaştırmalı Performans Analizleri

A ve B grubu yapay matriks örnekleri ve bu matriks malzemeleri kullanılarak hazırlanan yapay bimrock örneklerine ait en büyük asal gerilmeler (σ_1), hücre basıncı (σ_3), hacimsel blok oranı, matriks malzemelerine ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı ve “ m_i ” parametreleri kullanılarak, Mohr-Colulomb (Eş. 4.2 ve Eş. 4.10) ve Hoek-Brown (Eş. 4.11 ve Eş. 4.15) yenilme ölçütleri dikkate alınarak ayrı ayrı hesaplanmış ve laboratuvar da ölçülen değerleri ile birlikte performans analizine tabi tutulmuştur.



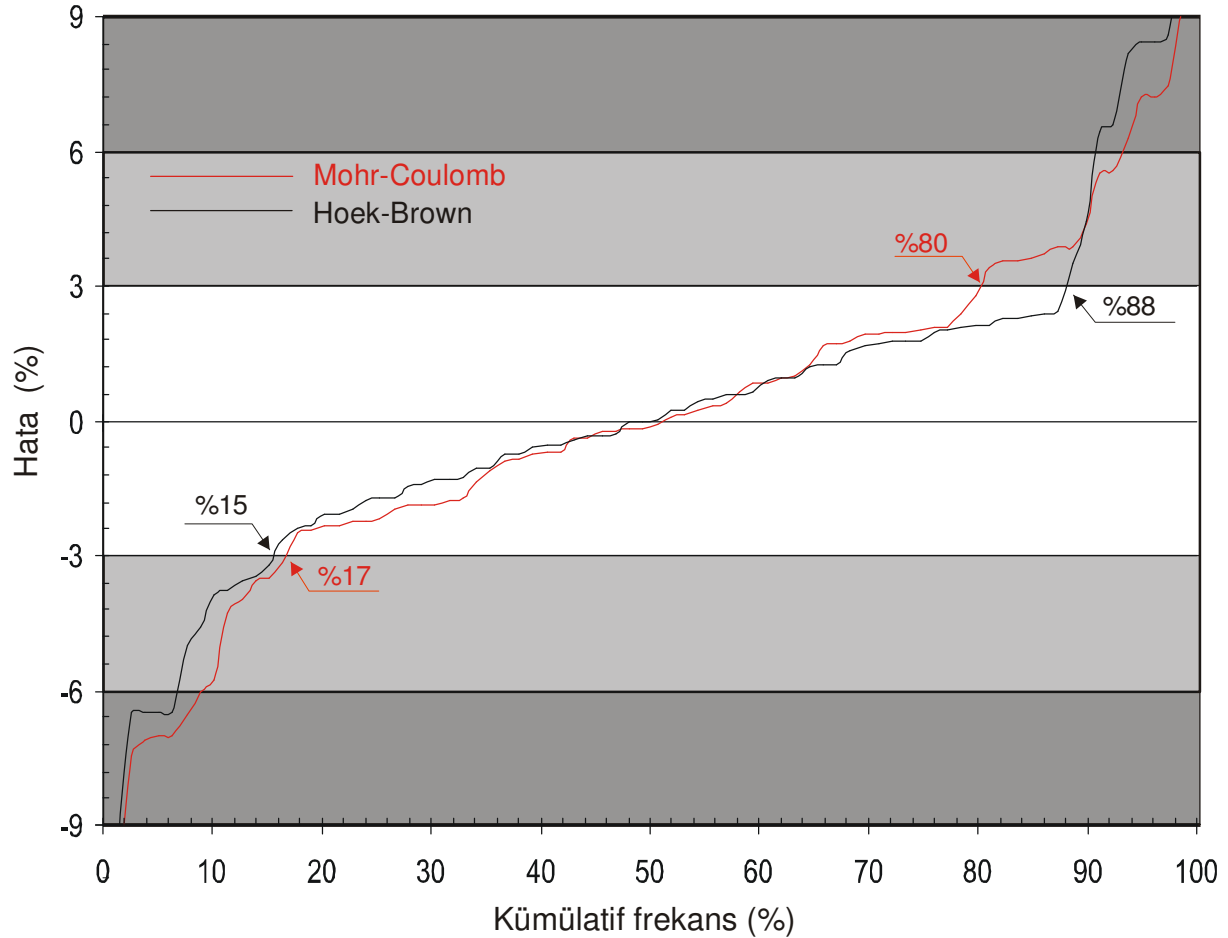
Şekil 4.11. Matriksin “ m_i ” değerine göre normalleştirilmiş (a) A grubu, (b) B grubu, (c) A ve B grubu örneklerin “ m_i ” parametrelerinin hacimsel blok oranına göre değişimi

Tek eksenli ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri sonucunda belirlenen UCS ve σ_1 değerlerinin (ölçülen değerler) tahmin edilen değerlerden gösterdikleri farklılık (hata) oranları aşağıdaki eşitlikle (Eş. 4.16) hesaplanmış ve hata oranına karşılık kümülatif frekans grafiği çizilmiştir (Şekil 4.12).

$$Hata(\%) = \left(\frac{TD - \ddot{O}D}{\ddot{O}D} \right) \times 100$$

Eş. 4.16

burada; TD: tahmin edilen değeri, $\ddot{O}D$ ise ölçülen değerdir.



Şekil 4.12. Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown yenilme ölçütlerini temel alarak önerilen ampirik eşitliklerin hata (%) oranına karşılık kümülatif frekans (%) grafiği.

