

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YERALTI MÜHENDİSLİK YAPILARININ STATİK VE
DİNAMİK KOŞULLAR ALTINDA SAYISAL ANALİZİ:
HONAZ TÜNELİ ÖRNEĞİ**

DOKTORA TEZİ

ERTUĞRUL KARAKAPLAN

DENİZLİ, OCAK – 2023

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



YERALTI MÜHENDİSLİK YAPILARININ STATİK VE
DİNAMİK KOŞULLAR ALTINDA SAYISAL ANALİZİ:
HONAZ TÜNELİ ÖRNEĞİ

DOKTORA TEZİ

ERTUĞRUL KARAKAPLAN

DENİZLİ, OCAK – 2023

Bu tez alışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2019FEBE053 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

ERTUĞRUL KARAKAPLAN

ÖZET

YERALTI MÜHENDİSLİK YAPILARININ STATİK VE DİNAMİK KOŞULLAR ALTINDA SAYISAL ANALİZİ: HONAZ TÜNELİ ÖRNEĞİ

DOKTORA TEZİ

ERTUĞRUL KARAKAPLAN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. DEVRİM ALKAYA)

(EŞ DANIŞMAN: PROF. DR. HAKAN BAŞARIR)

DENİZLİ, OCAK – 2023

Bu tez çalışmasında, kaya kütle sınıflama sistemleri tarafından önerilen destek tasarımlarının statik ve dinamik koşullar altındaki davranışı, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu amaçla, Honaz Dağı'nda zayıf kaya kütlesi içinde açılan, 2540 m kazı uzunluğuna sahip tünel bölgesine ait jeolojik veriler elde edilmiştir. Laboratuvar ve arazi deneyleri ile tünel çevresindeki kaya kütle özellikleri tanımlanmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan, kaya kütle sınıflama sistemleri (Q, RMR, RMQR, RMi, RSR, NATM) belirlenerek tünel çevresindeki kaya kütlelerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Aynı zamanda bu sistemler tarafından önerilen destek tasarımları da belirlenmiştir.

Söz konusu bölgenin depremselliği araştırılarak, dinamik koşulları oluşturacak sismik bilgileri içeren hesaplamalar yapılmıştır. Bu bilgiler kullanılarak, statik ve dinamik analiz yapabilen geoteknik yazılımlarıyla (RS2 ve RS3), gerçek arazi davranışlarına en yakın sonuçlar iki ve üç boyutlu olarak hesaplanmaya çalışılmıştır. Bu hesaplama sonuçlarına bağlı olarak statik ve dinamik koşullar altında sistemler tarafından önerilen destek tasarımlarının performansları değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, bir yeraltı yapısının stabilitesi, farklı destek tasarımları ile statik ve dinamik koşullar altında, sayısal yöntemlerle belirlenmeye çalışılmıştır. Hangi sınıflama sisteminin dinamik koşullar için en uygun destek tasarımını önerdiği yapılan

karşılaştırmalar ile ortaya konulmuştur. Kaya kütlesi destekleme önerisi içeren altı sistemin destek tasarımları, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilerek yeni öneriler getirilmiştir. Dinamik koşullar için destekleme önerisi geliştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri, Destek Tasarımı, Sayısal Modelleme, Tünelcilik, Statik-Dinamik Analiz.

ABSTRACT

**NUMERICAL ANALYSIS OF UNDERGROUND ENGINEERING
STRUCTURES UNDER STATIC AND DYNAMIC CONDITIONS: THE
CASE STUDY OF HONAZ TUNNEL
PH.D THESIS
ERTUGRUL KARAKAPLAN**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. DEVRİM ALKAYA)
(CO-SUPERVISOR: PROF. DR. HAKAN BASARIR)
DENİZLİ, JANUARY – 2023**

In this thesis, the behavior of the support designs proposed by the rock mass classification systems under static and dynamic conditions is analyzed by the finite element method. For this purpose, geological data are obtained from the tunnel area with an excavation length of 2540 m opened in the weak rock mass within Honaz Mountain. The rock mass properties around the tunnel have been determined by laboratory and field experiments. The rock mass classification systems (Q, RMR, RMQR, R_{Mi}, RSR, NATM) that are widely used today have been determined and the rock mass around the rock mass around the tunnel has been classified. At the same time, the support designs proposed by these systems have been determined.

By researching the seismicity of the region in question, calculations including seismic information that will create the dynamic conditions have been made. Using this information, two and three dimensional results are tried to be calculated with geotechnical software (RS2 and RS3) that can perform static and dynamic analysis, which are closest to the real terrain behavior. Based on these calculation results, the performances of the support designs proposed by the systems under static and dynamic conditions are evaluated.

As a result, the stability of an underground structure is tried to be determined by numerical methods under static and dynamic conditions with different support designs. Which classification system proposes the most suitable support design for dynamic conditions has been revealed by the comparisons made. Support designs

proposed by six systems containing rock mass support proposals are analyzed using the finite element method and new suggestions are made. Support suggestion are developed for dynamic conditions.

KEYWORDS: Rock Mass Classification Systems, Support Design, Numerical Modeling, Tunneling, Static-Dynamic Analysis.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖNSÖZ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam	2
1.3 Problemin Tanımı	2
1.4 Literatür	2
2. ÇALIŞMA BÖLGESİ	5
2.1 Bölgenin Genel Jeolojisi	5
2.2 Bölgenin Depremselliği	7
2.2.1 Depremsellik Parametrelerinin Belirlenmesi	8
2.2.2 Deprem Olasılığı Tahminleri	10
2.2.3 Sismik Tehlike Analizi	11
2.3 Bölgenin Mühendislik Jeolojisi	14
2.3.1 Jeolojik Etüt	14
2.3.2 Sismik Etüt.....	16
2.3.2.1 Aktif Kaynaklı Çok Kanallı Yüzey Dalgası Yöntemi	16
2.3.3 Mineralojik – Petrografik Analiz	18
2.3.3.1 Mikritik Kireçtaşı (No:1)	19
2.3.3.2 Mikritik Kireçtaşı (No:2)	20
2.3.3.3 Kristalize Kireçtaşı (No:3)	21
2.3.3.4 Breşik Kristalize Kireçtaşı (No:4).....	21
2.3.3.5 Kalk – Kuvars Şist (No:5).....	22
2.3.3.6 Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı (No:6).....	23
2.3.3.7 Karbonat Çimentolu Çakıltaşı (No:7)	24
2.3.3.8 Yamaç Molozu (No:8)	25
2.3.3.9 Fay Breşi (No:9).....	25
2.3.4 Kaya ve Zemin Mekanikliği Laboratuvar Deneyleri	25
3. KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİ	28
3.1 Kaya Kütle Kalitesi (Q) Sistemi	28
3.2 Kaya Kütle Puanlama (RMR) Sistemi.....	30
3.3 Kaya Kütle Kalitesi Puanlama (RMQR) Sistemi	31
3.4 Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM).....	32
3.5 Kaya Kütle İndeksi (RMi)	33

3.6	Kaya Yapısı Puanlama (RSR) Sistemi	34
3.7	Kaya kalite göstergesi (RQD).....	34
3.8	Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI).....	35
3.9	Yerel Zemin Sınıfı	36
3.10	Kaya Kütle Sınıflama Sistemlerinin Hesaplamaları	36
3.11	Kaya Kütlelerinin Desteklenmesi.....	38
3.11.1	Kaya Kütleleri Destekleme Elemanları	39
3.11.1.1	Çelik İksa	40
3.11.1.2	Kafes Profil	40
3.11.1.3	Kaya Bulonu	41
3.11.1.4	Çelik Hasır	42
3.11.1.5	Püskürtme Beton	42
3.11.1.6	Süren	43
3.11.1.7	Kaplama Betonu.....	43
3.12	Kaya Kütle Özelliklerinin Tahmini	44
4.	YÖNTEM.....	46
4.1	Sayısal Analizler	46
4.2	Sayısal Analizlerin Teorik Altyapısı	48
4.2.1	Gauss Eliminasyon Yöntemi	48
4.2.2	Kullanılan Modeller.....	49
4.2.2.1	Hoek-Brown ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown Malzeme Modeli	49
4.2.2.2	Mohr-Coulomb Malzeme Modeli.....	51
4.2.2.3	Kaya Cıvatası Modeli.....	52
4.2.2.4	Dinamik Analiz Modeli.....	53
4.3	Sayısal Analizlerin Yapılışı	54
4.3.1	Statik Analizler	54
4.3.2	Dinamik Analizler.....	55
5.	BULGULAR	58
6.	DİNAMİK KOŞULLAR İÇİN DESTEKLEME ÖNERİSİ	
	GELİŞTİRİLMESİ	67
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
8.	KAYNAKLAR.....	76
9.	EKLER.....	86
EK A.1	Sismik-1 ölçümüne ait grafikler.....	86
EK A.2	Sismik-2 ölçümüne ait grafikler.....	87
EK A.3	Sismik-3 ölçümüne ait grafikler.....	88
EK A.4	Sismik-4 ölçümüne ait grafikler.....	89
EK A.5	Sismik-5 ölçümüne ait grafikler.....	90
EK A.6	Sismik-6 ölçümüne ait grafikler.....	91
EK B.1	Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler	92
EK B.1	Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (devamı).....	93
EK B.1	Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (devamı).....	94
EK B.2	Q puanına göre önerilen destekleme türü ve miktarı	95
EK C.1	RMR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler: A	96

EK C.2 RMR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler: B – F	97
EK C.3 RMR değerine göre destek sistemi seçimi kılavuzu	98
EK D.1 RMQR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler	99
EK D.2 10 m açıklıktaki tüneller için RMQR sistemi destek önerileri	100
EK D.3 Destek elemanlarının boyutlarıyla RMQR arasındaki ilişki	101
EK E.1 NATM sisteminin içerdiği kaya sınıfları.....	102
EK E.2 NATM ve ÖNORM B2203'e göre destek önerileri	103
EK E.2 NATM ve ÖNORM B2203'e göre destek önerileri (devamı)	104
EK F.1 RMi puanının hesaplamasında kullanılan parametreler	105
EK F.2 RMi puanlarının sınıflandırılması	106
EK F.3 RMi sisteminin sürekli zeminler için destekleme önerileri	107
EK F.4 RMi sisteminin bloklu ve zayıf zeminler için destekleme önerileri.....	108
EK G.1 RSR değeri hesaplama parametreleri: A, B, C	109
EK G.2 RSR sisteminin önerdiği destek sistemi türleri ve miktarları	110
EK H RQD puanının elde edilmesi ve sınıfının belirlenmesi	111
EK I GSI puanının hesaplamasında kullanılan grafik.....	112
EK J Yerel zemin sınıfları belirleme tablosu	113
EK K Q veya RMR kullanılarak destek tasarımı belirlenmesi grafiği.....	114

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Honaz Dağı ve çevresinin fay haritası (Özkaymak, 2015 değiştirilerek)	6
Şekil 2.2: Türkiye diri fay haritası Denizli paftası (MTA).....	7
Şekil 2.3: Deprem büyüklüğü ile sıklığı arasındaki ilişki	11
Şekil 2.4: Deprem dönüş periyotlarının grafiksel gösterimi.....	12
Şekil 2.5: Azalım ilişkilerinin grafiksel gösterimi.....	13
Şekil 2.6: Tünel bölgesinde oluşacağı varsayılan maksimum ivme değerleri.....	14
Şekil 2.7: Honaz Tüneli güzergâhının jeolojik kesiti	15
Şekil 2.8: Honaz Tüneli sismik ölçüm bölgeleri	17
Şekil 2.9: Honaz Tüneli sismik ölçüm etütlerinin yapılışı	17
Şekil 2.10: Mikritik kireçtaşıma ait tek nikol ve çift nikol görünümleri	19
Şekil 2.11: Mikritik kireçtaşıma ait tek nikol ve çift nikol görünümleri	20
Şekil 2.12: Kristalize kireçtaşıma ait tek nikol ve çift nikol görünümleri.....	21
Şekil 2.13: Breşik kristalize kireçtaşıma ait tek nikol ve çift nikol görünümleri	22
Şekil 2.14: Kalk – kuvars şiste ait tek nikol ve çift nikol görünümleri	23
Şekil 2.15: Demir oksit çimentolu kumtaşıma ait tek nikol ve çift nikol görünümleri	24
Şekil 2.16: Karbonat çimentolu çakıltaşıma ait tek nikol ve çift nikol görünümleri	24
Şekil 2.17: Etüvde kurutulmuş karotlar (a), Sismik hız ölçümü yapılması (b), Schmidt çekici ile sertlik belirlenmesi (c), Tek eksenli basınç deneyi (d), Nokta yükü dayanım deneyi (e), Endirekt çekme (Brazilian) deneyi (f)	25
Şekil 3.1: Tünel jeolojik kesiti üzerinde kaya kütle sınıflama puanlarının gösterimi.....	37
Şekil 3.2: Destek sisteminin boyutlandırılmasında izlenen genel aşamalar	38
Şekil 3.3: Honaz Tüneli kazı sonrası uygulanan destekleme elemanları.....	39
Şekil 3.4: Honaz Tüneli'nde kullanılan çelik iksa destek elemanları.....	40
Şekil 3.5: Honaz Tüneli'nde kullanılan kafes profil destek elemanları.....	40
Şekil 3.6: Honaz Tüneli'nde kullanılan kaya bulonu destek elemanları	41
Şekil 3.7: Tünelde bölgesinde yerleştirilen kaya bulonları	41
Şekil 3.8: Honaz Tüneli'nde kullanılan çelik hasır destek elemanları	42
Şekil 3.9: Tünel bölgesine püskürtme beton uygulaması	42
Şekil 3.10: Honaz Tüneli'nde kullanılan süren destek elemanları	43
Şekil 3.11: Honaz Tüneli kaplama beton uygulaması	43
Şekil 4.1: Sayısal analizlerde kullanılan malzeme parametreleri	47
Şekil 4.2: Sayısal analizlerde izlenen yol	47
Şekil 4.3: Üç boyutlu gerilme uzayında Genelleştirilmiş Hoek–Brown modelinin yenilme yüzeyi (Rocscience 2021)	50
Şekil 4.4: Üç boyutlu gerilme uzayında Mohr–Coulomb modelinin yenilme yüzeyi (Rocscience 2021)	52
Şekil 4.5: Dolgulu kaya civatası modeli (Rocscience 2021)	52
Şekil 4.6: Dolgulu kaya civatası yenilme kriteri (Rocscience 2021).....	53
Şekil 4.7: RS2 yazılımı sayısal analiz sonuçlarının elde edilmesi.....	55
Şekil 4.8: Tünel kazı alanında yapılan ölçüm değerlerindeki değişim.....	55

Şekil 4.9: Sismik katsayı girişi ile dinamik etki oluşturma	56
Şekil 4.10: Dinamik veri analizi ile deprem ivme kayıtlarının sisteme girilmesi.....	57
Şekil 4.11: Dinamik veri analizi ile sistemine girilen deprem ivme kayıtları.....	57
Şekil 4.12: Ölçüm bölgelerini gösteren tünel kesiti	57
Şekil 5.1: Malzeme modeline göre destekleme – deformasyon ilişkisi (1,2,3)	59
Şekil 5.2: Malzeme modeline göre destekleme – deformasyon ilişkisi (4,5,6)	59
Şekil 5.3: Malzeme modeline göre destekleme – deformasyon ilişkisi (7,8,9)	60
Şekil 5.4: Malzeme modellerinin kıyaslanması.....	60
Şekil 5.5: Sınıflama sistemi destek önerilerinin tüm kaya türlerindeki statik ve dinamik durumunun kıyaslamalı gösterimi	61
Şekil 5.6: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 1	62
Şekil 5.7: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 2	62
Şekil 5.8: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 3	62
Şekil 5.9: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 4	63
Şekil 5.10: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 5	63
Şekil 5.11: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 6	63
Şekil 5.12: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 7	64
Şekil 5.13: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 8	64
Şekil 5.14: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 9	64
Şekil 5.15: Sığınma ceplerinin iki boyutlu dinamik katsayılı hesap çıktısı (RMQR)	65
Şekil 5.16: Sığınma cebi ve bağlantı tüneli kavşak noktalarının üç boyutlu analiz çıktısı (NATM).....	65
Şekil 5.17: Tüneldeki kavşak bölgelerinin iç kısımdan üç boyutlu görünümü (desteksiz)	66
Şekil 5.18: Tünel içindeki kavşak noktalarına ait üç boyutlu analiz sonuçları	66
Şekil 6.1: Kaya kütle puan türüne göre destekleme önerisi belirleme grafiği (Bieniawski 1990 değiştirilerek)	67
Şekil 6.2: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 1	70
Şekil 6.3: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 2	70
Şekil 6.4: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 3	70
Şekil 6.5: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 4	71
Şekil 6.6: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 5	71
Şekil 6.7: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 6	71
Şekil 6.8: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 7	72
Şekil 6.9: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 8	72
Şekil 6.10: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 9	72
Şekil 7.1: Dinamik koşullar için destek sistemi önerisi grafiği	75
Şekil A.1: Sismik-1 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)	86
Şekil A.2: Sismik-2 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)	87
Şekil A.3: Sismik-3 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)	88

Şekil A.4: Sismik-4 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)	89
Şekil A.5: Sismik-5 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)	90
Şekil A.6: Sismik-6 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)	91
Şekil B.1: Q değeri hesaplanmış kaya kütleline önerilen destekleme türü ve miktarı (Barton ve Grimstad 2014)	95
Şekil F.1: RMI puanının hesaplamasında kullanılan parametreler (Palmström 1995)	105
Şekil F.2: RMI sisteminin sürekli zeminler için önerdiği destekleme tür ve miktarları (Palmström 1995)	107
Şekil F.3: RMI sisteminin bloklu ve zayıf zeminler için önerdiği destekleme tür ve miktarları (Palmström 1995)	108
Şekil G.1: RSR sisteminin önerdiği destek sistemi türleri ve miktarları (Wickham ve diğ. 1972)	110
Şekil H: Kaya kalite gösterge değerinin elde edilmesi ve sınıfının belirlenmesi (Deere 1964 değiştirilerek)	111
Şekil I: Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) puanının hesaplanmasında kullanılan grafik (Marinos ve Hoek, 2000)	112
Şekil K: Q veya RMR kullanılarak destek tasarımı belirlenmesi grafiği (Bienawski 1990)	114

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: 1976 – 2020 yılları arasında meydana gelmiş $M \geq 5.5$ olan depremler.....	8
Tablo 2.2: 1976 – 2020 yılları arasında meydana gelmiş depremlerin istatistiksel bilgileri	10
Tablo 2.3: Depremlerin dönüş periyotları	11
Tablo 2.4: Hesaplanan azalım ilişkileri sonuçları	13
Tablo 2.5: Kaya kütlelerinde yapılan sismik etüt sonuçları.....	18
Tablo 2.6: Laboratuvar deney verilerinin kaya malzemesine göre ortalama sonuçları	26
Tablo 3.1: Hesaplanan Q puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları	29
Tablo 3.2: Hesaplanan RMR puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları	30
Tablo 3.3: Hesaplanan RMQR puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları	31
Tablo 3.4: Hesaplanan NATM sınıfları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları	32
Tablo 3.5: Hesaplanan R _{Mi} puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları	33
Tablo 3.6: Hesaplanan RSR puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları	34
Tablo 3.7: Hesaplanan RQD puanları	35
Tablo 3.8: Hesaplanan GSI puanları	35
Tablo 3.9: Hesaplanan yerel zemin türleri	36
Tablo 3.10: Hesaplanan kaya kütle sınıflama sistemleri puanları ve zemin sınıfları.....	36
Tablo 3.11: Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen kaya kütlelerine ait deformasyon modülü denklemleri.....	45
Tablo 5.1: Yapılan iki boyutlu sayısal analizler (RS2)	58
Tablo 5.2: Yapılan üç boyutlu sayısal analizler (RS3).....	58
Tablo 6.1: Kazı tipine göre kazı destek oranı belirleme tablosu (Barton ve Grimstad 2014 değiştirilerek).....	68
Tablo 6.2: Yeraltı mühendislik yapısı için destek türü ve miktarı öneri kılavuzu	69
Tablo B.1: Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (Barton ve Grimstad 2014).....	92
Tablo B.1: Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (devamı).....	93
Tablo B.1: Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (devamı).....	94
Tablo C.1: RMR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler: A (Bieniawski 1989)	96
Tablo C.2: RMR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler: B, C, D, E, F (Bieniawski 1989).....	97
Tablo C.3: RMR değerine göre destek sistemi seçimi kılavuzu (Bieniawski, 1989)	98
Tablo D.1: RMQR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (Aydan ve diğ. 2014).....	99

Tablo D.2: 10 m açıklıktaki tüneller için RMQR sistemi destek önerileri (Aydan ve diğ. 2015).....	100
Tablo D.3: Kemer açıklığı (L_a) veya yan duvar yüksekliğiyle (H_s) normalize edilmiş destek elemanlarının boyutları ile RMQR arasındaki ampirik ilişki (Aydan ve diğ. 2015).....	101
Tablo E.1: NATM sisteminin içerdiği kaya sınıfları (ÖNORM 1994, KTŞ 2013).....	102
Tablo E.2: NATM ve ÖNORM B2203'e göre kaya sınıfları ve destek önerileri (ÖNORM 1994, KTŞ 2013).....	103
Tablo E.2: NATM ve ÖNORM B2203'e göre kaya sınıfları ve destek önerileri (devamı).....	104
Tablo F.1: RMi puanlarının sınıflandırılması (Palmström 1995).....	106
Tablo G.1: RSR değeri hesaplama parametreleri: A (Wickham ve diğ. 1972).....	109
Tablo G.2: RSR değeri hesaplama parametreleri: B (Wickham ve diğ. 1972).....	109
Tablo G.3: RSR değeri hesaplama parametreleri: C (Wickham ve diğ. 1972).....	109
Tablo J: Yerel zemin sınıfları belirleme tablosu (TBDY 2018).....	113

SEMBOL LİSTESİ

M	: Magnitüd (büyüklük)
M _w	: Moment büyüklüğü
M _s	: Yüzey dalgası büyüklüğü
M _l	: Yerel büyüklük
M _d	: Süreye bağlı büyüklük
M _b	: Cisim dalgası büyüklüğü
T _R	: Deprem tekrarlanma zamanı
a, b	: Gutenberg – Richter parametreleri
ΔT	: Zaman aralığı
F _M	: M rastlantı değişkeninin dağılım fonksiyonu
T	: Tekrarlanma periyodu
R	: Uzaklık
PGA	: En büyük yer ivmesi
S _A , S _B	: Saha koşullarına bağlı parametreler
λ	: Ortalama yıllık oluşum oranı
V _s	: İkincil dalga hızı
V _p	: Birincil dalga hızı
ν	: Poisson oranı
φ	: İçsel sürtünme açısı
ISRM	: Uluslararası Kaya Mekanikliği ve Kaya Mühendisliği Topluluğu
Q	: Kaya Kütle Kalitesi
RMR	: Kaya Kütle Puanlaması
RMQR	: Kaya Kütle Kalitesi Puanlaması
NATM	: Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu
RMi	: Kaya Kütle İndeksi
RSR	: Kaya Yapısı Puanlaması
RQD	: Kaya Kalite Göstergesi
GSI	: Jeolojik Dayanım İndeksi
J _n	: Eklem takım sayısı
J _r	: Eklem pürüzlülük durumu
J _a	: Eklem ayrışma durumu
J _w	: Eklem suyu indirgeme faktörü
SRF	: Gerilme indirgeme faktörü
L	: Uzunluk
L _a	: Kemer açıklığı
H _s	: Yan duvar yüksekliği
L _b	: Bulon uzunluğu
e _{av}	: Kaya ankrajı aralığı
e _{bv}	: Kaya bulonu aralığı
t ^{SY}	: Tavan kemerindeki püskürtme beton kalınlığı
t ^{SW}	: Yan duvardaki püskürtme beton kalınlığı

ÖNORM	: Avusturya Standardı
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
σ_{ci}	: Tek eksenli basınç dayanımı
s	: Kaya cıvatası çapı
t	: Püskürtme beton kalınlığı
W_r	: Kaya yükü
I 160	: IPE çelik profil 15.8 kg/m
I 200	: IPE çelik profil 22.4 kg/m
PG	: Nervürlü çelik kaya cıvatası
IBO	: Delici uçlu çelik kaya cıvatası
Q589/378	: Kare çelik hasır 7.59 kg/m ²
Q221/221	: Kare çelik hasır 3.48 kg/m ²
C20	: Basınç dayanımı 20 MPa olan beton
C25	: Basınç dayanımı 25 MPa olan beton
C30	: Basınç dayanımı 30 MPa olan beton
γ	: Birim hacim ağırlık
H	: Derinlik
σ_1	: Düşey gerilme
σ_3	: Yatay gerilme
σ_z	: Yatay gerilme
k	: Yatay gerilme katsayısı
D	: Örselenme faktörü
β	: RMQR parametresi
F_s	: Yenilme kriteri
s, m, a	: Hoek-Brown parametreleri
τ	: Kesme mukavemeti
c	: Kohezyon
u_e	: Kaya cıvatası uzama miktarı
L_e	: Kaya cıvatası uzunluğu
AE	: Kesit alanı ve elastisite modülü
F_{akma}	: Kaya cıvatası akma dayanımı
F_{rez}	: Kaya cıvatasının rezidüel kapasitesi
u	: Yer değiştirme
v	: Hız
a	: İvme
e_A	: Sismik katsayı
α	: En büyük yer ivmesi (PGA)
g	: Kütle çekim ivmesi
KDO	: Kazı destek oranı
KDO _D	: Dinamik kazı destek oranı

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında öneri ve desteğini gördüğüm danışmanım, Pamukkale Üniversitesinden Doç. Dr. Devrim ALKAYA'ya,

Lisans eğitimimden bugüne kadar sürdürdüğüm akademik çalışmalarında yardım, öneri ve desteklerini esirgmeden benimle paylaşan Norveç Bilim ve Teknik Üniversitesinden eş danışmanım Prof. Dr. Hakan BAŞARIR'a,

Akademik çalışmalarında yardım, öneri ve desteklerini esirgmeden benimle paylaşan Adelaide Üniversitesinden Doç. Dr. Murat KARAKUŞ'a,

Tez izleme komitesinde yer alan, çalışmalarım süresince öneri ve desteğini gördüğüm, Pamukkale Üniversitesinden Prof. Dr. Gürhan GÜRARSLAN ve Prof. Dr. İbrahim ÇOBANOĞLU'na,

Çalışmamın yöntem kısmında desteğini gördüğüm Atina Ulusal Teknik Üniversitesinden Prof. Dr. Pavlos NOMIKOS'a,

Çalışmamın materyal kısmında desteğini gördüğüm Prof. Dr. Reşat ULUSAY ve Prof. Dr. Ömer AYDAN'a,

Doktora eğitimim sırasında çeşitli konularda desteğini gördüğüm Prof. Dr. Mahir VARDAR, Prof. Dr. Halim CEYLAN, Prof. Dr. Halil KUMSAR, Prof. Dr. Mete HANÇER, Prof. Dr. Abdullah Cem KOÇ, Prof. Dr. Yetiş Şazi MURAT, Prof. Dr. Selçuk TOPRAK, Doç. Dr. Sefer Beran ÇELİK, Doç. Dr. Barış SEMİZ, Doç. Dr. Sedat SERT, Dr. Öğr. Üy. Mehmet KURUOĞLU, Dr. Öğr. Üy. Mehmet Rifat KAHYAOĞLU, Dr. Öğr. Üy. Engin NACAROĞLU, Honaz Tüneli çalışanlarına,

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu süreçte de benden desteklerini esirgemeyen annem, babam, kardeşim, Ayşe teyzem, Murat eniştem ve hayat arkadaşım Ceren'e teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Günümüzde geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında sayısal yöntemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yeraltı yapılarında kullanılan destek sistemlerinin statik ve dinamik koşullar altındaki performansları sayısal yöntemler ile analiz edilerek yeni öneriler getirilmiştir.

Geoteknik mühendisliğinin kapsamında olan tüneller, inşaat ve maden uygulamaları, enerji istasyonları, gaz depoları, radyoaktif atık depoları gibi birçok yeraltı mühendislik yapıları bu çalışmanın konusu hakkında büyük öneme sahiptir. Bu yapıların tasarımı mühendisler tarafından, genellikle statik durumlar göz önüne bulundurularak hesaplanır ve uygulamaya geçilir.

Kaya kütleleri yapısı gereği çok sayıda duraysızlıklar içermektedir. Yeraltı mühendislik yapılarının inşasında bu duraysızlıkların varlığı büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, deprem, patlama, heyelan gibi olaylar kaya ve zemin üzerinde duraysızlıklara yol açacak dinamik koşulları oluşturmaktadır. Bu dinamik koşullara maruz kalan yeraltı yapılarında meydana gelecek yenilmeler, insan ve çevre açısından büyük felaketlere yol açabilmektedir. Ayrıca çalışma bölgelerinin sismik hareketliliğinin yüksek olması dinamik analizlerin önemini arttırmaktadır.

“Yeraltı mühendislik yapılarının statik ve dinamik koşullar altında sayısal analizi: Honaz Tüneli örneği” başlıklı bu tez çalışmasında Honaz Tüneli’ne ait arazi ve laboratuvar verileri elde edilip bu verilere bağlı olarak kaya kütle parametrelerinin hesaplama işlemleri yapılmıştır. Hesaplanan bu parametreler, Kaya Kütle Kalitesi (Q), Kaya Kütle Puanlama (RMR) Sistemi, Kaya Kütle İndeksi (RMi), Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), Kaya Kütle Kalitesi Puanlama (RMQR) Sistemi, Kaya Yapısı Puanlama (RSR) Sistemi ve Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM) olarak sekiz sistemin önerdiği şekillerde belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak bilimsel araştırma projesi kapsamında temin edilen, sonlu elemanlar tabanlı çalışan (RS2 ve RS3) yazılımlarda üç kısma ayrılan analizler tamamlanmıştır.

1.1 Amaç

Yeraltı mühendislik yapılarında uygulanan destek sistemlerinin statik ve dinamik koşullar altındaki performanslarının, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmesi ve yeni öneriler getirilmesi çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

1.2 Kapsam

Bu tez çalışması, Denizli – Antalya karayolunun bir parçası olan Honaz Tüneli çevresindeki kaya kütesinin özelliklerinin tanımlanarak bölgenin sismik tehlike analizinin yapılması, tünelde kullanılan destek sisteminin statik ve dinamik durum altındaki stabilitesinin değerlendirilmesi, yaygın kullanılan kaya kütle sınıflama sistemlerinin destek önerilerinin statik ve dinamik durum altındaki performanslarının kıyaslanmasını kapsamaktadır.

1.3 Problemin Tanımı

Yaygın kullanılan kaya kütle sınıflama sistemlerine ait destekleme önerilerinin dinamik koşulları içeren tanımlamaları bulunmamaktadır. Destekleme önerileri için kolay kullanılabilir bir çizelge ile dinamik koşulları içeren yeni önerilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasının belirtilen problemin çözümüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.4 Literatür

Yeraltı mühendislik yapılarının tasarımına yönelik araştırmacılar tarafından yapılmış çok sayıda çalışmaya ulaşmak mümkündür. Bu tez çalışmasında yeraltı mühendislik yapılarıyla ilgili depremsellik, kaya kütesine ait arazi etütleri, kaya malzemesine ait laboratuvar deneyleri, kaya kütle sınıflama sistemleri, destek sistemlerinin tasarımı, statik ve dinamik yüklerin kaya kütesine etkisi gibi çeşitli konular incelenmiştir. Bu konular kapsamında yapılan literatür taramasında (Gutenberg ve Richter 1944, Deere 1964, Rabcewicz 1964, Wickham ve diğ. 1972,

Noda ve diğ. 1975, Barton ve diğ. 1974, Hoek ve Brown 1980, ISRM 1981, Bieniawski 1989, Bieniawski 1990, Palmström 1995, Hoek 1995, Aydan ve Kawamoto 2000, Karakuş ve Fowell 2000, Carranza-Torres ve Fairhurst 2000, Aydan ve Kawamoto 2001, Hoek ve diğ. 2002, Özsan ve Başarır 2003, Geniş ve Gerçek 2003, Ulusay ve diğ. 2004, Aydın ve diğ. 2004, Başarır ve diğ. 2005, Karakuş ve Fowell 2005, Hoek ve Diederichs 2006, Başarır 2006, Karakuş ve Fowell 2006, Özsan ve Karakuş 2006, Geniş ve Aydan 2007, Gürocak ve diğ. 2007, Karakuş ve diğ. 2007, Başarır 2007, Geniş ve diğ. 2007, Özsan ve diğ. 2007, Başarır 2008, Çobanoğlu ve Çelik 2008, Aksoy ve diğ. 2009, Aydan ve diğ. 2010, Başarır ve diğ. 2010, Sert ve diğ. 2010, Geniş 2010, Aydan ve diğ. 2011, Çobanoğlu ve Alkaya 2011, Gürocak 2011, Karakuş 2012, Shen ve diğ. 2012, Aydan ve diğ. 2013, Idris ve diğ. 2013, Gürarlan ve diğ. 2013, Barton ve Grimstad 2014, Başarır ve diğ. 2015, Tong ve diğ. 2016, Dong ve diğ. 2019, Başarır ve diğ. 2019, Kabwe ve diğ. 2020, Kasimzade ve diğ. 2020, Zuo ve Shen 2020) belirtilen çalışmalar incelenmiştir. Bu incelemeler neticesinde, tez çalışmasının iskeleti belirlenerek aşağıda verilen çalışmalarla tezin dış çerçevesi oluşturulmuştur.

Hashash ve diğ. (2001) yaptığı çalışmada, yeraltı yapılarının sismik tasarımında kullanılan analitik ve sayısal yöntemlerden bahsederek Kobe ve Kocaeli gibi depremlerin etkisinde kalan yeraltı yapılarının davranışı hakkında bilgi vermiştir.

Geniş (2002) yaptığı çalışmada, geometrik tasarım değiştirelerinin derin yeraltı açıklıklarında yenilme bölgesinin boyutlarına etkilerinin statik ve dinamik koşullarda araştırmış ve bazı geometrik tasarım değiştirelerinin derin yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan yenilme bölgesinin boyutlarına statik ve dinamik koşullardaki etkilerinin ne şekilde olduğunu ortaya koymuştur.

Erik (2004) yaptığı çalışmada, Mersin-Taşucu'nda bulunan Boğsak karayolu tünellerinin gerilme-deformasyon analizlerini yapmış ve destek üzerinde meydana gelecek deformasyonları sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplayarak uygun destek çözümlerini ortaya koymuştur.

Aktürk (2010) yaptığı çalışmada, Ankara Necatibey Metro İstasyonu tünelinin çevresindeki deformasyon alanını üç boyutlu sayısal modelleme ile değerlendirmiş, peron ve bağlantı tünelleri boyunca oluşan gerilme-deformasyon dağılımlarını yerinde ölçümler ile karşılaştırmıştır.

Ertuğrul (2010) yaptığı çalışmada, Düzce depremine maruz kalan Bolu tünellerinin sismik davranışını iki boyutlu sonlu eleman modelleriyle incelemiş ve mevcut analiz yöntemlerinin yeterliliğini değerlendirmiştir.

Üçer (2012) yaptığı çalışmada, Bolu tünellerinin sismik davranışını analitik, yarı-statik ve tam-dinamik analiz yöntemleri kullanarak değerlendirmiştir.

Çolak (2012) yaptığı çalışmada, Gökgöl mağarası duraylılığını analitik ve sayısal çözümleme yöntemleriyle değerlendirmiş ve oluşabilecek duraysızlık problemlerini belirleyerek, duraylılığı artırmaya yönelik alınabilecek önlemleri ortaya koymuştur.

Demircan (2015) yaptığı çalışmada, Bitlis-Hizan'da bulunan Akşar regülatör tünelinin destek sistemlerinin performanslarını görgül, analitik ve sayısal yöntemler ile değerlendirmiştir.

Nurnur (2016) yaptığı çalışmada, büyük kesitli tünel kazısı sırasında çevre yapılar da meydana gelen oturmaları sayısal modellemeyle analiz etmiş ve tünel çevresinde bulunan bir su deposunun etkileşiminin nasıl olduğunu ortaya koymuştur.

Geniş ve Derin (2016) yaptığı çalışmada, Zonguldak-Üzülmez tünellerinin çevre kaya özelliklerini RMR ve Q kaya kütlesi sınıflama sistemleri kullanarak belirlemiş ve tünel kazısının çeşitli aşamalarında uygulanan destek sisteminin duraylılığını değerlendirmiştir.

Derin (2018) yaptığı çalışmada, Zonguldak'ta bulunan bir karayolu tünelinin çevre kaya özelliklerini belirlemiş ve duraylılığını iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle değerlendirmiştir.

Literatürde sismik bölgelerde yapılacak yeraltı yapılarının destek sistemi tasarımı konusunda çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Kaya kütle sınıflama sistemlerinin, destekleme önerileri içerisinde de sismik aktivitesi yüksek bölgelerde yapılacak tasarımlar ile ilgili bir görüş bulunmaması, bu konunun önemini artırmaktadır.

2. ÇALIŞMA BÖLGESİ

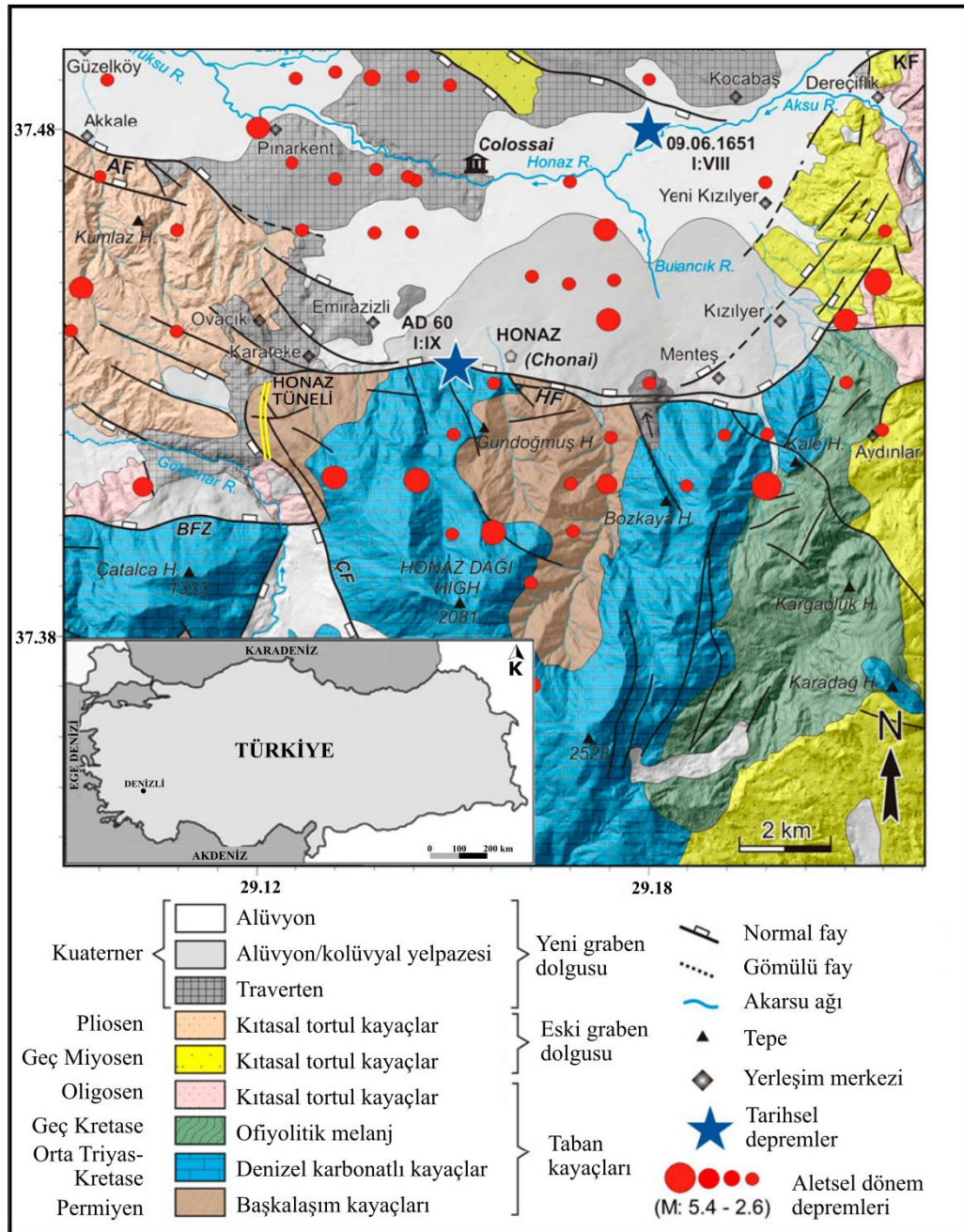
2.1 Bölgenin Genel Jeolojisi

Denizli'nin Honaz ilçesi ve çevresi Menderes masifinin güney bölümünde yer almaktadır. Masifin temelinde Paleozoyik yaşlı, her seviyede metamorfizmaya uğramış kayaç toplulukları içeren gnayslarla, migmatitlerden oluşan bir çekirdek kısmıyla şist, kuvarsit ve mermerden oluşan, bu çekirdeği çevreleyen örtü zonları görülmektedir. Bölgede, Neojen birimler gölsel ortamda çökelmişlerdir. Bu birimler Menderes masifinin kuzeyinde ve güneyinde, kristalin temelli kayaçlar üzerine uyumsuz olarak gelmişlerdir ve kalınlıkları yer yer yüzlerce metreye kadar çıkmaktadır. Neojen yaşlı birimler çeşitli irilikte kum ve çakıl, konglomera, kumtaşı, kil, marn-kil araldanmasından oluşmuştur. Bölgede kuru ve sulu dere ağızlarında ve dik yamaçlı topoğrafyanın ovaya girişte bıraktığı kesimlerde yamaç molozları, alüvyonlar ve alüvyon yelpazeleri izlenmektedir. Bu birimler, temeldeki birimler üzerine uyumsuz olarak çökelmişlerdir. Bölgede ayrıca Pliyokuvaterner yaşlı birimler ya da karbonatlı suların bıraktığı travertenler de görülmektedir. Bu birimler Menderes masifinin her iki yanında da çökelmişlerdir (Okay, 1989).

Batı Anadolu bölgesi Miyosen'den itibaren, bölgesel ölçekte kabuksal genişleme ve ilişkili normal fayların denetiminde gelişmiş horst-graben sistemlerinden oluşmaktadır. Denizli ve çevresinde, Prekambriyen-Paleozoik yaşlı Menderes Masifi metamorfikleri ile bunları tektonik olarak üzerleyen Mezozoik yaşlı Likya Napları'nın karbonat ve ofiyolitleri bölgenin temel kayaçlarıdır. Denizli Havzası, erken Miyosen başından itibaren bölgesel genişleme ile çökmeye başlamış ve alüviyal, flüviyal ve gölsel tortullarla dolgulanmıştır. (Şimşek 1984, Okay 1989, Sun 1990, Westaway 1993, Konak ve Şenel 2002, Koçyiğit 2005, Kaymakçı 2006, Alçiçek ve diğ. 2007).

