

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GALERİ TAHKİMAT TASARIMINDA KULLANILAN KAYA KÜTLESİ
SINIFLAMA SİSTEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

ERTUĞRUL KARAKAPLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MALATYA

2012

Tezin Başığı : Galeri Tahkimat Tasarımında Kullanılan Kaya Kütlesi Sınıflama
Sisteminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Tezi Hazırlayan : Ertuğrul KARAKAPLAN

Sınav Tarihi : 16.04.2012

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değeriendirilerek Maden Mühendisliği Ana Bilim
Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Doç. Dr. Hakan BAŞARIR

.....

Prof. Dr. Mustafa KUMRAL

.....

Yrd. Doç. Dr. Gulmustafa ŞEN

.....

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

الله

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Galeri Tahkimat Tasarımında Kullanılan Kaya Kütlesi Sınıflama Sisteminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ertuğrul KARAKAPLAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GALERİ TAHKİMAT TASARIMINDA KULLANILAN KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Ertuğrul KARAKAPLAN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

XVII + 101 sayfa

2012

Danışman: Doç. Dr. Hakan BAŞARIR

Bu çalışmada, madencilikte kullanılan yeraltı açıklıklarının tahkimat tasarımında yaygın olarak kullanılan deneysel sistemlerinden (RMR) kaya kütlesi sınıflama sisteminin gözden geçirilmesi ve sistemce önerilen tahkimat tasarımı önerilerinin revizyonu amaçlanmıştır.

Bunun için açıklık duraylılığı ve tahkimat performansı hakkında miktarsal bilgiler veren sayısal modelleme tekniği kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında farklı araştırmacılar tarafından yürütülen, zayıf ve orta kalite kaya kütleleri gibi farklı koşulları içeren, inşaat ve maden mühendisliği projelerinin sonuçları saha verileri olarak kullanılmıştır. Bu saha verileri ile farklı derinliklerde ve hidrostatik gerilme koşulları altında oluşturulan yeraltı açıklıklarının sayısal modellemeleri yapılmış ve bu açıklıklar etrafında oluşacak olan deformasyonlar elde edilmiştir. Kullanılan sayısal modellere ve elde edilen deformasyonlara bağlı olarak açıklık duraylılığı ve tahkimat performanslarına dair değerlendirmeler yapılmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışması sonucunda RMR sisteminde önerilen tahkimat tasarımındaki eksiklikler tespit edilmiş ve iyileştirici öneriler getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tahkimat Tasarımı, Kaya Kütle Sınıflaması, Phase², Sonlu Elemanlar Yöntemi.

ABSTRACT

Master of Science Thesis

THE ANALYSIS OF THE ROCK MASS RATING SYSTEM USED IN DRIFT SUPPORT DESIGN BY FINITE ELEMENT METHOD

Ertuğrul KARAKAPLAN

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mining Engineering

XVII + 101 pages

2012

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan BAŞARIR

The subject of this thesis is to revise the RMR system, one of the most widely used rock mass classification systems in designing support of underground openings used in mining operations and to make recommendations for revising support design proposed by the system.

Within this purpose numerical modeling technique that can give quantitative information about the stability of an opening and support performance is used.

In this study, the information obtained from the mining and civil engineering projects, including different conditions such as weak and fair quality rock masses, conducted by different researchers are used as field data. Using the field data, underground openings excavated in different depth and under different stress conditions are modeled numerically and the deformations occurring around underground openings are obtained. Evaluations about the opening stability and support performance are made based on numerical models and obtained deformations.

As a result of this master thesis deficiencies included in the support design proposed by the RMR system are defined and remedial suggestions are made.

Keywords: Support Design, Rock Mass Rating, Phase², Finite Element Method.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemedi beni yönlendiren danışman hocam Sayın **Doç. Dr. Hakan BAŞARIR** 'a;

Yüksek lisansım boyunca gerek ders gerekse tez çalışmalarım sırasında desteğini gördüğüm bölümümüz öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Mustafa KUMRAL 'a;

Çalışmaların deneysel aşamasında bilgisayar yazılımları hakkında her türlü yardımını gördüğüm Fen-Edebiyat Fakültesi öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Mustafa KARAKAPLAN 'a;

Yaptığım çalışmalar sırasında destek ve yapıcı eleştirilerini aldığım, bölümümüz öğretim üyelerinden Prof. Dr. Mehmet ÖNAL, Doç. Dr. Hikmet SİS, Yrd. Doç. Dr. Adem ÖCAL ve İnşaat Mühendisliği öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Gulmustafa ŞEN 'e;

Gerek lisans gerekse yüksek lisans öğrenciliğim boyunca bana yardımcı olan İnönü Üniversitesi'nin akademik ve idari personellerine;

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu süreçte de benden desteklerini esirgemeyen ailem ve teyzem Ayşe Köse 'ye;

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	III
ABSTRACT	IV
TEŞEKKÜRLER	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç.....	1
1.2. Kapsam	2
2. TASARIM YÖNTEMLERİ	3
2.1. Deneysel Yöntemler	3
2.1.1. Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin kazanımları	6
2.2. Analitik Yöntemler	6
2.3. Sayısal Yöntemler	9
2.3.1. Diferansiyel yöntemler.....	11
2.3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi.....	12
2.3.1.2. Sonlu farklar yöntemi.....	15
2.3.2. Sınır elemanları yöntemi	16
2.3.3. Melez yöntemler	18
2.3.4. Ayrık elemanlar yöntemi.....	19
3. RMR SINIFLAMA SİSTEMİ	21

3.1. Sistemin Gelişimi ve Esasları	21
3.2. Sistemin 1973'teki İlk Hali.....	22
3.3. Sistemin 1989'daki Son Versiyonu.....	25
3.4. RMR Parametrelerinin Belirlenmesi.....	26
3.4.1. Kaya malzemesinin dayanımı.....	26
3.4.2. Kaya kalite göstergesi.....	27
3.4.3. Süreksizlik aralığı	29
3.4.4. Süreksizlik yüzeyinin koşulu	30
3.4.5. Yeraltı suyu	31
3.4.6. Süreksizlik yönelimi düzeltmesi.....	32
3.5. RMR Sistemi Puan Düzeltmesi	34
3.5.1. Gerilme düzeltmesi.....	34
3.5.2. Patlatma düzeltmesi.....	35
3.5.3. Başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme.....	36
3.6. RMR Sisteminin Tahkimat Tasarımında Kullanımı.....	36
3.7. RMR Sisteminin Eksiklikleri.....	39
4. MATERYAL	41
4.1. Sayısal Modelleme Girdi Parametreleri	41
4.1.1. Hoek-Brown parametreleri.....	42
4.1.2. Yeraltı gerilme değerleri.....	43
4.2. Saha Verileri	44
4.2.1. Bilecik – İstanbul karayolu (Osmangazi) tüneli.....	44
4.2.2. Mashhad – Kallat karayolu (Kallat) tüneli.....	47
4.2.3. Kavak – Merzifon karayolu (Şehzadeler) tüneli	50

5. YÖNTEM	52
5.1. Phase ² Yazılımı Veri Aktarımı ve Analizi.....	52
5.2. Gerçek Geometri ve Derinlik Analizleri	54
5.3. Tahkimatsız Analizler	71
5.4. Eşdeğer Tahkimatlı Analizler	72
5.5. Gerekli Tahkimat Basıncı Analizleri.....	73
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	75
6.1. Bilecik – İstanbul Karayolu (Osmangazi) Tüneli.....	76
6.1.1. Formasyon 1 - sahip olduğu RMR puanı 37.....	76
6.1.2. Formasyon 2 - sahip olduğu RMR puanı 50.....	77
6.1.3. Formasyon 3 - sahip olduğu RMR puanı 55.....	78
6.1.4. Formasyon 4 - sahip olduğu RMR puanı 63.....	79
6.1.5. Formasyon 5 - sahip olduğu RMR puanı 66.....	80
6.1.6. Formasyon 6 - sahip olduğu RMR puanı 63.....	81
6.1.7. Formasyon 7 - sahip olduğu RMR puanı 65.....	82
6.2. Mashhad – Kallat Karayolu (Kallat) Tüneli	83
6.2.1. Formasyon 1 - sahip olduğu RMR puanı 55.....	83
6.2.2. Formasyon 2 - sahip olduğu RMR puanı 46.....	84
6.2.3. Formasyon 3 - sahip olduğu RMR puanı 40.....	85
6.3. Kavak – Merzifon Karayolu (Şehzadeler) Tüneli	86
6.3.1. Formasyon 1 - sahip olduğu RMR puanı 58.....	86
6.3.2. Formasyon 2 - sahip olduğu RMR puanı 43.....	87
6.3.3. Formasyon 3 - sahip olduğu RMR puanı 51.....	88
6.3.4. Formasyon 4 - sahip olduğu RMR puanı 34.....	89

6.4. Gerekli Tahkimat Basıncı Sonuçları	90
6.5. Elde Edilen Verilerin Çoklu Regresyon Modellemesi	92
6.5.1. Regresyon Modeli Oluşturulması	93
6.5.2. Regresyon Modeli Geçerlilikleri	93
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR	98
ÖZ GEÇMİŞ	101

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Alan
A_B	RMR sınıflamasında patlatma hasarı düzeltme faktörü
A_S	RMR sınıflamasında gerilme düzeltme faktörü
A_W	RMR sınıflamasında zayıflık düzlemleri düzeltme faktörü
a	Hoek-Brown yenilme ölçütü
B	Tünel genişliği
D	Örselenme faktörü
d_b	Kaya saplaması çapı
E_i	Kaya malzemesinin elastisite modülü
E_c	Püskürtme beton deformasyon modülü
E_m	Kaya kütlesinin elastisite modülü
E_s	Kaya saplamasının deformasyon modülü
GSI	Jeolojik dayanım indeksi
GRC	Kaya kütlesi tepki eğrisi
ISRM	Uluslararası Kaya Mekanik Derneği
ks	Belirlenen maksimum deformasyon sınırı
L	Uzunluk
m	Boyutsuz malzeme sabiti
m_b	Kaya kütlesine ait boyutsuz malzeme sabiti
m_i	Kaya malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti
Q	Deformasyon yük sabiti
P	Tahkimat basıncı
P_g	Gerekli tahkimat basıncı
P_{rmr}	RMR sisteminin önerdiği tahkimat basıncı
P_i	İç tahkimat basıncı
$P_{i^{cr}}$	Kritik tahkimat basıncı
P_s^{max}	Tahkimat elemanının uygulayacağı maksimum basınç
R	Galeri çapı
R^2	Çoklu belirleme sabiti
R_{pl}	Plastik bölge çapı
RMR	Kaya kütlesi sınıflaması
RQD	Kaya kalite göstergesi
s	Hoek-Brown parametresi
S	Gerilme faktörü

SİMGELER VE KISALTMALAR (Devamı)

s_c	Tünel kesitinde saplamalar arası çevresel uzaklık
SCC	Tahkimat karakteristik eğrisi
s_l	Tünel eksenli boyunca saplamalar arası uzaklık
s_m	Hoek-Brown parametresi
S_0	Normalleştirilmiş birincil gerilme
T_{bf}	Kaya saplaması maksimum taşıma kapasitesi
t_c	Püskürtme beton kalınlığı
u_r	Deformasyon miktarı
σ'	Etkin normal gerilme
σ_{cc}	Püskürtme betonun tek eksenli basınç dayanımı
σ_{ci}	Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
σ_{cm}	Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı
σ_h	Yatay yönde etkiyen gerilme
σ_v	Düşey yönde etkiyen gerilme
σ_0	Tünel etrafındaki kaya kütlelerine ait gerilme değeri
σ_1	En büyük asal gerilme
σ'_1	En büyük etkin asal gerilme
σ'_3	En küçük asal gerilme
σ'_3	En küçük etkin asal gerilme
ν	Poisson oranı
ν_c	Püskürtme beton poisson oranı
γ	Birim hacim ağırlığı
z	Derinlik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Galeri etrafındaki oluşan parametrelerin gösterimi.....	7
Şekil 2.2. Gerilme - deformasyon grafiği	7
Şekil 2.3. Sayısal yöntemlerin sınıflandırılması	11
Şekil 2.4. Çokgenler yardımı ile daire çevresi ve alanının hesaplanması.....	12
Şekil 2.5. Sonlu elemanlar yönteminde açıklık etrafında oluşturulan örgüler	13
Şekil 2.6. Sonlu farklar hesaplama yöntemi yapan program görseli	16
Şekil 2.7. Sınır elemanlara ayrılmış yeraltı boşluğu	18
Şekil 2.8. Melez yöntem ile elemanlara ayrılmış kaya kütlesi	19
Şekil 2.9. Sınır elemanlara ayrılmış yeraltı boşluğu	20
Şekil 3.1. RMR sisteminde 1973'ten 1989'a kadarki puanlama değişimlerinin grafiksel gösterimi.....	25
Şekil 3.2. Günümüzde kullanılan RMR sistemi için girdi parametreleri.....	26
Şekil 3.3. Tek eksenli basınç dayanımı – puan grafiği.....	27
Şekil 3.4. Kaya kalite gösterge değerinin elde edilişi	28
Şekil 3.5. Kaya kalite göstergesi – puan grafiği.....	29
Şekil 3.6. Süreksizlik aralığı – puan grafiği	29
Şekil 3.7. Süreksizlik özellikleri.....	30
Şekil 3.8. Kaya kütlelerinde süreksizlikler boyunca su akışı ve olası etkileri	31
Şekil 3.9. Süreksizlik yönelimine bağlı galeri yönü seçimi.....	33
Şekil 3.10. Gerilme düzeltilmesi	34
Şekil 3.11. Bieniawski tarafından önerilen "tahkimatsız açıklık boyutu – tahkimatsız durma süresi" ilişkisini gösteren grafik	37
Şekil 3.12. RMR puanı değerlendirmesi ve tahkimat tasarımında yapılan hatalar.....	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devamı)

Şekil 4.1. Arazide kaya malzemesinden kaya kütlesine geçişi gösteren kesitler	41
Şekil 4.2. Osmangazi tünelinin konumu.....	44
Şekil 4.3. Osmangazi tüneli kesit görünüşü	45
Şekil 4.4. Osmangazi tüneli günümüz görüntüsü.....	47
Şekil 4.5. Kallat tünelinin konumu	47
Şekil 4.6. Kallat tüneli jeolojik haritası	48
Şekil 4.7. Kallat tünelinin günümüzdeki görüntüsü	49
Şekil 4.8. Şehzadeler tünelinin konumu	50
Şekil 4.9. Şehzadeler tünelinin günümüzdeki görüntüsü	51
Şekil 5.1. Sonlu elemanlara ayrılmış kaya kütlesi	52
Şekil 5.2. Phase ² yazılımı hesaplama çıktısı	53
Şekil 5.3. Osmangazi tüneli gerçek geometrisi	54
Şekil 5.4. Osmangazi tüneli formasyon 1; tavan, yan duvar ve plastik bölge	55
Şekil 5.5. Osmangazi tüneli formasyon 2; tavan, yan duvar ve plastik bölge	56
Şekil 5.6. Osmangazi tüneli formasyon 3; tavan, yan duvar ve plastik bölge	57
Şekil 5.7. Osmangazi tüneli formasyon 4; tavan, yan duvar ve plastik bölge	58
Şekil 5.8. Osmangazi tüneli formasyon 5; tavan, yan duvar ve plastik bölge	59
Şekil 5.9. Osmangazi tüneli formasyon 6; tavan, yan duvar ve plastik bölge	60
Şekil 5.10. Osmangazi tüneli formasyon 7; tavan, yan duvar ve plastik bölge	61
Şekil 5.11. Kallat tüneli gerçek geometrisi	62
Şekil 5.12. Kallat tüneli formasyon 1; tavan, yan duvar ve plastik bölge	63
Şekil 5.13. Kallat tüneli formasyon 2; tavan, yan duvar ve plastik bölge	64

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devamı)

Şekil 5.14. Kallat tüneli formasyon 3; tavan, yan duvar ve plastik bölge	65
Şekil 5.15. Şehzadeler tüneli gerçek geometrisi	66
Şekil 5.16. Şehzadeler tüneli formasyon 1; tavan, yan duvar ve plastik bölge.....	67
Şekil 5.17. Şehzadeler tüneli formasyon 2; tavan, yan duvar ve plastik bölge.....	68
Şekil 5.18. Şehzadeler tüneli formasyon 3; tavan, yan duvar ve plastik bölge.....	69
Şekil 5.19. Şehzadeler tüneli formasyon 4; tavan, yan duvar ve plastik bölge.....	70
Şekil 5.20. Tahkimatsız analizlerde izlenen yol	71
Şekil 5.21. Eşdeğer tahkimatlı analizlerde izlenen yol	72
Şekil 5.22. Dairesel galeri etrafına uygulanan tahkimatın görüntüsü	73
Şekil 5.23. Gerekli tahkimat basıncını hesaplarken izlenilen yol	74
Şekil 6.1. Osmangazi tüneli 1. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	76
Şekil 6.2. Osmangazi tüneli 2. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	77
Şekil 6.3. Osmangazi tüneli 3. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	78
Şekil 6.4. Osmangazi tüneli 4. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	79
Şekil 6.5. Osmangazi tüneli 5. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	80
Şekil 6.6. Osmangazi tüneli 6. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	81
Şekil 6.7. Osmangazi tüneli 7. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	82
Şekil 6.8. Kallat tüneli 1. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	83
Şekil 6.9. Kallat tüneli 2. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	84
Şekil 6.10. Kallat tüneli 3. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge	85
Şekil 6.11. Şehzadeler tüneli 1. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge.....	86
Şekil 6.12. Şehzadeler tüneli 2. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge.....	87

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devamı)

Şekil 6.13. Şehzadeler tüneli 3. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge.....	88
Şekil 6.14. Şehzadeler tüneli 4. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge.....	89
Şekil 6.15. Osmangazi tüneli, derinliklere göre uygulanması gereken tahkimat basıncı.....	90
Şekil 6.16. Kallat tüneli, derinliklere göre uygulanması gereken tahkimat basıncı	90
Şekil 6.17. Şehzadeler tüneli, derinliklere göre uygulanması gereken tahkimat basıncı.....	91
Şekil 6.18. Derinliğe bağlı olarak değişen gerekli tahkimat basıncının RMR sisteminin önerdiği eşdeğer tahkimat basıncına normalize grafiği	92
Şekil 6.19. P_g/P_{rmr} ile RMR ve derinlik arasındaki ilişki.....	93
Şekil 6.20. Regresyon sonucunda elde edilen P_g/P_{rmr} ile RMR ve derinlik arasındaki ilişki.....	95
Şekil 7.1. Regresyon sonucunda elde edilen P_g/P_{rmr} ile RMR ve derinlik arasındaki ilişki.....	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kaya kütlesi ile ilgili günümüze kadar geliştirilen sınıflama sistemleri, geliştirildikleri ülkeler, geliştirenler ve uygulama alanları	4
Çizelge 3.1. RMR sisteminin 1973 yılında kullanılan, tek eksenli basınç dayanımı ve süreksizlik aralığı parametrelerinin tanımlanma ölçütleri	23
Çizelge 3.2. RMR sisteminin 1973 yılında kullanılan, bozunma parametrelerinin tanımlanma ölçütleri	23
Çizelge 3.3. RMR sisteminde 1973 yılında kullanılan parametrelerin tanımlama ölçütleri ve değişim aralıkları	24
Çizelge 3.4. RMR sisteminde 1973'ten 1989'a kadarki puanlama değişimleri	24
Çizelge 3.5. Tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükü dayanımına göre sınıflandırma	27
Çizelge 3.6. RQD tanımı	28
Çizelge 3.7. RMR kaya kütlesi sınıflama sistemi'nin son versiyonu	32
Çizelge 3.8. Galeride süreksizlik eğim ve doğrultusunun etkisi	33
Çizelge 3.9. Süreksizlik yönelimine göre düzeltme puanları	33
Çizelge 3.10. Patlatma düzeltmesi	35
Çizelge 3.11. Zayıflık düzlemleri ile ilgili düzeltme	36
Çizelge 3.12. RMR sisteminin 1973'teki versiyonunda kaya kütlesi sınıfları ve her sınıf için RMR puanı değişim aralıkları	37
Çizelge 3.13. RMR sisteminde ön tahkimat sisteminin seçimi kılavuzu	38
Çizelge 4.1. Osmangazi tüneli kayaç parametreleri	45
Çizelge 4.2. Yeraltı derinlik koşullarına bağlı gerilme değerleri	46
Çizelge 4.3. Kallat tüneli kayaç parametreleri	48
Çizelge 4.4. Yeraltı derinlik koşullarına bağlı gerilme değerleri	49
Çizelge 4.5. Şehzadeler tüneli kayaç parametreleri	50

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devamı)

Çizelge 4.6. Yeraltı derinlik koşullarına bağlı gerilme değerleri.....	51
Çizelge 6.1. Tüneller ve deformasyon sınırları.....	75
Çizelge 6.2. Regresyon modeli ve ayarlanmış R^2 değeri	94
Çizelge 6.3. ANOVA tablosu ve hesaplanan F değeri	94

1. GİRİŞ

Maden işletmeciliği amaçlı yeraltında açılan galeriler, kuyular, gaz depoları gibi geniş yeraltı açıklıklarının tasarımları karmaşık jeolojik ve jeoteknik özelliklerden dolayı oldukça güçtür. Yeraltı madencilik açıklıklarının mühendislik tasarım yaklaşımları üç ana gruba ayrılabilir. Bunlar; deneysel, sayısal ve analitik yaklaşımlardır. Günümüzde kullanım kolaylığı nedeniyle deneysel yöntemlerin uygulamacılar tarafından yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

Bu yöntemlerden birisi olan kaya kütle sınıflama (RMR) sisteminin tahkimat tasarımında bir takım eksiklikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, bu eksikliklerden birisi olan yeraltındaki gerilme koşullarına bağlı olarak RMR sisteminin tahkimat önerilerinde değişiklikler yapılması gerekip gerekmediği konusu değerlendirilmiştir.

Belirlenen amaçlar doğrultusunda açıklık duraylılığı ve tahkimat performansı hakkında miktarsal bilgiler verebilen ve yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi esaslı Phase² bilgisayar programı ve farklı koşullar içeren gerçek saha verileri kullanılarak çok sayıda hesaplamalar yapılmıştır.

Çalışmalar neticesinde RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanlarının düzeltilmesine yönelik öneriler değerlendirilmiştir.

1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı; madencilik galerilerinin tahkimat tasarımında yaygın olarak kullanılan deneysel yöntemlerden birisi olan kaya kütle sınıflama (RMR) sisteminin gözden geçirilmesi ve sistemin içerisinde bulunan eksikliklerin, sayısal modelleme yöntemiyle belirlenerek giderilmesidir.

1.2. Kapsam

Bu çalışma kapsamında tahkimat tasarımı ve kaya kütle kalitesi belirlenmesinde günümüzde yaygın olarak kullanılan deneysel sistemlerden RMR sistemi gözden geçirilmiştir. Söz konusu sistemin kullanımı ve temel işleyişine değinildikten sonra sistemin uygulama alanları ile ilgili bilgiler aktarılmıştır.

Literatür araştırması yapılarak RMR sistemi kullanılan çalışmalardan gerçek saha verileri belirlenmiştir. Bu verilerin belirlenmesi ve seçilmesi sırasında özellikle farklı kalitede kaya kütleleri içermeleri konusuna dikkat edilmiştir. Seçilen gerçek saha verilerine dayalı olarak sistemce önerilen tahkimat elemanlarının performansları farklı koşullar için sayısal modelleme yöntemi kullanılarak test edilip mevcut eksiklikler belirlenmiştir.

Eksikliklerin tespitinden sonra açıklık boyutu, gerilme koşulları, kaya malzeme ve kütle özelliklerinin ve RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanlarınca üretilecek olan iç tahkimat basıncının bire bir kullanıldığı sayısal modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modelleme sonucunda tahkimat performansları ve açıklık duraylılığı üzerine değerlendirmeler yapılarak açıklığı istenilen deformasyon sınırında tutmak için gerekli tahkimat basınçları bulunmaya çalışılmıştır.

Belirlenen bu tahkimat basınçları ileride yapılacak çalışmalar için RMR değeri ve derinliğe bağlı tahkimat basıncı belirlenmesi yada tahkimat elemanı seçiminde başvurulacak bir kaynak olacaktır.

2. TASARIM YÖNTEMLERİ

Yeraltındaki cevherin çıkarılması için madencilik açıklıkları tasarımında günümüzde yaygın olarak kullanılan üç ana yöntem mevcuttur. Bunlar deneysel, analitik ve sayısal tasarım yöntemleridir. Her bir yöntemin kendine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Konu ile ilgili ayrıntılı bilgiler alt bölüm 2.1, 2.2 ve 2.3'te verilmiştir.

Literatürde seçilen çalışmalar; deneysel olarak RMR sistemini ve sayısal olarak sonlu elemanlar yöntemi içeren çalışmalar olduğundan bu yöntemler üzerinde daha detaylı bir şekilde durulmuştur.

2.1. Deneysel Yöntemler

Yeraltı galerilerinin duraylılığının sağlanabilmesi için koşullara bağlı olarak galeriye tahkimat uygulanması gerekebilmektedir. En güvenli ve ekonomik tahkimat sisteminin belirlenmesi yeraltı yapıları için önemlidir. Arazi incelemesinde elde edilen veriler çok zengin bile olsa, teorilerin mühendislik koşullarına uygulanmasında problemler söz konusu olabilir. Bunun bir sonucu olarak kaya kütle sınıflama sistemleri geliştirilmiştir. Bu sınıflamalar, teorinin eksiksiz olarak kullanıldığı ve kaya özelliklerinin tamamen ihmal edildiği iki uç durum arasında bir uzlaşıdan ibarettir [1].

Sınıflama sistemlerinin hepsi kilit rol oynadığı düşünülen kaya kütlesi ve malzeme özelliklerini dikkate alır ve bunlara sayısal değerler vererek elde edilen toplam puana göre kaya kütlelerini sınıflara ayırır. Deneysel yöntemler çalışma sırasında diğer yöntemlere göre pratik olmaları nedeniyle, mühendisler tarafından daha çok tercih edilirler. Kaya kütlesi sınıflandırıldıktan sonra örneğin bir galeri için gerekli tahkimat sisteminin seçiminde bu yöntemler doğrudan kılavuzluk eder.

Çizelge 2.1'de yer alan, Terzaghi tarafından önerilen Kaya Yüğü sınıflama sisteminden itibaren çok sayıda araştırmacı çeşitli sınıflama sistemi önerilerinde bulunmuştur. Bieniawski 1973 yılında Kaya Kütle Sınıflama (RMR) sistemini önermiş, sistem üzerinde birçok kez değişikliğe gitmiş ve 1989'da sisteme son şeklini vermiştir.

Sınıflama sistemlerinden yaygın kullanılanları, bunları öneren araştırmacılar ve önerildikleri ülkeler Çizelge 2.1'de yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Kaya kütlesi ile ilgili günümüze kadar geliştirilen sınıflama sistemleri, geliştirildikleri ülkeler, geliştirenler ve uygulama alanları [1]

	Sınıflama Sisteminin Adı	Geliştiren(ler)	Geliştirildiği Ülke	Uygulama Alanları
1.	Kaya yükü	Terzaghi, 1946	A.B.D.	Çelik destekli tüneller
2.	Desteksiz durma süresi	Lauffer, 1958	Avusturalya	Tünelcilik
3.	NATM (Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi)	Pacher vd., 1964	Avusturya	Tünelcilik
4.	RQD	Deere vd., 1967	A.B.D.	Karot loğlama, tünelcilik
5.	RSR	Wickham vd., 1972	A.B.D.	Tünelcilik
6.	RMR Sistemi	Bieniawski, 1973	G. Afrika	Tüneller, madenler, (şevler, temeller.)
		(son versiyon 1989)	A.B.D	
RMR Sistemi ile ilgili değişiklikler:				
Düzeltilmiş RMR '85	Weaver, 1975	G. Afrika	Sökülebilirlik	
	Laubscher, 1977	G. Afrika	Madencilik	
	Olivier, 1979	G. Afrika	Bozunabilirlik	
	Ghose ve Raju, 1981	Hindistan	Kömür madenciliği	
	Moreno Tallon, 1982	İspanya	Tünelcilik	
	Kendorski vd., 1983	A.B.D.	Sert kaya madenciliği	
	Nakao vd., 1983	Japonya	Tünelcilik	
	Serafim ve Pereria, 1983	Portekiz	Temeller	
	Gonzalez De Vallejo, 1983	İspanya	Tünelcilik	
	Ünal, 1983	A.B.D.	Kömür madenciliğinde tavan saplaması	
	Romana, 1985	İspanya	Şev duraylılığı	
	Newman ve Bieniawski, 1985	A.B.D.	Kömür madenciliği	
	Sandback, 1985	A.B.D.	Delinebilirlik	
Basitleştirilmiş RMR '85	Brook ve Dharmerante, 1985	Sri Lanka	Madencilik	
	Smith, 1986	A.B.D.	Taranabilirlik	
	Venkateswarlu, 1986	Hindistan	Kömür madenciliği	
	Robertson, 1988	Kanada	Şev duraylılığı	
M-RMR	Ünal ve Özkan, 1990	Türkiye	Madencilik	
Düzeltilmiş RMR '93	Sheorey, 1993	Hindistan	Kömür madenciliği	

Çizelge 2.1. (Devamı)

	Sınıflama Sisteminin Adı	Geliştiren(ler)	Geliştirildiği Ülke	Uygulama Alanları
7.	Q Sistemi	Barton vd., 1974	Norveç	Tüneller ve yeraltı boşlukları (odaları), madencilik
	Q Sistemi ile ilgili değişiklikler:			
		Kirsten, 1982	G. Afrika	Kazılabilirlik
		Kirsten, 1983	G. Afrika	Tünelcilik
	Modifiye Q	Grimstad ve Barton, 1993	Norveç	Tüneller, yer altı boşlukları, madencilik
	Modifiye Q	Sheorey, 1993	Hindistan	Kömür madenciliği
8.	Dayanım-boyut	Franklin, 1975	Kanada	Tünelcilik
9.	Temel jeoteknik sınıflama	ISRM, 1981	Uluslararası	Genel amaçlı
10.	MBR	Cummings vd., 1982	A.B.D.	Sert kaya madenciliği
11.	RMS	Stille vd., 1982	İsveç	Metal madenciliği
12.	Birleştirilmiş sınıflama sistemi	Williamson, 1984	A.B.D.	Genel iletişim amaçlı
13.	RMZ	Dong vd., 1989	Çin Halk Cumhuriyeti	Kömür madenciliği
14.	RTR	Inyang, 1991	A.B.D.	Tünelcilik, madencilik, şevler
15.	SGDM	Milne ve Potvin, 1992	Kanada	Madencilik
16.	GC	Mendes vd., 1993	Portekiz	Kömür madenciliği
17.	CMRR	Molinda ve Mark, 1993	A.B.D.	Kömür madenciliği
18.	RFI	Singh vd., 1994	Hindistan	Kömür madenciliği
19.	RMI	Palmstrom, 1985	Norveç	Tünelcilik

Görüldüğü üzere pek çok sınıflama sistemi olmasına rağmen bu çalışmada, en yaygın olarak kullanılan RMR sistemi esas alındığından üçüncü bölümde sistemin detaylı bir şekilde tanıtımına yer verilmiştir.

2.1.1. Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin kazanımları

Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden elde edilebilecek kazanımlar ise şu şekilde sıralanabilir;

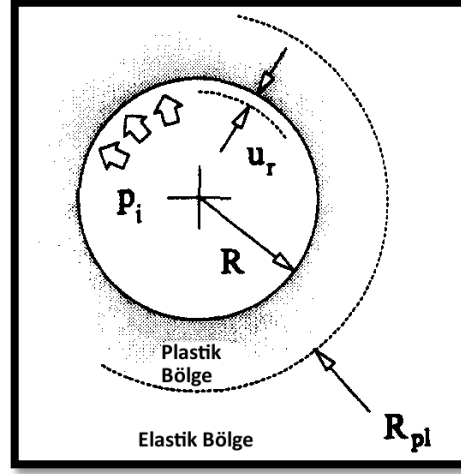
- En az sayıda sınıflama parametresi esas alınarak, toplanan verilerle saha çalışmalarının kalitesinin artırılması,
- Tasarıma yönelik amaçlar için sayısal veri sağlanması,
- Daha doğru mühendislik kararlarının alınabilmesi ve projelerde daha etkin bir iletişimin sağlanması [1].

2.2. Analitik Yöntemler

Bu kısımda en güncel ve yaygın kullanılan analitik yöntemlerden birisi olan Carranza-Torres [2] tanıtılacaktır. Analitik yöntemlerde; galeri açıklık boyutu, yeraltındaki gerilmeler, tek eksenli basınç dayanımı, Hoek-Brown parametreleri, poisson oranı, jeolojik dayanım indeksi (GSI), kaya kütlesinin birim hacim ağırlığı gibi birçok parametre hesaba katılmaktadır. Bu hesaplamalar sonucunda uygulanması gereken tahkimat özellikleri, oluşabilecek deformasyon miktarları, oluşacak gerilme değişimleri hesaplanabilmektedir. Carranza-Torres [2] tahkimat tasarımı ile ilgili çalışmasında bu hesaplamaların yanı sıra, bir yeraltı açıklığına yapılacak tahkimatın uygulayacağı basınçları hesaplamış ve bunu formülize etmiştir. Çalışmanın yöntem kısmında bu formüllerden faydalanılarak RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanlarının kaya kütlesine uyguladığı basınçlar hesaplanmıştır. Hesaplanan bu basınçlar galeri etrafına eşit olarak dağıtılıp modellemeler yapılmıştır. Analiz sonuçlarında elde edilen gerekli tahkimat basınçlarına göre kaya saplaması veya püskürtme beton miktarı hesaplamalarında kullanılabilecektir.

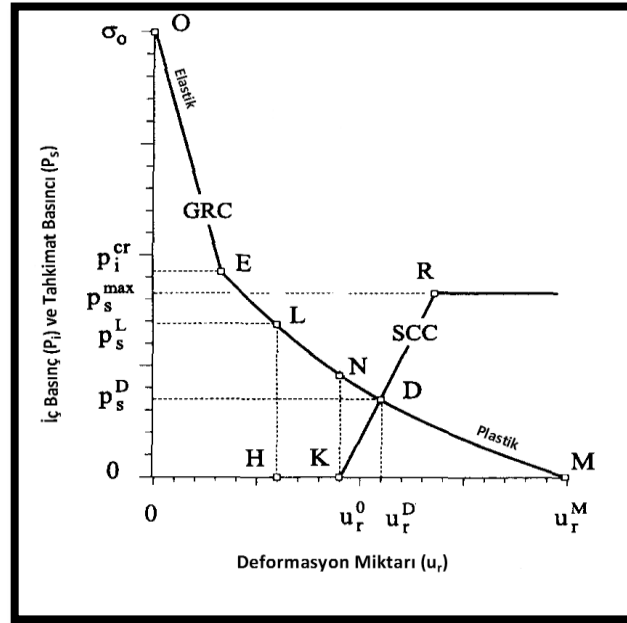
Şekil 2.1'de kaya kütlesinde açılan bir galeri ve etrafındaki farklı parametreler tanımlanmıştır. Açıklık etrafında oluşan gerilme değerleri, açıklığın duraylılığını sürdürmek için gerekli kritik tahkimat basıncı (P_i^{cr}), uygulanan tahkimat elemanının

kaya kütlesine etki ettiği basınç ($P_s^{\max}$) ve oluşacak deformasyonları (u_r) gösteren kaya kütle reaksiyon eğrisi Şekil 2.2'de verilmiştir [2].



Şekil 2.1. Galeri etrafındaki oluşan parametrelerin gösterimi [2]

- P_i : Uygulanan tahkimat basıncı (MPa)
- u_r : Galeri etrafında oluşan deformasyon miktarı (m)
- R : Galeri çapı (m)
- R_{pl} : Plastik bölge çapı (m)



Şekil 2.2. Gerilme - deformasyon grafiği [2]

- GRC : Kaya kütlesi reaksiyon (tepki) eğrisi
- SCC : Tahkimat karakteristik eğrisi

Carranza-Torres tarafından oluşturulan, tahkimat elemanlarının tahkimat basınçlarına çevriminde kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

İç tahkimat basıncı (P_i) formülü;

$$P_i = \frac{P_i}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad \{1\}$$

Normalleştirilmiş birincil gerilme (S_0) formülü;

$$S_0 = \frac{\sigma_0}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad \{2\}$$

Elastik limitteki kritik iç tahkimat basıncı (P_i^{cr}) formülü;

$$P_i^{cr} = \frac{1}{16} [1 - \sqrt{1 + 16S_0}]^2 \quad \{3\}$$

Kritik iç tahkimat basıncı formülü;

$$P_i^{cr} = \left[P_i^{cr} - \frac{s}{m_b^2} \right] m_b \sigma_{ci} \quad \{4\}$$

Burada;

- P_i^{cr} : Kritik iç tahkimat basıncı (MPa)
- m_b : Hoek-Brown parametresi
- s : Hoek-Brown parametresi
- σ_{ci} : Kaya malzemesini tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
- σ_0 : Tünel etrafındaki kaya kütleline ait gerilme değeri (MPa)
- S_0 : Birincil gerilme (MPa)

Püskürtme beton tahkimatı basınç formülü;

$$P_s^{max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \frac{(R-t_c)^2}{R^2} \right] \quad \{5\}$$

Püskürtme betonun elastik sertlik durumunda kullanılan formül;

$$K_s = \frac{E_c}{(1-\nu_c)R} \frac{R^2 - (R-t_c)^2}{(1-2\nu_c)R^2 + (R-t_c)^2} \quad \{6\}$$

Burada;

- P_s^{max} : Püskürtme beton basıncı (MPa)
- σ_{cc} : püskürtme betonun tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
- E_c : Püskürtme betonun deformasyon modülü
- ν_c : Püskürtme betonun poisson oranı
- t_c : Püskürtme beton kalınlığı (m)
- R : Tahkimatın dış yarıçapı (m)

Kaya saplama tahkimatı basınç formülü;

$$P_s^{max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_l} \quad \{7\}$$

Kaya saplamasının elastik sertlik durumunda kullanılan formül;

$$\frac{1}{K_s} = s_c s_l \left[\frac{4l}{\pi d_b^2 E_s} + Q \right] \quad \{8\}$$

Burada;

- P_s^{max} : Kaya saplaması basıncı (MPa)
- d_b : Kaya saplaması çapı (m)
- l : Kaya saplaması uzunluğu (m)
- T_{bf} : Kaya saplaması maksimum taşıma kapasitesi (MPa)
- Q : Deformasyon yük sabiti
- E_s : Kaya saplamasının deformasyon modülü
- s_c : Tünel kesitinde saplamalar arası çevresel uzaklık (m)
- s_l : Tünel eksen boyunca saplamalar arası uzaklık (m)

Bu formüller ile RMR sisteminin önerdiği; kaya saplaması ve püskürtme beton tahkimatlarının basınçları (MPa olarak) hesaplanarak, sayısal modellemeye dâhil edilmiştir. Araştırma bulgularındaki gerekli tahkimat basınçları da bu formüller yardımıyla püskürtme beton ve/veya kaya saplaması gibi tahkimat elemanlarına dönüştürüle bilecektir.

