

**DERİN KÖMÜR MADENLERİNDE POMPAJLI HİDROELEKTRİK SANTRAL ALT
REZERVUAR SU DEPOLAMA UYGULAMALARI İÇİN ANA GALERİLERDE
DURAYLILIĞIN İNCELENMESİ**

Halil Yalçın AYDINER

**Bülent Ecevit Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

ZONGULDAK

Mart 2013

KABUL:

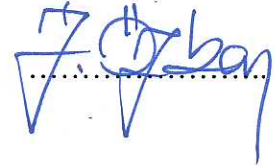
Halil Yalçın AYDINER tarafından hazırlanan "DERİN KÖMÜR MADENLERİNDE POMPAJLI HİDROELEKTRİK SANTRAL ALT REZERVUAR SU DEPOLAMA UYGULAMALARI İÇİN ANA GALERİLERDE DURAYLILIĞIN İNCELENMESİ" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 01/03/2013

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN (BEÜ)



.....

Üye : Doç. Dr. İhsan ÖZKAN (SÜ)



.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hamit AYDIN (BEÜ)



.....

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .../.../2013



Prof. Dr. Özden ÖZEL GÜVEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Halil Yalçın AYDINER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DERİN KÖMÜR MADENLERİNDE POMPAJLI HİDROELEKTRİK SANTRAL ALT REZERVUAR SU DEPOLAMA UYGULAMALARI İÇİN ANA GALERİLERDE DURAYLILIĞIN İNCELENMESİ

Halil Yalçın AYDINER

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN

Mart 2013, 111 sayfa

Yüksek kapasiteli rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinden elde edilen dalgalanmalı yenilenebilir enerjinin elektrik sistemi ağlarına uyumu için büyük ölçekli enerji depolama yöntemleri ve teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde yaygın bir şekilde kurulu olan büyük-ölçekli enerji depolama tesisleri rezervuar tabanlı hidroelektrik ve pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerden (PHES) oluşmaktadır. PHES tesisleri için, nispeten sınırlı hacimsel depolama yoğunluğu özellikleri nedeniyle, büyük su depolama hacimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Derin kömür madenleri açıklıklarının büyük hacimsel depolama potansiyelinden yararlanılması için incelemeler yapılmaktadır. Özellikle işletilmekte ve bazı kapanmış olan taşkömürü madenlerinde mevcut olan ana galerilerden PHES tesislerinde büyük hacimli alt rezervuar su depolama açıklıkları olarak yararlanma olanağı bulunmaktadır. Tezin amacı derin kömür madenlerinde PHES projeleri ile ilintili olarak ana galerilerde kaya mühendisliği konularının değerlendirilmesidir. Yeraltı kömür madenleri ana galeri

ÖZET (devam ediyor)

açıklıklarının PHES alt rezervuar depolama hacimleri olarak güvenli ve verimli kullanımı için değerlendirmeler yapılmıştır.

Bu kapsamda, önce, büyük ölçekli enerji depolama yöntemleri özetlenmiştir. Elektrik ağıları ihtiyaçları için kullanılan pompajlı hidroelektrik enerji depolama yöntemi hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Ardından, kaya malzemesi ve kaya kütlelerinin mekanik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Duraylılık çözümlenmeleri için kullanılan nümerik modellerin şekilleri ve sınır koşulları ile ilgili bilgiler verilmiştir. İncelenen kumtaşı ve silttaşı kayaların özellikleri ve çözümlenmelerde kullanılan parametreler verilmiştir. Sonunda, pompajlı hidroelektrik alt rezervuar su depolama amaçlı derin kömür madeni ana galeriler için ayrıntılı duraylılık analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya mekaniği, Kömür madeni, Pompaj depolamalı hidroelektrik santral

Bilim Kodu: 607.01.02

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

STABILITY ANALYSES OF DEEP COAL MINE ROADWAYS FOR PUMPED HYDROPOWER LOWER RESERVOIR STORAGE APPLICATIONS

Halil Yalçın AYDINER

**Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mining Engineering**

Thesis Advisor: Asst. Prof. Ahmet ÖZARSLAN

March 2013, 111 pages

A grid compatible integration of fluctuating renewable energy from high capacity wind and solar energy farms to electricity systems requires large-scale energy storage methods and technologies. Currently widespread large-scale electricity storage installed is reservoir-based hydropower and pumped hydropower energy storage (PHES). Large storage volumes are necessary to deal with the relatively low volumetric storage density property of PHES plants. Investigations are made to benefit from the large volumetric storage potential of deep coal mine openings. Especially, main roadways of active and some closed hard coal mines are available and may be used as large lower reservoir volumetric storage openings for PHES plants. The objective of this thesis is to evaluate rock engineering issues associated with PHES projects in deep coal mine main roadways. Evaluations are made for safe and effective usage of the underground coal mine main roadway openings as PHES lower reservoir storage volumes.

ABSTRACT (continued)

In this context, firstly, large-scale energy storage methods are summarized. Detailed information is given about pumped hydropower energy storage method which is significantly used for grid electricity storage requirements. Then, information is presented on rock material and rock mass mechanical properties. Also, instructions about rock mass classification systems are provided. The geometry and boundary conditions of the numerical models used for stability analyses are presented. The properties of the investigated sandstone and siltstone rocks and the parameters used in the analyses are given. Finally, detailed stability analyses of deep coal mine main roadways for pumped hydropower lower reservoir storage are made and evaluated.

Keywords: Rock mechanics, Coal mine, Pumped hydropower

Science Code: 607.01.02

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan, tez konusunun belirlenmesi, kapsamının ayrıntılandırılması, tez süresi boyunca yapıcı öneri ve eleştirileri ile sonuçların yorumlanmasında, çok değerli katkı ve yönlendirmeleri için tez danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince ve sonuçlandırılmasında derin bilgileriyle önerilerde bulunan değerli jüri üyeleri Doç. Dr. İhsan ÖZKAN ve Yrd. Doç. Dr. Hamit AYDIN'a, deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Özgür YILMAZ'a, tekniker Hasan ANGIN'a, hem laboratuvar hem arazi çalışmalarındaki değerli katkılarından dolayı Arş. Gör. Ekin KÖKEN'e, arazi çalışmalarındaki katkılarından dolayı Maden Yüksek Mühendisi Eren SOYER (HEMA)'e, Jeoloji Mühendisi Ali SALTİK (HEMA)'a, Maden Mühendisi Vedat TATAR (SOMA)'a, tez çalışması boyunca desteklerinden dolayı Arş Gör. Berdan ÇOLAK'a, Arş Gör. Utku SAKIZ'a ve Maden Yüksek Mühendisi Mutlu Serkan BÜLBÜL'e çok teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca benden maddi ve manevi hiçbir şekilde emeğini esirgemeyen her konuda desteklerini gördüğüm sevgili babam İsmet AYDINER ve annem Ayşe AYDINER'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 KONUNUN ÖNEMİ.....	1
1.2 TEZİN AMACI VE KAPSAMI	1
BÖLÜM 2 BÜYÜK ÖLÇEKLİ ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ	3
2.1 GENEL BİLGİLER	3
2.2 POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALLER.....	6
2.2.1 Dünya’da Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral Tesisleri.....	10
2.2.2 Türkiye’de Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral Projeleri.....	13
2.2.3 Derin Kömür Madenlerinde PHES Projeleri.....	14
2.3 DİĞER DEPOLAMA YÖNTEMLERİ.....	18
2.3.1 Yeraltı Tuz Açıklıklarında Doğal Gaz Depolama	19
2.3.2 Yeraltı Tuz Açıklıklarında Sıkıştırılmış Hava Depolama.....	20
2.3.3 Yeraltı Tuz Açıklıklarında Sıkıştırılmış Hidrojen Gazı Depolama	21

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3 KAYA MALZEMELERİ İLE KAYA KÜTLELERİNİN DAYANIM VE DEFORMABİLİTELERİ.....	23
3.1 GENEL BİLGİLER	23
3.2 HOEK – BROWN GÖRGÜL YENİLME ÖLÇÜTÜ	24
3.3 JEOLJİK DAYANIM İNDEKSİ SINIFLAMASI (GSI)	29
3.4 KAYA KÜTLELERİNİN DAYANIMI (σ_{cm}).....	35
3.5 KAYA KÜTLELERİNİN DEFORMASYON MODÜLÜ (Em).....	36
3.6 KAYA MALZEMESİ VE KAYA KÜTLELERİNİN POISSON ORANLARI	37
BÖLÜM 4 KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ	41
4.1 GENEL BİLGİLER	41
4.2 KAYA KÜTLESİ PUANLAMA SİSTEMİ (RMR).....	43
4.3 Q SINIFLAMA SİSTEMİ.....	48
4.4 RMİ SINIFLAMA SİSTEMİ	54
4.5 M-RMR SINIFLAMA SİSTEMİ	57
BÖLÜM 5 YERALTI KÖMÜR MADENLERİNDE ANA GALERİLERDE DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ	63
5.1 AMASRA BÖLGESİ JEOLJİSİ.....	63
5.1.1 Üst Kretase	64
5.1.2 Alt Kretase	64
5.1.3 Permian	65
5.1.4 Karbonifer	66
5.2 İNCELENEN İŞLETME KOŞULLARI	67
5.3 İNCELENEN KAYA KÜTLESİ KOŞULLARI	71
5.4 DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ	78
5.4.1 Birincil Gerilme ve İçsel Su Basıncı Durumu.....	78
5.4.2 İncelenen Açıklık Şekilleri.....	79