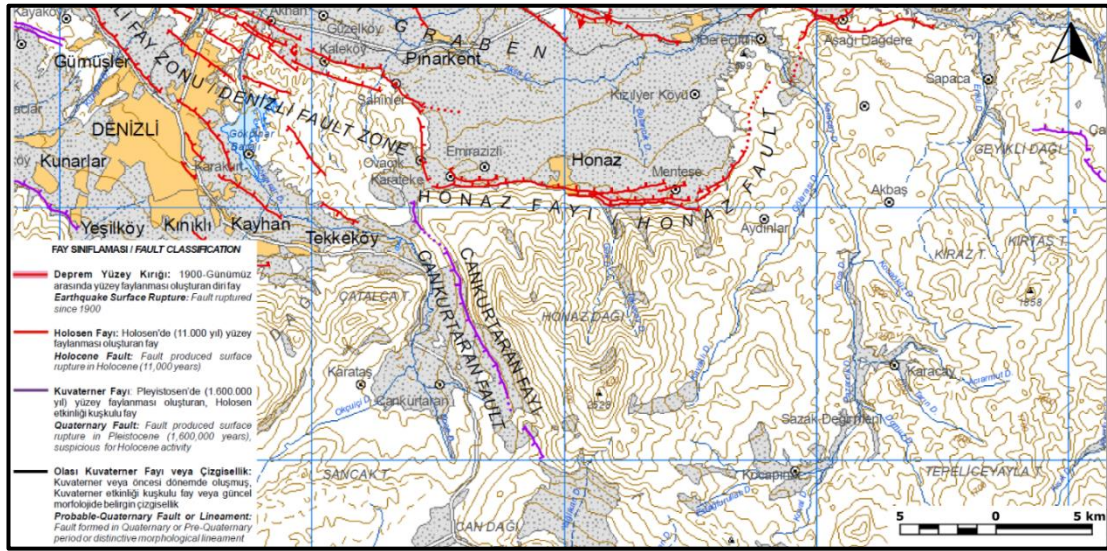
Okay (1989) tarafından yapılan çalışma, bu bölgenin üst üste duran tektonik birimlerden oluştuğunu göstermektedir. Tektonik istifin en altında monoton yeşil metaşeylden oluşan ve yaşı belirsiz Honaz şeyli, bunun üzerinde tektonik bir dokanakla masif beyaz kireçtaşı ile ince tabakalı çörtlü kireçtaşı ve şeylden oluşan,

hafif bir metamorfizma geçirmiş, Menderes masifinin Mezozoik örtü birimi yer almaktadır. Bu masif üzerinde tektonik dokanakla Likya naplarına ait Sandak birimi bulunur. Mezozoik yaşlı dolomit ve kireçtaşlarından oluşan Sandak birimi üzerinde ise ofiyolitler görülmektedir. Bütün bu birimler Honaz antiklinali olarak adlandırılmakta ve Honaz Dağı'nın doğuya doğru devrik büyük bir kapalı antiklinal yapısı olduğunu göstermektedir. Şekil 2.1'de Honaz Dağı ve çevresinin jeolojik durumunu gösteren fay haritası ile Şekil 2.2'de Türkiye diri fay haritası Denizli paftasının ilgili kısmı verilmiştir.



Şekil 2.1: Honaz Dağı ve çevresinin fay haritası (Özkaymak, 2015 değiştirilerek)

Tarihsel dönemde bu bölgede birçok yıkıcı deprem meydana geldiği bilinmektedir. Bu depremlerden bölgeye en yakında olan dört tanesi M.Ö. 65'te Honaz-Denizli'de VIII şiddetinde, M.S. 60'ta Pamukkale-Denizli'de IX şiddetinde, M.S. 1651'de Honaz-Denizli'de VIII şiddetinde, M.S. 1703'te Sarayköy-Denizli'de VIII şiddetinde meydana gelmiştir (Calvi 1941, Francis 1947, Ambraseys 1975, Ergin ve diğ. 1967, AFAD 2021).



Şekil 2.2: Türkiye diri fay haritası Denizli paftası (MTA)

2.2 Bölgenin Depremselliği

Honaz Tüneli merkez noktası $37^{\circ}44'41''K$, $29^{\circ}12'40''D$ olan 100 km yarıçapındaki 31416 km^2 dairesel alanda meydana gelen deprem kayıtları hesaplamalarda kullanılmıştır. Türkiye'de ivme ölçer istasyonlar 1973 yılında kurulmaya başlanmış, ilk kayıtlar ise 1976 yılından itibaren alınmıştır. Çalışma bölgesine ait 1900 – 2020 yılları arasında meydana gelmiş deprem bilgileri elde edilmiş, ivme ölçer istasyonlarından kayıtların alındığı tarihe kadar olan verilerde tutarsızlıklar gözlemlenmiştir. Bu sebepten 1976 – 2020 tarihleri arasında 44 yılda meydana gelen deprem kayıtları ($M_d \geq 4$) kullanılmıştır. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (KRDAE BDTİM 2021), Afet ve Acil Durum Yönetimi Deprem Dairesi Başkanlığı (AFAD 2021) ve Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS 2021) tarafından elde edilen deprem kayıtları ($M \geq 5.5$) ve bu deprem kayıtlarından elde edilen istatistiksel bilgiler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: 1976 – 2020 yılları arasında meydana gelmiş $M \geq 5.5$ olan depremler

Oluş Tarihi	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Uzaklık R (km)	Mw	Ms	Ml	Md	Mb	Yer
01.10.1995	38.11	30.05	5.0	91	6.1	6	5.9	6	6	BELENPINAR
20.03.2019	37.42	29.44	5.0	40	5.7	-	5.6	-	-	YENIKOY
08.08.2019	37.90	29.59	8.9	39	5.6	-	5.7	-	-	ARMUTALANI
11.10.1986	37.94	28.56	5.0	62	5.5	5.4	5.5	-	5.4	YOZE

(Mw: Moment büyüklüğü, Ms: Yüzey dalgası büyüklüğü, Ml: Yerel büyüklük, Md: Süreye bağlı büyüklük, Mb: Cisim dalgası büyüklüğü)

2.2.1 Depremsellik Parametrelerinin Belirlenmesi

Gutenberg ve Richter (1944) uzun bir süre Güney California depremlerine ait verileri toplamış ve bu verileri farklı büyüklükleri aşan depremlerin sayısına göre düzenlemişlerdir. Gutenberg–Richter yasası Ishimoto ve Iida (1939) olarak bilinen genliğin güç yasası temeline dayanır. Tahmin edileceği gibi küçük depremlerin yılda ortalama aşılma oranları büyük depremlerinkinden daha fazla olacaktır. Belirli bir büyüklükteki depremin ortalama aşılma oranının tersi, genellikle o büyüklüğü aşan depremin dönüş periyodu olarak ifade edilmektedir. Deprem tekrarlanması için geliştirilen Gutenberg–Richter yasası aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\log N = a - bM \quad (2.1)$$

Burada, ‘a’ değeri deprem faaliyetinin düzeyi (kabuğun deprem üretkenliği) ile ilişkilidir ve incelenen bölgenin genişliğine ve gözlem süresine bağlıdır. ‘b’ değeri kabuktaki gerilme ile ters orantılı olup deprem oluşumunun fiziği ile ilişkilidir (Scholz 1968, Urbancic ve diğ. 1992, Wiemer ve Wyss 1997). Dünya üzerinde Gutenberg–Richter denkleminde belirlenen ‘b’ değeri ortalama 1 civarındadır (Frohlich ve Davis, 1993).

Bir bölge için Gutenberg–Richter denklemi, arındırılmış depremsellik belirlendikten sonra hedeflenen bir büyüklük (M_h) için o bölgedeki deprem tekrarlanma zamanı (T_R) denklemi ile kolayca hesaplanabilir (Wiemer ve Wyss 1997).

$$T_R = \frac{\Delta T}{10^{(a-bM_h)}} \quad (2.2)$$

Burada ΔT , depremsellik kataloğunun kapsadığı zaman aralığını temsil etmektedir. Ancak bölgesel depremsellikten belirlenecek Gutenberg–Richter denkleminde hesaplanacak deprem tekrarlanma zamanları güvenilir olmayacaktır (Wiemer ve Wyss 1997). Çünkü, ‘b’ değeri uzaysal olarak daha ayrıntılı (1 km’ye varan ayrıntıda) incelendiğinde, ‘1’ değerinden önemli sapmalar olduğu görülmüştür (Wiemer ve Wyss 1997, Westerhaus ve diğ. 2002).

Dolayısıyla, bölgesel depremsellikten yapılacak belirlenmelerde uzaysal olarak değişmekte olan ‘b’ değerlerinin ortalamasını içeren bir Gutenberg–Richter denklemi ve bu denklemden belirlenmiş bir deprem tekrarlanma zamanı (T_R) bulunacaktır. Bölgesel ölçekte uzanan fay zonlarının deprem üretme davranışını yerel ölçeklerde uzanan pürüzler belirlediğinden, yerel olarak ayrıntılı bulunacak bir bölge için Gutenberg–Richter denklemi arındırılmış Gutenberg–Richter ilişkilerinden deprem tekrarlanma zamanları (2.2) numaralı denklem ile daha güvenilir belirlenebilir (Wiemer ve Wyss 1997, Wyss ve Matsumura 2002).

Depremlerin zamansal oluşumlarında yaygın olarak Poisson Modeli kullanılmaktadır. Bu model Poisson (1838) tarafından, verilen bir zaman aralığında ya da belirli bir bölge içinde belirli bir olayın oluşum sayısını tanımlayan rastgele değişkenin değerlerini verir olarak tanımlanmıştır.

$$F_M = 1 - e^{-\lambda T} \quad (2.3)$$

Azalm ilişkileri ile ilgili olarak günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından çeşitli denklemler önerilmiştir. Cornell ve diğ. (1979), tarafından önerilen denklemde Amerika Birleşik Devletleri’nin batısında, 20 ile 200 km arasında, büyüklüğü (M_s) 3.0 ile 7.0 aralığında meydana gelen depremlerden elde edilen veriler kullanılarak geliştirilmiştir.

$$\ln PGA = 6.74 + 0.859M_L - 1.80 \ln(R + 25) \quad (2.4)$$

İnan ve diğ. (1996), 1976 – 1996 yılları arasında Türkiye’de meydana gelmiş deprem kayıtları kullanılarak geliştirilmiş bir denklemdir. Kullanılan veriler hakkında detaylı bilgi verilmemiştir.

$$\log PGA = 0.65M_s - 0.9 \log R - 0.44 \quad (2.5)$$

Aydan ve diğ. (1996), tarafından önerilen denklemin oluşturulmasında 1969 – 1995 yılları arasında Türkiye’de meydana gelmiş $3.5 \leq M \leq 7.3$ olan 50 deprem kaydı kullanıldığı belirtilmektedir. Bu depremlerden sadece 30 tanesi aletsel (1976 yılından sonraki) dönemde ölçülmüş kayıtlardır. Aydan (2001), ilk önerilen denklemde (2.6) bulunan ‘2.8’ değeri 0.56’ değeriyle değiştirilerek yeni önermede (2.7) bulunmuştur.

$$PGA = 2.8e^{(0.9M_s)}e^{(-0.025R)} - 1 \quad (2.6)$$

$$PGA = 0.56e^{(0.9M_s)}e^{(-0.025R)} - 1 \quad (2.7)$$

Ulusay ve diğ. (2004) farklı zemin türlerine göre geliştirilen denklem, 1976 – 2003 yılları arasında Türkiye genelinde meydana gelen 122 depremden elde edilen 221 kuvvetli hareket kaydından oluşmaktadır. Deprem büyüklüğü için moment magnitüd ölçeği esas alınmış ve $4.1 \leq M \leq 7.5$ magnitüd arasındaki deprem verileri kullanılmıştır.

$$PGA = 2.18e^{0.0218(33.3M_w - R_e + 7.8427S_A + 18.9282S_B)} \quad (2.8)$$

2.2.2 Deprem Olasılığı Tahminleri

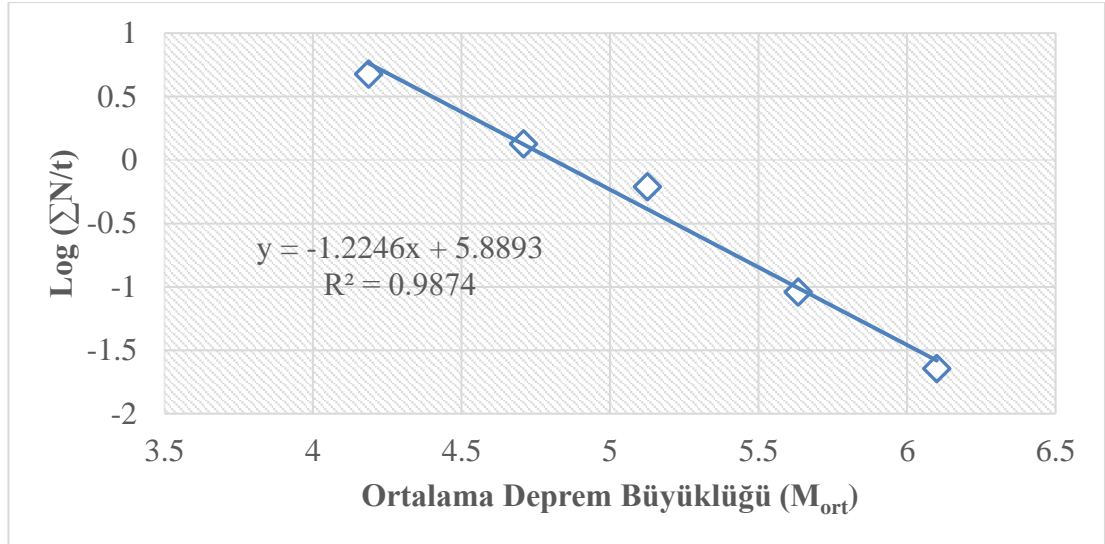
Farklı kaynaklardan elde edilip düzenlenen 1976 – 2020 yılları arasında meydana gelmiş depremlerin istatistiksel bilgileri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: 1976 – 2020 yılları arasında meydana gelmiş depremlerin istatistiksel bilgileri

Büyüklik Aralıkları	$4.0 \leq M_w < 4.5$	$4.5 \leq M_w < 5.0$	$5.0 \leq M_w < 5.5$	$5.5 \leq M_w < 6.0$	$6.0 \leq M_w < 6.5$
Deprem Sayısı (N)	150	32	23	3	1
Ortalama Büyüklik (Mort)	4.187	4.709	5.126	5.633	6.1
Kümülatif Deprem Sayısı ($\sum N$)	209	59	27	4	1
Deprem Sayısının Zamana Oranı ($\sum N/t$)	4.75	1.341	0.614	0.091	0.023
Log ($\sum N/t$)	0.677	0.127	-0.212	-1.041	-1.644

Sismik tehlike analizinde çalışma bölgesinde oluşabilecek en yüksek deprem büyüklüğünün belirlenmesi önemlidir. Bu değer aletsel dönemde ölçülen en büyük değere ve uzman görüşüne bağlı olarak belirlenmektedir. Aletsel dönemden önce meydana gelmiş büyük depremlerin tekrarlanma aralıklarının fazla olması durumunda deprem büyüklük tahminleri gerçeği yansıtmayacaktır. Gutenberg–Richter yasasına

göre denklem (2.1) kullanılarak Şekil 2.3'teki doğrunun eğiminden $a=5.8893$ ve $b=1.2246$ olarak bulunmuştur. Bulunan bu parametreler ile bölgede meydana gelebilecek depremlerin ortalama yıllık oluşum oranları hesaplanmıştır.



Şekil 2.3: Deprem büyüklüğü ile sıklığı arasındaki ilişki

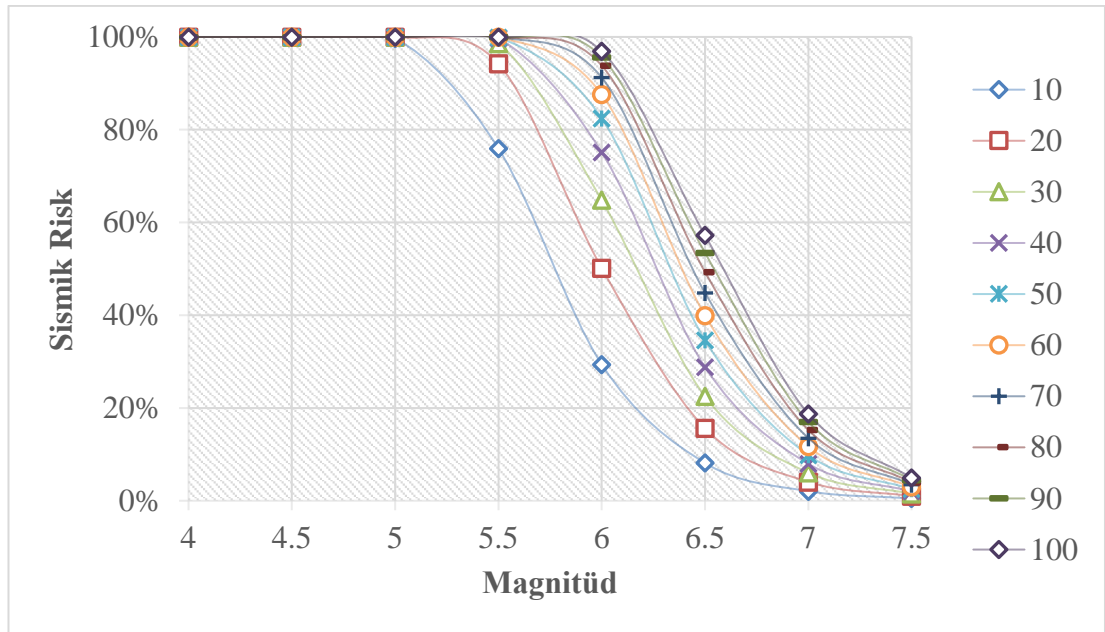
2.2.3 Sismik Tehlike Analizi

Depremlerin zamansal oluşumları en çok Poisson modeli ile tanımlanmaktadır. Poisson modeli, Poisson sürecini takip eden olayların olasılıklarını değerlendirmede önemli bir çerçeve oluşturmaktadır. Poisson süreci, verilen bir zaman aralığında ya da belirli bir bölge içinde belirli bir olayın oluşum sayısını tanımlayan rastgele değişkenin değerlerini veren bir süreçtir (Kramer 1996). Poisson modeli kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen depremlerin dönüş periyotları Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3: Depremlerin dönüş periyotları

M_w	λ	T (Yıl)										T_R (Yıl)	
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
		Sismik risk (%)											
4.0	9.7926	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.1
4.5	2.3911	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.4
5.0	0.5838	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1.7
5.5	0.1426	76	94	99	100	100	100	100	100	100	100	100	7.0
6.0	0.0348	29	50	65	75	82	88	91	94	96	97	97	28.7
6.5	0.0085	8	16	23	29	35	40	45	49	53	57	57	117.7
7.0	0.0021	2	4	6	8	10	12	14	15	17	19	19	481.8
7.5	0.0005	1	1	2	2	3	3	3	4	4	5	5	1973.3

Hesaplanan deprem dönüş periyotlarının grafiksel gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir (Karakaplan ve Alkaya 2022).



Şekil 2.4: Deprem dönüş periyotlarının grafiksel gösterimi

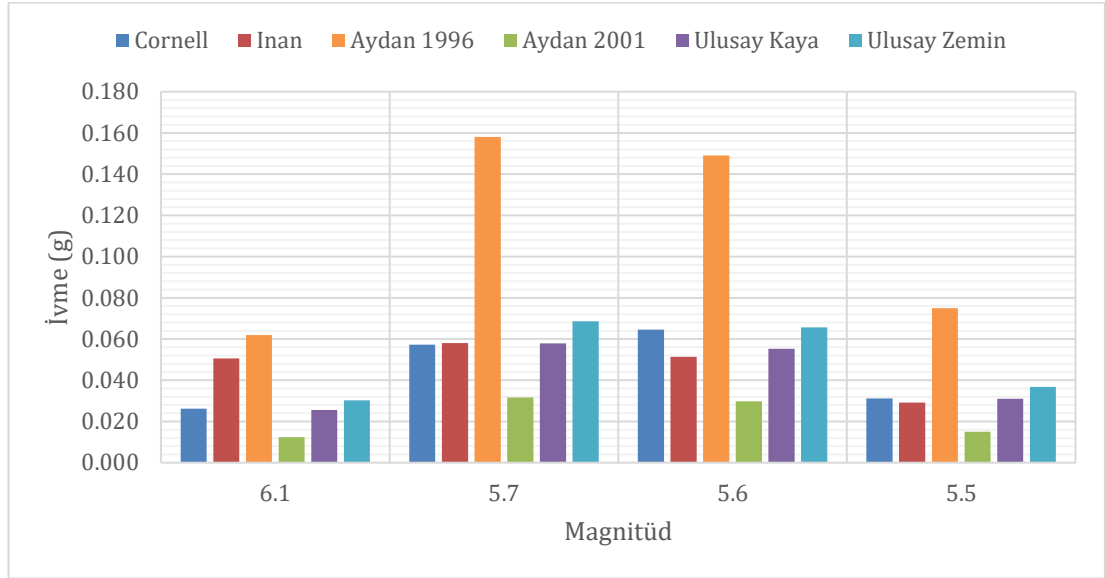
Sismik tehlike analizi ile ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen verilerden deprem yüzey dalgası büyüklüğü (Ms) kullanılmıştır. Yüzey dalgası büyüklüğü ilgili veri tabanlarından elde edilemeyen değerler, denklem (2.9) kullanılarak hesaplanmıştır (Kadirioğlu ve Kartal 2016). Belirtilen denklemlerden elde edilen azalım ilişkilerinin sonuçları Tablo 2.4'te verilmiştir.

$$M_w = 0.8126 (\pm 0.034602) M_s + 1.1723 (\pm 0.208173) \quad (2.9)$$

Honaz Tüneli merkezli 100 km yarıçapındaki dairesel alanda meydana gelen deprem verileri kullanılarak deprem tehlike analizi yapılmıştır. Tünel güzergâhı Denizli graben sisteminin bir kolu olan Honaz (Holosen) fayı ile Cankurtaran (Kuvaterner) fayı arasında kalmaktadır (Şekil 2.2). Bu faylar, aletsel dönemde çok büyük depremler meydana getirmese de tarihsel dönemde Denizli graben sistemi içerisinde büyük depremler meydana getirmiştir (Şekil 2.1). Sismoloji literatüründe önemli bir yeri olan Gutenberg–Richter bağıntısı kullanılarak çeşitli büyüklükteki depremlere ait tekrarlanma periyotları istatistiksel bir yöntem olan Poisson modeli ile çözümlenmiştir. Çalışma bölgesinde aletsel dönemde meydana gelmiş depremlerin tünel bölgesine etki ettiği ivme değeri tahminleri Tablo 2.4 ve Şekil 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.4: Hesaplanan azalım ilişkileri sonuçları

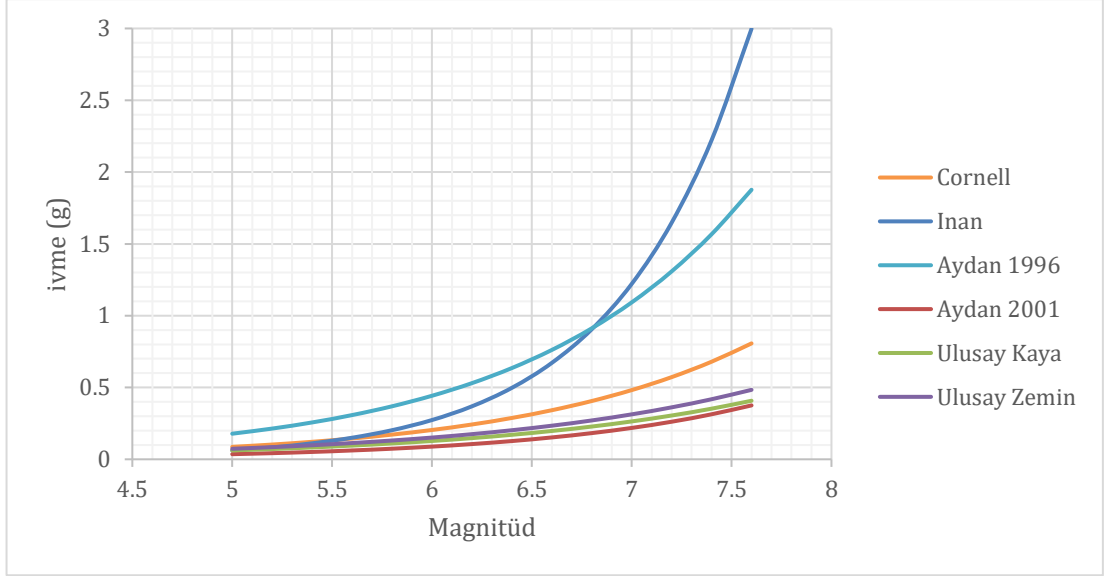
Oluş Tarihi	Derinlik (km)	Mw	Ms	Ml	Uzaklık (km)	Cornell (g)	Inan (g)	Aydan 1996 (g)	Aydan 2001 (g)	Ulusay Kaya (g)	Ulusay Zemin (g)
01.10.1995	5.0	6.1	6.0	5.9	91	0.026	0.051	0.012	0.062	0.024	0.030
20.03.2019	5.0	5.7	5.6	5.6	40	0.057	0.058	0.032	0.158	0.058	0.069
08.08.2019	8.9	5.6	5.5	5.7	39	0.065	0.051	0.030	0.149	0.055	0.066
11.10.1986	5.0	5.5	5.4	5.5	62	0.031	0.029	0.015	0.075	0.031	0.037



Şekil 2.5: Azalım ilişkilerinin grafiksel gösterimi

Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif web uygulaması üzerinden bölgede 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan en büyük yer ivmesi (PGA 2475) değeri 0.852 g olarak görülmektedir. Tarihsel dönemde Honaz fayında şiddet düzeyi VIII ve IX olan depremlerin meydana geldiği bilinmektedir. Mercalli ölçeğinde olan bu şiddet düzeylerinin Richter ölçeğindeki karşılığı 6.0 ile 6.9 büyüklüğü arasında olduğu bilinmektedir.

Honaz Tüneli'ne 10 km uzaklık ve 10 km derinlikte meydana gelebilecek depremlerin ($5.0 \leq M \leq 7.6$) tünel bölgesinde oluşturacağı tahmin edilen maksimum ivme değerleri hesaplanarak Şekil 2.6'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde Cornell (1979) ve Ulusay Zemin (2004) azalım ilişkilerinin hesaplanan değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



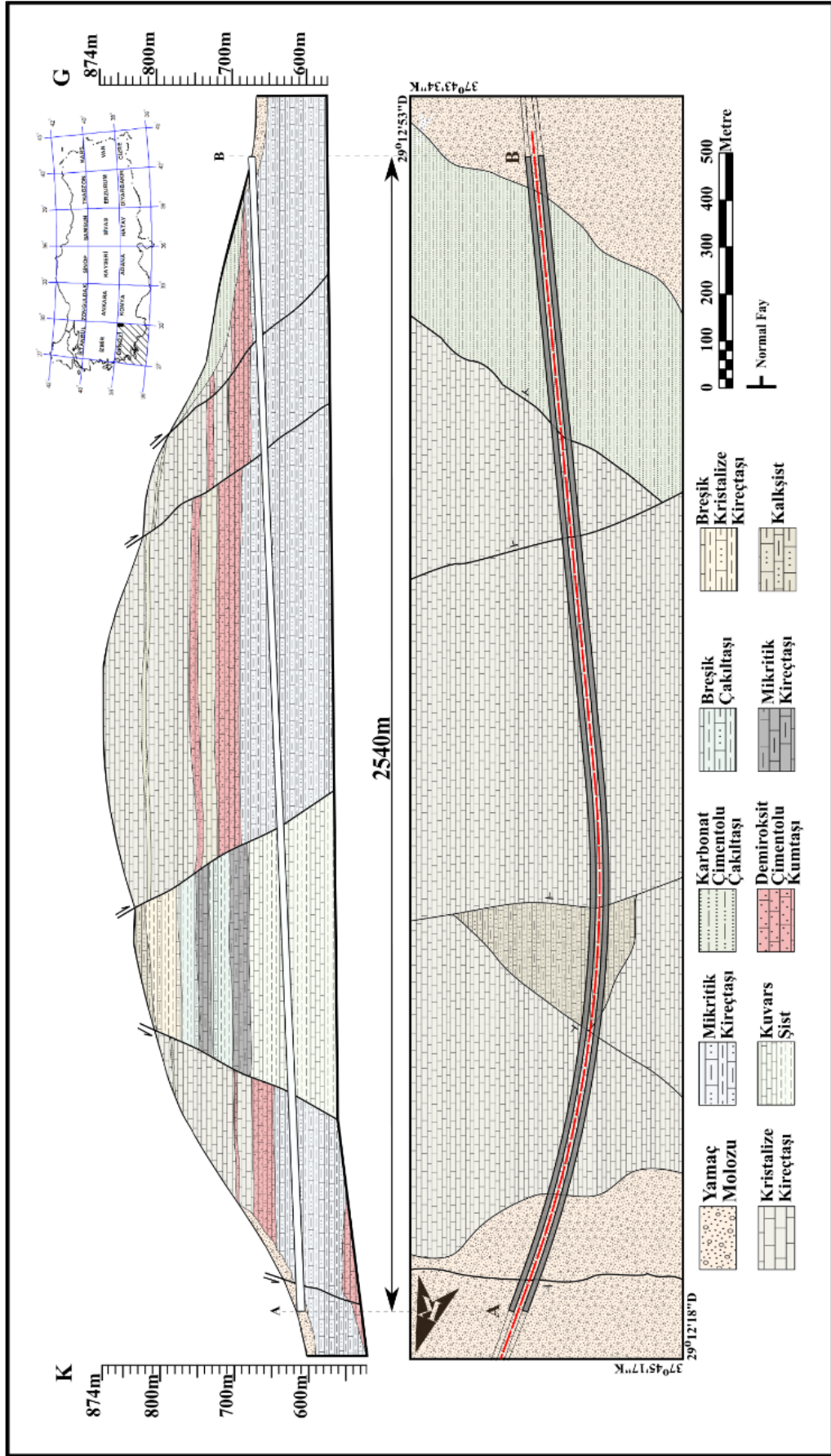
Şekil 2.6: Tünel bölgesinde oluşacağı varsayılan maksimum ivme değerleri

2.3 Bölgenin Mühendislik Jeolojisi

Koordinatları $37^{\circ}44'41''K$, $29^{\circ}12'40''D$, 2540 metresi kazı olmak üzere, kanopi ve aç-kapa yapılarıyla birlikte toplam 2640 m uzunluğa sahip tünel bölgesinde yapılan etütler ve kazı alanından elde edilen numuneler üzerinde yapılan kaya ve zemin mekaniği deneyleri bu başlık altında incelenmiştir.

2.3.1 Jeolojik Etüt

Çalışma bölgesinin geçirmiş olduğu yoğun tektonik faaliyetler sonucunda birimler dokusal özelliklerini kaybetmiş, etkin yeraltı suyu akışı nedeniyle killeşmiş ve dayanımını kaybetmiştir. Çok ayrık kayaç-zemin niteliğindeki bu birimlerin içerisinde, dayanımı daha yüksek olan çok küçük boyutlardan büyüklükleri birkaç metreye varan kireçtaşı blokları yüzmektedir. Şekil 2.7'de yapılan arazi gözlemleri ile çizilen Honaz Tüneli güzergâhının jeolojik kesiti verilmiştir. Tünel kazı girişi 10+590 km tünel kazı çıkışı 13+125 km'dir. Tünel çıkış noktasında aç-kapa yapısı bulunmaktadır.



Şekil 2.7: Honaz Tüneli güzergâhının jeolojik kesiti

2.3.2 Sismik Etüt

Tünel güzergâhı üzerinde belirlenen 6 noktada aktif kaynaklı çok kanallı yüzey dalgası yöntemi (MASW) ve P-kırılma ölçümleri (50 m) yapılmıştır. Bu ölçümler tünel kotunun 30 m altına kadar olan formasyon hakkında bilgi sağlamıştır. Topoğrafik yüzeyden yapılan keşif sondajlarının inmediği bu derinlikteki kaya kütesinin boşluk içeriği ve kaya malzemesinin kalitesi hakkında elde edilen sonuçlar sayısal modellemede daha gerçekçi çıkarımlar yapmayı sağlamıştır.

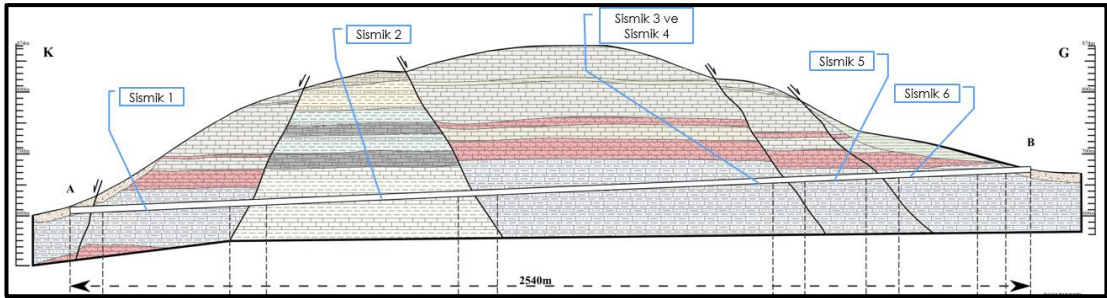
2.3.2.1 Aktif Kaynaklı Çok Kanallı Yüzey Dalgası Yöntemi

Aktif kaynaklı çok kanallı yüzey dalgası yönteminin (MASW) çalışmaları üç temel aşamada gerçekleştirilir. Bu aşamalar; veri toplama, dispersiyon eğrisinin elde edilmesi ve ters çözüm işlemiyle Vs dağılımının belirlenmesidir. Veri toplamada kullanılan arazi düzeni ve ölçü alımı, sismik kırılma yöntemiyle benzerlik gösterir. Kullanılan serim uzunluğu, kaydedilebilecek en büyük dalga boyu ile ilişkili olduğundan araştırma derinliğini belirler. Jeofon aralığı, kaydedilebilecek en küçük dalga boyu ile ilişkilidir. Bu nedenle, jeofon aralığı doğrudan sığ araştırma derinliğinin çözünürlüğünü etkileyen bir değişkendir. Uygulamada yaygın olarak, doğrusal dizilim ve eşit jeofon aralığı kullanılır. Bununla birlikte, jeofonlar arası mesafenin eşit alınmaması ve jeofonların artan mesafeyle dizilmesi, dispersiyon görüntüsü çözünürlüğünü artırır (Korkmaz 2012).

MASW yönteminde kaynak olarak balyoz, çekiç, patlatma veya ağırlık düşürme gibi geçici enerji üreten kaynaklar kullanılır. Bu tür kaynaklar, hızlı veri toplama sağlarken, frekans içeriğinin çoğu durumda zayıf olmasından dolayı sınırlı çalışma olanağı sağlar. Belirli frekans aralığında harmonik dalga üretici kaynaklar geçici kaynaklara göre özellikle düşük frekanslarda daha iyi enerji oluşturur. Veri toplamada, genel olarak 1 ms – 2 ms örnekleme aralığı kullanılarak 1 saniye süresince veri toplanması, Vs değişimin belirlenmesi için yeterlidir. Sismik hızlar, zeminin yoğunluğuna, mineral bileşimine, tane dağılımına, tane büyüklüğüne, gözenekliliğe, gözenegi dolduran sıvının türüne ve miktarına, sıklığına, maruz kaldığı basınçlara ve jeolojik geçmişine bağlıdır (Dikmen ve diğ. 2010).

Bu etütte kullanılan sistem, otomatik kendi programı ile veri toplayan 12 adet sinyal artırıcı, bir balyoz, 12 adet düşey jeofon (4.5 Hz.), kablolar, usb ara yüzüyle cihaza bağlanan bilgisayar ve özel bağlantı ünitelerinden oluşmaktadır. Çalışma alanında yapılan 6 adet sismik MASW ile P-Kırılma profil çalışmasında jeofon aralıkları 2 m olarak alınmıştır. Bir serim boyunca ofset aralıkları 0 m – 9 m – 25 m – 31 m – 41 m – 50 m olmak üzere ayrı ayrı 6 ölçü alınmıştır. Enerji kaynağı olarak 10 kg ağırlığında ve alet ile bağlantılı özel çekiç kullanılmıştır. Ölçülen değerler “Seismager” yazılımı kullanılarak iki boyutlu olarak modellenmiştir.

Tünelin altı bölgesinde her iki tüpte sismik ölçümler yapılmıştır. Sismik ölçüm bölgelerini gösteren tünel haritası ve sismik ölçüm etütlerinin yapılışını gösteren fotoğraflar aşağıda verilmiştir (Şekil 2.8, Şekil 2.9).



Şekil 2.8: Honaz Tüneli sismik ölçüm bölgeleri



Şekil 2.9: Honaz Tüneli sismik ölçüm etütlerinin yapılışını

Bu ölçümlerden elde edilen verilerden oluşturulan Faz – Hız grafiği, V_s – Derinlik ve V_p – Derinlik modelleri ekler bölümünde verilmiştir.

Bu ölçüm sonuçlarına bağlı olarak kaya kütleline ait V_s – V_p dalgı hızları, poisson oranı, elastisite modülü, kesme modülü, yoğunluk, sıkışmazlık modülü, zemin büyütmesi, sökülebilirlik değerleri elde edilmiştir (Tablo 2.5).

Tablo 2.5: Kaya kütlelerinde yapılan sismik etüt sonuçları

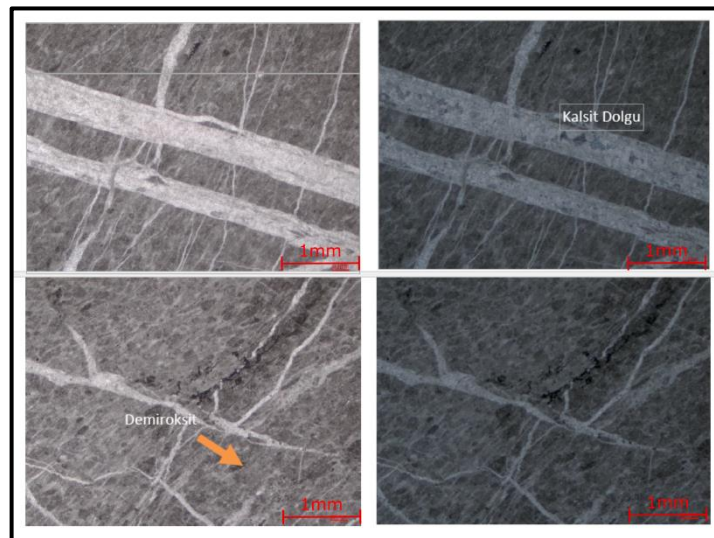
	Tabaka alt sınırı	Tabaka kalınlığı	Vp (m/sn)	Vs (m/sn)	Hız oranı	Yoğunluk	Poisson oranı	Kesme modülü (kg/cm ²)	Elastisite modülü (kg/cm ²)	Sıkışmazlık modülü (kg/cm ²)	Zb	Vs(30)
Sismik-1	10.8	10.8	3589	1235	2.91	2.40	0.43	36596	104874	260271	0.95	1297
	21.3	10.5	3794	1284	2.95	2.43	0.44	40111	115145	296730	0.93	
			3999	1400	2.86	2.47	0.43	48318	138204	329809	0.88	
Sismik-2	10.8	10.8	3500	1292	2.71	2.38	0.42	39802	113126	239020	0.92	1356
	21.3	10.5	3700	1405	2.63	2.42	0.42	47727	135140	267354	0.88	
			3899	1383	2.82	2.45	0.43	46854	133818	309926	0.89	
Sismik-3	8	8	2471	1256	1.97	2.19	0.33	34479	91426	87480	0.94	1261
	14	6	2878	1185	2.43	2.27	0.40	31884	89143	145557	0.97	
			3199	1294	2.47	2.33	0.40	39038	109476	186535	0.92	
Sismik-4	14	14	2322	1147	2.02	2.15	0.34	28311	75795	78277	0.99	1137
	21.3	7.3	2944	1136	2.59	2.28	0.41	29468	83249	158621	1.00	
			3099	1122	2.76	2.31	0.42	29117	82960	183308	1.01	
Sismik-5	5.5	5.5	1644	687	2.39	1.97	0.39	9316	25978	40929	1.35	840
	8	2.5	2011	742	2.71	2.08	0.42	11429	32487	68714	1.29	
	21.3	13.3	2256	900	2.51	2.14	0.41	17305	48641	85662	1.15	
			2499	908	2.75	2.19	0.42	18071	51464	112784	1.14	
Sismik-6	8	8	1767	833	2.12	2.01	0.36	13946	37854	44159	1.20	1025
	10.8	2.8	2300	918	2.51	2.15	0.41	18092	50847	89444	1.13	
	14	3.2	2567	1042	2.46	2.21	0.40	23958	67148	113458	1.05	
			2699	1180	2.29	2.23	0.38	31112	85984	121285	0.98	

2.3.3 Mineralojik – Petrografik Analiz

Elde edilen numuneler, jeolog çekici ile makroskobik gözlemler yapmak amacıyla kırılmıştır. Kırılan taze yüzeyin gözlemsel tanımlanmaları lup, çakı ve stereoskopik mikroskop (10x) ile yapılmıştır. Ayrıca reaktif olarak hidroklorik asit çözeltisi ile örneğin verdiği tepki gözlenmiştir. Daha sonra her bir numuneden 1 adet ince kesit hazırlanarak polarizan mikroskopta detaylı olarak incelenmiştir. Tüm materyaller ilgili Türk Standardları Enstitüsünde verilen özelliklere uygun seçilmiştir.