2.3. Sayısal Yöntemler

Madencilik açıklıkları tasarımında son yıllarda en etkili olarak kullanılan yöntemlerden birisi de sayısal hesaplama yöntemleridir. Sonlu eleman, sonlu farklar, sınır eleman ve ayırık eleman gibi farklı düzeyde analiz yapılabilen bu yöntemlerde, bir model oluşturulmakta ve modeller farklı yükleme ve geometri koşullarında, boyut

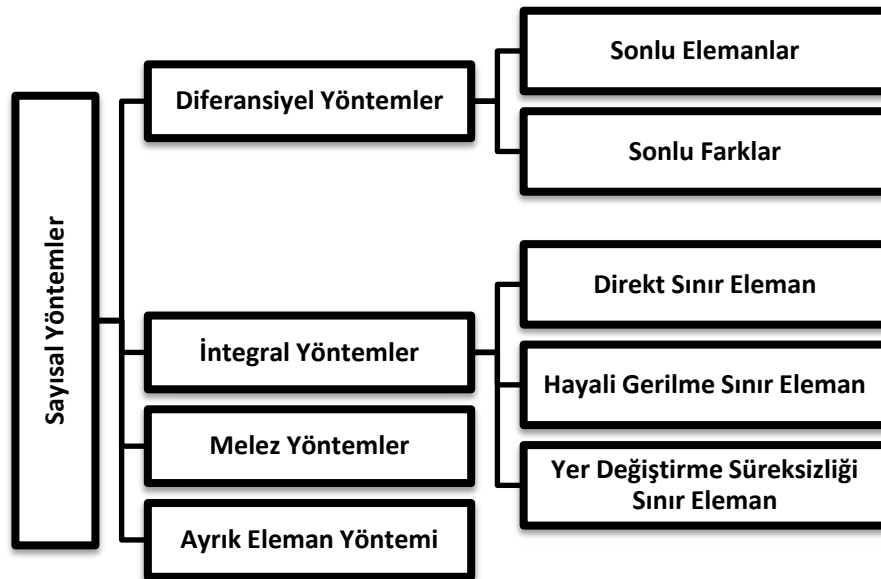
etkisi de dikkate alınarak analiz edilmektedir. Birim deformasyon veya gerilme kontrollü olarak çözüm yapılabilir. Sayısal yöntemler diğer yöntemlere oranla daha az maliyete ihtiyaç duyduğu ve birçok farklı alanlarda da kullanılabilmesi yönünden, kısa süre içerisinde hızlıca gelişerek yayılmıştır. Sayısal yöntemler madencilikte; galeri, kuyu, kazı arını, şev gibi önemli özelliğe sahip bölgelerin tasarımlarında, kazı öncesi, kazı sırası ve sonrası için gerilme durumları kestiriminde, arazi davranışı analizi hesaplamalarında kullanılmaktadır.

Günümüzde çok yüksek yatırımlarla açılan yeraltı boşlukları ve yeryüzü yapıları genellikle modelleme yapıldıktan sonra tasarlanırlar. Gerçekten de doğru kullanıldığında modelleme çalışma bölgesinde emniyetin ve üretimin artırılması için vazgeçilmez bir ön araştırma aracıdır. Analitik modelleme ile bir problemin çözümünde genellikle, diferansiyel ya da integral denklem takımının çözümü gibi karmaşık matematiksel işlemler kullanılır. Bu denklemler dairesel ya da elips şeklindeki boşluklar gibi basit yapılar üzerinde yapılan analizlerde analitik olarak çözülebilirler. Ancak kaya içindeki yapılar genellikle farklı şekillerde ve homojen olmayan ortamlarda oluşturulduklarından denklemler ancak sayısal yaklaşımlar ile çözümlenebilir. Sayısal yöntemler yardımıyla en basit problemlerin çözülmesi, aritmetiksel işlem sayısı fazla olması nedeniyle ancak bilgisayar yardımı ile gerçekleştirilir [3].

Kaya kütleleri 1960'lı yıllarda kullanılan ilk sayısal yöntemlerde homojen, izotrop ve elastik olarak kabul edilerek iki boyutta modellenmiş ancak bu basit algoritmalar bile araştırma merkezlerinin bilgisayarlarında uzun zaman alarak çalışmıştır. Günümüzde kişisel bilgisayar ve programlama tekniklerinin gelişmesi ile mühendis seviyesindeki araştırmacılar dahi sayısal modellemeyi başarı ile kullanabilmektedir. Günümüzdeki modelleme teknikleri ile statik gerilme analizinin yanında termik, dinamik nedenli ya da akışkan basıncından doğan gerilme ve stabilite analizleri de yapılabilir. Ayrıca, homojen izotrop ve elastik kaya kütlelerinin dışında süreksizlikler içeren, plastik ya da anizotropik ortamlar da modellenebilmektedir. Hatta tahkimatı yapılmış kaya kütleleri, aşamalı kazı, yerçekimi

etkisi, kayanın yenilmeden sonraki davranışı, çatlak mekaniği analizlerini yapmak da olanaklıdır [3].

Yeraltı madencilik galerileri tasarımı, modelleme açısından hem problemin az bilindiği hem de verilerin az ve değişken olduğu bir alandır. Bu yüzden makina ve inşaat mühendisliğinde olduğu gibi sayısal modelleme tasarım için direkt olarak kullanılmaz. Genellikle jeolojik detayın bilinmemesi modelin kabul edilmemesine yol açabilir. Modelcinin istenilen verileri toplaması ise pahalı laboratuvar deneyleri ve arazi ölçümleri gerektirir. Modellemeye veri toplamak için bu işlemlere fazla yatırım yapmak sayısal modellemenin ucuzluk avantajını ortadan kaldırabilir [3]. Bu sebeplerden dolayı araştırmacı tarafından, gerekli jeolojik verilerin elde edilmesi sayısal hesaplama yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan sayısal yöntemler Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Sayısal yöntemlerin sınıflandırılması [3]

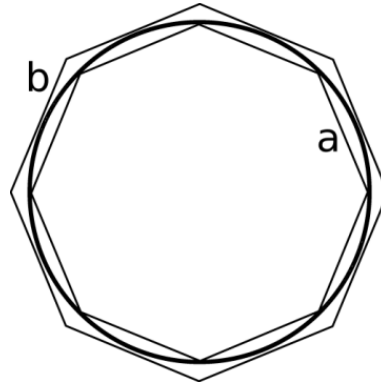
2.3.1. Diferansiyel yöntemler

Diferansiyel yöntemde kaya kütesinin tümü elemanlara ya da bölgelere ayrılır ve hesaplamalar bu elemanlar üzerinde yapılarak sonuçlar elde edilir. Sonlu eleman ve sonlu farklar en çok kullanılan diferansiyel yöntemlerdir [3].

2.3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, birçok mühendislik türünde bulunan problemlerin hassas bir şekilde çözülmesi için kullanılır. Bu sebepten sonlu elemanlar yöntemi hızlı bir şekilde gelişmiş ve en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi olmuştur.

Sonlu elemanlar yönteminin temelleri birkaç yüzyıl öncesine dayanmaktadır. Yöntem ilk olarak matematikçiler tarafından kullanılmıştır. Matematikçiler dairenin çevresini, çokgenler yardımıyla hesaplamışlardır (Şekil 2.4). Burada dairenin çevresi, dışında ve içinde bulunan çokgenlerin çevre uzunluklarının arasında bir ölçüye sahiptir. Çokgenlerin kenar sayısı arttıkça dairenin gerçek çevresine yaklaşılmaktadır ($8a < \text{dairenin çevresi} < 8b$). Günümüzde ise bu çokgenin her bir kenarı sonlu eleman olarak adlandırılmaktadır.

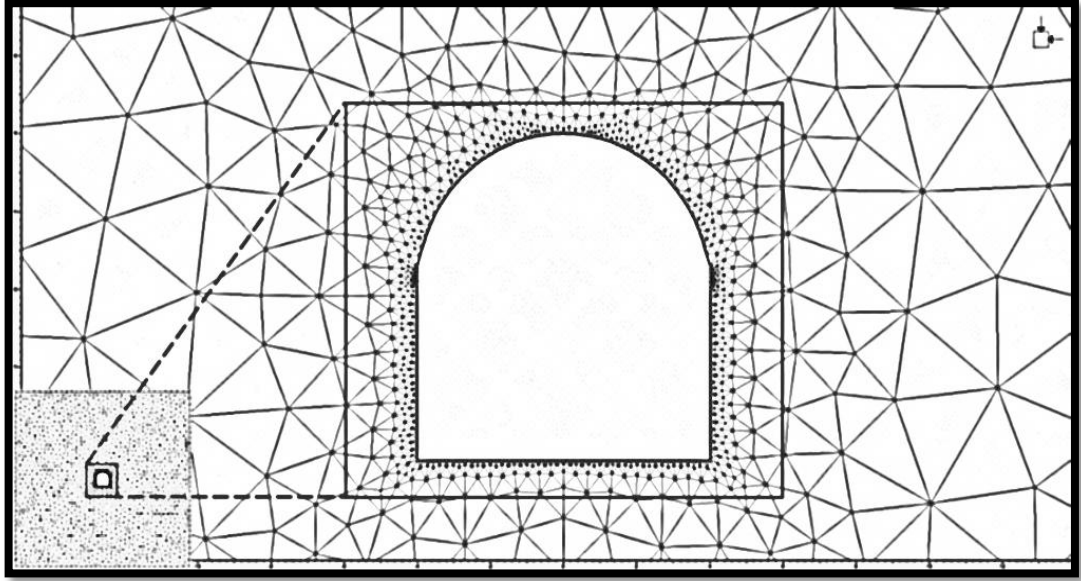


Şekil 2.4. Çokgenler yardımı ile daire çevresi ve alanının hesaplanması

Köse'nin tanımına göre [4] sonlu elemanlar yönteminde pratik boyutlarda seçilen alan bir örgü (mesh) oluşturacak şekilde, iki boyutlu problemlere genellikle üçgen ya da dörtgen elemanlara bölünür [3].

Şekil 2.5'te iki boyutta bir yeraltı boşluğunun (galeri kesitinin) etrafındaki kaya kütesinin sonlu elemanlar ile örgüye ayrılmış temsili şekli görülmektedir. Örgüde bitişik elemanların köşeleri aynı düğüm noktasını paylaşır. Aynı elemanı paylaşan bu düğüm noktalarında yer değiştirmenin sonuçta eşit olması amacı ile lineer bir denklem sistemi kurulur. Modele etki eden kuvvetler ve yer değiştirmeler denklem sisteminde bilinenler

olarak yer alırlar. Denklemin çözümü ile bulunan düğümlerdeki yer değiştirmenin türevi ile birim deformasyon ve her düğüm noktası için Hoek kanunu ile gerilmeler bulunabilir. İki boyutlu problemlerde düğüm sayısının iki katı kadar denklem ortaya çıkar. Örneğin, orta boyutta bir arazi kontrolü modelinde 1000 kadar düğüm kullanıldığında 2000x2000'lik bir denklem sisteminin çözümü gerekir. Bu çözümün sonuçlanması ise uzun zaman alabilir [3].



Şekil 2.5. Sonlu elemanlar yönteminde açıklık etrafında oluşturulan örgüler

Sonlu elemanlar yönteminde fiziksel olarak eleman rijitesini belirlemek gerekmektedir. Bir elemanın her düğüm noktasındaki yer değiştirmeleri, bu noktalara etkiyen kuvvetlerle orantılıdır. Eleman rijitesi mutlak bir sabit olmayıp, yüklerin değişmesi ile değişir ve kırılma noktası altında yüklenmiş elemanların durumu için geçerlidir. Gerçekte elemanın yüke karşı olan reaksiyonu, malzemenin deneysel yoldan belirlenmiş gerilme - birim deformasyon ilişkisi olarak hesaplamalara yansımaktadır. Eleman reaksiyonunun belirlenmesi için diferansiyel denklemlerden oluşan bir cebirsel denklemler sistemi kurulur. Bu cebirsel sistemle, sayısal olarak düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin elemanlardaki gerilme ve birim deformasyonların çözümüne gidilir. Belirlenen eleman gerilmeleri, bir kırılma ölçütü olarak örgü içindeki tüm elemanların

emniyet faktörlerinin hesaplanması ve yapının bir bütün olarak stabilitesinin sağlanması için kullanılmaktadır [5].

Yeraltı galerilerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde birtakım zorluklar vardır. Bu zorluklardan biri; sonsuz genişlikte varsayılan zemin kütlelerinin temsil edilmesi, bir başka ifade ile açıklığı saran malzeme kütlesi içindeki ilgi sahasının sınır şartlarının belirlenmesidir. Bu amaçla bazı çalışmalar yapılmış ve sonuçlar uluslararası toplantılarda tartışılmıştır. Bu çalışmalardan biri, Kulhawy tarafından 1974 yılında düzlem birim deformasyon şartları için yapılanıdır. Kulhawy'e [6] göre, sonlu elemanların tünel merkezinden uzaklığı en az tünel yarıçapının 6 katı olmalıdır. Sonlu eleman ağının sınır şartlarının belirlenmesinde en etkili faktör, tünelin açıldığı ortamdır. Bu ortamın kaya ve zemin olması, süreksizliklerin varlığı, yeraltı suyu durumu modelleme için birer ölçüt olmaktadır [5].

Sonlu elemanlar yönteminin avantaj ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır.

Avantajları:

- ✓ En çok kullanılmış olan yöntemdir, arazi kontrolünde birçok başarılı uygulaması vardır,
- ✓ Kaya kütlelerinde oluşturulan mesh boyutları değiştirilerek hesaplama süreleri kısaltılabilmektedir,
- ✓ Farklı özellikli tabakalar modellenabilir,
- ✓ Zamana bağlı deformasyon, visko-elastisite, elasto-plastik malzeme, aşamalı kazı, [7]; doğrusal olmayan elastisite, [8]; süreksizlikler modele katılabilir [3].

Dezavantajları:

- Tüm kayaç kütlelerinin, hatta kazıdan birkaç cm uzağının bile elemanlara ayrılması gerekebilir. Bu durum hesaplama sayısını arttırır,
- Sonsuzdaki sınır şartları yaklaşık olarak hesaplanır,
- Kayacın ilerleyen yenilmesinde ortaya çıkan yüksek yer değiştirmeler normal dışı sonuçlar verir [3].

Yapılan bu çalışmada avantaj ve dezavantajlarda dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemi sayısal yöntem olarak seçilmiştir. Bu yöntemin seçiminde rol oynayan ana sebep ise sonlu elemanlar ile hesaplama yapan yazılımlarda kaya kütle özellikleri, gerilme değerleri gibi girdi parametrelerinin kolay bir şekilde değiştirilip farklı türde bölgeler için hesaplama yapılabilir olmasıdır.

2.3.1.2. Sonlu farklar yöntemi

Sokohnikoff [9] tarafından sonlu farklar yöntemi sınır değer problemlerindeki diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözümü için kullanılmıştır. Bu yöntemde de sonlu elemanlarda olduğu gibi tüm kaya kütlesi elemanlara ayrılır ve elemana farklı özellikler atanabilir; kayacın ilerleyen yenilmesi gibi büyük yer değiştirmelere neden olan olaylar daha kolay ele alınabilir [3].

Entegre sonlu farklar yönteminde çözüm küçük bir zaman parçasında yapılır. Her düğümün yer değiştirmesi sadece o zaman parçasında komşu düğümleri etkiler. Örneğin modelin bir köşesinden etkiyen kuvvetin tüm ortama yayılması için her biri küçük bir zaman parçasında modeldeki yer değiştirmeleri yeniden hesaplayan birçok iterasyon gerekir [3]. Şekil 2.6'da sonlu farklar hesaplaması yapan bir programın ekran görüntüsü verilmiştir.

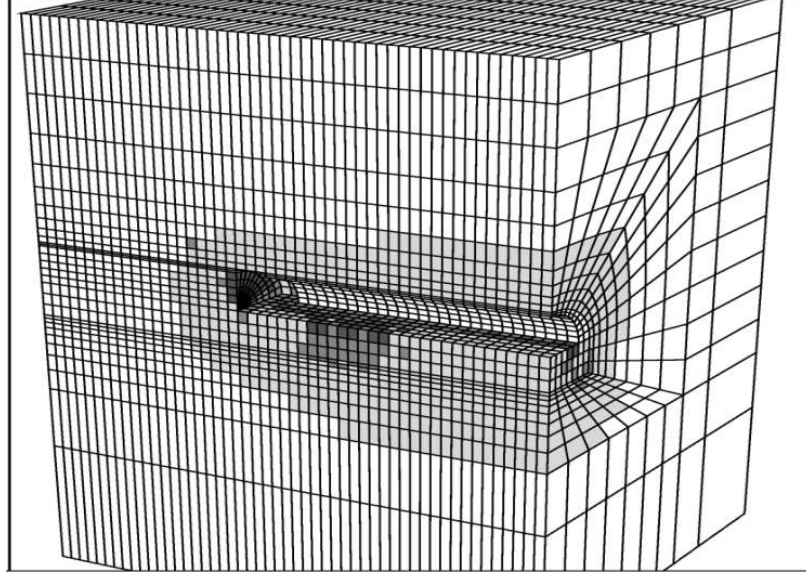
Sonlu farklar yönteminin avantaj ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır.

Avantajları:

- ✓ Farklı özellikli tabakalar ve kayacın ilerleyen yenilmesi modellenenebilir,
- ✓ Zamana bağlı deformasyon, visko-elastisite, elasto-plastik malzeme, aşamalı kazı, [7]; doğrusal olmayan elastisite, [8]; süreksizlikler modele katılabilir,
- ✓ Sonlu farklar ile kayacın ilerleyen yenilmesinde ortaya çıkan yüksek yer değiştirmeler normal sonuçlar verir,
- ✓ Büyük matrisler ortaya çıkmadığından gereken bilgisayar hafızası ve çözüm zamanı sonlu elemanlardan azdır [3].

Dezavantajları:

- Sonlu elemanlarda olduğu gibi tüm kayaç kütesinin, hatta kazıdan birkaç cm uzağının bile elemanlara ayrılması gerekebilir,
- İterasyon zaman aralığını belirleme deneyim ister,
- Basit elastik problemler sonlu elemanlardan daha uzun zamanda çözülür [3].



Şekil 2.6. Sonlu farklar hesaplama yöntemi yapan program görseli [10]

Yapılan çalışmanın hesaplama kısmında, basit problemler hesaplanmıştır ve çok sayıda farklı bölgenin modellenmesi yapılmıştır. Bu sebepler göz önüne alındığında sonlu farklar yönteminde hesaplamaların uzun zaman alacağı düşünülmüş ve ayrıca yöntemin dezavantajları da dikkate alınarak yöntem seçilmemiştir.

2.3.2. Sınır elemanları yöntemi

Önceleri makine ve inşaat bilim dallarında geliştirilmiş fakat jeoteknik ile ilgili araştırmacılar tarafından daha fazla rağbet görmüştür. Buna neden olarak, bu yöntemde sadece kazı sınırlarını örgüye ayırmanın yeterli olması, bütün kaya kütesini örgülemek gerekmediği gösterilebilir [3].

Şekil 2.7'deki iki boyutlu örgü sadece tünel kesitini doğru parçalarına bölmek yoluyla elde edilmiştir. Üç türlü sınır eleman yöntemi mevcuttur. Bunlar; direkt sınır

eleman yöntemi, hayali gerilme sınır eleman yöntemi ve yer değiştirme süreksizliği sınır eleman yöntemidir. Matematiksel olarak birbirlerinden çok az farklıdırlar. Direkt sınır eleman yöntemi, hayali gerilme sınır eleman yöntemi; iki boyutlu elastik problemlerin çözümüne, yer değiştirme süreksizliği sınır eleman yöntemi; süreksizlik içeren kütlelerin elastik analizine uygundur [3].

Sınır elemanlar yönteminde sınır değer problemi sadece sınır üzerindeki komşu elemanların düğümlerindeki yer değiştirmelerin eşit olması varsayımına dayanır. Sonuca ulaşmak için sonlu elemanlarda olduğu gibi büyük bilgisayar hafızası gerektiren lineer denklem sisteminin çözümü gerekir. Ancak aynı problem için sonlu elemanlara kıyasla daha küçük matrisler ortaya çıkar [3].

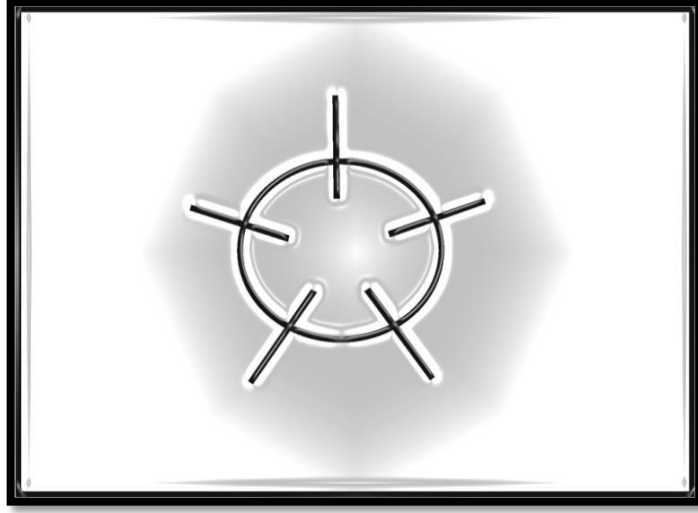
Sınır elemanlar yönteminin avantaj ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır.

Avantajları:

- ✓ Sonsuzdaki sınır şartları yöntemin yapısı gereği otomatik olarak bulunur,
- ✓ Süreksizlikler (kaya eklemleri ve faylar), yer değiştirme süreksizliği yöntemi ile ele alınabilir,
- ✓ Sınır elemanlar, üç boyutlu problemleri iki ve iki boyutluları bir boyuta indirgeyen bir yöntem olduğundan örgüye ayırma basitleşmiştir [3].

Dezavantajları:

- Sınır elemanlarda kuramsal kavramların anlaşılması problemin çözümünde integral denklemler ortaya çıkardığından, diferansiyel yöntemden daha zordur. Sınır elemanlar konusunda kuramsal ilerleme yapılması için tansör analizinin bilinmesi de gerekir,
- Farklı elastik özellikli tabakalar farklı kuramsal çözümler gerektirirler. Böylece problem çeşitlerine göre yazılım geliştirmek gerekir.
- Lineer olmayan gerilme, zamana bağlı deformasyon, visko-elastisite, elasto-plastik malzeme, aşamalı kazı, doğrusal olmayan elastisite, tahkimat elemanlarının modellemeye katılması çok zordur [3].



Şekil 2.7. Sınır elemanlara ayrılmış yeraltı boşluğu

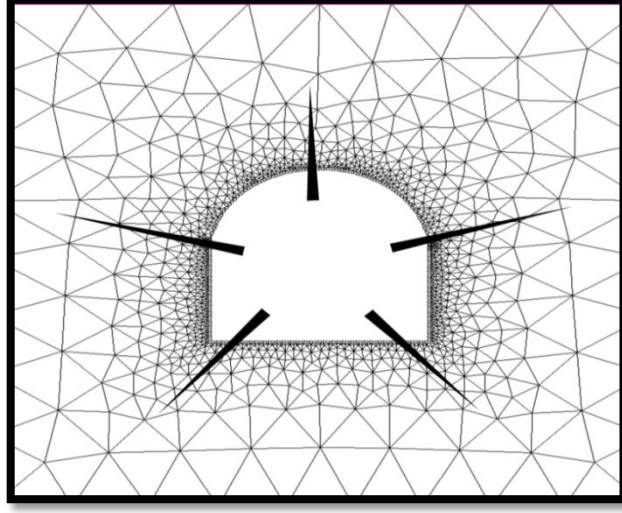
Yapılan çalışmada kaya kütleğinde oluşacak gerilmeler ve açıklık etrafındaki yenilmiş zonun önemi büyüktür, bu yöntemde ise sadece kazı sınırı üzerinden hesaplamalar yapılabilmektedir. Bu özellikle birlikte diğer dezavantajlarda yöntemin seçilmemesinde büyük rol oynamıştır. Ayrıca bu çalışmada kullanılacak olan kaya kütlesi elasto-plastik malzeme olduğundan bu yöntem seçilmemiştir.

2.3.3. Melez yöntemler

Melez yöntem, genellikle sınır elemanları yönteminin sonlu elemanlar ya da ayırık elemanlar yöntemleriyle matematiksel olarak birleştirilmesinden oluşur.

Şekil 2.8'de sonlu ve sınır elemanlarından oluşan bir melez yöntem ile modellenen yeraltı boşluğu görülmektedir. Boşluğun etrafı, örneğin galeri kesiti gibi; çapın 2-3 katına kadar sonlu eleman örgüsüne ayrılmış, sonlu eleman örgünün sınırına ise sınır elemanları yerleştirilmiştir. Böylece hem sonsuzdaki sınır şartları otomatik olarak sağlanmış, hem de bütün kaya kütleğinin sonlu elemanlara ayrılması önlenerek bilgisayar hafızası ve zamandan tasarruf edilmiştir. Kazının etrafında sonlu elemanın tüm avantajlarından faydalanılabilirken sonsuzda sınır şartları otomatik olarak hesaplanmıştır. Melez yöntemlerin arazi kontrolünde kullanımı üzerine fazla çalışma yapılmadığından dikkatle uygulanmaları gerekmektedir [3].

Yöntem üzerinde fazla çalışma olmaması ve sonsuzdaki sınır şartları otomatik olarak hesaplandığından yöntem tercih edilmemiştir.



Şekil 2.8. Melez yöntem ile elemanlara ayrılmış kaya kütlesi

2.3.4. Ayrık elemanlar yöntemi

Cundall [11] tarafından ayrık elemanlar yöntemi kaya kütlesinin süreksizlikler içerdiği ortamların modellenmesi için geliştirilmiştir. Bu yöntemde süreksizliklerle komşu bloklardan ayrılmış kaya parçası tek bir eleman olarak kabul edilir [3].

Şekil 2.9'daki kaya kütlesi birçok faylanma düzlemi içermektedir. Bu ortamda açılacak bir galerinin stabilitesi oluşan kamaların yerçekimi etkisi ile yer değiştirme ve dönmelerine bağlıdır. Şekil 2.9'daki faylardan dolayı tünelin tavanında ve yan duvarlarında bulunan, boşta kalan bloklar belli sürtünme şartları gerçekleştiğinde boşluk içine kayabilir. Ayrık elemanlarla bu tür ortamlar modellenebildiği gibi, eğer deformasyon ve gerilme analizi de gerekiyorsa süreksizliklerle sınırları belirlenmiş her kaya parçası, sadece kendi içinde sonlu farklar ile alt elemanlara ayrılır. Böylece gerilme ve yerçekimi etkisinin bir arada stabiliteye etkisi incelenebilir [3].

Ayrık elemanlar yönteminin temeli sonlu farklara benzer. Çözüm küçük bir zaman parçası için yapılır. Her parçanın yer değiştirmesinden sadece komşu parçalar etkilenir. Problem ardışık iterasyonlar ile çözülür. Modelleme yapan kişi problemin

özüm zamanını deneyimleri ile saptar. Örneğın Şekil 2.9'daki blokların kaymaya başlaması modellemeyi durdurmak için yeterli koşul olabilir.

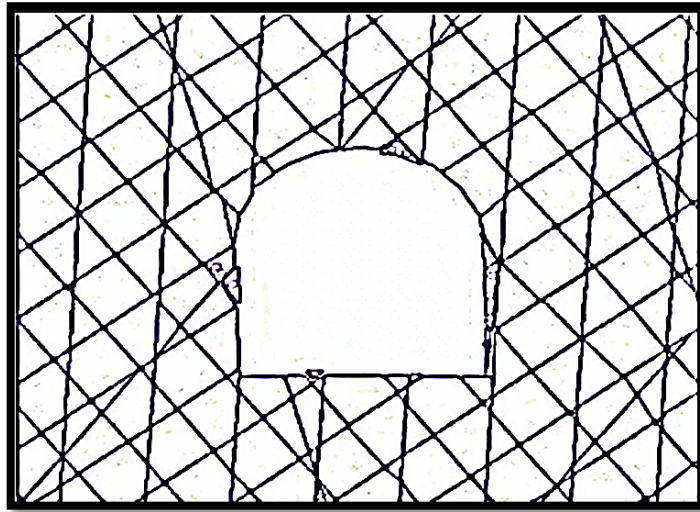
Ayrık elemanlar yönteminin avantaj ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır.

Avantajları;

- ✓ Süreksizlikler (eklemler ve faylar), aşamalı kazı, dolgu, kayacın ilerleyen yenilmesi, visko-elastik, tahkimat elemanları, termal gerilme ve yerçekimi etkisi kolayca ele alınabilir,
- ✓ Sınır elemanları ile bu yöntem kaynaştırılabilir [3].

Dezavantajları;

- Büyük modellerde, uzun çözüm zamanı gerekir,
- Kaya eklemlerinin özelliklerinde örneğın dalım yönü gibi; küçük bir artış sonuçları değıştirebilir, örneğın duraylı olan kama kayabilir [3].



Şekil 2.9. Sınır elemanlara ayrılmış yeraltı boşluğu [12]

özüm metodu sınır elemanlar gibidir ve oluşturulan galeri etrafındaki kaya kütlelerinin içerdğı süreksizliklerin hesaplandğı bir yöntemdir. Yapılan çalışmada süreksizlikler ile ilgili bir hesaplama yapılmayacaktır. Bu sebeplerden ayrık elemanlar yöntemi tercih edilmemiştir.

3. RMR SINIFLAMA SİSTEMİ

RMR sınıflama sistemi, kaya kütlesinin sınıflandırılması ve tahkimat tasarımında kullanılan deneysel tasarım yaklaşımıdır. Bu sistemin seçilmesinin ana sebepleri, sistemin yaygın olarak kullanılması ve sistemden elde edilen verilerin kolayca sayısal yaklaşımlara girdi parametresi olarak dönüştürülebilmesidir. Bu kısımda söz konusu bu sistem ile ilgili bilgiler verilip temel algoritmasına değinilmiştir.

3.1. Sistemin Gelişimi ve Esasları

RMR sınıflama sistemi, ilk kez 1972-1973 yılları arasında Bieniawski tarafından geliştirilmiştir. Başlangıçta bu sistem, Bieniawski'nin sedimanter kayalarda açılmış tünellerde yaptığı gözlemler ve bu gözlemlerden kazandığı deneyimler esas alınarak geliştirilmiştir. Bieniawski [13] tarafından 1973'ten 1989'a kadar tüneller, büyük yeraltı açıklıkları, maden işletmeleri ile ilgili toplam 351 farklı uygulamadan derlenen veriler ve kazanılan deneyimler çerçevesinde sistem son şeklini almıştır [1].

Bieniawski [14], bir görgül yöntem olan kaya kütlesi sınıflama sisteminin başlıca amaçlarını aşağıdaki gibi belirtmiştir [1].

- Kaya kütlesinin davranışını etkileyen önemli parametreleri tayin etmek,
- Kaya kütlesini kendi içerisinde benzer özellikler gösteren bölgelere ayırarak değişik kalitedeki kaya kütlesi sınıflarını belirlemek,
- Her kaya kütlesi sınıfının özelliklerinin anlaşılması amacıyla esaslar oluşturmak,
- Herhangi bir sahadaki kaya kütlesi koşullarıyla ilgili olarak kazanılan deneyimleri diğer sahalarda elde edilen koşullarla karşılaştırıp ilişki kurmak,
- Mühendislik tasarımı için sayısal veri tabanı ve bir kılavuz oluşturmak,
- Mühendisler arasında ortak temele dayalı teknik iletişimi sağlamak.

3.2. Sistemin 1973'teki İlk Hali

İlk kez 1973'te önerilen sistemde aşağıda belirtilen 8 parametre esas alınmakta ve sınıflama bu parametrelere verilen puanlara göre yapılmaktaydı [1]. Bu parametreler;

- Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
- RQD (Kaya kalite göstergesi)
- Bozunmanın derecesi
- Süreksizlik aralığı
- Süreksizlik açıklığı
- Süreksizliklerin devamlılığı
- Yeraltı suyu akışı
- Süreksizlik yönelimi'dir.

ISRM [15] tarafından yukarıdaki parametrelerin tanımlanması amacıyla daha sonraki yıllarda önerilen ve yaygın bir kullanım alanı bulan tanımlama ölçütleri ve değişim aralıkları sistemin önerildiği o dönemde henüz gündeme gelmediğinden, RQD'nin dışındaki parametreler değişik araştırmacıların 1973'e kadar önerdikleri tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. O dönemde dayanım (a), süreksizlik aralığı (b) ve bozunma (c) gibi parametrelerin tanımlanması için sistem tarafından kullanılan ölçütler Çizelge 3.1 – 3.2'de verilmiştir. Diğer parametrelere ilişkin tanımlamalar ve değişim aralıkları ise Bieniawski [16] tarafından önerilmiştir.

Çizelge 3.3'te sistemin içerdiği beş kaya sınıfı için her parametrenin tanımı ve/veya sayısal olarak değişim aralığı görülmektedir. Bu çizelgedeki tüm parametreler, birbirleriyle olan etkileşimlerine göre kaya kütlelerinin davranışı üzerinde tek başlarına veya birlikte rol oynamaktadır. Eğim ve doğrultu parametresi, tüneller ve yapı temelleri gibi ve herhangi bir sayısal veri esas alınmaksızın, "çok uygun" ile "hiç uygun değil" arasında değişen beş farklı tanımlamaya bağlı olarak belirlenmekteydi (Çizelge 3.3). Ancak bu amaçla verilen tanımlamalar için esas alınabilecek, örneğin süreksizlikler ile tünelin yönelimi arasındaki ilişki vb. gibi ölçütlere sistemde yer verilmemiş olması,

yönelim parametresinin ve dolayısıyla kaya kütlesi sınıflama puanının tayininde belirsizliğe yol açmakta ve sistemin, o tarihteki durumu açısından tartışmaya açık bir konu olarak görülmektedir [1].

Çizelge 3.1. RMR sisteminin 1973 yılında kullanılan, tek eksenli basınç dayanımı ve süreksizlik aralığı parametrelerinin tanımlanma ölçütleri [1]

(a) Kaya Malzemesinin Tek Eksenli Basınç Dayanımı		
Tanım	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	
Çok düşük dayanım	1-25	
Düşük dayanım	25-50	
Orta derecede dayanım	50-100	
Yüksek dayanım	100-200	
Çok yüksek dayanım	>200	

(b) Süreksizlik Aralığı		
Tanım	Aralık	Kaya kütlesi tanımı
Çok geniş aralıklı	>3m	Sağlam
Geniş aralıklı	1-3m	Masif
Orta aralıklı	0.3-1.0m	Bloklu / katmanlı
Yakın aralıklı	50-300mm	Kırıklı
Çok yakın aralıklı	<50mm	Parçalanmış

Çizelge 3.2. RMR sisteminin 1973 yılında kullanılan, bozunma parametrelerinin tanımlanma ölçütleri [1]

(c) Bozunma	Tanımlama Ölçütü
Bozunmamış kaya	Kayada bozunmanın belirtileri gözlenmiyor. Kaya taze ve mineraller parlak. Birkaç süreksizlik yüzeyinde çok az oksitlenme izi gözlenebilir.
Az bozunmuş kaya	Açık süreksizlik yüzeylerinde kayaya nüfuz eden bir bozunma gözlenmekle birlikte, kaya malzemesi çok az bozunmuş. Süreksizliklerde renk değişimi söz konusu ve değişim süreksizlik yüzeyinden itibaren kayanın içine doğru 10mm kadar ilerlemiş.
Orta derecede bozunmuş kaya	Kaya kütlesinin önemli bir bölümünde hafif renk değişimi gözleniyor. Zayıf çimentolanmış sedimanter kayalar hariç, kaya malzemesi kırılgan değil. Süreksizlik yüzeyleri oksitlenmiş ve/veya bozunmuş malzemeden oluşan dolgu malzemesi ile kaplı.
Çok fazla bozunmuş kaya	Bozunma, tüm kaya kütlesinde gözleniyor ve kaya malzemesi kısmen kırılgan özellikte. Kayada parlaklık yok. Kuvars hariç, tüm malzemede renk değişimi gözleniyor. Kaya, jeolog çekicinin darbeleriyle kazılabilecek derecede zayıf.
Tamamen bozunmuş kaya	Kaya, orijinal rengini tamamen yitirmiş, bozunmuş ve kırılgan, ayrıca kayanın yapı ve dokusunu koruyan parçacıklar gözleniyor. Kaya, dış görünüşü itibarıyla toprak zemin özelliğine sahip.

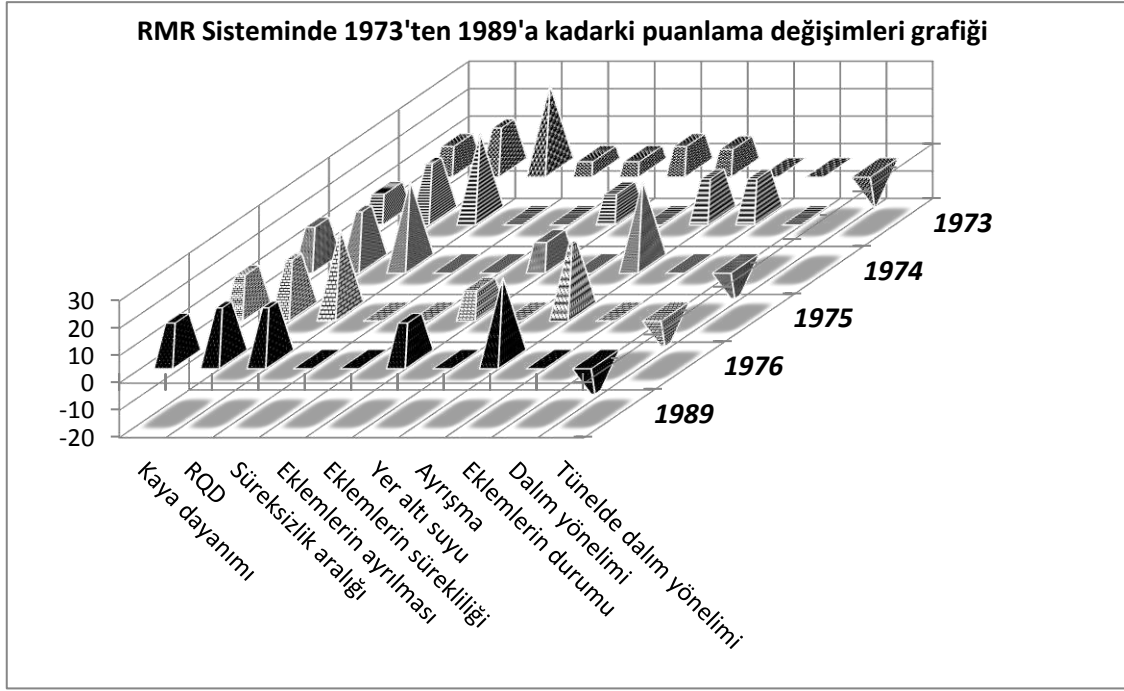
Çizelge 3.3. RMR sisteminde 1973 yılında kullanılan parametrelerin tanımlama ölçütleri ve değişim aralıkları [1]

No	Parametre	1	2	3	4	5
		Çok iyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok zayıf
1	RQD(%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
2	Bozunma	Bozunmamış	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Çok fazla bozunmuş	Tamamen bozunmuş
3	Kaya malzemesinin dayanımı (MPa)	>200	100-200	50-100	25-50	<25
4	Süreksizlik aralığı	>3m	1-3m	0.3-1m	50-300mm	<50mm
5	Süreksizlik açıklığı	<0.1mm	<0.1 mm	0.1-1mm	1-5mm	>5mm
6	Süreksizliğin devamlılığı	Sürekli değil	Yok	Sürekli dolgu yok	Sürekli ve dolgulu	Sürekli ve dolgulu
7	Yeraltı suyu akışı (açıklığın her 10m'sinde)	Yok	Yok	Az <25 lt/dk	Orta 25-125 lt/dk	Fazla >125 lt/dk
8	Eğim ve doğrultu	Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil

Sistemde birçok kere değişikliğe gidilmiştir. Çizelge 3.4'te bu değişimlerin yıllara göre hangi belirleyici özelliğe, hangi puan aralığı verildiği ve Şekil 3.1'de bu puanlandırmaların grafiksel gösterimi sunulmuştur.