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.4.3 Farklı İşletme Durumları için Duraylılık Çözümlenleri	80
5.5 BULGULAR VE GENEL DEĞERLENDİRMELER	98
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	103
BİBLİYOGRAFYA	107
ÖZGEÇMİŞ	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Rüzgar enerjisi üretiminde zaman içindeki dalgalanmaların görünümü	4
2.2 Büyük ölçekli enerji depolama sistemleri.....	5
2.3 Türkiye’de rüzgar enerjisi kapasitesinin yıllar içindeki gelişimi.....	6
2.4 Yeraltı pompaj depolamalı hidroelektrik santral ve su iletim yapıları tesis şeması.....	8
2.5 Yük ihtiyacı ve üretimi	8
2.6 PHES tesislerine ait görünümler	9
2.7 PHES - RES Hibrit çalışma prensip şeması.....	10
2.8 Dünya ülkeleri PHES potansiyeli.....	12
2.9 Derin yeraltı kömür madenlerinde PHES konsepti	15
2.10 Türkiye kömür havzaları.....	16
2.11 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası	17
2.12 Türkiye rüzgar potansiyeli atlası	17
2.13 Yeraltı tuz açıklıklarında işletilen bir yüksek basınçlı doğal gaz depolama tesisine ait birimler.....	19
2.14 Tuz açıklıklarında sıkıştırılmış hava depolama tesisinin şematik görünümü	20
2.15 Yenilenebilir enerjiden (rüzgar, güneş) hidrojen üretimi ve tuz çözelti açıklıklarında depolama sisteminin şematik görünümü	22
3.1 Kaya malzemesi ve kaya kütlesi kavramları.....	24
3.2 Kaya malzemesi için m_i sabitinin değerleri	27
3.3 Örselenme faktörü D’nin seçimi	29
3.4 Jeolojik tanımlamalara dayalı Jeolojik Dayanım İndeksi’nin tahmin edilmesi	30
3.5 Zayıf ve su içeren kaya kütlesi koşullarında GSI değerinin değişimi	33
3.6 Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından önerilen modifiye edilmiş GSI Sistemi.....	34
3.7 Bazı kaya türleri için Poisson oranı değerlerinin tipik değişim aralıkları	38
4.1 Kaya kütlesi puanlama sistemi (RMR) değiştiricileri	44
4.2 RMI uygulanan tipik bir kaya kütlesi ve başlıca parametrelerinin idealleştirilmiş yapısı.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.3 RMi ve bileşenleri için girdi parametreleri.....	56
4.4 Türkiye’de değişik maden işletmelerindeki kaya kütleleri için RMR ve M-RMR sınıflama sistemlerinden elde edilen sınıf puanlarının karşılaştırılması.....	59
4.5 M-RMR sistemi tarafından sınıflandırma parametreleri için önerilen aralıklar ve indeks değerleri	61
5.1 Amasra bölgesi genel jeolojisi	65
5.2 Amasra genel stratigrafisi	67
5.3 Kuyular, inset ve ana galerilerin konumları.....	68
5.4 Kuyu inseti ve ana galeri kesiti	69
5.5 B24 galeri kesiti ve tahkimat elemanları	70
5.6 Ana galeri genel tahkimat şekli.....	71
5.7 Kumtaşı kaya kütlesi için seçilen GSI değerleri	75
5.8 Silttaşı kaya kütlesi için seçilen GSI değerleri	76
5.9 İncelenen yeraltı açıklık şekilleri	80
5.10 Sayısal çözümlenmelerde kullanılan radyal sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları.....	81
5.11 İncelenen yeraltı kömür madeni için PHES su depolama yönteminin görünümü.....	81
5.12 İçsel su basıncı ($P_i=0$) etkisi olmadan dairesel açıklık çevresinde asal ikincil gerilme dağılımları.....	82
5.13 İçsel su basıncı etkisinde ($P_i=6$ MPa) dairesel açıklık çevresinde asal ikincil gerilme dağılımları.....	83
5.14 Kumtaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında dairesel açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.....	84
5.15 Silttaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında dairesel açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.....	85
5.16 Kumtaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.....	86
5.17 Silttaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.....	88
5.18 Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımındaki değişimin yenilme bölgesinin oluşumuna etkileri	89

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
5.19 Kumtaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.....	91
5.20 Silttaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.....	92
5.21 Silttaşı için kuru kaya malzemesi ve içsel basınç etkisi durumunda invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.....	94
5.22 Silttaşı için suya doymun kaya malzemesi ve içsel basınç etkisi durumunda invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi	95
5.23 Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımındaki değişimin yenilme bölgesinin oluşumuna etkileri	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Elektrik enerjisi depolama amaçları	4
2.2 Türkiye yenilenebilir enerji potansiyeli ve 2011 yılı kullanımı.....	6
2.3 Dünyadaki pompaj depolamalı HES'lerin işletilmekte olan ve projelendirilen güçleri..	11
2.4 İlk etüd seviyesinde çalışılan projeler	13
2.5 Yeraltı kömür madenlerinde PHES projeleri	16
2.6 Tuz açıklıklarında sıkıştırılmış hava depolama tesisleri ile ilgili özet bilgiler	21
2.7 Yeraltında hidrojen gazı depolama tesisleri ile ilgili özet bilgiler	22
3.1 Güncellenen kaya malzemesi için mi sabiti değerleri	27
3.2 Blok boyutu tanımlamaları ve J_v parametresi aralıkları	32
3.3 Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının ($\sigma_{c\text{ kütle}}$) kestirimi için önerilen görgül bağıntılar	35
3.4 Kaya kütlelerinin deformasyon modülünün (E_m) kestirimi için önerilen görgül bağıntılar	37
3.5 Kaya malzemesi için Poisson oranı sınıflaması önerisi	39
4.1 Jeomekanik Sınıflama Sistemi'nde Kaya Kütle Puanı'nın (RMR) belirlenmesinde kullanılan değişkenler ve puanları	46
4.2 Q sisteminin girdi parametreleri ve değerleri	50
4.3 Eklem takımları arası duruma ait indeks değerlerin belirlenmesi - I_{JC}	60
4.4 Patlatma (A_b) ve büyük süreksizlik düzlemleri için düzeltme katsayıları (A_w).....	62
5.1 Çözümlemelerde kullanılan ortalama değerler	72
5.2 Kumtaşı kaya birimi için tek eksenli basınç dayanımına ait özet istatistik değerleri	72
5.3 Kumtaşı kaya birimi için dolaylı çekme dayanımına ait özet istatistik değerleri	73
5.4 Kumtaşı kaya birimi için m_i sabitine ait özet istatistik değerleri	73
5.5 Kumtaşı kaya birimi için E_i değerine ait özet istatistik değerleri	73
5.6 Az sayıdaki örnek üzerinde kuru ve doymun halde yapılan deneylerin ortalama sonuçları.....	74

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
5.7	Çözümlemelerde kumtaşı ve silttaşı için kullanılan kaya malzemesi ile kütlesi parametreleri	77
5.8	Çözümlemelerde kabul edilen 600 m derinlikte sabit birincil gerilme değerleri.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- a : H-B ölçütünde kaya kütlesinin özelliklerine bağlı sabiti
- Ab : Patlatmaya dayalı düzeltme katsayısı
- Aw : Büyük süreksizlik düzlemi ve zayıflık düzlemlerine dayalı düzeltme katsayısı
- D : Örselenme faktörü
- E_i : Kaya malzemesinin elastisite modülü
- E_m : Kaya kütlesinin deformasyon modülü
- F_c : Suda dağılma dayanımına bağlı bir katsayı
- H : Yerüstünden derinlik
- I_{PLT} : Nokta yükleme dayanımına bağlı indeks değeri
- I_{RQD} : RQD (Rock Quality Designation) değerine bağlı indeks değeri
- I_{JS} : Süreksizlikler arası mesafeye bağlı indeks değeri
- I_{JC} : Süreksizlikler arası durum indeks değeri
- I_{GW} : Yeraltı su durumuna bağlı indeks değeri
- I_{OI} : Eklem takım konumuna bağlı indeks değeri
- J_a : Eklem yüzeyi araştırma sayısı
- jA : Olası dolgu ve aşınma varlığında eklem duvarının özelliğini temsil eden eklem ayrışma katsayısı
- jC : Eklem koşulu faktörü
- jL : Eklem boyutu ve süreklilik katsayısı
- J_n : Eklem takımı sayısı
- JP : Eklem parametresi
- J_r : Eklem pürüzlülük sayısı
- J_r : Eklem düzlemsellik ve eklem duvar yüzeyinin eklem pürüzlülük katsayısı
- J_v : Hacimsel eklem sayısı
- J_w : Eklem su azaltma faktörü
- k : Toplam gerilme oranı
- m_i : H-B ölçütünde kaya malzemesi için boyutsuz malzeme sabiti
- m_b : H-B ölçütünde kaya kütlesi için boyutsuz malzeme sabiti

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

n	: Veri sayısı
Q_1	: Birinci kantil değeri
Q_2	: İkinci kantil değeri
Ph_{max}	: En büyük yatay birincil gerilme
Ph_{min}	: En küçük yatay birincil gerilme
P_i	: İçsel su basıncı
P_v	: Düşey birincil gerilme
R_f	: Süreksizliklerin dolgu puanı
R_r	: Süreksizliklerin pürüzlülük puanı
R_w	: Süreksizliklerin bozunma puanı
s	: H-B ölçütünde kaya kütlelerinin özelliklerine bağlı sabiti
V_b	: Blok hacmi
γ	: Birim hacim ağırlığı
τ	: Kayma gerilmesi
ν	: Poisson oranı
σ	: Normal gerilme
σ_{ci}	: Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
σ_{cm}	: Kaya kütlelerinin basınç dayanımı
σ_{max}	: En büyük asal gerilme
σ_{min}	: En küçük asal gerilme
σ_{ti}	: Kaya malzemesinin çekme dayanımı
σ_{tB}	: Kaya malzemesinin dolaylı (Brezilya) çekme dayanımı
σ_{tm}	: Kaya kütlelerinin çekme dayanımı
σ_{θ}	: En büyük teğetsel gerilme

KISALTMALAR

ACAES	: Isı depolamalı adyabatik sıkıştırılmış hava depolama konseptleri
CAES	: Sıkıştırılmış hava enerji depolama yöntemi (compressed air energy storage)
D-P	: Drucker – Prager
EİE	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

GSI	: Jeolojik dayanım indeksi (geological strength index)
GW	: Gigawatt
GWh	: Gigawatt saat
H-B	: Hoek Brown
HES	: Hidroelektrik santraller
ISRM	: Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (International Society for Rock Mechanics)
M-C	: Mohr-Coulomb
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
M-RMR	: Yeniden düzenlenmiş kaya kütlesi puanı (modified rock mass rating)
MW	: Megawatt
NGI	: Norveç jeoteknik enstitüsü
Q	: Tünelcilik kalitesi indeksi
PHES	: Pompaj depolamalı hidroelektrik santraller
RES	: Rüzgar enerji santralleri
RMR	: Kaya kütlesi puanı (rock mass rating)
RMİ	: Kaya kütlesi indeksi
RQD	: Kaya kalite göstergesi
SCR	: Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı
SR	: Yapısal Özellik Puanı
SRF	: Gerilme azaltma faktörü
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 KONUNUN ÖNEMİ

Rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, sabit ve sürekli enerji üretme olanaklarına sahip olmayıp, mevsimsel ve günlük meteorolojik koşullardan etkilenmektedir. Özellikle MW kapasiteli rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinde, talebe uygun sürekli enerji üretiminin güvence altına alınabilmesi için, büyük ölçekli enerji depolama tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dünyada uygulanmakta olan büyük ölçekli enerji depolama tesisleri ağırlıklı olarak pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerden (PHES) oluşmaktadır. PHES’de alt ve üst olmak üzere iki rezervuar olup, rezervuarlar inşa edilecek havuzlar dışında nehir, doğal göl, mevcut baraj rezervuarı veya deniz olabilmektedir. Enerji talebi yüksek olduğu zaman su üst seviyeden alt seviyeye düşürülerek enerji kazanılmaktadır. Enerjiye talebi sınırlı olduğu zaman, fazla olan enerji ile pompa çalıştırılarak su alt seviyeden üste yükseltilmektedir. PHES rezervuarlarında nispeten düşük olan birim hacim depolama yoğunlukları nedeniyle, büyük kapasiteli PHES’ler için büyük ölçekli su depolama hacimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yeni PHES tesisleri için uygun sahaların sınırlı olması, çevresel etkileşimler gibi nedenlerden dolayı yeni kapasitelerin yaratılmasında sorunlar ile karşılaşılmaktadır. Bundan dolayı derin yeraltı kömür madenlerine ait açıklıklardan, PHES’ler için alt rezervuar depolama uygulamalarında yararlanılması konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Özellikle madencilik üretim çalışmaları sonrasında mevcut olacak uygun ve derin yeraltı açıklıklarından su depolamak amacıyla yararlanılması düşünülmektedir.