2.3.3.1 Mikritik Kireçtaşı (No:1)

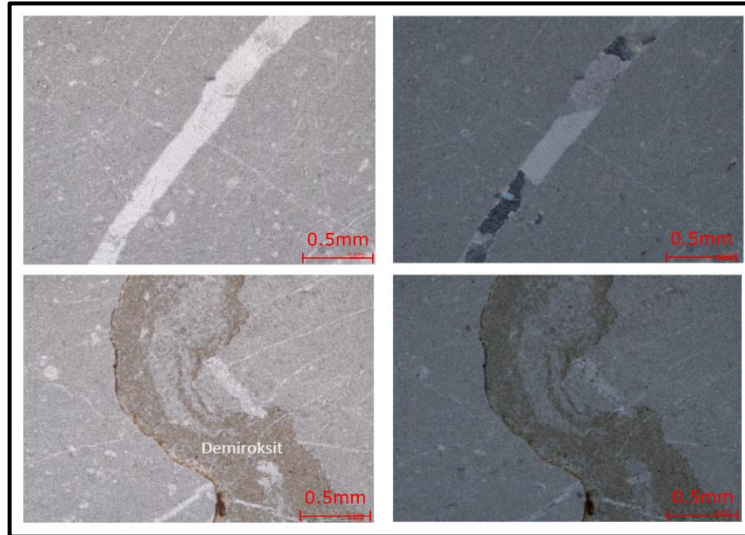
Kayaç numunesi, koyu gri renkli ve ince kristallidir. Kristaller küçük olduğu için üzerinde makro mineraller gözlenmemektedir. Kayaç üzerinde belirgin gözenek ve boşluk gözlenmemektedir. Kayaç üzerinde 5 mm kalınlıklarına varan beyaz renkli kristalli ikincil kalsit dolgular tespit edilmiştir. Kayaç, hidroklorik asitle şiddetli bir tepkime gerçekleştirmiştir. Kayaç mikroskop altında incelendiğinde, belirgin bir mikritik doku göze çarpmaktadır. Kayacın temel bileşenini mikrokristalen kalsit (mikrit) oluşturmaktadır. Mikrokristalen kalsit 1 – 4 mikron boyutlarındadır. Açık kahverengimsi bir renk göze çarpmaktadır. Mikrit, üzerinde inceleme yapılamayacak kadar küçük kristallerden meydana gelmektedir. Mikritler, tahminen kayacın ~%70'ini oluşturmakta olup genel itibariyle kayaç içerisinde homojen bir dağılım sunmaktadır. Mikritik doku çoğunlukla ikincil mikro çatlaklar tarafından kesilmekte ve bu çatlaklarda ikincil iri sparikalsit dolgu gözlenmektedir. Kalsit mineralleri polisentetik ikizlenme gösterir. Bu kalsit dolgulu çatlakların, kayacın kırılmasında veya dayanımında olumsuz bir etki yaratmadığı düşünülmektedir. Kayaçta yer alan kılcal çatlaklarda demir oksitleşme (stilolitleşme) gözlenmektedir. Kayaç içerisinde yer yer kuvars minerallerinin varlığı da tespit edilmiştir. Numune üzerinde yapılan mikroskopik tayinler sonucunda mikritik dokunun belirgin olduğu gözlemlenmiş ve kayaç çok ince taneli “mikritik kireçtaşı” olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Mikritik kireçtaşına ait tek nikol ve çift nikol görüntüleri

2.3.3.2 Mikritik Kireçtaşı (No:2)

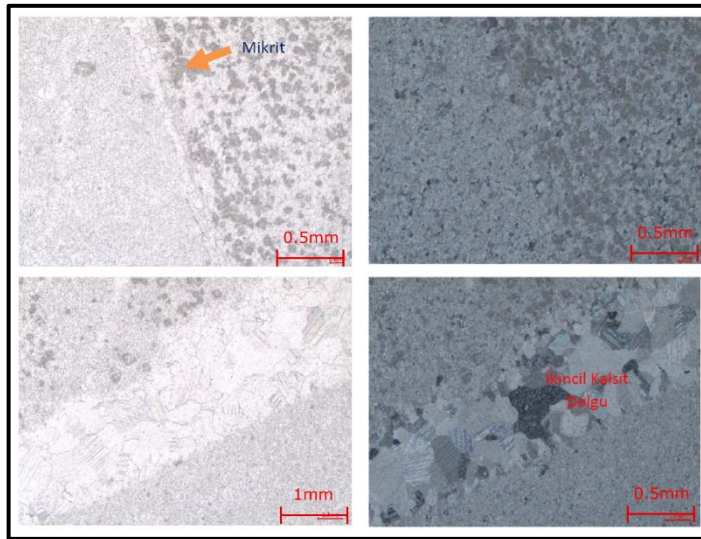
Kayaç numunesi, gri renkli ve ince kristallidir. Kristaller küçük olduğu için üzerinde makro mineraller pek gözlenmemektedir. Kayaç içerisinde krem renkli kalsit dolgular belirgin şekilde izlenmektedir. Kayaç üzerinde belirgin gözenek ve boşluk gözlenmemektedir. Kayaç, hidroklorik asitle şiddetli bir tepkime gerçekleştirmiştir. Kayaç mikroskop altında incelendiğinde, belirgin bir mikritik doku göze çarpmaktadır. Kayacın temel bileşenini mikrokristalen kalsit (mikrit) oluşturmaktadır. Mikrokristalen kalsit 1 – 4 mikron boyutlarındadır. Açık kahverengimsi bir renk göze çarpmaktadır. Mikrit, üzerinde inceleme yapılamayacak kadar küçük kristallerden meydana gelmektedir. Mikritler, tahminen kayacın ~%90'ını oluşturmakta olup genel itibarıyla kayaç içerisinde homojen bir dağılım sunmaktadır. Ayrıca bu yapıları kesen bol miktarda mikro çatlaklar görülmektedir. Kayaç içerisinde gözlenen çatlaklar ikincil kalsitler (sparikalsitler) tarafından doldurulmuştur. Kalsit mineralleri yer yer polisentetik ikizlenme gösterir. Bu kalsit dolgulu çatlakların, kayacın kırılmasında veya dayanımında olumsuz bir etki yaratmadığı düşünülmektedir. Ayrıca kayaç içerisinde damar şeklinde uzanan demir oksitleşme tespit edilmiştir. Numune üzerinde yapılan mikroskopik tayinler sonucunda mikritik dokunun belirgin olduğu gözlemlenmiş ve kayaç çok ince taneli “mikritik kireçtaşı” olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Mikritik kireçtaşına ait tek nikol ve çift nikol görünümüleri

2.3.3.3 Kristalize Kireçtaşı (No:3)

Kayaç numunesi, açık grimsi renkli ve ince kristallidir. Kristaller küçük olduğu için üzerinde makro mineraller pek gözlenmemektedir. Kayaç içerisinde yer yer kalsit dolgular belirgin şekilde izlenmektedir. Kayaç üzerinde belirgin gözenek ve boşluk gözlenmemektedir. Kayaç, hidroklorik asitle şiddetli bir tepkime gerçekleştirmiştir. Kayaç mikroskop altında incelendiğinde, belirgin bir sparitik doku göze çarpmaktadır. Az olarak gözlenen mikrokristalen kalsit 1 – 4 mikron boyutlarındadır. Açık kahverengimsi bir renk göze çarpmaktadır. Mikrit, üzerinde inceleme yapılamayacak kadar küçük kristallerden meydana gelmektedir. Ayrıca bu yapıları kesen mikro çatlaklarda görülmektedir. Kayaç içerisinde gözlenen boşluklar ikincil kalsitler (sparikalsitler) tarafından doldurulmuştur. İkincil kalsit mineralleri polisentetik ikizlenme gösterir. Bu kalsit dolguların, kayacın kırılmasında veya dayanımında olumsuz bir etki yaratmadığı düşünülmektedir. Ayrıca kılcal çatlaklarda demir oksitleşme (stilolitleşme) tespit edilmiştir. Numune üzerinde yapılan mikroskopik tayinler sonucunda sparitik dokunun belirgin olduğu gözlemlenmiş ve kayaç ince taneli “kristalize kireçtaşı” olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.12).

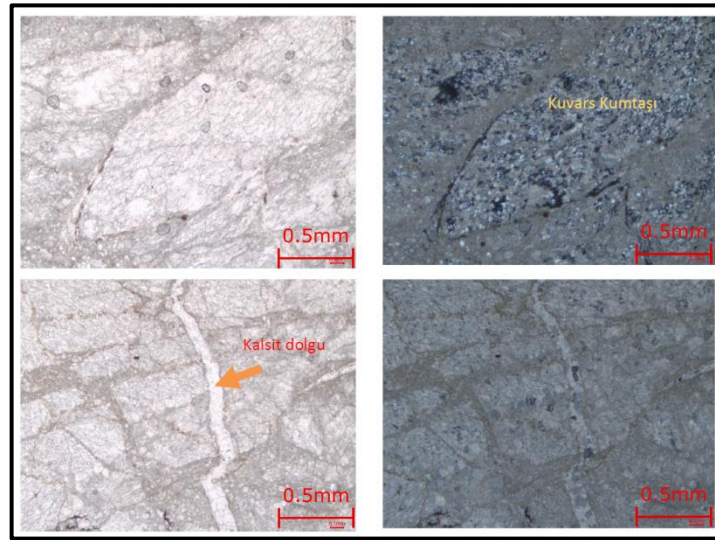


Şekil 2.12: Kristalize kireçtaşına ait tek nikol ve çift nikol görünüşleri

2.3.3.4 Breşik Kristalize Kireçtaşı (No:4)

Kayaç numunesi, krem renkli ve ince kristallidir. Kayaç üzerinde belirgin gözenek ve boşluk gözlenmemektedir. Kayaç üzerinde tespit edilen kılcal çatlaklarda

demir oksitleşmeler gözlenmektedir. Bu durum kayaç renginde yer yer sarımsı tonlar şekline gözlenmektedir. Kayaç, hidroklorik asitle şiddetli bir tepkime gerçekleştirmiştir. Kayaç mikroskop altında incelendiğinde, ince kalsit mineralleri bol miktarda gözlenmektedir. Kayaç breşik bir yapı göstermektedir. Granoblastik dokulu taneler arasındaki sınır ilişkisi basit-düzgün (mozayik dokulu)'dür. Kalsit mineralleri genellikle polisentetik ikizlenme gösterirler. Kayaç içerisinde boşluk gözlenmektedir ve bu boşluklar dolgusuzdur. Kayaç içerisinde ikincil kalsit dolgular gözlenmektedir. Kayaçta belli kesimlerinde kuvars taneleri ile karbonat çimentolu kuvars kumtaşı parçaları gözlenmektedir. Kayaç içerisinde breşik taneler arasında gözlenen boşluklarda demir oksitleşmeler belirgindir. Kayaçta yer yer mineral kenarları boyunca girik dokanıklarda demir oksitleşme (stilolitleşme) gözlenmektedir. Numune üzerinde yapılan mikroskobik tayinler sonucunda sparitik dokunun belirgin olduğu gözlemlenmiş ve kayaç ince taneli "breşik kristalize kireçtaşı" olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.13).

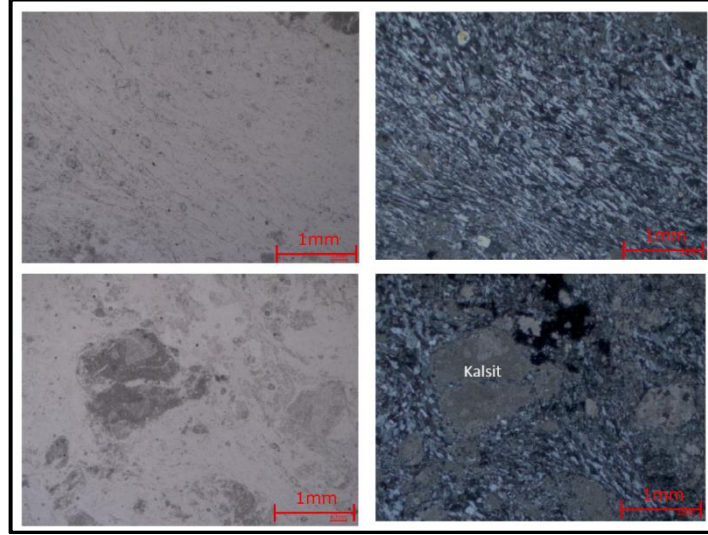


Şekil 2.13: Breşik kristalize kireçtaşına ait tek nikol ve çift nikol görünüşleri

2.3.3.5 Kalk – Kuvars Şist (No:5)

Kayaç numunesi, grimsi-beyazımsı renklidir. Kuvars mineralleri belirgin şekilde ayırt edilmektedir. İçerdikleri mineral türlerine ve yüzdelerine göre açık renklidir. Kayaç numunesinin mikroskop altında incelenmesi sonucunda, bol ve çok küçük kuvars mineralleri ile iri kalsit minerallerine rastlanmıştır. Kuvars çoğunlukla eş boyutlu taneler şeklinde olup belirgin yönlenme göstermektedir. Bu bileşenlerin

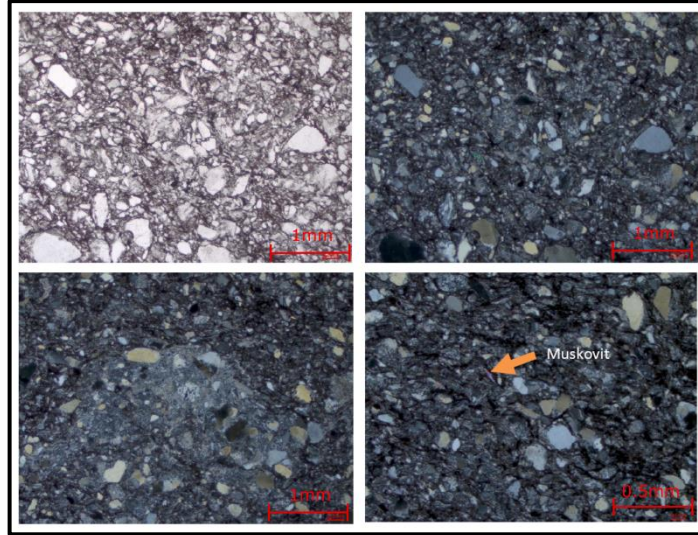
paralel bir şekilde dizilmesi kayaçta şiştözite dokusunun ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yaklaşık eş boyutlu kuvars kristalleri içeren lepidoblastik doku sunmaktadırlar. Kuvarslar dalgalı sönme gösteren kuvarslardır. Numune üzerinde yapılan mikroskopik tayinler sonucunda lepidoblastik dokunun belirgin olduğu gözlemlenmiş ve kayaç “kalk-kuvars şişt” olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14: Kalk – kuvars şişte ait tek nikol ve çift nikol görüntüleri

2.3.3.6 Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı (No:6)

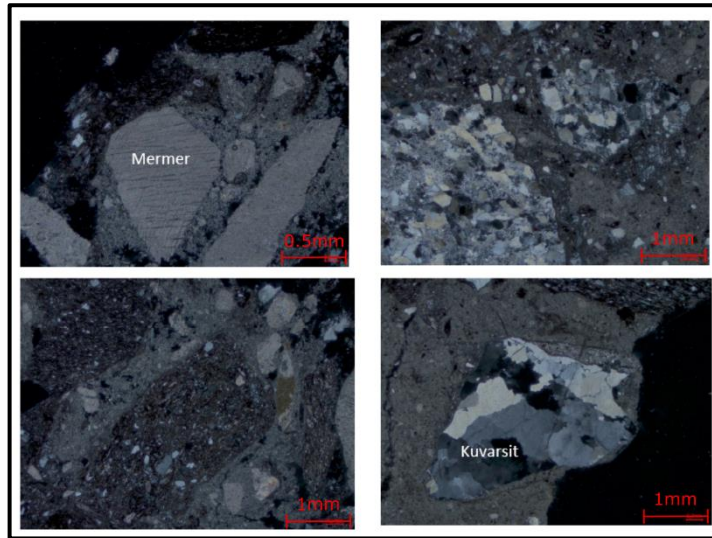
Kayaç numunesi, kırmızımsı-bordo renkli ve ince kristallidir. Kristaller küçük olduğu için üzerinde makro mineraller pek gözlenmemektedir. Kayaç içerisinde yer yer kuvars taneleri gözlenmektedir. Kayaç üzerinde belirgin gözenek ve boşluk gözlenmemektedir. Kayaç mikroskop altında incelendiğinde, belirgin bir demir oksitleşme gözlenmektedir. İçerisinde bol kuvars, metamorfik kayaç parçaları ve kireçtaşı taneleri tespit edilmiştir. Kuvars taneleri egemendir. Buna karşın kireçtaşı taneleri daha az oranda gözlenmektedir. Yer yer az ve küçük oranda muskovit mineralleri belirlenmiştir. Numune üzerinde yapılan mikroskopik tayinler sonucunda “demir oksit çimentolu kumtaşı” olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15: Demir oksit çimentolu kumtaşına ait tek nikol ve çift nikol görüntüleri

2.3.3.7 Karbonat Çimentolu Çakıltaşı (No:7)

Kayaç numunesi, kırmızımsı-bordo renklidir. Kayaç içerisinde iri çakıl taneleri gözlenmektedir. Kayaç mikroskop altında incelendiğinde, belirgin bir demir oksitleşme gözlenmektedir. İçerisinde bol kuvars, metamorfik kayaç parçaları (kuvarsit, şist ve mermer) ve kireçtaşı taneleri tespit edilmiştir. Taneler genellikle köşelidir. Kuvars taneleri ve metamorfik çakıllar egemendir. Buna karşın kireçtaşı taneleri de gözlenmektedir. Çakıl tanelerinin çevresinde belirgin karbonat çimento gözlenmektedir. Numune üzerinde yapılan mikroskobik tayinler sonucunda “karbonat çimentolu çakıltaşı” olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16: Karbonat çimentolu çakıltaşına ait tek nikol ve çift nikol görüntüleri

2.3.3.8 Yamaç Molozu (No:8)

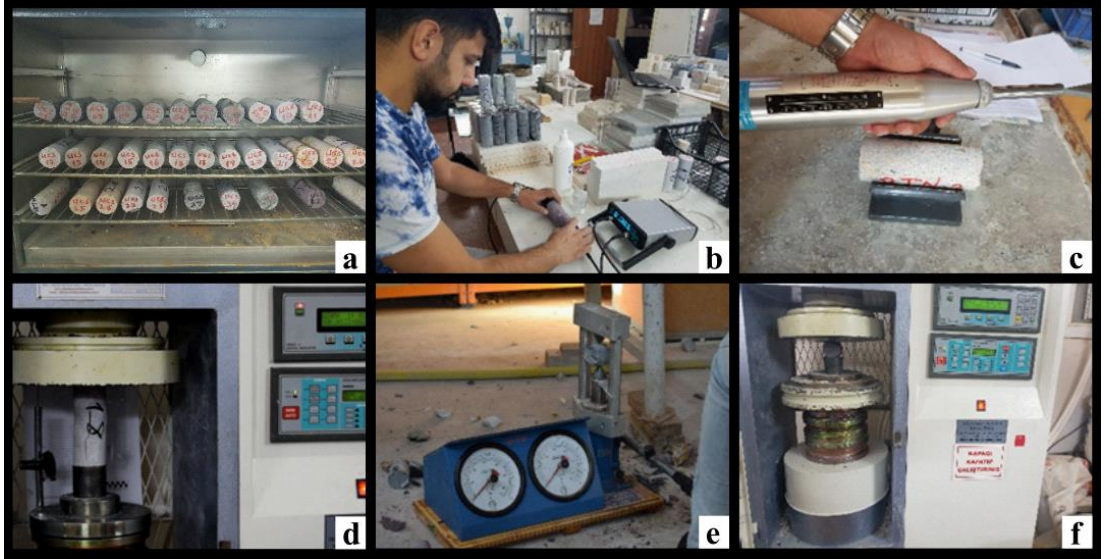
Zemin numunesi, krem renklidir. Çok iri çakıl tanelerinden meydana gelmiş, bol miktarda metamorfik kayaç parçalarından oluşmuştur.

2.3.3.9 Fay Breşi (No:9)

Zemin numunesi, açık gri renklidir. İri çakıl tanelerinden meydana gelmiş, bol miktarda metamorfik kayaç parçaları (kuvars, şist) ve kireçtaşı tanelerinden oluşmuştur.

2.3.4 Kaya ve Zemin Mekanîği Laboratuvar Deneyleri

Tünel içerisinde kazılan çeşitli bölgelerdeki kaya malzemeleri elde edilip, laboratuvarında karot numuneleri alınmıştır. Deneyler ISRM önerilerine göre yapılmıştır. Yapılan deneylere ait bazı fotoğraflar Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17: Etüvde kurutulmuş karotlar (a), Sismik hız ölçümü yapılması (b), Schmidt çekici ile sertlik belirlenmesi (c), Tek eksenli basınç deneyi (d), Nokta yükü dayanım deneyi (e), Endirekt çekme (Brazilian) deneyi (f)

Tek eksenli basınç deneyi için 32 adet Nx çapında (54 mm, boy/çap oranı 2.5:1) sağlam karot numunesi elde edilmiştir. Bununla birlikte 60 adet nokta yükü dayanım deneyi ve 63 adet endirekt çekme deneyi için numuneler hazırlanarak toplamda 155

numuneye ait deney sonuçlar elde edilmiştir. Kaya malzemesi üzerinde, birim hacim ağırlık tayini, ağırlıkça su emme ve gözeneklilik, Schmidt sertlik, $V_p - V_s$ dalga hızı, tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükü, indirekt çekme (Brazilian) deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen ve hesaplanan sonuçlar Tablo 2.6'da verilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, kaya malzemesinin tanımı hakkında kesin ve detaylı bilgi sağlamıştır.

Tablo 2.6: Laboratuvar deney verilerinin kaya malzemesine göre ortalama sonuçları

	Mikritik Kireçtaşı	Mikritik Kireçtaşı	Kristalize Kireçtaşı	Breşik Kristalize Kireçtaşı	Kalk – Kuvars Şist	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	Karbonat Çimentolu Çakıltaşı	Yamaç Molozu	Fay Breşi
Numune numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tek eksenli basınç dayanımı – UCS (MPa)	48.81	24.71	39.40	41.49	11.67	22.17	2.05	0	0
Kohezyon – C (MPa)	1.81	1.72	2.01	2.09	1.82	1.29	0.28	0.1	0.1
İçsel sürtünme açısı – ϕ (°)	38	44	40	39	27	28	25	22	24
Endirekt çekme (MPa)	0.27	0.48	0.41	0.42	1.13	0.30	0.15	0	0
Nokta yükü $I_{s(50)}$ (MPa)	2.72	3.08	2.63	2.44	1.39	2.22	0.17	0	0
Poisson oranı – ν	0.31	0.27	0.29	0.30	0.38	0.37	0.39	0.41	0.40
Doğal yoğunluk (g/cm^3)	2.68	2.65	2.65	2.60	2.42	2.72	2.30	1.80	1.90
Schmidt sertlik – N	32	29	31	30	15	20	-	-	-
Gözeneklilik – n (%)	1.08	1.10	2.39	1.87	5.21	1.87	-	-	-
Young modülü – E (MPa)	4757	3880	3164	3436	1128	2366	-	-	-
Deformasyon modülü – E_m (MPa)	3134	2139	3984	1747	978	1141	675	418	505
Kesme modülü – G (MPa)	1812	1218	1229	1321	410	861	-	-	-
Sıkışmazlık modülü – K (MPa)	976	672	670	716	215	451	-	-	-
V_p (m/s)	5570	5417	4841	5558	4452	1539	-	-	-
V_s (m/s)	4432	3073	3599	3240	-	1134	-	-	-
V_p/V_s	1.43	1.86	2.04	2.40	-	1.36	-	-	-
Ortalama derinlik (m)	150	150	200	150	150	150	30	15	30

Kaya malzemesiyle ilgili detaylı bilgiler kaya kütlesinin tanımlanarak sınıflandırılması konusunda önemli parametreler olsa da arazi gözlemleriyle birlikte kaya kütlesini daha gerçekçi sınıflamak mümkündür. Tek eksenli basınç dayanımı arasında çok büyük fark olan kaya malzemelerinde, süreksizliklerle (eklemlerle) ilgili parametre puanları farklı olduğunda kaya kütlesinin sınıflandırılmasında birbirine çok yakın değerler elde etmek mümkündür.

Elde edilen tüm veriler ve arazi gözlemleriyle tünel çevresindeki kaya kütlesinin sınıflaması yapılmıştır. Bunun için sekiz farklı kaya kütle sınıflama sisteminden yararlanılmıştır. Bu sistemler; Kaya Kütle Kalitesi (Q), Kaya Kütle Puanlaması (RMR), Kaya Kütle Kalitesi Puanlaması (RMQR), Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM), Kaya Kütle İndeksi (RMi), Kaya Yapısı Puanlaması (RSR), Kaya Kalite Göstergesi (RQD) ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), sistemleridir.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen veriler ışığında, Q, RMR, RMQR, NATM, RMi, RSR sistemleri kullanılarak kaya kütlesi sınıfları ve bu altı sistemin önerdiği destek elemanlarının tür ve miktarları belirlenmiştir.

3. KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİ

Yirminci yüzyılın başından bu yana birçok araştırmacı tarafından kaya kütle sınıflama ve kazı destek sistemi önerilmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından bir diğeri de farklı kaya kütle sınıflama sistemlerinin önerdiği destek sistemlerinin tür, miktar ve boyutlarının değerlendirilmesidir. Bu amaçla aşağıda yer alan kaya kütle sınıflama sistemlerinin önerdiği şekilde çalışma bölgesinin kaya kütle sınıflandırılmış daha sonra destekleme tür ve miktarları belirlenmiştir.

Günümüzde inşaat ve maden mühendisliği alanlarında yaygın kullanım yeri bulan ve destekleme önerileri içeren sistemlerden altı tanesi bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Bu sistemler; Kaya Kütle Kalitesi (Q), Kaya Kütle Puanlama (RMR) Sistemi, Kaya Kütle Kalitesi Puanlama (RMQR) Sistemi, Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM), Kaya Kütle İndeksi (RMi) ve Kaya Yapısı Puanlama (RSR) Sistemi'dir. Sistemler, uzun yıllar süren arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler toplanarak geliştirmiştir. İleride yapılacak yeni çalışmalarla geliştirilmeye açık olması araştırmacıların bu sistemlere ilgisini arttırmış ve bazıları birçok kez değişikliğe uğramıştır. Çeşitli alanlardan elde edilen gözlem ve tecrübelerle bu sistemlerin ileride de gelişmeye açık olacağı öngörülmektedir. Örneğin, bu sistemlerde kaya kütlelerinde meydana gelebilecek deprem gibi dinamik koşulları tanımlamak için herhangi bir hesaplama ölçütü yer almamaktadır.

3.1 Kaya Kütle Kalitesi (Q) Sistemi

Q sistemi Norveç Geoteknik Enstitüsü araştırma ekibinden Barton ve diğ. (1974) tarafından geliştirilmiş bir kaya kütle sınıflama sistemidir. Sistemin temeli, İskandinavya bölgesinde bulunan 200'den fazla maden galerisi ve tünelde yapılan incelemelere dayanmaktadır. Kaya kütle değerlendirilmesinde kullanılan Q değeri aşağıdaki denklem (3.1) yardımıyla hesaplanır. Bu eşitliği oluşturan 6 değer arazi ve laboratuvardan elde edilen veriler ışığında belirlenmektedir.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

Burada; RQD: kaya kalite göstergesi, Jn: eklem takım sayısı, Jr: eklem pürüzlülük durumu, Ja: eklem ayrışma durumu, Jw: eklem suyu indirgeme faktörü, SRF: gerilme indirgeme faktörüdür.

Denklem (3.1) yardımıyla hesaplanan, Q değerine göre tüneller ve diğer yeraltı açıklıkları için önerilen destekleme miktarı ve türü 2014 yılında güncellenen, Q değeri hesaplanmış kaya kütlelerine önerilen destekleme türü ve miktarı grafiği yardımıyla belirlenmektedir (Barton ve Grimstad 2014).

Q sistemi hesaplanmasında kullanılan bu parametreler ve destekleme miktarı hakkında, yayınlanan ilk makale çok detaylı bilgi içermektedir (Barton ve diğ. 1974). Yazarlar tarafından 2014 yılında yayınlanan makale sistemin 40 yıllık tecrübe birikimlerini içererek daha optimum destekleme türü önermektedir (Barton ve Grimstad 2014). Bu makale ile Q sisteminin kullanımını kolaylaştırmak için Norveç Geoteknik Enstitü'sü tarafından yayınlanan kullanıcı el kitabı Mayıs 2015 tarihinde araştırmacıların erişimine sunulmuş ve son olarak Haziran 2022 tarihinde güncelleştirme yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, Honaz Tüneli çevre kaya kütlelerinin Q sistemine göre hesaplanan puanları ve önerilen destekleme elemanları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Hesaplanan Q puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları

No	Kaya Birimi	Q Puanı	Kaya Cıvatası Uzunluğu (m)	Kaya Cıvatası Aralığı (m)	Kaya Cıvatası (adet)	Püskürtme Beton Kalınlığı (mm)	Çelik Kafes Çapı (mm)	Çelik Kafes Aralığı (m)	Taban Astar (mm)	Taban Bulonu (m)
1	Mikritik Kireçtaşı	1.32	3	1.8	20-21	90	Yok	Yok	90	3
2	Mikritik Kireçtaşı	0.528	3	1.6	22-23	120	Yok	Yok	120	3
3	Kristalize Kireçtaşı	4.752	3	1.6	22-23	120	Yok	Yok	120	3
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	0.176	3	1.4	27-28	300	16	0.6	300	3
5	Kalk – Kuvars Şist	0.010417	3	1	36-37	400	20	0.2	400	3
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	0.020833	3	1.1	33-34	450	20	0.2	450	3
7	Karbonat Çimentolu Çakıtaşı	0.007333	3	1	36-37	550	20	0.15	550	3
8	Yamaç Molozu	0.0022	3	0.5	74-75	550	20	0.1	550	3
9	Fay Breşi	0.0055	3	0.75	49-50	500	20	0.15	500	3

3.2 Kaya Kütle Puanlama (RMR) Sistemi

RMR sistemi 1973 yılında Bieniawski tarafından geliştirilmiş ve 1989 yılında son halini almış bir kaya kütle sınıflama sistemidir. Sistemin temeli Güney Afrika ve Amerika Birleşik Devletleri bölgesinde bulunan 350'den fazla maden galerisi ve tünelde yapılan incelemelere dayanmaktadır. Kaya kütle değerlendirilmesinde kullanılan RMR değeri ilgili tabloda (Bieniawski 1989) yer alan parametreler kullanılarak 100 puan üzerinden hesaplanmaktadır. Bu parametreler, kaya malzemesi dayanımı, kaya kalite göstergesi (RQD), süreksizlik aralığı, süreksizlik koşulu ve yeraltı suyu olmak üzere beş tanedir.

Sistem önerdiği desteksiz durma süresi ve açıklık boyutunu içeren grafiklerle kazı-destek hesaplamalarının yapımını kolaylaştırmaktadır. RMR sistemi kullanılmaya başladığı günden günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından çeşitli değişikliğe uğramıştır. Bu değişiklikler, süreksizlik düzeltmesi, patlatma düzeltmesi, gerilme düzeltmesi, zayıflık düzeltmeleri (fay, dayk, kıvrım vb.), derinlik düzeltmesidir (Ulusay ve Sönmez 2007, Karakaplan ve diğ. 2016). RMR değerine göre destek sistemi seçim kılavuzu ile destek önerileri belirlenmektedir. Elde edilen veriler ışığında, Honaz Tüneli çevre kaya kütlelerinin RMR sistemine göre hesaplanan puanları ve önerilen destekleme elemanları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Hesaplanan RMR puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları

No	Kaya Birimi	RMR Puanı	Kaya Cıvatası Uzunluğu (m)	Kaya Cıvatası Aralığı (m)	Kaya Cıvatası (adet)	Püskürtme Beton (mm)	Çelik Kafes Tipi	Çelik Kafes Aralığı (m)	Taban Astar (mm)	Taban Bulon (m)	Çelik Hasır (mm)
1	Mikritik Kireçtaşı	40	5	1	27-28	150	Orta	1.5	150	Yok	6
2	Mikritik Kireçtaşı	35	5	1	27-28	150	Orta	1.5	150	Yok	6
3	Kristalize Kireçtaşı	44	4	1.5	17-18	100	Yok	Yok	100	Yok	6
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	30	5	1	27-28	150	Orta	1.5	150	Yok	6
5	Kalk – Kuvars Şist	24	5	1	27-28	150	Orta	1.5	150	Yok	6
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	27	5	1	27-28	150	Orta	1.5	150	Yok	6
7	Karbonat Çimentolu Çakıtaşı	17	6	1	38-39	200	Ağır	0.75	200	6	6
8	Yamaç Molozu	10	6	1	38-39	200	Ağır	0.75	200	6	6
9	Fay Breşi	13	6	1	38-39	200	Ağır	0.75	200	6	6

3.3 Kaya Kütle Kalitesi Puanlama (RMQR) Sistemi

Kaya Kütle Kalitesi Puanlama (RMQR) Sistemi, nicel ve güncel kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde kullanılan önemli parametreler de dikkate alınarak ve parametre tekrarından kaçınılarak, kaya kütlelerinin fiziksel durumunun daha iyi tanımlanması amacıyla Aydan ve diğ. (2014) tarafından geliştirilmiştir. Bu sınıflama sistemi, bozunma derecesi, süreksizlik takım sayısı, süreksizlik aralığı veya RQD, süreksizliklerin durumu, süreksizlik durumu, yeraltı suyu sızma durumu, yeraltı emme durumu olmak üzere, yedi girdi parametresi ile süreksizlik durumuna ait (açıklık, dolgu ve pürüzlülük gibi) alt parametrelerden oluşmaktadır. Ölçülen veya tanımlanan bu parametrelere verilen puanların toplamından kaya kütlelerine ait RMQR değeri 100 puan üzerinden hesaplanmaktadır.

Girdi parametrelerinden biri olan yeraltı suyu sızma koşulu ve su emme durumunu daha iyi hesaplayabilmek için araştırmacılar tarafından sunulan ek tablolar da kullanılmaktadır. RMQR değerine göre tüneller için önerilen destekleme türü ve miktarı, RMQR sistemi destek önerileri ve destek elemanları boyutları ile RMQR arasındaki ampirik ilişki tablolarından belirlenmektedir (Aydan ve diğ. 2015). Elde edilen veriler ışığında, RMQR sistemine göre hesaplanan puanlar ve önerilen destekleme elemanları Tablo 3.3'te verilmiştir (Karakaplan ve diğ. 2022).

Tablo 3.3: Hesaplanan RMQR puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları

No	Kaya Birimi	RMQR Puanı	Kaya Bulonu Lb (m)	Kaya Bulonu eb (m)	Kaya Bulonu Adet	Püskürtme Beton (mm)	Çelik Kafes Tipi	Çelik Kafes er (m)	Çelik Hasır	Beton Astar (mm)	Taban Astar (mm)	Taban Bulon (m)
1	Mikritik Kireçtaşı	42	5	1.5	17-18	150	Orta	1.2	Evet	300	300	-
2	Mikritik Kireçtaşı	32	6	1	37-38	200	Ağır	1	Evet	500	500	6
3	Kristalize Kireçtaşı	49	5	1.5	17-18	150	Orta	1.2	Evet	300	300	-
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	35	6	1	37-38	200	Ağır	1	Evet	500	500	6
5	Kalk – Kuvars Şist	22	6	1	37-38	200	Ağır	1	Evet	500	500	6
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	25	6	1	37-38	200	Ağır	1	Evet	500	500	6
7	Karbonat Çimentolu Çakıltası	17	7	0.5	74-75	250	Çok ağır	0.8	Evet	800	800	7
8	Yamaç Molozu	10	7	0.5	74-75	250	Çok ağır	0.8	Evet	800	800	7
9	Fay Breşi	14	7	0.5	74-75	250	Çok ağır	0.8	Evet	800	800	7

3.4 Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM)

NATM sistemi Rabcewicz (1964) tarafından geliştirilmiş bir tünel açma yöntemidir. Yöntem aynı zamanda içerisinde kaya kütle sınıflama sistemi barındırmaktadır. Bu sistem kaya kütlelerini A, B ve C olarak basitçe sınıflara ayırmakta kazı ve destekleme önerilerini bu sınıflamalara göre vermektedir. Sistemde yer alan kaya kütle sınıflaması birçok kez güncellenmiştir ve günümüzde Avusturya standardı olan ÖNORM B2203'e göre kullanılmaktadır. Güncel kaya kütle sınıfları ilgili tablolarda yer almaktadır (ÖNORM 1994, KTŞ 2013). NATM yöntemi kaya kütlelerini on sınıfa ayırmakta ve NATM ve ÖNORM B2203'e göre kaya sınıfları ve destek önerileri tablosundan destek miktarı belirlenmektedir.

NATM yöntemi diğer sınıflama sistemlerine göre daha sübjektif olduğundan, günümüzde RMR ve Q gibi kaya kütlelerini puanlayan sistemlerle birlikte kullanılarak tünel ve diğer yeraltı yapılarının projelendirmeleri yapılmaktadır (KTŞ 2013). Elde edilen veriler ışığında, Honaz Tüneli çevre kaya kütlelerinin NATM sistemine göre hesaplanan puanları ve önerilen destekleme elemanları Tablo 3.4'te verilmiştir (Karakaplan ve diğ. 2022).

Tablo 3.4: Hesaplanan NATM sınıfları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları

No	Kaya Birimi	NATM Sınıfı	Kaya Cıvatası Uzunluğu (m)	Kaya Cıvatası Aralığı (m)	Kaya Cıvatası (adet)	Püskürtme Beton (mm)	Çelik Kafes ar (m)	Çelik Kafes Aralığı (m)	Çelik Hasır (mm)	Taban Astar (mm)
1	Mikritik Kireçtaşı	B2	4-6	1.25	17-18	250	Hafif	250	6*3	250
2	Mikritik Kireçtaşı	B3	4	1.25	17-18	250	Hafif	250	6*3	250
3	Kristalize Kireçtaşı	B2	4-6	1.25	17-18	250	Hafif	250	6*3	250
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	B3	4	1.25	17-18	250	Hafif	250	6*3	250
5	Kalk – Kuvars Şist	C2	6-8	1	22-23	300	Orta	0.6	8*3	300
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	C2	6-8	1	22-23	300	Orta	0.6	8*3	300
7	Karbonat Çimentolu Çakıltaşı	C3	6-9	1	24-25	310	Ağır	0.6	8*3	310
8	Yamaç Molozu	C4	6-9	1	24-25	310	Ağır	0.6	8*3	310
9	Fay Breşi	C4	6-9	1	24-25	310	Ağır	0.6	8*3	310

3.5 Kaya Kütle İndeksi (RMi)

Çoğu mühendislik çalışmaları, değişik tanımlamalar, sınıflandırmalar ve tecrübelerden elde edilen bilgilerden yararlanılarak başarılmıştır. Hoek–Brown, Bieniawski ve daha pek çok yazar, kaya kütlelerinin dayanım karakterizasyonuna ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Kaya kütle indeksi sistemi (RMi), bu ihtiyacı karşılamak amacıyla geliştirilmiştir (Palmström 1995). Mühendislik çalışmalarında en önemli işlemlerden birisi de RMi’deki parametrelerin doğru bir şekilde kullanımıdır. RMi, diğer genel sınıflamalardan sayısal, üstel formüller içerdiği için daha farklı ve mühendislik jeolojisi uygulamalarında, tasarımların kullanılmasında yer almış bir sistemdir. RMi puanının hesaplamasında, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), eklem pürüzlülük faktörü (jR), eklem alterasyon faktörü (jA), eklem boyut faktörü (jL), eklem aralığı ya da eklem yoğunluğu olmak üzere beş ana parametre kullanılmaktadır.

Hesaplanan puana bağlı olarak kaya kütlelerinin sınıflandırılması yapılmakta ve RMi sisteminin sürekli zeminler ile bloklu (zayıf) zeminler için önerdiği destekleme tür ve miktarları (Palmström 1995) grafikleri kullanılarak destek sistemi önerisi belirlenmektedir. Elde edilen veriler ışığında, RMi sistemine göre hesaplanan puanlar ve önerilen destekleme elemanları Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5: Hesaplanan RMi puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları

No	Kaya Birimi	RMi Puanı	Kaya Cıvatası Uzunluğu (m)	Kaya Cıvatası Aralığı (m)	Kaya Cıvatası (adet)	Püskürtme Beton (mm)	Çelik Riba Çapı (mm)	Çelik Riba Aralığı (m)	Çelik Hasır (mm)	Beton Astar (mm)	Taban Astar (mm)
1	Mikritik Kireçtaşı	0.286855	3	1.25	21-22	100	Yok	Yok	6	Yok	100
2	Mikritik Kireçtaşı	0.051981	3	1	27-28	200	Yok	Yok	6	Yok	200
3	Kristalize Kireçtaşı	0.89687	3	1.25	21-22	100	Yok	Yok	6	Yok	100
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	0.141006	3	1.25	21-22	150	Yok	Yok	6	Yok	150
5	Kalk – Kuvars Şist	0.024813	3	1	27-28	250	Yok	Yok	6	Yok	250
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	0.002909	3	0.5	52-53	250	10	0.6	6	100	100
7	Karbonat Çimentolu Çakıltaşı	0.010214	3	0.5	52-53	300	10	0.6	6	200	200
8	Yamaç Molozu	0.000202	3	0.5	52-53	300	10	0.6	6	200	200
9	Fay Breşi	0.000341	3	0.5	52-53	300	10	0.6	6	200	200

3.6 Kaya Yapısı Puanlama (RSR) Sistemi

Wickham ve diğ. (1972), bir kaya kütesinin kalitesini tanımlamak ve RSR sınıflandırmalarına dayanarak uygun desteği seçmek için nicel bir yöntemi tanımlamıştır. Bu sistemin geliştirilmesinde kullanılan verilerin çoğu, çelik setlerle desteklenen nispeten küçük tüneller içindir. Ancak tarihsel olarak bu sistem püskürtme beton desteğine referans veren ilk sistem olduğundan tanınan sistemler içerisinde yer almaktadır. Yarı-nicel bir kaya kütle sınıflandırma sisteminin geliştirilme özelliği gösteren RSR sistemi biraz ayrıntılı inceleme ile kapsamlı çözümler sunabilmektedir. Sistem parametre hesabında, kayaç tipi ve jeolojik yapı (A), süreksizlik durumu (B) ve su geliri (C) olmak üzere üç tane tablodan elde edilen puanlar kullanılmaktadır. RSR sisteminin önerdiği destek türleri ve uygulama miktarlarını içeren grafikler destek sistemi belirlenmektedir. Elde edilen veriler ışığında, RSR sistemine göre hesaplanan puanlar ve önerilen destekleme elemanları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Hesaplanan RSR puanları ile önerilen destekleme elemanı tür ve miktarları

No	Kaya Birimi	RSR Puanı	Kaya Cıvatası Uzunluğu (m)	Kaya Cıvatası Aralığı (m)	Kaya Cıvatası (adet)	Püskürtme Beton (mm)	Çelik Kafes Tipi	Çelik Kafes Aralığı (m)	Taban Astar (mm)
1	Mikritik Kireçtaşı	48	3	1	26-27	90	Ağır	0.6	90
2	Mikritik Kireçtaşı	45	3	0.75	35-36	100	Ağır	0.6	100
3	Kristalize Kireçtaşı	58	3	1	26-27	70	Orta	0.6	70
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	43	3	0.75	35-36	110	Ağır	0.6	110
5	Kalk – Kuvars Şist	36	3	0.6	44-45	150	Ağır	0.6	150
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	38	3	0.5	52-53	150	Ağır	0.6	150
7	Karbonat Çimentolu Çakıltaşı	27	3	0.5	52-53	200	Ağır	0.6	200
8	Yamaç Molozu	20	3	0.5	52-53	300	Ağır	0.6	300
9	Fay Breşi	22	3	0.5	52-53	300	Ağır	0.6	300

3.7 Kaya kalite göstergesi (RQD)

RQD değeri kaya kütesi tanımlamalarında yaygın kullanılan bir girdi olup, Deere (1964) tarafından geliştirilmiştir. RQD, sondajda boyu 10 cm'den fazla olan sağlam karotların toplam uzunluğunun, sondaj kademe ilerlemesine oranı olarak

tanımlanmıştır. Kaya kalitesini beş sınıfa ayırarak RQD tanımı yapılmaktadır. Elde edilen veriler ışığında, Honaz Tüneli çevre kaya kütlelerinin RQD sistemine göre hesaplanan puanları Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7: Hesaplanan RQD puanları

No	Kaya Kütle Türü	RQD Puanı
1	Mikritik Kireçtaşı	10
2	Mikritik Kireçtaşı	12
3	Kristalize Kireçtaşı	18
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	10
5	Kalk – Kuvars Şist	6
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	5
7	Karbonat Çimentolu Çakıltası	3
8	Yamaç Molozu	1
9	Fay Breşi	1

3.8 Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Hoek (1995) ve Hoek ve diğ. (1995) tarafından önerilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), farklı durumdaki jeolojik koşullar için kaya kütle dayanımındaki azalmayı kestiren bir sistem sağlamaktadır. GSI puanını kullanarak Hoek–Brown malzeme modeli (kaya dayanım karakteristiği) parametreleri olan m_b , s , a değerleri hesaplanabilmektedir. Kaya kütle ile ilgili yapılan sayısal analizlerde kullanılan bu parametreler, GSI puanının önemini yüksek olduğunu göstermektedir. Jeolojik dayanım indeksi kestirimi için kullanılan grafik ile GSI puanı belirlenmektedir. Elde edilen veriler ışığında, GSI sistemine göre hesaplanan puanlar Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8: Hesaplanan GSI puanları

No	Kaya Kütle Türü	GSI Puanı
1	Mikritik Kireçtaşı	35
2	Mikritik Kireçtaşı	30
3	Kristalize Kireçtaşı	39
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	25
5	Kalk – Kuvars Şist	23
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	22
7	Karbonat Çimentolu Çakıltası	16
8	Yamaç Molozu	8
9	Fay Breşi	11

3.9 Yerel Zemin Sınıfı

Yerel zemin türleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre ZA, ZB, ZC, ZD, ZE ve ZF grubu zemin olmak üzere altı sınıfa ayrılmıştır (TBDY 2018). ZA grubu en sağlam zemini, ZF grubu ise en zayıf zemini göstermektedir. Elde edilen veriler ışığında, Honaz Tüneli çevre kaya kütlelerinin yerel zemin türleri Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9: Hesaplanan yerel zemin türleri