Çizelge 3.4. RMR sisteminde 1973'ten 1989'a kadarki puanlama değişimleri

	1973	1974	1975	1976	1989
Kaya dayanımı	10	10	15	15	15
RQD	16	20	20	20	20
Süreksizlik aralığı	30	30	30	30	20
Eklemlerin ayrılması	5	-	-	-	-
Eklemlerin sürekliliği	5	-	-	-	-
Yeraltı suyu	10	10	10	10	15
Ayrışma	9	-	-	-	-
Eklemlerin durumu	-	15	30	25	30
Dalım yönelimi	-	15	-	-	-
Tünelde dalım yönelimi	3 – (-15)	-	0 – (-12)	0 – (-12)	0 – (-12)



Şekil 3.1. RMR sisteminde 1973'ten 1989'a kadarki puanlama değişimlerinin grafiksel gösterimi

3.3. Sistemin 1989'daki Son Versiyonu

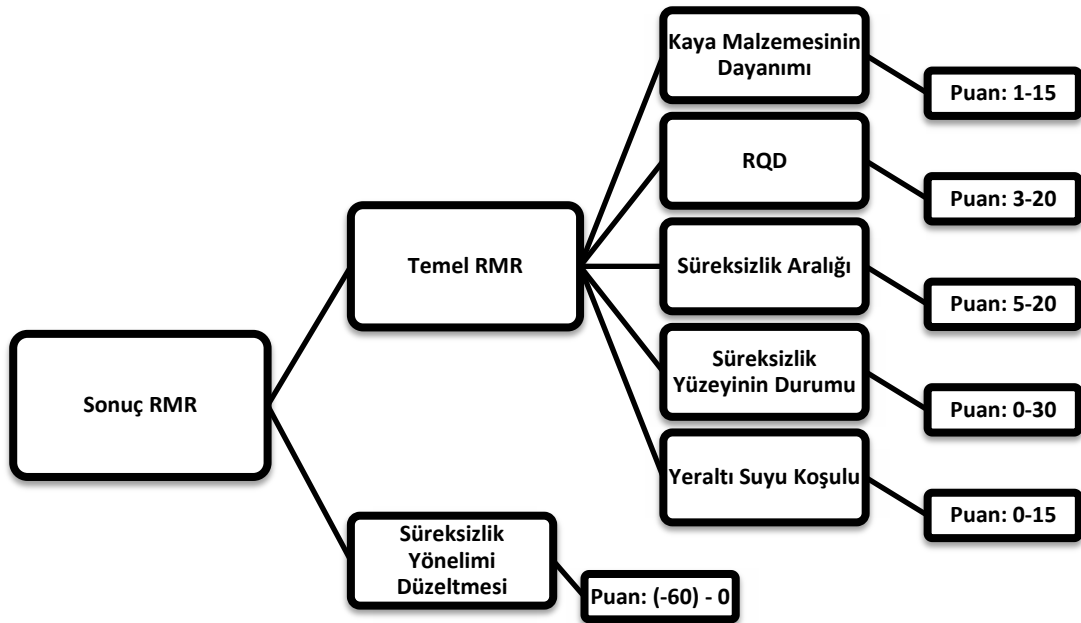
İlk önerildiği 1973'ten bu yana birçok kez modifiye edilen sistem, Bieniawski [13] tarafından yapılan değişikliklerle son şeklini almış ve bu haliyle günümüze kadar kullanılagelmiştir. Sistemde yapılan başlıca değişiklikler ve getirilen yenilikler aşığıdaki gibi sıralanabilir [1].

- Kaya malzemesinin dayanımına, RQD'ye ve süreksizlik aralığı parametrelerine ait puanların, sınıflama parametreleri çizelgelerinde (Çizelge 3.1 – 3.2) verilen aralıkların yanı sıra, daha duyarlı bir puanlama amacıyla yeni geliştirilen "parametre-puan" grafiklerinden (Şekil 3.3, 3.5 ve 3.6) doğrudan belirlenmesi,
- Süreksizlik koşuluna ait; süreksizlik devamlılığı, aralığı ve pürüzlülüğü ile dolgu ve bozunmanın derecesi gibi parametrelerin ISRM [15] tarafından önerilen tanımlamalara göre gruplandırılıp, her gruba ayrı puan verilerek daha duyarlı bir puanlamanın yapılması,

- Özellikle yeraltı maden işletmeciliği amacıyla açılan galerilerde; patlatma, faylara yakınlık ve gerilme değişimlerinin kaya kütlesi sınıflaması (RMR) üzerindeki etkilerinin de dikkate alınması amacıyla bir dizi düzeltme faktörünün önerilmesi,
- Uzun süreli gözlemler ve ölçümler esas alınarak, tahkimatsız durma süresi grafiğinin (Şekil 3.11) yeniden düzenlenmesi.

3.4. RMR Parametrelerinin Belirlenmesi

RMR sisteminin girdi parametreleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu parametrelerle ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.2. Günümüzde kullanılan RMR sistemi için girdi parametreleri

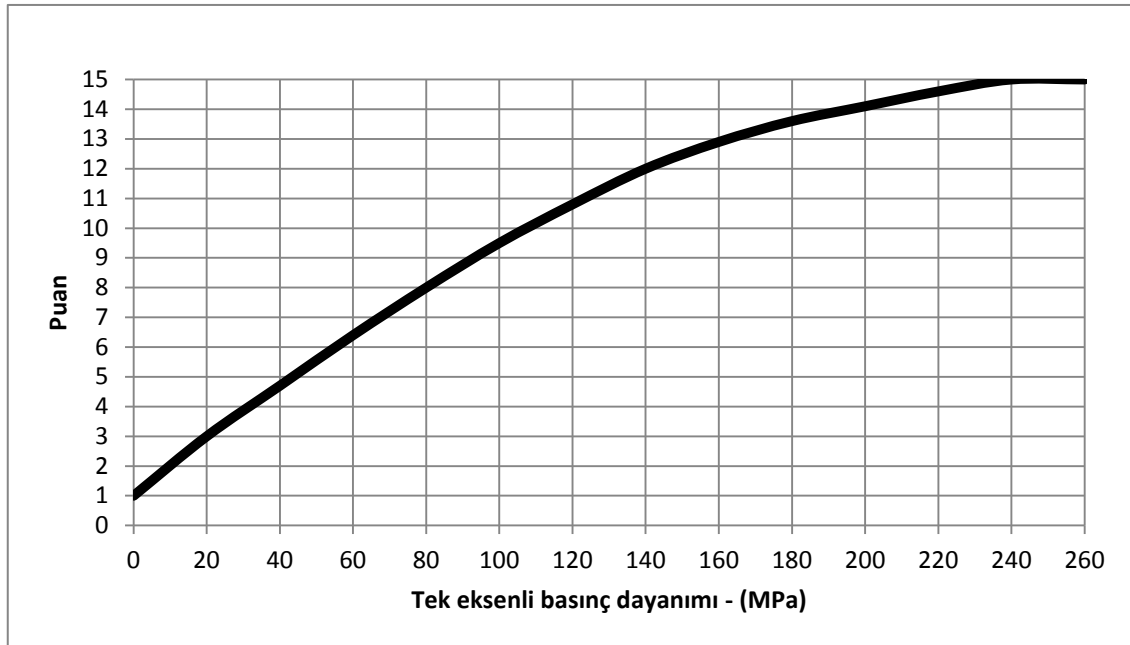
3.4.1. Kaya malzemesinin dayanımı

Kaya malzemesi dayanım değeri birçok sınıflamada girdi olarak kullanılır. Sondaj karotlarından boy/çap oranı 2,5 – 3 arasında olacak şekilde, üstü ve altı düzeltilerek hazırlanan örneklerde deney yapılarak tek eksenli basınç dayanımı elde edilir [15]. Deney yapılamayan durumlarda nokta yükü dayanım indeksi değerinden de faydalanılabilir. Çizelge 3.5'te sınıflama ve tanımlar verilmiştir [17]. Kaya malzemesinin

dayanımı puanının daha kolay elde edilebilmesi için Bieniawski [13] Şekil 3.3'teki grafiği önermiştir.

Çizelge 3.5. Tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükü dayanımına göre sınıflandırma [1]

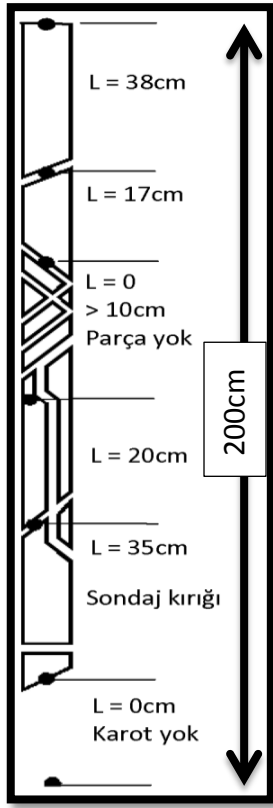
Sınıf	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	Tanım	Nokta yükü dayanımı (MPa)
A	> 250	Çok yüksek dirençli	> 10
B	100 - 250	Yüksek dirençli	4 - 10
C	50 - 100	Orta dirençli	2 - 4
D	25 - 50	Düşük dirençli	1 - 2
E	< 25	Çok düşük dirençli	< 1



Şekil 3.3. Tek eksenli basınç dayanımı – puan grafiği [13]

3.4.2. Kaya kalite göstergesi (RQD)

Kaya kütlesi tanımlamalarında sıklıkla kullanılan bir girdi olup, ilk olarak Deere [18] tarafından geliştirilmiştir. RQD (%), sondajda boyu 10 cm'den fazla olan sağlam karotların toplam uzunluğunun kademe ilerlemesine (toplam sondaj uzunluğu) oranı olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.4). Kaya kalitesinin RQD tanımı Çizelge 3.6'da yer almaktadır.



$$RQD = \frac{\text{Sondajda elde edilen 10cm'den büyük karotların toplam uzunluğu}}{\text{Toplam karot uzunluğu}} * 100 \quad \{9\}$$

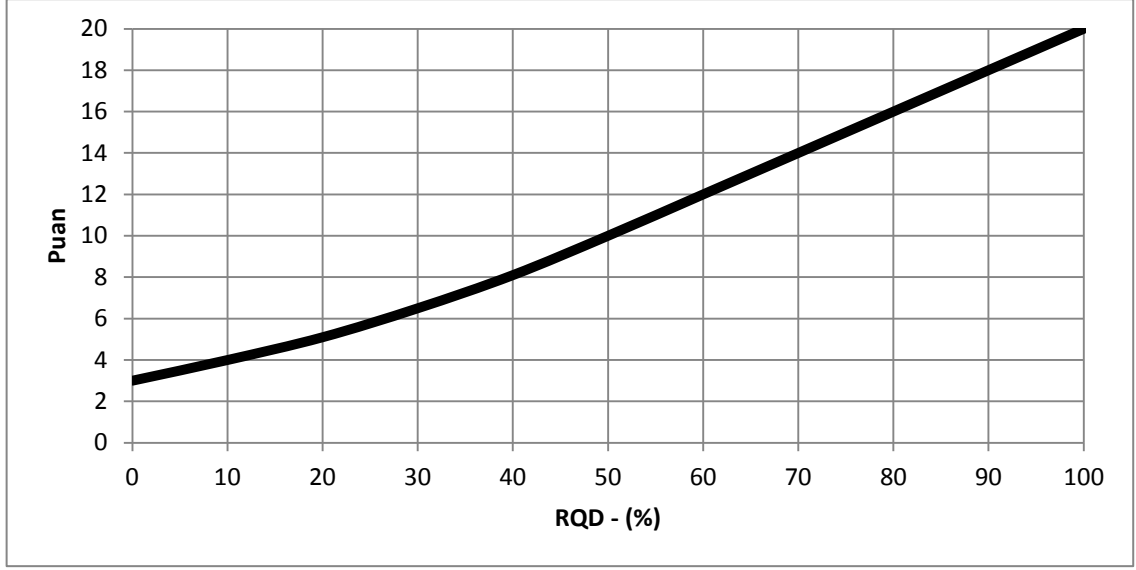
$$RQD = \frac{38+17+20+35}{200} * 100 = \%55$$

Şekil 3.4. Kaya kalite gösterge değerinin elde edilişi [19]

Çizelge 3.6. RQD tanımı [18]

RQD %	Kaya kalitesi
0 - 25	Çok düşük
25 - 50	Düşük
50 - 75	Orta
75 - 90	İyi
90 - 100	Çok iyi

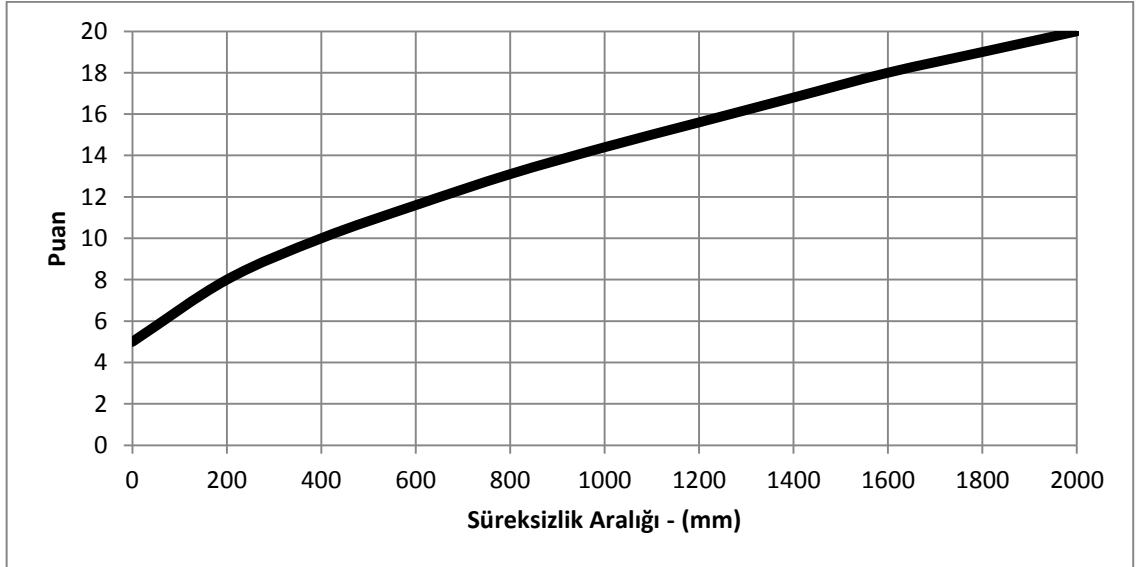
RMR puanı hesaplanması için gerekli olan RQD değeri, Bieniawski'nin [13] oluşturduğu “kaya kalite göstergesi – puan” grafiğinden faydalanılarak kolay bir şekilde elde edilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Kaya kalite göstergesi – puan grafiği [13]

3.4.3. Süreksizlik aralığı

Faylanma, çatlak, dayk gibi oluşumlar arası ortalama uzunluktur. Hesaplamanın daha kolay yapılabilmesi için Bieniawski tarafından Şekil 3.6'daki grafik oluşturulmuştur. Bu uzunluk ne kadar fazla olursa grafikte görüldüğü gibi kaya kalitesi de o kadar yüksek olacaktır.

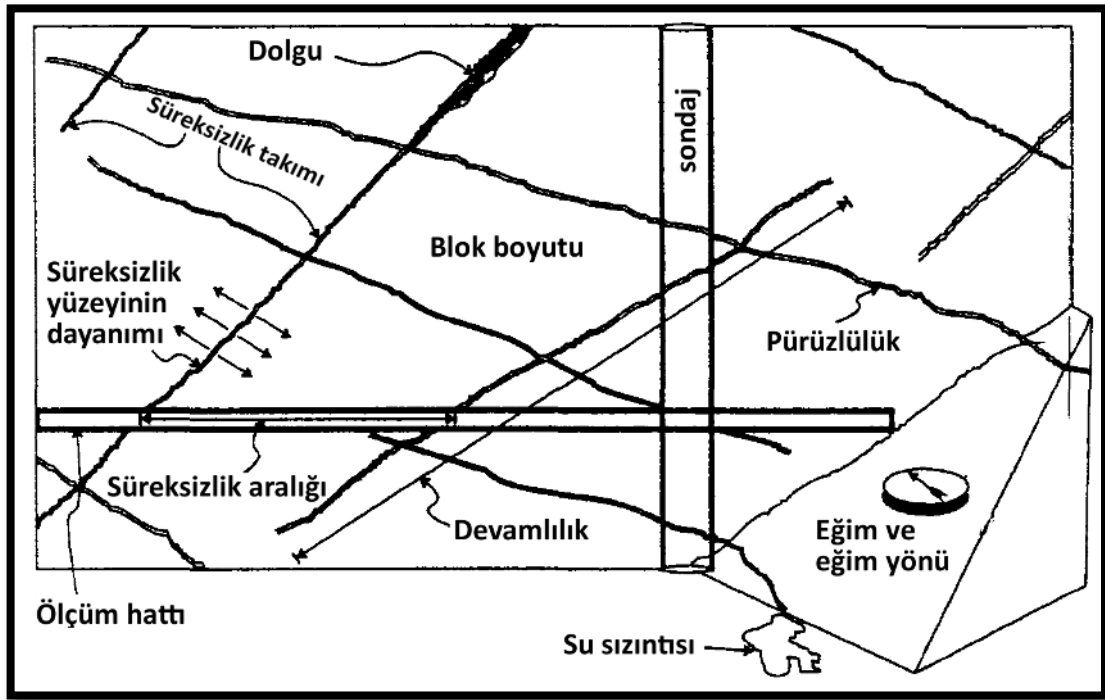


Şekil 3.6. Süreksizlik aralığı – puan grafiği [13]

3.4.4. Süreksizlik yüzeyinin koşulu

Her ne kadar aynı kaya türü için üniform bir yapı olsa da kaya türü içinde bile süreksizlik sıklığındaki ve bozunmanın derecesindeki değişimler, ayrıca fay, makaslama zonu ve dayk vb. yapısal unsurların varlığı nedeniyle kaya kütleleri üniformluğunu koruyamazlar. Bu sebepten kaya kütlelerinde bulunan bu süreksizliklerin ve şekillerin belirlenmesi önemlidir (Şekil 3.7).

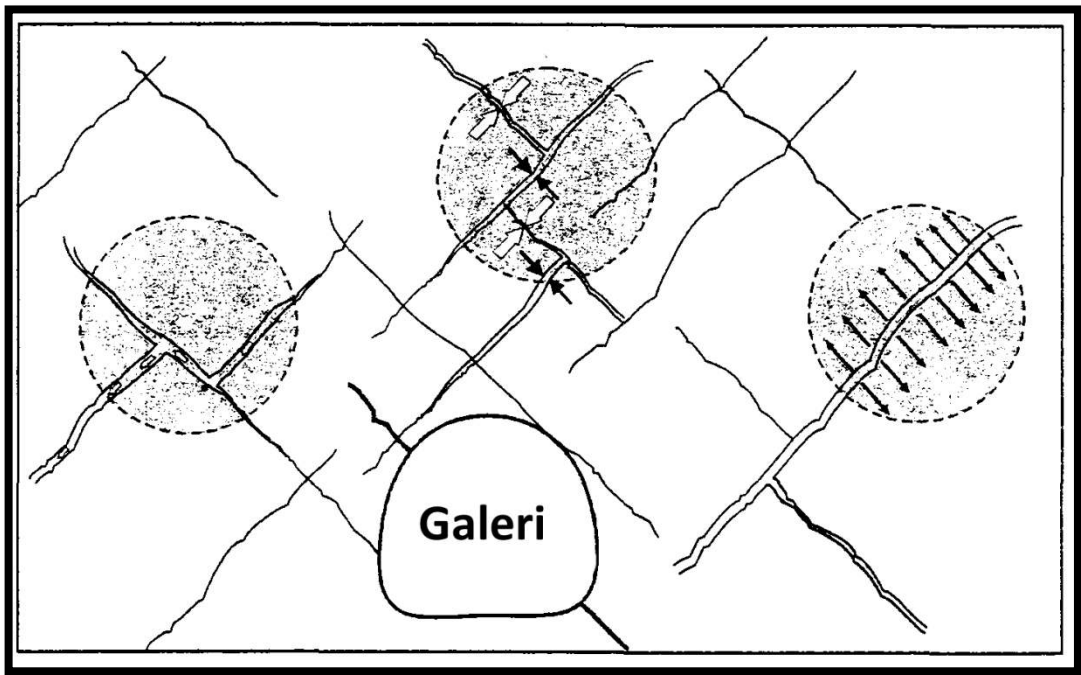
Belirlenen; süreksizlik devamlılığı, aralığı ve pürüzlülüğü ile dolgu ve bozunmanın derecesi gibi parametrelerin ISRM [15] tarafından önerilen tanımlamalara göre gruplandırılır ve her gruba ayrı puan verilerek RMR sistemine dâhil edilir.



Şekil 3.7. Süreksizlik özellikleri [20]

3.4.5. Yeraltı suyu

Kaya kütlelerinde suyun akışı, birbirleriyle bağlantılı süreksizlikler arasında geçmesiyle oluşur [1]. Yeraltı suyu kaya kütlesindeki faylanma ve çatlaklara bağlı olarak artmaktadır. Şekil 3.8'de bu süreksizliklerdeki suyun akış durumu ve olası etkileri (basınç vs.) mevcuttur. RMR sisteminde yeraltı suyu puanlandırılması yaparken suyun akış miktarına bağlı olarak puanlandırma yapılmaktadır. RMR sisteminin son versiyonunda bulunan bu 5 parametrenin nasıl puanlandırıldığı Çizelge 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.8. Kaya kütlelerinde süreksizlikler boyunca su akışı ve olası etkileri [20]

Çizelge 3.7. RMR kaya kütlesi sınıflama sistemi'nin son versiyonu [13]

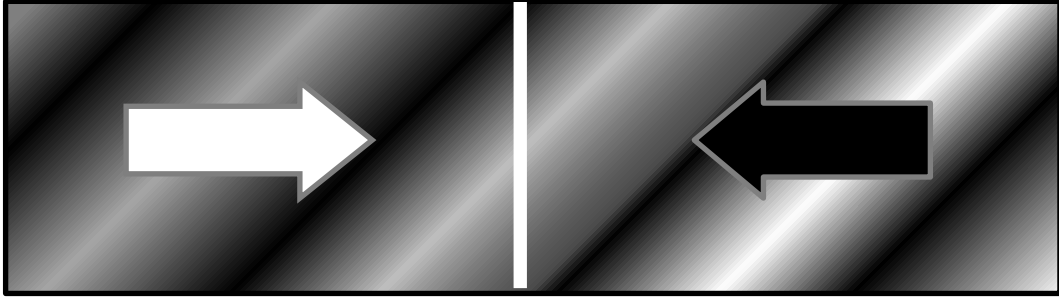
1	Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım		
		Tek eksenli basınç dayanımı	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2	Kaya kalite göstergesi, RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik aralığı		> 2m	0.6 - 2m	200 - 600mm	60 - 200mm	< 60mm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4	Süreksizlik koşulu		Çok kaba yüzeyler	Az kaba yüzeyler	Az kaba yüzeyler	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu	Yumuşak fay dolgusu		
			Sürekli değil	Ayrılma <1mm	Ayrılma <1mm	<5mm veya 1mm	>5 mm kalınlıkta veya açık eklemler		
			Ayrılma yok	Sert eklem yüzeyleri	Yumuşak eklem yüzeyleri	5mm açık eklemler, sürekli eklemler	>5 mm devamlı süreksizlikler		
	Puan		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10m'lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	< 25 lt/dk	25 - 125 lt/dk	> 125 lt/dk		
		Süreksizlik su basıncı	Veya	Veya	Veya	Veya	Veya		
		En büyük ORANI asal gerilme	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Genel koşullar	Veya	Veya	Veya	Veya	Veya		
			Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
	Puan		15	10	7	4	0		

Elde edilen bu beş parametre ile “Temel RMR” puanı ve süreksizlik yönelimi düzeltmesi ile “Sonuç RMR” puanı elde edilmektedir.

3.4.6. Süreksizlik yönelimi düzeltmesi

Süreksizlik yönelimi, yeraltında oluşan açıklıkta kaya kütlesinin hareket durumunu belirleyen diğer parametreler kadar önemli bir parametredir. Şekil 3.9'da 45°'lik açıda, tabakalara sahip kaya kütlesinde yatay eksen boyunca açılacak olan galeri

kesiti bulunmaktadır. Eğer galeri beyaz ok yönünde açılırsa eğime karşı, siyah ok yönünde açılırsa eğim yönünde olacak ve Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9'dan yararlanılarak bu parametre puanı hesaplanacaktır.



Şekil 3.9. Süreksizlik yönelimine bağlı galeri yönü seçimi

Çizelge 3.8. Galeride süreksizlik eğim ve doğrultusunun etkisi [21, 22]

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

Çizelge 3.9. Süreksizlik yönelimine göre düzeltme puanları [21]

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

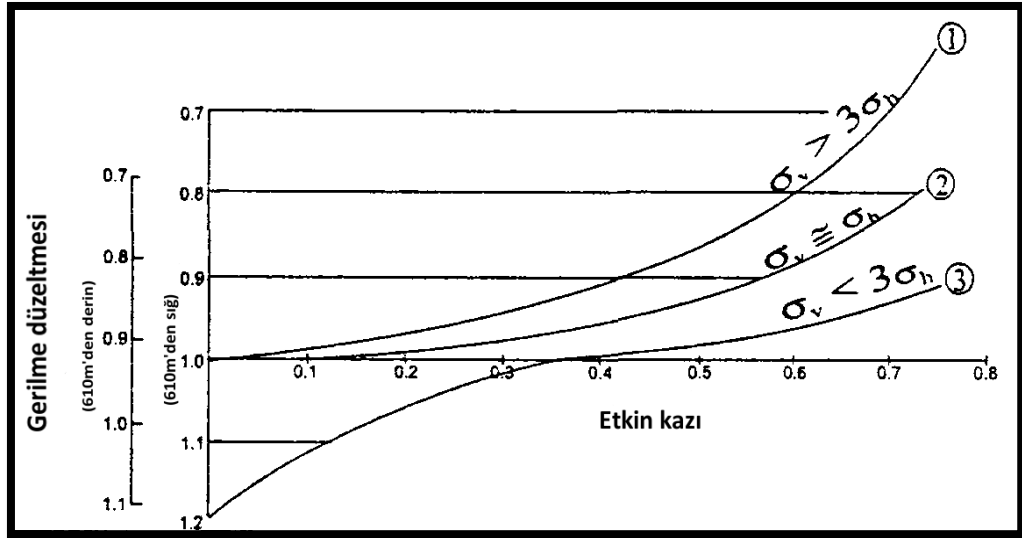
Bieniawski [16], RMR sisteminin ilk versiyonu için şeyl ve şişebilen kayalarla karşılaşıldığında, sınıflama yapılırken dikkatli olunmasını önermiştir. Mühendislik özellikleri açısından geniş bir aralıkta değişim gösteren bu tür kaya kütleleri, özellikle ıslanma ve kuruma süreçleri sonucunda bozunmaya ve dağılmaya karşı düşük dirence sahiptirler. Bu husus, sınıflama sisteminin geliştiricisi olan Bieniawski [16] tarafından bir sınırlama olarak değerlendirilmiştir. O dönemde bu tür kaya kütlelerinden alınmış örneklerde Franklin ve Chandra [23] ile Gamble [24] tarafından tanımlanan suda dağılmaya karşı duraylılık deneyinin yapılması veya Olivier'in [25] geliştirdiği bozunabilirlik sınıflamasının ek bir sınıflama ölçütü olarak uygulanması önerilmiştir [1].

3.5. RMR Sistemi Puan Düzeltmesi

RMR sistemini kullanan birçok araştırmacı, sistemin gelişmesinde büyük rol oynamıştır. Sistem kullanılmaya başlandıktan sonra Kendorski [26] tarafından üç tür düzeltme önerilmiştir. Bu düzeltmeler günümüzde de RMR puanı hesaplanırken kullanılmaktadır [1].

3.5.1. Gerilme düzeltmesi (A_s)

Yeraltındaki yatay ve dikey gerilmelere bağlı olarak Kendorski [26] tarafından gerilme düzeltmesi önerilmiştir. Hesaplanan yatay ve dikey gerilmelerin birbirleri ile olan ilişkisine bakılarak Şekil 3.10'daki eğriler yardımıyla bu katsayı bulunur. Bu düzeltmenin uygulanabilmesi yüksek maliyet getirdiğinden, genellikle uygulamacılar tarafında hesaplama katılmamaktadır. Bu nedenle hesaplama katılabilecek daha pratik düzeltme faktörüne ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.10. Gerilme düzeltmesi [26]

3.5.2. Patlatma düzeltmesi (A_B)

Eğer açılacak yeraltı açıklığında patlatma yapılacaksa, Düzeltilmiş RMR değerine Kendorski [26] tarafından önerilen patlatma düzeltmesini (A_B) eklemek daha doğru bir RMR puanı sağlayacaktır. Çizelge 3.10'dan bu katsayı elde edilmektedir [1].

Çizelge 3.10. Patlatma düzeltmesi [26]

Patlatma Düzeltmesi (A_B)			
Koşullar / Yöntem		Uygulanabilir terim	Düzeltilme katsayısı, (A_B)
1	Makineyle kazı	Hasarsız	1.0
2	Denetimli patlatma	Çok az hasar	0.94 - 0.97
	a. Pratik olarak patlatmada tüm deliklerin izleri gözlenebilir.	-	-
	b. Gevşemiş bloklar veya açılmış süreksizlikler söz konusu değildir.	-	-
	c. Aşırı sökülme: genellikle 15cm'den az, ender olarak 30cm'den azdır.	-	-
	d. Eklemler arasında yeni kırıklar yok veya çok azdır.	-	-
3	İyi klasik patlatma	Orta derecede hasar	0.90 - 0.94
	a. Bazı patlama deliklerinin izleri gözlenebilir.	-	-
	b. Az sayıda gevşek bloklar söz konusu olabilir ve bazı eklemler açılabilir.	-	-
	c. Aşırı sökülme: yaygın olarak 30cm, yerel olarak 30cm'yi aşabilir.	-	-
	d. Sağlam kaya bloklarında ve eklemler arasında kılcal çatlaklar gelişebilir.	-	-
4	Kötü klasik patlatma	Şiddetli hasar	0.90 (en iyi) 0.80 (en kötü)
	a. Patlatma deliklerinden sadece birkaçı gözlenir.	-	-
	b. Açıklığın tavanında çok sayıda gevşemiş blok gözlenir. Çok sayıda eklem açılmış ve bloklar düşebilecek hale gelmiştir.	-	-
	c. Aşırı sökülme: genellikle 30cm'den büyük, yerel olarak 1m veya daha fazladır.	-	-
	d. Patlamayla ilgili herhangi bir bilgi yok.	Orta derecede hasar	0.90 (göreceli)

3.5.3. Başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme (A_w)

Bir diğer RMR düzeltme parametresi olan başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme (A_w) puanı Çizelge 3.11'den elde edilmektedir.

Çizelge 3.11. Zayıflık düzlemleri ile ilgili düzeltme [26]

Koşul	Düzeltilme, Katsayısı A_w
1 Zayıflık düzlemi yok	1.0
2 Sert dayklar	0.90
3 Yumuşak cevher zonları	0.85
4 Ana kaya/cevher dokanak zonları veya homojen olmayan tavan kayası	0.80
5 Kıvrımlar (senklinal ve antiklinaller)	0.75
6 Münferit fay zonları	0.70

Bu 3 düzeltme elde edildikten sonra “Düzeltilmiş RMR” puanının hesabı için aşağıdaki formül (10) kullanılmaktadır.

$$\text{Düzeltilmiş RMR} = \text{Sonuç RMR} * A_S * A_B * A_w \quad \{10\}$$

Burada;

A_S : Gerilme düzeltmesi
 A_B : Patlatma düzeltmesi
 A_w : Başlıca zayıflık düzlemleri düzeltmesi

3.6. RMR Sisteminin Tahkimat Tasarımında Kullanımı

Yeraltı açıklıklarında kullanılacak tahkimat sistemlerine gelecek basınç, RMR puanından yararlanılarak tahmin edilebilmektedir. Ünal [27] kömür madenlerinde yaptığı çalışmalar sonucunda, yeraltı açıklıkları için RMR'ı kullanarak tahkimat basıncının tahmin edileceğini öne sürmüştür. Ünal'ın önerdiği ifade en son şekliyle aşağıdaki formül (11) verilmiştir.

$$P = \left[\left(\frac{100 - RMR}{100} \right) * \gamma * B * S \right] \quad \{11\}$$

Burada;

P: Tahkimat basıncı (MPa)
 γ : Kayanın birim hacim ağırlığı (MN/m³)
B: Tünelin genişliği (m)
S: Gerilme faktörü

Tahkimatsız açıklık boyutu kavramı ilk kez Lauffer [28] tarafından önerilmiştir. Lauffer'in orijinal sınıflaması o dönemde ender olarak kullanılmış, ancak bu kavramın modifiye edilerek RMR sistemi'ne dâhil edilmesiyle kullanımı yaygınlaşmıştır. Şekil 3.11'de RMR puanına bağlı olarak, yeraltındaki bir açıklığın boyutu ile açıklığın tahkimatsız durma süresi arasındaki bağlantı görülmekte. Şekil 3.11'de bulunan RMR bölümünün daha anlaşılır olabilmesi için Bieniawski tarafından oluşturulan Çizelge 3.12 kullanılmaktadır. Söz konusu grafikten bilinen veya seçilen bir açıklık boyutu için uygulama sınırları ve o açıklığın tahkimatsız durabilme süresi tahmin edilmektedir [1].

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Sınıf tanımı	Çok sağlam kaya	Sağlam kaya	Orta derecede sağlam kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Toplam RMR puanı	100←90	90←70	70←50	50←25	<25

Şekil 3.11. Bieniawski [16] tarafından önerilen "tahkimatsız açıklık boyutu – tahkimatsız durma süresi" ilişkisini gösteren grafik [29]

Bieniawski yeraltı açıklıklarında uygulanması gereken tahkimat ile ilgili olarak Çizelge 3.13'te bulunan ön tahkimat seçimi kılavuzunu önermiştir. Bu çizelgeden kaya sınıflandırıldıktan sonra hangi tahkimat veya tahkimatların seçilmesi gerektiği ve ne kadar miktarda uygulanması gerektiği elde edilmektedir. Yapılan bu çalışmada uygulanması gereken tahkimat miktarı ve türü seçiminde Çizelge 3.13'ten faydalanılmıştır.

Çizelge 3.13. RMR sisteminde ön tahkimat sisteminin seçimi kılavuzu [16]

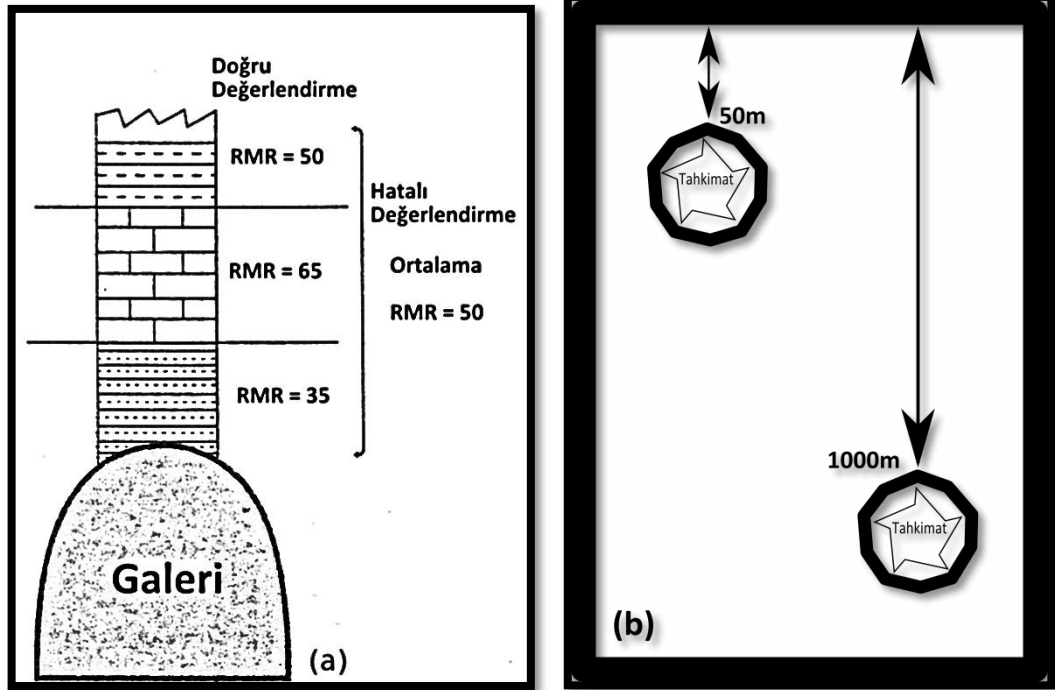
Kaya kütlesi sınıfı	Tahkimatsız duraylı kalabilme süresi (açıklık)	TAHKİMAT SİSTEMLERİ						
		KAYA SAPLAMALARI		PÜSKÜRTME BETON			ÇELİK BAĞLAR	
		Aralık	Ek tahkimat	Kemer	Yan duvarlar	Ek tahkimat	Türü	Aralık
1	10 yıl (5m)	GENELLİKLE TAHKİMAT GEREKMEZ						
2	6 ay (4m)	1.5 - 2.0m	Tavan kemerinde yer yer hasır çelik	50mm	-	-	Ekonomik değil	
3	1 hafta (3m)	1.0 - 1.5m	Çelik hasır ve gerektiğinde kederde 30mm'lik püskürtme beton	100mm	50mm	Gerekli durumlarda yer yer çelik hasır ve kaya saplamaları	Hafif çelik bağ profiller	1.5 - 2.0m
4	5 saat (1.5m)	0.5 - 1.0m	Çelik hasır ve gerektiğinde kemer ve yan duvarlarda 30 - 50 mm'lik püskürtme beton	150mm	100 mm	Çelik hasır ve 1.5m aralıklı 3m uzunluğunda kaya saplamaları	Orta aralıklı profiller ve 50mm kalınlığında püskürtme beton	0.75 - 1.5m
5	10 dakika (0.5m)	Önerilmez		200mm	150mm	Çelik hasır, kaya saplamaları ve hafif çelik bağlar	Ağır çelik profiller yerleştirildikten hemen sonra 80mm kalınlığında püskürtme beton	0.7m

3.7. RMR Sisteminin Eksiklikleri

Sistem yaygın olarak kullanılmasına rağmen bazı eksiklikler içermektedir. Bunlardan önemlilerini şöyle sıralayabiliriz;

- RMR sistemi ağırlıklı olarak yeraltı açıklıklarının kazısı sırasında kullanılan ve çok sayıda gözleme dayalı deneysel bir yöntem olduğu için, mühendislik uygulamaları ve tasarım açısından hatalı değerlendirmelerin yapılmasına neden olabilir.
- Süreksizliklerin yönelimi ve bunların puanlandırılması her ne kadar düzenlenmeye çalışılmış olsa da, bu sistem için sınırlayıcı bir eksikliktir.
- Sistemde; yeraltı su koşulları bir parametre olarak dikkate alınsa da, suyun ince tabakalı ve kil içeren zayıf kaya kütlelerinde yapacağı olumsuz etkileri tanımlayacak bir parametrenin bulunmaması.
- Sistemde, kaya malzemesinin dayanımı da bir sınıflama parametresi olarak dikkate alınmakta ve bu amaçla tek eksenli basınç dayanımı veya nokta yükü dayanım indeksi kullanılarak puanlamanın yapılması önerilmektedir. Ancak lamina, şistozite yüzeyi vb. gibi sık aralıklarla tekrarlanan zayıflık düzeylerini içeren kaya kütlelerinden alınmış kaya malzemesi örneklerinde bu deneylerin yapılması için ihtiyaç duyulan boyutta örnek hazırlanması çoğu kez olanaksızdır.
- İçerisinde farklı özellikte kayaç türleri barındıran kaya kütleleri de değerlendirmede eksik kalmaktadır.
- Dünya üzerindeki hiçbir maden birebir aynı özellikleri taşımamaktadır, bu nedenle farklı yeraltı açıklıklarında farklı davranışlar görebiliriz. RMR sistemi de deneysel bir yöntem olduğundan yapılacak tasarımda bu farklı davranışlardan dolayı bir takım eksiklikler meydana gelebilecektir.
- Deneyim eksikliği veya sınıflama sisteminde yapılan bazı değişikliklerin iyi izlenmemesi nedeniyle parametrelerin tanımlanmasıyla ilgili hatalar, kaya kütlesi sınıf puanının hesaplanmasında da olumsuz yönde etkiye yol açmaktadır.