Ülkemizde birçok bölgede kömür yatakları ve madenleri olmasına karşın, taşkömürü üretimi sadece Zonguldak kömür havzasında gerçekleştirilmektedir. Havzada yer alan bazı işletmelerde kuyu derinlikleri yerüstünden 500 m’den fazla olup, taşkömürü üretimi bu seviyelerde devam etmektedir. Türkiye’de rüzgar enerji potansiyeli açısından Karadeniz Bölgesinde özellikle Bartın-Amasra civarının önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahip

olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı tez çalışması kapsamında ülkemizde derin kömür madenlerinde PHES potansiyelini araştırmak için Amasra taşkömürü sahası seçilmiştir.

1.2 TEZİN AMACI VE KAPSAMI

Çalışma kapsamında, gelecekte bölgede inşa edilecek rüzgar enerji tesisleri ile birlikte, derin kömür madeninden PHES tesisi olarak yararlanma olanakları için n incelemeler yapılmıştır. Amasra B taşkömürü proje sahasında üç adet derin (> 500 m) maden kuyusu açılmış olup ana galeriler aracılığıyla bağlantıları sağlanmaktadır. Tez çalışmasında, özellikle PHES tesisinde alt rezervuar su depolama uygulamaları için, ana galerilerin uygunluğu jeomekanik açıdan incelenmiştir.

Tez kapsamında öncelikle, büyük ölçekli enerji depolama yöntemlerinden, pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerinden (PHES) ve derin kömür madenlerindeki PHES projelerinden bahsedilmiştir. Ardından, kaya malzemesi ve kaya kütlesinin mekanik özellikleri hakkında bilgi verilip, kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri hakkında açıklamalar yapılmıştır. Son bölümde, yeraltı kömür madenlerinde ana galeriler için incelenen kaya kütlesi ve işletme koşulları hakkında bilgiler verilip, ayrıntılı duraylılık zmlmeleri ve değerlendirmeler yapılmıştır.

BÖLÜM 2

BÜYÜK ÖLÇEKLİ ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

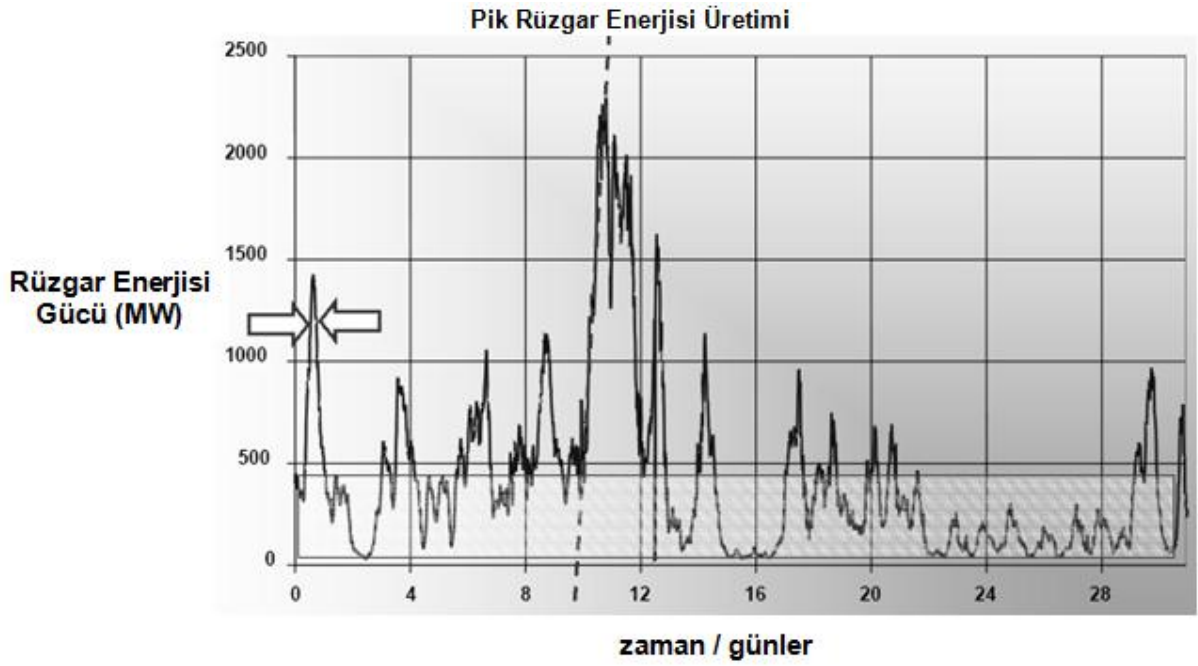
2.1 GENEL BİLGİLER

Enerji toplumsal refahın sağlanması için gerekli araçlardan ve üretim faaliyetlerinin ana girdilerinden biri olarak, ekonomik ve sosyal kalkınmanın vazgeçilmez temel taşlarından biridir. Bu nedenle, endüstrideki gelişmelerin, yaşam standartlarındaki yükselişin ve artan nüfusun ihtiyaç duyduğu enerjinin yeterli, güvenilir bir şekilde ve düşük maliyetle sağlanması büyük önem arz etmektedir (Saraç 2009). Arz güvenilirliği için sürdürülebilir enerji politikalarının oluşturulması ve enerji kaynaklarında dışa bağımlılığın azaltılması gerekmektedir. Arz güvenilirliği kısa dönemde talebin sürekli ve kaliteli bir şekilde karşılanması, uzun dönemde ise yeterli kapasite yatırımlarının yapılmasını ifade etmektedir. Günümüzde dünya enerji gereksinimi büyük oranda fosil (kömür, doğal gaz vb.) ve nükleer yakıtlardan karşılanmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminde kullanılan en yaygın yöntemler ise hidroelektrik, rüzgar ve güneş enerjisi sistemleridir.

Genel olarak termik (kömür, doğal gaz) ve nükleer santraller talep değişimlerine kolayca uyum sağlayamamaları nedeniyle baz yükte, hidroelektrik santraller (HES) ise kolayca işletilip durdurulabilen ve aynı zamanda kısa bir sürede tam kapasite yüke çıkışa uyum sağlayabilmeleri nedeni ile pik talebin karşılanmasında kullanılmaktadır. Pik talebin karşılanmasında rezervuarlı HES'lerin yetersiz kalması durumunda pompaj depolamalı hidroelektrik santrallere (PHES) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu santraller güç talebinin düşük olduğu zamanlarda suyu yüksekte bir rezervuarda depolamak ve bu şekilde biriktirilen sudan puant zamanlarda hidroelektrik enerji elde etmek amacıyla kullanılmaktadır (Yorgancılar ve Kökçüoğlu 2009).

Rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, sabit ve sürekli enerji üretme olanaklarına sahip olmayıp, mevsimsel ve günlük meteorolojik koşullardan etkilenmektedir.

Şekil 2.1’de şematik olarak rüzgar enerji üretimi için örnek bir dağılım verilmiştir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinde üretilen enerji süreç açısından kesikli ve yoğunluk açısından değişiklik gösterdiğinden elektrik enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik enerjisini depolama ihtiyacı sadece yenilenebilir kaynaklar için var olan bir sorun olmayıp, aynı zamanda enerji kalitesi, gücü destekleme ve enerji yönetimini sağlamaya yönelik olabilmektedir (Mazman vd. 2010). Çizelge 2.1’de elektrik enerjisi depolama amaçları özetlenmiştir.



Şekil 2.1 Rüzgar enerjisi üretiminde zaman içindeki dalgalanmaların görünümü (Crotofino 2010).

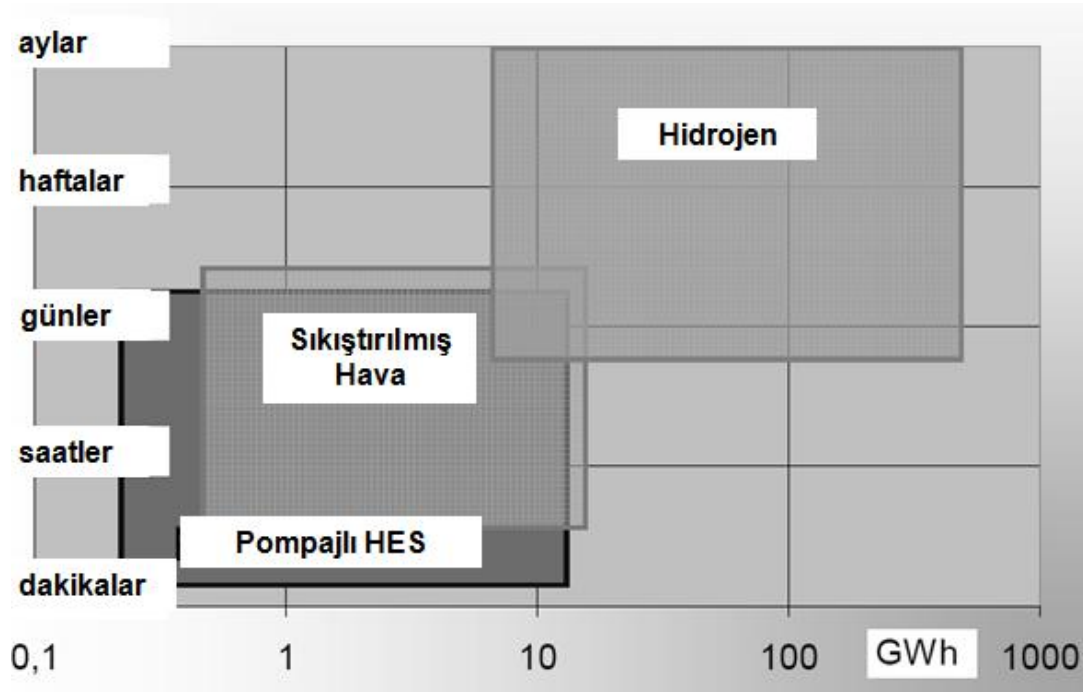
Çizelge 2.1 Elektrik enerjisi depolama amaçları (Mazman vd. 2010).

Amaç	Zaman aralığı	Açıklama
Enerji kalitesi	Saniyeler mertebesi ya da daha kısa süreler	Enerji kalitesinin sürekliliğinin sağlanması
Gücü destekleme	Saniyelerden dakikalar mertebesine kadar	Farklı enerji üretim merkezlerini kesme/devreye almalarında enerjinin sürekliliğinin sağlanması
Enerji Yönetimi	Saatlerden günler mertebesine kadar	Enerjinin üretim fazlası/ekonomik olduğu zamanlarda depolanması ve ihtiyaç zamanlarında kullanılması

Enerjinin elektrik olarak depolanması pahalıdır ve teknolojik olarak genelde verimli değildir. Enerji depolama sistemlerinin birçoğu, elektriğin diğer enerji formlarına dönüşümüne ihtiyaç duyduğundan, dolaylı depolama sistemleri olarak ifade edilmektedir. Başlıca enerji depolama

sistemleri; bataryalar, süper kapasitörler, volan (flywheel), süper iletken manyetik enerji (Smes) pompajlı HES (PHES) ve sıkıştırılmış havadan oluşmaktadır (Mazman vd. 2010, Meiwes 2009).