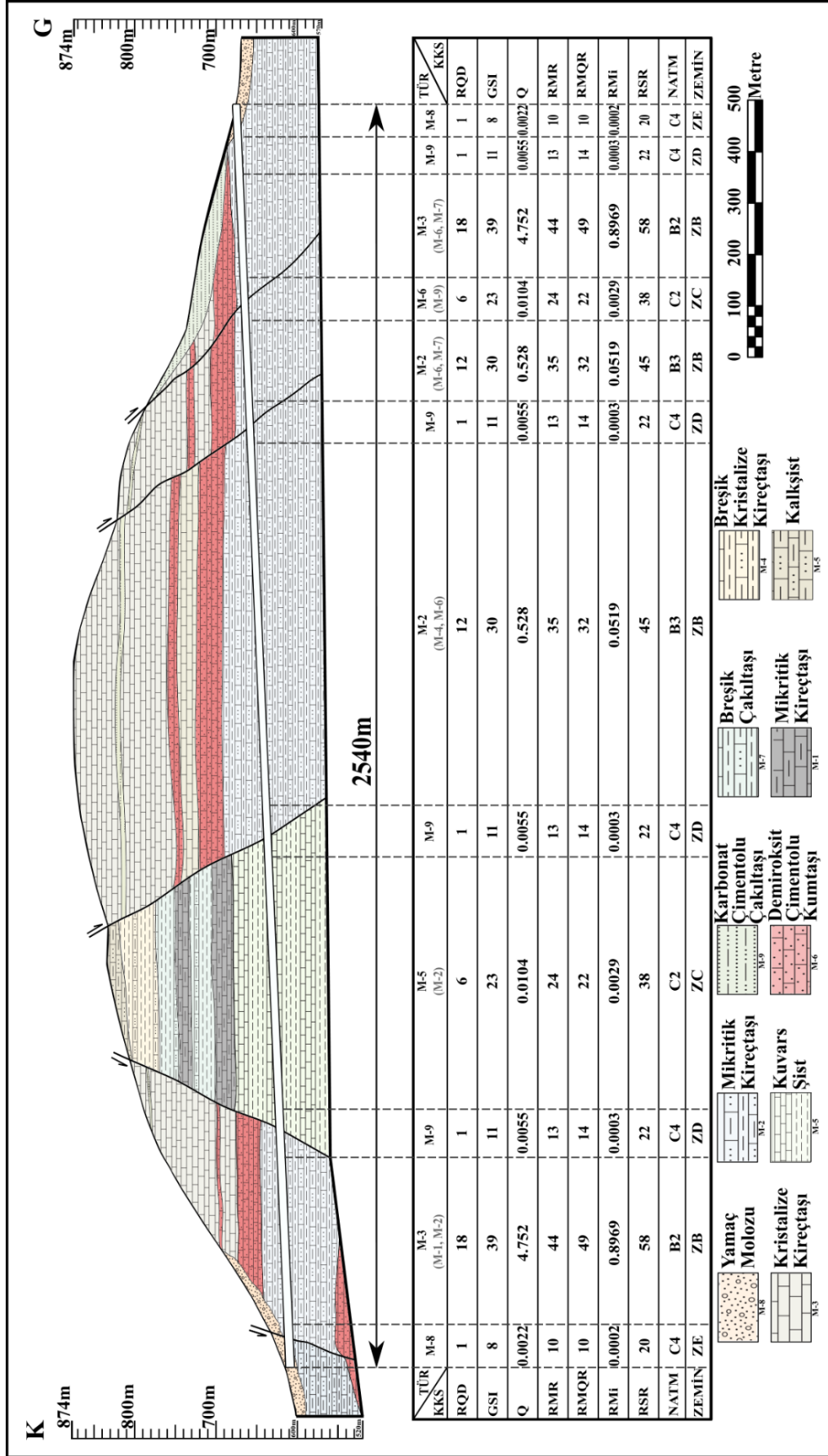
No	Kaya Kütle Türü	Zemin Sınıfı
1	Mikritik Kireçtaşı	ZB
2	Mikritik Kireçtaşı	ZB
3	Kristalize Kireçtaşı	ZB
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	ZC
5	Kalk – Kuvars Şist	ZC
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	ZC
7	Karbonat Çimentolu Çakıltası	ZD
8	Yamaç Molozu	ZE
9	Fay Breşi	ZD

3.10 Kaya Kütle Sınıflama Sistemlerinin Hesaplamaları

Yapılan çalışmalar neticesinde kaya kütle sınıflama sistemlerine ait hesaplama sonuçlarının tümü Tablo 3.10'te verilmiştir. Hesaplanan kaya kütle sınıflama puanlarının tünel jeolojik kesiti üzerindeki gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.10: Hesaplanan kaya kütle sınıflama sistemleri puanları ve zemin sınıfları

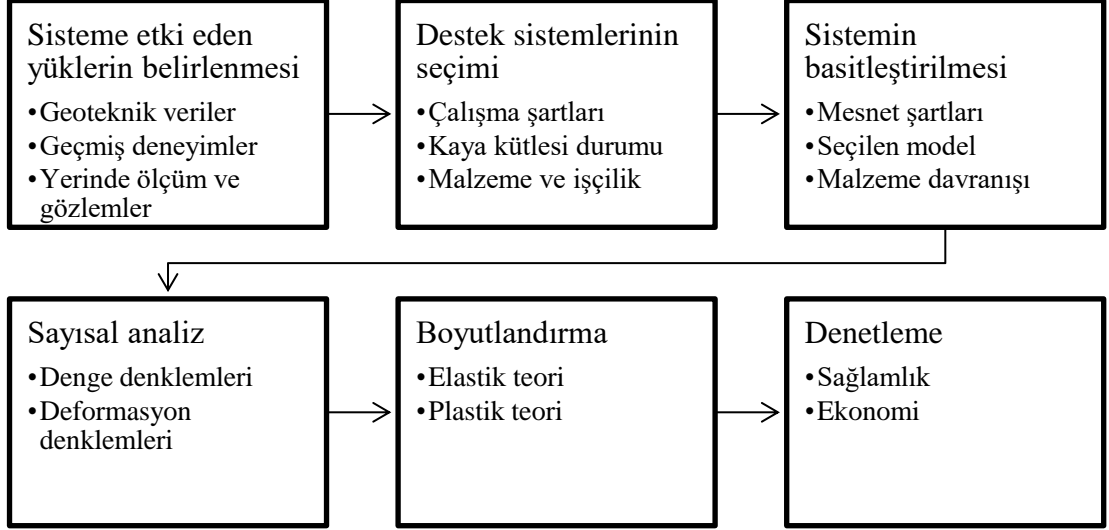
No	Kaya Kütle Türü	RMR	Q	GSI	RQD	RMQR	RMi	RSR	NATM	Zemin
1	Mikritik Kireçtaşı	40	1.32	35	10	42	0.286855	48	B2	ZB
2	Mikritik Kireçtaşı	35	0.528	30	12	32	0.051981	45	B3	ZB
3	Kristalize Kireçtaşı	44	4.752	39	18	49	0.89687	58	B2	ZB
4	Breşik Kristalize Kireçtaşı	30	0.176	25	10	35	0.141006	43	B3	ZC
5	Kalk – Kuvars Şist	24	0.010417	23	6	22	0.024813	36	C2	ZC
6	Demir Oksit Çimentolu Kumtaşı	27	0.020833	22	5	25	0.002909	38	C2	ZC
7	Karbonat Çimentolu Çakıltası	17	0.007333	16	3	17	0.010214	27	C3	ZD
8	Yamaç Molozu	10	0.0022	8	1	10	0.000202	20	C4	ZE
9	Fay Breşi	13	0.0055	11	1	14	0.000341	22	C4	ZD



Şekil 3.1: Tünel jeolojik kesiti üzerinde kaya kütle sınıflama puanlarının gösterimi

3.11 Kaya Kütlesinin Desteklenmesi

Destek sisteminin boyutlandırılmasında sisteme etki eden yüklerin emniyetli bir şekilde taşınması ve minimum malzeme tüketimi olması mühendislik çözümleri için göz önünde bulundurulması gereken iki öncelikli durumdur. Bu kapsamda destek sistemi boyutlandırılmasında aşağıdaki Şekil 3.2’de verilen genel aşamalar izlenir.



Şekil 3.2: Destek sisteminin boyutlandırılmasında izlenen genel aşamalar

Kaya kütlelerinde açılan açıklıklar için öncelikli hedef oluşturulan boşluğun üzerindeki kütleyi yan duvarlara taşıtmaktır. Bu durum gerçekleştirilemiyorsa tavan bloğundan gelen yükün emniyetli bir şekilde taban bloğuna aktarılması sağlanmalıdır. Bu açıdan destekleme elemanlarını iki gruba ayırmak doğru olacaktır. İlki kaya kütlesini güçlendirerek destekleme sağlayan, ikincisi ise kaya kütlesi yükünü üstlenerek destekleme sağlayandır.

Uzun yıllar boyunca açık kalacak ve yapımından sonra farklı gerilmelere maruz kalabilecek mühendislik yapıları için seçilen yöntem her iki türdeki destek elemanlarının kullanılmasından geçmektedir. Karayolu tünellerinde de bu iki türde destekleme elemanları kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Honaz Tüneli’nde kullanılan destekleme elemanlarının detayları bir sonraki başlıkta verilmiştir.

3.11.1 Kaya Kütlesi Destekleme Elemanları

Honaz tüneli kazı ve destekleme işleri tez çalışması boyunca izlenip destek sistemi ile ilgili de detaylı veriler elde edilmiştir. Tünel çalışmalarında kullanılan destek elemanları, çelik iksa, kafes profil, kaya bulonu (kaya civatası), çelik hasır, püskürtme beton, süren ve kaplama betonundan oluşmaktadır. Şekil 3.3'te tünel aynası ile kazı öncesi (süren) ve sonrası (Çelik iksa, Kafes profil ve püskürtme beton) uygulanan destekleme elemanları verilmiştir.



Şekil 3.3: Honaz Tüneli kazı sonrası uygulanan destekleme elemanları

3.11.1.1 elik İksa

Tünelde IPE elik profil 15.8 kg/m (I 160) ve IPE elik profil 22.4 kg/m (I 200) olmak üzere iki tür elik iksa (kafes, riba) destek elemanları kullanılmıştır (şekil 3.4).



şekil 3.4: Honaz Tüneli'nde kullanılan elik iksa destek elemanları

3.11.1.2 Kafes Profil

Tünelde 32 mm çapa sahip üç nervürlü demirden oluşturulan kafes profil destek elemanları kullanılmıştır (şekil 3.5).



şekil 3.5: Honaz Tüneli'nde kullanılan kafes profil destek elemanları

3.11.1.3 Kaya Bulonu

Tünelde 28 mm nervürlü çelik kaya cıvatası (PG) ve 32 mm delici uçlu çelik kaya cıvatası (IBO) bulon olmak üzere iki tür kaya bulonu (cıvatası) destek elemanları kullanılmıştır (Şekil 3.6, Şekil 3.7).



Şekil 3.6: Honaz Tüneli'nde kullanılan kaya bulonu destek elemanları



Şekil 3.7: Tünelde bölgesinde yerleştirilen kaya bulonları

3.11.1.4 Çelik Hasır

Tünelde 7.59 kg/m^2 (Q589/378) ve 3.48 kg/m^2 (Q221/221) kare çelik hasır olmak üzere iki tür çelik hasır destek elemanları kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Honaz Tüneli'nde kullanılan çelik hasır destek elemanları

3.11.1.5 Püskürtme Beton

Tünelde C20/C25 dayanıma sahip püskürtme beton malzemesi destek elemanı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Tünel bölgesine püskürtme beton uygulaması

3.11.1.6 Süren

Tünelde 3.5” çapa sahip 9 m uzunluğunda süren boruları ile şemsiye sistemi destekleme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Honaz Tüneli’nde kullanılan süren destek elemanları

3.11.1.7 Kaplama Betonu

Tünel kazı çevresine destekleme elemanları uygulanıp, keçe ve membran yerleştirildikten sonra kalıp sistemi ile C25/C30 nihai kaplama beton uygulaması yapılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Honaz Tüneli kaplama beton uygulaması

3.12 Kaya Kütle Özelliklerinin Tahmini

Q, RMR, RMQR, RMi, RSR, NATM sistemleri kaya kütlelerini sınıflandırarak araştırmacılara ön fikir vermektedir. Bu ön fikir proje hazırlaması için yeterli değildir. Araştırmacılar kaya kütleleri hakkında daha detaylı bilgi elde etmek için kaya malzemesi üzerinde laboratuvar deneyleri ve arazi ölçümleri yaparak, elastisite (deformasyon) modülü, tek eksenli basınç dayanımı, kohezyon, poisson oranı, vs. değerleri hesaplamaya ihtiyaç duymaktadır (Tablo 2.6).

Bu deneyleri yapmak her zaman mümkün olmadığından, birçok araştırmacı tarafından ihtiyaç duyulan bu değerler için tahmini denklemler (Hoek ve diğ. 1995, Hoek ve Brown 1997, Hoek ve diğ. 2002, Barton 2002, Aydan ve diğ. 1997, Aydan ve Dalgıç 1998, Hoek ve Diederichs 2006, Carranza-Torres ve Fairhurst 2000) önerilmiştir. Bu denklemlerle ilgili çok sayıda yapılmış kolerasyon çalışmasına ulaşmak mümkündür (Palmström ve Singh 2001, Kayabaşı ve diğ. 2003, Gokçeoğlu ve diğ. 2003, Shen ve diğ. 2012). Bu denklemler sayesinde Q, RMR, RMQR vb. puanlarından yararlanılarak kaya malzemesine ait elastisite modülü, tek eksenli basınç dayanımı gibi değerleri tahmin etmek mümkündür. Tahmin edilen kaya kütle özellikleri, proje hazırlanmasında kullanılan sayısal modelleme için önemli olan girdi parametrelerini oluşturmaktadır. Tablo 3.11’de yer alan denklemler kullanılarak kaya kütlelerine ait ortalama deformasyon modülü değerleri hesaplanmıştır. Arazi yüklerinin belirlenmesinde birçok bilinmeyen doğal etmenin varlığı analitik model hesaplamasını güçleştirmektedir. Bu nedenle arazi yüklerinin hesaplanmasında ampirik tabanlı denklemler kullanılmaktadır. Denklem (3.2) Mindlin, (1939) ve denklem (3.4) Kastner (1949) ile yeraltındaki düşey ve yatay gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Ayrıca kaya kütle özellikleri ve sayısal modelleme çıktıları (deformasyon, gerilme, plastik bölge vs.) kullanılarak, çeşitli denklemler yardımıyla (Serafim ve Pereira 1983, Ünal 1983), gerekli destek basıncı hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_1 = \gamma * H \quad (3.2)$$

$$\sigma_{3,z} = k * \sigma_1 \quad (3.3)$$

$$k = \frac{\vartheta}{1-\vartheta} \quad (3.4)$$

Tablo 3.11: Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen kaya kütesine ait deformasyon modülü denklemleri

Deformasyon Modülü (E_m) Denklemleri	Birim	Öneren	Yıl	No
$E_m = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}$	GPa	Serafim and Pereira	1983	(3.5)
$E_m = e^{(4.407+0.081 \cdot RMR)}$	MPa	Jašarević ve Kovačević	1996	(3.6)
$E_m = 0.0097 * RMR^{3.54}$	MPa	Aydan ve diğ.	1997	(3.7)
$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) * \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$ ($\sigma_{ci} < 100$ MPa için)	MPa	Hoek ve diğ.	2002	(3.8)
$E_m = 100 \frac{(1-0.5D)}{1+e^{\left(\frac{75+25D-GSI}{11}\right)}}$	GPa	Hoek ve Diederichs	2006	(3.9)
$E_m = 0.135 \left[\frac{E_i \left(1 + \frac{RQD}{100}\right)}{WD} \right]^{1.1811}$	MPa	Kayabaşı ve diğ.	2003	(3.10)
$E_m = 5,6 * RMi^{0,375}$ ($RMi > 0,1$ için)	GPa	Palmström	1995	(3.11)
$E_m = 0.1 * \left(\frac{RMR}{10}\right)^3$	GPa	Mitri ve diğ.	1994	(3.12)
$E_m = 5 \sqrt{Q'}$	GPa	Diederichs ve Kaiser	1999	(3.13)
$E_m = 10 Q^{\frac{1}{3}}$	GPa	Barton	1995	(3.14)
$E_m = 10 \left(Q \frac{\sigma_{ci}}{100}\right)^{\frac{1}{3}}$	GPa	Barton	2002	(3.15)
$E_m = 0.876 * RMR + 1.056(RMR - 50) + 0.015(RMR - 50)^2$	GPa	Galera ve diğ.	2005	(3.16)
$\frac{E_m}{E_i} = \frac{RMQR}{RMQR+6*(100-RMQR)}$		Aydan ve diğ.	2014	(3.17)
$\frac{E_m}{E_i} = 0.009e^{RMR/22.82} + 0.000028 * RMR^2$		Nicholson ve Bieniawski	1990	(3.18)
$\frac{E_m}{E_i} = \frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$		Aydan ve Kawamoto	2000	(3.19)
$\frac{E_m}{E_i} = e^{(RMR-100)/36}$		Galera ve diğ.	2005	(3.20)
$\frac{E_m}{E_i} = \frac{(1-0.5D)}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}}$		Hoek ve Diederichs	2006	(3.21)

Bu değerlerin tahmini, proje yapım aşamasında olumsuz durumlarla karşılaşmayı önlemenin yanında, optimum destek miktarının belirlenip yapı güvenliğinin artırılıp masrafların da azalmasını sağlamaktadır.

4. YÖNTEM

Mühendislik tasarım yöntemleri ampirik (görgül), analitik ve sayısal olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Bu yöntemlerin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Geoteknik açıdan yeraltı mühendislik yapılarının tasarımı oldukça güçtür. Yeraltının çok fazla bilinmezlik içermesinden dolayı tasarımlarda üç yaklaşımdan da faydalanmak önemlidir. Bu çalışmada kaya malzemesi ve kaya kütlelerinin özelliklerinin elde edilmesinde ampirik ve analitik yöntemlerden yararlanılmış, yeraltı mühendislik yapısı için gerçeğe yakın ortam koşullarının oluşturularak modellenmesinde sayısal analizlerden faydalanılmıştır.

4.1 Sayısal Analizler

Sonlu elemanlar, sonlu farklar, sınır eleman, ayrık eleman gibi farklı şekillerde analiz yapılabilen bu yöntemlerde; ilk olarak bir model oluşturulup bu model farklı geometri ve yükleme koşullarında analiz edilmektedir. Sistemler gerilme kontrollü ve birim deformasyon kontrollü olarak çözüm sunmaktadır. Sayısal yöntemler diğer yöntemlere oranla daha az maliyete ihtiyaç duymakta ve birçok farklı alanda kullanılması sayesinde kısa süre içerisinde hızlıca gelişerek yaygınlaşmaktadır.

Büyük projeler olarak tasarlanan yeraltı ve yerüstü yapıları, modellemeler oluşturulduktan sonra tasarlanıp yapılır. Modellemeler çalışma bölgesinin emniyeti ve optimizasyonu için vazgeçilmez bir ön araştırma aracıdır. Analitik modellemelerin çözümünde genellikle, diferansiyel ya da integral denklem takımı kullanılır ve çalışma alanı belirli sınırlamalar içerir. Kaya kütleleri heterojen ve sürekli olmayan bir ortam olduğundan analitik çözümler yerine sayısal yaklaşımlar kullanılarak gerçeğe daha yakın sonuçlarla çözülebilir. Sayısal analizler için kullanılan denklem miktarı çok fazla olduğundan kolaylıkla yapılabilmesi için günümüzde bilgisayar yazılımlarından faydalanılmaktadır.

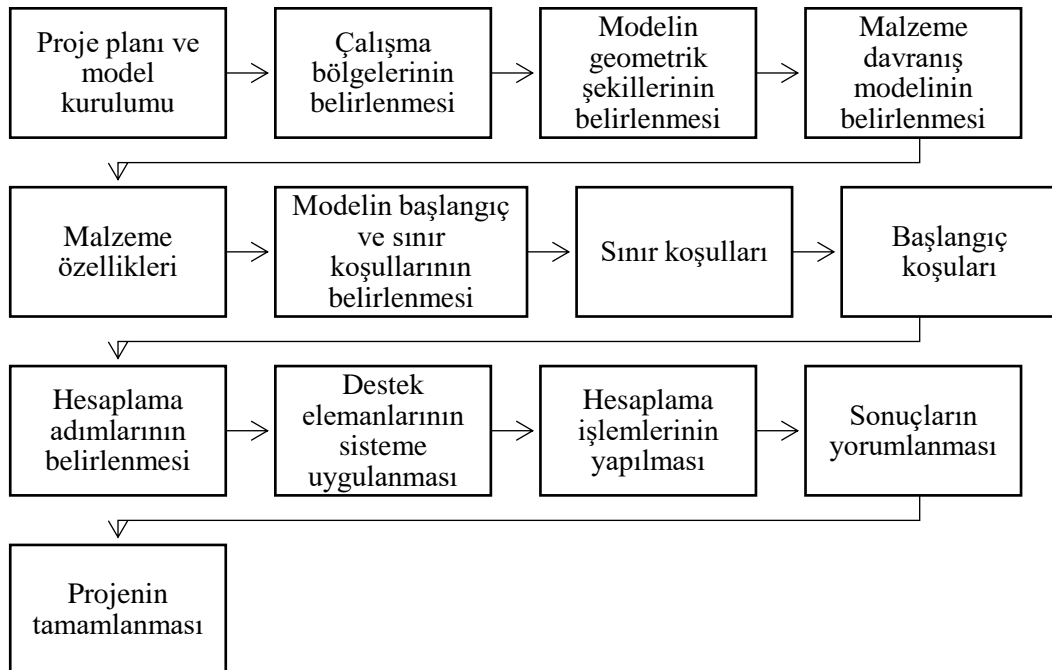
Sayısal analizlerin yapılması için kaya ve zemin malzeme modellerini kütüphanesinde barındıran, inşaat ve maden uygulamalarında kullanılan destekleme

elemanlarını içeren ve aynı zamanda dinamik analizler yapan yazılımlar incelenmiştir. Geoteknik alanında yaygın kullanım örnekleri olan sonlu elemanlar tabanlı analiz yapan yazılımlardan, RS2 ve RS3 (Akademik) yazılımı bu doktora çalışması için seçilmiştir. Aynı zamanda bu yazılımların girdi parametrelerinin hesaplandığı RocData ve RSData yazılımlarından faydalanılmıştır.

RS2 ve RS3 yazılımlarında kaya kütlelerinin temsili için ihtiyaç duyulan malzeme özellikleri aşağıdaki Şekil 4.1’de sayısal analizlerde izlenen yol ise Şekil 4.2’de verilmiştir.

Başlangıç koşulları	Sertlik	Dayanıklılık	Hidrolik özellikler	Veri bağımlılığı
<ul style="list-style-type: none"> • İlk element yüklemesi • Birim hacim ağırlık 	<ul style="list-style-type: none"> • Poisson oranı • Deformasyon modülü 	<ul style="list-style-type: none"> • Mohr-Coulomb <ul style="list-style-type: none"> • Çekme dayanımı • Sürtünme açısı • Kohezyon • Dilatasyon açısı • Hoek-Brown <ul style="list-style-type: none"> • Tek eksenli basınç dayanımı • mb parametreleri • s parametreleri • Dilatasyon parametresi 	<ul style="list-style-type: none"> • Drenaj durumu • Gözeneklilik 	<ul style="list-style-type: none"> • Kohezyon • Sürtünme açısı • Deformasyon modülü

Şekil 4.1: Sayısal analizlerde kullanılan malzeme parametreleri



Şekil 4.2: Sayısal analizlerde izlenen yol

4.2 Sayısal Analizlerin Teorik Altyapısı

RS2 ve RS3 (Rock&Soil) yazılımları Rocscience firması tarafından sunulan kaya ve zemin modellemesi yapan sonlu elemanlar temelli geoteknik yazılımlarıdır. Bu yazılımların arka planda çözdüğü denklemler gerilme ve deformasyon sonuçlarını vermektedir (Rocscience, 2020^{a,b}). RS2 yazılımı ile yapılan analizlerde Gauss eliminasyon yöntemi tercih edilmiştir. Yazılım içerisinde üç çözüm yöntemi sunmaktadır. Bunlar; Gauss eliminasyon yöntemi, eşlenik gradyan yineleme ve ön eşlenik gradyan yineleme yöntemleridir. Sistem, tüm malzemelerin elastik durumda olduğu problemlerin çözümlerinde eşlenik gradyan yineleme modelinin kullanılmasını, içerisinde plastik özellik gösteren malzeme bulunan problemlerde Gauss eliminasyon yönteminin kullanılmasını önermektedir.

4.2.1 Gauss Eliminasyon Yöntemi

Lineer denklem sistemlerinin çözümünde kullanılan en yaygın tekniklerden birisi Gauss Eliminasyon yöntemidir. Bu yaklaşım genel bir “n” sayıdaki bilinmeyen içeren “n” sayıdaki denklem setini çözmek için tasarlanmıştır (Kaw ve Kalu, 2010).

$$\begin{array}{rcccccc} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n & = & b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n & = & b_2 \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n & = & b_n \end{array} \quad (4.1)$$

Gauss Eliminasyon yöntemi iki aşamadan oluşur;

1. Bilinmeyenlerin İleriye Doğru Elenmesi: Bu aşamada, ilk denklemden başlayarak her denklemde bilinmeyenler elenir. Bu şekilde, en son denklemde bir bilinmeyen kalana kadar işleme devam edilir.
2. Geriye Doğru Yerine Koyma: Bu aşamada, en son denklemden başlayarak bilinmeyenlerin her biri tek tek bulunur.

4.2.2 Kullanılan Modeller

RS2 ve RS3 yazılımlarının malzeme model kütüphanesi çok geniştir. Tez çalışmasında bu kütüphanede bulunan ve kaya kütlesi için yaygın olarak tercih edilen Hoek–Brown, Genelleştirilmiş Hoek–Brown ve Mohr–Coulomb Malzeme Modeli kullanılmıştır. Bunlarla birlikte modellemelerde, kaya cıvatası modeli ve dinamik analiz modeli de kullanılmıştır (Rocscience, 2020^{a,b}).

4.2.2.1 Hoek-Brown ve Genelleştirilmiş Hoek-Brown Malzeme Modeli

Hoek–Brown malzeme modeli (yenilme kriteri), kaya kütleleri için kullanılan en yaygın modeldir. Hoek ve Brown (1980^{a,b}), sağlam kayadaki yeraltı kazılarının tasarımında kullanılmak üzere bu malzeme modelini önermişlerdir. Bu model, Hoek (1968) tarafından sağlam kayanın gevrek yenilme araştırma sonuçlarından ve Brown (1970) tarafından eklemli kaya kütlesi davranışına ilişkin model çalışmalarından elde edilmiştir. Model, sağlam kayanın özelliklerinden başlar ve daha sonra kaya kütlesindeki eklemelerin özelliklerine dayalı indirgeme faktörleri uygulanarak kaya kütlesi davranışına uyacak şekilde değiştirilir. Hoek–Brown malzeme modeli asal gerilmeler cinsinden şu şekilde ifade edilebilir.

$$F_s = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} = 0 \quad (4.2)$$

Burada ‘ σ_{ci} ’, bozulmamış malzemenin tek eksenli basınç dayanımı, ‘ m ’, bozulmamış kaya parametresi m_i ’nin indirgenmiş değeridir ve ‘ s ’, bozulmamış kaya için maksimum ‘1.0’ değerine sahip olabilen bir malzeme sabitidir.

Hoek–Brown modeliyle modellenen bir malzemenin mekanik davranışı, aşağıdaki gibi özellikleri içerir,

- Kohezyon–sürtünme özelliğine sahip izotropik kesme mukavemeti ve gerilme/kapanma seviyesi ile doğrusal olmayan bir şekilde artar.
- Çekme mukavemeti
- Dilatasyon veya kritik durumda yenilme
- Lode (denklem 4.3) açısına göre kesme dayanımının bağımlılığı

$$L = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4.3)$$

Bu model, kaya malzemesi ve kaya kütlelerinde geoteknik/madencilik problemlerinin stabilitesinin değerlendirilmesi için çok uygundur. Bu model Mohr–Coulomb modeline kıyasla, doğrusal olmayan ve daha gerçekçi olan kesme dayanımının stres düzeyine bağımlılığı nedeniyle geniş bir gerilim/kapalılık aralığına sahip problemleri içerir. Kaya malzemesi ve kaya kütlelerini içeren modellemelerde yük – deplasman hesaplamaları için de başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Genelleştirilmiş Hoek–Brown malzeme modeli (Şekil 4.3), ‘0.5’ güc teriminin yerini alan ek bir ‘a’ parametresine sahiptir (Hoek ve diğ., 2002).

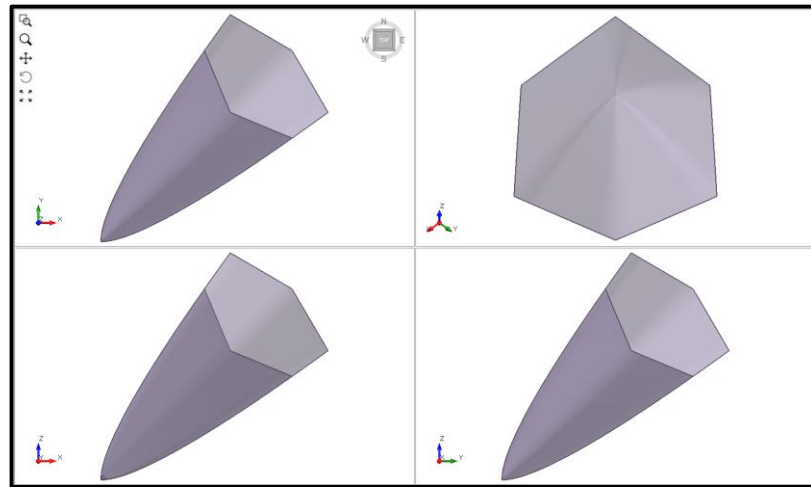
$$F_s = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(m \frac{-\sigma_1}{\sigma_{ci}} + s \right)^a = 0 \quad (4.4)$$

Hoek–Brown parametrelerini hesaplamada kaya kütlelerinin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerinden faydalanılır. ‘D’ değeri kaya kütlelerinin bozulma değeridir, bozulmamış kayada ‘0’, çok bozulmuş kayada ‘1’ alınır.

$$m = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (4.5)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (4.6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \quad (4.7)$$



Şekil 4.3: Üç boyutlu gerilme uzayında Genelleştirilmiş Hoek–Brown modelinin yenilme yüzeyi (Rocscience 2021)

4.2.2.2 Mohr–Coulomb Malzeme Modeli

Mohr–Coulomb malzeme modeli (yenilme kriteri), kaya kütlesi ve zemin için en yaygın kullanılan malzeme modelidir. Bu modelin özellikleri tipik olarak, bir düzlemdaki kesme mukavemeti ile ona etki eden normal gerilme arasındaki doğrusal bir ilişki olduğunu varsayan Coulomb hipotezini içerir (Owen ve Hinton, 1980).

$$\tau = c - \sigma_n \tan \varphi \quad (4.8)$$

Burada ‘ τ ’ kesme mukavemeti, ‘ σ_n ’ normal gerilme, ‘ φ ’ içsel sürtünme açısı, ‘ c ’ ise kohezyondur.

Mohr–Coulomb modeliyle modellenen bir malzemenin mekanik davranışı aşağıdaki gibi özellikleri içerir,

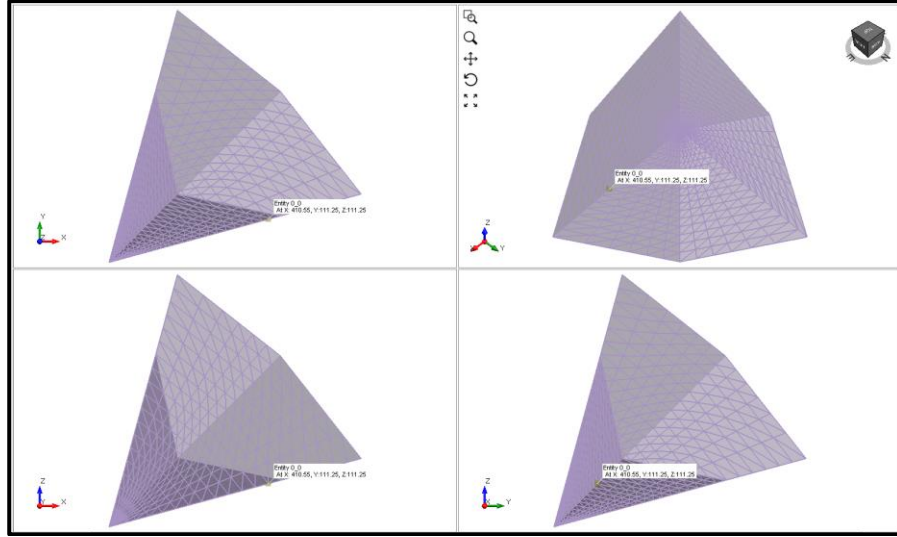
- Kohezyon – sürtünme özelliğine sahip izotropik kesme mukavemeti ve gerilme/tutulma düzeyi ile lineer olarak artar.
- Çekme mukavemeti (bir gerilim kesme akma fonksiyonu kullanarak).
- Yenilme durumunda genişleme (hacim artışı) veya kritik durum (sabit hacim).
- Lode açısına kesme mukavemeti bağımlılığı (çoğu zemin türü için gözlenir).

Bu model, geniş gerilme/kapanma aralıklarını içermeyen geoteknik/madencilik problemlerin stabilitesinin değerlendirilmesi için çok uygundur. Çakıl, kum gibi zemin malzemesi ile kaya malzemesi ve kaya kütlesi içeren modellemelerde yük – deplasman hesaplamaları için de başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Coulomb kriterinin gerilme durumunun Mohr çemberi gösterimi ile birleştirilmesi ve kabul edilebilir durumlar göz önüne alındığında Mohr–Coulomb malzeme modeli asal gerilmeler cinsinden şu şekilde ifade edilebilir.

$$F_s = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - \cos \varphi = 0 \quad (4.9)$$

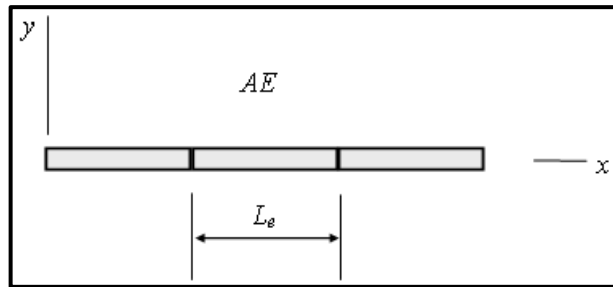
Üç boyutlu gerilme uzayında Mohr–Coulomb malzeme modeli Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4: Üç boyutlu gerilme uzayında Mohr–Coulomb modelinin yenilme yüzeyi (Rocscience 2021)

4.2.2.3 Kaya Cıvatası Modeli

Kaya cıvatası modelleri, sonlu elemanlar metodu (Goodman ve diğ., 1968), sınır elemanlar metodu (Crotty ve Wardle, 1985) ve blok metotları (Cundall, 1971) gibi çeşitli sayısal yöntemlerde uygulanmıştır. Cıvatalar ağdaki elemanlardan geçer ve bir veya bir dizi tek boyutlu eleman tarafından modellenir (Şekil 4.5).

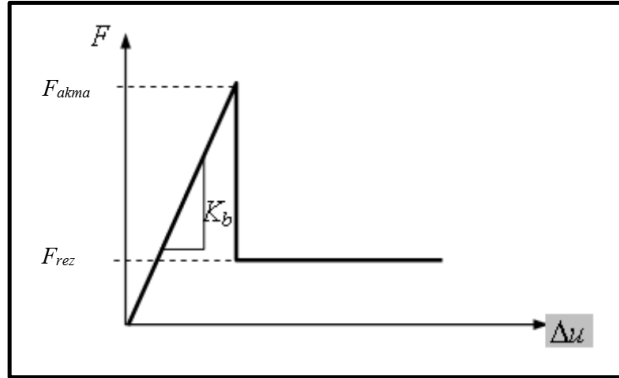


Şekil 4.5: Dolgulu kaya cıvatası modeli (Rocscience 2021)

Cıvataların sonlu elemanlar ağını geçtiği yere göre cıvata elemanlarına bölünür. Bu cıvata elemanları birbirinden bağımsız olarak hareket eder. Cıvata boyunca aksenal kuvvet, cıvata elemanının uzamasından belirlenir. Bir cıvata elemanının L_e uzunluğu Δu_e ile artırılırsa, cıvata indüklenen kuvvet şu şekilde verilir:

$$F_e = \frac{AE}{L_e} \Delta u_e \quad (4.10)$$

Eksenel kuvvet, cıvata malzemesinin yenilme (akma) dayanımını (F_{akma}) aşarsa, cıvata kuvveti rezidüel kapasite F_{rez} 'e ayarlanır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: Dolgulu kaya cıvatası yenilme kriteri (Rocscience 2021)

4.2.2.4 Dinamik Analiz Modeli

RS2'de kullanılan dinamik integrasyon şeması, u , v ve a 'nın sırasıyla yer değiştirmeyi, hızı ve ivmeyi temsil ettiği aşağıdaki denklemlerle karakterize edilen N.M. Newmark zaman adımli yöntemler ailesine dayanmaktadır (Noh ve Bathe, 2013).

$$v_{i+1} = v_i + [(1 - \beta)\Delta t]a_i + (\beta\Delta t)a_{i+1} \quad (4.11)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)v_i + \left[\left(\frac{1}{2} - \gamma\right)(\Delta t)^2\right]a_i + [\gamma(\Delta t)^2]a_{i+1} \quad (4.12)$$

Beta ve gama parametreleri, verilen herhangi bir zaman adımında ivmenin nasıl değiştiğini tanımlar ve algoritmanın kararlılığını ve doğruluğunu büyük ölçüde etkiler.

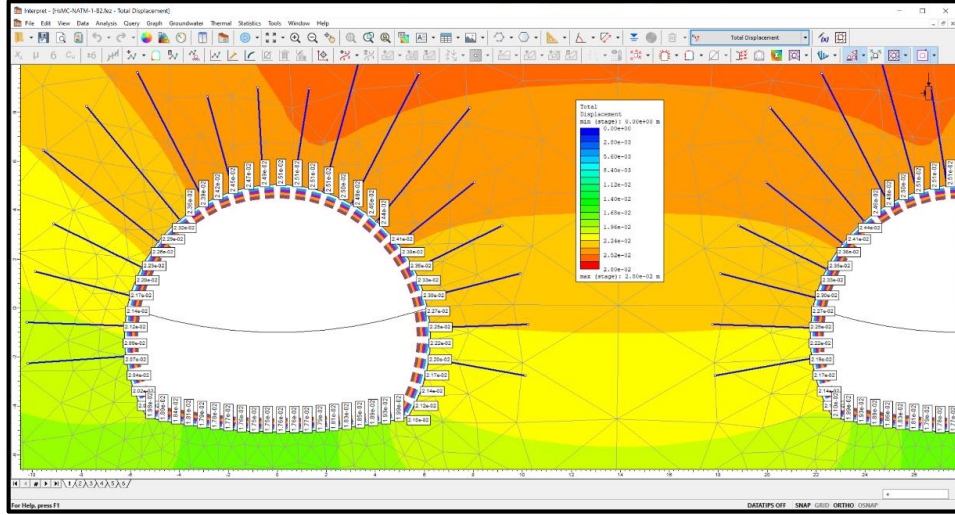
4.3 Sayısal Analizlerin Yapılışı

Kaya kütlesi ve kaya malzemesine ait arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ile kaya kütle sınıflama sistemleri tarafından önerilen destekleme elemanlarını baz alan veriler (Tablo 3.1–...–Tablo 3.6) yazılıma aktarılarak sayısal analizler yapılmıştır. İlk olarak yapılan pilot analizler ile sahanın daha gerçekçi modellenmesi için kalibrasyon yapılmıştır. Bunun için kaya kütlesi deformasyon modülü ana belirteç olmuştur ve Tablo 3.11’de verilen eşitliklerden yararlanılarak sisteme veri girişi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra statik analizler yapılmıştır. Bu analizler tamamlandıktan sonra dinamik analizler yapılarak destekleme önerilerinin dinamik durum performansları karşılaştırılmıştır.

Sayısal analizler üç kısımda yapılmıştır; Birinci kısımda, iki boyutlu statik analizler yapılmıştır. İkinci kısımda, iki boyutlu dinamik analizler (sismik yük değerleri sisteme girilerek) ve bölgenin depremselliğine göre sisteme deprem ivme kayıtları girilerek analizler yapılmıştır. Üçüncü kısımda, üç boyutlu statik ve dinamik analizler ile sığınma cebi ve bağlantı tüneli kavşaklarının analizleri yapılmıştır.

4.3.1 Statik Analizler

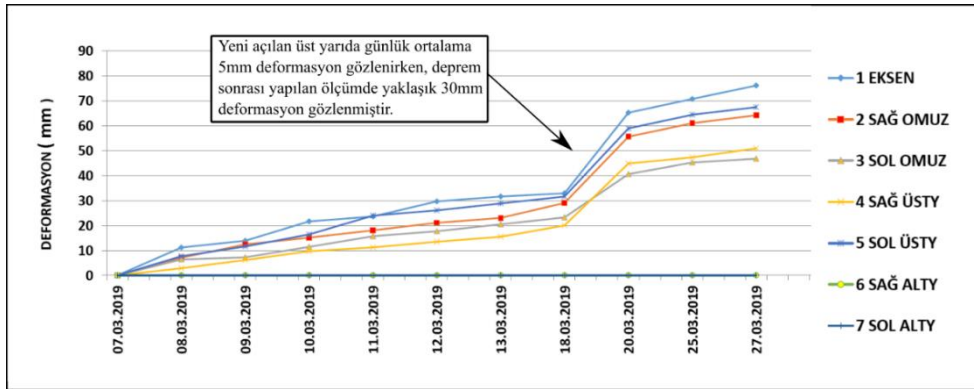
Hazırlanan saha verilerinin 2 boyutlu çözüm yapan RS2 (Rocscience 2021) yazılımına girişinde Kulhawy (1974) dikkate alınarak, dış sınırlar tünel çapının 5 katı olacak şekilde oluşturulup, sonrasında alan sonlu elemanlar örgüsüne ayrılmıştır. Kaya kütle özellikleri ve varsayılan derinliğe bağlı hesaplanan statik gerilme özellikleri yazılıma aktarılmıştır. Malzeme modeli olarak Mohr–Coloumb, Hoek–Brown ve Genelleştirilmiş Hoek–Brown modelleri seçilerek veriler girilmiştir. Açıklıklara herhangi bir destek uygulamadan, Q, RMR, RMi, RMQR, RSR ve NATM sistemlerinin önerdiği destek elemanları (çelik iksa, kafes profil, kaya bulonu, çelik hasır, püskürtme beton türünden) uygulanarak, statik durum için hesaplama sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar ile malzeme modelleri arasında karşılaştırma yapılarak saha ölçümlerine en yakın hesaplama yapacak model tespit edilmiştir. Şekil 4.7’de sayısal analiz sonuçlarından açıklık çevresindeki verilerin elde edilmesini gösteren yazılıma ait ekran görüntüsü mevcuttur.



Şekil 4.7: RS2 yazılımı sayısal analiz sonuçlarının elde edilmesi

4.3.2 Dinamik Analizler

Statik yükleme durumunun hesaplamaları ve sayısal modellemeye aktarılması kolaydır. Dinamik yükleme durumunda ise farklı değişkenlerin hesaplanması ve sayısal modellemeye aktarılması çeşitli güçlükler içermektedir. Deprem mühendisliğinde dinamik gerilme durumunun yapılara verdiği etkileri kestirmek için çeşitli araştırmacılar tarafından oluşturulmuş azalım ilişkileri kullanılmaktadır. “Bölgenin Depremelliği” başlığı altında bu azalım ilişkilerinden faydalanılarak bölgede meydana gelebilecek dinamik etkiler tahmin edilmeye çalışılmıştır. 20 Mart 2019 tarihinde merkez üssü bölgeye ~30 km mesafede bulunan 5.5 (Mw) büyüklüğündeki Acıpayam depreminden sonra yapılan ölçümlerde, tünel aynasına yakın bölümde ölçülen deformasyon değerlerindeki farklılıklar (Şekil 4.8, tünel çapının %0.3 kadar) dinamik analizlerin önemini arttırmaktadır.