- Şekil 3.12 (a)'da görüldüğü gibi bir tünelin güzergâhı boyunca yapılan sondajlarda tünel tavan kotunun hemen üzerindeki bölgedeki kaya kütleleri, tünel kazısı nedeniyle örtüden aktarılacak yüklerin taşınması açısından en kritik kesimi oluştururlar. Bu nedenle kaya kütlelerinin puanlamasının iyi yapılması gerekir [1].
- RMR sistemindeki önemli eksikliklerden birisi de tahkimat tasarımı ile ilgili olmaktadır. Derinliğe dolayısı ile uzak saha gerilmelerine bağlı tahkimat sisteminin değiştirilmesinde direkt olarak kullanılan bir parametre bulunmamaktadır. Şekil 3.12 (b)'de görüldüğü gibi aynı kaya kütlesi içerisinde farklı derinliklere sahip bölgelerde bulunan galerilerde, RMR sistemi neredeyse aynı tahkimatın uygulanmasını önermektedir. Buda tasarımda aşırı güvenli veya aşırı güvensiz bir yapıya yol açmaktadır. Yapılan çalışma neticesinde bu eksikliğin giderilmesi beklenmektedir.



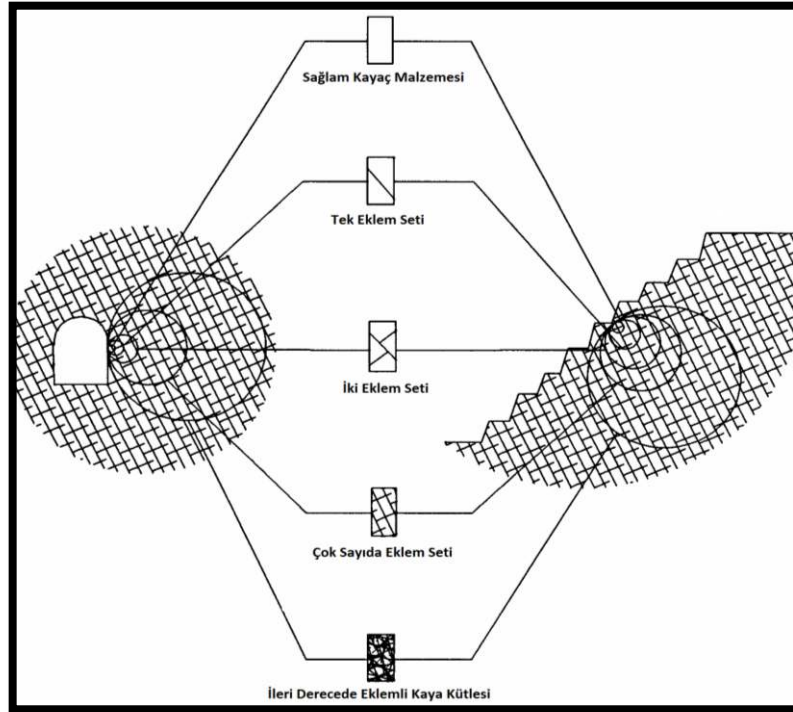
Şekil 3.12. RMR puanı değerlendirilmesi (a) ve tahkimat tasarımında (b) yapılan hatalar

4. MATERYAL

Bu çalışmada; gerçek saha verileri kullanılmıştır. Bu veriler, literatürde yer alan bilimsel çalışmalardan derlenmiştir. Çalışmaların ortak noktası, kaya sınıflandırmasında ve tahkimat tasarımında, RMR sisteminden ve sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplama yapan yazılımlardan yararlanmış olmalarıdır. Bu başlık altında sayısal modellemede kullanılan girdi parametreleri ve farklı araştırmalar tarafından literatürde sunulan gerçek saha verilerine değinilmiştir.

4.1. Sayısal Modelleme Girdi Parametreleri

Sayısal modellemede kaya malzemesine ait girdi parametrelerinden; deformasyon modülü (E_i), poisson oranı (ν), özgül ağırlık (γ) ve malzemenin tek eksenli basınç dayanım değeri (σ_{ci}) laboratuvarda elde edilir. Bu elde edilen veriler kullanılarak kaya kütlesinin gerekli değerleri literatürde önerilen formüller yardımıyla hesaplanmaktadır. Şekil 4.1'de laboratuvarda kullanılan kaya malzemesinden, arazideki kaya kütlesine geçiş gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Arazide kaya malzemesinden kaya kütlesine geçişi gösteren kesitler [19]

4.1.1. Hoek-Brown parametreleri

Hoek-Brown parametreleri [30] kaya kütlesinin yenilmesi ile ilgili yaygın kullanılan parametrelerdir. RMR puanı sayısal modellemede direkt girdi parametresi olarak kullanılmamaktadır. Elde edilen RMR puanları Hoek-Brown yenilme parametrelerine kolay bir şekilde dönüştürülerek sayısal modellemeye girilmektedir. Hoek [31] zayıf ve orta kalitedeki kaya kütlelerinde elastik mükemmel kullanılabileceğinden bahsetmiştir. Bu sebepleri de dikkate alarak, sayısal modellemede Hoek-Brown yenilme kriterleri dolayısı ile ilgili parametreler kullanılacaktır. Kaya kütlesi için Hoek-Brown yenilme ölçütü şu şekilde tanımlanmaktadır;

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \{12\}$$

Burada σ_1' ve σ_3' yenilme anındaki maksimum ve minimum efektif gerilmeler, m_b kaya kütlesi için Hoek-Brown sabiti, s ve a değerleri kaya kütlesinin karakteristiğine bağlı olan Hoek-Brown sabitleri ve σ_{ci} ise sağlam kaya parçasının tek eksenli basınç dayanımıdır [19].

Girdi parametreleri hesaplamalarında RMR esaslı eşitlikler veya GSI (Jeolojik dayanım indeksi) esaslı olan formüller kullanılacaktır. Kaya kütle sabitlerinden 'a' değeri Phase² yazılımında (0.5) sabit değerinde otomatik olarak hesaplamaya dâhil edildiğinden bu değerin hesaplaması yapılmayacaktır.

RMR puanı ve GSI puanı arasındaki dönüşüm aşağıdaki eşitlikten sağlanmaktadır [1].

$$GSI = RMR - 5 \quad \{13\}$$

Jeolojik dayanım indeksi (GSI) ve kaya malzemesi sabiti (m_i) değerlerine bağlı olarak kaya kütlesinin sabiti (m_b) ve 's' değeri formül (14 ve 15)'ten hesaplanmaktadır [30].

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

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad \{15\}$$

Eşitliklerde örselenme faktörü (D), kaya kütleinin hangi ölçüde patlatma veya gerilme salınımı kaynaklı örselendiğinin göstergesidir. Bu çalışmada kaya kütleinin örselenmediği hasarsız patlatma tekniği uygulandığı varsayılarak bu faktör sıfır (0) olarak alınmıştır.

Hoek ve Diederichs [32] kaya kütlei deformasyon modülünün (E_m) hesaplanması için aşağıdaki eşitliği önermişlerdir.

$$E_m = 100 \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{75 + 25D - GSI}{11} \right)}} \right) \quad \{16\}$$

4.1.2. Yeraltı gerilme değerleri

Yeraltındaki farklı derinlik koşullarında oluşacak gerilme değerleri hesaplamalarda kullanılmaktadır. Bu sebepten yeraltında oluşacak gerilmelerin hesabı için formül (17)'den faydalanılmaktadır. Çalışmada kullanılacak derinlik değerleri 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900m ve 100m'dir. Yeraltındaki gerilme değerleri hesaplamasında hidrostatik gerilme durumu varsayılmıştır. Bu durumda, yatay gerilmelerin düşey gerilmelere eşit olduğu kabul edilerek ve galeri kesit alanları, eşdeğer dairesel çapa dönüştürülerek (18) sayısal modellemeye girilmektedir.

Düşey gerilme formülü;

$$\sigma_v = \gamma * z \quad \{17\}$$

σ_v : Düşey gerilme

γ : Malzemenin birim hacim ağırlığı

z : Derinlik

Galeri kesitinin eşdeğer dairesel kesite dönüşüm formülü;

$$A = \frac{\pi R^2}{4} \quad \{18\}$$

A : Galerı kesit alanı

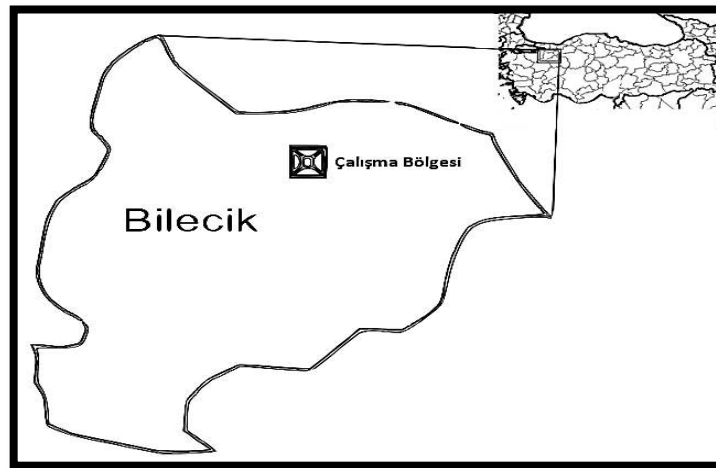
R : Galerı çapı

4.2. Saha Verileri

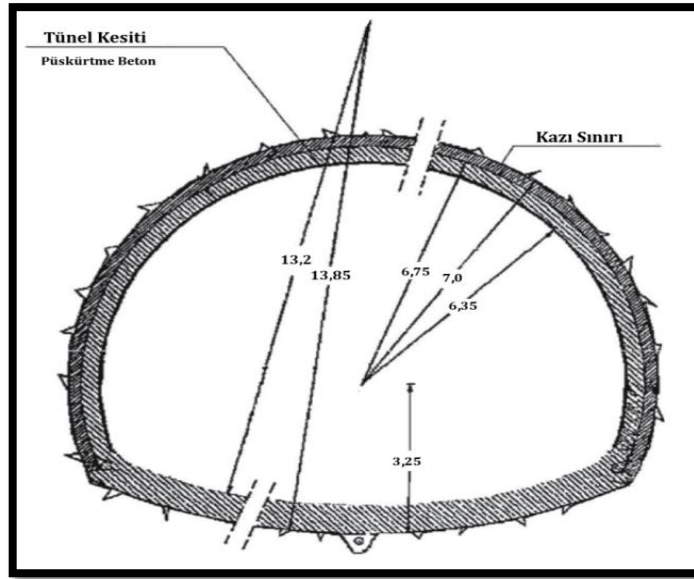
Saha verileri olarak; üç farklı karayolu tüneli için değişik araştırmacılarca [12, 33 ve 38] elde edilmiş veriler kullanılmıştır. Bu verilere bağlı olarak hesaplanan dayanım ve deformasyon parametreleri Phase² yazılımı için girdi olarak kullanılmıştır. Programa girilen değerler arasında laboratuvar verileri ve RMR puanı kullanarak hesaplanan Hoek-Brown parametreleri de bulunmaktadır.

4.2.1. Bilecik – İstanbul karayolu (Osmangazi) tüneli

Türkiye'nin Bilecik ilinde bulunan Osmangazi tüneli 12.5 m genişliğe, 9.6 m yüksekliğinde olup yaklaşık 2.5 km uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca 7 farklı formasyondan geçilmektedir [33]. Şekil 4.2'de tünelin bulunduğu konum ve Şekil 4.3'te tünel kesiti verilmektedir.



Şekil 4.2. Osmangazi tünelinin konumu [34]



Şekil 4.3. Osmangazi tüneli kesit görünüşü [33]

Şekil 4.3'te verilen kesitten tünelin alanı $\approx 103\text{m}^2$ olarak hesaplanmış ve dairenin alan formülünden (18) eşdeğer dairesel çap ise 11.44m olarak hesaplanmıştır.

Araştırmacılar tarafından sunulan 7 formasyona ait; RMR, σ_{ci} , E_i , ν , γ , m_i değerleri yapılmış olan çalışmadan direkt alınarak Çizelge 4.1'de verilmiştir [33]. Çizelge 4.1'de bulunan; GSI, E_m , m_b , s_m değerleri ise sayısal modelleme girdi parametreleri bölümünde verilen formüller (12, 13, 14, 16) kullanılarak hesaplanmış ve çizelgeye aktarılmıştır.

Çizelge 4.1. Osmangazi tüneli kayaç parametreleri

No	Kayaç Özelliği	Formasyon						
		1	2	3	4	5	6	7
1	RMR puan aralığı	32-42	48-53	50-60	60-66	62-70	60-66	63-68
2	RMR puanı*	37	50	55	63	66	63	65
3	Tek eksenli basınç dayanım değeri aralığı MPa (σ_{ci})	1-5	63-82	75-100	47-77	57-110	59-88	63-110
4	Tek eksenli basınç dayanım değeri MPa (σ_{ci})*	3	72	90	63	81	75	85
5	GSI değeri	27	45	50	58	61	58	60
6	Kaya malzemesinin deformasyon modülü MPa (E_i)	3976	6905	8715	6698	7873	7675	7703
7	Kaya malzemesinin Hoek-Brown sabiti (m_i)	4	12,79	18,04	22,68	23,38	20,83	18,27

Çizelge 4.1. (Devamı)

8	Kaya kütlesinin deformasyon modülü (E_m)	121	878	1648	2389	3564	2738	3221
9	Kaya kütlesinin Hoek-Brown sabiti (m_b)	0,29	1,79	3,02	5,06	5,81	4,65	4,38
10	Kaya kütlesinin Hoek-Brown sabiti (m_b)*	0,15	0,89	1,51	2,53	2,90	2,32	2,19
11	Kaya kütlesinin Hoek-Brown sabiti (s_m)	0,0003	0,0022	0,0039	0,0094	0,0131	0,0094	0,0117
12	Kaya kütlesinin Hoek-Brown sabiti (s_m)*	0,0002	0,0011	0,0019	0,0047	0,0065	0,0047	0,0058
13	Poisson oranı (ν)	0,25	0,28	0,31	0,30	0,29	0,32	0,31
14	Birim ağırlık - MN/m ³ (γ)	0,0263	0,0267	0,0268	0,0269	0,0269	0,0265	0,0263

(*) Ortalama olarak hesaplanan ve modellemeye aktarılan değer

Osmangazi tüneli için varsayılan derinliklere bağlı gerilme değerleri formül (17) kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.2'ye aktarılmıştır. İnşa edilmiş tünelin günümüzdeki görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Yeraltı derinlik koşullarına bağlı gerilme değerleri

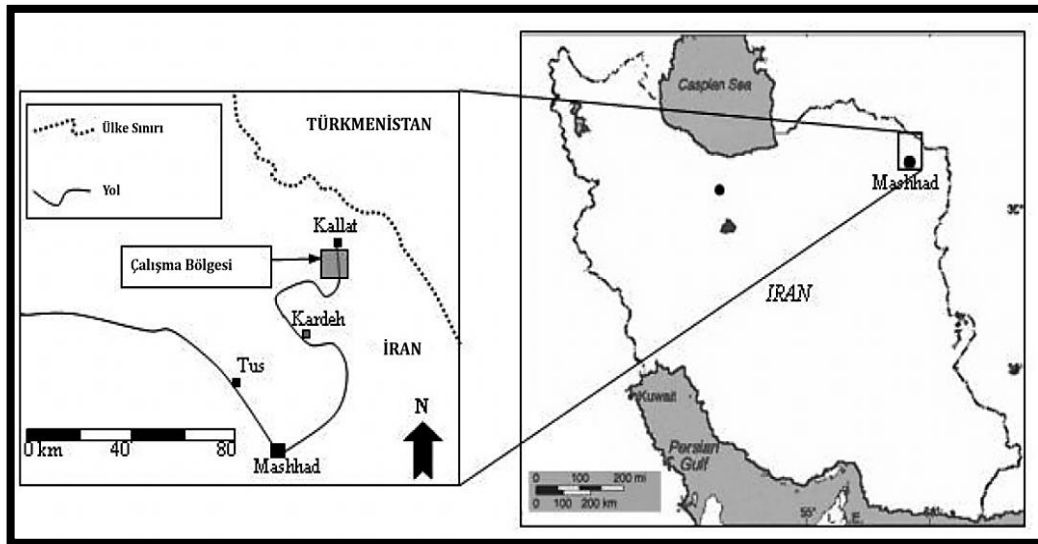
Derinlik (m)	Formasyon						
	1	2	3	4	5	6	7
	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)
50	1,315	1,335	1,34	1,345	1,345	1,325	1,315
100	2,63	2,67	2,68	2,69	2,69	2,65	2,63
200	5,26	5,34	5,36	5,38	5,38	5,3	5,26
300	7,89	8,01	8,04	8,07	8,07	7,95	7,89
400	10,52	10,68	10,72	10,76	10,76	10,6	10,52
500	13,15	13,35	13,4	13,45	13,45	13,25	13,15
600	15,78	16,02	16,08	16,14	16,14	15,9	15,78
700	18,41	18,69	18,76	18,83	18,83	18,55	18,41
800	21,04	21,36	21,44	21,52	21,52	21,2	21,04
900	23,67	24,03	24,12	24,21	24,21	23,85	23,67
1000	26,3	26,7	26,8	26,9	26,9	26,5	26,3



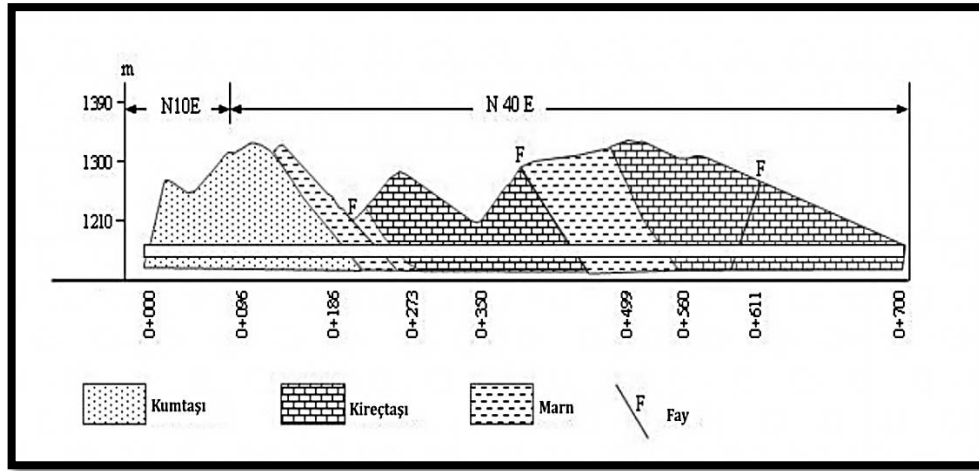
Şekil 4.4. Osmangazi tüneli günümüz görüntüsü [35]

4.2.2. Mashhad – Kallat karayolu (Kallat) tüneli

İran'ın Mashhad ilinde bulunan Kallat tüneli 8 m genişliğe, 8.4 m yüksekliğe ve 725 m uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca 3 farklı formasyondan geçilmektedir [12]. Şekil 4.5'te tünelin bulunduğu konumun haritası verilmiştir. Araştırmacılar tarafından sunulan tünele ait jeolojik harita Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5. Kallat tünelinin konumu [12]



Şekil 4.6. Kallat tüneli jeolojik haritası [12]

Tünelin alanı $\approx 64 \text{ m}^2$ olarak verilmiştir ve formül (18) kullanılarak eşdeğer dairesel çap 9.03 m olarak hesaplanmıştır.

Araştırmacılar tarafından sunulan tünel boyunca geçilen 3 formasyona ait; RMR, σ_{ci} , E_i , ν , γ , m_i değerleri yapılmış olan çalışmadan direkt alınarak Çizelge 4.3'te sunulmuştur [12]. Çizelge 4.3'te bulunan; GSI, E_m , m_b , s_m değerleri ise sayısal modelleme girdi parametreleri bölümünde verilen formüller (12, 13, 14, 16) kullanılarak hesaplanmış ve çizelgeye aktarılmıştır.

Çizelge 4.3. Kallat tüneli kayaç parametreleri

No	Kayaç Özelliği	Formasyon		
		1	2	3
1	RMR puanı	53	46	40
2	Tek eksenli basınç dayanım değer aralığı MPa (σ_{ci})	52,5 - 60	42,8 - 50	31,6 - 39,2
3	Tek eksenli basınç dayanım değeri MPa (σ_{ci})*	55	45	35,1
4	GSI değeri	48	41	35
5	Kaya malzemesinin deformasyon modülü MPa (E_i)	9000 - 20200	10100 - 23100	9000 - 14000
6	Kaya malzemesinin deformasyon modülü MPa (E_i)*	18000	19000	12000
7	Kaya kütlelerinin deformasyon modülü MPa (E_m)*	3965	2397	1496
8	Kaya kütlelerinin Hoek-Brown sabiti (m_b)	0,8	0,3	0,1
9	Kaya kütlelerinin Hoek-Brown sabiti (m_b)*	0,4	0,15	0,05
10	Kaya kütlelerinin Hoek-Brown sabiti (s_m)	0,0004	0,00013	0,0001

Çizelge 4.3. (Devamı)

11	Kaya kütlesinin Hoek-Brown sabiti (s_m)*	0,0002	0,00006	0,00005
12	Poisson oranı (ν)	0,26 - 0,32	0,21 - 0,34	0,22 - 0,36
13	Poisson oranı (ν)*	0,3	0,31	0,32
14	Birim ağırlık MN/m ³ (γ)	0,0241 - 0,0262	0,021 - 0,034	0,022 - 0,036
15	Birim ağırlık MN/m ³ (γ)*	0,0255	0,027	0,0265

(*) Ortalama olarak hesaplanan ve modellemeye aktarılan değer

Kallat tüneli için derinliklere bağlı gerilme değerleri formül (17) kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.4'e aktarılmıştır. İnşa edilmiş tünelin günümüzdeki fotoğrafı ise Şekil 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Yeraltı derinlik koşullarına bağlı gerilme değerleri

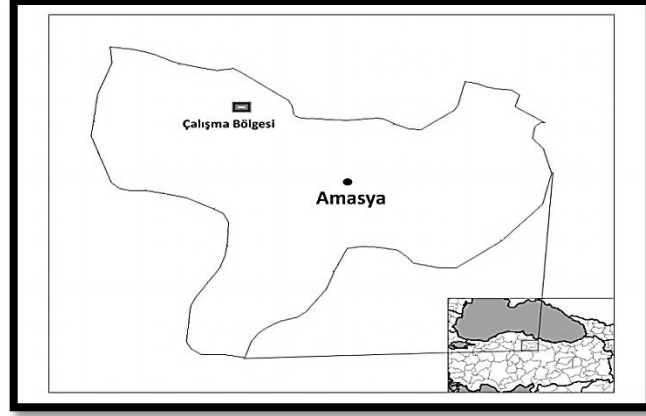
Derinlik (m)	Formasyon		
	1	2	3
	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)
50	1,275	1,35	1,325
100	2,55	2,7	2,65
200	5,1	5,4	5,3
300	7,65	8,1	7,95
400	10,2	10,8	10,6
500	12,75	13,5	13,25
600	15,3	16,2	15,9
700	17,85	18,9	18,55
800	20,4	21,6	21,2
900	22,95	24,3	23,85
1000	25,5	27	26,5



Şekil 4.7. Kallat tünelinin günümüzdeki görüntüsü [36]

4.2.3. Kavak – Merzifon karayolu (Şehzadeler) tüneli

Türkiye'nin Amasya ilinde bulunan Şehzadeler tüneli 12 m genişliğe, 9 m yüksekliğe ve 345 m uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca 4 farklı formasyondan geçilmektedir. Şekil 4.8'de tünelin bulunduğu konum verilmiştir.



Şekil 4.8. Şehzadeler tünelinin konumu [37]

Araştırmacılar tarafından hesaplanan 4 formasyona ait; RMR, σ_{ci} , E_i , v , γ , m_i değerleri yapılmış olan çalışmadan direkt alınarak Çizelge 4.5'te sunulmuştur [38]. Çizelge 4.5'te bulunan; GSI, E_m , m_b , s_m değerleri ise sayısal modelleme girdi parametreleri bölümünde verilen formüller (12, 13, 14, 16) kullanılarak hesaplanmış ve çizelgeye aktarılmıştır.

Çizelge 4.5. Şehzadeler tüneli kayaç parametreleri

No	Kayaç Özelliği	Formasyon			
		1	2	3	4
1	RMR değeri	58	43	51	34
2	Tek eksenli basınç dayanım değeri (σ_{ci})	65	45	55	10
3	GSI değeri	53	38	46	29
4	Kaya malzemesinin deformasyon modülü (E_i)	19000	10000	13000	10000
5	Kaya malzemesinin Hoek-Brown sabiti (m_i)	17	11	9	12
6	Kaya kütlelerinin deformasyon modülü (E_m)	4280	1212	2210	790
7	Hoek-Brown sabiti (m_b)	2,566	0,632	0,757	0,271
8	Hoek-Brown sabiti (m_b)*	1,28	0,316	0,38	0,135
9	Hoek-Brown sabiti (s_m)	0,0039	0,0003	0,0010	0,00005

Çizelge 4.5. (Devamı)

10	Hoek-Brown sabiti (s_m)*	0,0019	0,0002	0,0005	0,00002
11	Poisson oranı (ν)	0,3	0,3	0,3	0,3
12	Birim ağırlık MN/m ³ (γ)	0,025	0,022	0,023	0,024

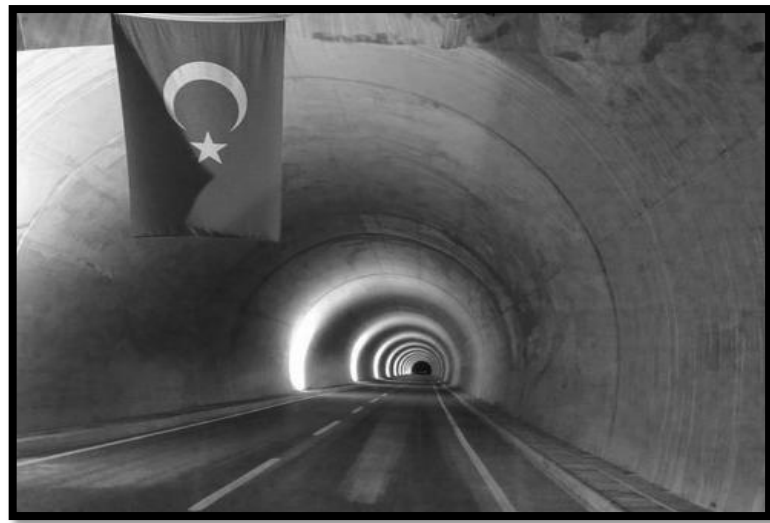
(*) Ortalama değer

Tünelin alanı $\approx 82 \text{ m}^2$ olarak verilmiştir ve dairenin alan formülünden (18) eşdeğer dairesel tünel çapı 10.20m olarak hesaplanmıştır.

Şehzadeler tüneli için derinliklere bağlı gerilme değerleri formül (17) kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.6'ya aktarılmıştır. İnşa edilmiş tünelin günümüzdeki fotoğrafı ise Şekil 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Yeraltı derinlik koşullarına bağlı gerilme değerleri

Derinlik (m)	Formasyon			
	1	2	3	4
	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)	Gerilme (MPa)
50	1,25	1,1	1,15	1,2
100	2,5	2,2	2,3	2,4
200	5	4,4	4,6	4,8
300	7,5	6,6	6,9	7,2
400	10	8,8	9,2	9,6
500	12,5	11	11,5	12
600	15	13,2	13,8	14,4
700	17,5	15,4	16,1	16,8
800	20	17,6	18,4	19,2
900	22,5	19,8	20,7	21,6
1000	25	22	23	24



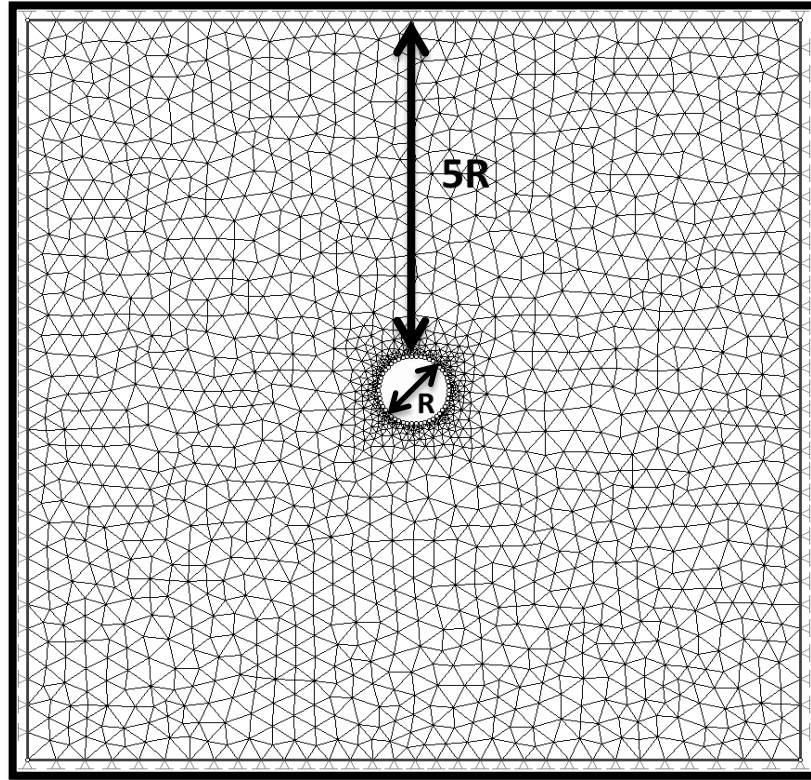
Şekil 4.9. Şehzadeler tünelinin günümüzdeki görüntüsü [39]

5. YÖNTEM

Bu bölümde kullanılan hesaplama ve analiz yöntemi sunulmuştur. Hesaplama yöntemi olarak sonlu elemanlar yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemin seçiminde rol oynayan ana sebep ise sonlu elemanlar ile hesaplama yapan yazılımlarda kaya kütle özellikleri, gerilme değerleri gibi girdi parametrelerinin kolay bir şekilde değiştirilip farklı türde bölgeler için hesaplama yapılabilir olmasıdır. Bu çalışmada sonlu elemanlar ile hesaplama yapan ticari yazılımlarından Phase² yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılıma nasıl verilerin aktarıldığı ve analizlerin nasıl yapıldığı ilerleyen bölümde yer almaktadır.

5.1. Phase² Yazılımı Veri Aktarımı ve Analizi

Hazırlanan saha verilerinin Phase² yazılımına girişinde Kulhawy [6] dikkate alınarak, dış sınırlar galeri çapının 5 katı olacak şekilde oluşturulmaktadır. Daha sonra alan sonlu elemanlar örgüsüne (mesh) ayrılmaktadır (Şekil 5.1).

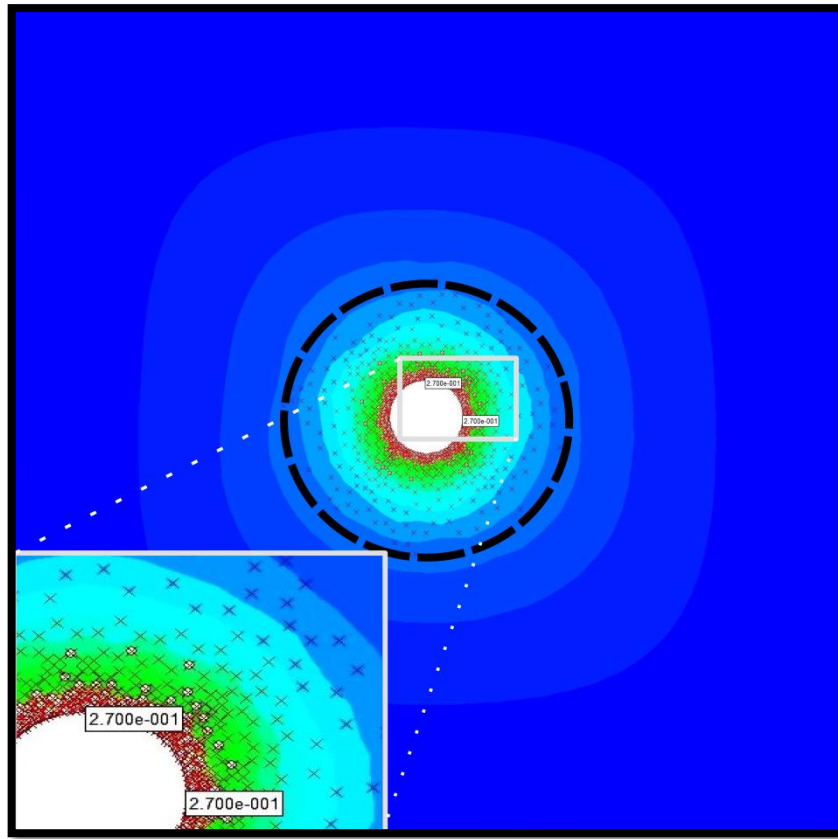


Şekil 5.1. Sonlu elemanlara ayrılmış kaya kütlesi

Bu işlemlerin ardından kaya kütlesi özellikleri, gerilme özellikleri ve gerektiği durumlarda tahkimat özellikleri yazılıma girilip hesaplamalar yaptırılmaktadır.

Bu hesaplamaların sonuçlarından (Şekil 5.2) açıklığın tavan ve yan duvar sınırlarındaki deformasyonları ve tünel etrafındaki kaya kütlesinde oluşan plastik bölge çapları kaydedilmektedir.

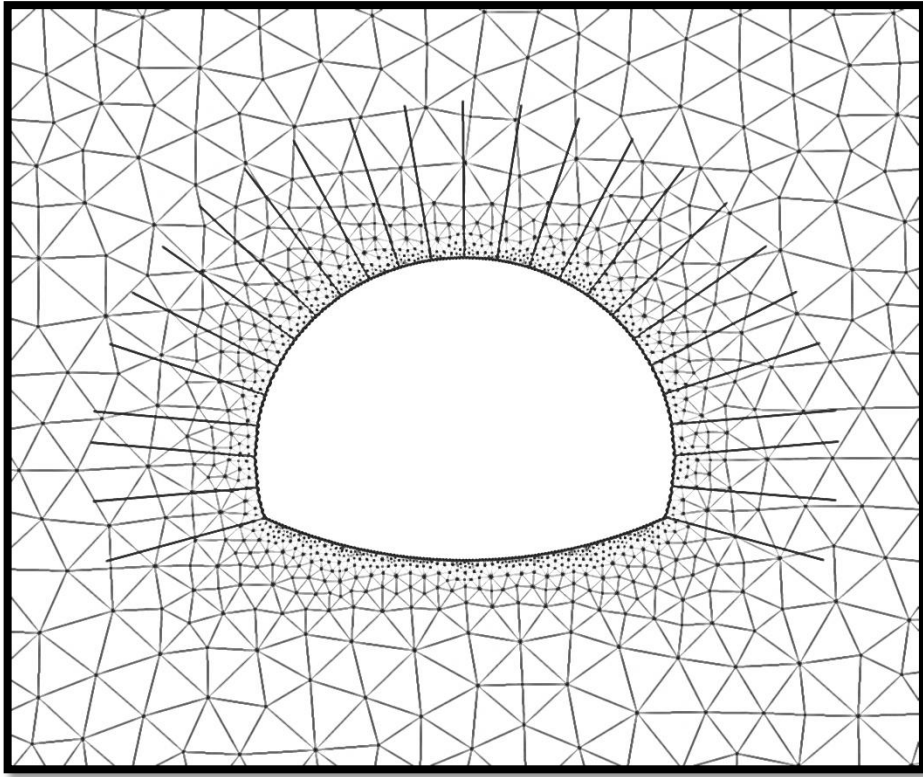
Şekil 5.2'de hesaplama sonucunda galerinin tavan ve yan duvardaki deformasyonların alım bölgeleri ve kaya kütlesinde oluşan plastik bölge çapı (siyah kesikli çizgilerle ayrılmış alan) belirtmektedir.



Şekil 5.2. Phase² yazılımı hesaplama çıktısı

5.2. Gerçek Geometri ve Derinlik Analizleri

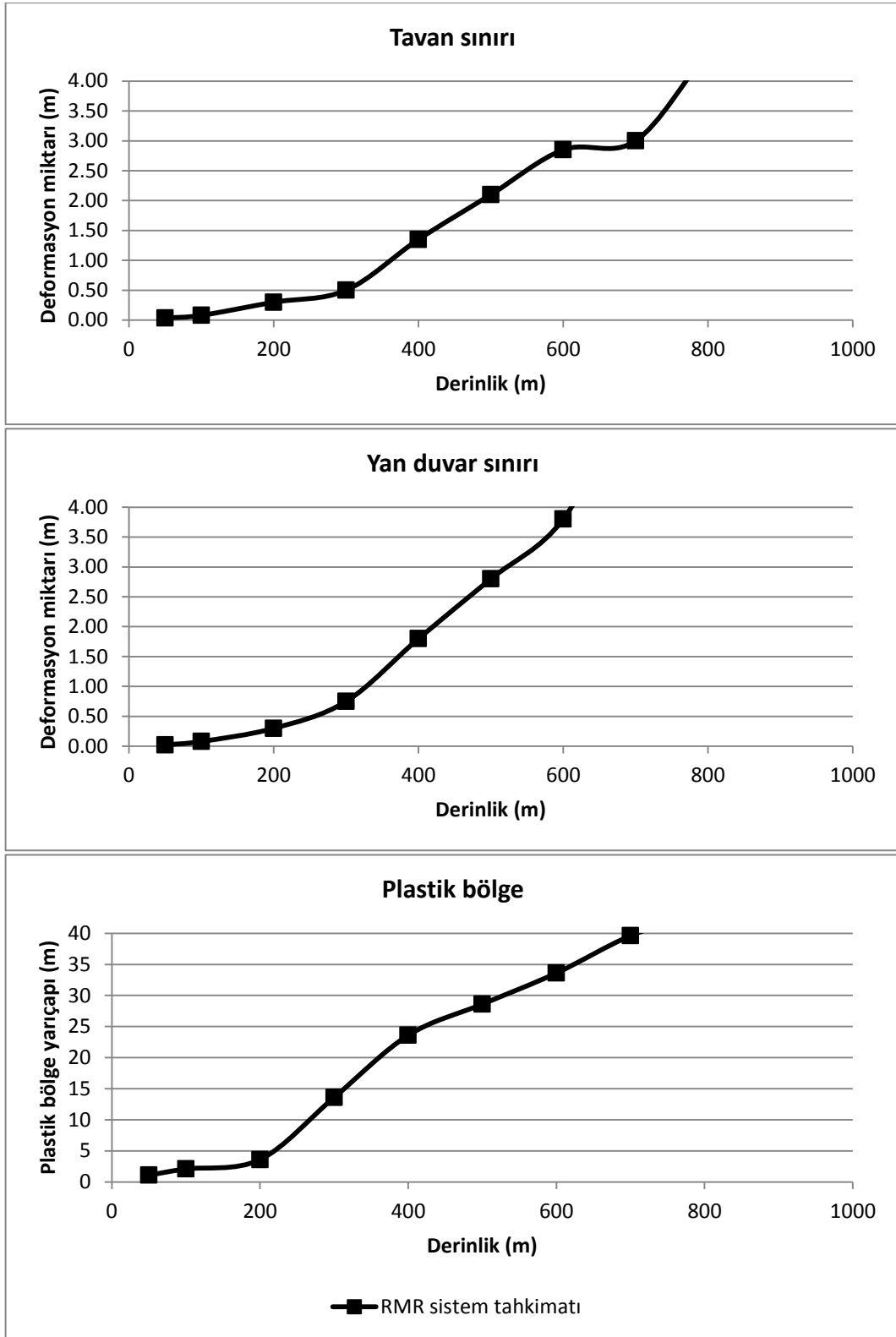
Phase² yazılımında yeraltı açıklığı olarak, gerçek tünel geometrisi oluşturulmuştur. Ardından dış sınırlar oluşturularak alan sonlu elemanlar ağına ayrılmış, kaya kütlesi özellikleri ve varsayılan derinliğe bağlı hesaplanan gerilme özellikleri yazılıma aktarılmıştır. Daha sonra bu açıklıklara RMR sisteminin önerdiği tahkimat (kaya saplaması ve/veya püskürtme beton türünden) uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. şekil 5.3'te Osmangazi tünelinin Phase² yazılımında oluşturulmuş şekli verilmiştir.