Mohr-Coulomb parametrelerini esas alan ampirik eşitlikler dikkate alındığında, girdi olarak kullanılan σ_1 ve UCS değerlerinin % 63'ü $\pm\%3$ hata sınırları içerisinde yer alırken, Hoek-Brown yenilme ölçütünün dikkate alındığı ampirik eşitliklerin kullanılması durumunda $\pm\%3$ hata sınırları içerisinde verilerin %73'ü kalmaktadır. Bu nedenle Hoek-Brown yenilme ölçütünün dikkate alındığı ampirik eşitliklerin bir miktar daha iyi tahmin yapılabildiği söylenebilir. Ancak Şekil 4.11'deki grafikten de görüleceği üzere, her iki yaklaşımın da oldukça iyi bir tahmin performansına sahip oldukları görülmektedir.

Yukarıda yapılan değerlendirmenin yanı sıra, her iki yenilme ölçütünü esas alan ampirik eşitliklerden elde edilen sonuçlara göre istatistikte performans analizlerinde yaygın olarak kullanılan VAF (Variance Account For) (Eş. 4.17) değeri hesaplanmıştır.

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)} \right] \times 100 \quad \text{Eş. (4.17)}$$

Burada; y ölçülen değerler, y' , tahmin edilen değerler, N ise veri sayısıdır. Mükemmel bir tahmin performansı durumunda, VAF %100 olmaktadır.

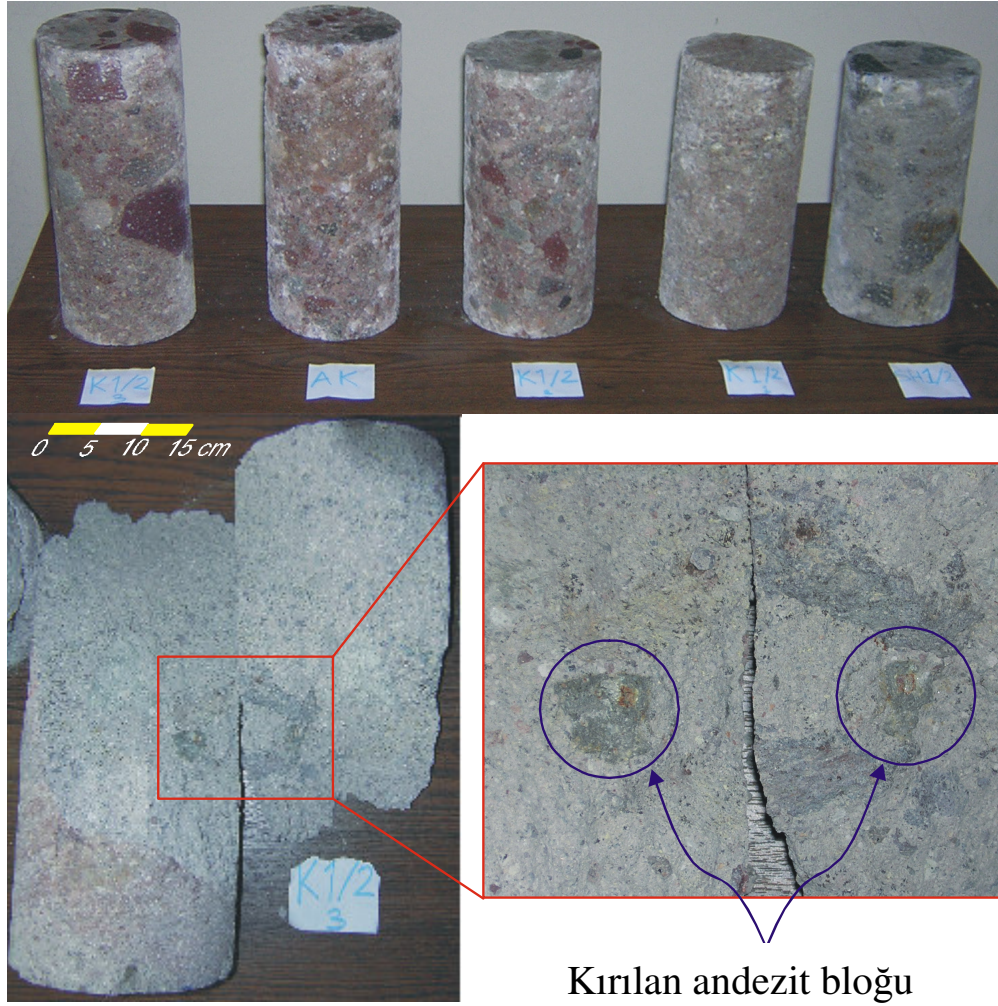
Mohr-Coulomb yenilme ölçütünün dikkate alındığı ampirik eşitliklerin kullanılması durumunda VAF değeri, %99.7 olarak elde edilirken, Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre geliştirilen ampirik eşitliklerin kullanılması durumunda ise %99.8 olarak belirlenmiştir. VAF değeri ile yapılan performans değerlendirmesine göre yaklaşımın oldukça iyi tahmin performansına sahip oldukları, buna karşın Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre geliştirilen eşitliklerin, az da olsa, daha iyi sonuç ürettiğini söylemek mümkündür.

5. BİMROCKLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN KESTİRİLMESİNE YÖNELİK GENEL BİR YAKLAŞIM

Bimrocklara ilişkin jeolojik ve jeomekanik amaçlı yapılmış çalışmaların verildiği 2. Bölümde de vurgulandığı üzere, özellikle matriks içinde blok içeren kayaların jeomekanik davranışlarının yorumlanmasında kullanılabilecek kabul gören bir yöntem mevcut değildir. Gerçekte bu durum melanj ve olistostrom gibi jeolojik anlamda oldukça karmaşık yapıya sahip jeolojik malzemelerin de bimrock kavramı altında toplanmış olmasından da kaynaklanmaktadır. Tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular, önerilen ampirik ilişkiler ve literatürdeki çalışmalar tezin bu bölümde değerlendirilmiş ve bimrockların jeomekanik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilecek genel bir sınıflamanın temelleri oluşturulmuştur.

Tez çalışması sırasında yukarıdaki ana unsurlara cevap verebilecek genel bir yaklaşım oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, tez kapsamında ve literatürde belirlenen bulgular dikkate alınarak aşağıdaki yorum ve yaklaşımlar yapılmıştır.

Medley (1994); melanjlar, olistostromlar, aglomera vb. gibi jeolojik anlamda karmaşık malzemelerin tamamını kapsayan tanımıyla matriks içinde blok içeren kayalar kavramını ortaya sunmuştur. Bu tanımlama jeolojik karmaşığın kökeniyle, oluşumuyla vb. ilgili hiç bir açıklama içermez. Ancak, jeomekanik anlamda, matriks ile içerisinde konuşlanan blokların arasında dayanım ve deformasyon özellikleri açısından bir kontrastın (en düşük oran=2) olması gerektiği vurgulanmaktadır. Matriks içerisindeki blokların varlığının sadece matriks içerisinde gelişmesi olası yenilme yüzeyinin uzunluğunu arttıracakı vurgulanmaktadır (Medley, 1994; Lindquist, 1994). Bunun sonucu olarak, bimrock kütlelerinin dayanımının matriksin dayanımı ve hacimsel blok oranıyla kontrol edildiği belirtilmektedir. Buna karşın, andezit bloklarının tüf matriks içinde yer aldığı Ankara aglomerasında gerçekleştirilen çalışmalarda (Gökçeoğlu vd., 1998; Gökçeoğlu, 2002; Sönmez vd., 2005; Sönmez at. al., 2006) aglomera karotlarında yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde andezit parçalarının da kırıldığı belirlenmiştir (Şekil 5.1).



Kırılan andezit bloğu

Şekil 5.1. Geniş çaplı (15 cm) Ankara aglomerası karotları ve kırılan bir andezit çakılı (bloğu)
(Sönmez vd., 2005'den)

Yukarıdaki değerlendirmelerin ışığında yenilme zarfının davranışı açısından temelde iki farklı bimrock modeli söz konusudur. Bunlardan ilki Lindquist (1994) tarafından da belirlenen ve bu çalışmada da benzer sonuçların elde edildiği, hacimsel blok oranındaki artışa bağlı olarak kohezyonun azaldığı ve içsel sürtünme açısının ise arttığı bimrock türüdür (Şekil 5.2). Bu tür bimrockların en zayıf dayanıma sahip bileşeni matriks ile blok sınırı olup, “*kaynaşmamış bimrock*” olarak tanımlanmıştır. Diğer bimrock türünde ise, blok ile matriks arasında iyi bir kaynaşma söz konusu olup, “*kaynaşmış bimrock*” olarak tanımlanmıştır. Bu iki bimrock türünün diğerinden daha da ayrılabilmesi için sahada uygulanabilecek pratik bir yaklaşım da önerilmiştir. El ile veya jeolog çekici ile bimrock

içerisindeki bloklar nispeten kolay bir şekilde matriksten ayrılamıyor ve ayrılabilen bloklar üzerinde kolaylıkla temizlenemeyen matriks kalıntıları kalıyor ise bu tür bimrocklar “kaynaşmış bimrock” olarak tanımlanabilirken, diğerleri “kaynaşmamış bimrock” olarak tanımlanabilirler.

“*kaynaşmamış*” bimrockların hacimsel blok oranına bağlı olarak dayanımlarının değişimiyle ilgili olarak literatürde bir yanlış da söz konusudur. Literatürde hacimsel blok oranının artmasıyla ile bimrockın dayanımının da artacağı ifade edilmektedir. Hatta bimrocklarda sadece matriksin dayanımının dikkate alınması gibi tutucu bir yaklaşımdan da kaçınılması da vurgulanmaktadır. Bu tür malzemelerde bimrockın dayanımı ağırlıklı olarak aşağıda belirtilirken üç faktörün denetimi altındadır.

- i) Matiksin dayanımı
- ii) Hacimsel blok oranı
- iii) Blok ile matriks sınırındaki dayanım

Kaynaşmanın düşük olması nedeniyle bu tür bimrocklarda blok ile matriks sınırındaki dayanım matriksin dayanımından düşük olmaktadır. Bundan dolayı, hacimsel blok oranındaki artışa bağlı olarak, kohezyon azalırken içsel sürtünme açısı ise artmaktadır (Şekil 5.2a). Bu durumda, belirli bir normal gerilme (yanal basınç) değerine kadar gerçekte matriksin blok içermesi durumunun makaslama dayanımını azalttığı söylenebilir. Dolayısıyla, bu tür bimrocklarda hacimsel blok oranındaki artışa bağlı olarak, tek eksenli sıkışma dayanımı da düşmektedir. Bu nedenle, bimrocklar için hacimsel blok oranının artmasının bimrockın dayanımın arttıracacağı yönündeki bir genellemeden kaçınılmalı, bu durumun dayanımın türü (makaslama dayanımı, tek eksenli sıkışma dayanımı gibi) ile blok ve matriks sınırındaki dayanıma ve normal gerilme (yanal basınç) düzeyine bağlı olacağı unutulmamalıdır.