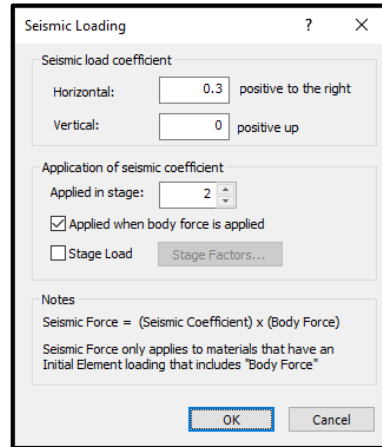
Şekil 4.8: Tünel kazı alanında yapılan ölçüm değerlerindeki değişim

Çalışma bölgesinin çevresinde sismik aktivitenin yüksek oluşu (8 Ağustos 2019 Bozkurt Depremi 6.0 Mw) kaya kütlelerinin duraylılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu koşullar altında yapılan analizler sayesinde tünelin mevcut destek sisteminin performansı değerlendirilmiştir.

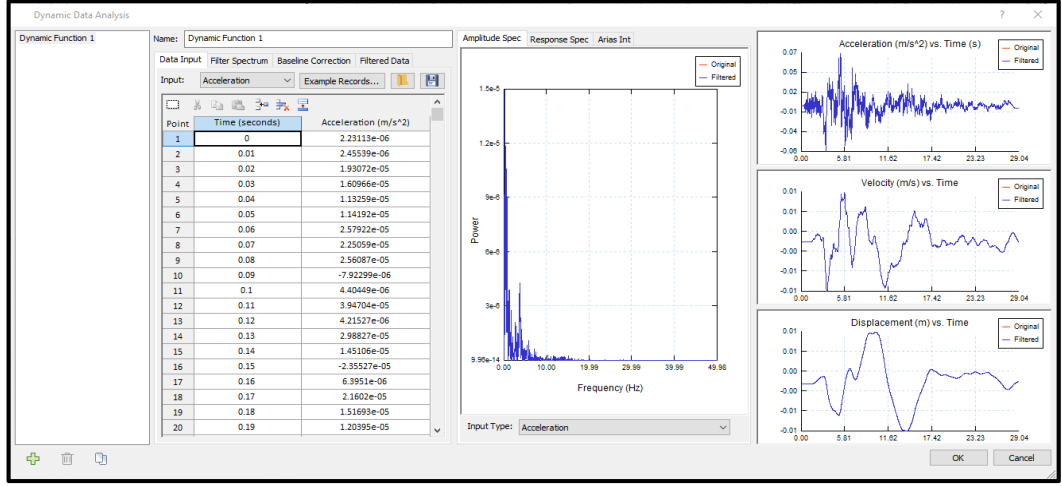
Tez çalışması kapsamında iki çeşit dinamik etki değeriyle analizler yapılmıştır. Bunlardan birincisi, azalım ilişkileri ile yapılan hesaplamalar sonucunda bölge için öngörülen ~1 g ivme değeriyle Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif web uygulaması üzerinden bölgede 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan en büyük yer ivmesi (α , PGA 2475) 0.852 g değeri, Noda ve diğ. (1975)'e göre denklem (4.13) kullanılarak sismik katsayı (e_A) değerleri hesaplanmıştır.

$$e_A = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.13)$$

İkincisi, 1999 yılında Düzce'de meydana gelen 7.2 büyüklüğündeki depremin, Düzce'de bulunan "DZC 180" ve "DZC 270" istasyonlarına ait ivme kayıtları yazılıma girilerek sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Bu verinin kullanılmasında, çalışma bölgesinde beklenenden (>6.9 M) görece olarak daha büyük bir deprem olması, bölgeye yakınlığı (~350 km) ve çevresindeki birçok istasyon tarafından ivme kaydının bulunması etkili olmuştur. DZC 180'e ait PGA: 0.348 g ve dışmerkez uzaklığı: 1.6 km, DZC 270'e ait PGA: 0.535 g ve dışmerkez uzaklığı: 1.6 km'dir. RS2 yazılımında dinamik yükleme koşulları için ilk yapılan sismik yükleme ile dinamik etki oluşturma ve Düzce depremi ivme kayıtlarının "Dinamik veri analizi" ile sisteme girilmesi Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

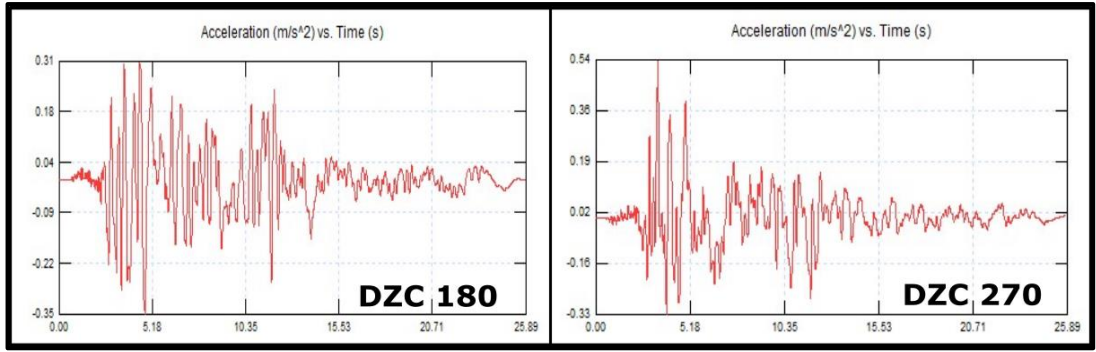


Şekil 4.9: Sismik katsayı girişi ile dinamik etki oluşturma



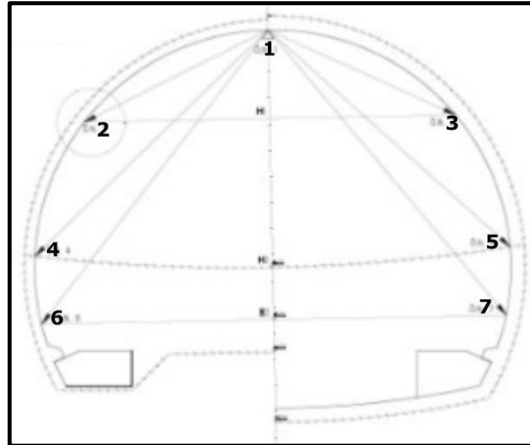
Şekil 4.10: Dinamik veri analizi ile deprem ivme kayıtlarının sisteme girilmesi

Dinamik veri analiziyle sisteme girilirken kullanılan istasyonların deprem ivme kayıtlarının (DZC 180 ve DZC 270) grafikleri Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11: Dinamik veri analizi ile sistemine girilen deprem ivme kayıtları

Tünel kesitinde her ölçümde 7 noktada deformasyon değeri alınarak kaydedilmektedir (Şekil 4.12). Yapılan analizler neticesinde bu ölçüm noktalarına denk gelen koordinat noktalarının deformasyon değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 4.12: Ölçüm bölgelerini gösteren tünel kesiti

5. BULGULAR

Yapılan çalışmalar neticesinde altı farklı kaya kütle sınıflama sistemi tarafından önerilen destek elemanlarının statik ve dinamik koşullar altında deformasyon değerleri hesaplanmıştır. İki boyutlu ve üç boyutlu hesaplamalar ile ilgili yapılan analiz miktarları Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Yapılan iki boyutlu sayısal analizler (RS2)

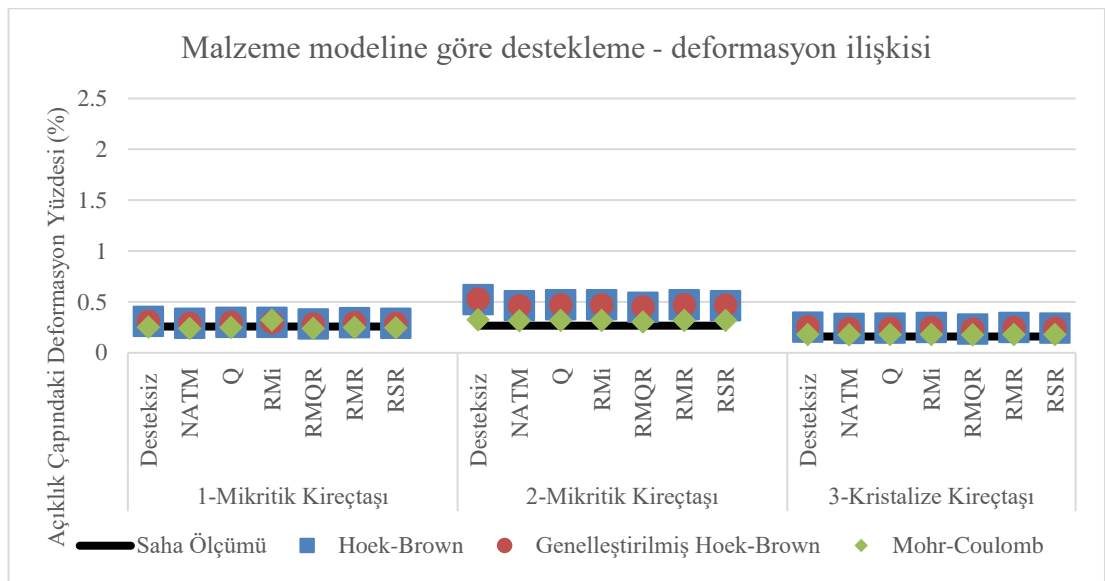
1. İki Boyutlu Statik Analizler			
Malzeme Modeli	Desteksiz	Destekli*	
Mohr–Coulomb	9 adet	54 adet	
Hoek–Brown	9 adet	54 adet	
Genelleştirilmiş Hoek–Brown	9 adet	54 adet	
			Toplam: 189 adet
2. İki Boyutlu Dinamik Analizler			
Malzeme Modeli	Desteksiz	Destekli*	İvme Bilgileri**
Mohr–Coulomb	9 adet	63 adet	Yatay – 1 g ($e_A=0.3$)
Mohr–Coulomb	9 adet	63 adet	Düzce Depremi (0.348 g)
Mohr–Coulomb	9 adet	63 adet	Düzce Depremi (0.535 g)
			Toplam: 216 adet
3. Sığınma Cepleri İçin Yapılan Statik ve Dinamik Analizler			
Malzeme Modeli	Desteksiz	Destekli*	İvme Bilgileri**
Mohr–Coulomb	9 adet	54 adet	Statik
Mohr–Coulomb	9 adet	54 adet	Yatay – 1 g ($e_A=0.3$)
			Toplam: 126 adet
* 9 kaya kütle türüne göre, Q, RMR, RMQR, R _{Mi} , RSR, NATM ait altı kaya kütle sınıflama sistemlerinin önerdiği ve geliştirilen destek sisteminin önerdiği toplam 63 adet analiz.			
** İvme Bilgileri: Pik yatay (1g) ve düşey ivmeye (0 g) karşılık gelen sismik katsayı ($e_A=0.3$) değeri, ile RS2 yazılımının kullanıcı ara yüzünde var olan 1999 Düzce deprem ivme kayıtları (0.348 g ve 0.535 g), Honaz Tüneli’ni depremin merkez üssü kabul ederek sisteme girilmiştir.			

Tablo 5.2: Yapılan üç boyutlu sayısal analizler (RS3)

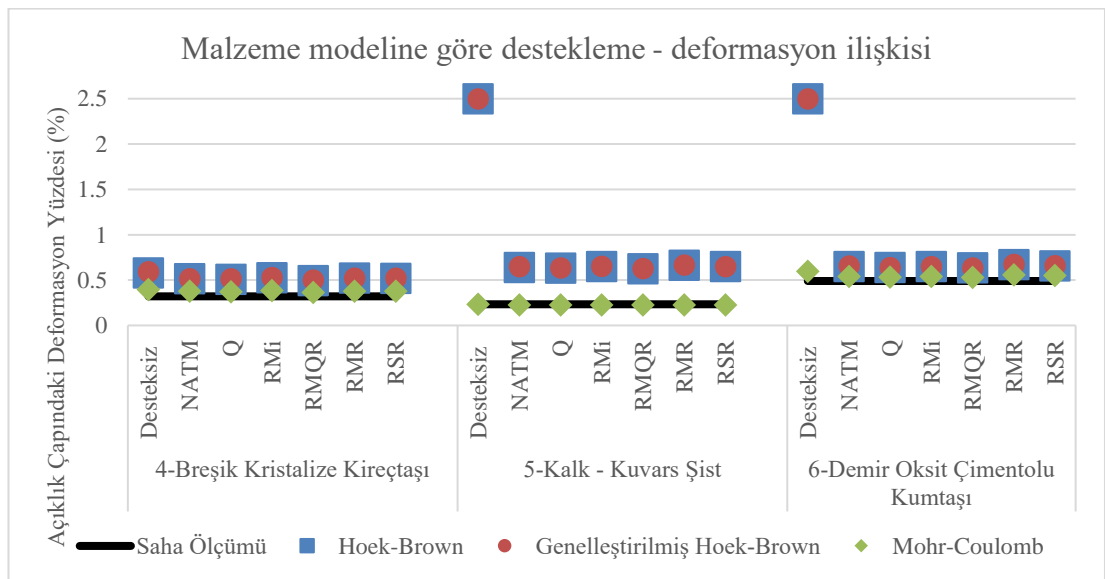
3. Üç Boyutlu Kavşak Bölgeleri İçin Yapılan Statik ve Dinamik Analizler		
Malzeme Modeli	Statik	Dinamik
Mohr–Coulomb	8 adet	8 adet
		Toplam: 16 adet

Yapılan bu çalışmalar neticesinde altı farklı kaya kütle sınıflama sistemi tarafından önerilen destek elemanlarının, statik ve dinamik koşullar altında deformasyon değerleri hesaplanmıştır.

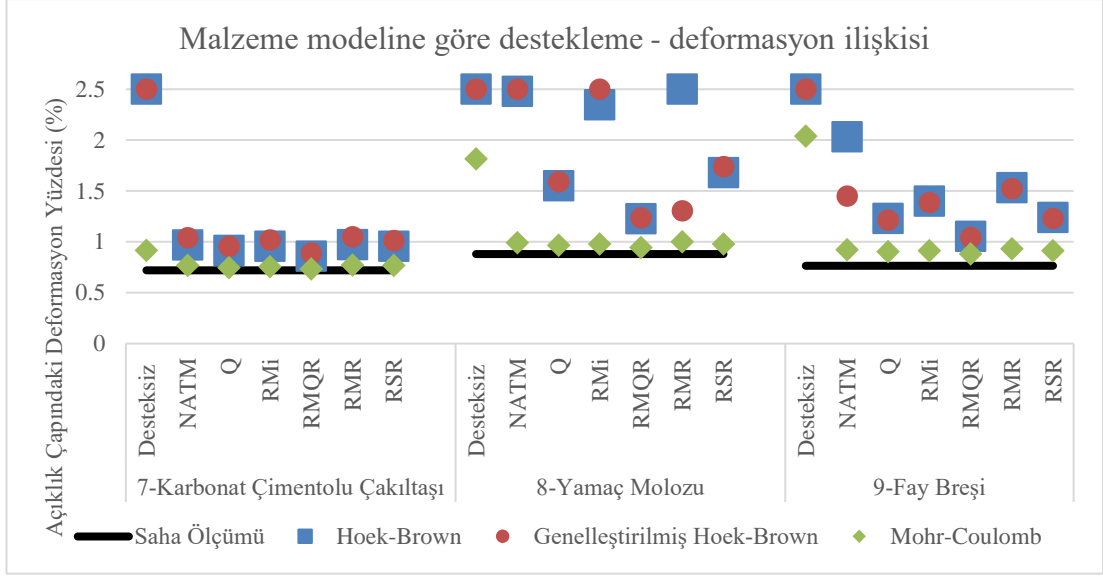
Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'te desteksiz durum, NATM, Q, RMi, RMQR, RMR ve RSR sistemlerinin önerdiği destekleme elemanları kullanılarak yapılan statik analizlerden, elde edilen en yüksek deformasyon değerlerinin açıklık çapına oranının yüzde değerlerini içeren sonuçlar verilmiştir. Tünel sahasından elde edilen ölçüm verilerinde, deformasyonların tünel çapının %2'sini geçmediği bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda tünel eksen, sağ omuz ve sol omuz (Şekil 4.13'teki 1, 2 ve 3 numaralı bölgeler) deformasyon değerlerinin ortalaması alınarak grafikler oluşturulmuştur. Elde edilen deformasyon değerlerine bağlı olarak malzeme modellerinin kıyaslanması içeren grafik Şekil 5.4'te verilmiştir.



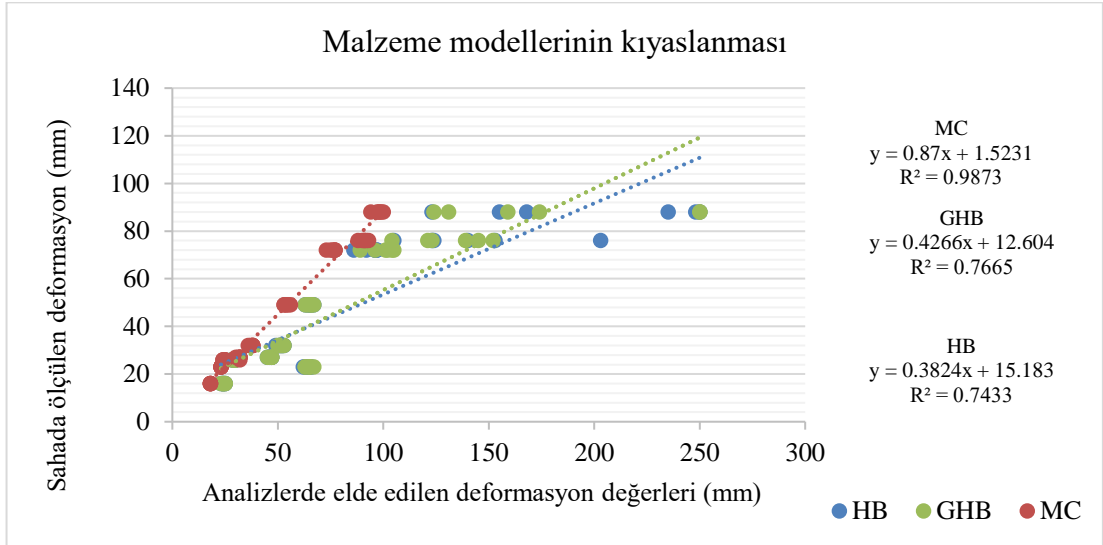
Şekil 5.1: Malzeme modeline göre destekleme – deformasyon ilişkisi (1,2,3)



Şekil 5.2: Malzeme modeline göre destekleme – deformasyon ilişkisi (4,5,6)



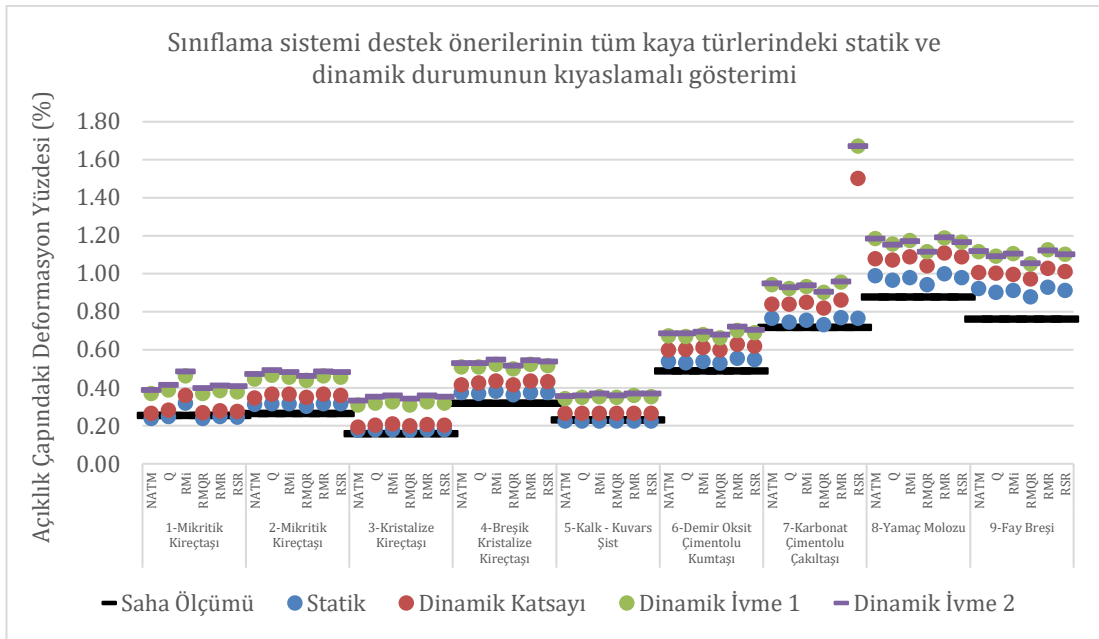
Şekil 5.3: Malzeme modeline göre destekleme – deformasyon ilişkisi (7,8,9)



Şekil 5.4: Malzeme modellerinin kıyaslanması

İki boyutlu statik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, Mohr–Coulomb (MC) malzeme modelinin sahada ölçülen deformasyon değerlerine Hoek–Brown (HB) ve Genelleştirilmiş Hoek–Brown (GHB) modellerinden daha yakın sonuçları verdiği görülmüştür ($R^2_{MC} > R^2_{GHB} > R^2_{HB}$). Bu sebepten ikinci ve üçüncü analizlerde Mohr–Coulomb malzeme modeli tercih edilmiştir. Çalışma bölgesi zayıf kaya kütesinden meydana geldiğinden dolayı Mohr–Coulomb malzeme modelinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Görece daha sağlam olan kireçtaşında üç yöntem de birbirine ve saha ölçümlerine yakın değer verirken çakıltaşı, yamaç molozu gibi zemin özelliği gösteren kaya kütesinde Hoek–Brown ve Genelleştirilmiş Hoek–Brown modelleri gerçekten çok uzak sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kaya kütle sınıflama sistemi destek önerilerinin tüm kaya türlerindeki statik ve dinamik durumunun kıyaslamalı gösterimi aşağıdaki Şekil 5.5'te verilmiştir.

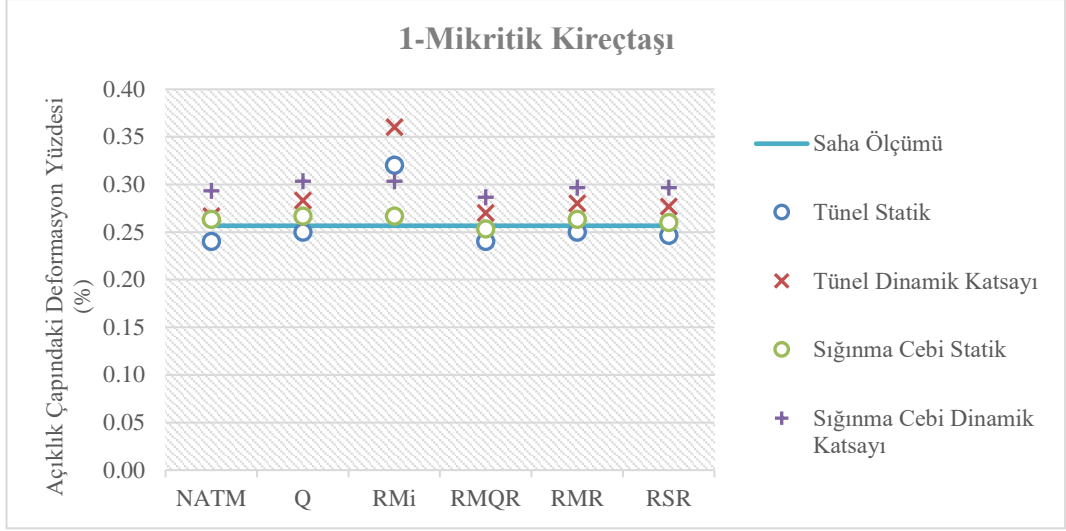


Şekil 5.5: Sınıflama sistemi destek önerilerinin tüm kaya türlerindeki statik ve dinamik durumunun kıyaslamalı gösterimi

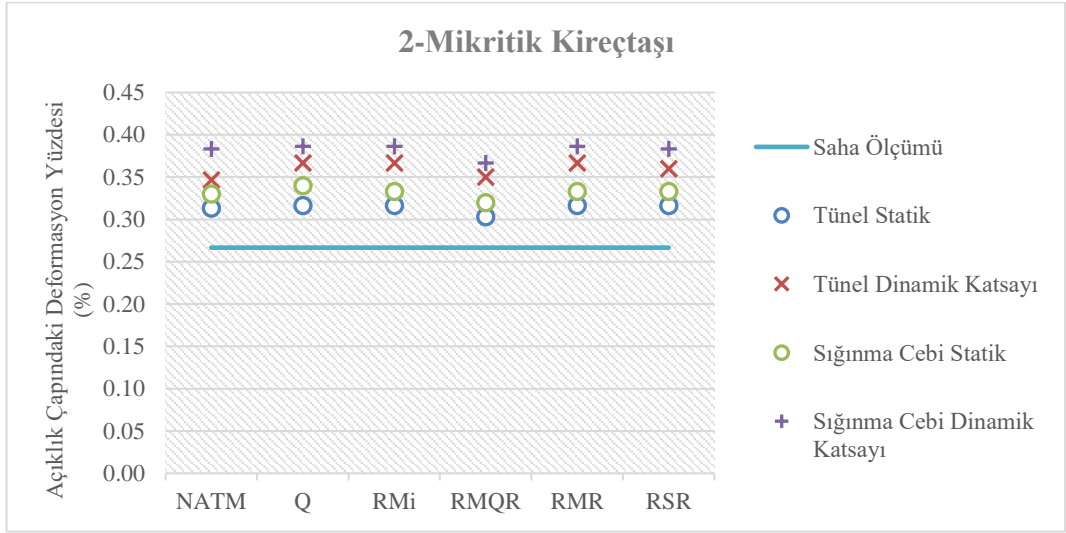
İki boyutlu statik ve dinamik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, statik analizlerde tüm sistemlerdeki öneriler birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Dinamik analizlerde ise RMQR sisteminin tüm kaya türlerinde, Q ve NATM sistemlerinin çok zayıf (8 ve 9 numaralı) kaya türü hariç diğerlerinde daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir. RSR sistemi zayıf kaya kütlelerinde kaya cıvatası ve püskürtme beton destek türlerinin kullanılmasını önermediği için statik analizlerde normal sonuçlar elde edilmesine karşın, dinamik analizlerde yüksek deformasyon değerleri elde edilmiştir.

Yeraltı açıklık boyutu ve şekli daha farklı olan sığınma cepleri (RS2) ile bu ceplerin bağlantı tünelleriyle bağlanması sonucu oluşturulan kavşak bölgelerinin (RS3) analiz sonuçlarından elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.6 –...– Şekil 5.14'te verilmiştir.

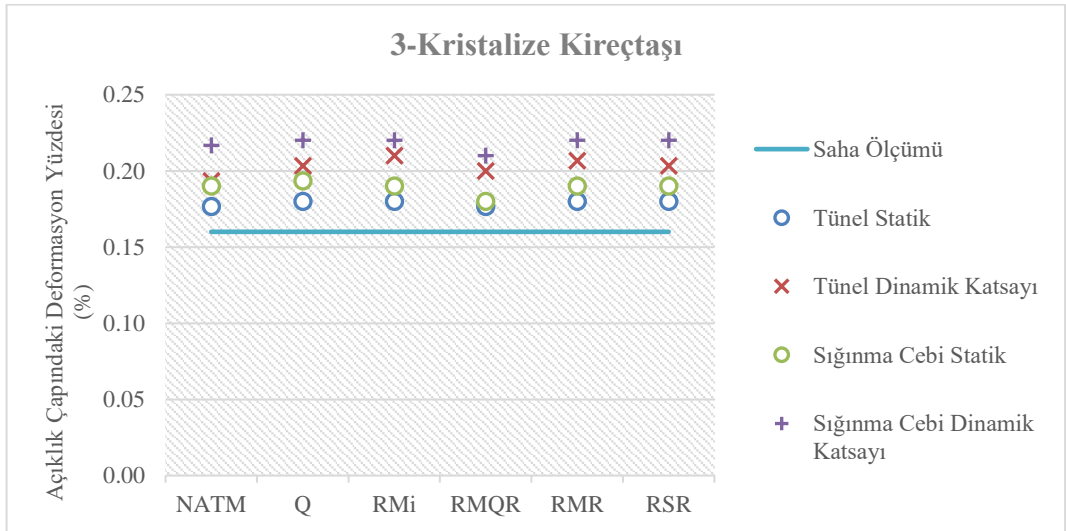
Sığınma cepleri analizleri yapılırken 7, 8 ve 9 numaralı çok zayıf olarak nitelendireceğimiz kaya türlerinde, yüksek deformasyon değerlerine ulaşıldığı için hesaplamalar %1.5 değerinde sabit tutulmuştur (NATM, Q ve RSR). Bu nedenle bazı dinamik deformasyon sonuçları üst üste gelerek çakışmıştır.



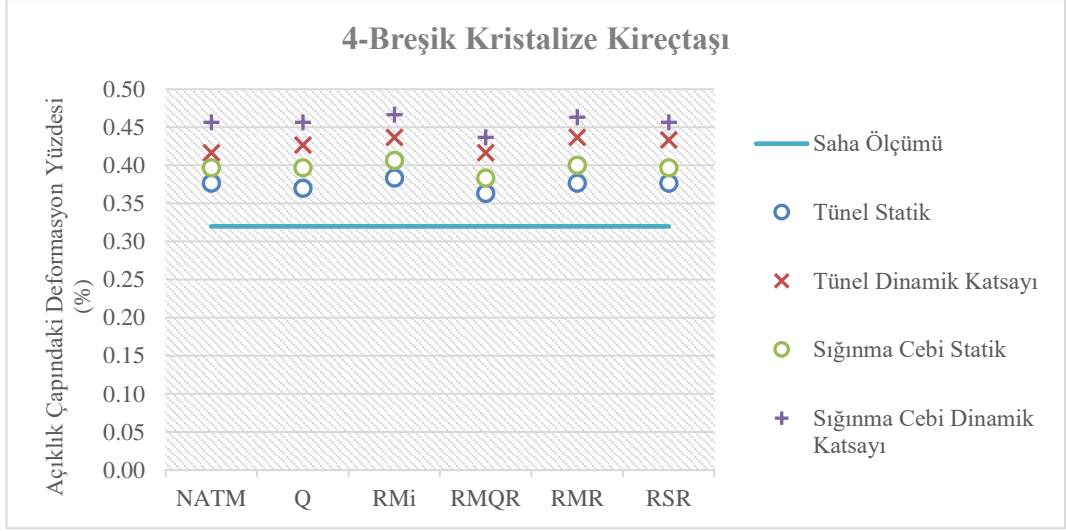
Şekil 5.6: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 1



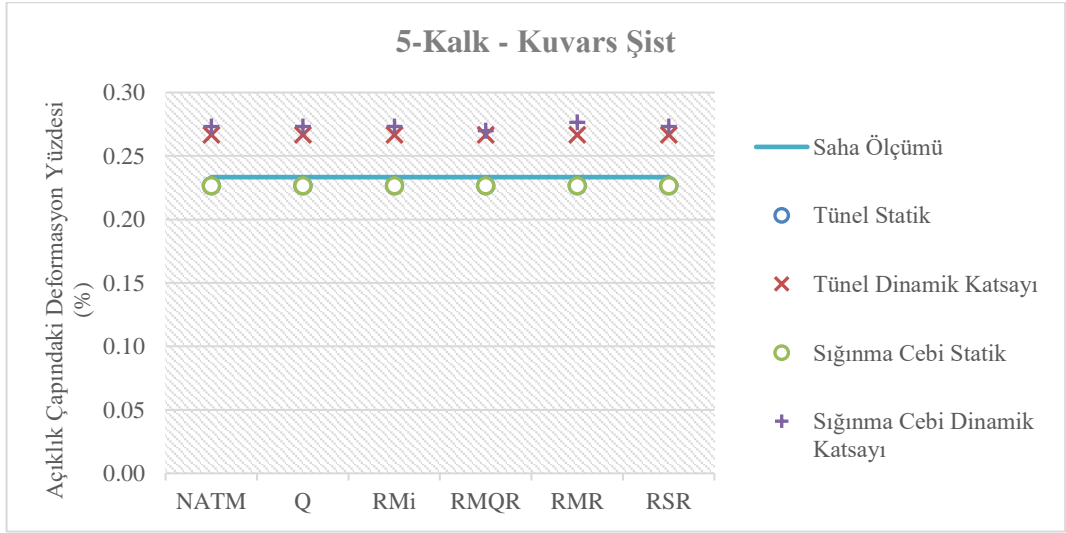
Şekil 5.7: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 2



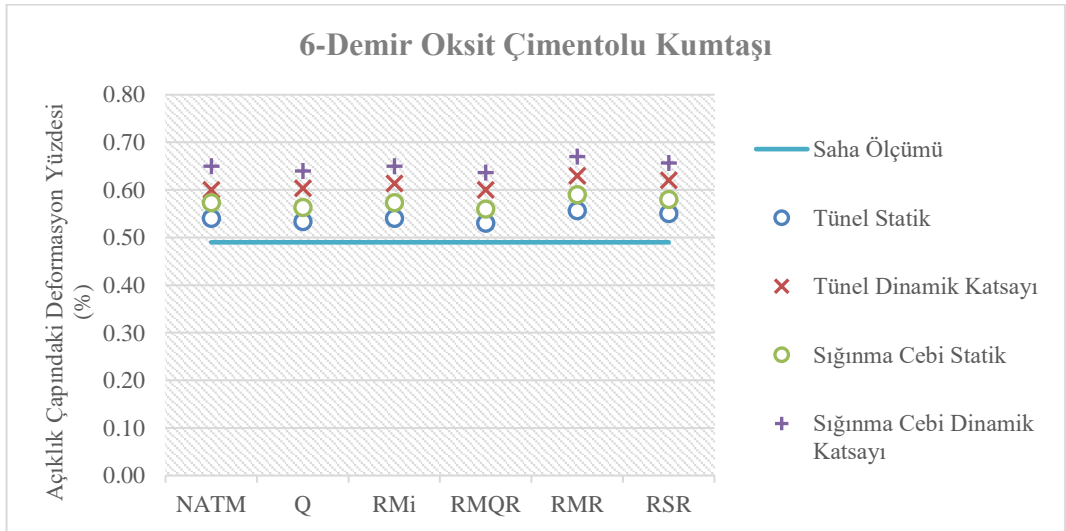
Şekil 5.8: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 3



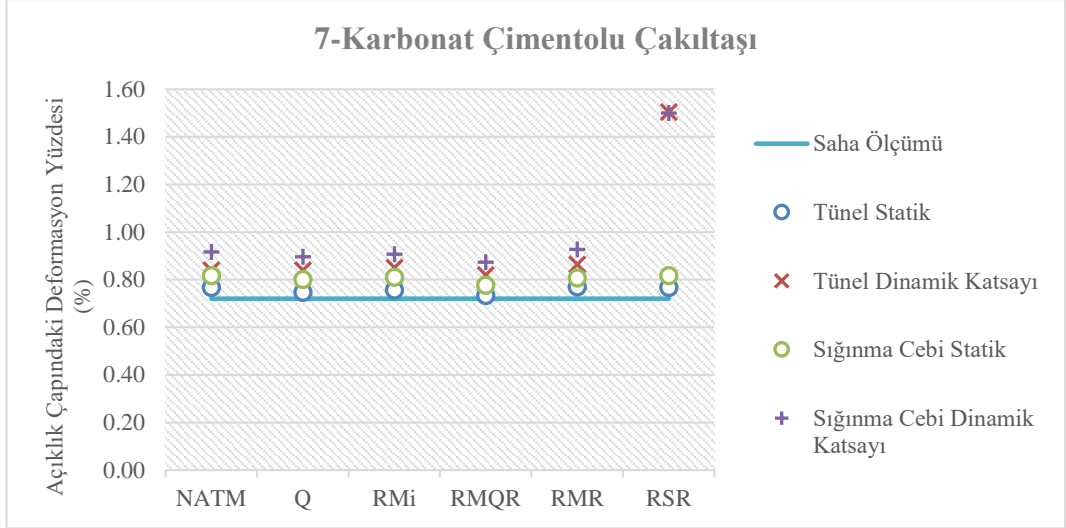
Şekil 5.9: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 4



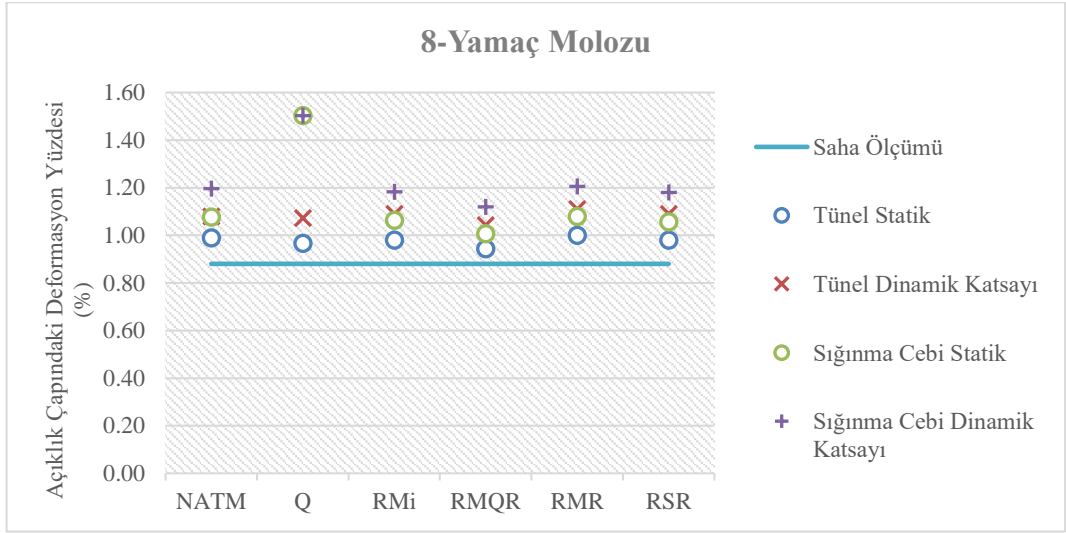
Şekil 5.10: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 5



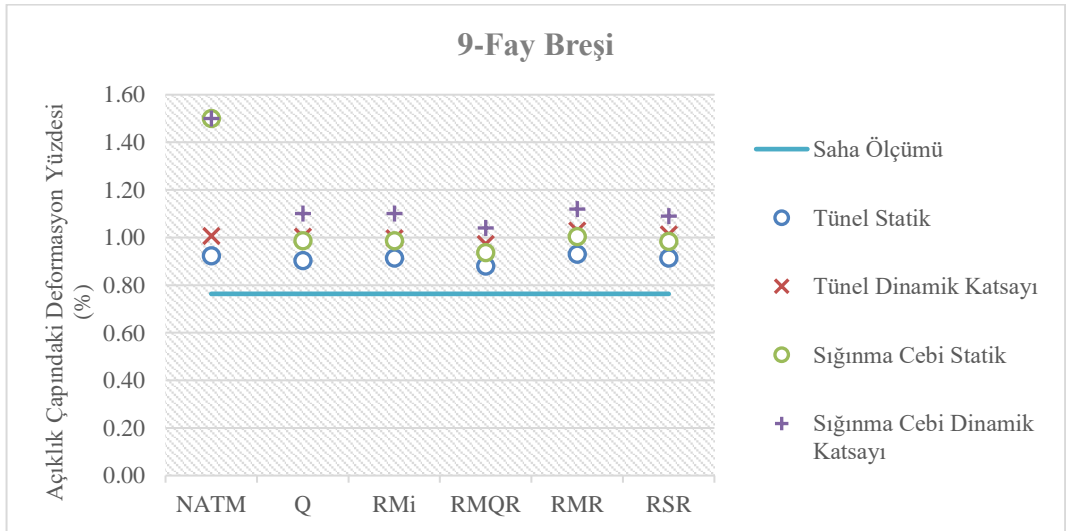
Şekil 5.11: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 6



Şekil 5.12: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 7

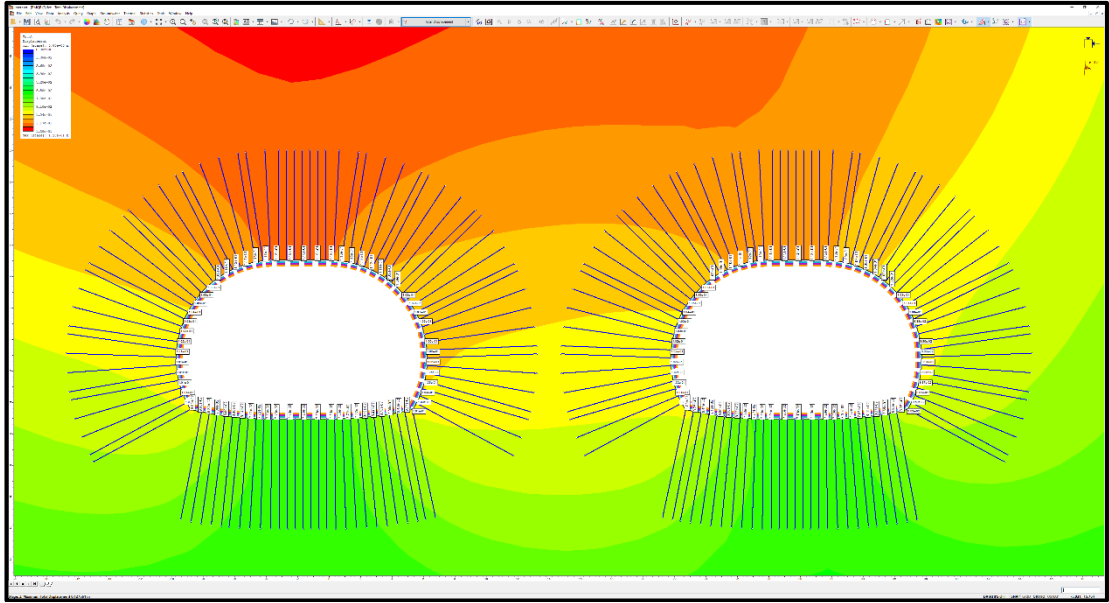


Şekil 5.13: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 8

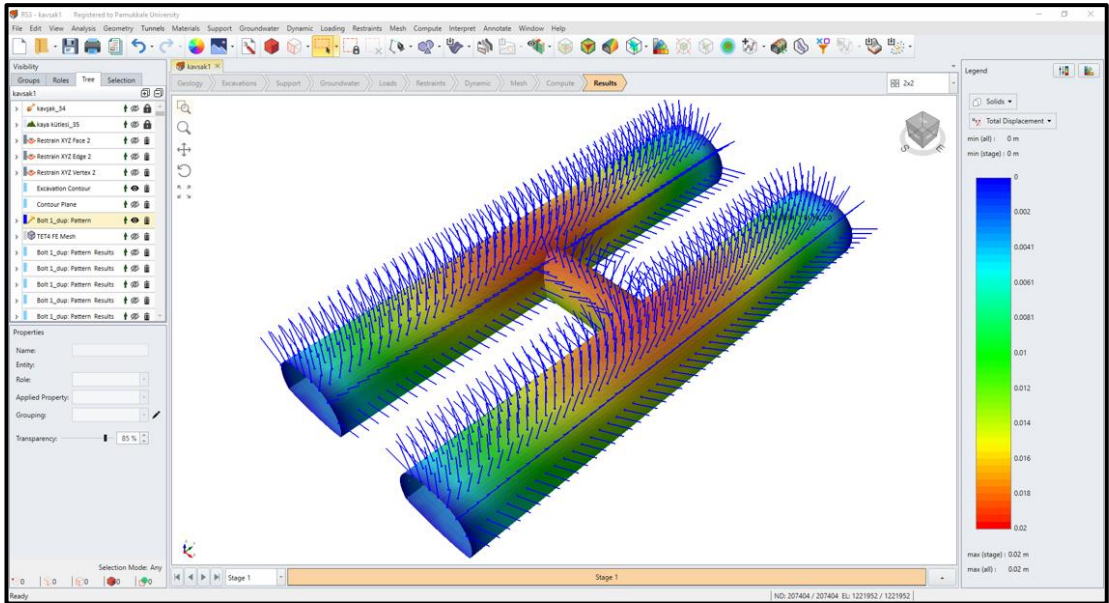


Şekil 5.14: Sığınma cebi ile tünel açıklığının karşılaştırılması – 9

Sığınma cebi ile bağlantı tünellerinin iki ve üç boyutlu analizlerinin yazılım çıktıları Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.15: Sığınma ceplerinin iki boyutlu dinamik katsayılı hesap çıktısı (RMQR)

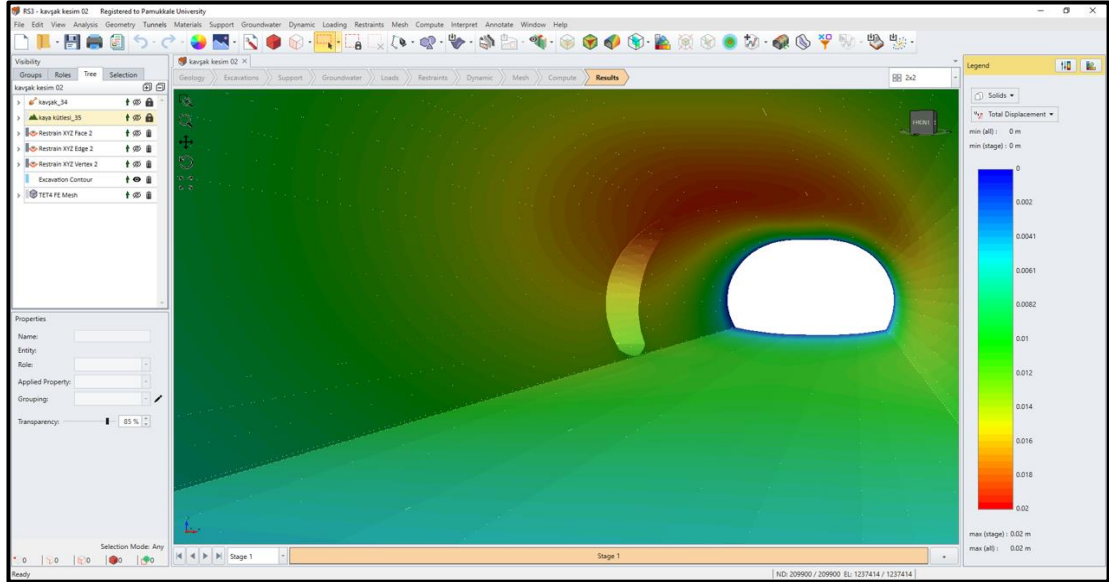


Şekil 5.16: Sığınma cebi ve bağlantı tüneli kavşak noktalarının üç boyutlu analiz çıktısı (NATM)

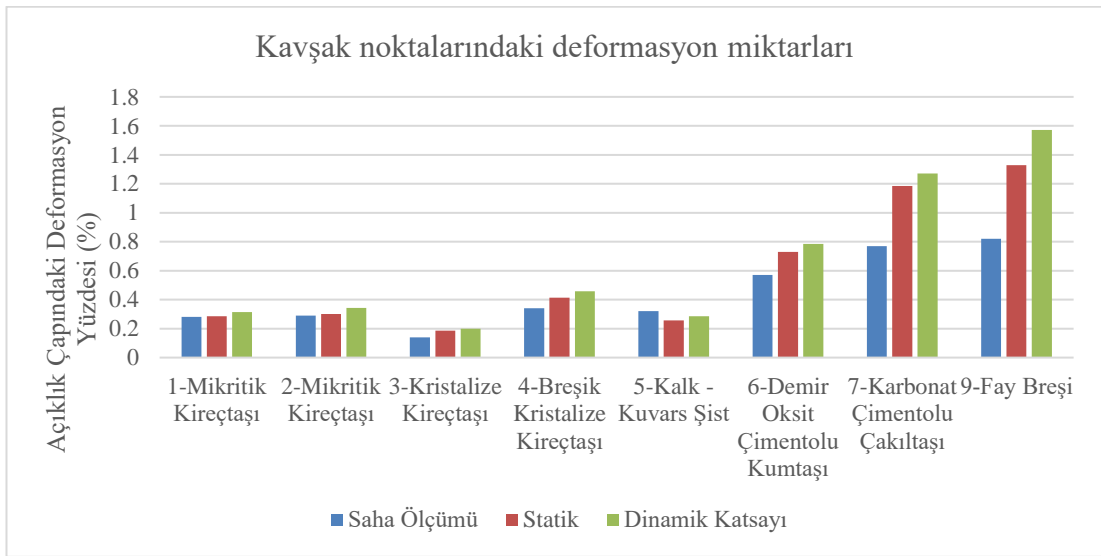
Normal tünel açıklığı ile sığınma cebi karşılaştırıldığında NATM, Q ve RSR sistem önerilerinin çok zayıf formasyonlarda daha geniş açıklıklarda düşük performans verdiği görülmüştür.