şekil 5.3. Osmangazi tüneli gerçek geometrisi

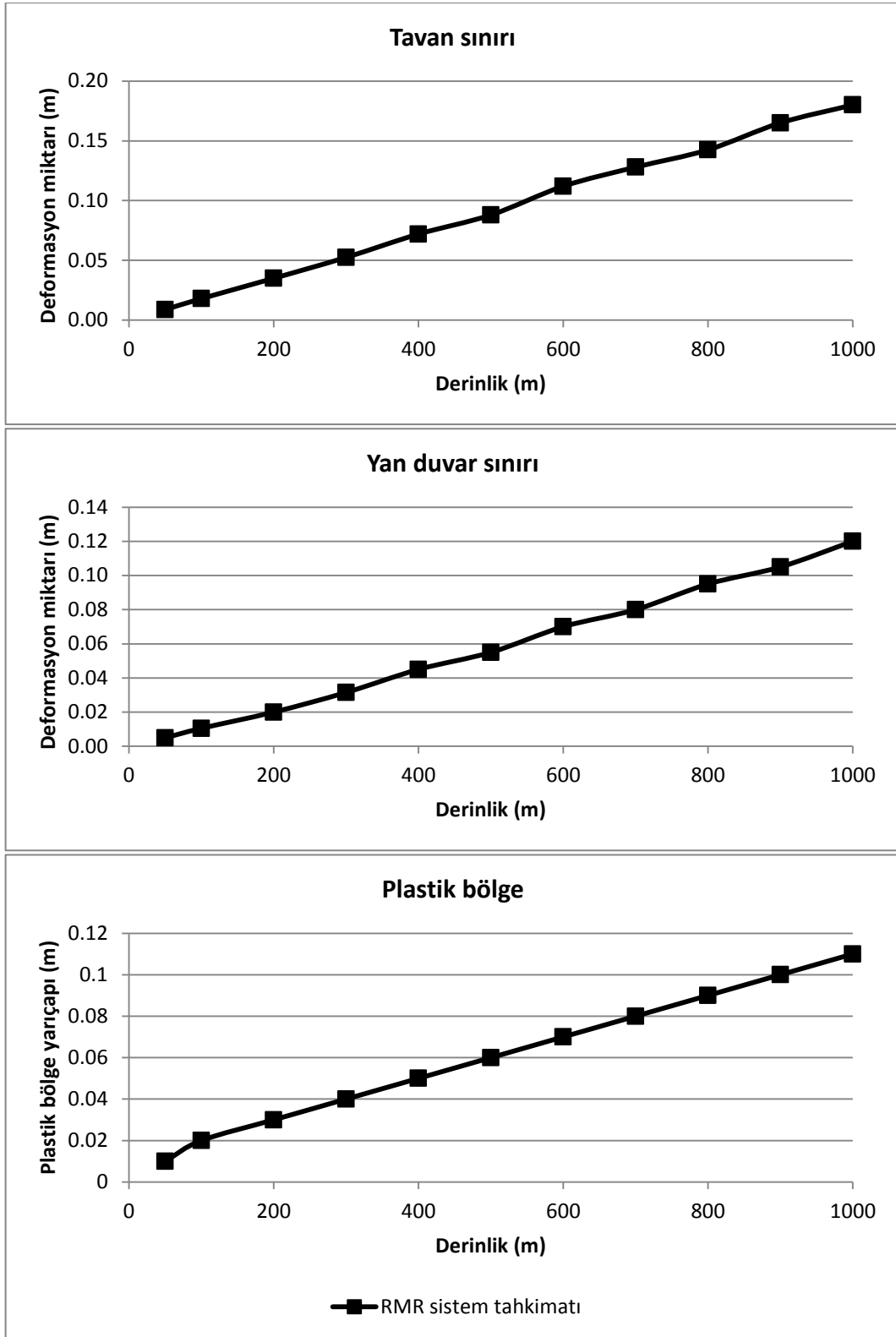
Osmangazi tüneli için 7 farklı formasyona ait, tünel tavan ve yan sınırlarındaki deformasyon değerleri ile tünel etrafındaki oluşan plastik bölgelerin çapları şekil 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10'da verilmiştir. Aşağıdaki grafiklerde bulunan 'RMR sistem tahkimatı' olarak adlandırılan şekil; RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanlarını kullanarak yapılan analizler sonucu elde edilen deformasyon değerini belirtmektedir.

Osmangazi tüneli 1. formasyon; RMR puanı: 37



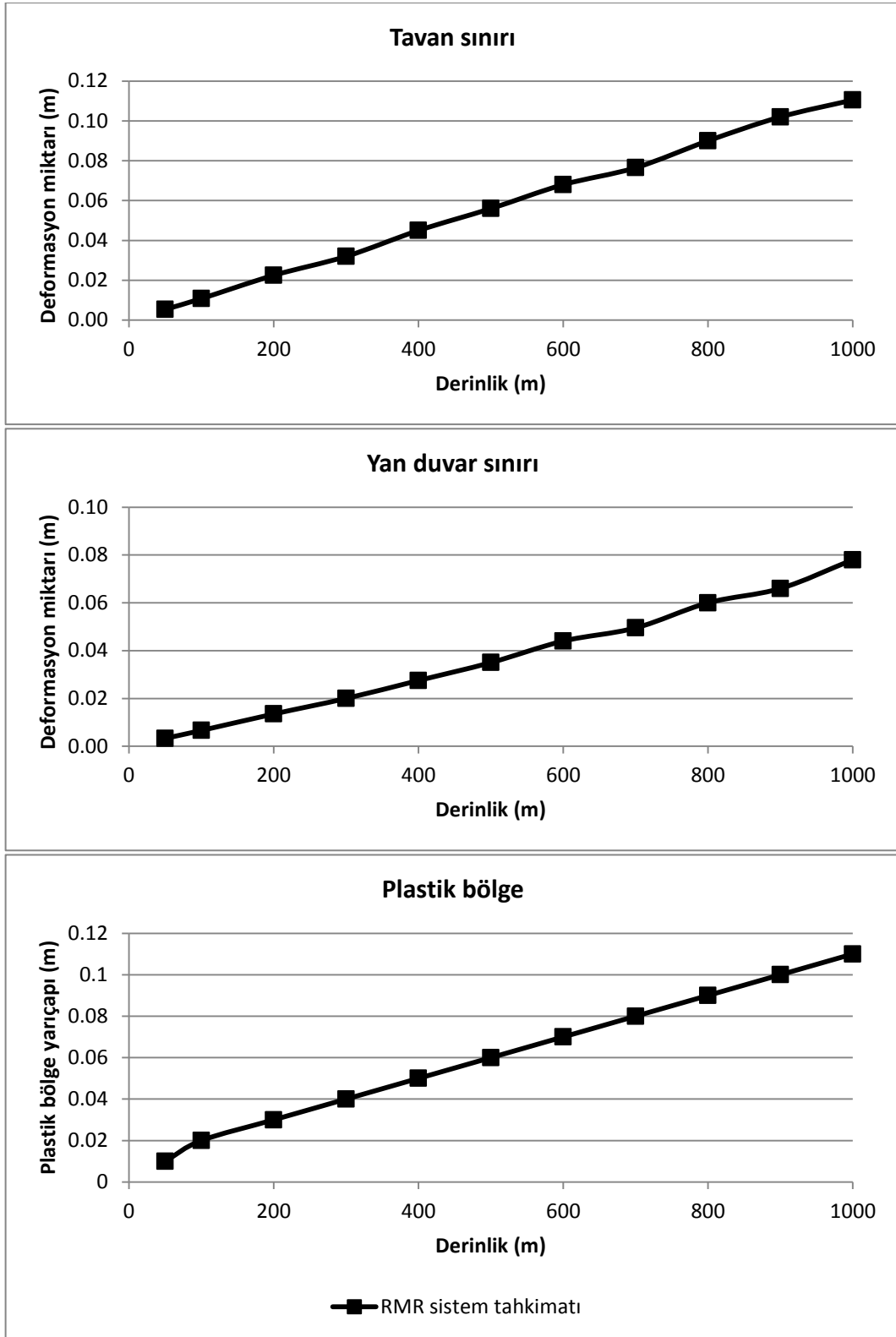
Şekil 5.4. Osmangazi tüneli formasyon 1; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Osmangazi tüneli 2. formasyon; RMR puanı: 50



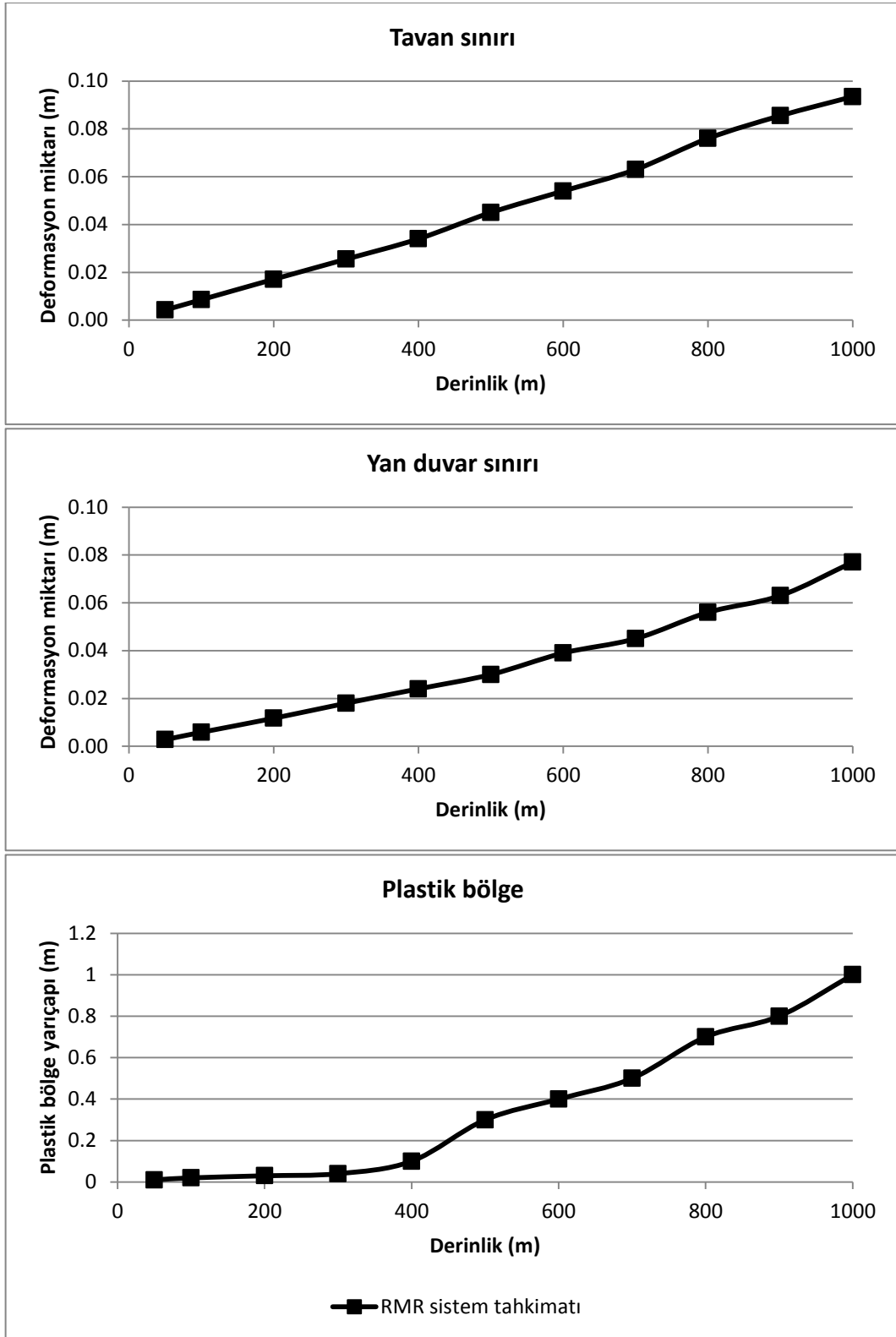
Şekil 5.5. Osmangazi tüneli formasyon 2; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Osmangazi tüneli 3. formasyon; RMR puanı: 55



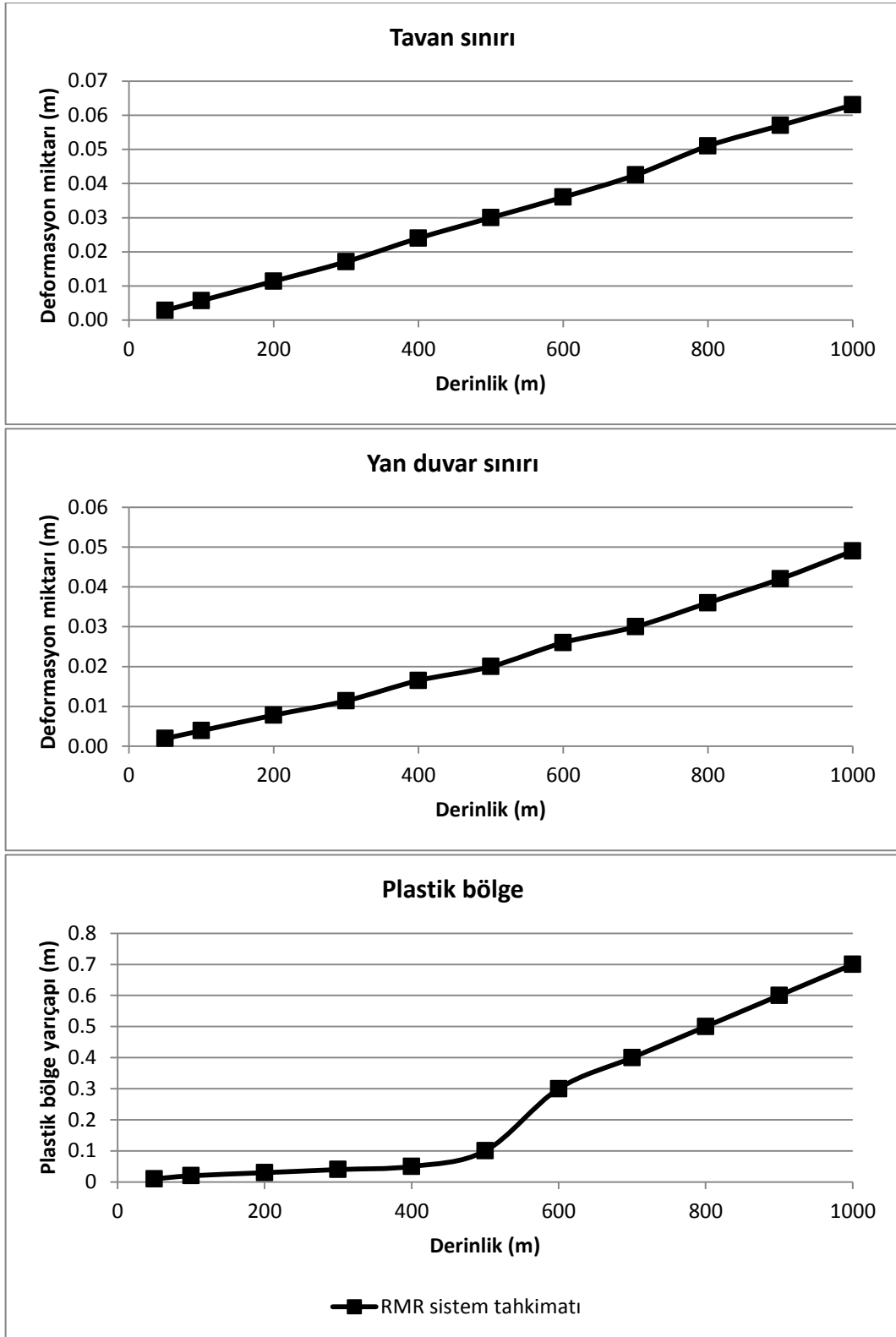
Şekil 5.6. Osmangazi tüneli formasyon 3; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Osmangazi tüneli 4. formasyon; RMR puanı: 63



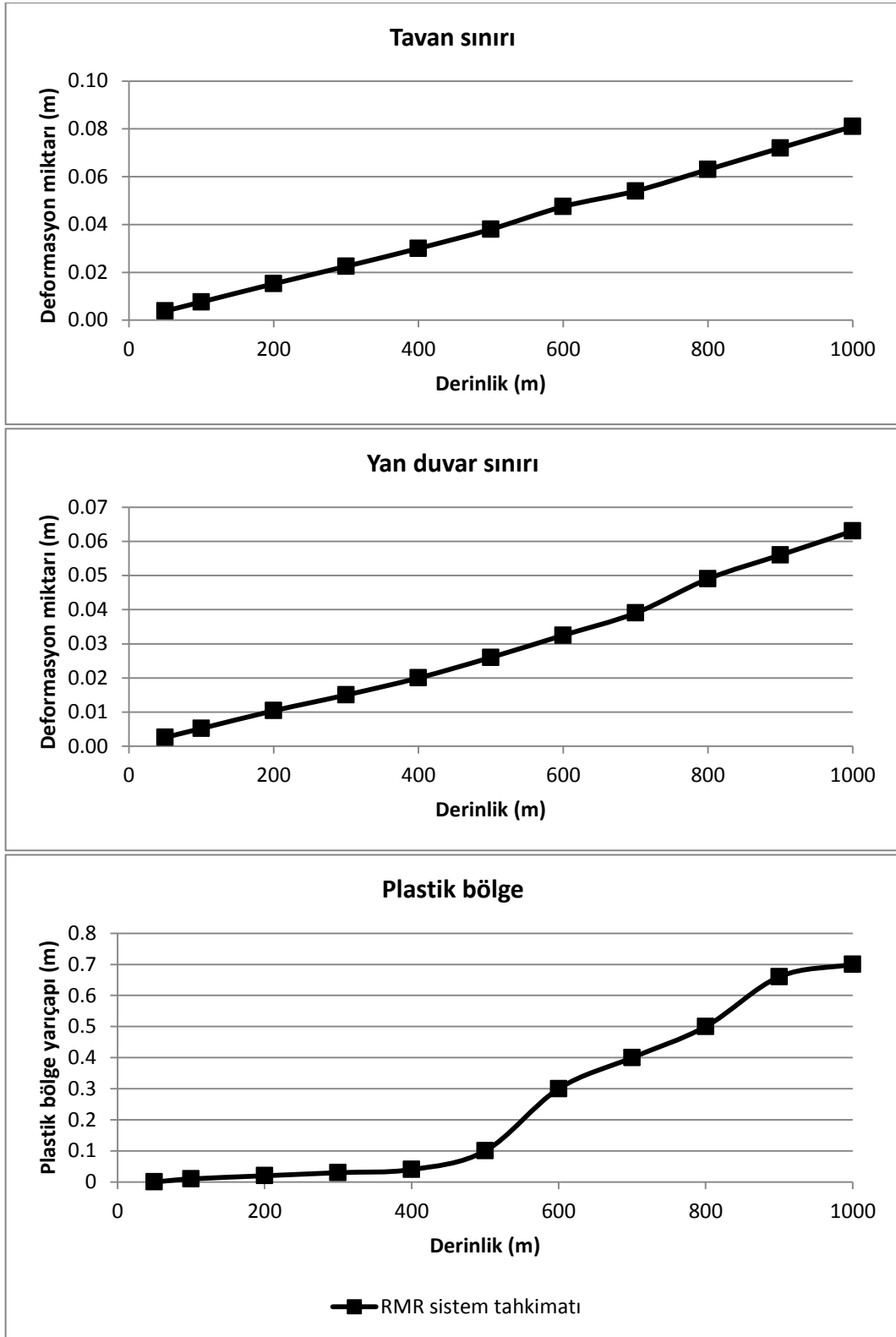
Şekil 5.7. Osmangazi tüneli formasyon 4; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Osmangazi tüneli 5. formasyon; RMR puanı: 66



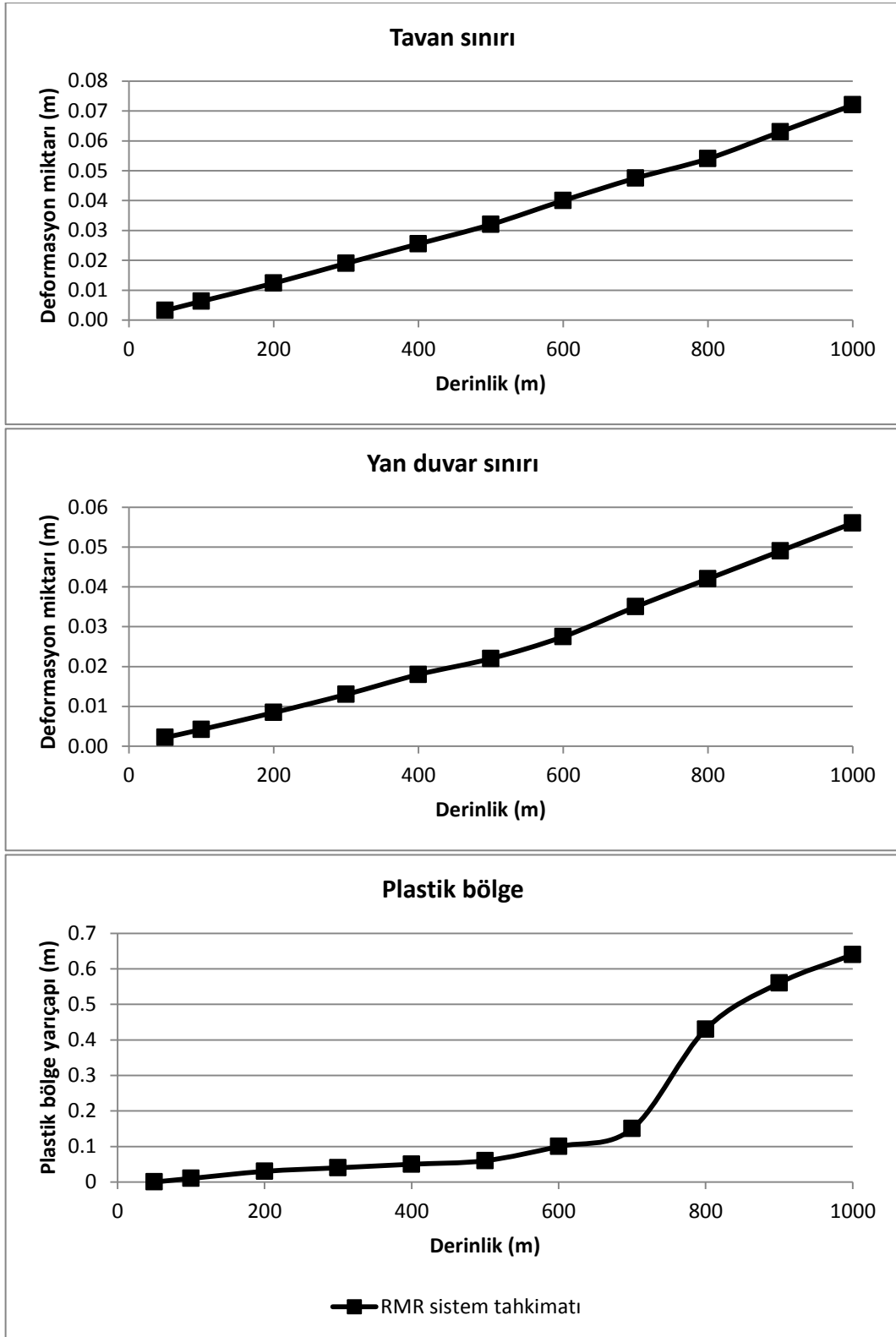
Şekil 5.8. Osmangazi tüneli formasyon 5; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Osmangazi tüneli 6. formasyon; RMR puanı: 63



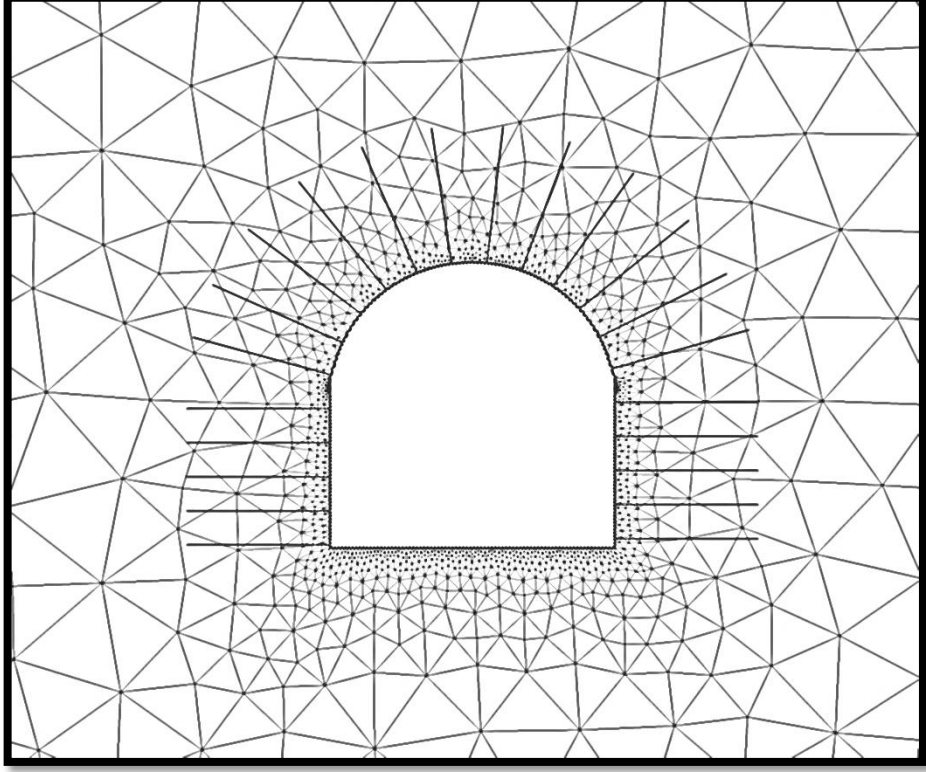
Şekil 5.9. Osmangazi tüneli formasyon 6; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Osmangazi tüneli 7. formasyon; RMR puanı: 65



Şekil 5.10. Osmangazi tüneli formasyon 7; tavan, yan duvar ve plastik bölge

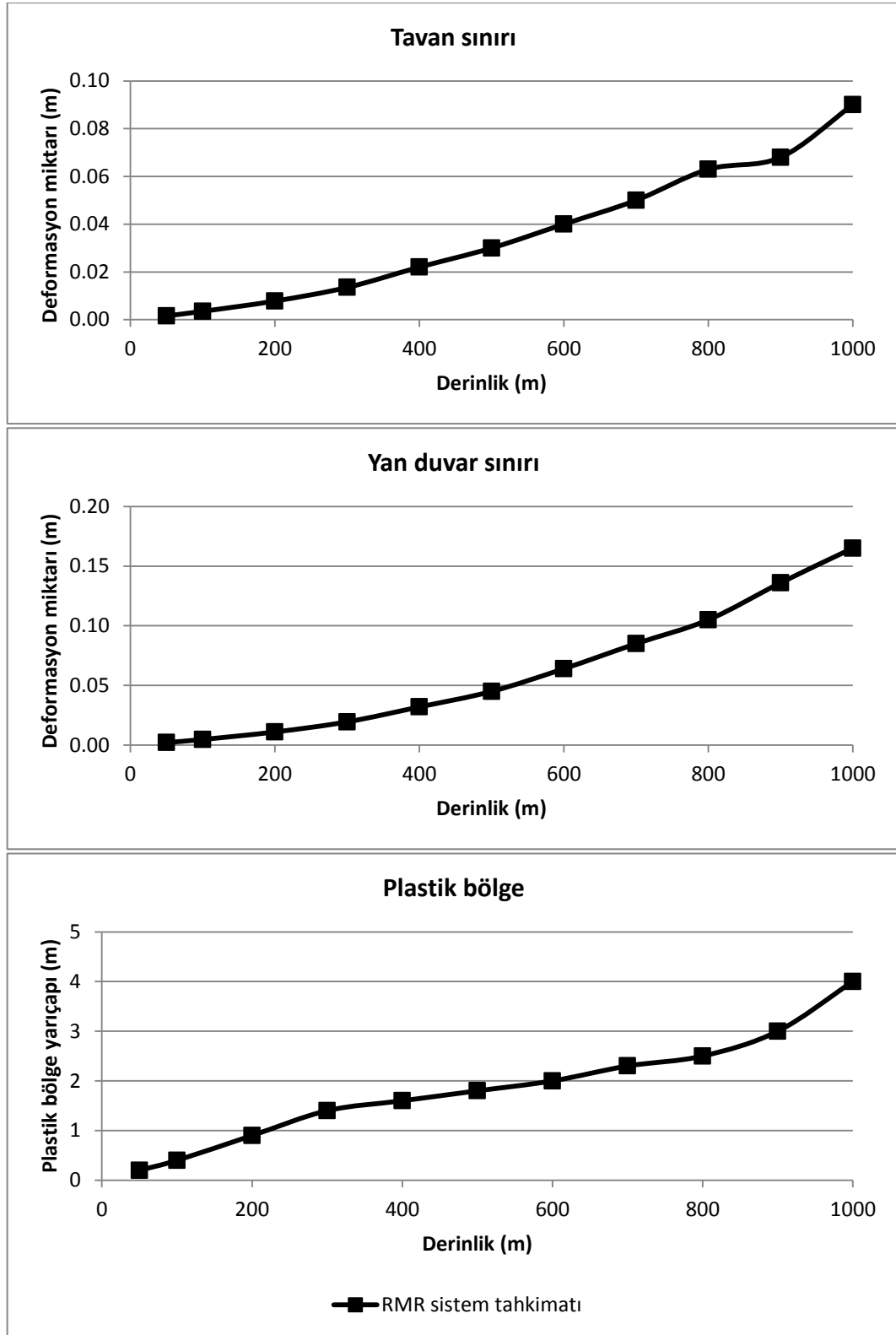
Şekil 5.11'de Kallat tünelinin Phase² yazılımında, gerçek geometri ve RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanları ile oluşturulmuş şekli verilmiştir.



Şekil 5.11. Kallat tüneli gerçek geometrisi

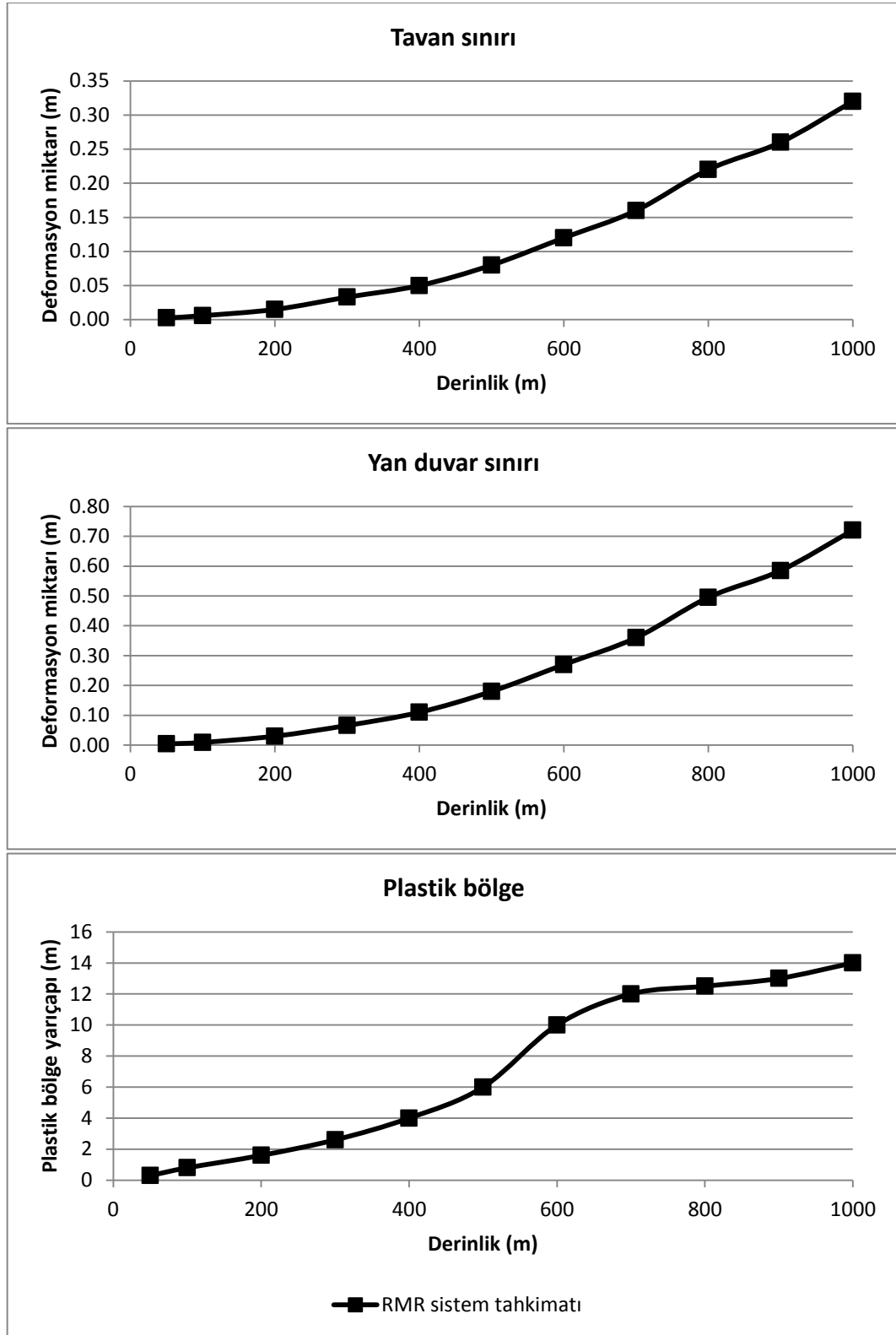
Kallat tüneli için 3 farklı formasyona ait, tünel tavan ve yan sınırlarındaki deformasyon değerleri ile tünel etrafındaki oluşan plastik bölgelerin çapları Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14'te verilmiştir.