Mühendislik uygulamalarında pratik olmasından dolayı doğrusal karakteri olan Mohr-Coulomb yenilme zarfı yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, özellikle kaya kütlelerinde olmakla birlikte, pek çok jeolojik malzemenin eğrisel yenilme zarfına sahip olduğu da güncel literatürde vurgulanmaktadır. Hacimsel blok oranı % 75’in üzerinde olan matriks içinde blok içeren kayalar için kaya kütlesi ilkelerinin geçerli

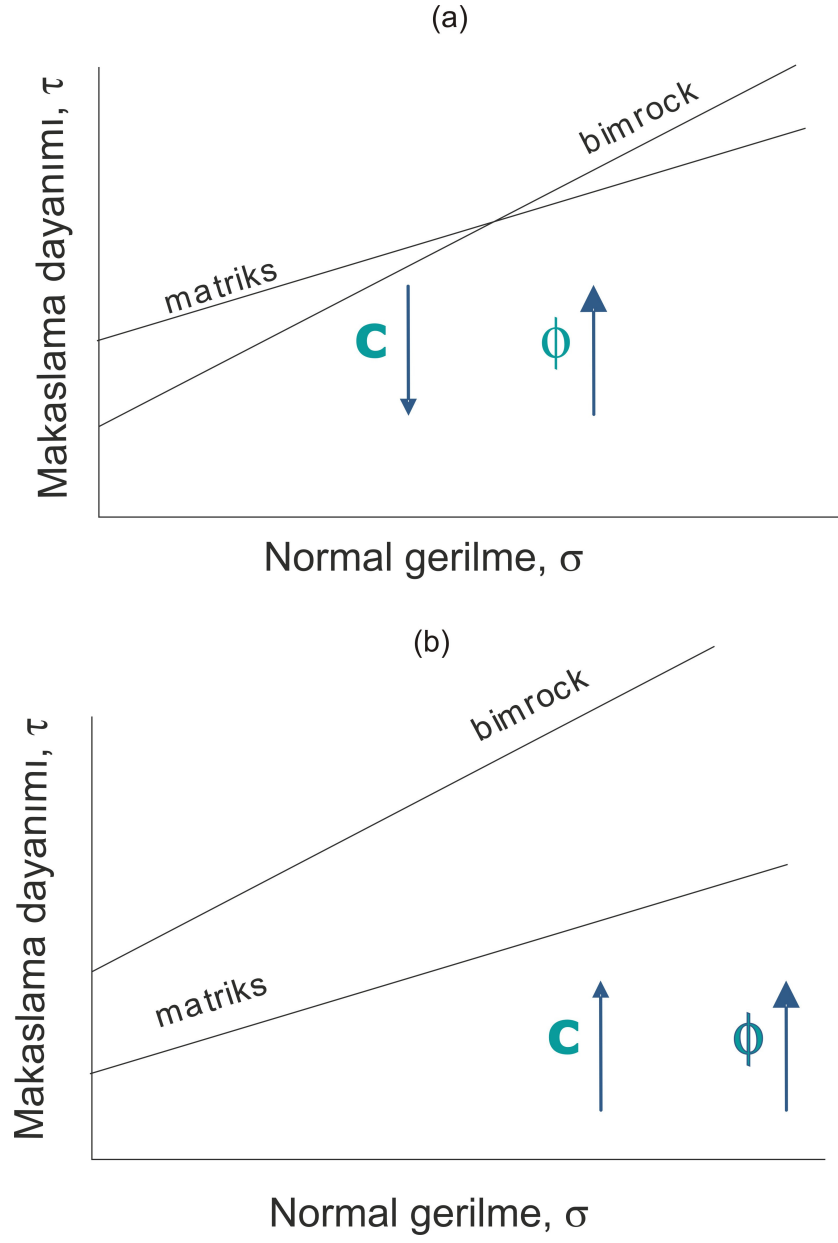
olacağı literatür çalışmaları bölümünde vurgulanmıştır. Bu nedenle, özellikle hacimsel blok oranının artışına bağlı olarak bimrockların da yenilme zarfının eğrisel bir karakterde olacağı öngörülebilir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında her iki yenilme ölçütünün de uygulanabileceği ampirik eşitlikler önerilmiştir. Önerilen bu eşitlikler de tezin bu bölümünde oluşturulan yaklaşıma dahil edilmiştir.

Yukarıdaki hususların ışığı altında genel değerlendirmeye yönelik olarak oluşturulan ve dayanım parametrelerinin belirlenebileceği bir akış diyagramı Şekil 5.3'de verilmiştir.