Sığınma ceplerinin, bağlantı tünelleriyle birleşmesiyle oluşan kavşak bölgelerinde tünelin halihazırda sahip olduğu destek elemanı (NATM) bilgileri RS3

yazılımına girilerek üç boyutlu analiz sonuçları elde edilmiştir (Şekil 5.16, Şekil 5.17). ‘8-Yamaç Molozu’ numaralı kaya türü kavşak noktasında yer almadığı için bu tür hesaplamaya dahil edilmemiştir. Kavşak bölgeleri için yapılan üç boyutlu analizlerde, dinamik etki altında “9-Fay Breşi” hariç diğer kaya kütle türlerinde çok fazla deformasyon değerleriyle karşılaşılacağı ön görülmektedir (Şekil 5.18).



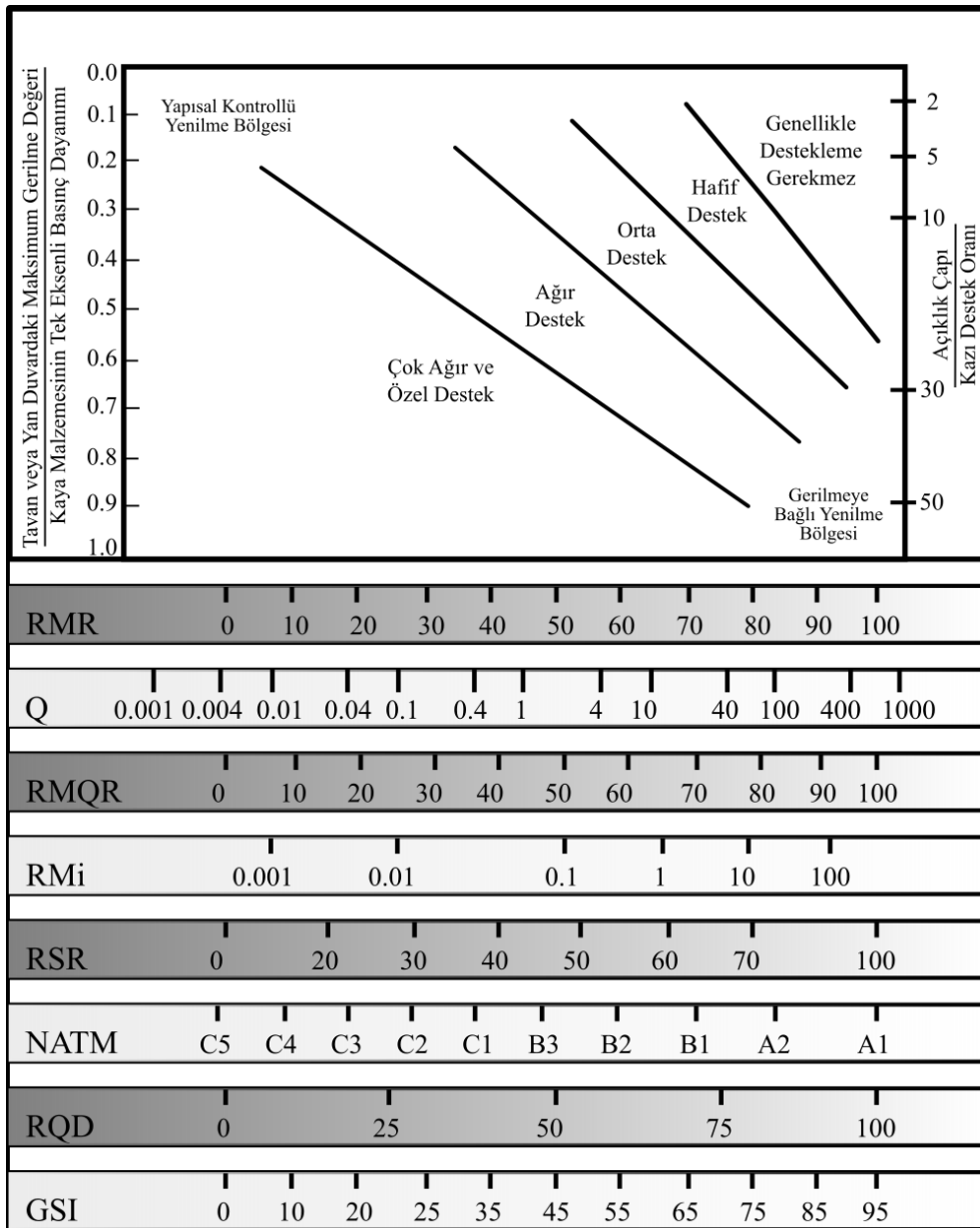
Şekil 5.17: Tüneldeki kavşak bölgelerinin iç kısımdan üç boyutlu görünümü (desteksiz)



Şekil 5.18: Tünel içindeki kavşak noktalarına ait üç boyutlu analiz sonuçları

6. DİNAMİK KOŞULLAR İÇİN DESTEKLEME ÖNERİSİ GELİŞTİRİLMESİ

Yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ışığında Bienawski (1990) tarafından önerilen Q ve RMR sistemine bağlı kaya destek önerisi belirleme grafiği RMR, Q, RMQR, RMi, RSR, NATM, RQD ve GSI sistemlerini içerecek şekilde değiştirilerek Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1: Kaya kütle puan türüne göre destekleme önerisi belirleme grafiği (Bienawski 1990 değiştirilerek)

Tablo 6.1’de Barton ve Grimstad (2014) tarafından önerilen kazı destek oranı belirleme tablosu Şekil 6.1 ile birlikte kullanılmak için değiştirilerek verilmiştir.

Tablo 6.1: Kazı tipine göre kazı destek oranı belirleme tablosu (Barton ve Grimstad 2014 değiştirilerek)

Kazı tipi	Kazı Destek Oranı (KDO)	Dinamik Kazı Destek Oranı (KDO _D)
1 Geçici maden açıklıkları vb.	~3 – 5	$KDO_D = \frac{KDO}{e^{e_A}}$
2 Dikey kuyular; ▪ Dairesel kesitli kuyu ▪ Dikdörtgen / kare kesitli kuyu	~2.5 ~2.0	
3 Kalıcı maden açıklıkları, hidroelektrik santralleri için oluşturulan su tünelleri, su temin tünelleri, pilot tüneller, büyük yeraltı galeri ve geçitleri	1.6	
4 Küçük karayolu ve demiryolu tünelleri, dalgalanma odaları (hidroelektrik santrali büyük basınçlı yeraltı odası), geçiş tünelleri, kanalizasyon tünelleri vb.	1.3	
5 Enerji santralleri, depolar, su arıtma tesisleri, karayolu ve demiryolu tünelleri, sivil savunma odaları, portallar, kavşaklar vb.	1.0	
6 Yeraltı nükleer santralleri, demiryolu istasyonları, spor ve kamu tesisleri, fabrikalar vb.	0.8	
7 Yaklaşık 100 yıl veya daha uzun ömürlü çok önemli mağaralar ve yeraltı açıklıkları ya da bakım erişimi olmayan yerler	0.5	

Tabloda yer alan dinamik kazı destek oranını belirlemek için denklem 4.13’ten yararlanılmıştır. Dinamik kazı destek oranı (KDO_D), kazı destek oranının (KDO) Euler sayısı üzeri sismik katsayı (e_A) değerine bölümünden hesaplanmaktadır.

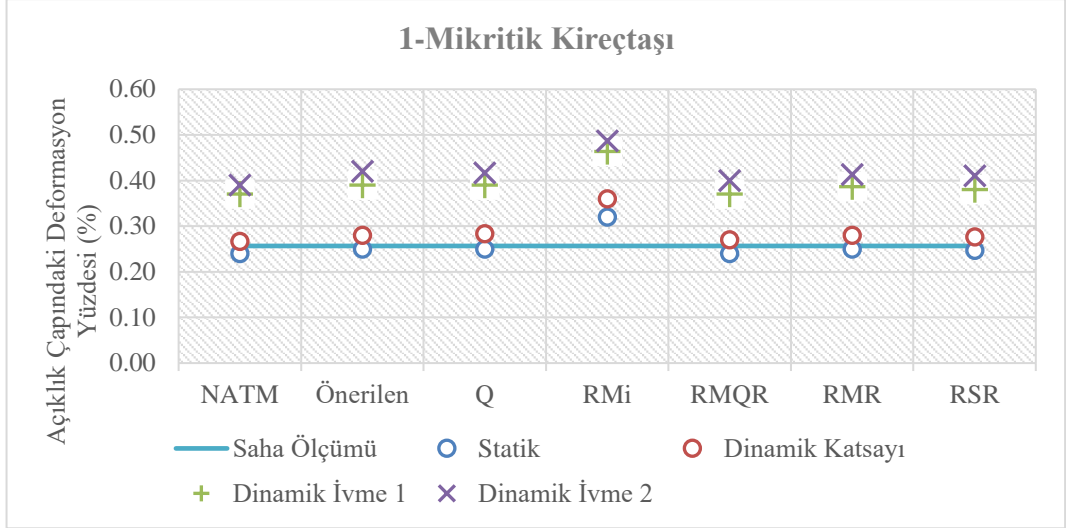
$$KDO_D = \frac{KDO}{e^{e_A}} \quad (6.1)$$

Şekil 6.1’de yer alan farklı miktarlardaki destekleme önerilerini içeren “yeraltı mühendislik yapısı için destek türü ve miktarı öneri kılavuzu” Tablo 6.2’de verilmiştir. Bu tablo aynı zamanda Şekil 7.1’de verilen dinamik koşullar için destek sistemi önerisi grafiğiyle birlikte kullanılabilir.

Tablo 6.2: Yeraltı mühendislik yapısı için destek türü ve miktarı öneri kılavuzu

Destek Türü ve Miktarı	Hafif Destek	Orta Destek	Ağır Destek	Çok Ağır Destek
Kaya Cıvatası	Noktasal	1 – 2m aralıklı (Açıklık çapı/Kazı destek oranı)	0.5 – 1 m aralıklı (Açıklık çapı/Kazı destek oranı)	<0.5m aralıklı (Açıklık çapı/Kazı destek oranı) kazı aynası da dahil (Mekanik ankrajlı kaya cıvatası önerilmez)
Püskürtme Beton	–	Tavan ve yan duvarlara 50 – 100 mm	Tüm açıklık çevresine 100 – 250 mm (Lifli)	Tüm açıklık çevresine >250 mm (Çelik lifli) (Kazı aynasına >50 mm)
Çelik Hasır	–	Tavan ve yan duvarlar 1 kat	Tüm açıklık çevresi 2 kat	Tüm açıklık çevresi 2 veya daha fazla kat (Kazı aynasına 1 kat)
Çelik İksa	–	–	Tavan ve yan duvarlar 1 – 2m aralıklı hafif çelik iksa	Tüm açıklık çevresi <1 m aralıklı ağır çelik iksa
Kafes Profil	–	–	Sismik hareketliliğin yüksek olduğu yerlerde çelik iksa yerine	Sismik hareketliliğin yüksek olduğu yerlerde çelik iksa yerine ya da süren uygulanan çelik iksa aralarına
Beton Astar	–	–	Donatısız	Donatılı
Süren	–	–	–	Çelik boru veya çelik levha

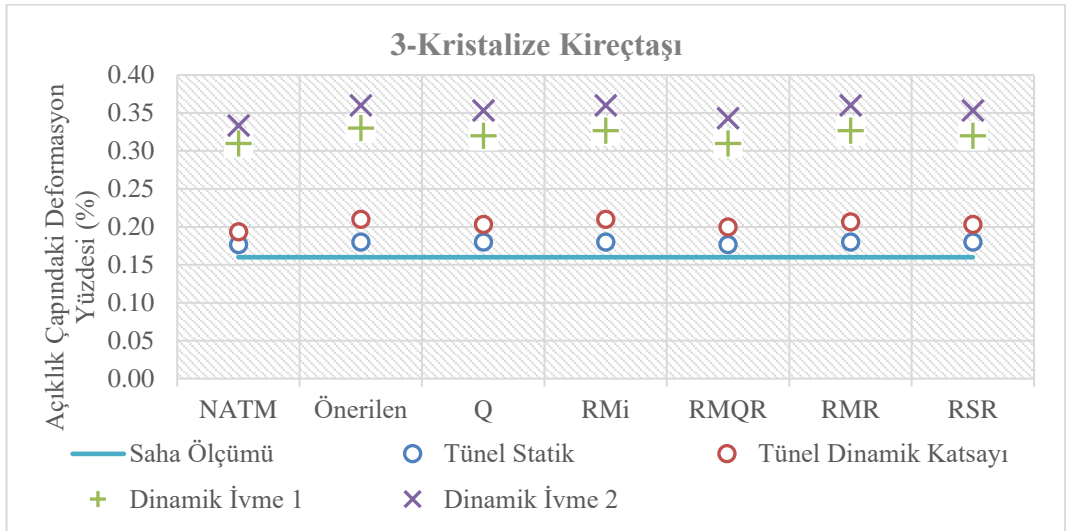
Geliştirilen destek sistemi önerisi Honaz Tüneli’nde bulunan kaya kütle türleri için statik ve dinamik koşullar altında uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.2 –...– Şekil 6.10’da verilen grafiklerde diğer kaya kütle sınıflama sistemi destek önerileriyle karşılaştırılmıştır. Grafiklerde yer alan “Önerilen” isimli eksen geliştirilen destek sistemi önerisinin sonuçlarını belirtmektedir. Bu grafiklerde Şekil 5.5’te verilen değerlerin daha ayrıntılı görünümüne erişmek mümkündür.



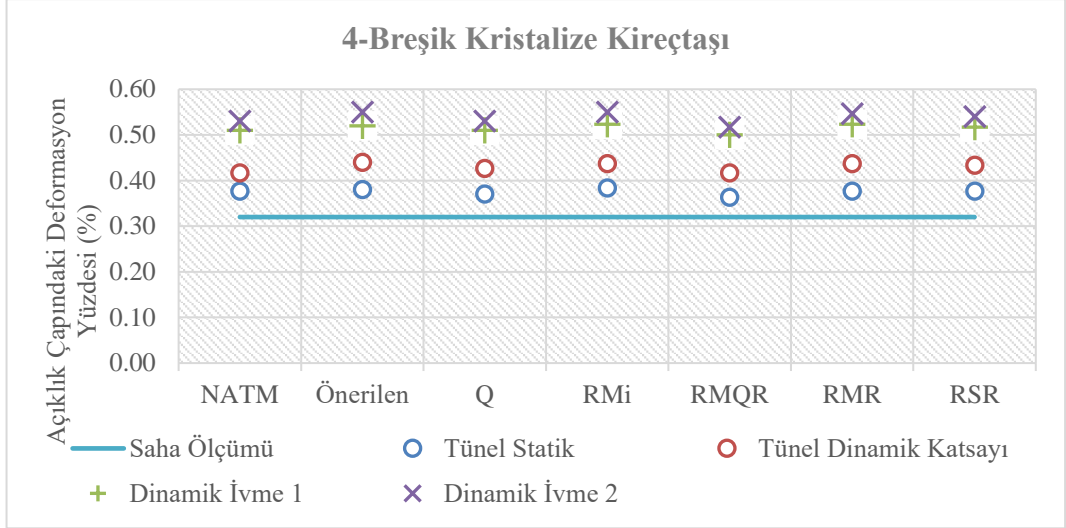
Şekil 6.2: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 1



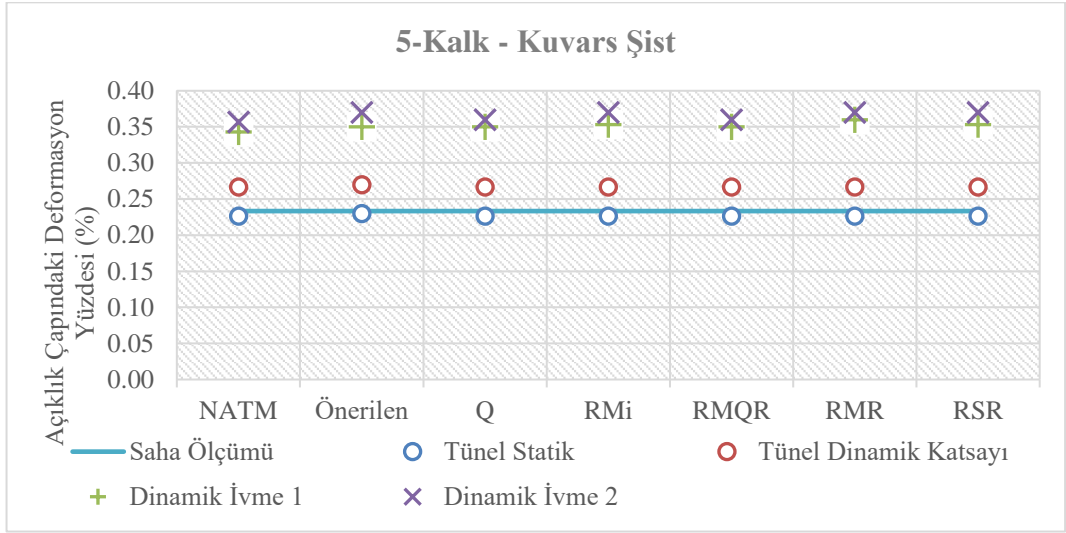
Şekil 6.3: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 2



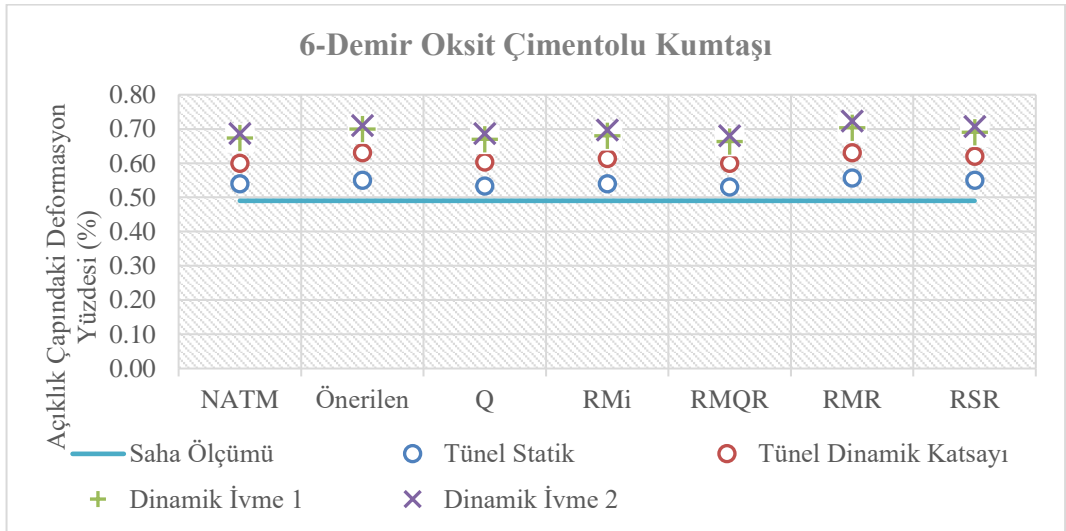
Şekil 6.4: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 3



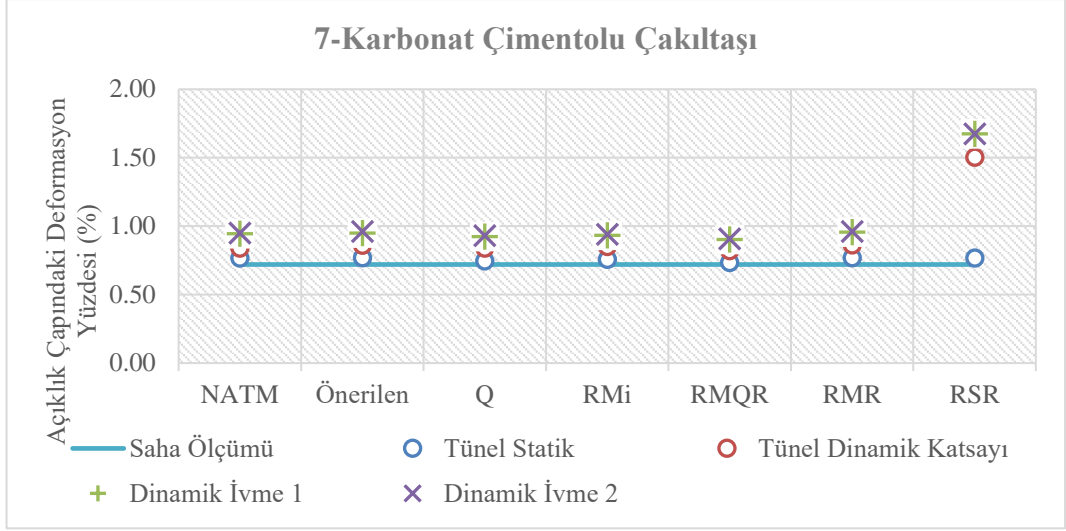
Şekil 6.5: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 4



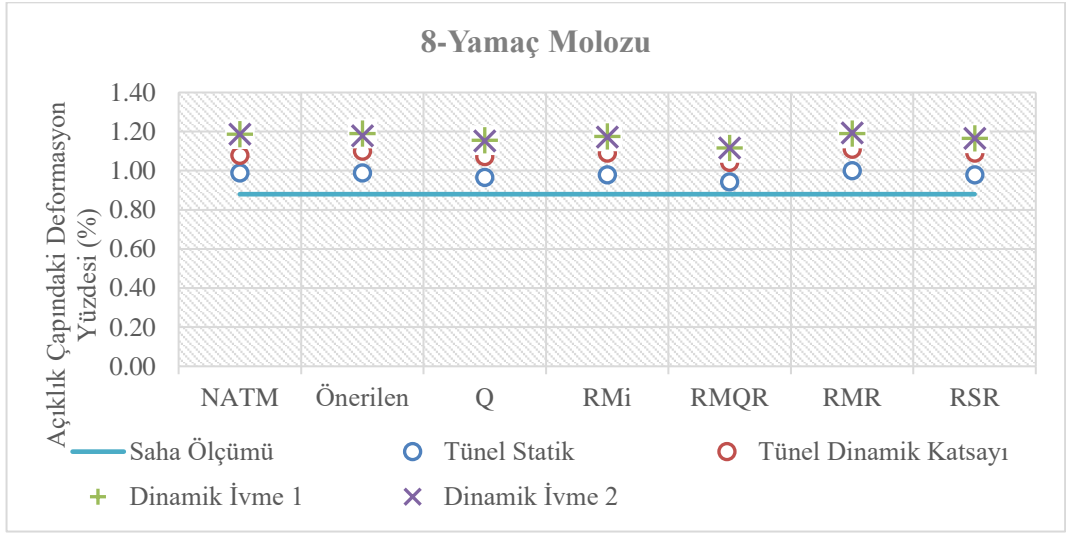
Şekil 6.6: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 5



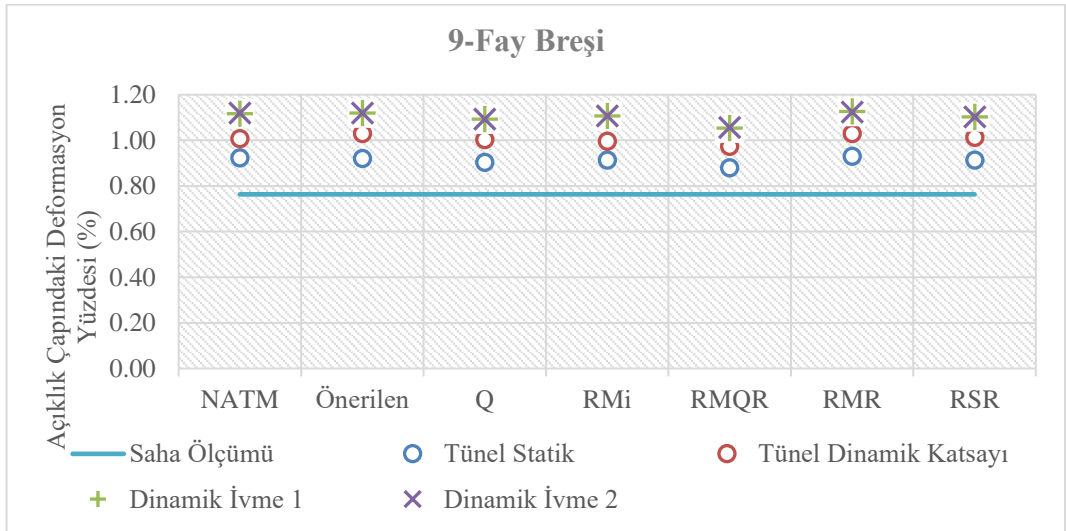
Şekil 6.7: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 6



Şekil 6.8: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 7



Şekil 6.9: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 8



Şekil 6.10: Önerilen sistemin diğer sistemler ile karşılaştırılması – 9

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, sahadan ve laboratuvardan elde edilen bilgiler ile kaya kütlelerini karakterize etmek için RMR, Q, RMQR, R_{Mi}, RSR, NATM, RQD ve GSI sistemlerinden yararlanılmıştır. Laboratuvar ve arazi deneyleri ile hesaplanan deformasyon modülü, tek eksenli basınç dayanımı, içsel sürtünme açısı, poisson oranı vb. parametreler ve destekleme önerileri sayısal analizler için girdi olarak kullanılmıştır.

NATM sistemine göre projelendirilip yapılan Honaz Tüneli'nin jeolojik birimleri için RMR, Q, RMQR, R_{Mi}, RSR, NATM sistemlerine göre puan hesaplamaları yapılmıştır. Bu altı sistem tarafından önerilen destekleme elemanlarının duraylılıkları sayısal modelleme ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar saha ölçüm değerleri ile karşılaştırıldığında tam olarak örtüşmese bile çok yakın ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. RMR, Q, R_{Mi}, RSR, RMQR tasarımlı sayısal modellerde NATM sistemine göre benzer sonuçlar gözlenmiştir. Sahada ölçülen deformasyon değerleri ile karşılaştırma yapıldığında, çok zayıf kaya kütleli olan karbonat çimentolu çakıltaşı, yamaç molozu ve fay breşi olan bölgelerde gerçek değerlere yakın sonuç elde edilse de diğer birimlere göre benzerlik açısından bu sonuçlar uzak kalmıştır. Deformasyon modülü ve diğer kaya kütle özelliklerinin tahmininde kullanılan denklemlerin çok zayıf kaya kütlelerinde gerçekten uzak sonuçlar vermesi bu denklemlerin gözden geçirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Destek sistemleri arasında RMQR sisteminin statik ve dinamik etki altında en az deformasyon değerlerini veren sistem olduğu görülmüştür. Bölgenin depremsellik verilerine dayanarak, olası bir depremde meydana gelebilecek deformasyon ve gerilme değişimlerinin nasıl olacağı hesaplanmıştır. Dinamik analizler ile olası deprem senaryolarında, tünel çevresindeki kaya kütlelerinin nasıl etkileneceği ve tünel güzergâhında meydana gelebilecek deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

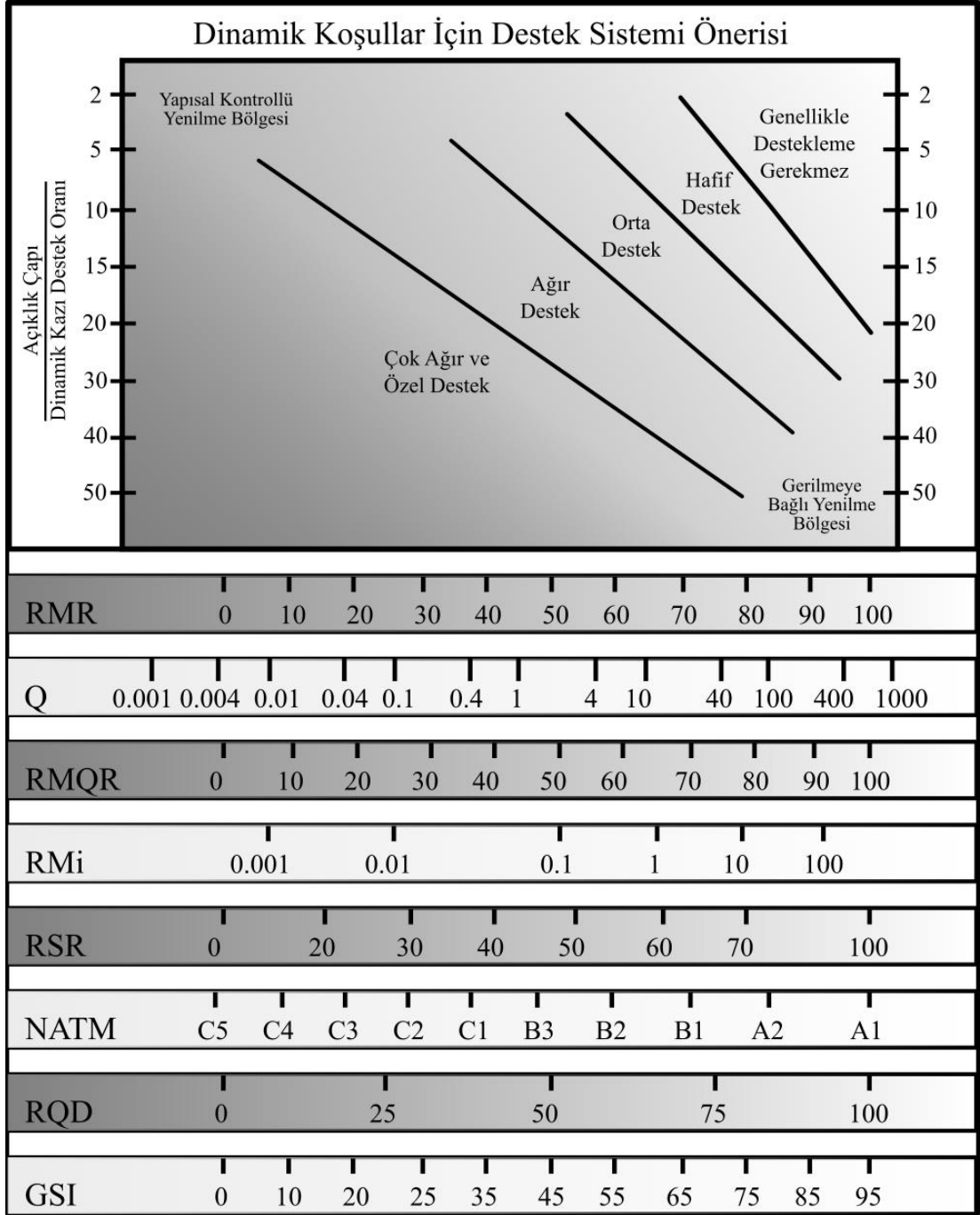
Üç boyutlu statik analiz sonuçları, iki boyutlu analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında tutarlık gösterdiği görülmüştür. Sığınma cepleri için farklı boyutta açılan tünel kesitinin depremsellik verilerine dayanarak, olası bir depremde meydana gelebilecek deformasyon ile gerilme değişimlerinin nasıl olacağı hesaplanmıştır.

Bulgular kısmında verilen analiz sonuçları incelendiğinde, yüksek gerilme altında zemin özelliği gösteren çok zayıf kaya kütlesi için en yüksek performansı RMQR sisteminin gösterdiği, bunun yanında Q ve NATM sistemlerinin de diğer sistemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Kullanılan destekleme elemanı baz alındığında, her sistemin güncellik durumuna göre kendine özgü tür destekleme elemanı önerdiği görülmektedir. RMR, RMi ve RSR sistemlerinin destekleme önerileri güncel olmadığı için analiz sonuçlarında saha ölçümlerine en uzak değerlerin elde edilmesi normal karşılanmaktadır.

Kaya özelliklerinin tahmini, kesin bir sonuç vermediğinden hem sayısal modellemeler hem de tünel yapımı sırasında elde edilen veriler bu sonuçların gerçeğe daha yakın olmasını sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında yapılan tünel davranışının analizi, sadece kaya kütle özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan görgül denklemlerin geliştirilmesine katkıda bulunmakta kalmayıp, aynı zamanda sayısal modelleme ile Q, RMR, RMQR, RMi, RSR, NATM sistemlerinin destek önerilerinin gelişmesine de katkı sağlayabilir.

Dinamik koşulları içeren destekleme önerisi geliştirilmiş ve belirlenen destek elemanları kaya kütesine uygulanıp sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar diğer sistemlerin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında birbirlerine yakın değerler verdiği görülmektedir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ışığında geliştirilen grafik (Şekil 7.1) dinamik etkiler altındaki yeraltı yapılarında, sınırlı verilerin elde edildiği projelerin destek tasarımının erken safhalarında kullanılabilir. İnşaat ve maden mühendisliği amaçlı bu kullanımlarda, çalışmada belirtilen kabuller ve sınırlamalara dikkat edilmelidir.



Şekil 7.1: Dinamik koşullar için destek sistemi önerisi grafiği

8. KAYNAKLAR

- AFAD, (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), “Tarihsel Depremler” [Çevrimiçi] <https://deprem.afad.gov.tr/tarihseldepremler>, 03 Ocak, (2021).
- AFAD, (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), “Deprem Kataloğu” [Çevrimiçi] <https://deprem.afad.gov.tr/depremkatalogu>, Erişim tarihi: 05 Ocak, (2021).
- Aksoy, C. O., Onargan, T., Kucuk, K., Genis, M., & Guney, A. “Numerical Modeling For the Umbrell Arch Application At the Shaft And Tunnel Intersection”, In ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK 2009. OnePetro, (2009).
- Aktürk, Ö., “Tünel çevresindeki deformasyon alanının 3-boyutlu sayısal modeller ile değerlendirilmesi (Necatibey Metro İstasyonu, Ankara, Türkiye)”, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, (2010).
- Alçıçek, H., Varol, B., Özkul, M., “Sedimentary facies, depositional environments and palaeogeographic evolution of the Neogene Denizli Basin of SW Anatolia”, Turkey. *Sedimentary Geology* 202, 596- 637, (2007).
- Ambraseys, N.N., “Studies in Historical Seismicity and Tectonics”, *Geodynamics Today*, Chap.2, The Royal Soc., London, (1975).
- Avusturya Standartları Ö NORM B 2203 (1994).
- Aydan, Ö., Sezaki, M. and Yazar, R., “The seismic characteristics of Turkish earthquakes”, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, June 23–28, Acapulco, Mexico, (1996).
- Aydan, O., Ulusay, R. and Kawamoto, T.: Assessment of rock mass strength for underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 34 (3/4), 777-786 (1997).
- Aydan, O., Dalgic, S.: Prediction of deformation behavior of 3 lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anatolian Fault Zone (NAFZ). *Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, 228-233 (1998).
- Aydan Ö., & Kawamoto, T., “The assessment of mechanical properties of rock masses through RMR rock classification system” In ISRM International Symposium, OnePetro, (2000).
- Aydan, Ö., & Kawamoto, T., “The stability assessment of a large underground opening at great depth”, In *Proceedings of the 17th international mining congress and exhibition of Turkey (IMCET 2001)*, Ankara, Turkey (Vol. 1, pp. 277-288). (2001).
- Aydan, Ö., “İstanbul Boğazı denizaltı geçişi için tüp tünel ile kalkan tünelin uygunluğunun karşılaştırılması”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Cilt. 25(1), s. 1-17, (2001).

- Aydan, Ö., Ohta, Y., Geniş, M., Tokashiki, N., & Ohkubo, K., “Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(6), 857-875, (2010).
- Aydan, Ö., Ohta, Y., Daido, M., Kumsar, H., Genis, M., Tokashiki, N., ... & Amini, M., “Earthquakes as a rock dynamic problem and their effects on rock engineering structures”, *Advances in rock dynamics and applications*, 341-422, (2011).
- Aydan, Ö., Ulusay, R. and Tokashiki, N., A new Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses, *Rock Mech. And Rock Eng.*, 47:12556, (2013).
- Aydan, Ö., Tokashiki, N. And Ulusay, R., Rock Mass Quality Rating (RMQR) for Rock Engineering, *International Journal of the Japanese Committee for Rock Mechanics*, 11:17-20, (2015).
- Aydin, A., Ozbek, A., & Cobanoglu, I. (2004). Tunnelling in difficult ground: a case study from Dranaz tunnel, Sinop, Turkey. *Engineering geology*, 74(3-4), 293-301.
- Barton N., Lien R., Lunde J., Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. NGI Publication No. 106, Oslo, 48, (1974).
- Barton, N., Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39 (1), 185- 216 (2002).
- Barton, N. And Grimstad, E., Forty years with the Q-system in Norway and abroad. *Fjellsprengningsteknikk, NFF, Oslo*, 25p, (2014).
- Basarir, H., Ozsan, A. & Karakus, M., “Analysis of support requirements for a shallow diversion tunnel at Guledar dam site”, *Turkey. Engineering geology*, 81(2), 131-145, (2005).
- Basarir, H., “Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site”, *Turkey. Engineering geology*, 86(4), 225-237, (2006).
- Basarir, H., “Numerical analysis of support performance and rock-support interaction considering different rock conditions”, 20th International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET 2007) (pp.303-314). Ankara, Turkey, (2007).
- Basarir, H., “Analysis of rock–support interaction using numerical and multiple regression modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1), 1-13, (2008).
- Basarir, H., Genis, M. & Ozarslan, A., “The analysis of radial displacements occurring near the face of a circular opening in weak rock mass”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(5), 771-783, (2010).
- Basarir, H., Oge, I. F., & Aydin, O. “Prediction of the stresses around main and tail gates during top coal caving by 3D numerical analysis”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 76, 88-97, (2015).
- Basarir H., Sun Y., Li G., “Gateway stability analysis by global-local modeling approach”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 113, Pages 31-40, ISSN 1365-1609, (2019).
- Bieniawski, Z.T. Engineering classification of jointed rock masses, *S. Afr. Inst. Civ. Engrs*, v.5, pp.333-344, (1973).