Dünyada uygulanmakta olan büyük ölçekli enerji depolama tesisleri ağırlıklı olarak pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerden (PHES) oluşmaktadır. Diğer yöntemler ise yeraltında doğal gaz, sıkıştırılmış hava enerjisi ve hidrojen gazı depolama teknolojilerinden oluşmaktadır (Crotofino 2010, Meiwes 2009). MW kapasiteli yenilenebilir rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinde, talebe uygun sürekli enerji üretiminin güvence altına alınabilmesi için, büyük ölçekli enerji depolama tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.2’de büyük ölçekli enerji depolama sistemleri, güç ve zaman bazında, karşılaştırmalı olarak verilmiştir. GWh ölçekli ve çok uzun süreli (hafta, ay) enerji depolama uygulamaları ancak hidrojen aracılığıyla mümkün olabilmektedir. Sıkıştırılmış doğal gaz, hava ve hidrojen gazı enerji depolama uygulamaları için uygun yeraltı ortamlardan (eski doğal gaz sahası, akifer, kaya tuzu açıklığı vb.) yararlanılabilmektedir (Özarslan ve Gerçek 2002). Hava ve hidrojen gazı enerji depolama uygulamaları için, jeolojik kaya tuzu yataklarında çözelti madenciliği yöntemiyle oluşturulan yeraltı depolama açıklıkları en uygun ortamlar olarak değerlendirilmektedir (Kepplinger et al. 2011).

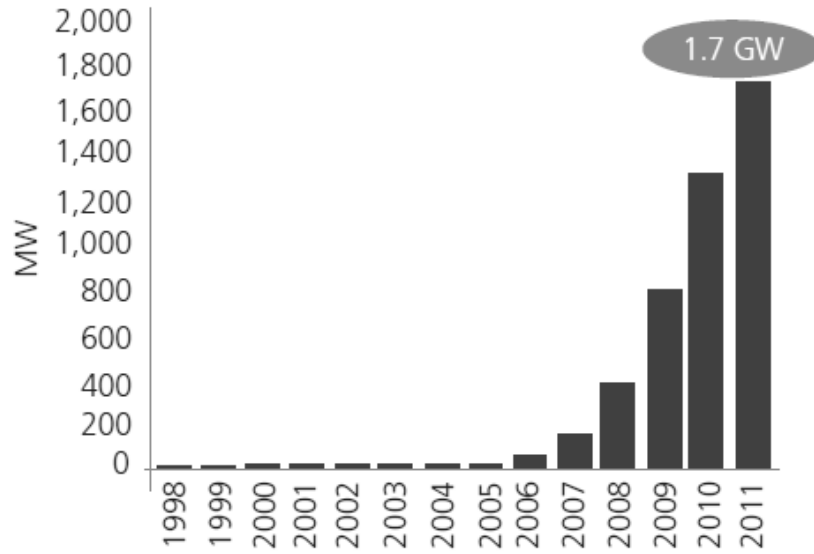


Şekil 2.2 Büyük ölçekli enerji depolama sistemleri (Crotofino 2010).

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynak potansiyeli açısından oldukça zengin olmakla birlikte henüz bu potansiyelin önemli bir kısmı hayata geçirilememiştir (Çizelge 2.2). Küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunları, enerjide yurtdışına bağımlılık, yerli ve yenilenebilir kaynaklardan artan oranlarda faydalanmak suretiyle kontrol altına alınabilecektir (EPDK 2011). Son yıllarda özellikle yenilenebilir rüzgar santrallerinin elektrik üretimindeki payında önemli artışlar gerçekleşmiştir (Şekil 2.3) (TWEA 2012).

Çizelge 2.2 Türkiye yenilenebilir enerji potansiyeli ve 2011 yılı kullanımı (Hubner vd. 2008).

Kaynak	Potansiyel	İnşa Halinde	İşletmede
Hidro	45 000 MW	14 600 MW	16 160 MW
Rüzgar	48 000 MW	2130 MW	1360 MW
Güneş	300 TWh/yıl	-	-
Jeotermal	600 MW	118 MW	94 MW
Bio-enerji	17 MTEP	50 MW	97 MW



Şekil 2.3 Türkiye’de rüzgar enerjisi kapasitesinin yıllar içindeki gelişimi (TWEA 2012).

2.2 POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALLER

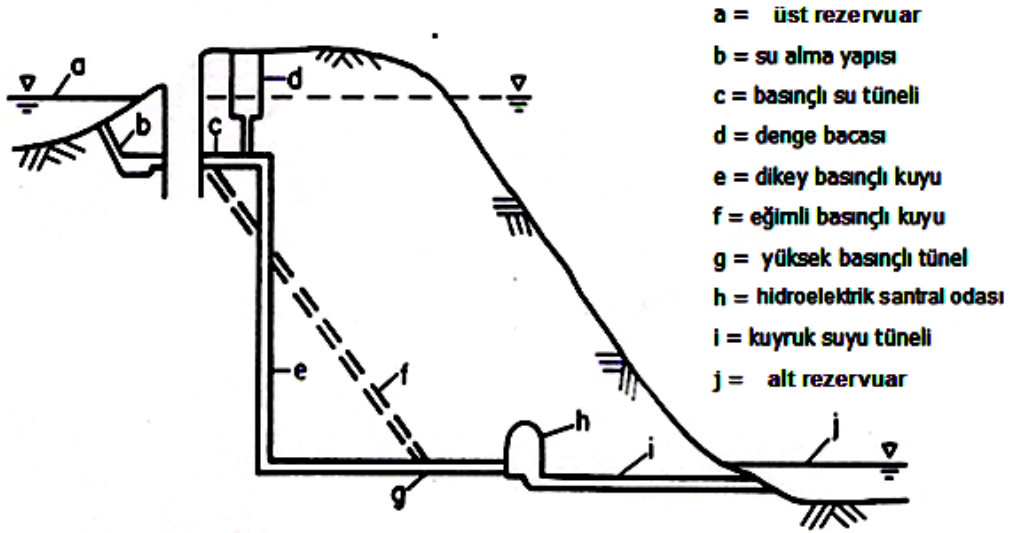
Hidroelektrik santraller (HES) suyun enerjisinden faydalanarak elektrik üreten yapılardır. HES, suyun potansiyel enerjisinin mekanik enerjiye ve mekanik enerjinin de elektrik enerjisine dönüştürüldüğü tesislerdir. Elde edilecek elektrik gücü, başlıca suyun akış hacmine ve düşüş yüksekliğine bağlıdır. HES depolama özelliklerine, yapılarına, su düşülerine ve kapasitelerine göre sınıflandırılabilir. Düşü yüksekliği 50 m’den fazla olan santraller

yüksek düşümlü santraller olarak kabul görmektedir. Depolama özelliklerine göre hidroelektrik santraller deposuz veya depolu (doğal, yatay) olmak üzere ayrılabilir. Deposuz santraller genelde doğrudan nehir veya bir kanal üzerinde kurulmaktadır. Su depoları veya başka bir ifadeyle gölleri olmadığından akan suyun enerjisini elektriğe çevirirler. Depolu santrallerde suyun depolanması esas olup genellikle su rejimlerinin düzensiz olduğu akarsularda bütün yıl boyunca düzenli olarak elektrik enerjisi üretilebilmesi için oluşturulmaktadır. Bu tip santrallere örnek olarak; yaygın olarak kullanılan barajlı hidroelektrik santraller (HES) ve tez çalışmasının da konusu olan pompaj rezervuarlı hidroelektrik santraller PHES verilebilmektedir (EİE 2009). Türbinlerin yer aldığı santral yapıları hem yerüstünde hem de yeraltında inşa edilebilmektedir. Son yıllarda santrallerin yeraltında olması tercih edilmektedir.

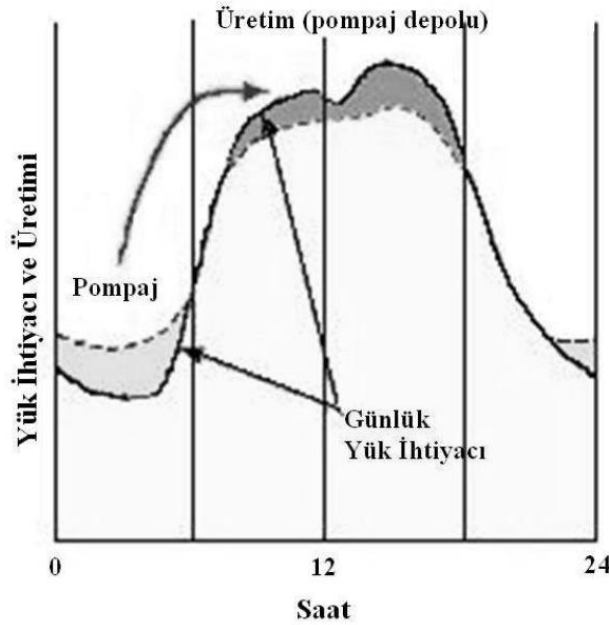
PHES, hidroelektrik santrallerin bir çeşidi olup, sistemin amacı güç talebinin düşük olduğu zamanlarda suyu yüksekte bir rezervuarda depolamak ve biriktirilen sudan elektrik enerjisi talebinin fazla olduğu zamanlarda hidroelektrik enerji elde etmektir. PHES’de alt ve üst olmak üzere iki rezervuar olup, rezervuarlar inşa edilecek havuzlar dışında nehir, doğal göl, mevcut baraj rezervuarı veya deniz olabilmektedir. Enerji talebi yüksek olduğu zaman su üst seviyeden alt seviyeye düşürülerek enerji kazanılır. Enerjiye talep sınırlı olduğu zaman, fazla olan enerji ile pompa çalıştırılarak su alt seviyeden üste yükseltilir. Su alma yapısı üst rezervuarın yanında veya altında olacak şekilde yapılabilir. Çoğunlukla yeraltı santralli olarak yapılan pompaj depolamalı HES’lerde su iletim yapısı olarak basınçlı kuyu ve enerji tüneli kullanılıp, santralle alt rezervuar arasındaki bağlantı da kuyruk suyu tüneli ile sağlanmaktadır (Şekil 2.4). Basınçlı su veya enerji tünelleri içsel su basıncı etkisinde olmalarından dolayı genelde beton ve çelik kaplamalı olarak inşa edilmektedir. Bununla beraber iç basınç fazla değilse veya sızdırmazlık sorun teşkil etmiyorsa, açık cebri borularda veya tünellerde sadece beton malzeme de kullanılabilir (EİE 2009). Yüksek düşümlü hidroelektrik tesislerde maliyetin önemli bir kısmını basınçlı su tünellerinde kullanılan kaplama malzemeleri oluşturabilmektedir. Özellikle çelik kaplama kullanılması durumunda önemli maliyet artışları oluşabilmektedir.

PHES, hidrolik, termik, nükleer ve rüzgar santrallerinden kurulu enterkonnekte sistemin günlük, haftalık veya sezonluk işletme şartlarını düzenlemekte olup, normal hidroelektrik santrallerde olduğu gibi talebin az olduğu ve enerji üretimine gerek olmadığı durumlarda durdurulabilir (Yorgancılar ve Kökçüoğlu 2009). Şekil 2.5’de bu durum ifade edilmiştir.

PHES yenilenebilir rüzgar ve güneş santrallerinden elde edilen MW seviyelerindeki dalgalanmalı enerji üretiminin depolanması için bir seçenek teşkil etmektedir. Bunun için rüzgar santrallerinden elde edilen enerjinin pompaj depolamalı bir tesis ile entegre edilerek daha avantajlı hale getirilmesi mümkündür.