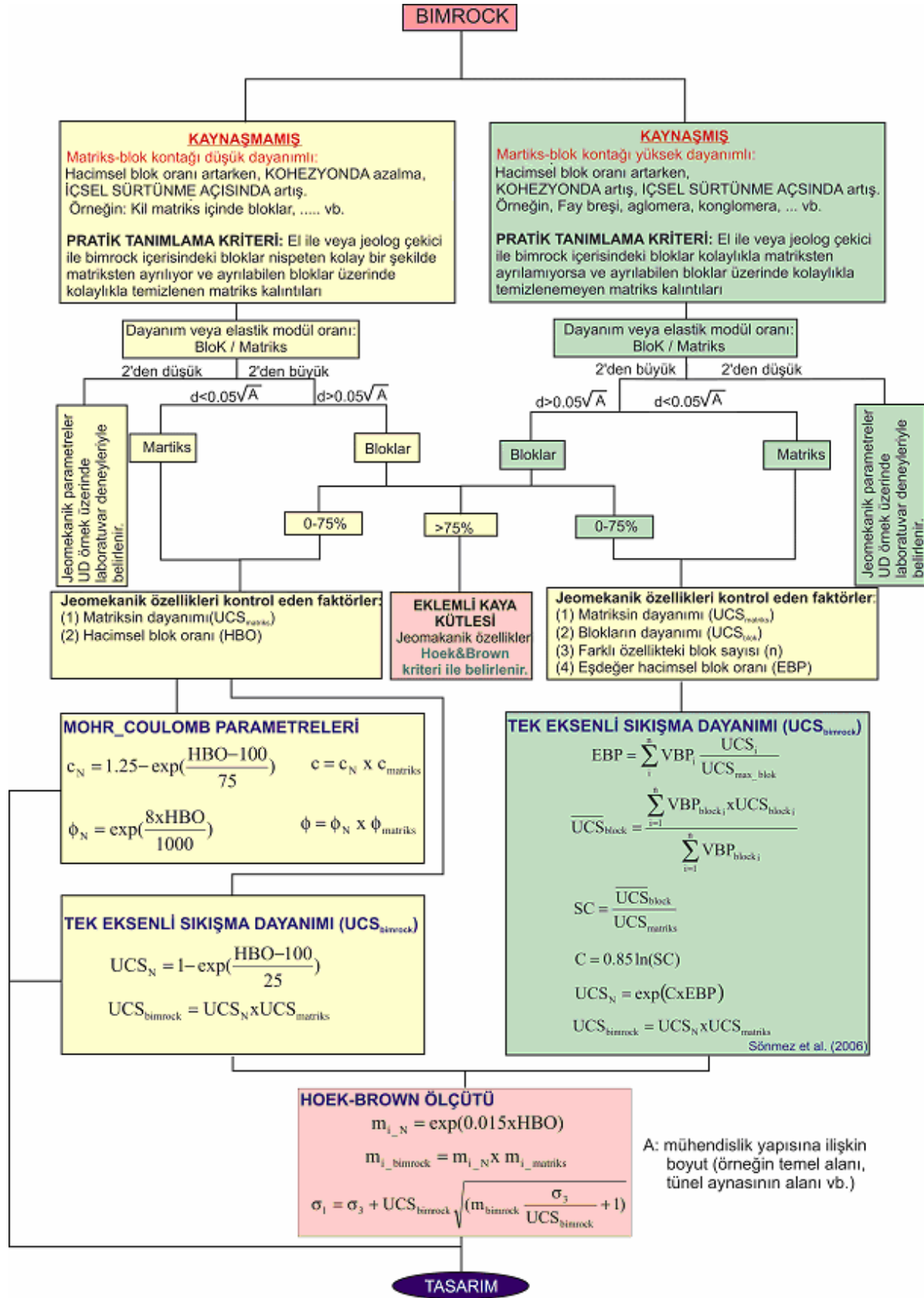
Medley and Lindquist (1995) tarafından ortaya konulan ve literatür çalışmalarının verildiği 2. Bölümde açıklanan bimrockların ölçekten bağımsız olması tezin bu bölümünde oluşturulan yaklaşımda da dikkate alınmıştır. Blok ile matriks arasındaki taneboyu sınırı (en küçük blok boyutu, EKB) inşası öngörülen mühendislik yapısının boyutlarına göre aşağıdaki eşitlikten belirlenebilmektedir.