- Bienawski, Z.T. Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York, (1989).
- Bieniawski, Z. T. "Tunnel design by rock mass classifications". Pennsylvania State Univ University Park Dept of Mineral Engineering, (1990).
- Brown, E.T., "Strength of models of rock with intermittent joints", J. Soil Mech. Foundn Div., ASCE 96, SM6, 1935-1949, (1970).
- Calvi, V. S., "Erdbebenkatalog der Turkei und Einiger Benaehbarter Gebiete. Rapor No.276, MTA Enstitüsü, Ankara, (yayımlanmamış), (1941).
- Carranza-Torres, C., ve Fairhurst, C. Application of the convergence confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. Tunneling and Underground Space Technology, 15(2), 187-213, (2000).
- Cornell, C. A., Banon, H., Shakal, A. F., "Seismic motion and response prediction alternatives", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 7(4), 295-315, (1979).
- Çobanoğlu, İ., & Çelik, S. B., "Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67(4), 491-498, (2008).
- Çobanoğlu, İ. & Alkaya, D., "Seismic risk analysis of Denizli (Southwest Turkey) region using different statistical models. International Journal of Physical Sciences, 6(11), 2662-2670, (2011).
- Çolak, B., "Gökgöl mağarası duraylılığının analitik ve sayısal çözümlene yöntemleriyle değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, (2012).
- Demircan, Y., "Akşar regülatörü T3 tüneli (Bitlis-Hizan) destek sistemlerinin görgül ve sayısal yöntemlerle incelenmesi." Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, (2015).
- Derin Z., "Zonguldak çevresinde açılan karayolu tünellerinin çevre kaya özelliklerinin belirlenmesi ve duraylılığının değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, (2018).
- Dikmen Ü., Başokur A. T., Akkaya İ., Arısoy M. Ö., "Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi yönteminde uygun atış mesafesinin seçimi", Yerbilimleri, c. 31, sayı. 1, ss. 23-32, Şub., (2010).
- Dong, X., Karrech, A., Qi, C., Elchalakani, M. & Basarir, H., "Analytical solution for stress distribution around deep lined pressure tunnels under the water table", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 123, 104124, (2019).
- Ergin, K., Güçlü, U., Uz, Z., "Türkiye ve civarının Deprem Kataloğu". İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Arz Fiziği Enstitüsü, Yayın No.24, İstanbul, (1967).

- Erik, D., “Boğsak karayolu tünelleri (Taşucu-Mersin) jeoteknik tasarımı”, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta (2004).
- Ertuğrul, N., “Analysis of seismic behavior of underground structures: A case study on Bolu tunnels”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, (2010).
- Francis, I., “Bizans Kaynaklarına göre Orta Şark'ta Vukubulan Zelzeleler” İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü, Doktora Tezi İ.Ü.Kitaplığı No.1420, (1947).
- Frohlich, C., ve Davis, S. D., “Teleseismic b values; or, much ado about 1.0”, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98(B1), 631-644, (1993).
- Geniş, M., “Geometrik tasarım değiştirgelerinin derin yeraltı açıklıklarında yenilme bölgesinin boyutlarına etkilerinin statik ve dinamik koşullarda araştırılması”, Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, (2002).
- Geniş, M. & Gerçek, H., “A numerical study of seismic damage to deep underground openings”, In 10th ISRM Congress. OnePetro, (2003).
- Genis, M., & Aydan, Ö., “Static and dynamic stability of a large underground opening”, In Proceedings of the second symposium on Underground excavations for Transportation (in Turkish), TMMOB, Istanbul, Vol. 138, pp. 317-326, (2007).
- Geniş, M., Basarir, H., Özarlan, A., Bilir, E. & Balaban, E., “Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design”, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey. Engineering geology, 92(1-2), 14-26, (2007).
- Geniş, M., “Assessment of the dynamic stability of the portals of the Dorukhan tunnel using numerical analysis”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(8), 1231-1241, (2010).
- Geniş, M. ve Derin, Z., “Zonguldak-Üzülmez Tünellerinin Çevre Kaya Özelliklerinin Belirlenmesi ve Duraylılığının Değerlendirilmesi” Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(1), 144-151, (2016).
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., and Kayabasi, A., “Predicting the deformation moduli of rock masses”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(5), 701-710, (2003).
- Gutenberg, B., Richter, C.F., “Frequency of earthquakes in California”, Bulletin of the Seismological Society of America, 34, 185–188, (1944).
- Gurarslan, G., Karahan, H., Alkaya, D., Sari, M., & Yasar, M., “Numerical solution of advection-diffusion equation using a sixth-order compact finite difference method”, Mathematical Problems in Engineering, (2013).
- Gürocak, Z., Solanki, P. & Zaman, M. M., “Empirical and numerical analyses of support requirements for a diversion tunnel at the Boztepe dam site”, eastern Turkey. Engineering Geology, 91(2-4), 194-208, (2007).
- Gürocak, Z., “Analyses of stability and support design for a diversion tunnel at the Kapıkaya dam site”, Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70(1), 41-52, (2011).

- Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., John, I., & Yao, C. "Seismic design and analysis of underground structures" *Tunnelling and underground space technology*, 16(4), 247-293, (2001).
- Hoek, E., "Brittle failure of rock. In *Rock Mechanics in Engineering Practice*". (eds K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz), 99-124. London: Wiley, (1968).
- Hoek, E. and Brown, E.T., "Empirical strength criterion for rock masses", *J. Geotech. Engng Div., ASCE* 106 (GT9), 1013-1035, (1980).
- Hoek, E. and Brown, E.T., "Underground Excavations in Rock, London", *Instn Min. Metall*, (1980).
- Hoek, E., Wood D., Shah S. "A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses". *Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92*, (ed. J.A. Hudson), 209-214. London, Brit. Geotech. Soc. (1992).
- Hoek, E., "Strength of rock and rock masses", *ISRM News Journal*, 2 (2), 4-16, (1994).
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F.: *Support of underground excavations in hard rock*. Balkema, Rotterdam, Brookfield, p 213 (1995).
- Hoek, E., ve Brown, E.T., "Practical estimates of rock mass strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1165-1186, (1997).
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. "Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition", *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, Vol. 1, p. 267 -273*, (2002).
- Hoek, E., Diederichs, M.S.: Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43 (2), 203–215 (2006).
- Hoek, E., and Martin C. D., "Fracture initiation and propagation in intact rock—a review." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6.4, 287-300, (2014).
- Idris, M. A., Basarir, H., Nordlund, E. & Wettainen, T., "The probabilistic estimation of rock masses properties in Malmberget mine", Sweden. *The Electronic journal of geotechnical engineering*, 18(B), 269-287, (2013).
- ISRM, "Rock Characterization, Testing and Monitoring – ISRM (International Society for Rock Mechanics) Suggested Method", Pergamon, Oxford, pp. 211, (1981).
- İnan E., Çolakoğlu Z., Koç N., Bayülke N., Çoruh E., "1976- 1996 Yılları Arası İvme Kayıtları Olan Deprem Kataloğu", T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 98 s., (1996).
- IRIS, (Incorporated Research Institutions for Seismology), "IEB – IRIS Earthquake Browser" [Çevrimiçi] <http://ds.iris.edu/ieb/>, 03 Ocak, (2021).
- Ishimoto, M. and Iida, K., "Observations of Earthquakes Registered with the Micro Seismograph Constructed Recently", *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 17, 443-478, (1939).
- Kabwe, E., Karakus, M. & Chanda, E. K., "Time-dependent solution for non-circular tunnels considering the elasto-viscoplastic rockmass", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 133, 104395, (2020).

- Kadirioğlu, F. T. ve Kartal, R. F., “The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900-2012)”, *Turkish Journal of Earth Sciences* , 25 (4) , 300-310, (2016).
- Karakaplan, E., Basarir, H., & Wesseloo, J. “Theoretical investigation of the effect of stress on the performance of support systems based on Rock Mass Rating (RMR) support recommendations”, In *Proceedings of the Eighth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*, Luleå, Sweden (pp. 12-14), (2016).
- Karakaplan, E., Alkaya, D., & Başarır, H. “Evaluation of the Applicability of the RMQR System for Honaz Tunnel”, In *Proceedings of the 27th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET 2022*, (2022).
- Karakaplan, E., & Alkaya, D. “Seismic Hazard Analysis of Honaz Tunnel Environment”, *Fresenius Environmental Bulletin*, 31(8 B), 8654-8662, (2022).
- Karakus, M. & Fowell, R. J., “FEM analysis for the effects of the NATM construction technique on settlement above shallow soft ground tunnels”, In *ISRM International Symposium. OnePetro*, (2000).
- Karakus, M., & Fowell, R. J., “Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 514-524, (2005).
- Karakus, M., & Fowell, R. J., “2-D and 3-D finite element analyses for the settlement due to soft ground tunnelling”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3), 392-392, (2006).
- Karakus, M., Ozsan, A. & Başarır, H. “Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay”, *Turkey. Bull Eng Geol Environ* 66, 71–79, (2007).
- Karakus, M. “Numerical modelling for NATM in soft ground”, *Lambert Academic Publishing*, (2012).
- Kasimzade, A. A., Abrar, O., Kuruoglu, M., & Atmaca, G. (2020). *New Structural Seismic Isolation for Nuclear Containment Structures. Science and Technology of Nuclear Installations*, (2020).
- Kastner, H., “Ober den echten Gebirgsdruck beim Bau tiefliegender Tunnel”, *Ost. Bauzeitschrift* 10-11, (1949).
- Kaw, A., Kalu, E., "Numerical Methods with Applications: Chapter 04.06 Gaussian Elimination" (1st ed.). University of South Florida, (2010).
- Kayabasi, A., Gokceoglu, C., ve Ercanoglu, M., “Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 55-63, (2003).
- Kaymakçı, N., “Kinematic development and paleostress analysis of the Denizli Basin (Western Turkish): implications of spatial variation of relative paleostress magnitudes and orientations”, *Journal of Asian Earth Sciences* 27, 207-222, (2006).

- Koçyiğit, A., "The Denizli graben-horst system and the eastern limit of the Western Anatolian continental extension: basin fill, structure, deformational mode, throw amount and episodic evolutionary history", SW Turkey. *Geodinamica Acta* 18, 167- 208, (2005).
- Konak, N., Şenel M., "1/500.000 Türkiye Jeoloji Haritası Denizli Paftası", (Şenel, M., (ed.)) Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2002.
- Korkmaz T., "Zemin iyileştirmesinin hâkim titreşim periyodu ve zemin büyütme katsayısı'na etkisi" Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Denizli, (2012).
- Kramer, S. L., "Geotechnical earthquake engineering", Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall. (Çeviri; Kâmil Kayabalı, 2003), 1996.
- KRDAE BDTİM, (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi), "B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi" [Çevrimiçi] <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/default.asp>, 03 Ocak, (2021).
- Marinos P. and Hoek E., "Gsi: A Geologically Friendly Tool For Rock Mass Strength Estimation." Paper presented at the ISRM International Symposium, Melbourne, Australia, November (2000).
- Mindlin, R. D., "Stress Distribution around a Tunnel", *Proc. Am. Soc. Civ. Eng. Apr.* 6/9- 642 (1939).
- Noda, S., Uwabe, T., Chiba, T., "Relation between seismic coefficient and ground acceleration for gravity quay wall." Report of the Port and Harbour Research Institute, 14(4), 67-111, (1975).
- Noh, G., ve Bathe, K. J. "An explicit time integration scheme for the analysis of wave propagations", *Computers & structures*, 129, 178-193, (2013).
- Nurnur, H., "Büyük kesitli tünel kazısı sırasında çevre yapılarında meydana gelen oturmaların sayısal modelleme ile analizi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2016).
- Okay, A., "Geology of the Menderes Massif and the Lycian Nappes South of Denizli, Western Taurides". *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 109, 37-51, (1989).
- Owen D. R. J. and Hinton E., "Finite Elements in Plasticity- Theory and Practice", Pineridge Press, Swansea, (1980).
- Önorm B2203, Untertagebauarbeiten Werkvertragsnorm, Österreichischer Normen, Österreich, (1994).
- Özkaymak, Ç., "Tectonic analysis of the Honaz Fault (Western Anatolia) using geomorphic indices and the regional implications", *Geodinamica Acta*, 27(2-3), 110-129, (2015).
- Özsan, A., & Başarır, H., "Support capacity estimation of a diversion tunnel in weak rock", *Engineering geology*, 68(3-4), 319-331, (2003).
- Özsan, A. & Karakus M., "Site investigations and convergence measurements for a twin metro tunnel driven in Ankara clay, Turkey." *The Geological Society of London*, (2006).

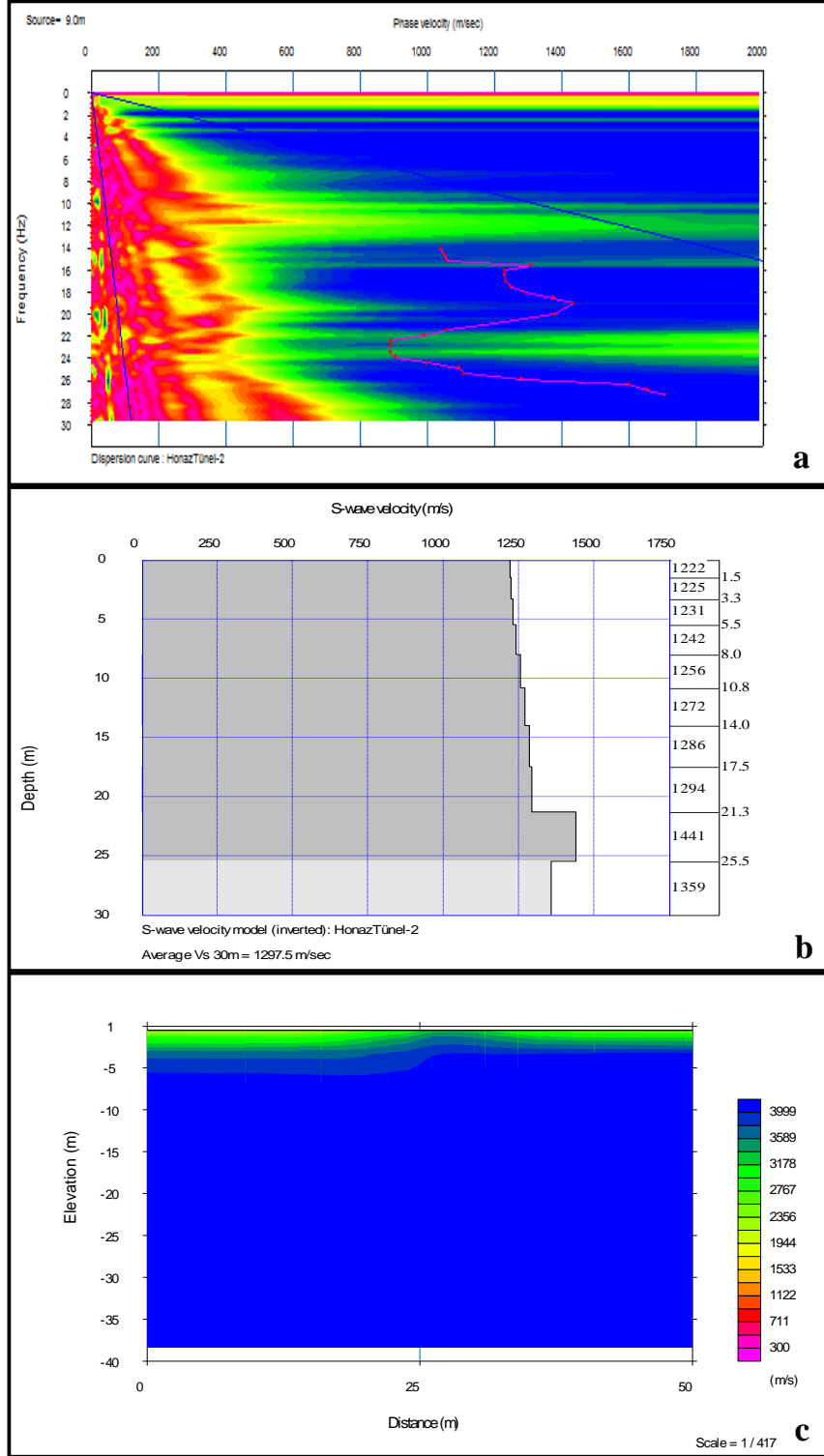
- Özsan, A., Öcal, A., Akın, M., & Başarır, H., “Engineering geological appraisal of the Sulakyurt dam site”, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(4), 483-492, (2007).
- Palmström, A., RMI – a rock mass characterization system for rock engineering purposes. PhD thesis, University of Oslo, Department of Geology, 405 p. (1995).
- Palmström, A., and Singh, R., “The deformation modulus of rock masses— comparisons between in situ tests and indirect estimates”, *Tunnelling and underground space technology*, 16(2), 115-131, (2001).
- Pietruszczak, S., “Fundamentals of Plasticity in Geomechanics”, Boca Raton, FL: CRC Press, (2010).
- Poisson, S.D., “Recherches Sur la Probabilitedes Jugements en Matieres Criminelles et Matiere Civile”, Paris: Elibron Classic Series, (1838).
- Rabcewicz, L., The New Austrian Tunneling Method. *Water Power*, 453-457, (1964).
- Rocscience, RS2 User Guide [Çevrimiçi] <https://www.rocscience.com/help/rs2/verification-theory>, (2020).
- Rocscience, RS3 User Guide [Çevrimiçi] <https://www.rocscience.com/help/rs3/verification-theory>, (2021).
- Serafim, J.L., Pereira, J.P.: Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proceedings International Symposium Engineering Geology and Underground Construction*, vol. 1. Balkema, Rotterdam, 1133– 1142 (1983).
- Sert, S., Önalp, A., & Arel, E., “Sayısal çözümlerde zemin özelliklerindeki değişimin sonuçlara etkisi”, *ZMTM*, 13, 471-482, (2010).
- Scholz, C. H., “The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes”, *Bulletin of the seismological society of America*, 58(1), 399-415, (1968).
- Sun, S., “Denizli-Uşak arasının jeolojisi ve linyit olanakları”, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No 9985*, 1-92, Ankara, (yayımlanmamış), (1990).
- Shen, J., Karakus, M., & Xu, C., “A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses”, *Tunnelling and underground space technology*, 32, 245-250, (2012).
- Şimşek, Ş., “Denizli Sarayköy-Buldan Alanının Jeolojisi ve Jeotermal Enerji Olanakları”, *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 3 (1-2), 1982.
- Şimşek, Ş., “Denizli-Kızıldere-Tekkehamam-Tosunlar-Buldan-Yenice alanının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları”, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 7846*, 85s, Ankara (yayımlanmamış), (1984).
- TBDY, “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”, Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, bölüm 16, 343-344, (2018).
- T.C. Karayolları Teknik Şartnamesi, kısım 350, 1-70, (2013).
- Tong, J., Karakus, M., Wang, M., Dong, C., & Tang, X., “Shear strength characteristics of shotcrete–rock interface for a tunnel driven in high rock temperature environment”, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2(4), 331-341, (2016).

- Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H. and Gökçeoglu, C., “An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey”, *Engineering Geology*, 74, 265–291, (2004).
- Ulusay, R., Sönmez H., *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özelliği 2. Cilt*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları No:60, Ankara, 95-255, (2007).
- Urbancic, T.I., Trifu, C-I., Long, J.M. and Young, R.P., “Space-time correlations of b values with stress release. *Pure and Applied Geophysics*, 139, 3/4, 449-462, (1992).
- Üçer, S., “Tünellerin sismik davranışı ve sismik hasar değerlendirilmesi: Bolu tünelleri üzerine bir çalışma” Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, (2012).
- Ünal, E., *Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs*. Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University p. 113, Rotterdam: A. A. Balkema (1983).
- Westaway, R., “Neogene evolution of the Denizli region of Western Turkey”, *Journal of Structural Geology* 15, 37-53, (1993).
- Westerhaus, M., Wyss, M., Yilmaz, R. and Zschau, J., “Correlating variations of b values and crustal deformations during the 1990s may have pinpointed the rupture initiation of the Mw=7.4 Izmit earthquake of 1999 August 17”, *Geophysical Journal International*, 148, 1, 139-152, (2002).
- Wiemer, S., and Wyss, M., “Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times?”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B7), 15115-15128, (1997).
- Wyss, M. and Matsumura, S., “Most likely locations of large earthquakes in the Kanto and Tokai areas, Japan, based on the local recurrence times”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 131(2), 173-184, (2002).
- Zuo, J. & Shen, J., “The Hoek-Brown Failure Criterion--From Theory to Application”, Singapore: Springer, (2020).

EKLER

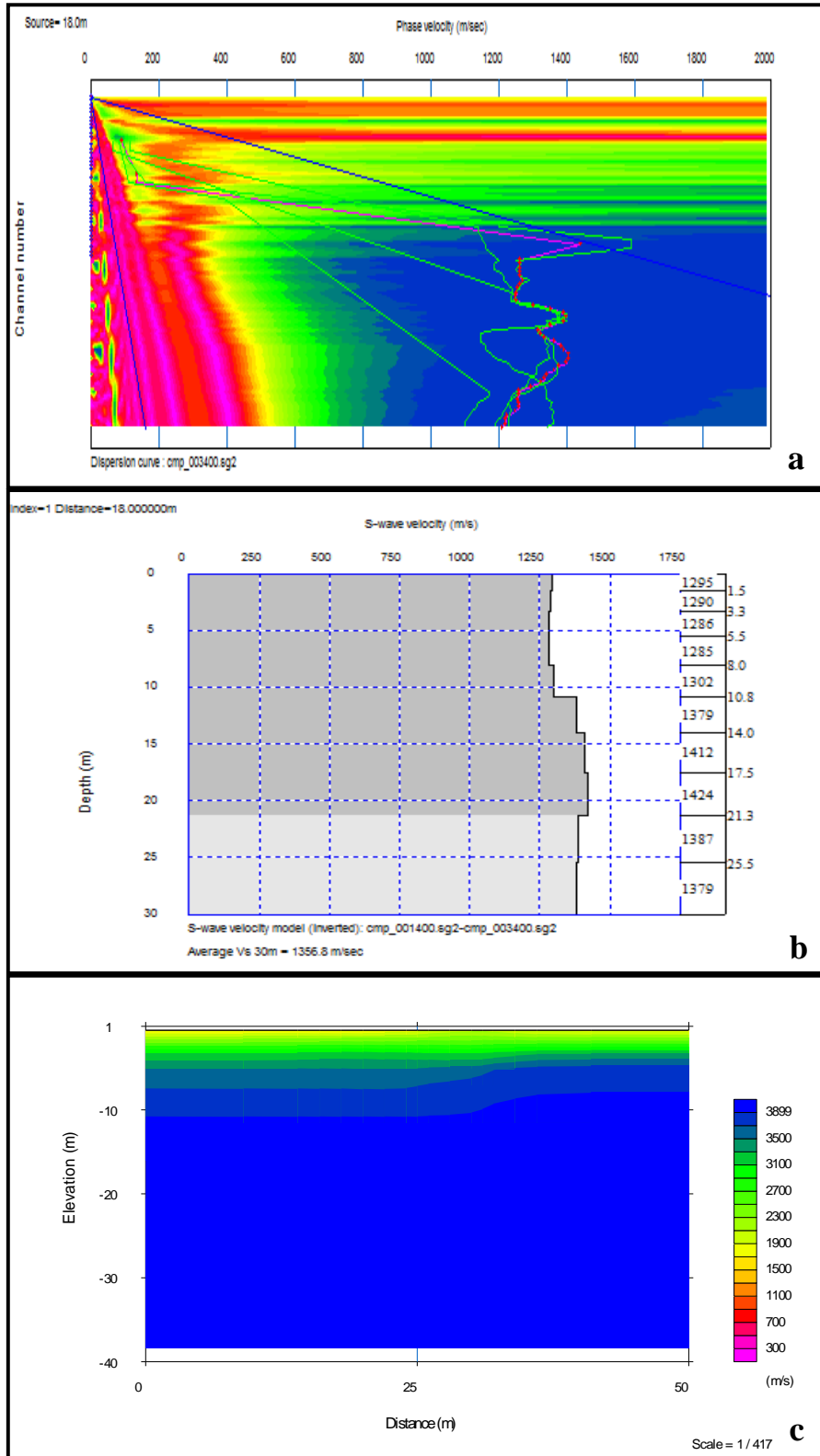
9. EKLER

EK A.1 Sismik-1 ölçümüne ait grafikler



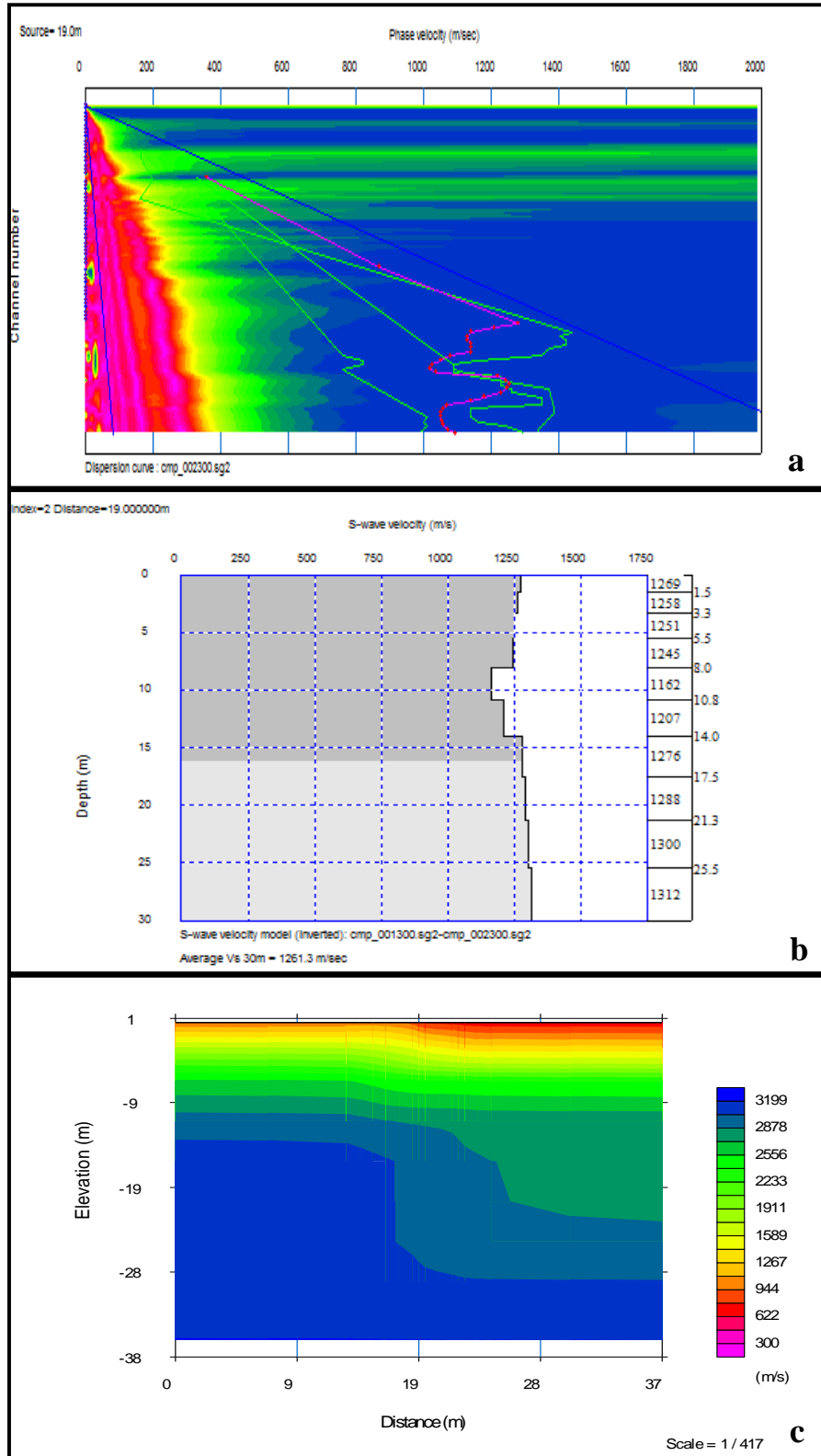
Şekil A.1: Sismik-1 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)

EK A.2 Sismik-2 ölçümüne ait grafikler



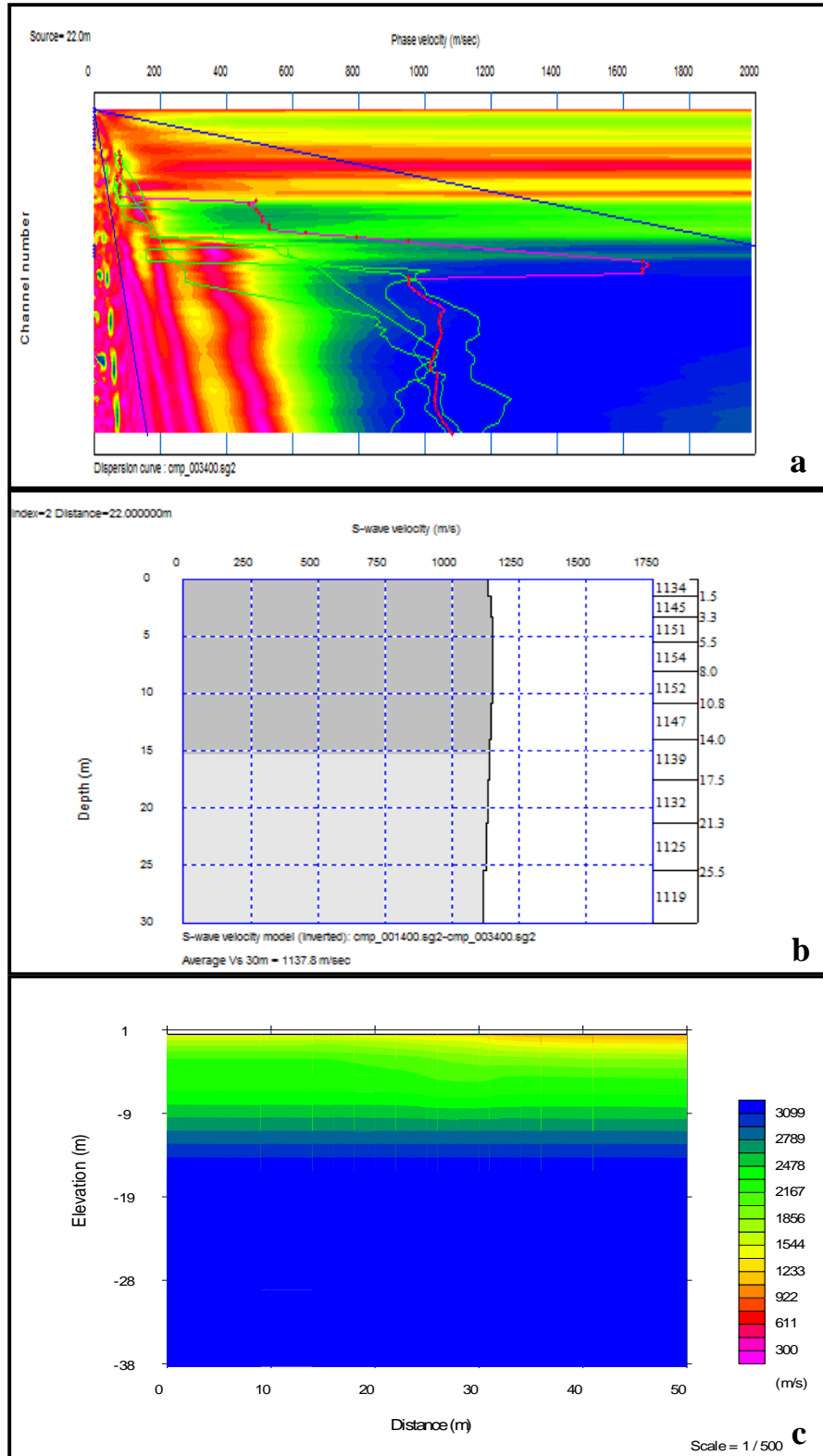
Şekil A.2: Sismik-2 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)

EK A.3 Sismik-3 ölçümüne ait grafikler



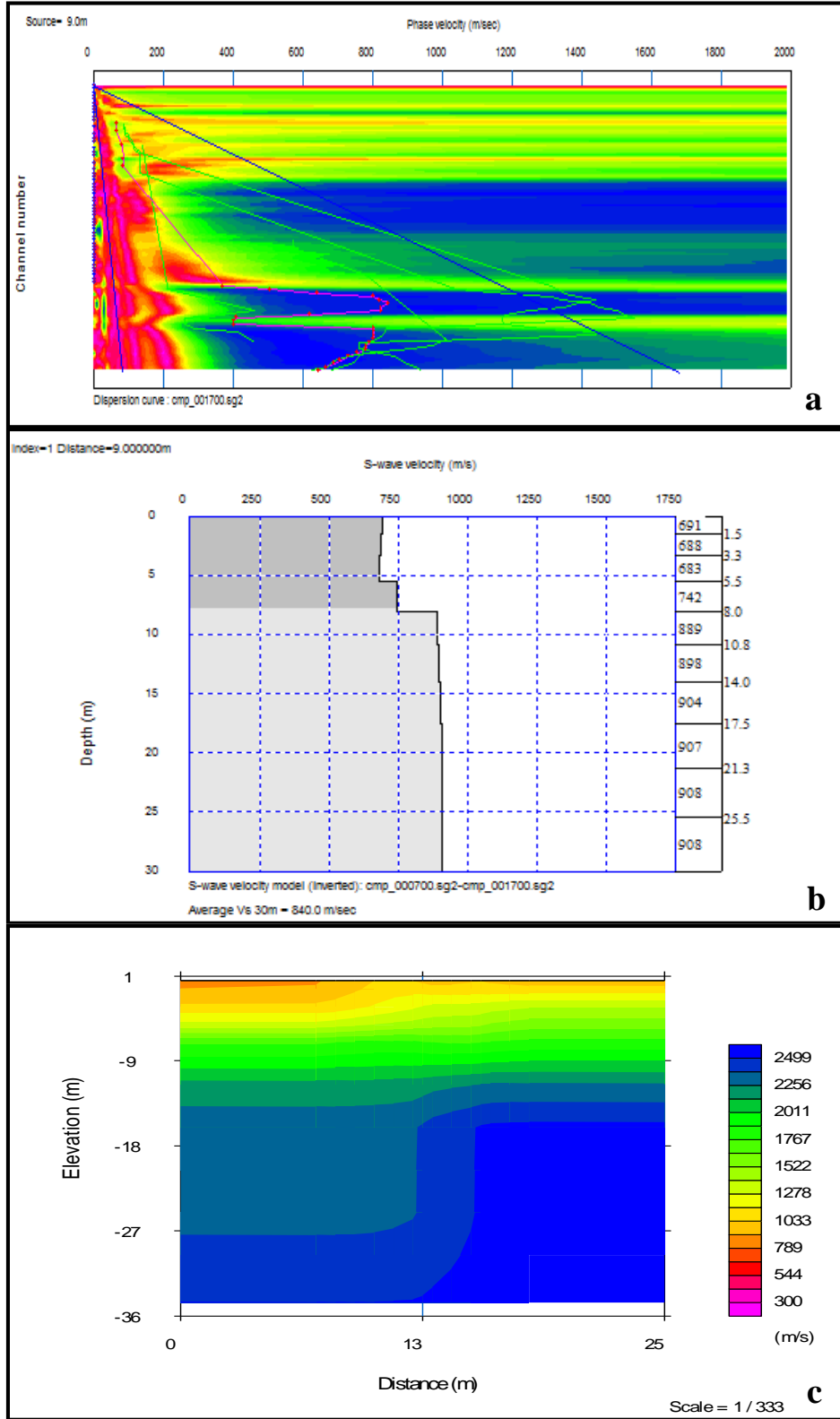
Şekil A.3: Sismik-3 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)

EK A.4 Sismik-4 ölçümüne ait grafikler



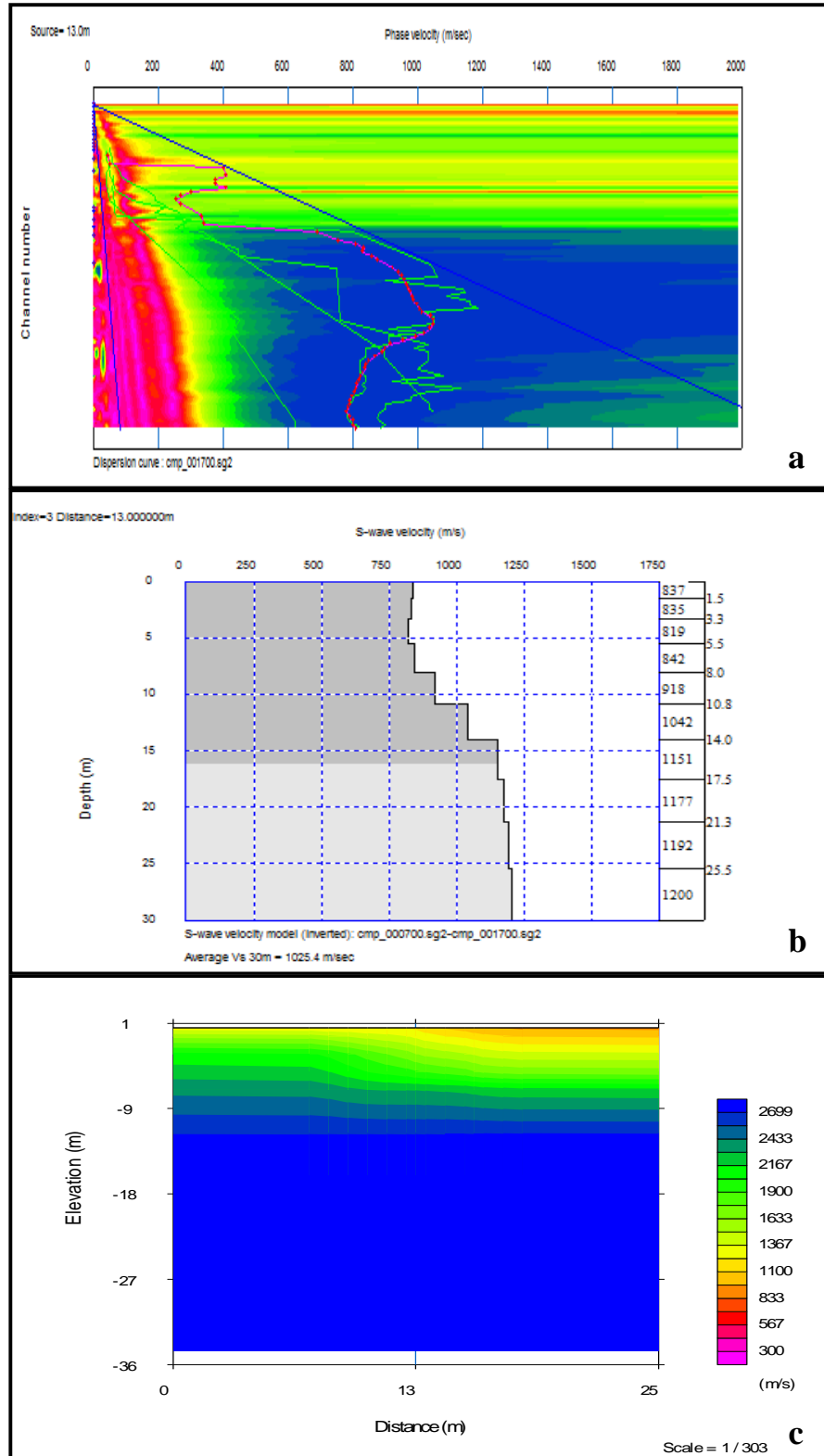
Şekil A.4: Sismik-4 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)

EK A.5 Sismik-5 ölçümüne ait grafikler



Şekil A.5: Sismik-5 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)

EK A.6 Sismik-6 ölçümüne ait grafikler



Şekil A.6: Sismik-6 ölçümüne ait, Faz – Hız grafiği (a), Vs-dalgası hız – derinlik modeli (b), Vp-dalgası hız – derinlik modeli (c)

EK B.1 Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler

Tablo B.1: Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (Barton ve Grimstad 2014)

1-	Kaya Kalite Göstergesi	RQD
A	Çok zayıf	0-25
B	Zayıf	25-50
C	Orta	50-75
D	İyi	75-90
E	Çok iyi	90-100
2-	Eklem takım sayısı	Jn
A	Masif, hiç veya birkaç eklem	0.5-1
B	Bir eklem takımı	2
C	Bir eklem takımı + düzensiz eklemler	3
D	İki eklem takımı	4
E	İki eklem takımı + düzensiz eklemler	6
F	Üç eklem takımı	9
G	Üç eklem takımı + düzensiz eklemler	12
H	Dört veya daha fazla eklem takımı, düzensiz veya çok eklemler, “küp şeker”, vb.	15
J	Tamamen ufalanmış kaya, zemin gibi	20
3-	Eklem pürüzlülük durumu	Jr
	(a) Eklem yüzeyleri temasta veya	
	(b) 10 cm’den az bir makaslama hareketiyle temasın sağlanması hali	
A	Süreksiz eklemler	4
B	Dalgalı-pürüzlü	3
C	Dalgalı-düz	2
D	Dalgalı-cilalı	1.5
E	Düzlemsel-pürüzlü	1.5
F	Düzlemsel-düz	1
G	Düzlemsel-cilalı	0.5
	(c) Makaslama ile eklem yüzeylerinin teması sağlanmadığında	
H	Eklem yüzeylerinin temasını önleyecek kadar kalın kil dolgusu	1
J	Eklem yüzeylerinin temasını önleyecek kalınlıkta kum, çakıl ve breş dolgusu	1
4-	Eklem ayrışma durumu	Ja
	(a) Eklem yüzeyleri temasta	
A	Sıkıca kaynamış, sert yumuşamayan geçirimsiz dolgu	0.75
B	Ayrışmamış eklem yüzeyleri, sadece yüzey boyanması	1
C	Az ayrışmış eklem yüzeyleri, yumuşamayan yüzey mineralleri, kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya, vb.	2
D	Siltli veya kumlu yüzey killeri, kil içeriği az (yumuşamayan)	3
E	Yumuşamayan veya düşük sürtünme açılı yüzey killeri, kaolin, mika, klorit, talk, jips, ve grafit, vs. az miktarda şişen (1-2 mm veya daha az kalınlıkta, süreksiz yüzey dolgusu)	4
	(b) 10 cm’den az bir makaslama hareketiyle eklem yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde	
F	Kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya, vs.	4

EK B.1 Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (devamı)

Tablo B.1: Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (devamı)