Şekil 2.4 Yeraltı pompaj depolamalı hidroelektrik santral ve su iletim yapıları tesis şeması (Brekke and Ripley 1993).



Şekil 2.5 Yük ihtiyacı ve üretimi (Yorgancılar ve Kökçüoğlu 2009).

PHES'ler su depolama amaçlı rezervuarlarının büyüklüğüne ve işletme politikasına göre günlük-haftalık veya sezonluk biriktirme yapabilmektedir. Günlük çevrimde, pik saatlerde

üretimde kullanılan suyun tamamı aynı gün pik dışı saatlerde üst rezervuara pompalanır. Haftalık çevrimde ise, hafta içi günlerde pik saatlerde üretimde kullanılan suyun bir kısmı aynı gün pik dışı saatlerde üst rezervuara pompalanır, hafta içi günlerin sonunda tamamen boşalan üst rezervuar hafta sonu günlerinde pik dışı saatlerde pompaj yapılarak tekrar doldurulur. Sezonluk biriktirmede ise nehir akımının ve enerjinin fazla olduğu dönemde su, üst rezervuara pompalanır ve akımın az olduğu dönemde üst rezervuarda depolanan sudan enerji üretilir (Yorgancılar ve Kökçüoğlu 2009).

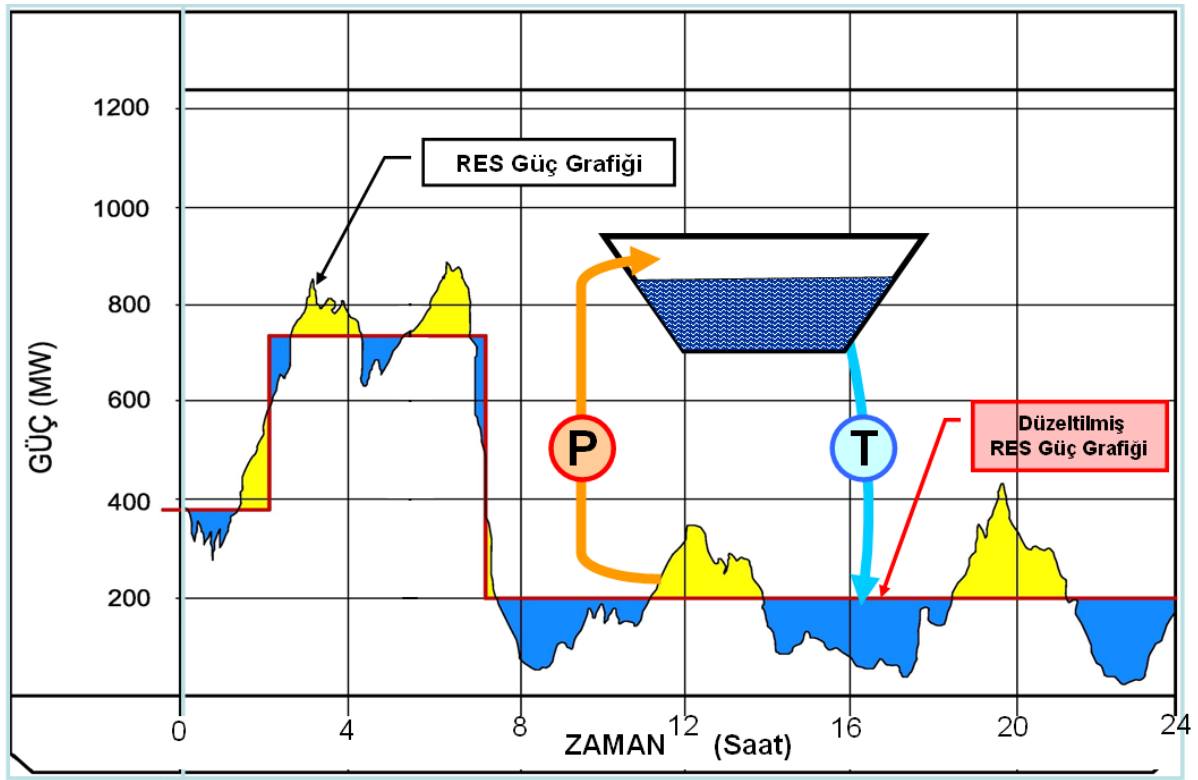
Yapılış amaçlarına göre PHES'ler pik güç santralleri olarak PHES ve enerji depolama santralleri olarak ayrılmaktadır. PHES'ler ayrıca saf PHES ve karışık PHES olmak üzere kendi içinde ayrılmaktadır. Alt ve üst rezervuarları herhangi bir su kaynağı üzerinde olmayıp iki yapay havuzdan oluşan sisteme saf PHES denilmektedir. Karışık PHES, bir nehir'in suyundan ve veya baraj gölünden yararlanılarak daha yüksek düşü'de inşaa edilen yapay su depolama havuzundan oluşmaktadır (Saraç 2012). Şekil 2.6'da farklı PHES tesislerine ait görünümümler verilmiştir.



Şekil 2.6 PHES tesislerine ait görünümümler (Saraç 2012).

Enerjilendirme durumuna göre PHES'ler şebeke destekli ve şebeke desteksiz olmak üzere iki çeşittir. Şebeke destekli PHES'lerde, her pompaj depolamalı hidroelektrik santralde suyu alt

rezervuardan üst rezervuara pompalamak için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Enerjisini ulusal şebeke sisteminden alan PHES'lere şebeke destekli denilmektedir. Şebeke Desteksiz PHES'de, pompalamak için kullanılan enerji doğrudan ulusal şebeke sisteminden sağlanmaz ve genelde güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılmaktadır. Rüzgâr enerji santrallerinin (RES) şebekeye düzgün güç verebilmesi için Şekil 2.7'de prensip şeması verilen RES ile PHES'ten oluşan hibrit sistem görülmektedir. Bu sistemde RES'ler doğrudan şebekeye bağlanmak yerine şebekeden bağımsız çalışır ve PHES ile oluşturulan Hibrit sistemin oluşturduğu ortak baradan şebekeye bağlanarak şebekeye düzgün güç verilir. Bu sistemde PHES'in enerjisi bağımsız çalışan RES'lerden sağlanmaktadır.



Şekil 2.7 PHES - RES Hibrit çalışma prensip şeması (Saraç 2012).

2.2.1 Dünya'da Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral Tesisleri

İlk pompaj depolamalı sistem kullanımı 1890'larda İtalya ve İsviçre'dedir. 1930'larda tersinir hidroelektrik türbinler geliştirilmiştir. İlk günlerde, pompaj depolamalı güç üretim santralının kapasitesi 10 MW' dan az olmasına rağmen kapasite devamlı artırılmış ve günümüzde kapasitesi 2000 MW' dan büyük santraller planlanmaktadır. Pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerin dünyadaki durumuna bakıldığında mevcut maksimum toplam gücü 99.663 MW,

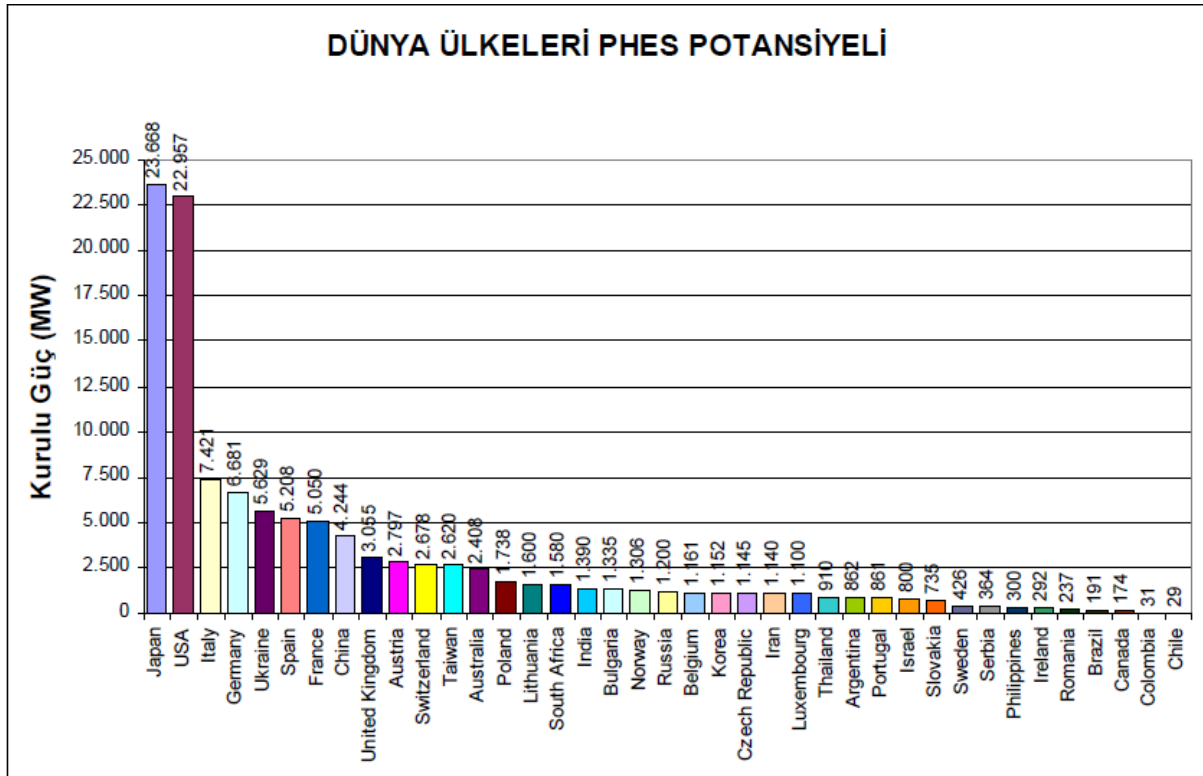
planlanan toplam gücü 43.796 MW olan 40 ülkede 386 tesis bulunmaktadır (Çizelge 2.3) (Şekil 2.8) (Yorgancılar ve Kökçüoğlu 2009).

Çizelge 2.3 Dünyadaki pompaj depolamalı HES'lerin işletilmekte olan ve projelendirilen güçleri (Yorgancılar ve Kökçüoğlu 2009).

ÜLKELER	İŞLETİLMEKTE OLAN MAKSİMUM TOPLAM GÜÇ (MW)	PROJELENDİRİLEN MAKSİMUM TOPLAM GÜÇ (MW)
ARJANTİN	987	0
AVUSTRALYA	2754	0
AVUSTURYA	2837	1700
BELÇİKA	1161	0
BREZİLYA	191	0
BULGARİSTAN	535	864
KANADA	122	0
ŞİLİ	29	0
ÇİN	855	4445
RUSYA	835	12048
KOLOMBİYA	31	0
HIRVATİSTAN	280	0
FİNLANDİYA	0	525
ÇEK CUMHURİYETİ	1153	0
FRANSA	5846	0
ALMANYA	6621	0
MACARİSTAN	0	1280
HİNDİSTAN	2427	1886
İRAN	0	1140
İRLANDA	292	0
İSRAİL	800	800
İTALYA	7421	1611
JAPONYA	24733	2987
KORE	1152	670
MEKSİKA	0	2600
FAS	0	780

Çizelge 2.3 (devam ediyor).