$$EKB = 0.05\sqrt{A} \quad \text{Eş. (5.1)}$$

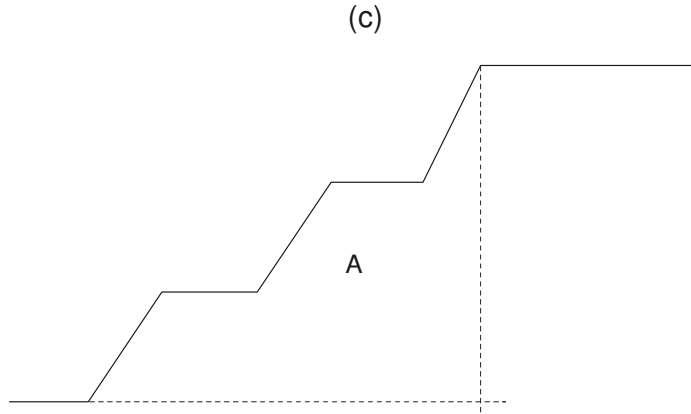
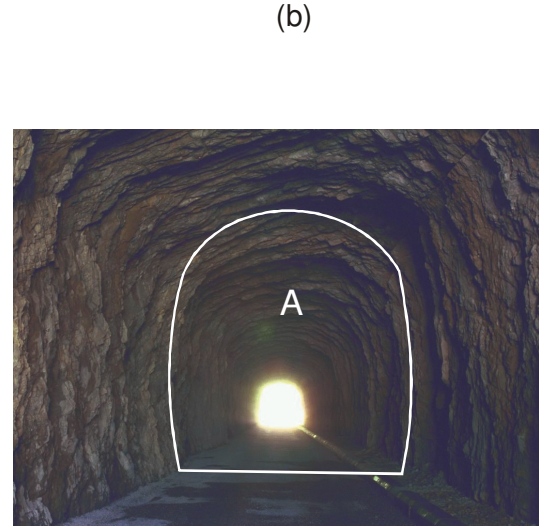
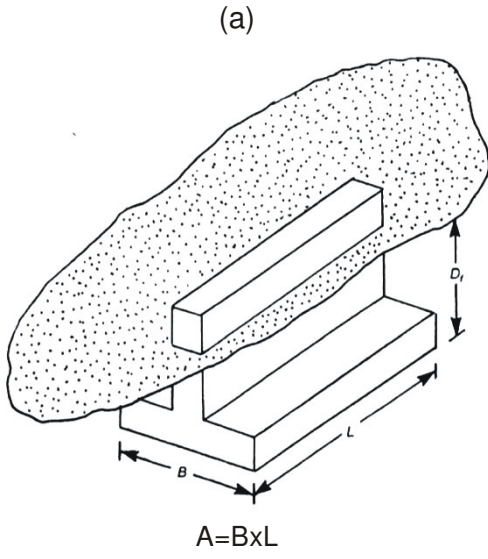
Mühendislik yapısının boyutlarına bağlı olarak seçilmesi gereken A değeri için kabul gören bir öneri bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında; temellerde temel alanı, (Şekil 5.4a, BxL) tünellerde tünel aynası (Şekil 5.4b), şevlerde şev tepesinden topuk kotuna kadar inilen düşey doğru ile topuktan geçen yatay doğrunun sınırlandığı alan (Şekil 5.4c) A olarak alınabilir.



Şekil 5.2. (a) Kaynaşmamış ve (b) Kaynaşmış bimrockların yenilme zarflarının şematik gösterimi.



Şekil 5.3. Bimrocklar jeomekanik parametrelerinin belirlenebildiği genel bir akış diyagramı.



Şekil 5.4. (a) temel (Das, 1999), (b) tünel ve (c) şevlerde EKB'nin belirlenmesinde dikkate alınması önerilen alanlar (A).

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Martiks içinde blok içeren kayalar olarak tanımlanan bimrockların dayanımlarının uluslararası standartlara uygun karot örnekler hazırlanarak laboratuvar deneyleriyle belirlenmesi, örnek hazırlamadaki güçlüklerden dolayı hemen hemen olanaksızdır. Bu güçlüğün üstesinden gelebilmek için ampirik yöntemlerin ve sınıflamaların geliştirilmesinin amaçlandığı bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ve gelecekte yapılacak çalışmalara ilişkin öneriler aşağıda sunulmuştur.

1. Yapay bimrock örneklerindeki hacimsel blok oranı (HBO) artarken, Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre belirlenen kohezyon azalmakta ve içsel sürtünme açısı ise artmaktadır. Makaslama dayanım parametrelerindeki bu değişimin bir sonucu olarak HBO artarken, tek eksenli sıkışma dayanımı da azalmaktadır. Bu sonuçlar, Ankara aglomeralarında belirlenen sonuçlar dışında, literatürdeki saptamalarla da uyum göstermektedir. Yapay matriks örneklerinin değerleri kullanılarak normalize edilen yapay bimrock örneklerine ait kohezyon, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli sıkışma dayanımlarının, HBO'ya bağlı olarak belirlenebileceği ampirik ilişkiler geliştirilmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütünün girdi parametresi olan ve jeolojik malzemenin bir göstergesi olan “ m_i ” parametresi, eğrisel yenilme zarfının genel eğimiyle oldukça yakından ilişkili olup, HBO artarken, “ m_i ” parametresi de artmaktadır. HBO ile m_i arasında da ampirik bir ilişki önerilmiştir.
2. Dayanım ve deformasyon özellikleri oldukça karmaşık ve çeşitlilik sunan bimrockların tasarım parametrelerinin belirlenmesinde yönlendirici olabilecek jeomekanik sınıflama da önerilmiştir. Bimrockların blok ile matriks dokanağındaki dayanım ilişkisi açısından “kaynaşmış” ve “kaynaşmamış” olarak iki sınıf tanımlanmış ve her iki sınıf için dayanım parametrelerinin belirlenmesine yönelik ampirik ilişkiler hem Mohr-Coulomb, hem de Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre önerilmiştir. “Kaynaşmış” bimrockların dayanımlarının belirlenmesinde Sönmez vd. (2005) ve Sönmez et al. (2006) tarafından önerilen ampirik eşitlikler kullanılmıştır.