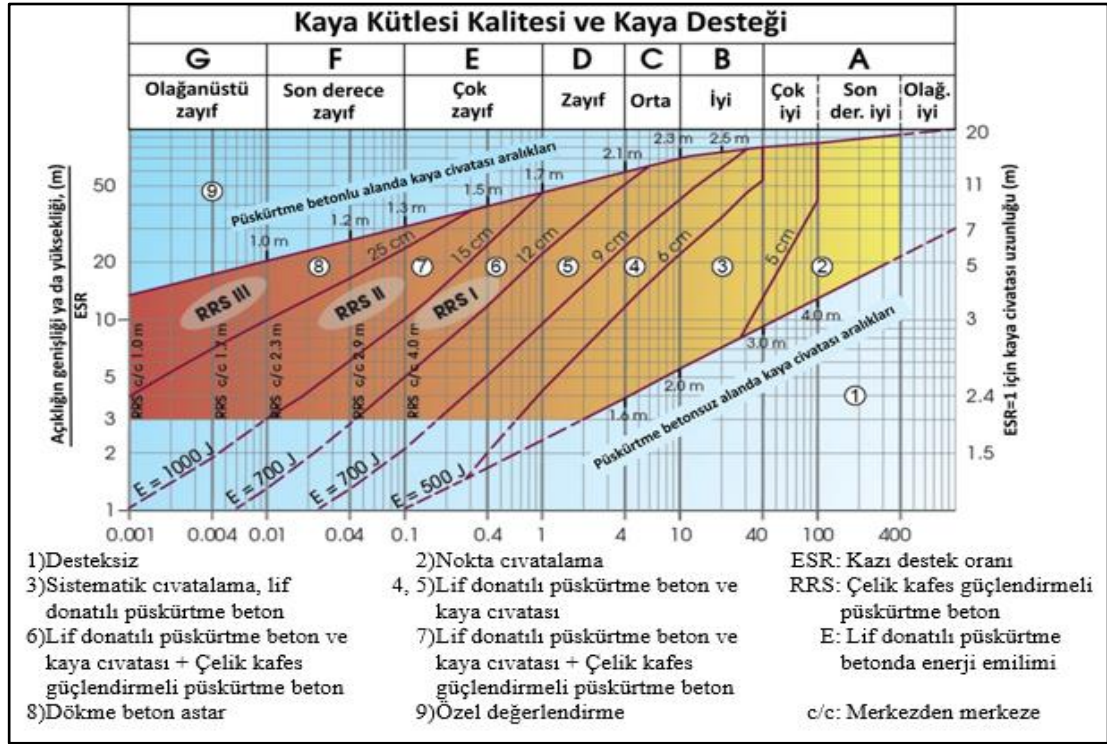
4-	Eklem ayrışma durumu	Ja
G	Çok aşırı konsolide, yumuşamayan kil dolgulu (sürekli, kalınlığı 5 mm'den az dolgu)	6
H	Orta veya az aşırı konsolide, yumuşamayan kil dolgulu (sürekli, kalınlık 5 mm'den az)	8
J	Şişen kil dolgusu, montmorillonit, vb. (sürekli, kalınlık 5 mm'den az, Ja değeri şişme özelliği olan kil boyutundaki parçaların yüzdesine ve su durumuna bağlıdır.)	8-12
	(c) Makaslama hareketiyle eklem yüzeylerinin teması sağlanmadığında	
K, L, M	Ufalanmış veya parçalanmış kaya ve kil bantları veya zonları (Kil özellikleri için sırasıyla G, H, J koşullarına bakınız)	6 veya 8, 8-12
N	Silt veya kum boyutunda killerden oluşan bantlar veya zonlar, kil içeriği az	5
O, P, R	Kalın, sürekli kil bantları veya zonları (kil özellikleri için G, H, J koşullarına bakınız)	10-13 veya 13-20
5-	Eklem suyu indirgeme faktörü	Jw
A	Kuru kazılar veya yer yer az su akışı, dakikada 5lt'den az	1
B	Orta miktar su akışı veya basıncı, dolgu yer yer su ile yıkanıp akarak eklem boşalabilir	0.66
C	Kendi kendini tutabilen kayalarda dolgusuz eklemlerden çok miktarda su akışı veya basıncı	0.5
D	Çok miktarda su akışı ve basıncı, dolgu hemen tümüyle yıkanıp akmış	0.33
E	Patlatma ile ortaya çıkıp zamanla azalan çok aşırı su akışı veya basıncı	0.2-0.1
F	Zamanla azalmayan çok aşırı su akışı ve basıncı	0.1- 0.05
6-	Gerilme indirgeme faktörü	SRF
	(a) Kazıyı etkileyen veya kesen ve kazı oluşturulduğunda kaya kütlelerinde gevşemelere neden olabilecek zayıf zonlar	
A	Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya veya kil içeren birden fazla zayıflık zonu, çok gevşek kaya kütleli (derinlik önemli değil)	10
B	Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya veya kil içeren tek zayıflık zonu (derinlik 50m'den az)	5
C	Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya veya kil içeren tek zayıflık zonu (derinlik 50m'den fazla)	2.5
D	Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada birden fazla makaslama zonu, kaya kütlelerinde gevşeme (derinlik önemli değil)	7.5
E	Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada tek makaslama zonu (derinlik 50m'den az)	5
F	Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada tek makaslama zonu (derinlik 50m'den fazla)	2.5
G	Gevşek, açık (dolgusuz) eklemler, çok eklemli veya "küp şeker" gibi (derinlik önemli değil)	5
	(b) Kendi kendini tutabilen kaya, kaya gerilmesi problemleri	

EK B.1 Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (devamı)

Tablo B.1: Q değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (devamı)

6-	Gerilme indirgeme faktörü	SRF
H	Az derin, düşük gerilme	2.5
J	Orta derecede kaya gerilmesi	1
K	Yüksek gerilme, çok sıkı yapısal unsurlar	0.5-2
L	Masif kayada orta derecede kaya patlamaları	5-10
M	Masif kayada aşırı derecede kaya patlamaları	10-20
	(c) Ezilen kaya; kendi kendini tutamayan kayanın yüksek gerilme altında plastik deformasyonu	
O	Ezilen kayada aşırı derecede gerilme	10-20
	(d) Şişen kaya; suyun varlığına bağlı olarak şişmede kimyasal etkenlik durumu	
P	Şişen kayada orta derecede gerilme	5-10
R	Şişen kayada aşırı derecede gerilme	10-20

EK B.2 Q puanına göre önerilen destekleme türü ve miktarı



Şekil B.1: Q değeri hesaplanmış kaya kütlelerine önerilen destekleme türü ve miktarı (Barton ve Grimstad 2014)

EK C.1 RMR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler: A

Tablo C.1: RMR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler: A (Bieniawski 1989)

A. Sınıflama Parametreleri ve Değerlendirmeleri									
Parametre		Değer Aralığı							
1	Kaya malzemesi	Nokta yükü dayanım indeksi	>10	4-10	2-4	1-2	Düşük aralık için tek eksenli basınç dayanımı		
	Kaya dayanımı	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50			5-25
Puan			15	12	7	4	2	1	0
2	Kaya kalite göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
Puan			20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik aralığı		>2m	0.6-2m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
Puan			20	15	10	8	5		
4	Süreksizlik koşulu		Çok pürüzlü yüzeyler Sürekli değil Ayrılma yok Bozunmamış kaya yüzeyleri	Az pürüzlü yüzeyler Ayrılma <1 mm. Hafifçe bozunmuş yüzeyler	Az pürüzlü yüzeyler Ayrılma <1 mm. Oldukça bozunmuş yüzeyler	Kayganlaşmış yüzeyler ya da Dolgu kalınlığı <5 mm ya da 1-5 mm ayrılmış yüzeyler, Sürekli	Yumuşak dolgulu >5 mm kalınlıkta ya da ayrılma >5 mm Sürekli		
Puan			30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	Her 10m tünel boyundaki akış miktarı (lt/dk)	Yok veya	<10 veya	10-25 veya	25-125 veya	>125 veya		
		Süreksizlik su basıncı/Büyük asal gerilme	0 veya	<0.1 veya	0.1-0.2 veya	0.2-0.5 veya	> 0.5 veya		
	Genel koşullar	Kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı			
Puan			15	10	7	4	0		

EK C.2 RMR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler: B – F

Tablo C.2: RMR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler: B, C, D, E, F (Bieniawski 1989)

B. Süreksizlik Konumlarına Göre Puan Düzeltmeleri					
Süreksizliklerin doğrultu ve eğim yönelimleri	Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puanlar					
Tüneller ve madenler	0	-2	-5	-10	-12
Temeller	0	-2	-7	-15	-25
Şevler	0	-5	-25	-50	-60
C. Toplam Puanları Belirlenen Kaya Sınıfları					
Puan	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıf numarası	I	II	III	IV	V
Kaya tanımı	Çok iyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok zayıf
D. Kaya Sınıflarının Anlamları					
Sınıf numarası	I	II	III	IV	V
Ortalama ayakta kalma süresi	15m açıklık için 20 yıl	10m açıklık için 1 yıl	5m açıklık için 1 hafta	2.5m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dk
Kaya kütesinin kohezyonu (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Kaya kütesinin sürtünme açısı	>45°	35-45°	25-35°	15-25°	<15°
E. Süreksizlik Koşullarının Sınıflandırılması İçin Kılavuzlar					
Süreksizlik uzunluğu	<1 m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Puan	6	4	2	1	0
Ayrıklık	Yok	<0.1 mm	0.1-1 mm	1-5 mm	>5 mm
Puan	6	5	4	1	0
Pürüzlülük	Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Pürüzsüz	Parlak yüzeyli
Puan	6	5	3	1	0
Dolgu	Yok	Sert <5 mm	Sert >5 mm	Yumuşak <5 mm	Yumuşak >5 mm
Puan	6	4	2	2	0
Bozunma	Bozunmamış	Az bozunmuş	Orta bozunmuş	Çok bozunmuş	Ayrıışmış
Puan	6	5	3	1	0
F. Süreksizlik Doğrultu ve Eğim Konumlarının Tünelcilikteki Etkisi					
Doğrultu tünel eksenine dik			Eğime karşı ilerleme		
Eğim yönünde ilerleme			Eğime karşı ilerleme		
Eğim 45-90°	Eğim 20-45°		Eğim 45-90°	Eğim 20-45°	
Çok uygun	Uygun		Orta	Uygun değil	
Doğrultu tünel eksenine paralel			Doğrultuya bakılmaksızın		
Eğim 45-90°	Eğim 20-45°		Eğim 0-20°		
Orta	Hiç uygun değil		Orta		

EK C.3 RMR değerine göre destek sistemi seçimi kılavuzu

Tablo C.3: RMR değerine göre destek sistemi seçimi kılavuzu (Bieniawski, 1989)

Kaya kütleli sınıfı, RMR değeri	Desteksiz duraylı kalabilme süresi (açıklık)	Kaya Cıvataları		Püskürtme Beton			Çelik Bağlar	
		Aralık	Ek tahkimat	Kemer	Yan duvar	Ek tahkimat	Türü	Aralık
I Çok sağlam 81-100	10 yıl (5m)	Genellikle tahkimat gerekmez						
II Sağlam 61-80	6 ay (4m)	1.5 – 2.0m	Tavan ke- merinde yer yer hasır çelik	50 mm	-	-	Ekonomik değil	
III Orta derece sağlam 41-60	1 hafta (3m)	1.0 – 1.5m	Çelik hasır ve gerekti- ğinde ke- merde 30 mm'lik püskürtme beton	100 mm	50 mm	Gerekli du- rumlarda çelik hasır ve kaya saplamaları	Hafif çelik bağ profiller	1.5- 2.0m
IV Zayıf 21-40	5 saat (1.5m)	0.5 – 1.0m	Çelik hasır ve gerekti- ğinde kemer ve yan du- varlarda 30- 50 mm'lik püskürtme beton	150 mm	100 mm	Çelik hasır ve 1.5m aralıkla 3m uzunluğunda kaya sap- lamaları	Orta aralıklı profiller ve 50 mm kalınlı- ğında püs- kürtme beton	0.75- 1.5m
V Çok zayıf 0-20	10 dakika (0.5m)	Önerilmez		200 mm	150 mm	Çelik hasır, kaya saplamaları ve hafif çelik bağlar	Ağır çelik pro- filler yerleştil- dikten hemen sonra 80 mm kalınlığında püskürtme beton	0.7m

EK D.1 RMQR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler

Tablo D.1: RMQR değeri hesaplanmasında kullanılan parametreler (Aydan ve diğ. 2014)

Bozunma Derecesi (DD)	Taze	Lekli Yüzey	Az Bozunmuş	Orta Derecede Bozunmuş	İleri Derecede Bozunmuş	Tamamen Bozunmuş					
Puan (R _{DD})	15	12	9	6	3	1-0					
Süreksizlik Takım Sayısı (DSN)	Yok (sağlam veya masif)	Tek Takım + Rasgele	İki Takım + Rasgele	Üç Takım + Rasgele	Dört Takım + Rasgele	Ezilmiş veya Paramparça					
Puan (R _{DSN})	20	16	12	8	4	1-0					
Süreksizlik Aralığı veya RQD (DS)	Yok veya SA ≥24m	24m> SA ≥6m	6m>SA ≥1.2m	1.2m> SA ≥0.3m	0.3m> SA ≥0.07m	0.07m> SA					
	RQD=100			100>RQD≥75	75>RQD≥35	35>RQD					
Puan (R _{DS})	20	16	12	8	4	1-0					
Süreksizliklerin Durumu (DC)	Yok	İyileşmiş veya Aralıklı	Pürüzlü	Nispeten Pürüzsüz ve Sıkı	İnce Dolgulu veya Ayrık Kaygan Yüzey (t<5 mm)	Kalın Dolgulu veya Ayrık (t>10 mm)					
Puan (R _{DC})	30	26	22	15	7	1					
veya alternatif olarak, “Yok” ve “İyileşmiş veya Aralıklı” sınıf yüzeyleri hariç											
Süreksizlik Durumu (SD) R _{SD} = R _{SDA} + R _{SDD} + R _{SDP}	Açıklık	Yok veya Çok Sıkı <0.1 mm	0.1-0.25 mm	0.25-0.5 mm	0.5-2.5 mm	2.5-10 mm	> 10 mm				
	Puan (R _{SDA})	6	5	4	3	2	1				
	Dolgu	Yok	Sadece Yüzey Sıvaması	İnce Kaplama <1 mm	İnce Dolgu 1 mm<t <10 mm	Kalın Dolgu 10 mm<t <60 mm	Çok Kalın Dolgu veya Makaslama Zonu				
	Puan (R _{SDD})	6	5	4	3	2	1-0				
	Pürüzlülük	Tanımlayıcı	Çok Pürüzlü	Pürüzlü	Düz Dalgalı	Düz Düzlemsel	Makaslama Zonu				
	ISRM'deki profil numarası	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1-0
	Puan (R _{SDP})	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1-0
Yeraltı Suyu Sızma Durumu (GWSC)	Kuru	Nemli	Islak	Damlama	Sürekli Akış	Fışkırarak Akış					
Puan (R _{GWSC})	9	7	5	3	1	0					
Yeraltı Suyu Emme Durumu (GWAC)	Emici Olmayan	Kılcal veya Elektriksel Su Emen	Çok Az Su Emen	Orta Derecede Su Emen	Çok Su Emen	Aşırı Su Emen					
Puan (R _{GWAC})	6	5	4	3	2	1-0					

EK D.2 10 m açıklıktaki tüneller için RMQR sistemi destek önerileri

Tablo D.2: 10 m açıklıktaki tüneller için RMQR sistemi destek önerileri (Aydan ve diğ. 2015)

RMQR Aralığı	Kaya Bulonu		Püskürtme Beton t_s (mm)	Çelik Kafes Tip	Çelik Hasır er (m)	Beton Astar (mm)		Taban Kemeri	
	L_b (m)	e_b (m)						Astar (mm)	Bulon L (m)
$100 \geq RMQR > 95$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$95 \geq RMQR > 80$	2-3	2.5	50	-	-	-	-	-	-
$80 \geq RMQR > 60$	3-4	2.0	100	Hafif	1.5	Evet	200	-	-
$60 \geq RMQR > 40$	4-5	1.5	150	Orta	1.2	Evet	300	300	-
$40 \geq RMQR > 20$	5-6	1.0	200	Ağır	1.0	Evet	500	500	5-6
$20 \geq RMQR$	6-7	0.5	250	Çok Ağır	0.8	Evet	800	800	6-7

EK D.3 Destek elemanlarının boyutlarıyla RMQR arasındaki ilişki

Tablo D.3: Kemer açıklığı (L_a) veya yan duvar yüksekliğiyle (H_s) normalize edilmiş destek elemanlarının boyutları ile RMQR arasındaki ampirik ilişki (Aydan ve diğ. 2015)

Destek Elemanı	Boyut	Tavan Kemer	Yan Duvar
Kaya Ankraji	Uzunluk	$\frac{L}{L_a} = 0.8 - \frac{RMQR}{200}$	$\frac{L}{H_s} = 0.7 - \frac{RMQR}{200}$
	Boşluk (m)	$e_{av} = 2 + 0.02RMQR$	$e_{av} = 2 + 0.03RMQR$
Kaya Bulonu	Uzunluk	$\frac{L_b}{L_a} = 0.35 - \frac{RMQR}{500}$	$\frac{L_b}{H_s} = 0.30 - \frac{RMQR}{500}$
	Boşluk (m)	$e_{bv} = 1 + 0.015RMQR$	$e_{bv} = 1 + 0.015RMQR$
Püskürtme Beton	Kalınlık	$\frac{t^{SY}}{L_a} = 0.125 - \frac{RMQR}{10000}$	$\frac{t^{SW}}{L_a} = 0.0075 - \frac{RMQR}{18000}$
Beton Astar*	Kalınlık (mm)	1000	-
*: Büyük yeraltı boşlukları için			

EK E.1 NATM sisteminin içerdği kaya sınıfları

Tablo E.1: NATM sisteminin içerdği kaya sınıfları (ÖNORM 1994, KTŞ 2013)

Kaya Sınıfı	Özellikleri
A	“A” olarak gösterilen kaya kütleleri genellikle stabil olup elastik davranış gösterirler. Yerel destek uygulanmaması halinde, yerçekimi nedeniyle, yer yer sığ göçükler meydana gelebilir. Göçükler genellikle izole olmuş, önemsiz eklem yapıları nedeniyle oluşur. Elastik deformasyonlar hızla azalır.
B	“B” olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı, yapısal kenetlenme ve/veya çekme mukavemeti azlığından ötürü hızlı gevşeme ve ayrışmaya meyillidir. Hemen hemen tüm çevrede, boşluk civarındaki ikincil gerilmeler, kaya kütlelerinin mukavemetini biraz aşmakta, bununla beraber bu zafiyet mekanizması içerilere ulaşmamaktadır. Destek yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler meydana gelir.
C	“C” olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı genellikle, kaya basıncının yeniden dağılımı süreci ve/veya deplasman sınırlamaları sonunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu göstermektedir. Kaya kütlelerinin aşırı gerilmelere maruz kalması ile kabuk atma, burkulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zafiyet mekanizmaları oluşur. Kaya kütlelerinin plastisite ve viskozitesi, zamana bağlı belirgin deformasyon davranış göstermesine ve sonuçta büyük deformasyonlara yol açar. Kaya zati ağırlık yüklerinin aktif hale geçmesi ve önemli miktarda gevşeme basıncı, sadece büyük deformasyonlara izin verildiğinde meydana gelir. Bu durum kaya kütlelerine zarar verecek derecedeki gevşeme ve ayrışma, kaya dayanımında büyük miktarda azalmaya yol açar. Açılan boşluktaki büyük deformasyonlar ve uzun dönemde zamana bağlı deplasman davranışı, zeminin elastik olmayan, plastik ve viskoz davranışına bağlıdır. Çatlamaya veya dökülmeye eğilimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenleri olan kaya kütleleri bu gruba girer. Bu grup, aynı zamanda ayrışmış veya bozmuş kayalar, gevşek zemin ve organik zeminler gibi kaya kütlelerini kapsamaktadır. Kaya kütlelerinin düşük özellikleri nedeniyle kohezyon miktarına ve/veya gevşeme basıncını takiben aşırı gerilmelere bağlı olarak, elastik veya plastik aşırı gerilme oluşur.

EK E.2 NATM ve ÖNORM B2203'e göre destek önerileri

Tablo E.2: NATM ve ÖNORM B2203'e göre kaya sınıfları ve destek önerileri (ÖNORM 1994, KTŞ 2013)

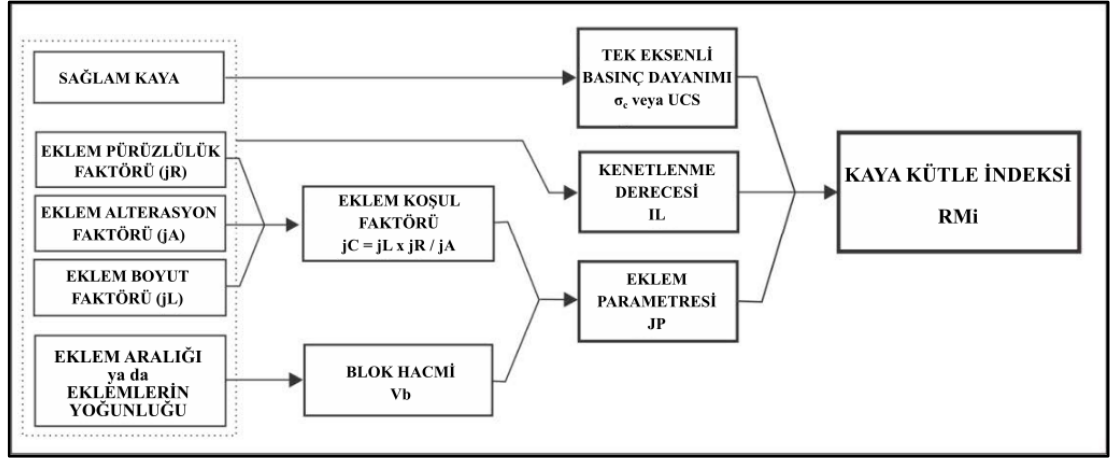
Kaya Sınıfı	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	C5
	Stabil	Az Sökülen	Gevrek	Çok Gevrek	Daneli	Dağ Atma	Baskılı	Çok Baskılı	Akıcı	Şişen
	Destek Türü ve Miktarı									
A1	-									
A2	Bulonlama; sadece bölgesel olarak tünel tavanında/yan duvarlarda yersel blokların stabil hale getirilmesi amacıyla kullanılabilir. Bu durumda kullanılacak kaya bulonları, aynadan itibaren en çok bir ilerleme adımı geriden uygulanacaktır. Kaya bulonlama yönü süreksizliklerin yönelimlerine göre seçilecektir.									
B1	Sınırlı bölgelerde sistematik destekleme gereklidir. Lokal olarak ön destekleme gerekebilir. Destekleme aynadan en fazla bir ilerleme adımı geriden monte edilecektir. Tehlikeli alanlar derhal desteklenecektir.									
B2	Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. Gerektiğinde tavanda süren kullanılacaktır. Süren için delme ve benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenmelidir.									
B3	Tünel tavanı ve yan duvarlarda, aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik destekleme gerekmektedir. Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir. Sistematik çelik iksa kullanılacaktır. Jeolojik şartlara göre, üst yarı aynasından 100-150m'den daha geride olmamak üzere, yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir.									
C1	Destekleme elemanları olarak kısa ama sık yerleştirilmiş kaya bulonları, çelik hasır gereklidir. Ek tedbir olarak kaya kütlesindeki basıncı azaltıcı delikler açılabilir. Bu yöntemle dağ atmaları da önlenir. Jeolojik şartlara göre üst yarı aynasından 100- 150m'den daha geride olmamak üzere yerinde dökme bir taban kemeri betonu yapmak gerekebilir.									
C2	Genellikle tünel aynası stabildir. Tüm kesit çevresinde sistematik destekleme gereklidir. Her ilerleme adımında destekleme sistemi tamamlandıktan sonra bir sonraki ilerleme adımına geçilecektir. Tünel tavanında süren uygulaması gerekecektir. Süren uygulaması için delgi sırası ve sonrasında imalatın ayna ve tavandaki kaya kütlesinin olumsuz etkilenmesi önlenmelidir. Destekleme elemanlarının görevi derin plastik kırılmaları sınırlamaktır. Jeolojik şartlara uygun olarak üst yarı aynasından 50-100m'den daha geride olmamak üzere taban kemeri gereklidir.									
C3	Tüm tünel desteklemesi sistematik olarak, üst yarı ve alt yarı kazı aynasının daha fazla ilerletilmesinden önce tatbik edilir. Tüm tavan kesimi üzerinde süren boru kullanımı gerekecektir. Süren için delme veya benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenmelidir. Üst yarı kazısında alt bölümlere ayrılmış en kesit ve geçici ring yapıları gerekli olabilir. Üst yarı kazısı aynasından 25-50m geride taban kemerinin ring kapaması gerekebilecektir.									

EK E.2 NATM ve ÖNORM B2203'e göre destek önerileri (devamı)

Tablo E.2: NATM ve ÖNORM B2203'e göre kaya sınıfları ve destek önerileri (devamı)

C4	Tünel desteklemesi, üst yarıda ve alt yarıda her bir ilerleme adımında tamamlanmalıdır. Süren boru veya çelik levha süren tatbiki, tavan kesiminin büyük kısmında gerekecektir. Kazı aynasında, püskürtme beton, hasır çelik, kaya bulonu, drenaj elemanlarından oluşan destekleme sisteminin, kazı sırasında veya hemen sonrasında kullanılması gerekebilecektir. Alt bölümlere ayrılmış kesitin kazısı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılması gerekli olacaktır. Süren uygulanması zorunludur. Üst yarı kazısının alt bölümlere ayrılmış kesimlerinde geçici ring kapama gerekebilir. Taban kemerinde ring kapaması, üst yarı kazı aynası gerisinde 25 ile 50m arasındaki kısa mesafelerde gerekli olabilir.
C5	Tünel desteklemesi, üst yarı ve alt yarıda her ilerleme adımında tamamlanmalıdır. Süren boru veya çelik levha süren uygulaması, tavan kesiminin büyük kısmında gerekecektir. Alt bölümlere ayrılmış kesitin kazısı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılması gerekli olacaktır. Geoteknik ihtiyaçlara uygun olarak üst yarı aynasından 100-150m'den daha geride olmamak üzere taban kemeri gereklidir.

EK F.1 R_{Mi} puanının hesaplamasında kullanılan parametreler



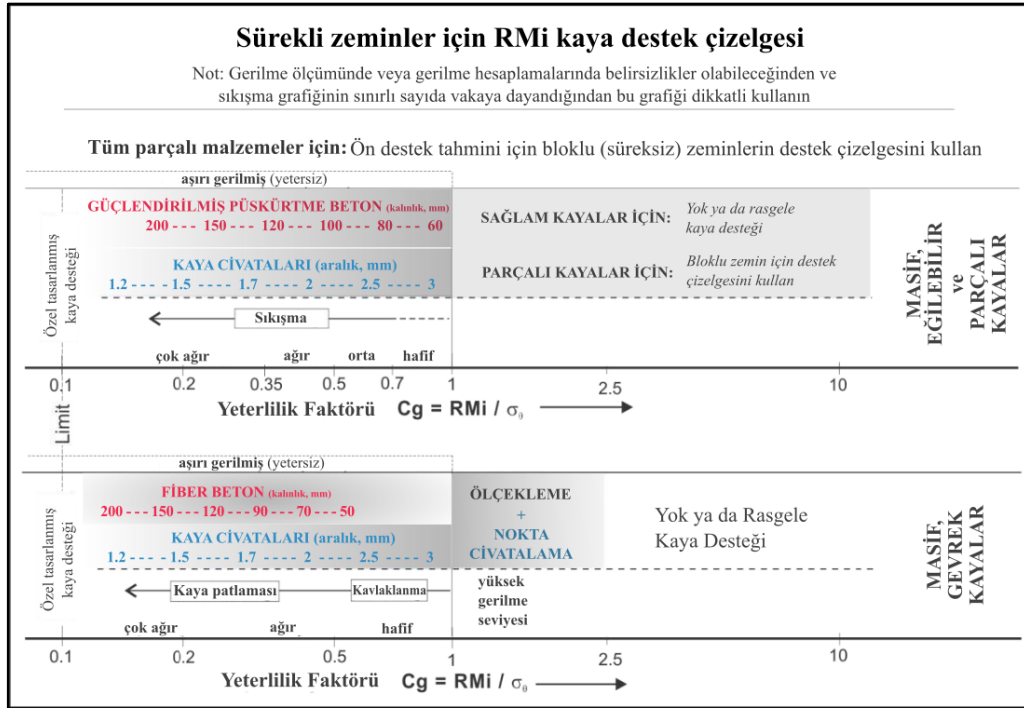
Şekil F.1: R_{Mi} puanının hesaplamasında kullanılan parametreler (Palmström 1995)

EK F.2 R_{Mi} puanlarının sınıflandırılması

Tablo F.1: R_{Mi} puanlarının sınıflandırılması (Palmström 1995)

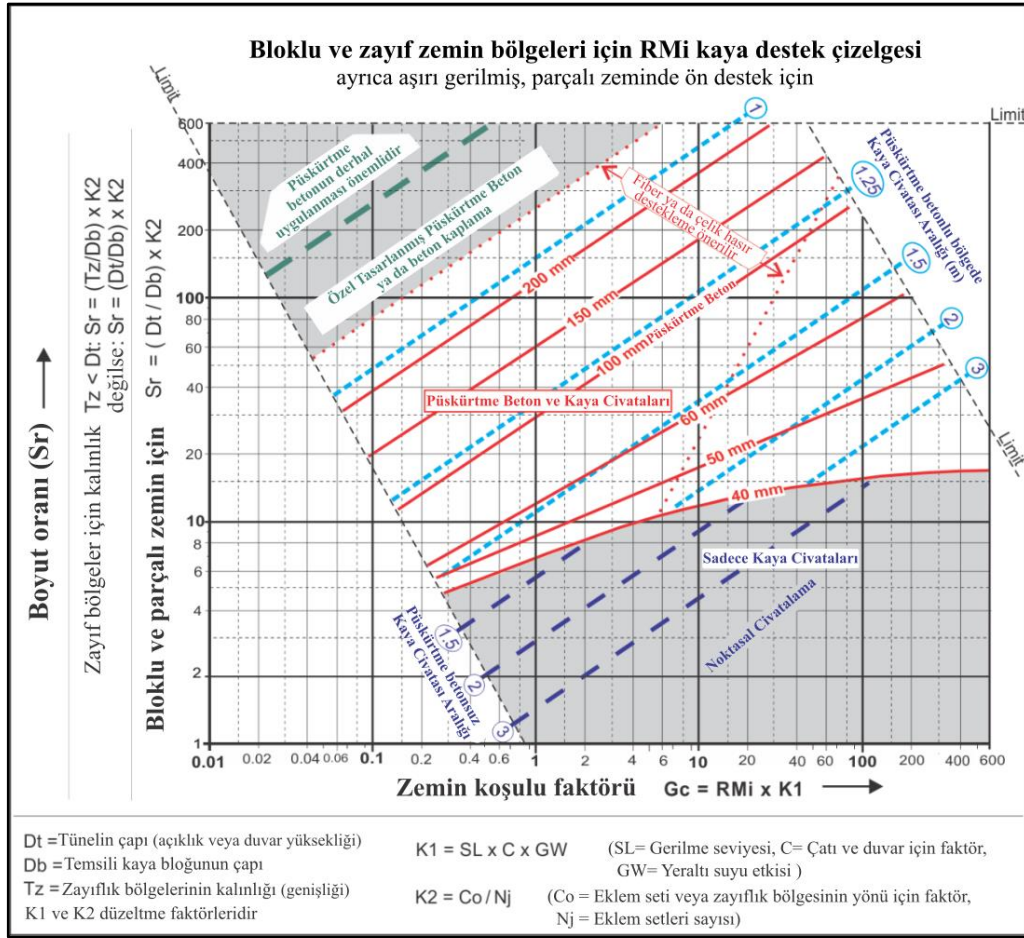
R _{Mi} için terim	Kaya kütle dayanımı ile ilgili terim	R _{Mi} değeri
Son derece düşük	Son derece zayıf	<0.001
Çok düşük	Çok zayıf	0.001 – 0.01
Düşük	Zayıf	0.01 – 0.1
Orta	Orta	0.1 – 1
Yüksek	Güçlü	1 – 10
Çok yüksek	Çok güçlü	10 – 100
Son derece yüksek	Son derece güçlü	> 100

EK F.3 RMi sisteminin sürekli zeminler için destekleme önerileri



Şekil F.2: RMi sisteminin sürekli zeminler için önerdiği destekleme tür ve miktarları (Palmström 1995)

EK F.4 RMi sisteminin bloku ve zayıf zeminler için destekleme önerileri



Şekil F.3: RMi sisteminin bloku ve zayıf zeminler için önerdiği destekleme tür ve miktarları (Palmström 1995)

EK G.1 RSR değeri hesaplama parametreleri: A, B, C

Tablo G.1: RSR değeri hesaplama parametreleri: A (Wickham ve diğ. 1972)

	Ana Kayaç Tipi				Jeolojik Yapı			
	Sert	Orta	Yu- muşak	Ayrış- mış	Masif	Hafif kıvrımlı ya da faylı	Orta kıvrımlı ya da faylı	Yoğun kıvrımlı ya da faylı
Magmatik	1	2	3	4				
Metamorfik	1	2	3	4				
Sedimanter	2	3	4	4				
Tip 1					30	22	15	9
Tip 2					27	20	13	8
Tip 3					24	18	12	7
Tip 4					19	15	10	6

Tablo G.2: RSR değeri hesaplama parametreleri: B (Wickham ve diğ. 1972)

	Doğrultu eksenine dik				Doğrultu eksenine paralel			
	Galeri açma yönü				Galeri açma yönü			
Ortalama sü- reksizlik aralığı	Her ikisi		Eğim yönünde		Eğime ters yönde		İkisinden biri yönünde eğim	
	Ana eklem eğimi*				Ana eklem eğimi			
	Yassı	Eğimli	Dikey	Eğimli	Dikey	Yassı	Eğimli	Dikey
Çok sık sü- reksizlik, <2in	9	11	13	10	12	9	9	7
Sık süreksizlik, 2-6in	13	16	19	15	17	14	14	11
Orta süreksizlik, 6-12in	23	24	28	19	22	23	23	19
Orta bloklu, 1-2ft	30	32	36	25	28	30	28	24
Bloklu masif 2-4ft	36	38	40	33	35	36	24	28
Masif >4ft	40	43	45	37	40	40	38	34

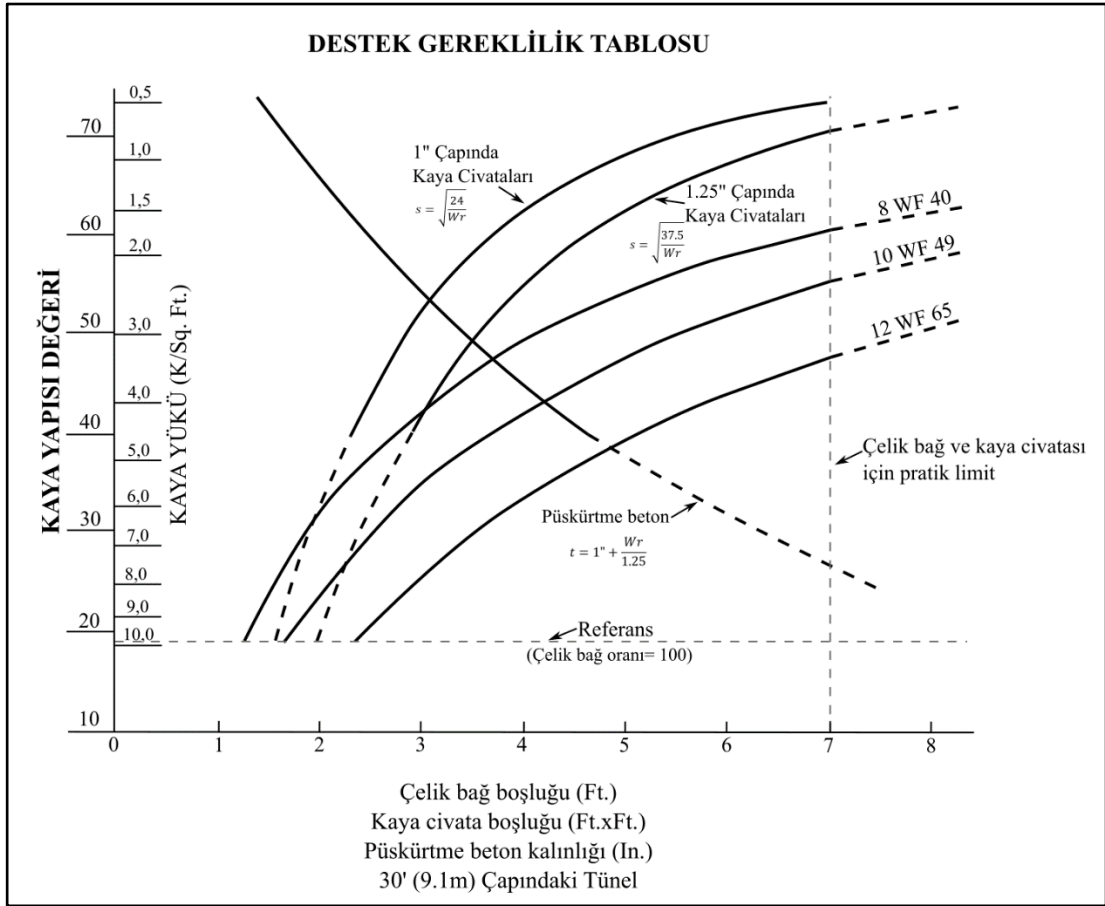
*: Düz 0-20°, Eğimli 20-50°, Dikey 50-90°

Tablo G.3: RSR değeri hesaplama parametreleri: C (Wickham ve diğ. 1972)

	Parametreler toplamı A+B					
	13-44			45-75		
Beklenen su geliri/1000ft tünel uzunluğu	Süreksizlik durumu**					
	İyi	Orta	Kötü	İyi	Orta	Kötü
Yok	22	18	12	25	22	18
Hafif, <200 lt/dk	19	15	9	23	19	14
Orta, 200-1000 lt/dk	15	22	7	21	16	12
Fazla, >1000 lt/dk	10	8	6	18	14	10

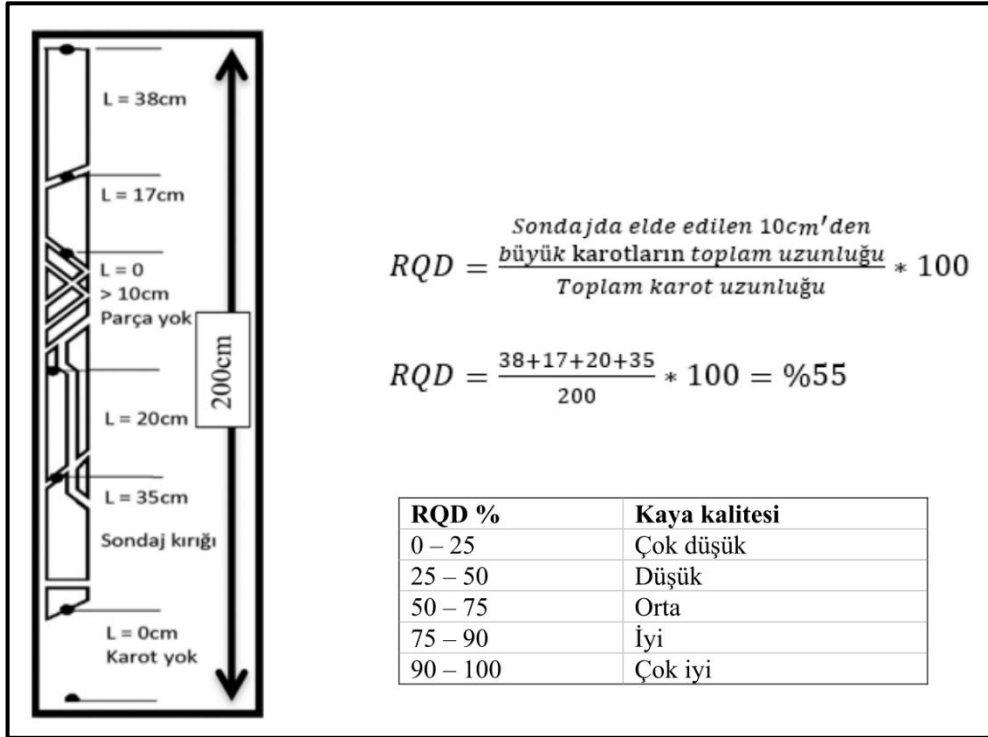
** : Süreksizlik durumu: İyi; sıkı ya da çimentolu, Orta; hafif bozunmuş ya da altere olmuş, Kötü; ciddi şekilde bozunmuş, altere olmuş ya da açık.

EK G.2 RSR sisteminin önerdiği destek sistemi türleri ve miktarları









Şekil G.1: RSR sisteminin önerdiği destek sistemi türleri ve miktarları (Wickham ve diğ. 1972)

EK H RQD puanının elde edilmesi ve sınıfının belirlenmesi



Şekil H: Kaya kalite gösterge değerinin elde edilmesi ve sınıfının belirlenmesi (Deere 1964 değiştirilerek)

EK I GSI puanının hesaplamasında kullanılan grafik

JEOLJİK DAYANIM İNDEKSİ (GSI)		YÜZEY DURUMU				
		ÇOK İYİ	İYİ	ORTA	ZAYIF	ÇOK ZAYIF
YAPI		AZALAN YÜZEY KALİTESİ →				
	BOZULMAMIŞ YA DA MASİF Birkaç geniş aralıklı süreksizlik içeren örnekler ya da masif kaya	90			YOK	YOK
	BLOKLU Üç ortogonal süreksizlik takımının oluşturduğu kübik bloklar içeren çok iyi kenetlenmiş örselenmemiş kaya kütlesi	80	70			
	ÇOK BLOKLU Kenetlenmiş, kısmen örselenmiş dört ya da daha fazla süreksizlik takımının oluşturduğu açılı çok yüzeyli bloklu		60			
	BLOKLU, ÖRSELENMİŞ Birçok süreksizlik takımının kesişmesiyle oluşmuş açılı bloklu, kıvrımlı ya da faylı			50		
	PARÇALANMIŞ Karışık ya da açılı ve yuvarlak kaya parçalı zayıfça kenetlenmiş tamamen kırık kaya kütlesi			40		
	İNCE TABAKALI/MAKASLANMIŞ Zayıf şistozite veya kayma düzlemlerinin birbirine yakın olması nedeniyle bloklaşmanın olmaması				30	
					20	
						10
		YOK	YOK			

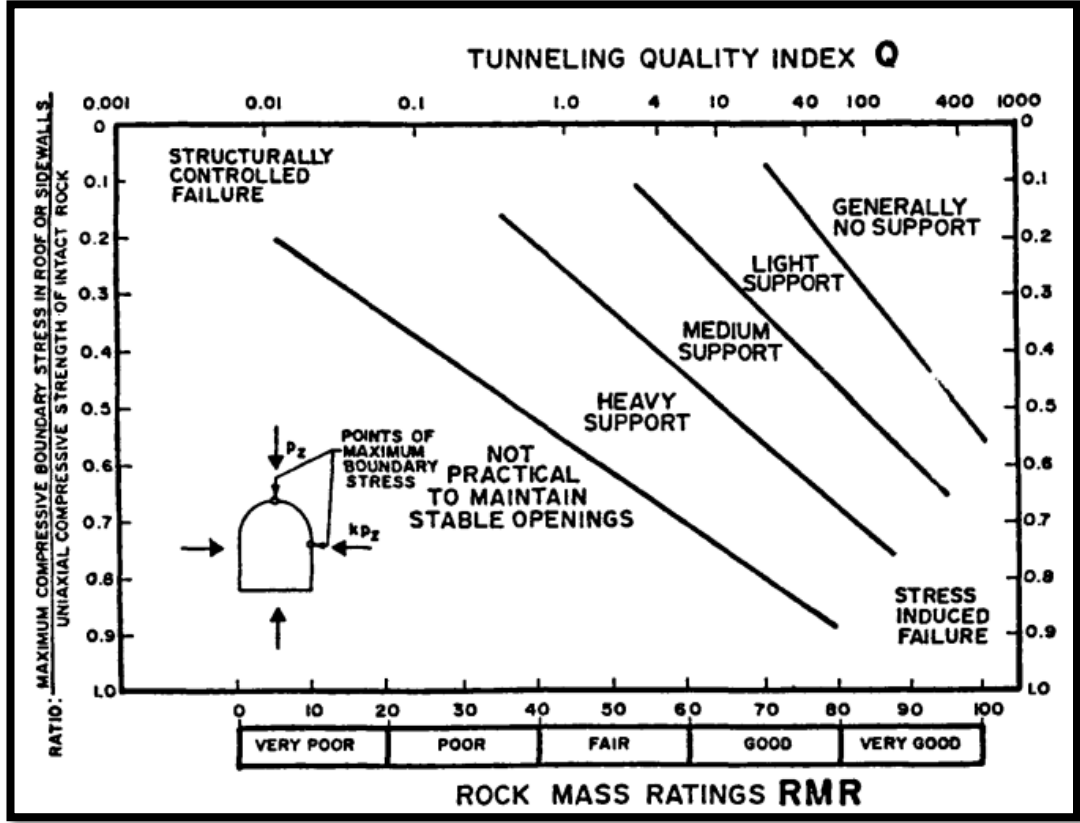
Şekil I: Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) puanının hesaplanmasında kullanılan grafik (Marinos ve Hoek, 2000)

EK J Yerel zemin sınıfları belirleme tablosu

Tablo J: Yerel zemin sınıfları belirleme tablosu (TBDY 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe/30 cm]	$(c_u)_{30}$ [30kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	>1500	-	-
ZB	Az ayrışmış orta sağlam kayalar	760 – 1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	>50	>250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katlı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya PI>20 ve w>%40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25\text{kPa}$) içeren profiller	<180	<15	<70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas kiler, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), Toplam kalınlığı 3 metreden fazla olan turba ve/veya organik içeriği yüksek kiler, Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI>50) kiler, Çok kalın (>35m) yumuşak veya orta katı kiler.			

EK K Q veya RMR kullanılarak destek tasarımı belirlenmesi grafiği



Şekil K: Q veya RMR kullanılarak destek tasarımı belirlenmesi grafiği (Bienawski 1990)