Kallat tüneli 1. formasyon; RMR puanı: 55



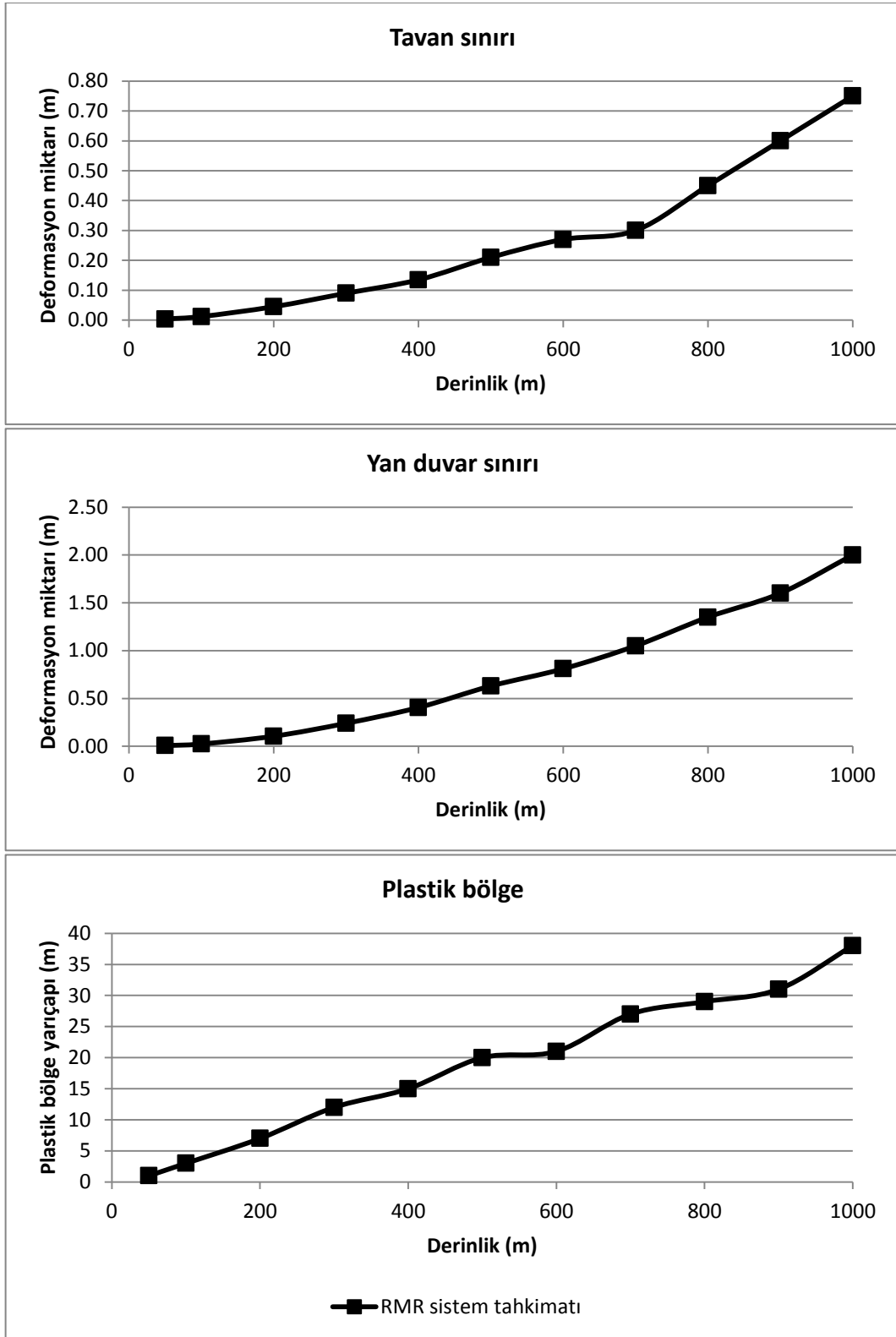
Şekil 5.12. Kallat tüneli formasyon 1; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Kallat tüneli 2. formasyon; RMR puanı: 46



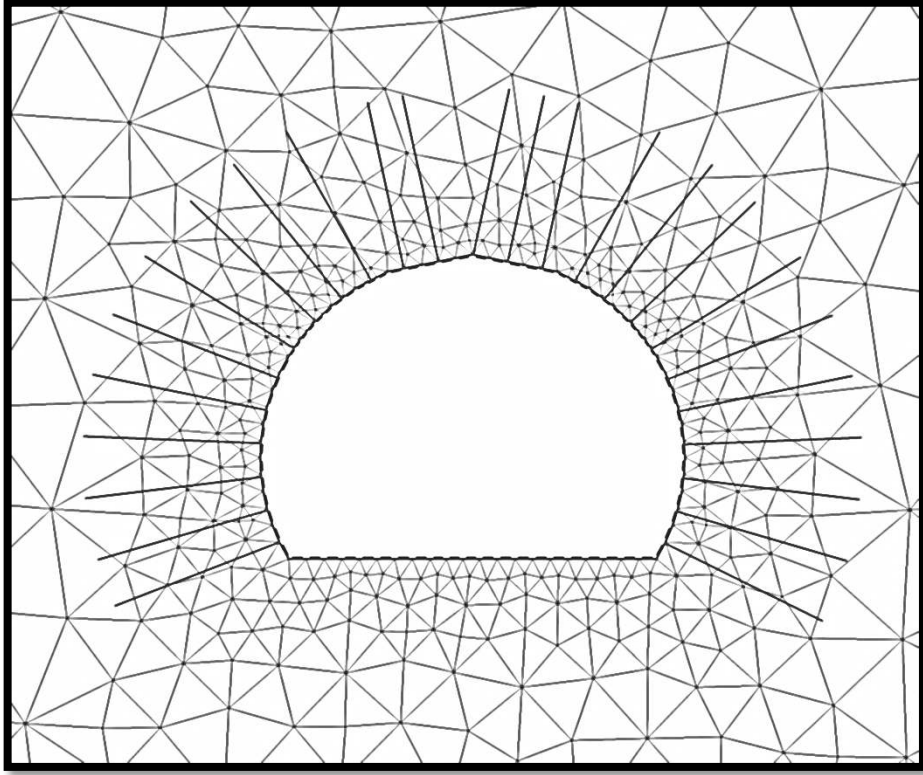
Şekil 5.13. Kallat tüneli formasyon 2; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Kallat tüneli 3. formasyon; RMR puanı: 40



Şekil 5.14. Kallat tüneli formasyon 3; tavan, yan duvar ve plastik bölge

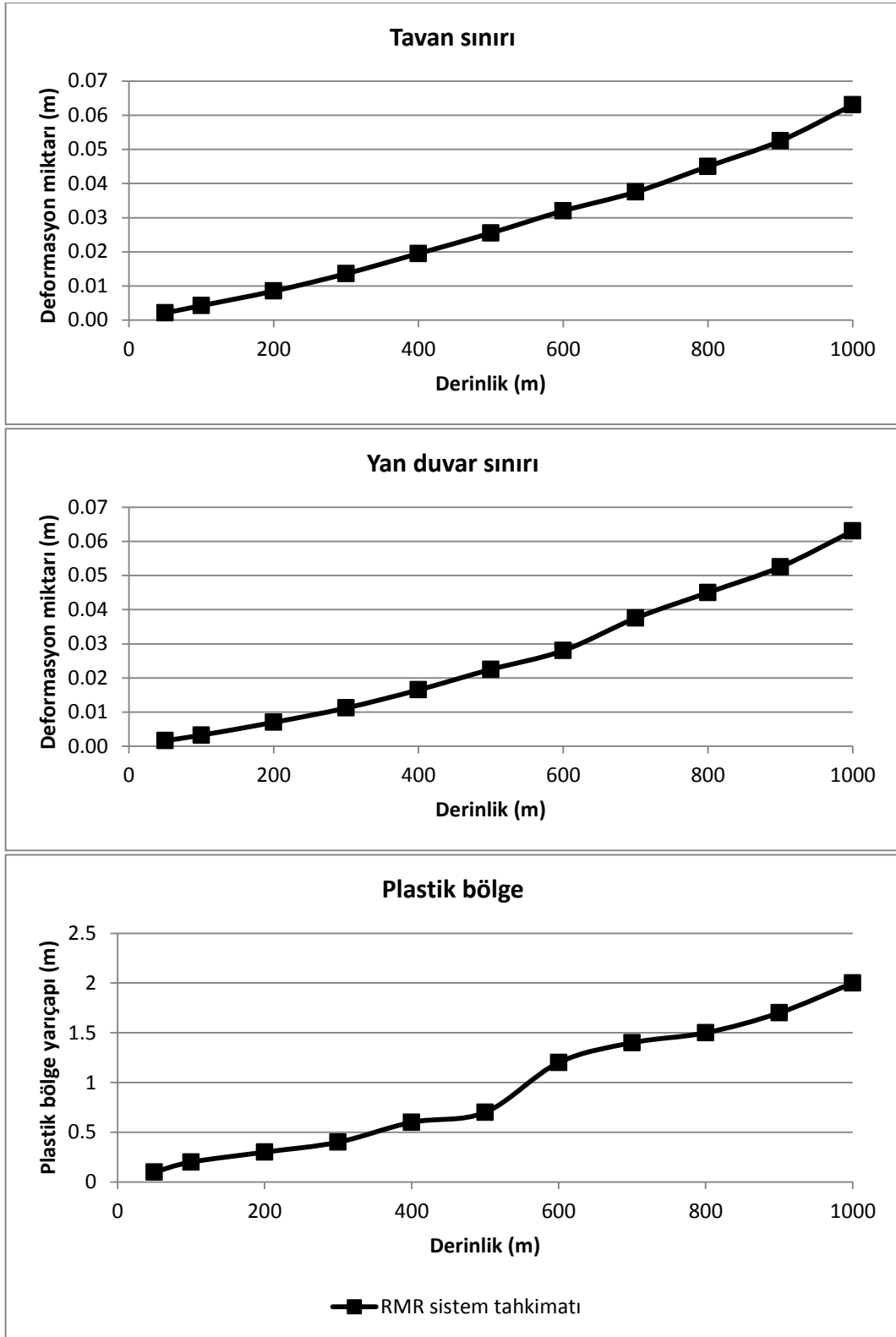
Şekil 5.15'te Şehzadeler tünelinin Phase² yazılımında, gerçek geometri ve RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanları ile oluşturulmuş şekli verilmiştir.



Şekil 5.15. Şehzadeler tüneli gerçek geometrisi

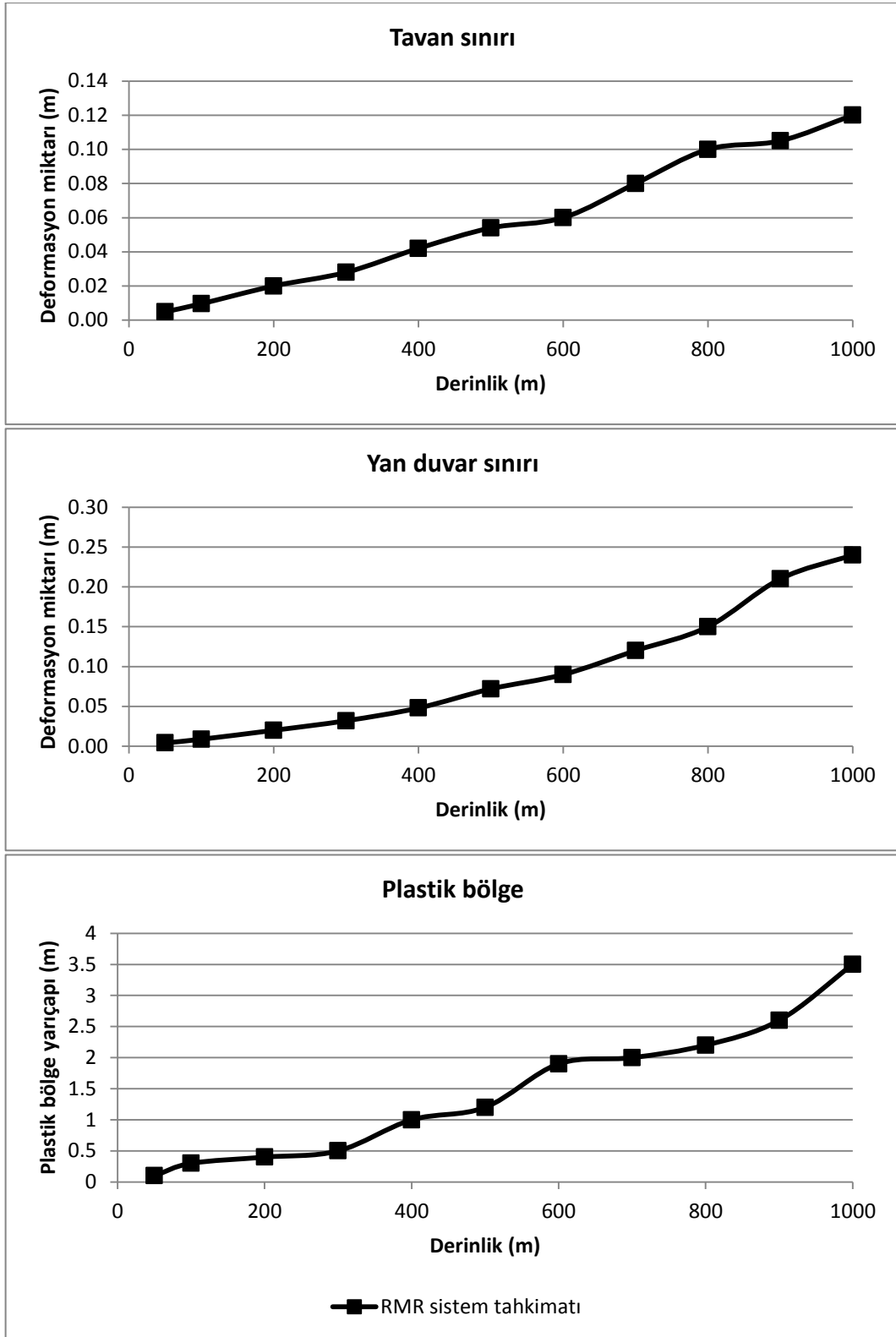
Şehzadeler tüneli için 4 farklı formasyona ait, tünel tavan ve yan sınırlarındaki deformasyon değerleri ile tünel etrafındaki oluşan plastik bölgelerin çapları Şekil 5.16, 5.17, 5.18 ve 5.19'da verilmiştir.

Şehzadeler tüneli 1. formasyon; RMR puanı: 58



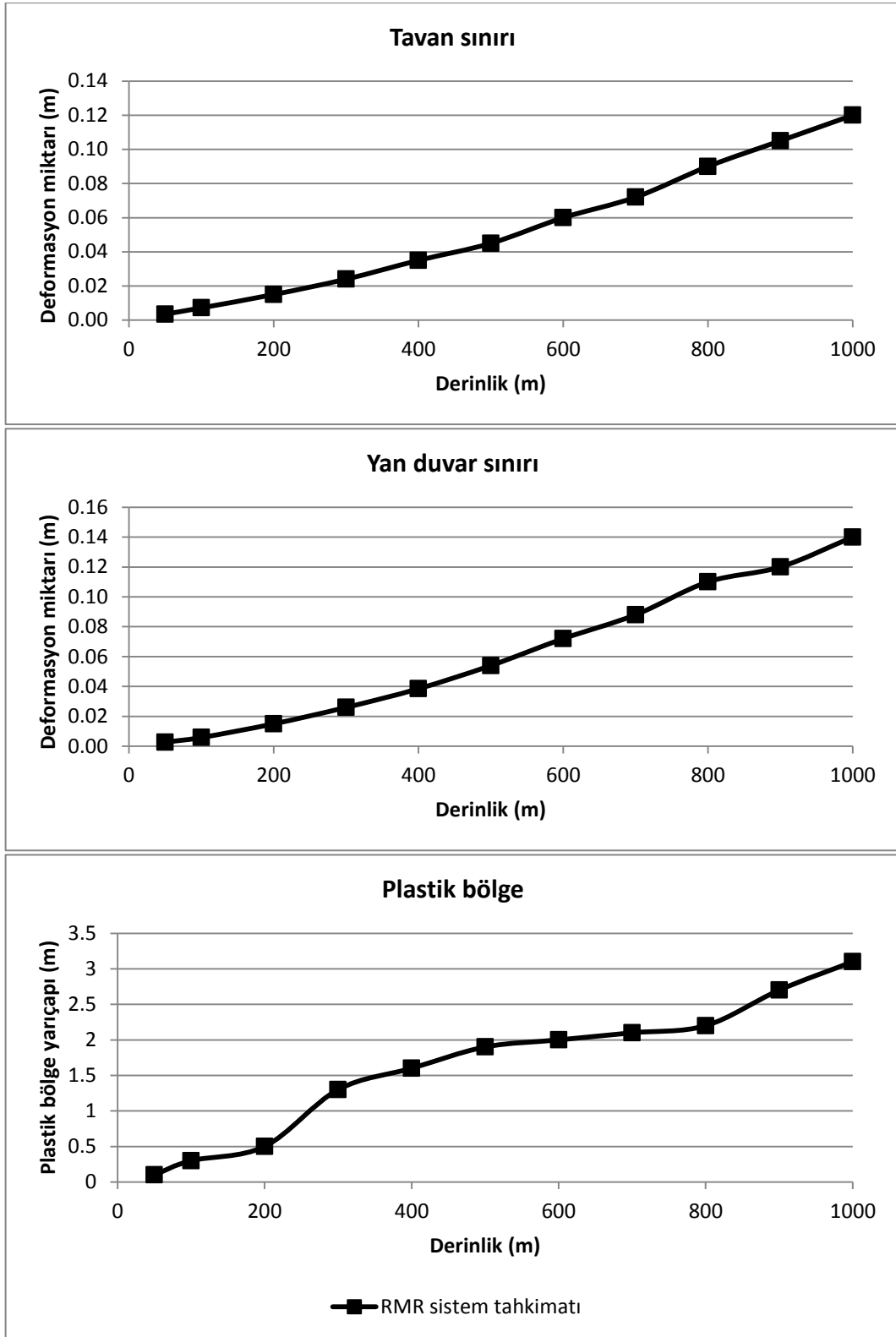
Şekil 5.16. Şehzadeler tüneli formasyon 1; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Şehzadeler tüneli 2. formasyon; RMR puanı: 43



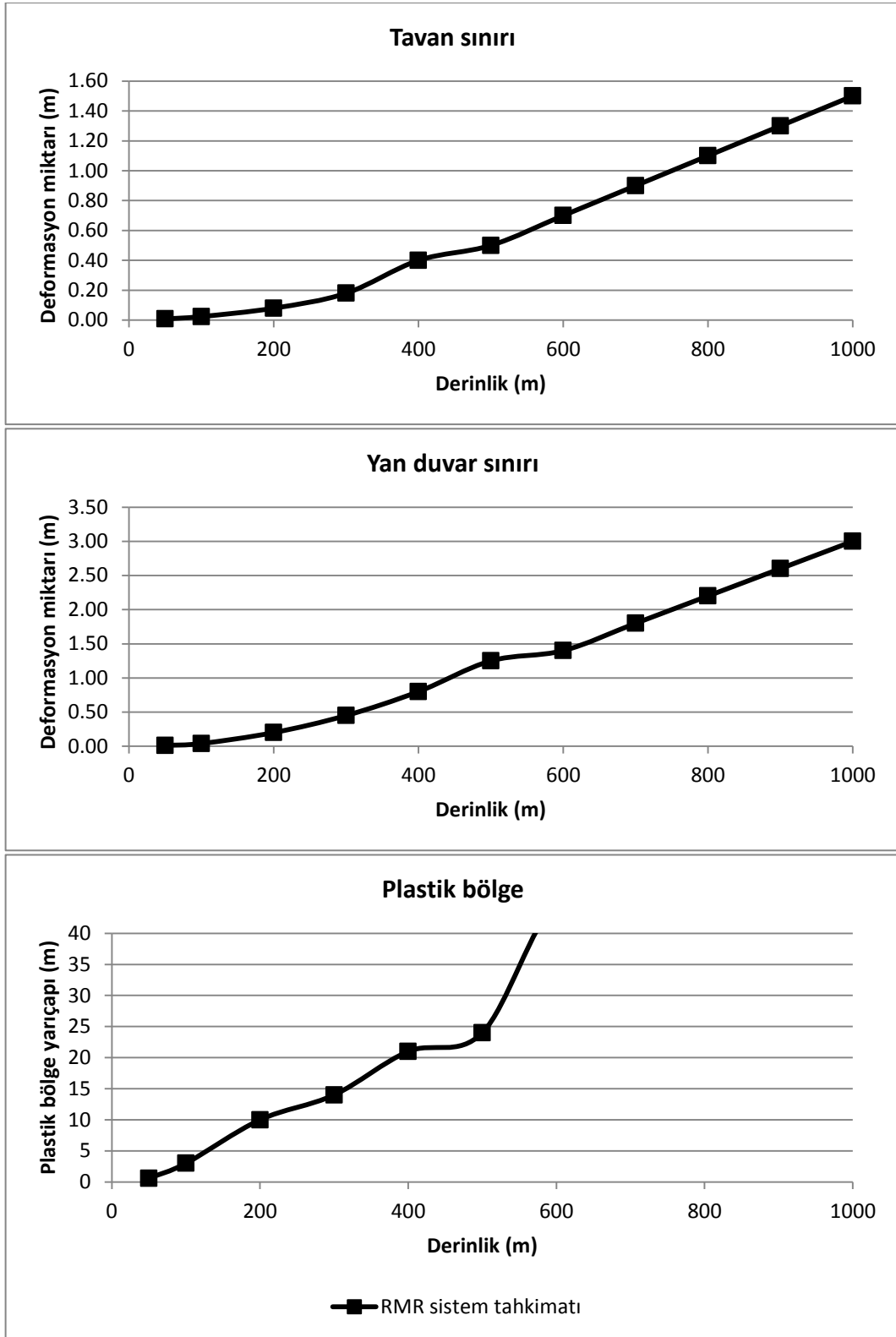
Şekil 5.17. Şehzadeler tüneli formasyon 2; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Şehzadeler tüneli 3. formasyon; RMR puanı: 51



Şekil 5.18. Şehzadeler tüneli formasyon 3; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Şehzadeler tüneli 4. formasyon; RMR puanı: 34



Şekil 5.19. Şehzadeler tüneli formasyon 4; tavan, yan duvar ve plastik bölge

Gerçek tünel geometrileri ve derinlikleri için RMR sisteminin önerdiği tahkimat performansları iyi olsa bile derinlik arttırıldığında, bu önerilen tahkimat sistemlerinin yetersiz kaldığı yukarıdaki grafiklerde de anlaşılmaktadır. zm amaçlı olarak eşdeğer dairesel tünel kesiti ve farklı derinliklerde tahkimatsız, eşdeğer tahkimat basıncı ve gerekli tahkimat basıncı olmak üzere 3 farklı tipte modelleme yapılmıştır.

5.3. Tahkimatsız Analizler

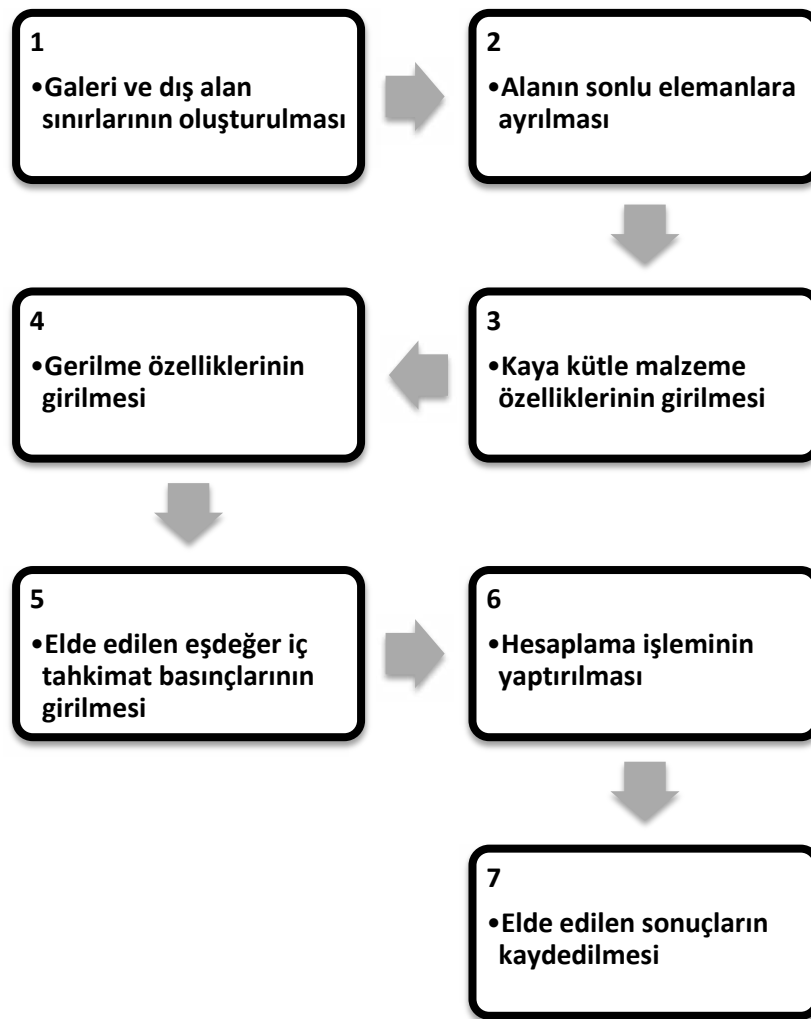
Tahkimatsız analizlerde açıklık boyutları eşdeğer çaplı dairesel olarak oluşturulmuş ve tahkimat uygulanmadan şekil 5.20'deki yol izlenmiştir.



şekil 5.20. Tahkimatsız analizlerde izlenen yol

5.4. Eşdeğer Tahkimatlı Analizler

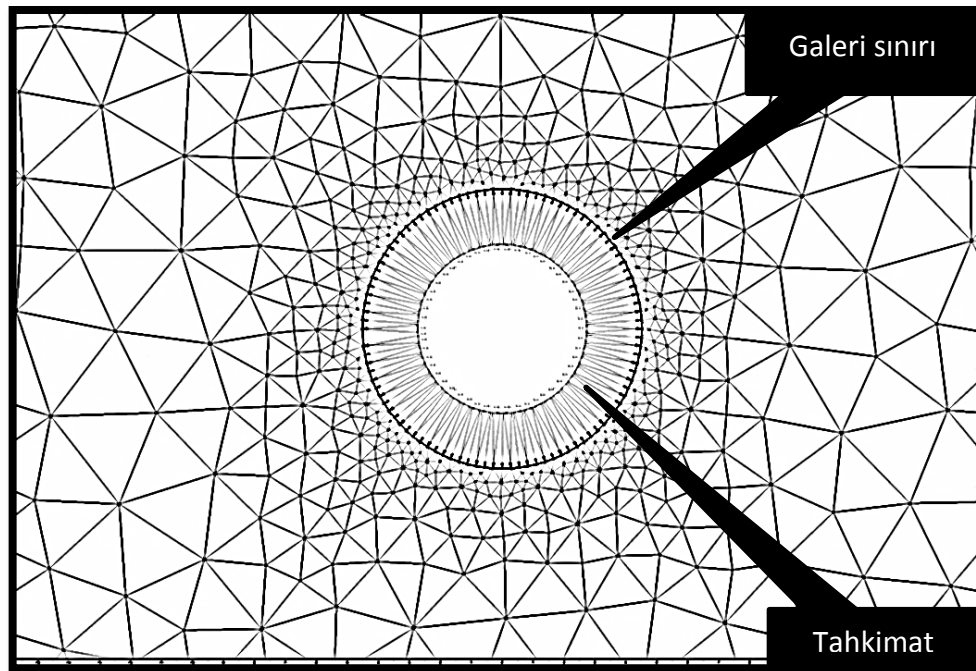
Bu analizlerde açıklık boyutları eşdeğer çaplı dairesel olarak oluşturulmuştur. Galerilere uygulanacak tahkimat için RMR sisteminin önerdiği “Ön tahkimat seçimi kılavuzu” baz alınmıştır (Çizelge 3.13). Bu kılavuzdan kayaç için RMR puanına göre uygulanması gereken, kaya saplaması ve püskürtme beton özellikleri alınmıştır. Bu tahkimat özellikleri, analitik yöntem (Carranza-Torres [2]) formülleri kullanılarak (MPa cinsinden) iç tahkimat basınca dönüştürülmüştür. Bu bölümde Şekil 5.21'deki yol izlenmiştir.



Şekil 5.21. Eşdeğer tahkimatlı analizlerde izlenen yol

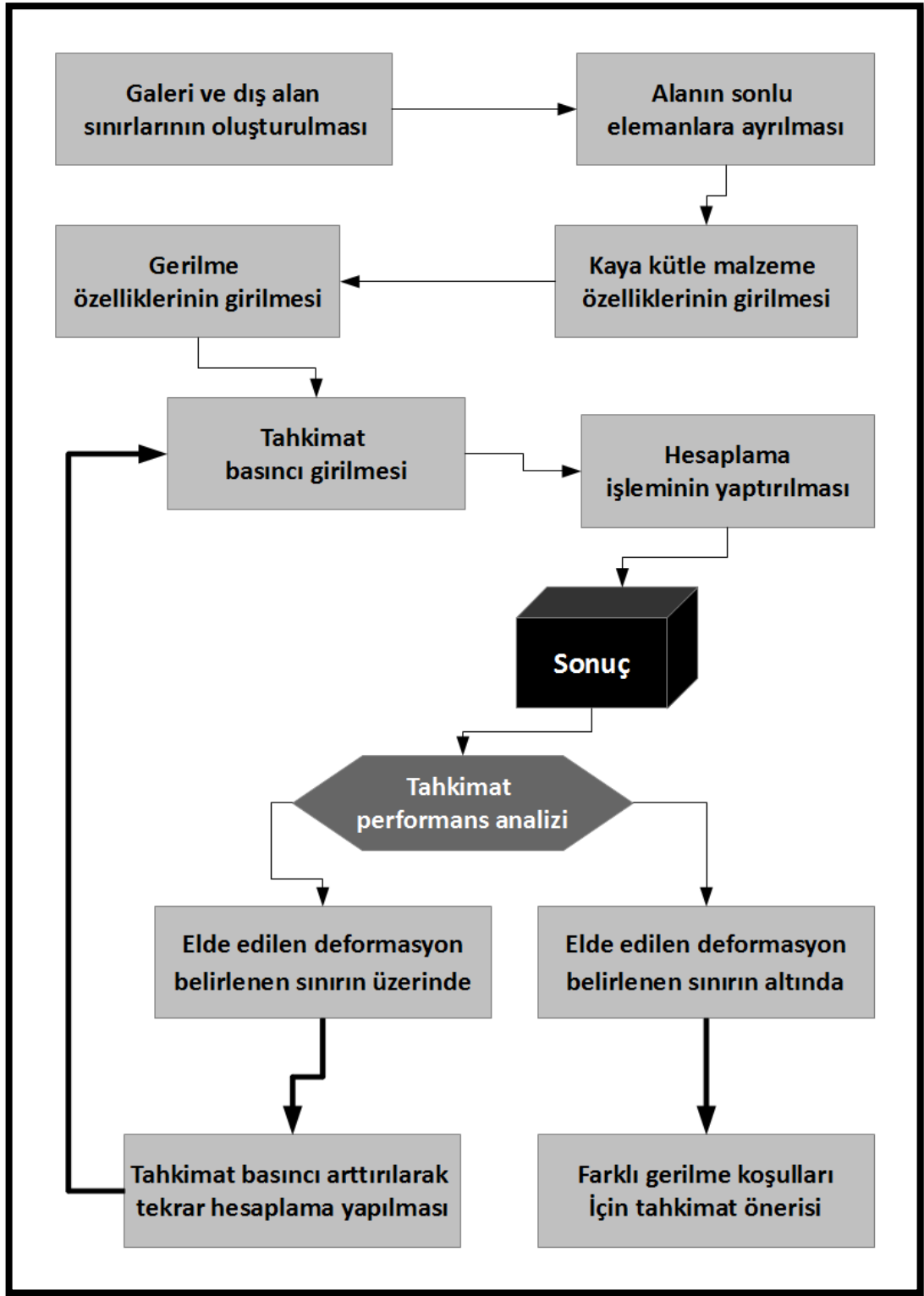
5.5. Gerekli Tahkimat Basıncı Analizleri

Hoek'a [31] göre bir galeride deformasyon miktarı, galeri çapının %2'sini geçerse önlenemez duraylılık problemleri ile karşılaşılacağı düşünülmektedir. Bu makale dikkate alarak yapılan bu çalışmada maksimum deformasyon galeri çapının %2'si sınırını geçmeyecek şekilde tahkimat uygulanmıştır. Tahkimatsız modellemelerin sonuçlarına göre galeri çapının %2'sini geçen deformasyona sahip derinliklerden itibaren galeriye tahkimat uygulanmaya başlanmıştır. Uygulanan tahkimat basınçları her derinlik için sıfırdan başlatılarak deformasyon miktarı istenilen sınıra gelinceye kadar 0.1 MPa hassasiyetinde arttırılmıştır. Dairesel olarak modellenen galerinin ve galeride uygulanan tahkimatın görüntüsü Şekil 5.22'de verilmiştir. Yapılan işlemlerde izlenen yol ise Şekil 5.23'te verilmiştir.



Şekil 5.22. Dairesel galeri etrafına uygulanan tahkimatın görüntüsü

Bu çalışmada 3 farklı bölgedeki toplam 14 farklı formasyon kullanılmıştır. Her formasyon değeri için 11 farklı derinlikte, tahkimatsız, eşdeğer tahkimatlı ve gerekli tahkimat basıncı analizi olmak üzere toplamda 462 farklı koşuldaki galeri için analiz yapılmıştır.



Şekil 5.23. Gerekli tahkimat basıncını hesaplarken izlenilen yol

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yapılan modellemeler neticesinde derinlik - deformasyon ilişkisini gösteren grafikler oluşturulmuştur. Bu grafikler tavan ve yan duvar sınırından alınan deformasyon değerleri ve kazı sonrası kaya kütleğinde oluşan plastik bölge yarıçapları olmak üzere üç çeşittir. Her formasyon için bu değerlerden elde edilen grafikler başlıklar altında ayrı ayrı olarak sunulmuştur.

Oluşturulan galeriler dairesel çaplı olduğu için galeri tavan ve yan duvarından elde edilen deformasyon değerleri birbirlerine çok yakındır. Bu sebepten sunulan grafiklerde galeri tavan ve yan duvar deformasyonları birbirlerine benzerlik göstermektedir. Grafiklerden RMR puanı 50'nin altında olan bölgelerde; tahkimatsız ve eşdeğer tahkimatlı hesaplamaların sonuçlarında çok fazla deformasyon olduğu gözlenmiştir. Bu sebepten dolayı grafiklerin daha anlaşılır olması adına logaritmik ölçek tercih edilmiştir.

Gerekli tahkimat basıncının uygulanmasında kullanılan deformasyon sınırı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Çizelge 6.1). Hoek [31] dikkate alınarak, galeri çapının %2'si sınır değer olarak belirlenmiştir. Gerekli tahkimat basınçları uygulandığında elde edilen deformasyon miktarlarının bu sınırları geçmediği grafiklerde görülmektedir.

Çizelge 6.1. Tüneller ve deformasyon sınırları

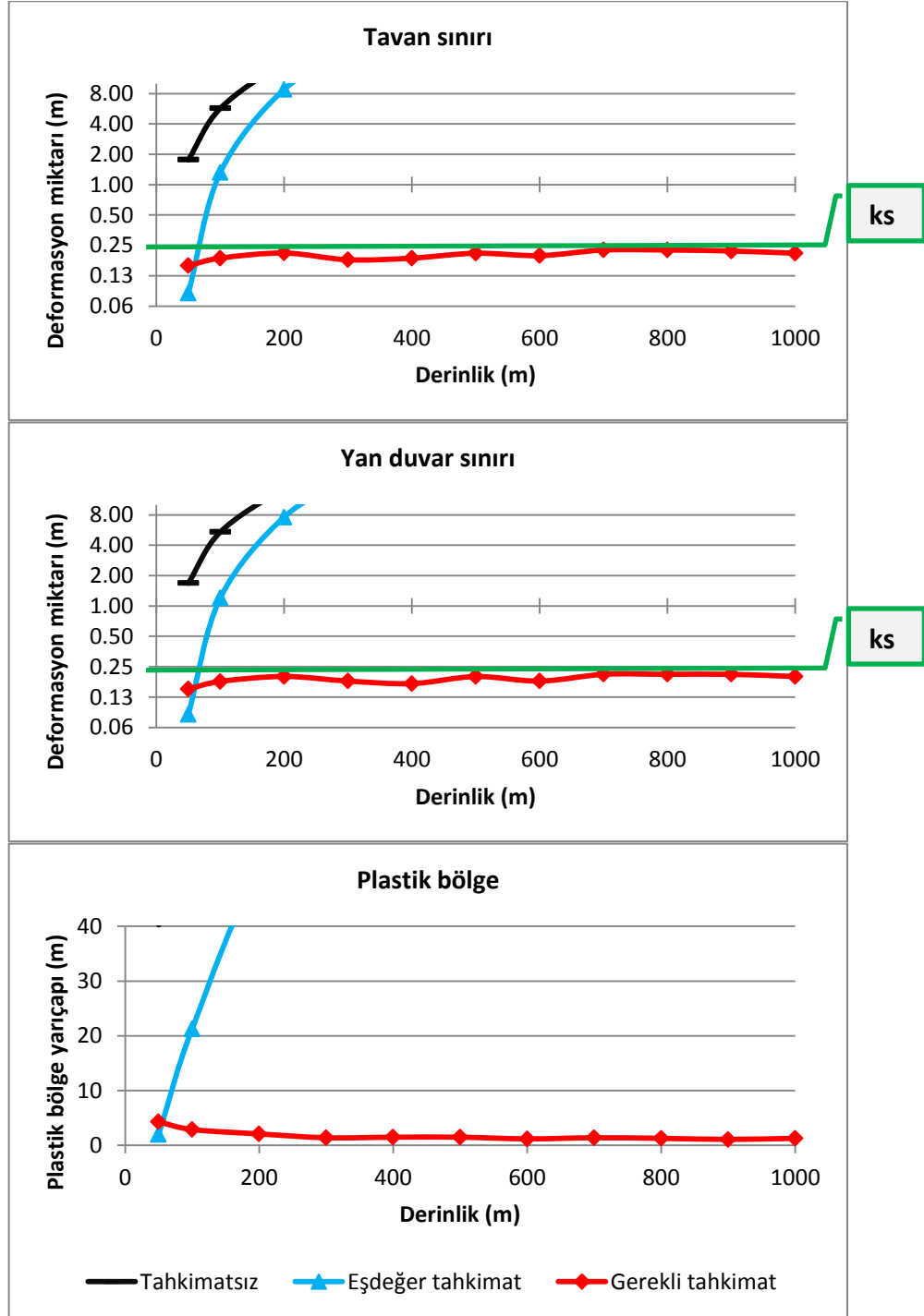
Tünel İsmi	Tünel Çapı	Tünel çapının %2'si
Osmangazi	11,44m	0,23m
Kallat	9,03m	0,18m
Şehzadeler	10,20m	0,20m

Aşağıdaki grafiklerde bulunan 'Tahkimatsız' olarak adlandırılan şekil; herhangi bir tahkimat uygulamadan elde edilen deformasyon değerlerini belirtmektedir. 'Eşdeğer tahkimat' olarak adlandırılan şekil; RMR sisteminin önerdiği tahkimat basınçları uygulanarak elde edilen deformasyon değerlerini belirtmektedir. 'Gerekli tahkimat' olarak adlandırılan şekil; gerekli tahkimat basıncı uygulandıktan sonra elde edilen deformasyon değerlerini belirtmektedir.