3. Her iki yenilme ölçütünü esas alan ampirik ilişkilerin performansları, çapraz korelasyonlar ve % hata grafikleriyle değerlendirilmiş ve her iki yaklaşımın da yüksek bir kestirim performansına sahip oldukları belirlenmiş, ancak Hoek-Brown yenilme ölçütünü dikkate alan ampirik ilişkiler, çok farklı olmasa da daha iyi bir tahmin performansı sergilemiştir.
4. Hacimsel blok oranının artışına bağlı olarak, bimrocktan kaya kütesine bir geçiş söz konusudur. Literatürde bu geçiş için yaklaşık %75 HBO önerilmektedir. Bu nedenle; matriksten, bimrock ve kaya kütlelerine kadar uzanan bütünleşik bir değerlendirme yönteminin oluşturulmasında, kaya kütlelerinin dayanımlarının tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan Hoek-Brown yenilme ölçütünün, bu amaçla tercih edilmesi daha faydalı olacaktır. Ayrıca, bu tezde uygulananlardan daha farklı hücre basıncı seviyelerine ait deneysel çalışmaların yapılabilmesi durumunda, muhtemelen bimrockların orta ve yüksek hacimsel blok içeriklerinde dayanımlarının yanıl basınç ile ilişkili olabileceği sonucuna ulaşılabilceği de düşünülmektedir.
5. Özellikle fay zonlarında ki bimrocklar matriks içerisinde yönlü bloklar içermektedir. Bu nedenle, özellikle en büyük asal gerilme ile blok yönelimi arasındaki etkileşimin dayanım üzerindeki etkileri model deneylerle belirlenerek, bu çalışmada önerilen sınıflamaya ve ampirik ilişkilere uyarlanabilir.
6. Matriks malzemesi zemin niteliğinde (killi) olan, yamaç molozu gibi zemin/kaya karışımlarının da yenilme davranışları model deneysel çalışmalarla araştırılmalıdır.
7. Doğal bimrockların blok boyutu dağılım frekansları incelenerek, yapay bimrock modellerinde belirli bir derecelenmeye sahip blokların dahil edilmesi durumunda yenilme davranışının nasıl etkileneceği de araştırılmalıdır.
8. Bu çalışmada önerilen ampirik eşitlikler farklı dayanım özelliklerine sahip yapay matriks ve bimrock örnekleri üzerinde gerçekleştirilen tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak geliştirilmiştir. Bu nedenle, tüm ampirik tasarım yöntemlerinde olduğu gibi, elde edilecek

parametreler doğrudan tasarım parametresi olarak tek başına kullanılmamalıdır. Özellikle saha uygulamalarında karşılaşılan problemlerin ve duraysızlıkların geriye dönük analizleri ile önerilen sınıflama ve eşitliklerin performansları sınanmalı ve gerekli iyileştirme yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- 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.
- Bates, R.L., and Jackson, J.A., 1984. *Glossary of Geology*, 3rd Edition, American Geology Institute, Alexandria, V.A., 788 p.
- Bedrosian, T.L., 1978. Geology and slope stability in the Geysers Geothermal: Resources area, California Geology, 31, 151-159.
- Bedrosian, T.L., 1980. Geology and slope stability in selected parts of the Geysers Geothermal resources area, No.142 of special reports: Sacramento, California, California Division of Mines and Geology, 66 p.
- Bertuccioli, P., and Lanzo, G., 1993. Mechanical properties of two Italian structurally complex clay soils. *Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks*, eds. Anagnostopoulos et al., 383-389.
- 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., 1989. *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons, 215 p.
- Çapan, U., 1981. Ankara melanji hakkındaki görüşler ve melanjin Gökdere-Aktepe yöresindeki özelliklerine ait gözlemler, Tükiye Jeoloji Kurumu 35. Bilimsel ve Teknik Kurultayı, İç Anadolu'nun Jeolojisi Sempozyumu, Ankara Melanjı Paneli, pp.27-31.
- Das, B.M., 1999. *Shallow Foundations, Bearing Capacity and Settlement*. CRC Press, Washington D.C.,366.
- Deere, D.V., and Miller, R.L., 1966. Engineering classification and index properties of intact rock. Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, 90-101.
- Fell, R., and Jeffery, R. P., 1987. Determination of drained shear strength for slope stability analysis. In *Soil Slope Instability and Stabilisation*, B F. Wolker and R. Fell (eds.), Balkema, Rotterdam, 53-70.

- Gökçeoğlu, C., 1997. Killi, yoğun süreksizlik içeren ve zayıf kaya kütlelerinin mühendislik sınıflamalarında karşılaşılan güçlüklerin giderilmesine yönelik yaklaşımlar, (Doktora tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gökçeoğlu C., 2002. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. *Engineering Geology*, 66: 39-51.
- Gökçeoğlu C, Kasapoğlu K.E. and Sönmez H. 1998. Prediction of uniaxial compressive strength of Ankara agglomerates from their petrographical composition. In: *Proceedings of 8th International Congress of IAEG and the Environment*, D.Moore and O. Hungr (ed.), Vancouver, Canada, A.A. Balkema, Rotterdam, 455-459.
- Gökçeoğlu C., Sönmez H. and Kayabaşı A. 2003. Predicting the deformation moduli of rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci*, 40(5): 703–712.
- Greenly, E., 1919. *The geology of anglesey*, London, Geological Survey of Great Britain, 980 p.
- Hobbs, B.E., Means, W.D., and Williams, P.F., 1976. *An Outline of Structural Geology*, John Wiley & Sons, 571 p.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980. *Underground excavations in rock*. London: Inst. Min. Metall. Stephen Austin and Sons.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1988. The Hoek and Brown failure criterion: a 1988 update. In: Juran JC, editor. *Rock Engineering for Underground Excavations*, Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. University of Toronto, 31-38.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Int J Rock Mech Min Sci*, 34(8):1165-1186.
- Hoek, E, Carranza-Torres, C.T. and Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. In: *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada, Vol. 1, 267–273.
- Hsü, K.J., 1968. Principles of melanges and their bearing on the Franciscan-Knoxville Paradox, *Geological Society of America*, (1968), 79, pp. 1063-74.