NORVEÇ	1014	0
FİLİPİNLER	300	1800
POLONYA	1550	92
PORTEKİZ	558	149
ROMANYA	237	293
SLOVAKYA	0	969
GÜNEY AFRİKA	1787	0
İSPANYA	5208	3218
İSVEÇ	426	0
İSVİÇRE	2678	0
TAYVAN	1008	1620
TAYLAND	410	743
İNGİLTERE	3242	0
ABD	20184	1576
TOPLAM	99663	43796



Şekil 2.8 Dünya ülkeleri PHES potansiyeli (Saraç 2009).

2.2.2 Türkiye’de Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral Projeleri

Ülkemizde ilk kez EİE tarafından pompaj depolamalı santral çalışmalarına 2005 yılında başlanmıştır. Bu maksatla çeşitli seviyelerde proje çalışmaları yapılmakta olup, 17 adet ilk etüt seviyesinde pompajlı depolamalı HES raporu hazırlanmıştır (Çizelge 2.4). İlk etüt seviyesinde çalışılan Sarıyar, Yalova ve İznik-I projeleri ilerletilerek fizibilite seviyesinde çalışılmaya başlanmıştır.

Pompaj depolamalı santraller pik güç talebini karşılamak üzere enerji ihtiyacının en fazla olduğu yerlerde planlanmaktadır. Böylece iletim hattı kısa ve yük kayıpları az olacaktır.

Ayrıca pompaj depolamalı santraller, yenilenebilir enerjinin yükselişe geçtiği günümüzde özellikle rüzgar santrallerinden üretilen enerjiyi de güvenilir hale getirmek amacıyla kullanılabilir. Bunun için rüzgar santrallerinden elde edilen enerjinin pompaj depolamalı bir tesis ile entegre edilerek daha avantajlı hale getirilmesi mümkündür (Yorgancılar ve Kökçüoğlu 2009).

Çizelge 2.4 İlk etüd seviyesinde çalışılan projeler (Yorgancılar ve Kökçüoğlu 2009).

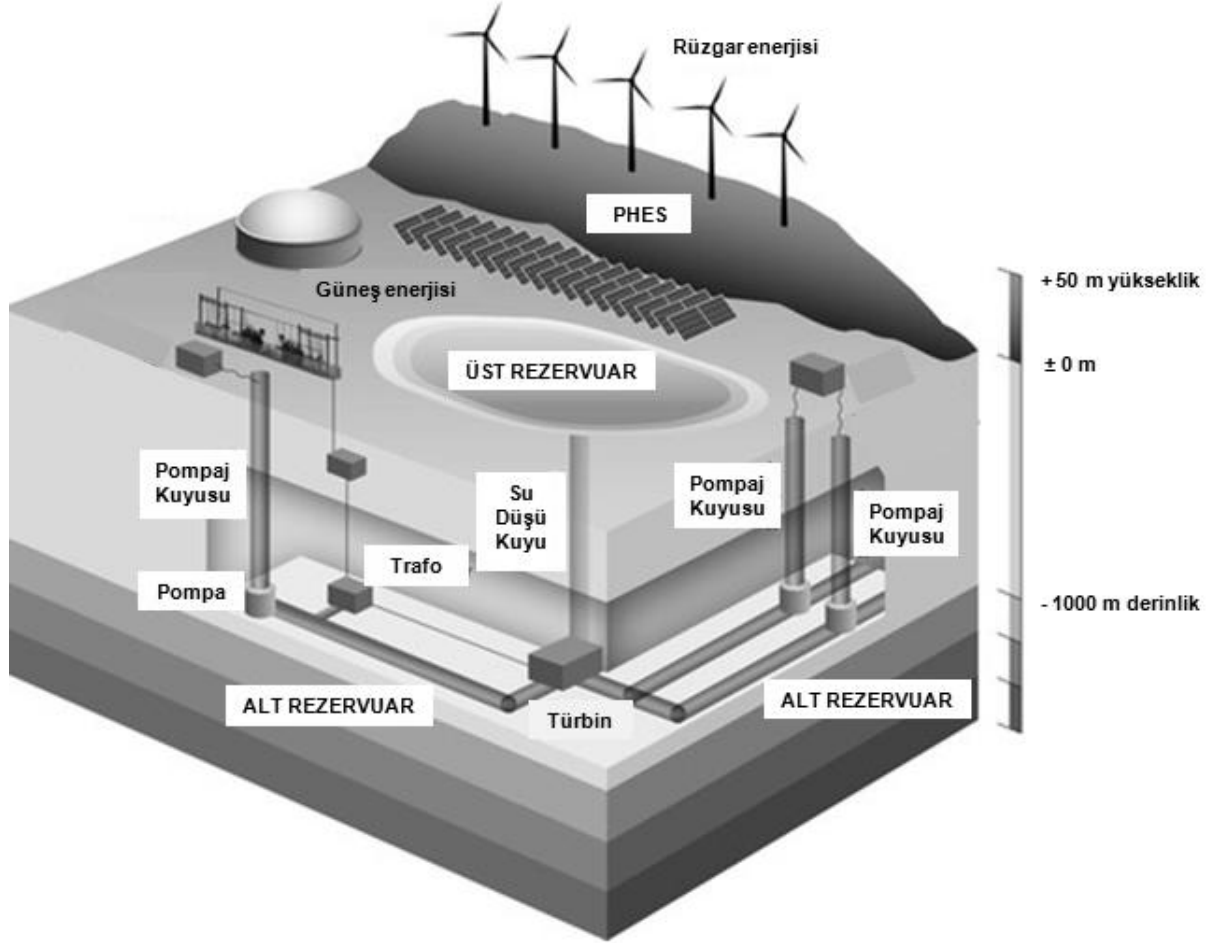
Proje Adı	Yeri	Kurulu Güç (MW)	Proje Debisi (m ³ /sn)	Düşü (m)
Kargı PHES	Ankara	1000	238	496
Sarıyar PHES	Ankara	1000	270	434
Gökçekaya PHES	Eskişehir	1600	193	962
İznik-I PHES	Bursa	1500	687	255
İznik-II PHES	Bursa	500	221	263
Yalova PHES	Yalova	500	147	400
Demirköprü PHES	Manisa	300	166	213
Adıgüzel PHES	Denizli	1000	484	242
Burdur Gölü PHES	Burdur	1000	316	370
Eğirdir Gölü PHES	Isparta	1000	175	672
Karacaören-II	Burdur	1000	190	615
Oymapınar PHES	Antalya	500	156	372
Aslantaş PHES	Osmaniye	500	379	154
Bayramhacılı	Kayseri	1000	720	161
Yamula PHES	Kayseri	500	228	260
Hasan Uğurlu	Samsun	1000	204	570

2.2.3 Derin Kömür Madenlerinde PHES Projeleri

Rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, sabit ve sürekli enerji üretme olanaklarına sahip olmayıp, mevsimsel ve günlük meteorolojik koşullardan etkilenmektedir. Özellikle MW kapasiteli rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinde, talebe uygun sürekli enerji üretiminin güvence altına alınabilmesi için, büyük ölçekli enerji depolama tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dünyada uygulanmakta olan büyük ölçekli enerji depolama tesisleri ağırlıklı olarak pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerden (PHES) oluşmaktadır. PHES rezervuarlarında nispeten düşük olan birim hacim depolama yoğunlukları nedeniyle, büyük kapasiteli PHES'ler için büyük ölçekli su depolama hacimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yeni PHES tesisleri için uygun sahaların sınırlı olması, çevresel etkileşimler gibi nedenlerden dolayı yeni kapasitelerin yaratılmasında sorunlar ile karşılaşmaktadır. Bundan dolayı, birçok ülkede mevcut olan derin yeraltı kömür madenlerine ait açıklıklardan, PHES'ler için alt rezervuar depolama uygulamalarında yararlanılması konusunda araştırmalar başlatılmıştır (Niemann 2011). Almanya, Polonya, İngiltere, İspanya ve Türkiye gibi ülkelerde taşkömürü üretim derinlikleri genelde yerüstünden 500 m'den fazla derinliklerde gerçekleşmektedir. Özellikle madencilik üretim çalışmaları sonrasında mevcut olacak uygun ve derin yeraltı açıklıklarından su depolamak amacıyla yararlanılması düşünülmektedir.

Yeraltı taşkömürü madenlerinde üretim genelde uzunayak yönteminden yararlanılarak panolarda gerçekleştirilmektedir. Uzunayak yönteminde üretim bir kazı arını boyunca yapılmakta olup bağlantı tabanyolları ile sağlanmaktadır. Yeraltı kömür madenlerinde üretim panosunu oluşturan ayak ve tabanyolu açıklıkları geçici olup üretim sonrası göçertmeye bırakılmaktadır. Bundan dolayı bu açıklıklardan PHES tesisleri için alt rezervuar depolama açıklıkları olarak yararlanılması mümkün olmamaktadır. PHES tesisleri için yeraltı kömür madenlerinde nakliyat ve havalandırma amaçlı hizmet veren kuyular ile ana galerilerden yararlanma potansiyeli bulunmaktadır. Bu yeraltı açıklıkları sürekli açıklıklar olup, bir madende kömür üretiminin sona ermesi ve kapanması aşamasına kadar genelde hizmet vermektedir. PHES tesisleri için dikey veya eğimli derin kuyulardan su düşünün sağlanması ve yatay ana galerilerden su depolama amaçlı alt rezervuar hacimlerinin oluşturulması planlanmaktadır. Derin kömür madenleri için tasarlanan bir PHES tesisinin konsepti şematik olarak Şekil 2.9'da verilmiştir. PHES tesisi için yapay üst rezervuar havuzu madenin yerüstü sahasında oluşturulabilmektedir. Kuyu veya kuyu içinde yer alacak boru aracılığıyla yerüstü

ile yeraltı arasında su düşü yaratılmaktadır. Türbinden geçecek basınçlı su aracılığıyla enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Türbinden geçen basınçlı su ana galerilerde oluşturulacak alt rezervuarda depolanabilmektedir. Enerji üretimi ihtiyacı olmadığında diğer kuyular aracılığıyla depolanan su yerüstünde üst rezervuar havuzunda depolanabilmektedir. Yeniden enerji üretimine ihtiyaç duyulduğunda yerüstünde üst rezervuarda depolanan su alt rezervuara iletilerek türbinler aracılığıyla enerji üretimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.9 Derin yeraltı kömür madenlerinde PHEs konsepti (Schreiber et al. 2011).

Dünyada derin kömür madenlerinde işletilmekte olan herhangi bir PHEs tesisi henüz işletmeye alınmamıştır. Bu konuda en önemli araştırmalar Almanya’da gerçekleştirilmektedir. Almanya’da yenilenebilir enerjinin (rüzgar, güneş vb.) toplam enerji üretimi içindeki payı yaklaşık %20 civarında olup gelecekte bu payın daha da artması beklenmektedir. Bu durum büyük ölçekli enerji depolama tesislerine olan ihtiyacı artırmaktadır. 2018 yılı sonunda Almanya’da tüm yeraltı taşkömürü madenlerinde, ekonomik ve politik kararlardan dolayı, üretimin sona erecektir. Bu kapsamda mevcut maden alt yapılarının PHEs tesisine

dönüştürülmesi konusunda araştırmalar gerçekleştirilmektedir. İncelenmekte olan iki yeraltı taşkömürü madenine ait PHES proje verileri izelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5 Yeraltı kömür madenlerinde PHES projeleri (Niemann 2011).