6.1. Bilecik – İstanbul Karayolu (Osmangazi) Tüneli

6.1.1. Formasyon 1 - sahip olduğu RMR puanı 37

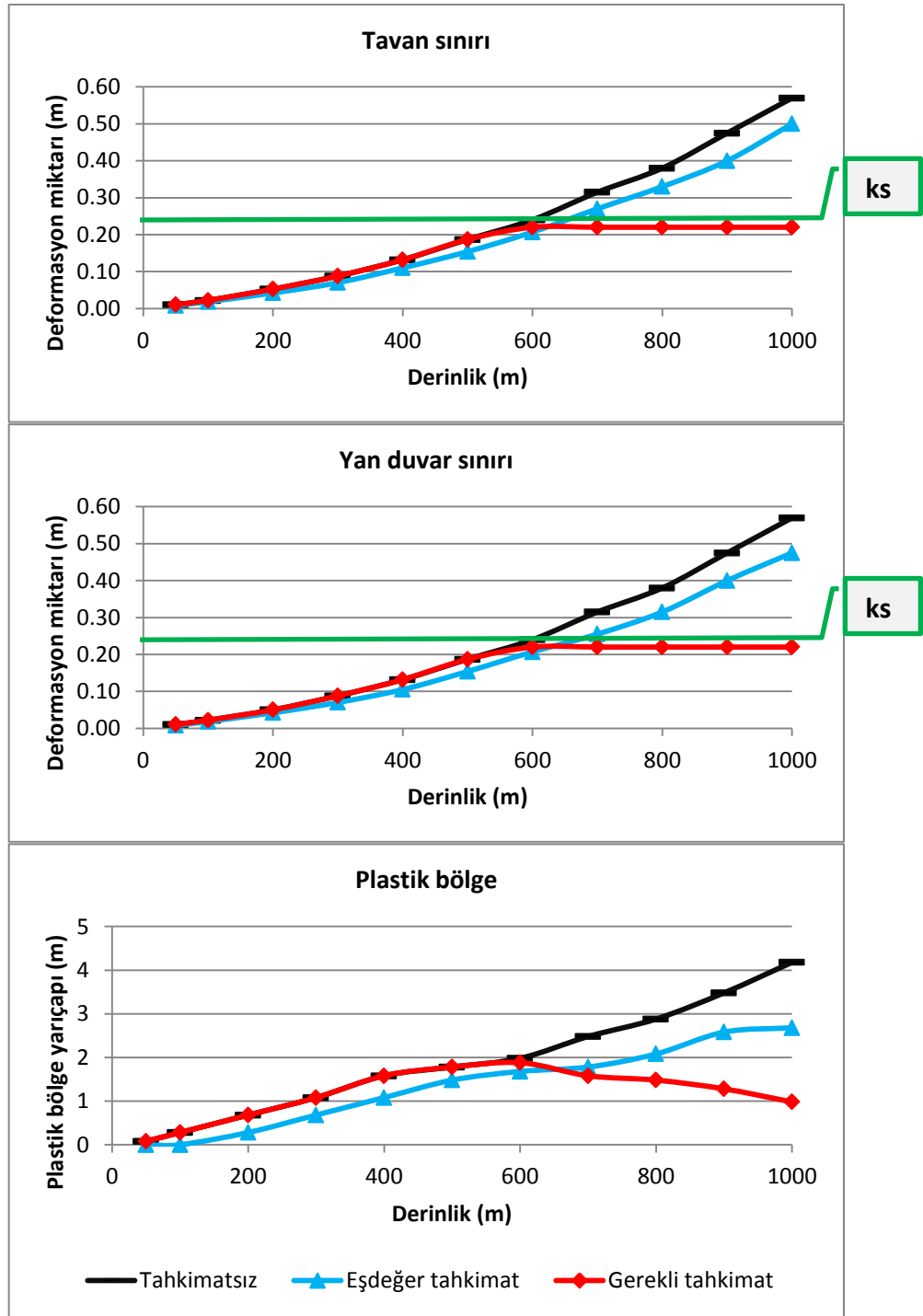
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.23 m



Şekil 6.1. Osmangazi tüneli 1. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.1.2. Formasyon 2 - sahip olduğu RMR puanı 50

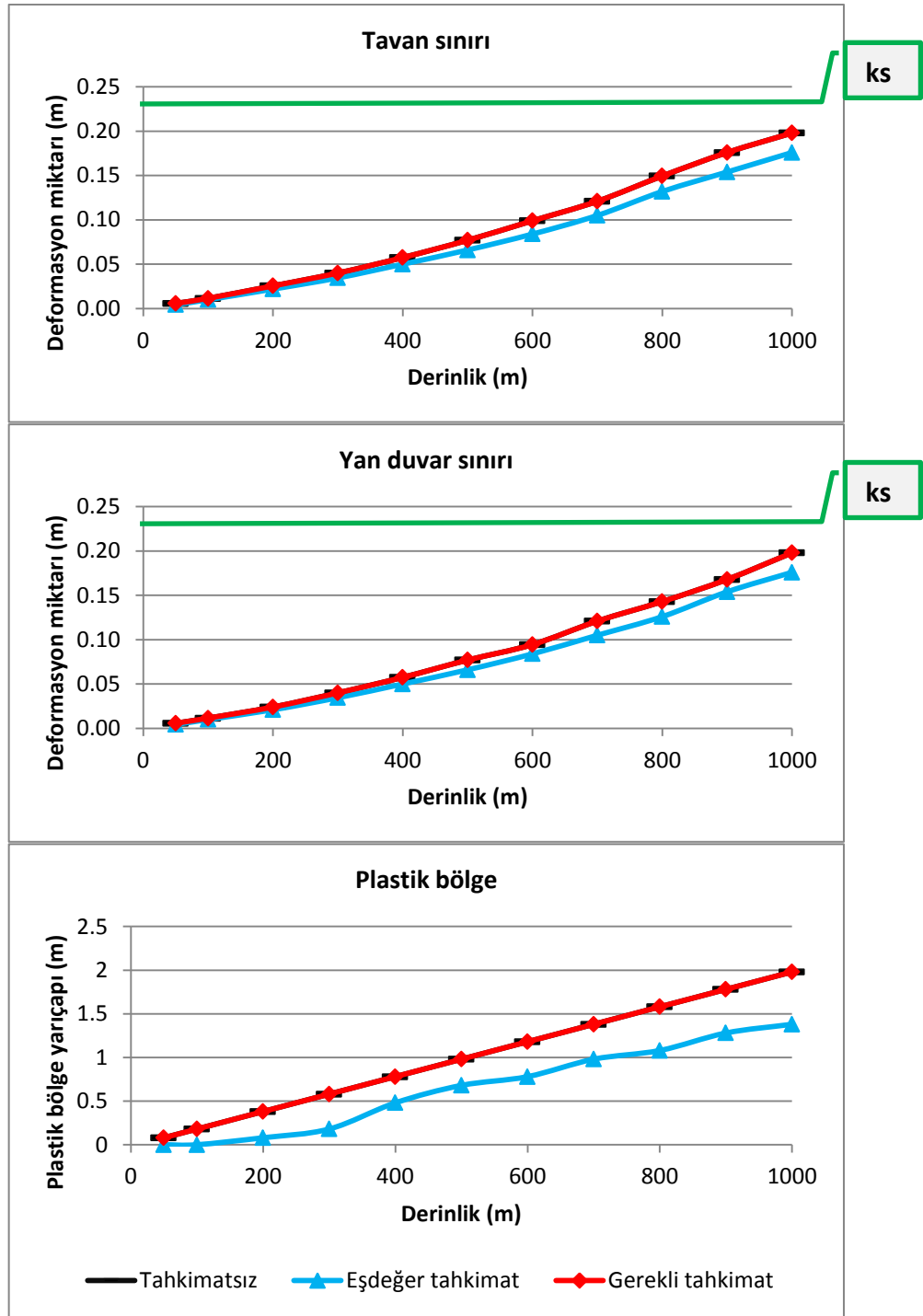
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.23 m



Şekil 6.2. Osmangazi tüneli 2. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.1.3. Formasyon 3 - sahip olduğu RMR puanı 55

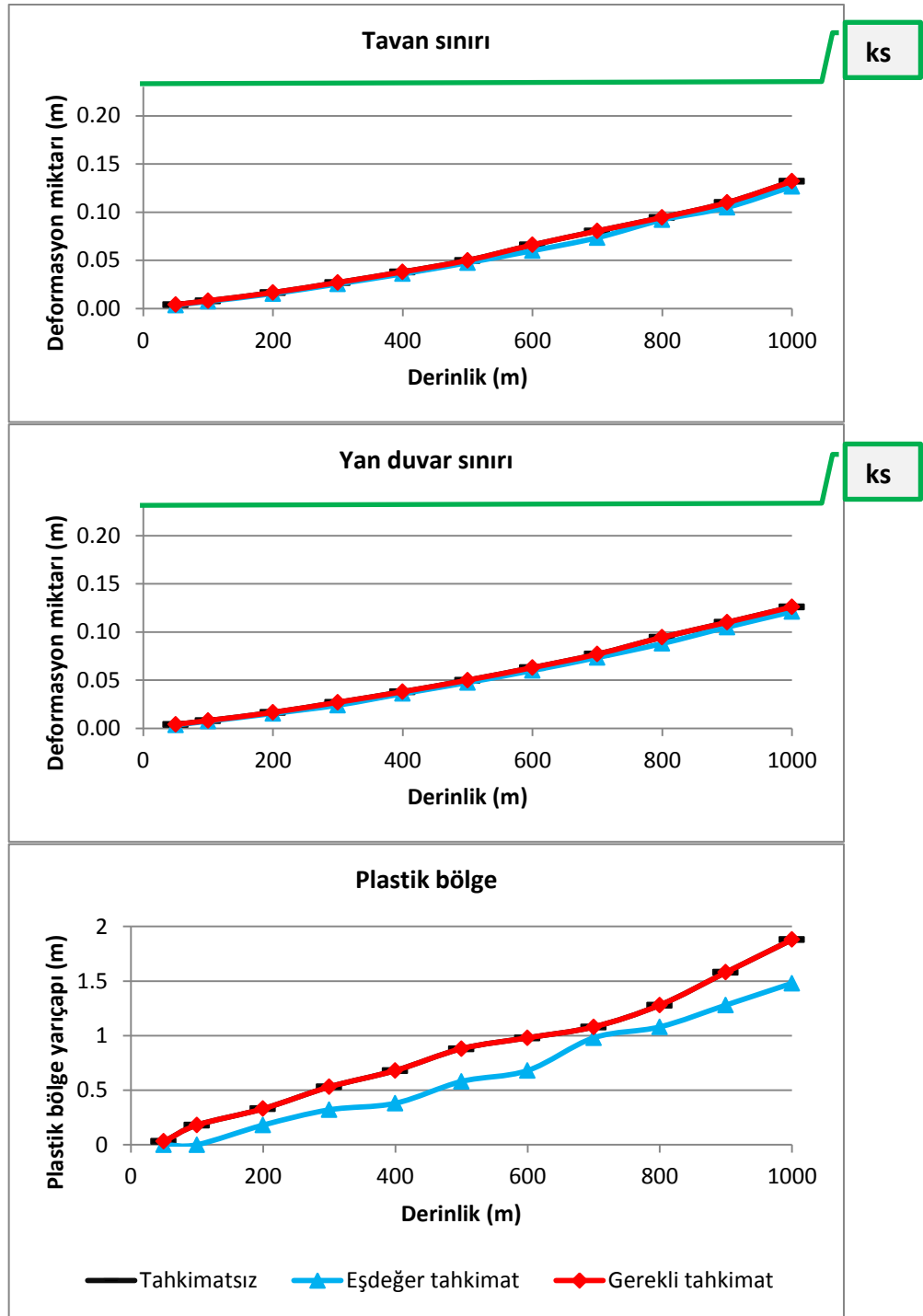
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.23 m



Şekil 6.3. Osmangazi tüneli 3. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.1.4. Formasyon 4 - sahip olduğu RMR puanı 63

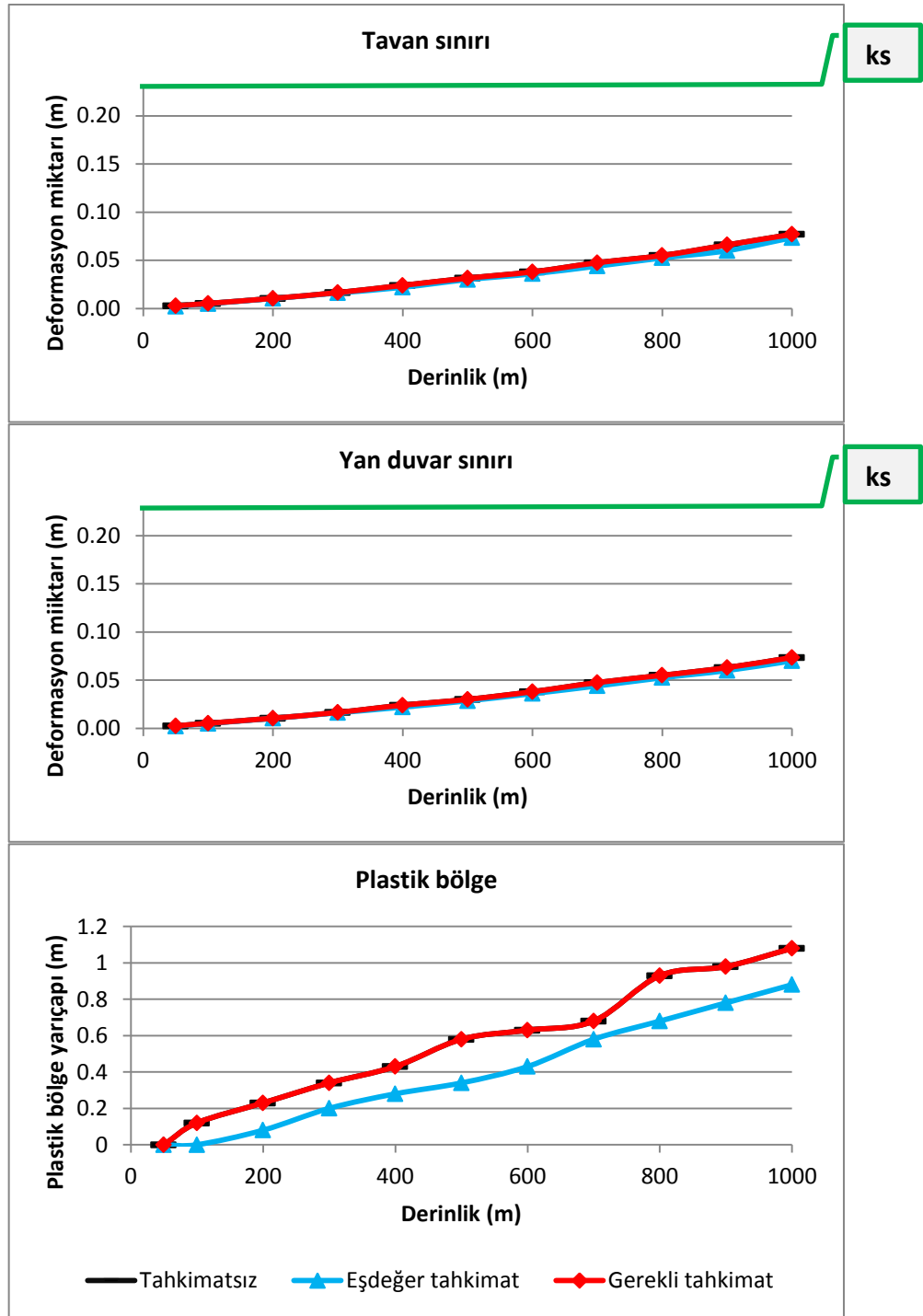
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.23 m



Şekil 6.4. Osmangazi tüneli 4. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.1.5. Formasyon 5 - sahip olduğu RMR puanı 66

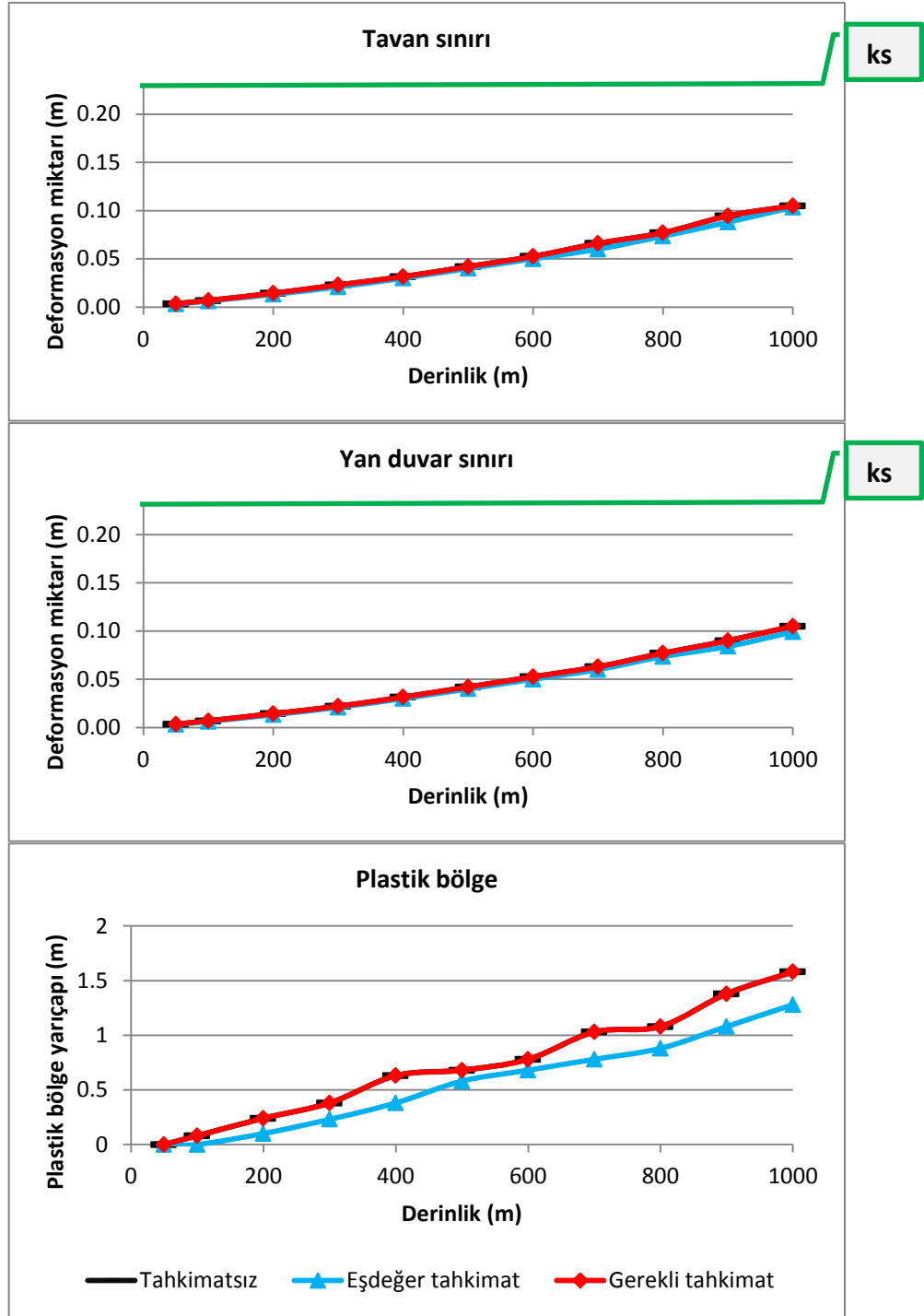
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.23 m



Şekil 6.5. Osmangazi tüneli 5. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.1.6. Formasyon 6 - sahip olduğu RMR puanı 63

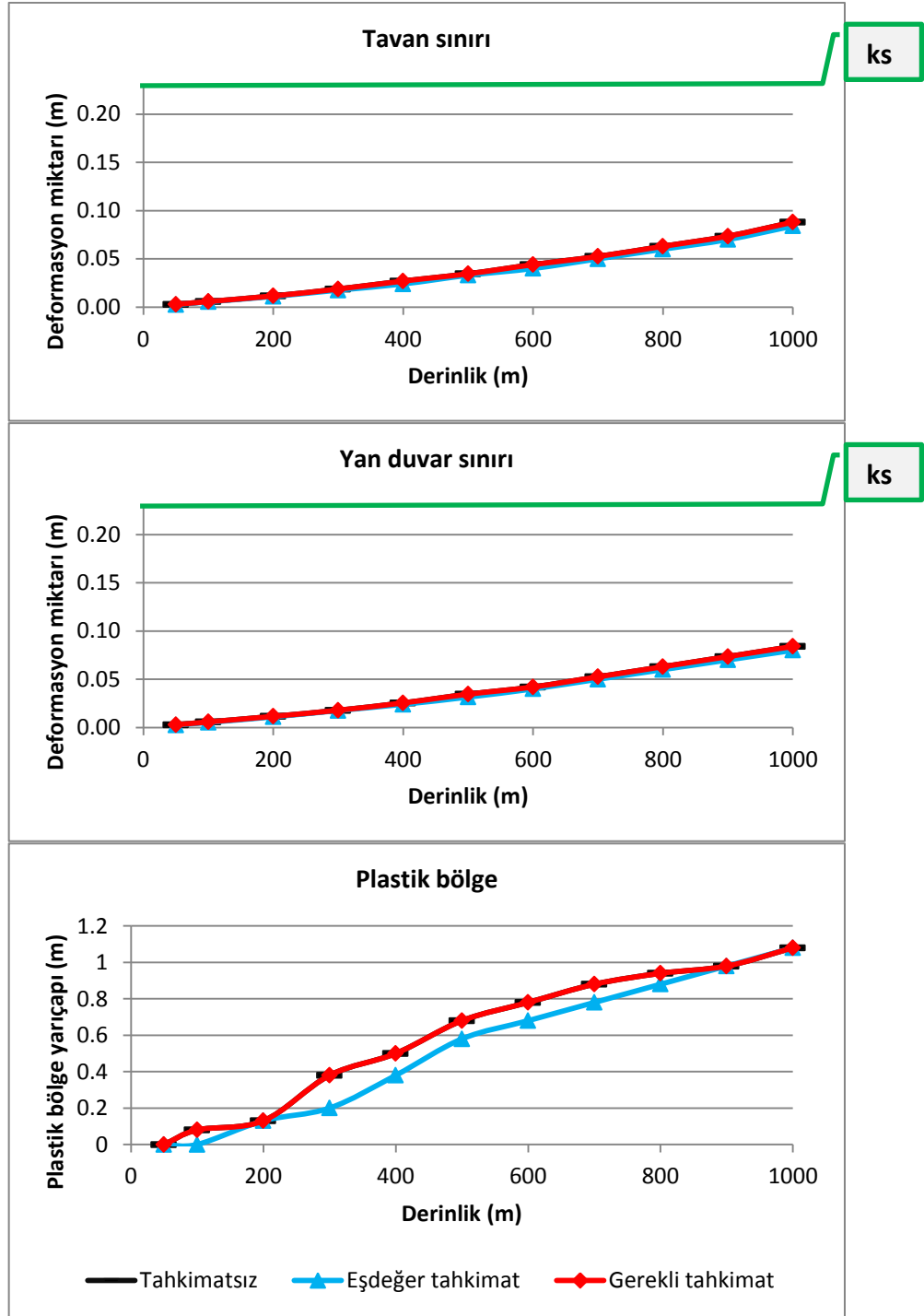
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.23 m



Şekil 6.6. Osmangazi tüneli 6. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.1.7. Formasyon 7 - sahip olduğu RMR puanı 65

Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.23 m

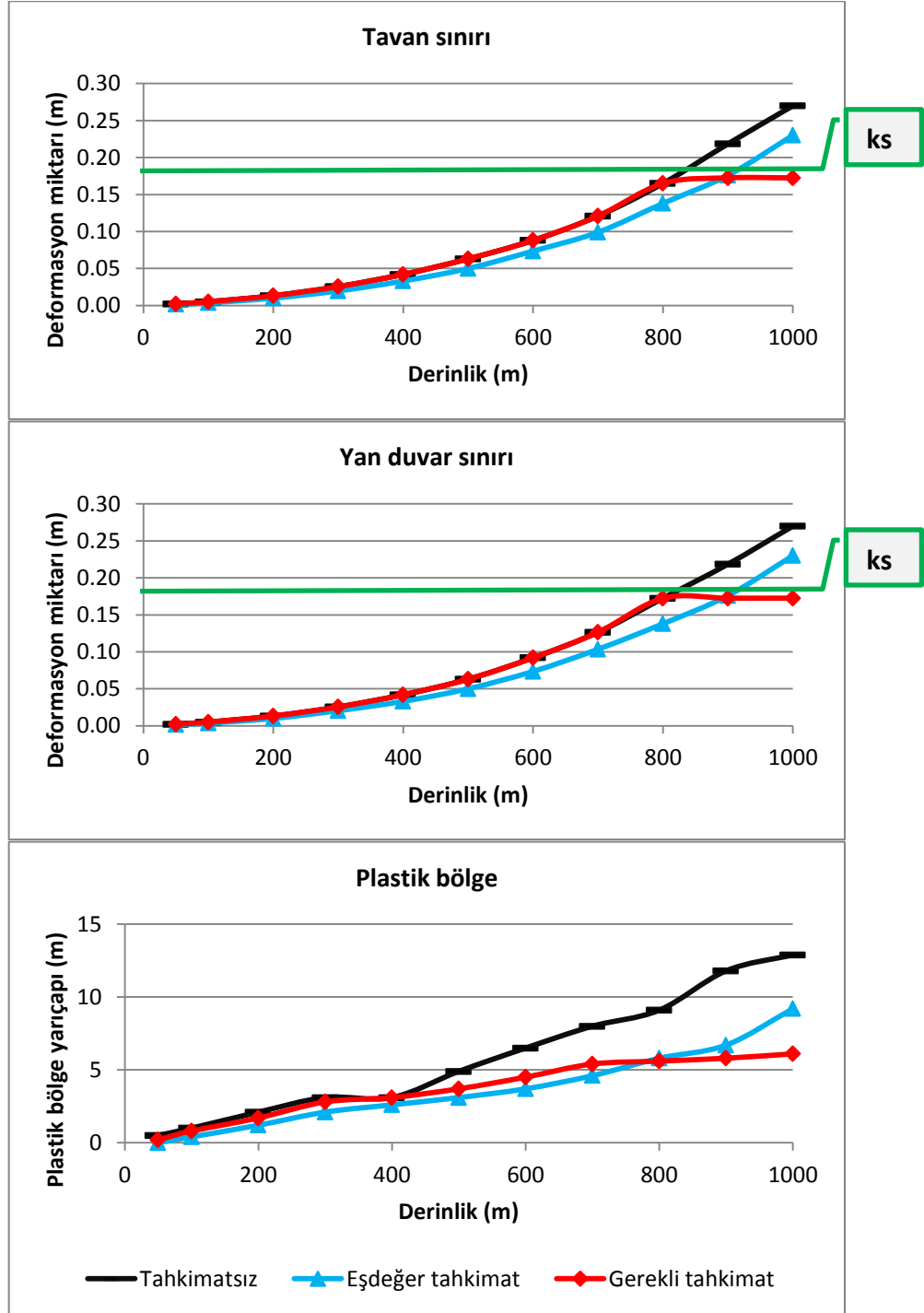


Şekil 6.7. Osmangazi tüneli 7. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.2. Mashhad - Kallat Karayolu (Kallat) Tüneli

6.2.1. Formasyon 1 - sahip olduğu RMR puanı 55

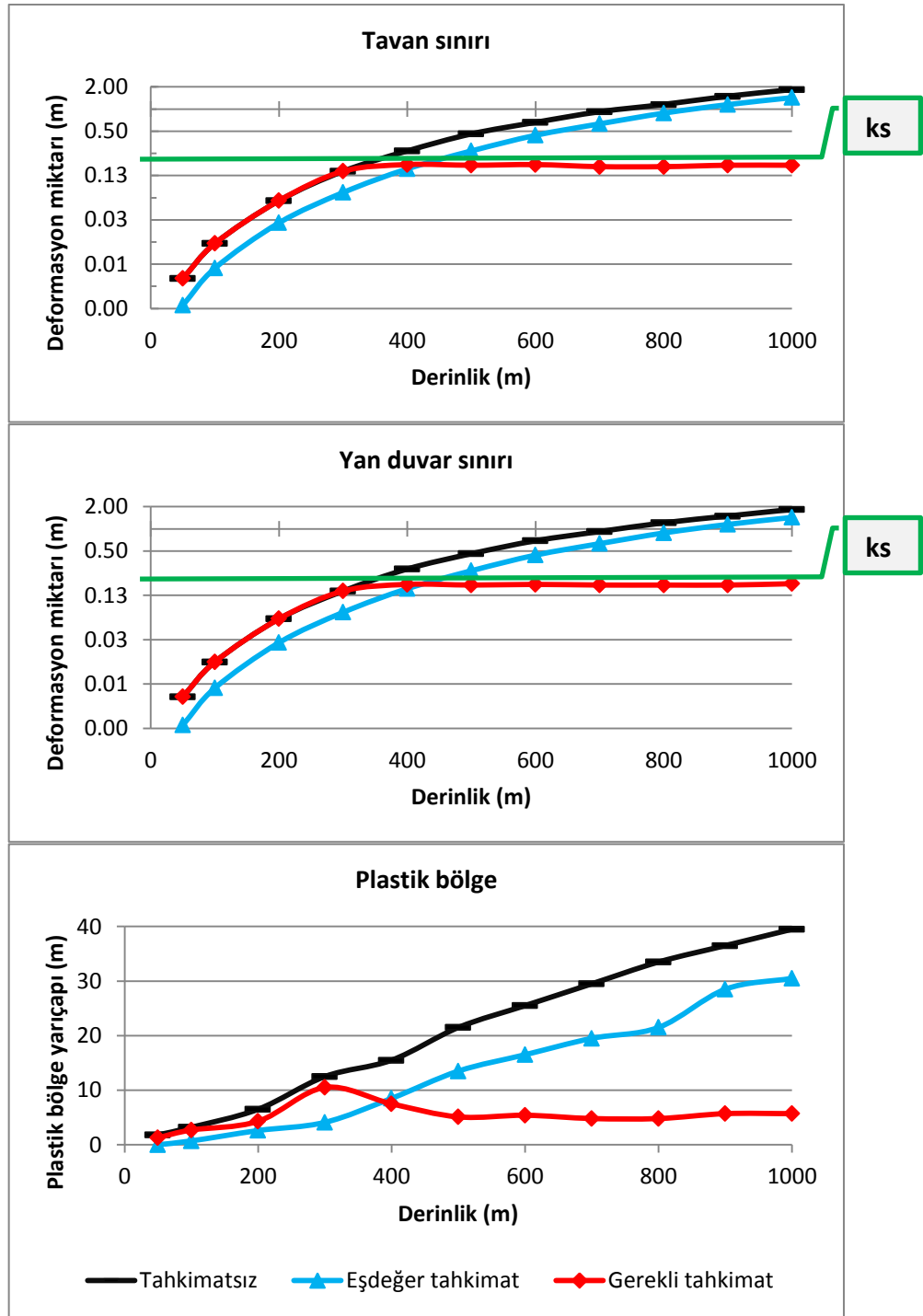
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.18 m



Şekil 6.8. Kallat tüneli 1. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.2.2. Formasyon 2 - sahip olduğu RMR puanı 46

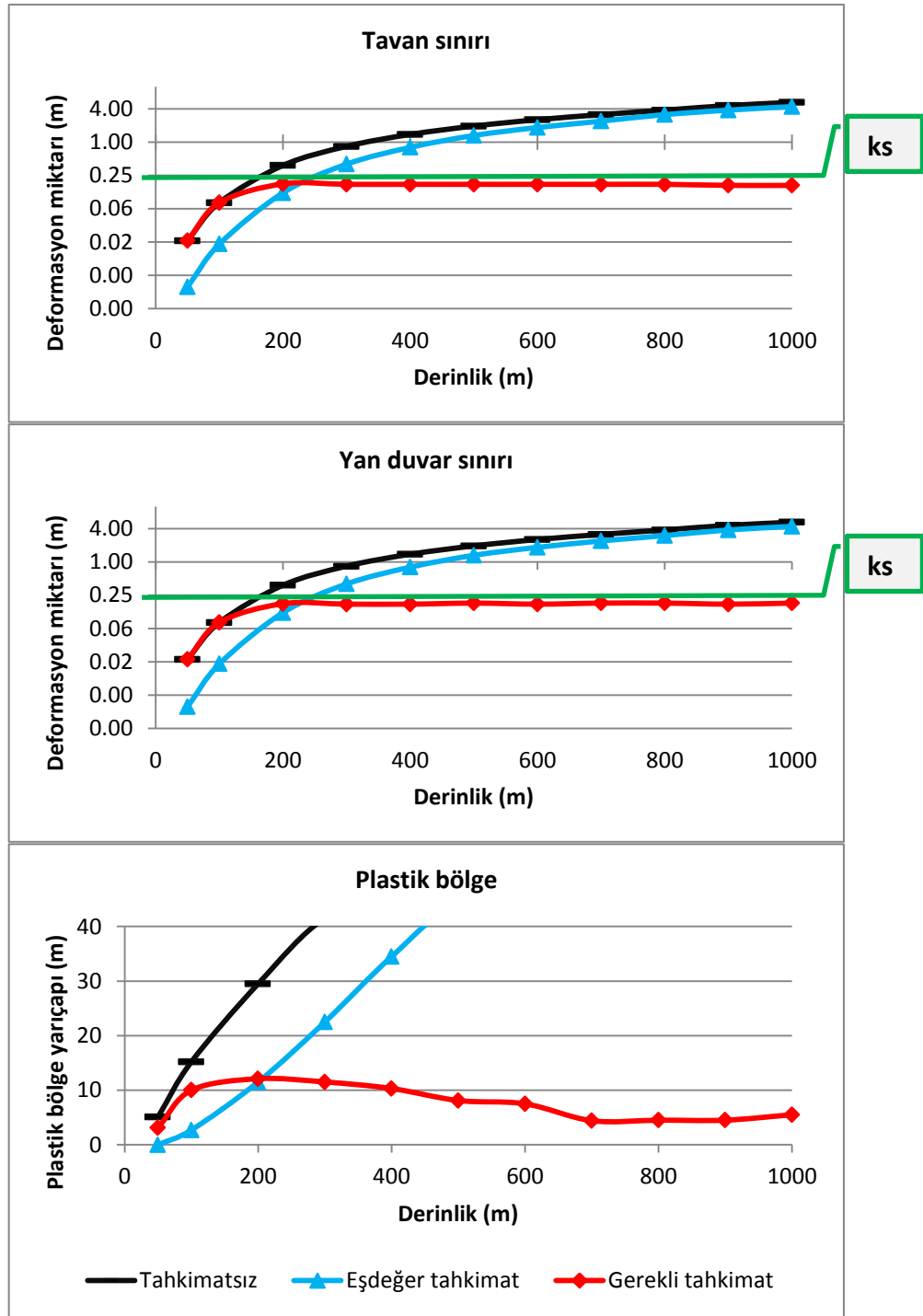
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.18 m



Şekil 6.9. Kallat tüneli 2. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.2.3. Formasyon 3 - sahip olduğu RMR puanı 40

Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.18 m

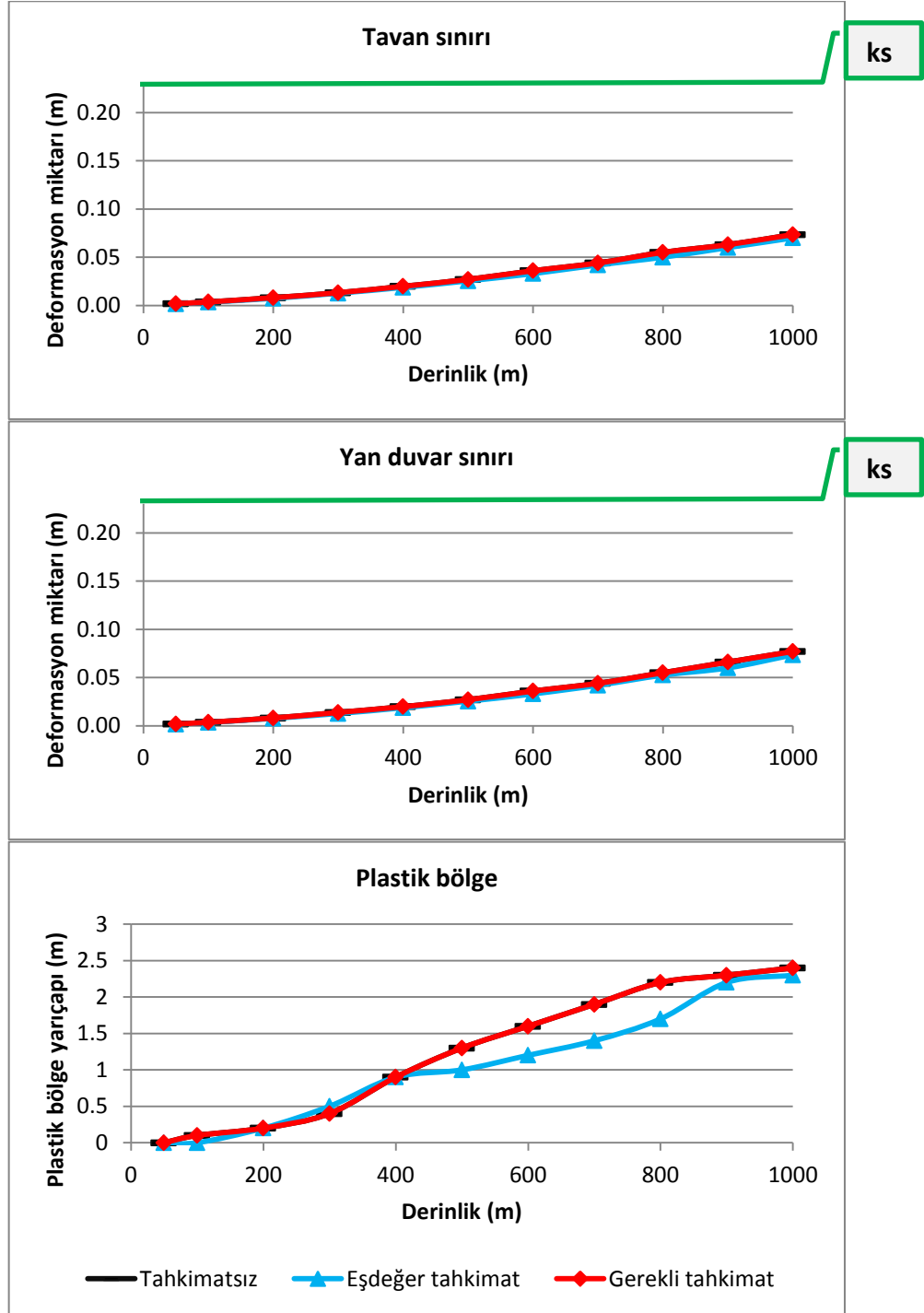


Şekil 6.10. Kallat tüneli 3. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.3. Kavak - Merzifon Karayolu (Şehzadeler) Tüneli

6.3.1. Formasyon 1 - sahip olduğu RMR puanı 58

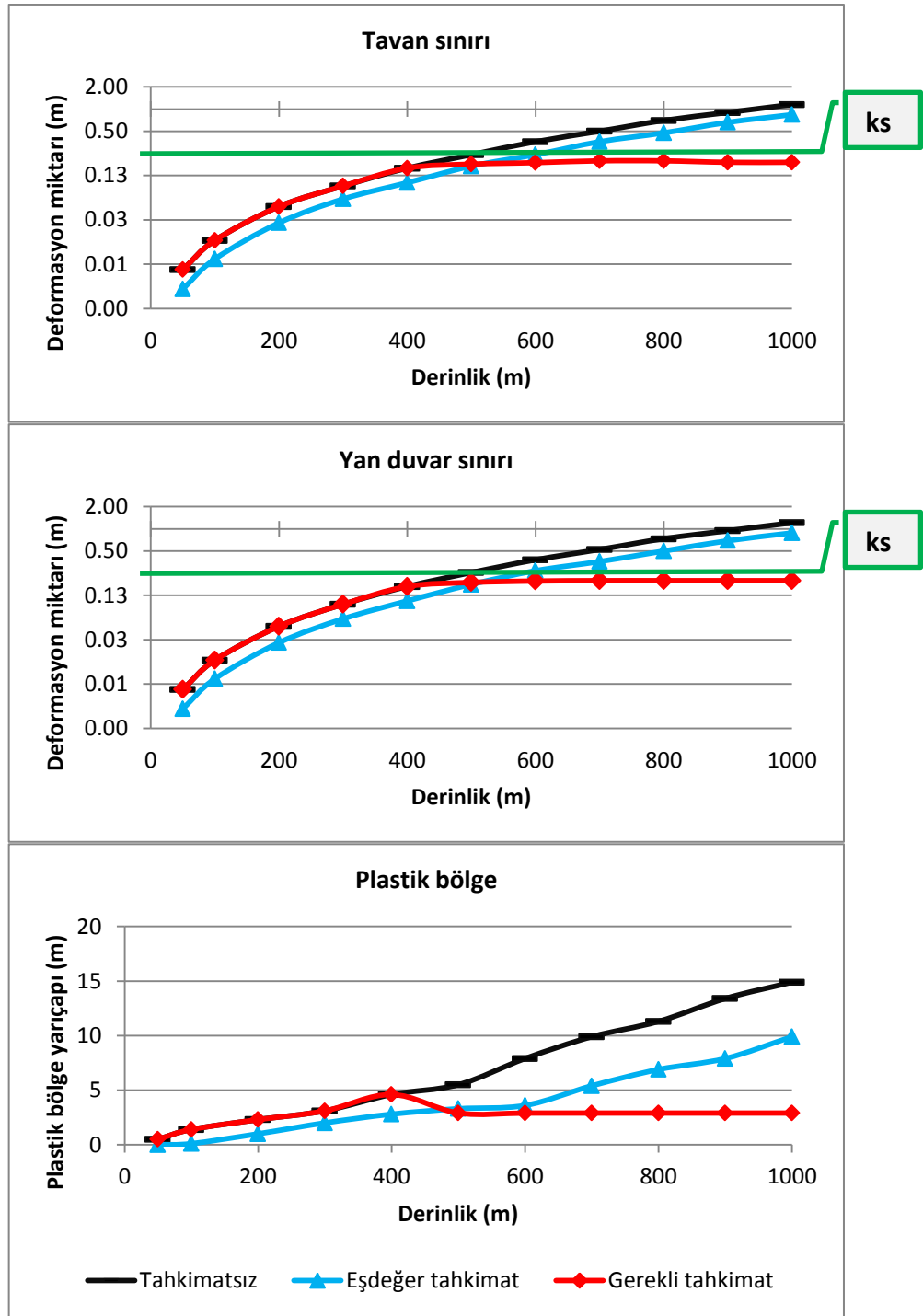
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.20 m



Şekil 6.11. Şehzadeler tüneli 1. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.3.2. Formasyon 2 - sahip olduğu RMR puanı 43