- Irfan, T.Y. and Tang, K.Y., 1993. Effect of the coarse fraction on the shear strength of colluvium in Hong Kong. TN 4/92. Hong Kong Geotechnical Engineering Office.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. In: Brown ET, editor. ISRM suggested method: rock characterization, testing and monitoring. London: Pergamon Press, (1981), 211p.
- Janbu N., 1973. Slope stability computations. In: Hirschfeld RC, Paulos SJ, editors. Embankment dam engineering: Cassagrande volume. New York: Wiley, 1973. p. 47-87.
- Kasapoğlu, K.E., 1980. Ankara kenti zeminlerinin jeo-mühendislik özellikleri, (Doçentlik Tezi), Hacettepe Üniversitesi.
- Kayabaşı, A., Gökçeoğlu, C. and Ercanoğlu, M., 2003. Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study. Int J Rock Mech Min Sci, 40(1):55–63.
- Lindquist, E.S., 1994. The strength and deformation properties of melange, (Ph.D. Thesis), University of California, Berkeley.
- Lindquist, E.S. and Goodman, R.E., 1994. The Strength and deformation properties of model melange, Proc. 1st North American Rock Mechanics Conference (NARMS), Austin, Texas; eds. Nelson, P.P. ve Laubach, S.E., Rotterdam: A.A. Balkema, 843-850.
- Medley, E.W., 1994. The engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks), (Ph.D. Thesis), University of California, Berkeley.
- Medley, E.W., 2001. Orderly charecretization of chaotic Franciscan Melanges, Felsbau, Journal of Engineering Geology, Geomechanics and Tunnelling, 19 (4) 20-33.
- Medley, E.W., 2002. Estimating Block Size Distributions of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks), Proc. of 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS), ed. by Hammah, R., Bawden, W., Curran, J. and Telesnicki, M.; July 2002, Toronto, Canada; University of Toronto Press, 509-606

- Medley, E.W. and Goodman, R.E., 1994. Estimating the block volumetric proportion of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks), Proc. 1st North American Rock Mechanics Conference (NARMS), Austin, Texas; eds. Nelson, P.P. ve Laubach, S.E., Rotterdam: A.A. Balkema, 851-858.
- Medley, E.W. and Lindquist, E.S., 1995. The engineering significance of the scale-independence of some Franciscan Melanges in California, USA, Proc. 35th US Rock Mechanics Symposium, eds. Daemen, J.K. ve Schultz, R.A., Rotterdam: A.A. Balkema, 907-914.
- Medley E.W. and Rehermann, P.S., 2003. Increases in slope stability of rock/soil mixtures due to tortuosity of failure surface around rock and blocks. GSA Conference, Seattle WA, November 2, 2003.
- Mitri, H.S., Edrissi, R. and Henning J., 1994. Finite element modeling of cablebolted slopes in hard rock ground mines. Presented at the SME Annual Meeting. New Mexico: Albuquerque, 94–116.
- Nicholson, G.A. and Bieniawski. Z.T., 1990. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. Int J Min Geol Eng, 181–202.
- Raymond, L.A., 1984. Classification of Melanges. In Melanges: Their nature, origin and significance; ed. L.A. Raymond L.A. Boulder: Geological Society of America, 7-20.
- Riedmüller, G., Brosch, F. J., Klima K. and Medley E..W., 2001. Engineering geological characterization of brittle fault rocks and classification of fault rocks. Feldsbau, J. Of Engineering Geology, Geomechanics and Tunnelling. 19 (4/2001): 13-19.
- Serafim, J.L. and Pereira, J.P. 1983. Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski. In: Proceedings of the symposium on engineering geology and underground openings. Portugal: Lisboa, 1133–1144.
- Sönmez, H., 2001. Hoek-Brown yenilme ölçütünün fisürlü killerin yenilme davranışına uygulanabilirliğinin araştırılması. (doktora tezi), Hacettepe Üniversitesi.
- Sönmez, H. and Ulusay, R., 1999. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. Int J Rock Mech Min Sci, 36:743–760.

- Sönmez, H. and Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77-99 (in English).
- Sönmez, H., and Gokceoglu, C., 2006. Discussion of the paper by E. Hoek and M.S. Diederichs "Empirical estimation of rock mass modulus". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43, 671-676.
- Sönmez, H., Tuncay, E. and Gökçeoğlu, C., 2004. Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara agglomerates. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41 (5), 717-729.
- Sönmez, H., Tuncay, E., Gökçeoğlu, C., and Nefeslioğlu, H., 2005. Matriks içinde blok içeren kayaçların deformasyon modülünün saptanabilmesine yönelik fotoanaliz destekli yaklaşımların geliştirilmesi. TÜBİTAK Proje No: 102Y033.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Kayabaşı, A. and Nefeslioğlu, H.A., 2006. Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43(2), 224-235.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakan Altınsoy

Doğum Yeri : Aksaray

Doğum Yılı : 20.08.1978

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise :1992-1995 Aksaray Lisesi

Lisans :1997-2003 Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans :2003-2006 Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü –
Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı

İş Tecrübesi:

Mart 2005 – Haziran 2006 (devam ediyor) STFA Temel Kazıkları İnşaatı A.Ş.

Askerlik : Tecilli

Yabancı Dil: İngilizce