Taşkömürü madeni	Prosper Haniel	Auguste Victoria
Alt rezervuar depolama hacmi	480,000 m ³	100,000 m ³
Statik dş (derinlik)	800 m	1,200 m
Verimlilik	0.65	0.65
Su akış hızı	11 m ³ /sn	2.3 m ³ /sn
Güç kapasitesi	56 MW	17 MW
Yıllık elektrik retimi	140 GWh/a	42.5 GWh/a

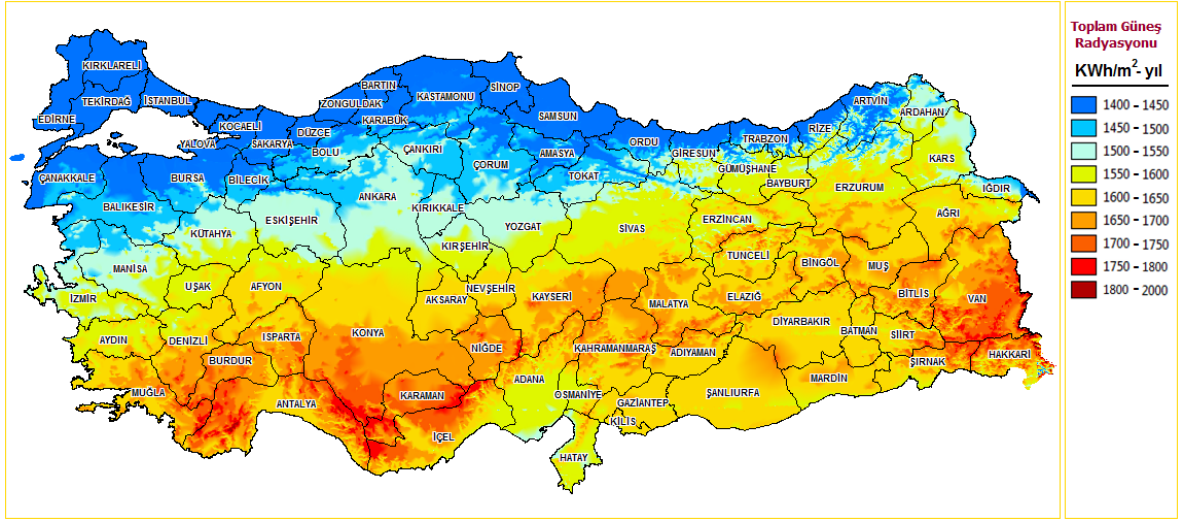
Ülkemizde birçok bölgede kömür yatakları ve madenleri olmasına karşın, taşkömürü rezervi ve üretimi sadece Zonguldak bölgesinde gerçekleştirilmektedir (şekil 2.10). Batı Karadeniz Bölgesinde yer alan Zonguldak taşkömürü havzasında; Kozlu, zlmez, Karadon, Armutçuk ve Amasra bölgelerinde yeraltından kömür üretimi yapılmaktadır. Bazı işletmelerde kuyu derinlikleri yerüstünden 500 m'den fazla olup, taşkömürü üretimi bu seviyelerde devam etmektedir.



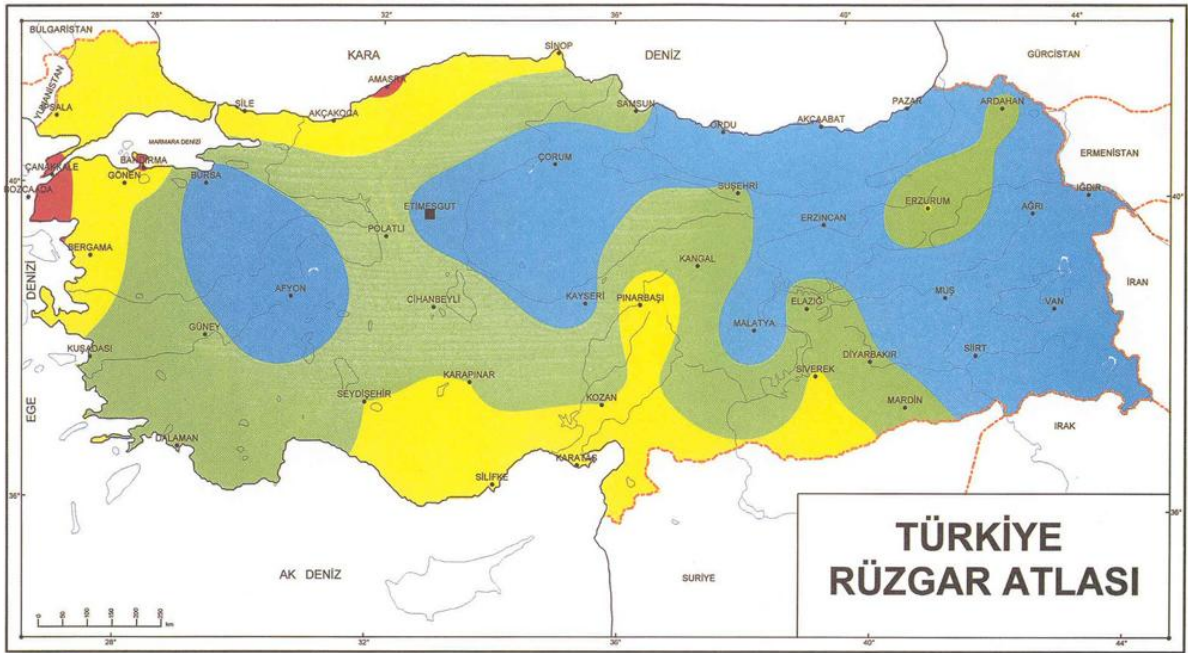
şekil 2.10 Türkiye kömür havzaları (EURACOAL 2013).

Batı Karadeniz Bölgesinde yenilenebilir enerji açısından güneş enerjisi potansiyeli diğer bölgelere kıyasla oldukça verimsizdir (şekil 2.11). Buna karşın rüzgar enerjisi potansiyeli daha fazladır. şekil 2.12'de Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli atlası haritası görülmektedir.

Haritadan Batı Karadeniz Bölgesinde özellikle Bartın-Amasra civarının önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.11 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası (YEGM 2013).



Beş farklı topoğrafik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri ¹										
	Kapalı Araziler ²		Açık Araziler ³		Kıyılar ⁴		Açık Deniz ⁵		Tepe ve Bayırlar ⁶	
	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Şekil 2.12 Türkiye rüzgar potansiyeli atlası (MGM 2013).

Tez çalışması kapsamında ülkemizde derin kömür madenlerinde PHES potansiyelini araştırmak için Amasra taşkömürü sahası seçilmiştir. Sahada üç adet derin (> 500 m) maden kuyusu açılmış olup ana galeriler aracılığıyla bağlantıları sağlanacaktır. Yeraltı madeninde taşkömürü üretimi yarı mekanize uzunayak yöntemi ile yapılacaktır. Üretim çalışmaları için panolarda ayak ve tabanyolu açıklıkları oluşturulacaktır. Bu yeraltı açıklıkları geçici açıklıklar olup, sahada kömür üretiminin tamamen sona erdirilmesinden sonra, sadece ana galeriler ve kuyular kullanılabilir durumda olacaktır. Çalışma kapsamında, gelecekte bölgede inşa edilecek rüzgar enerji tesisleri ile birlikte, derin kömür madeninden PHES tesisi olarak yararlanma olanakları için ön incelemeler yapılmıştır. Tez çalışmasında, özellikle PHES tesisinde alt rezervuar su depolama uygulamaları için, ana galerilerin uygunluğu jeomekanik açıdan incelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak Bölüm 5'te yeraltı kömür madeninde ana galeriler için ayrıntılı duraylılık çözümlenmeleri gerçekleştirilmiştir.

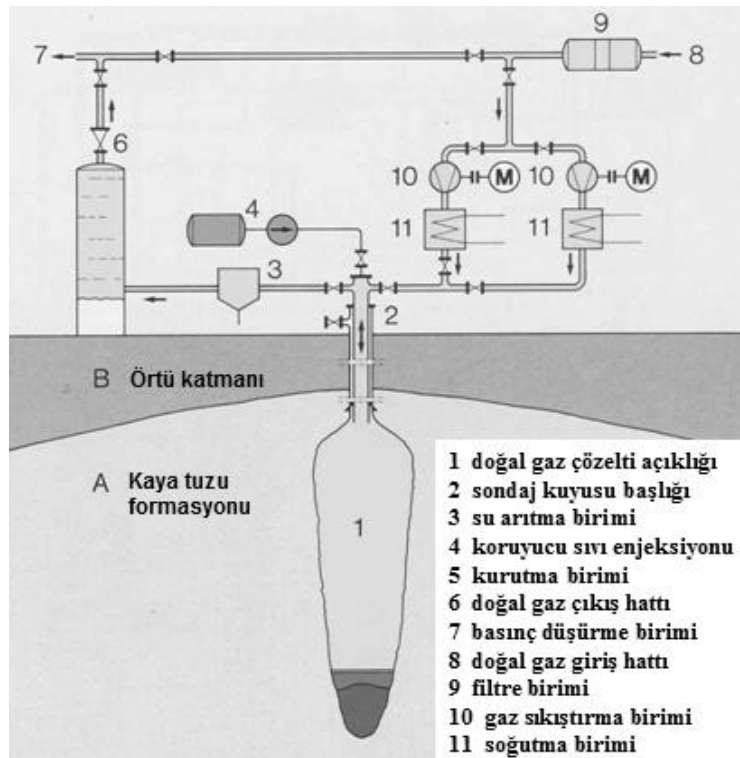
2.3 DİĞER DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Dünyada yaygın olarak kullanılmakta olan PHES dışında büyük ölçekli enerji depolama tesisleri ağırlıklı yeraltında sıkıştırılmış doğal gaz, hava ve hidrojen gazı depolama teknolojilerinden oluşmaktadır (Crotogino 2010, Özarslan 2012). Depolama uygulamaları için, uygun jeolojik tuz yataklarında çözelti madenciliği yöntemleriyle oluşturulan yeraltı depolama açıklıkları en uygun ortamlar olarak değerlendirilmektedir. Doğal kaya tuzu yatakları, sahip oldukları geçirimsizlik özellikleri ve madencilik yöntemleriyle (çözelti madenciliği, oda-topuk) yapay destek olmadan yaratılabilen duraylı büyük boyutlu açıklık hacimleri nedeniyle tercihli depolama ortamlarıdır. Tuz çözelti açıklıklarında duraylılık uygun tasarlanmış içsel gaz basınçları aracılığıyla sağlanmaktadır (Özarslan ve Gerçek 2002). Yeraltı tuz çözelti açıklıkları genel anlamda tuzun su ile çözündürülmesi sonucunda yaratılan geniş hacimli açıklıklardır. Çözelti madenciliği olarak da tanımlanan bu yöntemle kaya tuzu gibi suda eriyen evaporitik cevherlerin yeraltından çözelti ürünü olarak üretilmesi mümkün olmaktadır. Yöntemin esası, yeraltına sondaj kuyusu içerisine yerleştirilen boru vasıtasıyla gönderilen tatlı suyun, evaporitik tuz yataklarındaki katı tuz mineralleri ile temas etmesi sonucunda, tuzun çözündürülmesine dayanmaktadır. Bu yöntem özellikle yeterli kalınlık ve yayılıma sahip kaya tuzu yataklarında yıllardır başarıyla uygulanmaktadır (Özarslan ve Gerçek 2002). Önceden ağırlıklı olarak tuz üretme, sıvı petrol ürünleri ve doğal gaz depolama amacıyla oluşturulan tuz çözelti açıklıklarından son yıllarda büyük ölçekli enerji depolama

amaçlı sıkıştırılmış hava ve hidrojen gazı uygulamalarından da yararlanılmaktadır (Özarıslan 2012).