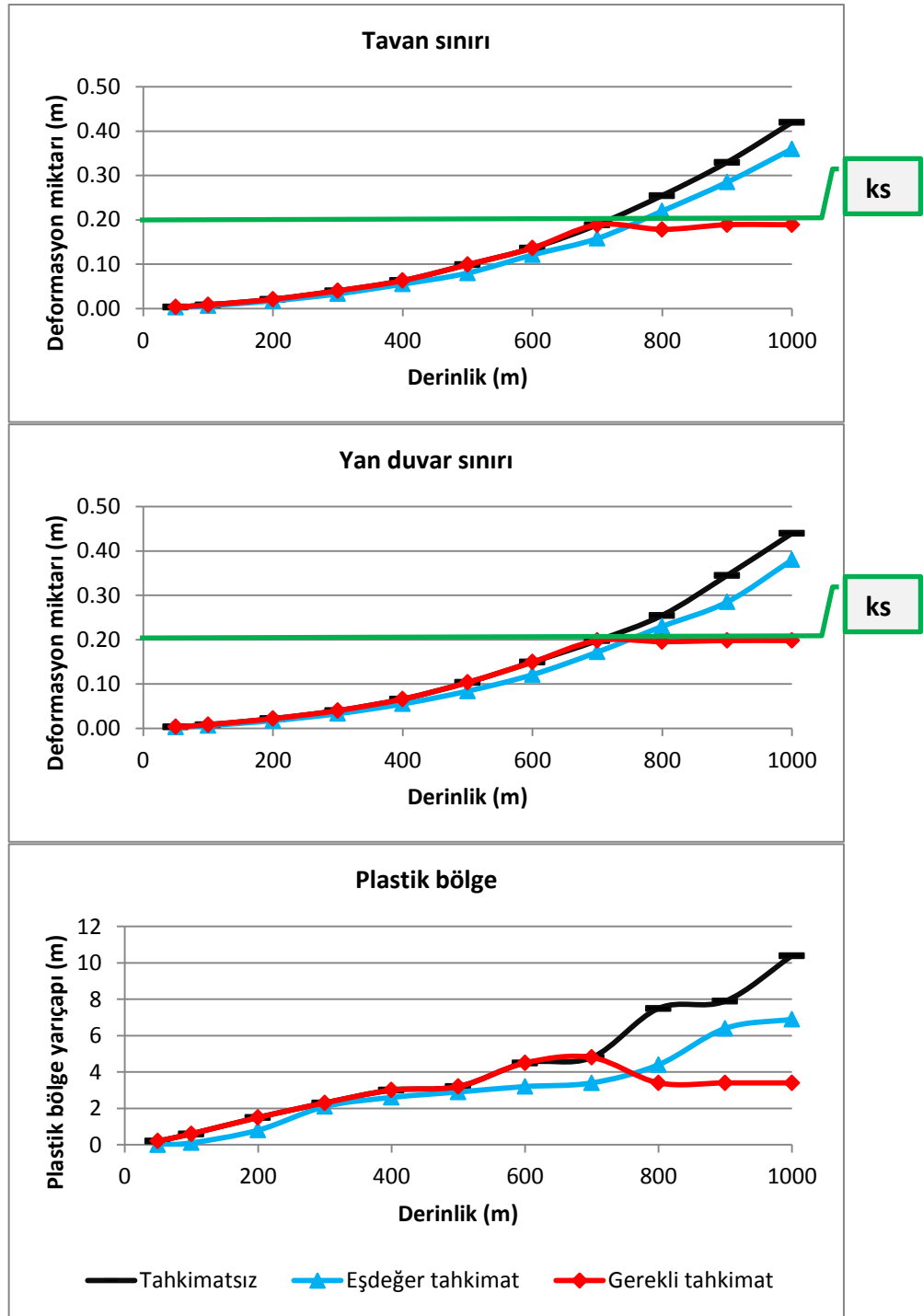
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.20 m



Şekil 6.12. Şehzadeler tüneli 2. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.3.3. Formasyon 3 - sahip olduğu RMR puanı 51

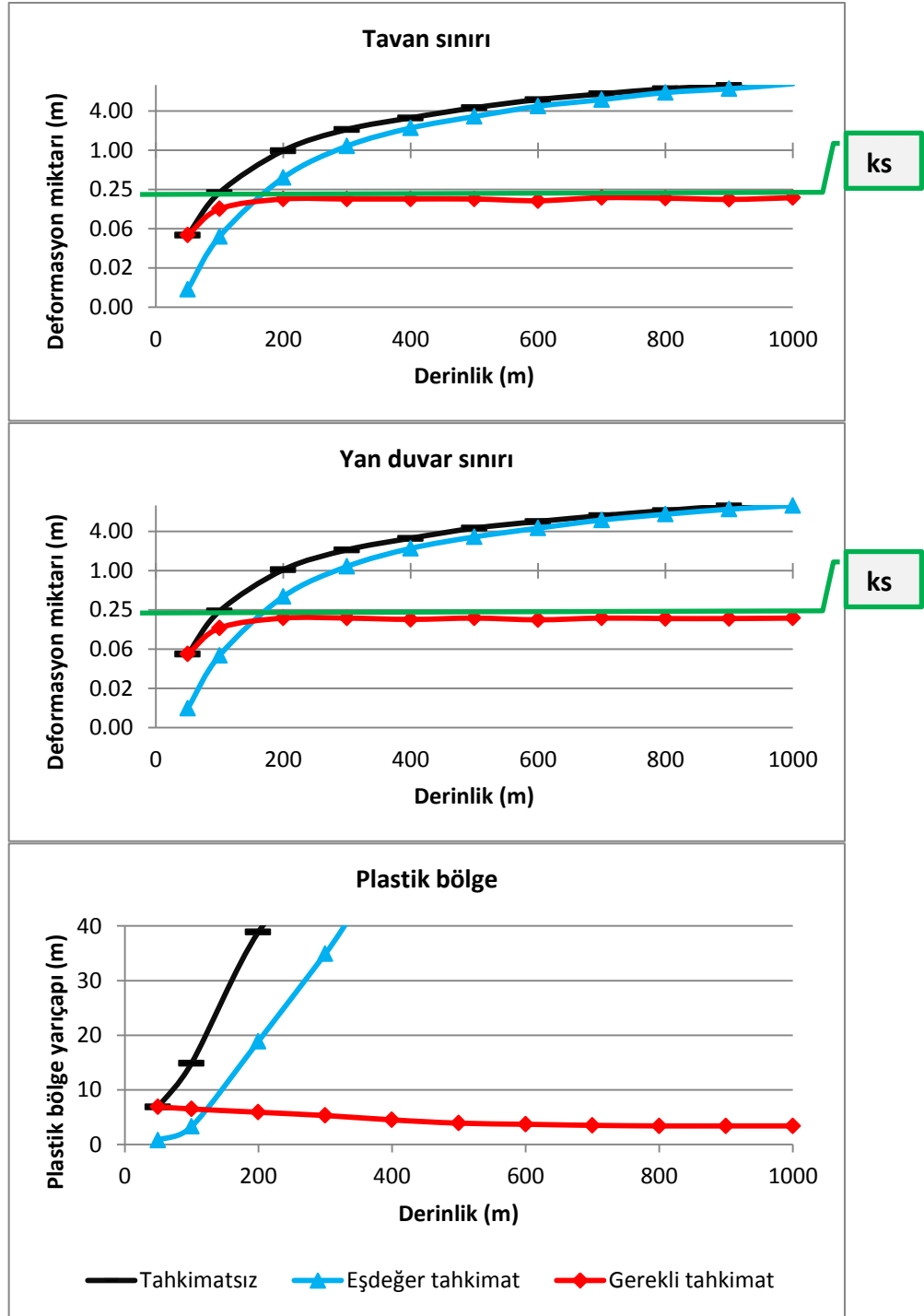
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.20 m



Şekil 6.13. Şehzadeler tüneli 3. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.3.4. Formasyon 4 - sahip olduğu RMR puanı 34

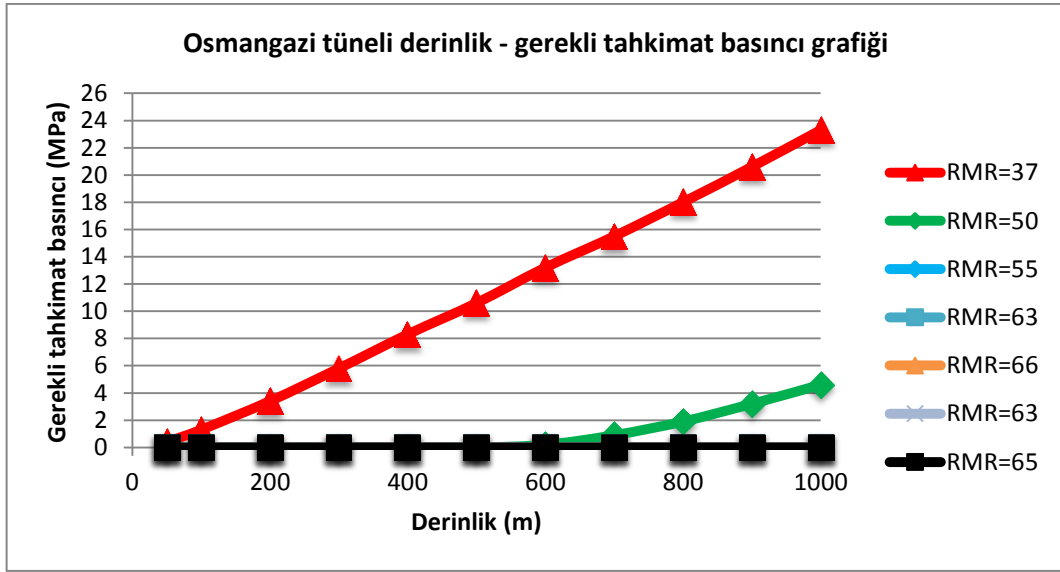
Maksimum %2'lik deformasyon sınırı (ks); 0.20 m



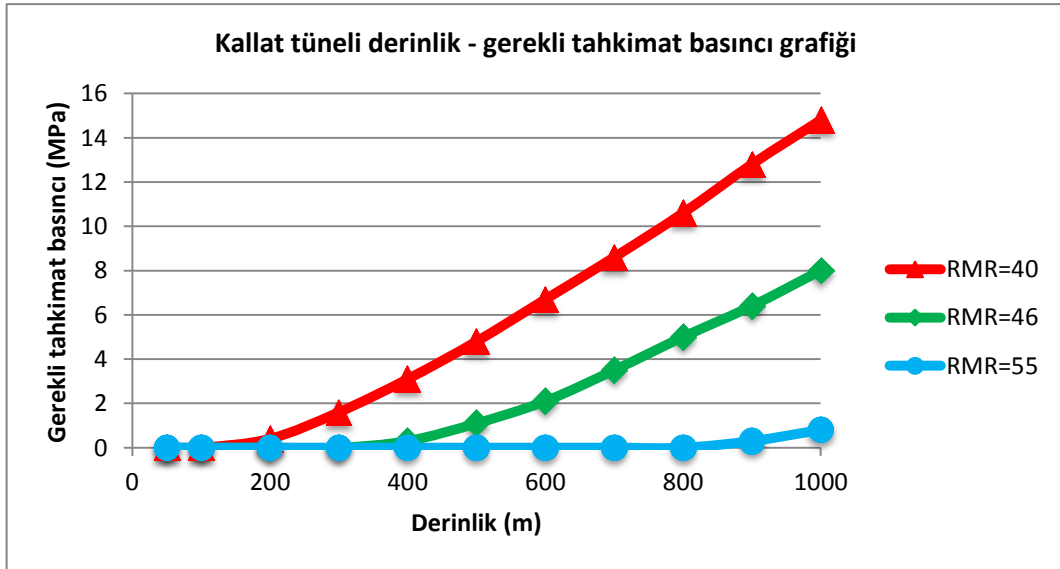
Şekil 6.14. Şehzadeler tüneli 4. formasyon; tavan, yan duvar ve plastik bölge

6.4. Gerekli Tahkimat Basıncı Sonuçları

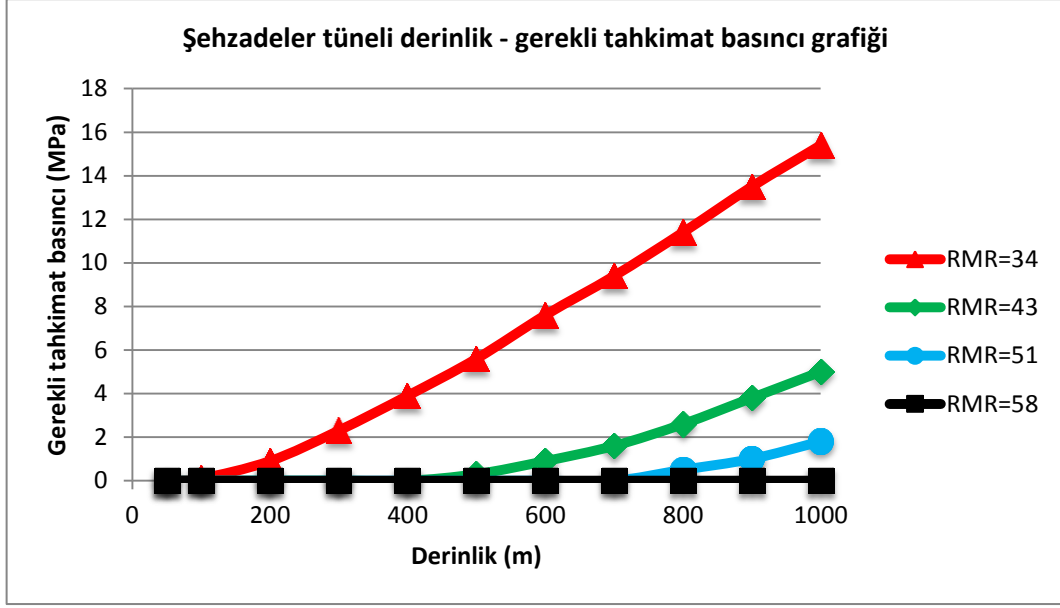
Derinliğe göre, deformasyon miktarını galeri çapının %2'sini geçmeyecek sınırd tutmak için uygulanması gerekli tahkimat basınçları aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 6.15, 6.16, 6.17). RMR puanı arttıkça gerekli tahkimat basıncı sıfıra (0) yaklaşmaktadır, bu sebepten Şekil 6.15'te görülmeyen RMR değerleri için gerekli tahkimat basınçları sıfırdır.



Şekil 6.15. Osmangazi tüneli, derinliklere göre uygulanması gereken tahkimat basıncı

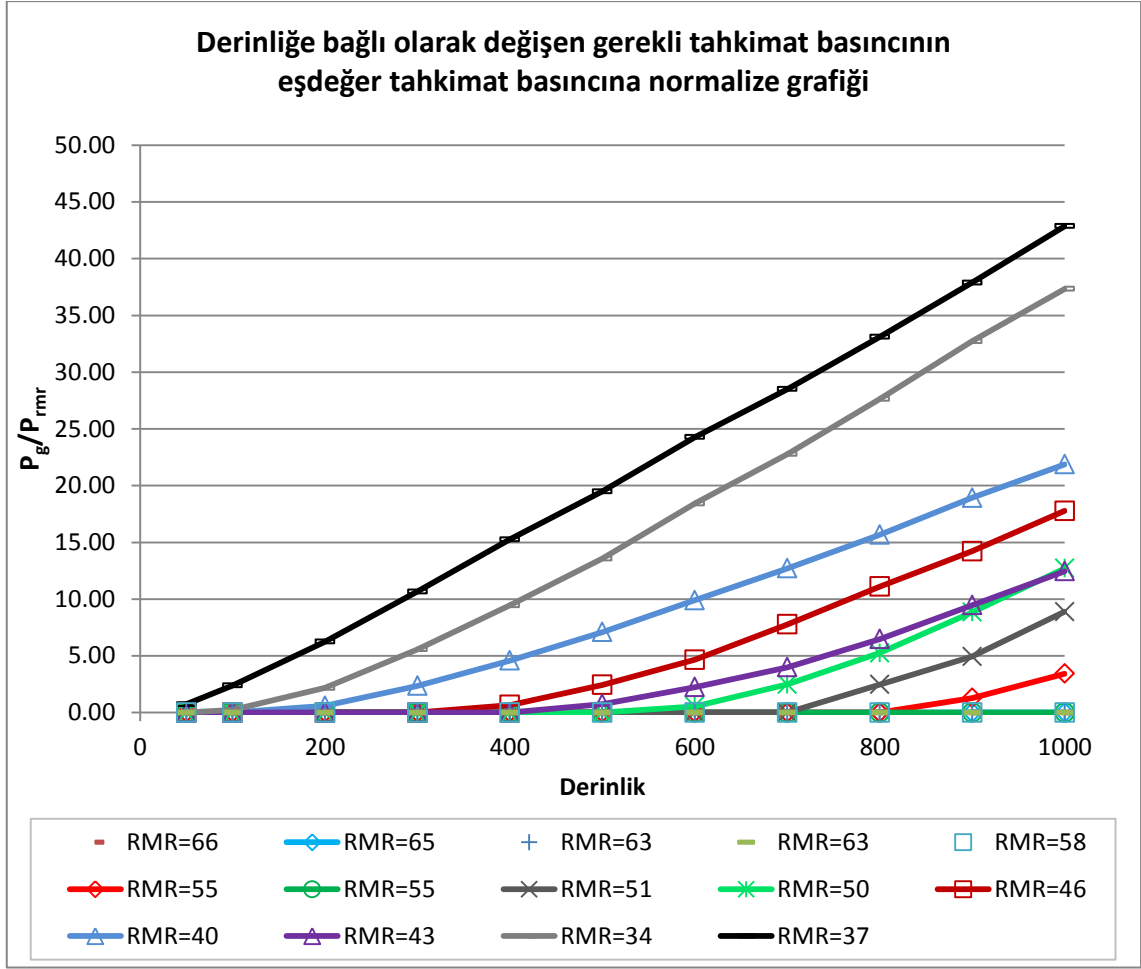


Şekil 6.16. Kallat tüneli, derinliklere göre uygulanması gereken tahkimat basıncı



Şekil 6.17. Şehzadeler tüneli, derinliklere göre uygulanması gereken tahkimat basıncı

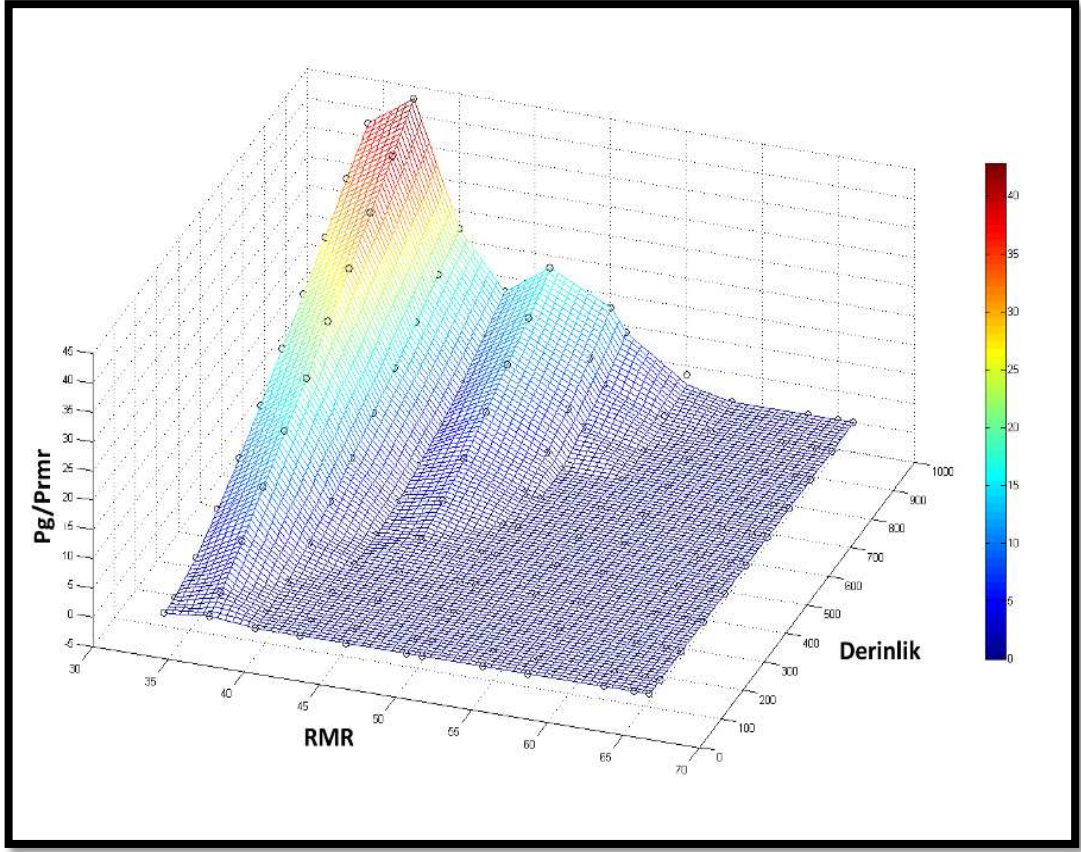
Bir yeraltı açıklığı için uygulanacak olan tahkimat seçiminde RMR puanı kadar, açıklık etrafındaki kaya kütlelerinin ve gerilme koşullarının da büyük önemi olduğu üstteki grafiklerden görülmektedir. Açılan galerinin duraylı bir şekilde kalması isteniyorsa uygulanacak olan tahkimatında o galerinin açıldığı derinliğe bağlı olarak değişmesi gerekmektedir. Bu değişim için bulunan gerekli tahkimat basınçlarını (P_g), RMR sisteminin önerdiği eşdeğer tahkimat basınçlarına (P_{rmr}) göre normalize edilerek Şekil 6.18'de sunulan grafik elde edilmiştir.



Şekil 6.18. Derinliğe bağlı olarak değişen gerekli tahkimat basıncının RMR sisteminin önerdiği eşdeğer tahkimat basıncına normalize grafiği

6.5. Elde Edilen Verilerin Çoklu Regresyon Modellemesi

Yapılan çalışmada elde edilen gerekli tahkimat basınçlarının (P_g), RMR sisteminin önerdiği tahkimat basınçlarına (P_{rmr}) oranı ile derinlik ve RMR puanı arasındaki ilişki Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekil 6.19'da görülen verileri daha verimli ve pratik bir şekilde sunmak için çoklu regresyon modellemesi yapılmıştır. Modellemenin içeriği ilerleyen kısımlarda sunulmuştur.



Şekil 6.19. P_g/P_{rmr} ile RMR ve derinlik arasındaki ilişki

6.5.1. Regresyon Modeli Oluşturulması

Yapılan çalışmada kullanılan RMR puanları, derinlik değerleri ve P_g/P_{rmr} değerleri arasındaki ilişkilerin daha kolay ve anlaşılır bir şekilde belirlenmesi için çoklu regresyon modellemesi kullanılmıştır. Modellerdeki bağımlı parametre gerekli tahkimat basıncının, RMR sisteminin önerdiği tahkimat basıncına oranı (P_g/P_{rmr}) olarak seçilirken bağımsız parametreler ise RMR puanı ve derinlik değerleri olarak seçilmiştir.

6.5.2. Regresyon Modeli Geçerlilikleri

Oluşturulan regresyon modeline ait bilgiler Çizelge 6.2'de verilmiştir. Ayarlanmış çoklu belirleme sabiti değerleri (R^2) çizelgeden de görülebileceği gibi %88.27'dir. Bu yüksek değerlerden de anlaşılacağı üzere, önerilen modelin seçilen parametreler arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde kurduğu belirtmektedir.

Çizelge 6.2. Regresyon modeli ve ayarlanmış R^2 değeri

Model	Ayarlanmış R^2
$P_g/P_{rmr}=a*b^{RMR}*Derinlik^c$	88,27

Regresyon eşitlik sabitleri;

$$a = 0.065928541$$

$$b = 0.889308216$$

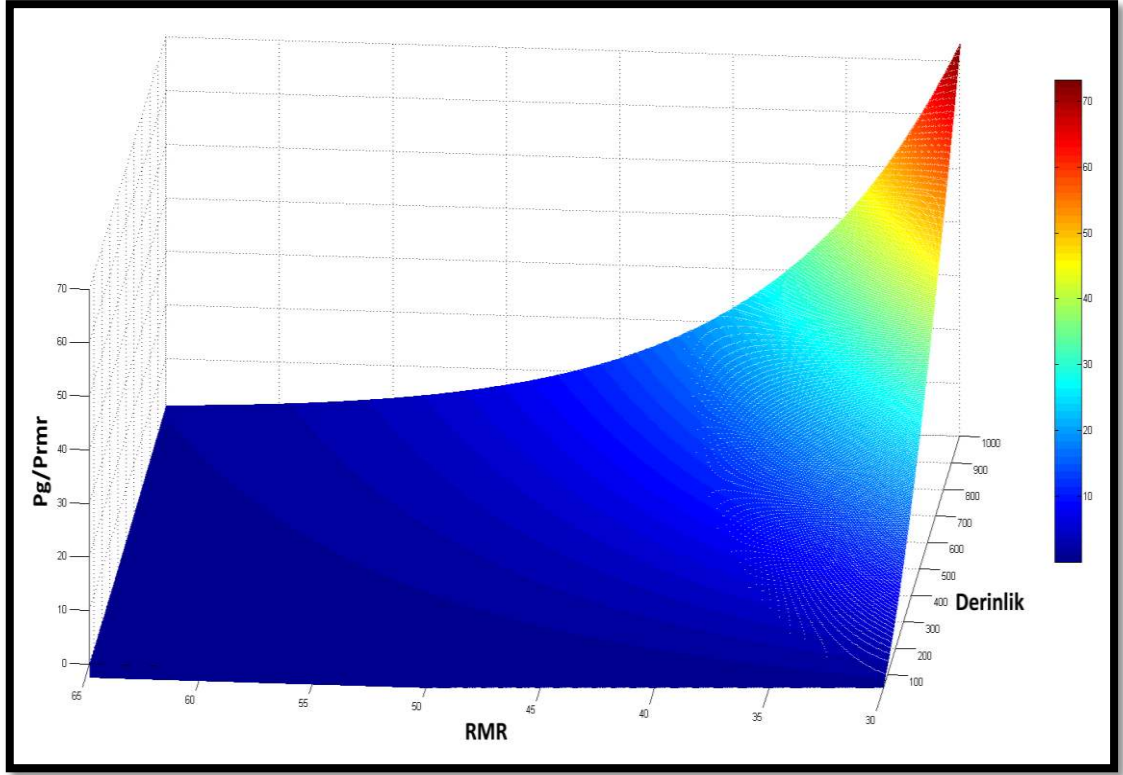
$$c = 1.524772081$$

Modelin genel geçerliliklerinin ise F testi ile ispatlanması gereklidir [40]. ANOVA tablosu ve hesaplanan F değeri Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelge 6.3'te görüldüğü gibi F testi çok düşük olasılık değeri (Prob(F)) vermektedir. Buda göstermektedir ki önerilen modeller geçerlidir.

Çizelge 6.3. ANOVA tablosu ve hesaplanan F değeri

Kaynak	DF	Kareler toplamı	Ortalama kare	F oranı	Prob(f)
Regresyon	2	9902.356	4951.178	568.1364359	0.00
Hata	151	1315.930	8.7152		
Toplam	153	11218.286			

Şekil 6.20'de regresyon modellemesi sonucu elde edilen, gerekli tahkimat basınçları (P_g) ile RMR sisteminin önerdiği tahkimat basınçları (P_{rmr}) oranının, derinlik ve RMR puanlarına bağlı olarak üç boyutlu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.20. Regresyon sonucunda elde edilen Pg/Prmr ile RMR ve derinlik arasındaki ilişki

Önerilen regresyon eşitliğinin geçerlilik ve performansı istatistiksel testlerle kontrol edilmiştir, bu regresyon eşitliği kullanılarak çok farklı kaya ve gerilme koşulları için cevap yüzeyleri oluşturulabilir. Bu yüzey veya eşitlik kullanılarak tasarımın ilk aşamalarında faydalı olabilecek olan galeri tahkimat basınçları farklı gerilme ve kaya koşulları için tahmin edilebilecektir.

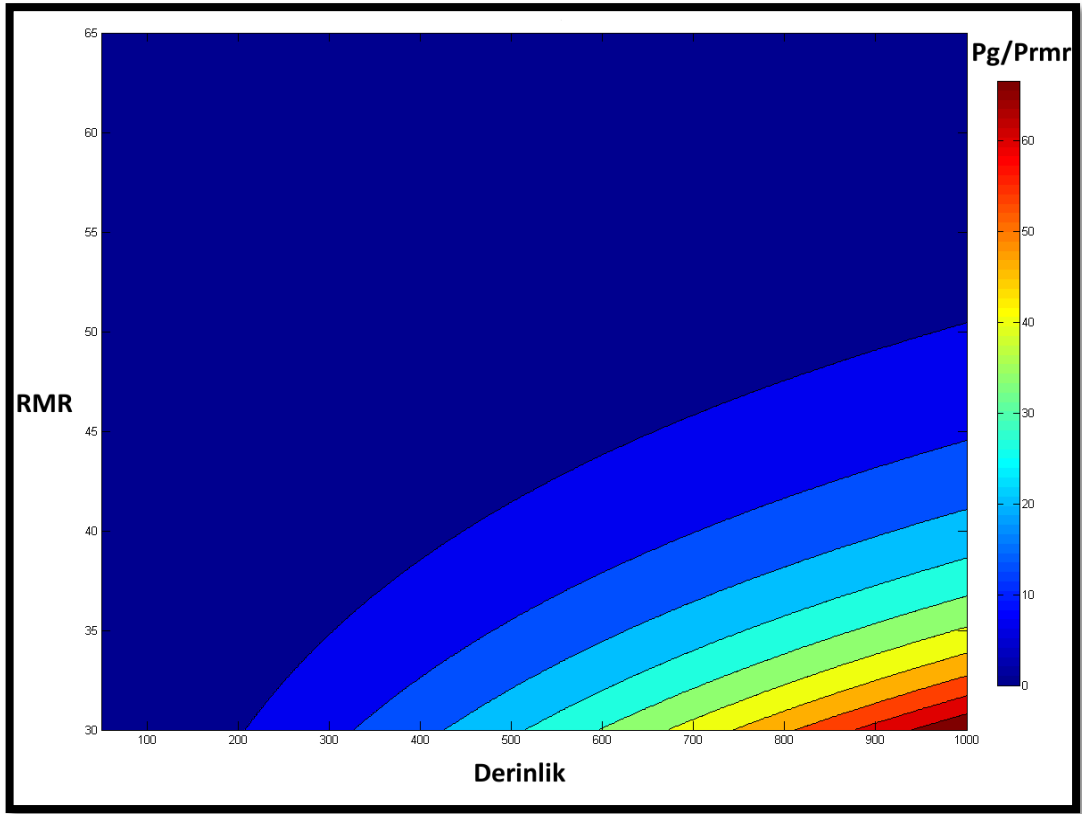
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında tahkimat tasarımı ve kaya kütle kalitesi belirlenmesinde günümüzde yaygın olarak kullanılan deneysel sistemlerden birisi olan RMR sistemi gözden geçirilmiş ve sistemde bulunan eksikliklerden gerilme koşullarına bağlı tahkimat önerisinin düzeltilmesine yönelik analizler yapılmıştır. Kaya kütlesi sınıflandırılmasında RMR ve GSI sistemlerinden yararlanılmıştır. RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanları analitik yöntem yardımıyla eşdeğer tahkimat basıncına (MPa) dönüştürülmüştür. Hesaplamalarda sonlu elemanlar tabanlı hesaplama yapan Phase² yazılımı kullanılmıştır. Farklı kalite ve gerilme koşulunda açılacak bir yeraltı galerisi için uygulanması gereken tahkimat basınçları RMR'a bağlı olarak bulunmuştur. Bu değerler RMR sisteminin önerdiği tahkimat basınçlarına oranlanıp derinlik ve RMR puanına bağlı olarak çoklu regresyonla modellenmesi yapılmıştır. Elde edilen bu regresyon değerlerinin grafiksel gösterimi kontur haritası olarak Şekil 7.1'de verilmiştir.

Şekilde gösterilen yüzeyler pratik bir tasarım aracı olarak projelerin ilk aşamalarında kullanılabilirler. Bu şekil yardımıyla derinlik değerleri ve RMR puanı bilindiği takdirde P_g/P_{rmr} yaklaşık tahmin edilebilir, dolayısıyla tahkimat elemanları öngörülebilir.

Bu çalışmada bazı sınırlama ve kabuller mevcuttur. Kaya kütlesinin elastik mükemmel plastik malzeme özellikleri taşıdığı varsayılmaktadır. Örneğin kaya kütlesi belirli yönelimde etkin bir süreksizlik içeriyorsa, mekanik davranışın anizotropik olması beklenir ve bu gibi durumlarda Hoek-Brown yenilme kriterinin kullanılmaması gerekir. Bu gibi durumlarda elasto-plastik malzeme davranışı ve anizotropik modelleme kullanılmalı veya süreksizlik esaslı modelleme teknikleri kullanılmalıdır.

Kaya kütle özellikleri, derinlik ve gerilme koşulları inşaat ve maden mühendisliği amaçlı açıklıklarda sıklıkla değişen parametreler olduğundan bu çalışmada önerilen eşitlik ve yüzeyler özellikle sınırlı verinin elde edilebildiği projenin tahkimat tasarımı önerilerinde erken safhalarında kullanılabilirler. Bu kullanım sırasında çalışmada kullanılan varsayım ve sınırlamalara dikkat edilmelidir.



Şekil 7.1. Regresyon sonucunda elde edilen P_g/P_{rmr} ile RMR ve derinlik arasındaki ilişki

KAYNAKLAR

- [1] R. Ulusay ve H. Sönmez, “*Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*” TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınlarını, No. 60, Güncellenmiş 2. Baskı, Ankara, 2007, s. 1 – 225.
- [2] C. Carranza-Torres ve C. Fairhurst, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 2, Minneapolis, 2000, p. 187 – 213.
- [3] S. Yazıcı ve E. Nasuf, *Arazi Kontrolunda Sayısal Modelleme*, Madencilik, Cilt. 32, Sayı. 3 – 4, Ankara, 1993, s. 1 – 14.
- [4] H. Köse, *Finite Element Yönteminin Kaya Mekaniği Dalındaki Problemlerin Çözümünde Kullanılışı*, Madencilik, Cilt. 19, Sayı. 3, Ankara, 1980, s. 26 – 34.
- [5] E. Ak, “*Tünel Tasarımında Sonlu Eleman Metodu ile Gerilme ve Deformasyon Analizleri*” Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Türkiye, 2005.
- [6] F.H. Kulhawy, *Finite Element Modelling Criteria for Underground Openings in Rock*, Int. J. Rock mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 11, No. 12, New York, 1974, p. 465 – 472.
- [7] A. Bilgin, *Sonlu Eleman Yöntemi ve Madencilğe Uygulama Olanakları*, Türkiye Bilimsel ve Teknik 5. Kongresi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 1977, s. 24.
- [8] M. Doktan, *Galeri Yan Duvarlarında Mevcut Yumuşak Tabakaların Galeride Duraylılığına Etkisi Üzerine Bir Sonlu Elemanlar Analizi*, Madencilik, Cilt. 30, Sayı. 1, Ankara, 1991, s. 21 – 25.
- [9] I.S. Sokolnikoff, “*Mathematical Theory of Elasticity*”, Mc-Graw Hill Book Company, 1956, p. 475.
- [10] H. Başarır, M. Geniş, A. Özarslan, *The analysis of radial displacements occurring near the face of a circular opening in weak rock mass*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 47, 2010, p. 771 – 783.
- [11] P.A. Cundall, “*Distinct Element Models of Rock and Soil Structure*”. Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics edited by E.T. Brown, Allen and Unwin, London, ISBN 0-04-620020-7, 1987, p. 129-163
- [12] M. Ghafoori, G. R. Lashkaripour, H. Sadeghi, S. Tarigh Azali, *Comparison of Predicted and Actual Behaviour and Engineering Geological Characterization of the Kallat Tunnel, Iran*, The Geological Society of London, Paper number 809, 2006, p. 1 – 8.

- [13] Z.T. Bieniawski, *“Engineering Rock Mass Classifications”*, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-60172-1, New York. 1989, p. 1 – 205.
- [14] Z.T. Bieniawski, *Rock Mass Classification as a Design Aid in Tunnelling*, Tunnels and Tunneling International, 1988, p. 19 – 22.
- [15] ISRM (International Society for Rock Mechanics), *Rock characterization, Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods*, Pergamon Press, Oxford, E.T. Brown, 1981.
- [16] Z.T. Bieniawski, *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*, Trans. S. African Instn. Civ. Engrs., Vol. 15, No. 12, 1973, p. 335 – 344.
- [17] D. U. Deere, R. P. Miller, *Engineering Classification and Index Properties of Intract Rock*, Air Force Laboratory Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Albuquerque, 1966.
- [18] D. U. Deere, *Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 1964, p. 17 – 22.
- [19] H. Başarır ve M. Karakuş, *“Kaya Mühendisliği – Evert Hoek”* TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, ISBN. 9944-89-149-5, Ankara, 2006, p. 1 – 304.
- [20] J. A. Hudson, *Rock Mechanics Principles in Rock Engineering Practice*, Butterworths, 1989, p. 72.
- [21] Z.T. Bieniawski, *Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunnelling*, Proceedings of the 3rd Congress of International Society for Rock Mechanics, Denver, Vol. 2, 1974, p. 27 – 32.
- [22] E. Hoek, *The Challenge of Input Data for Rock Engineering*, ISRM News Journal, 1995, p. 4 – 23.
- [23] J. A. Franklin, and R. Chandra, *The Slake-Durability Test*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1972, p. 41 – 325.
- [24] J. C. Gamble, *Durability-Plasticity Classification of Shales*, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, 1971.
- [25] H. J. Olivier, *Swelling Properties and Other Related Mechanical Parameters of Karroo Strata as Encountered in the Orange-Fish Tunnel*, Proceedings of the 15th Annual Congress, Geological Society of South Africa, 1973.
- [26] F. S. Kendorski, R. A. Cummings, Z.T. Bieniawski and E. H. Skinner, *Rock Mass Classification for Block Caving Mine Drift Support*, Proceedings of the 5th International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Melbourne, 1983, p. B51 – B63.
- [27] E. Ünal, *Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs*, PhD Thesis, Pennsylvania State University, 1983, p. 355.

- [28] H. Lauffer, *Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau*, Geologie und Bauwesen 24, 1958, p. 46 – 51.
- [29] C. Karpuz ve M. A. Hindistan, “*Kaya Mekaniği İlkeleri ve Uygulamaları*”, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, 2. Baskı No. 116, ISBN. 9944-89-166-5, 2008, Ankara, p. 3 – 336.
- [30] E. Hoek, C. T. Carranza-Torres and B. Corkum, *Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition*, Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, Vol. 1, 2002, p. 267 – 273.
- [31] E. Hoek, *Big Tunnels in Bad Rock*, 2000 Terzaghi Lecture, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 9, 2001, p. 726 – 740
- [32] E. Hoek and M. S. Diederichs, *Empirical estimation of rock mass modulus*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, 2006, p. 203 – 215.
- [33] Y. D. Sarı, A. G. Paşamehmetoğlu, E. Çetiner and S. Dönmez, *Numerical Analysis of a Tunnel Support Design in Conjunction with Empirical Methods*, International Journal of Geomechanics, Vol. 8, No. 1, 2008, p. 74 – 81.
- [34] *Bilecik İl Haritası*, http://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Dosya:Bilecik_districts.png&filetimestamp=20081228210645, 2012.
- [35] *Osmangazi Tüneli Fotoğrafı*, <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Galeri/DevletvellyollariTuneli.aspx>, 2012.
- [36] *Kallat Tüneli Fotoğrafı*, http://www.panoramio.com/photo/25427038?comment_page=3, 2012.
- [37] *Amasya İl Haritası*, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/53/Amasya_districts.png, 2012.
- [38] Ö. Satıcı, “*Kavak Merzifon Yolu T4 (Küçükbelvar) Tüneli Duraylılık Analizi*” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Türkiye, 2007.
- [39] *Şehzadeler Tüneli Fotoğrafı*, <http://www.tunel.com.tr/?p=Tamamlanan-Projeler&a=ayrinti&no=17#>
- [40] H. Başarır, *Prediction of the Deformations Around the Face of an Circular Opening in Weak Rock Mass*, The 3th International Balkan Mining Congress, 2009, İzmir, p. 391 – 401.

ÖZ GEÇMİŞ

Ertuğrul KARAKAPLAN 1988 yılında Malatya'da doğdu, ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2006 yılında İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2010 yılında mezun oldu ve aynı yıl içerisinde İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

İletişim Bilgileri

- ✓ Tel : 0 422 322 14 85
- ✓ GSM-1 : 0 538 242 40 96
- ✓ GSM-2 : 0 542 766 04 44
- ✓ E-posta-1 : erturock@gmail.com
- ✓ E-posta-2 : 36101602001@ogr.inonu.edu.tr

ERTUROCK

ERTUROK

ERTKX