2.3.1 Yeraltı Tuz Açıklıklarında Doğal Gaz Depolama

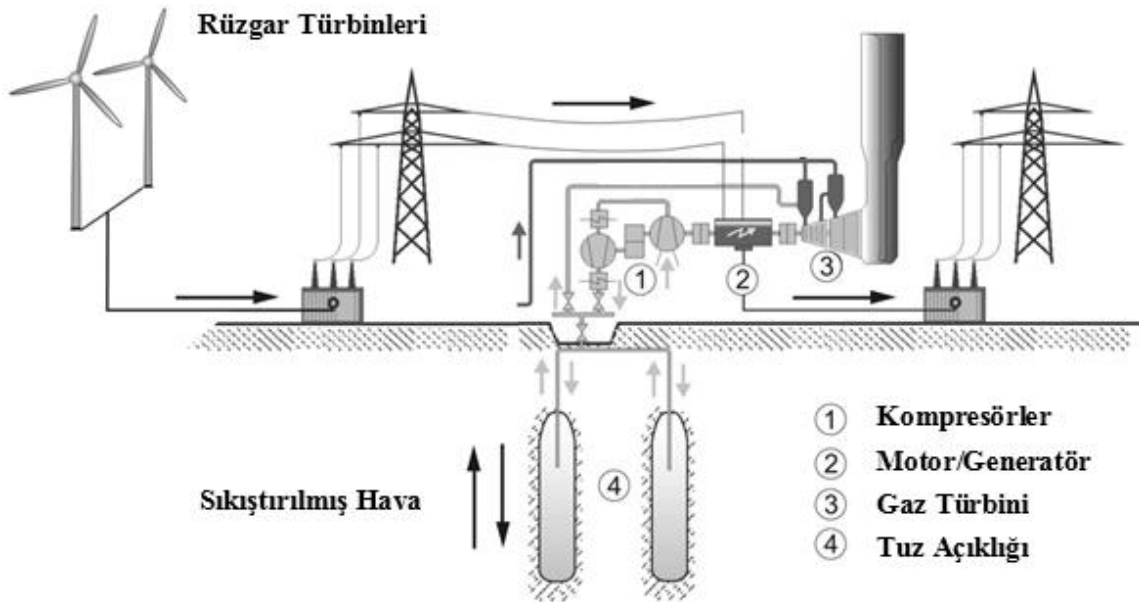
Tuz çözelti açıklıklarında doğal gaz depolama yaygın bir uygulama alanını teşkil etmektedir. Çözelti açıklıklarının istenen boşluk hacmine ve şekline ulaşmasından sonra, tuz çözeltisi üretimine benzer olarak, açıklığa yüksek basınçlı doğal gaz beslenmekte ve çözelti sıvısı içteki boru aracılığıyla yerüstüne tahliye edilmektedir. Doğal gazın çözelti açıklığını tamamen doldurmasından sonra, sondaj kuyusu başındaki vanalar kapatılmakta ve depo, mevsimsel ve kısa süreli doğal gaz talep artışlarını karşılayabilecek şekilde, hazır halde denetim altında bekletilmektedir (Özarıslan 2012). Şekil 2.13'te yeraltı tuz açıklıklarında işletilen bir yüksek basınçlı doğal gaz depolama tesisinin şematik görünümü verilmiştir. Genelde doğal gaz depolama açıklıkları talebin az olduğu yaz aylarında doldurulmakta ve tüketimin fazla olduğu kış aylarında, geçici yüksek seviyeli talep artışlarını karşılamak üzere, tesisten gaz çekilmektedir. Doğal gazdan kombine çevrim santralleri aracılığıyla iyi verimde elektrik üretimi gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 2.13 Yeraltı tuz açıklıklarında işletilen bir yüksek basınçlı doğal gaz depolama tesisine ait birimler (KBB 1988, Özarıslan 2012).

2.3.2 Yeraltı Tuz Açıklıklarında Sıkıştırılmış Hava Depolama

Sıkıştırılmış hava enerji depolama yöntemi (compressed air energy storage-CAES) dalgalanmalı ve süreksiz yenilebilir enerji kaynaklarının (rüzgar vb.) esnek bir enerji sisteminde daha verimli değerlendirilmesine katkıda bulunabilen bir teknolojidir. Sıkıştırılmış hava depolama yöntemi mevcut gaz türbini teknolojisinin geliştirilmiş bir şeklidir. Bu yöntemde özellikle talep fazlası oluşan rüzgar elektrik enerjisi havanın kompresörlerde sıkıştırılarak yeraltında depolanması için kullanılabilir. Elektrik şebekesinde oluşabilen pik talep saatlerinde hava ısıtmakta ve gaz yanma türbininde doğal gaz- basınçlı hava karışımı elektrik üretimi için beslenmektedir. Sadece doğal gaza dayalı bir elektrik üretim tesisinde enerjinin yaklaşık 2/3'ü havanın sıkıştırılması için kullanıldığından fiili üretime yansımamaktadır (Özarlan 2012). Yeraltı tuz açıklıklarında sıkıştırılmış hava depolama tesisinin şematik görünümü Şekil 2.14'de verilmiştir. Dünyada iki adet sıkıştırılmış hava depolamalı doğal gaz elektrik üretim tesisi işletilmektedir. Tesisler ile ilgili özet bilgiler Çizelge 2.6'da verilmiştir. Havanın ısıtılmasında ihtiyaç duyulan enerjinin kısıtlanması için ısı depolamalı adyabatik sıkıştırılmış hava depolama (ACAES) konseptleri üzerinde çalışılmaktadır. CAES tesislerinde genel verimlilik %42-54 civarında oluşurken, ACAES tesisleri ile enerji verimliliğinin %70 seviyelerinde gerçekleşeceği belirtilmektedir (Meiwees 2009).



Şekil 2.14 Tuz açıklıklarında sıkıştırılmış hava depolama tesisinin şematik görünümü (Crotagino 2010).

Çizelge 2.6 Tuz açıklıklarında sıkıştırılmış hava depolama tesisleri ile ilgili özet bilgiler (Özarıslan 2012).

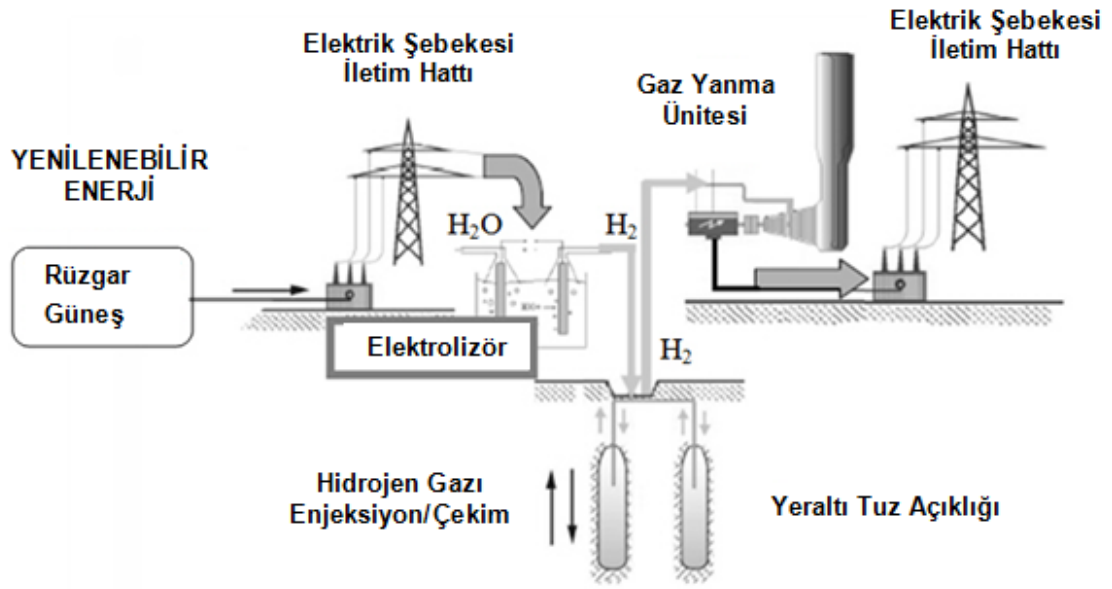
Konum	Huntorf-Almanya	McIntosh-ABD
İşletme Başlangıcı	1978	1991
Depo türü	Tuz açıklığı	Tuz açıklığı
Depo hacmi	2 x 150 000 m ³	538 000 m ³
Depo derinliği	600-800 m	450-750 m
Enerji ihtiyacı (1 kWh eşdeğer elektrik için)	0.8 kWh elektrik 1.6 kWh gaz	0.69 kWh elektrik 1.17 kWh gaz
Hava basınç aralığı	50-70 bar*	45-76 bar*
Çıkış gücü	290 MW 2 saat süresince	110 MW 26 saat süresince

* 10 bar \approx 1 MPa

2.3.3 Yeraltı Tuz Açıklıklarında Sıkıştırılmış Hidrojen Gazı Depolama

Hidrojen kimyasal olarak metallerde hidrür, düşük sıcaklıkta sıvı veya sıkıştırılmış gaz şeklinde depolanabilmektedir. Yeraltında uygun jeolojik formasyonlarda büyük ölçekli sıkıştırılmış hidrojen gazı depolama uygulamalarından, hidrojen talep dalgalanmalarını karşılamak ve rüzgar, güneş gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin depolanması ve hidrojenden yeniden elektrik üretmek için yararlanılabilmektedir. Tuz çözelti açıklıklarında sıkıştırılmış hidrojen gazı depolama uygulaması, depolama teknolojisi ve işletme koşulları açısından, doğal gaz depolama uygulaması ile benzerdir. Buna karşın, hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğu doğal gazın üçte biri seviyesindedir. Bundan dolayı birim hidrojen enerji depolama maliyeti doğal gaz depolama maliyetinden daha fazladır (Crotogino et al. 2010). Depolama uygulaması için derin (> 1000 m) yeraltı tuz açıklıklarında hidrojen gazı 20 MPa (200 bar) ve üstü değerlere sıkıştırılmaktadır. Yenilenebilir enerji (rüzgar, güneş) ve sudan elektrolizör ile hidrojen üretimi ve yeraltı tuz açıklıklarında depolama sisteminin şematik görünümü Şekil 2.15'de verilmiştir. Sistemin ana bileşenleri, yenilenebilir enerji üretimi için rüzgar türbini veya fotovoltaik modüller, sudan hidrojen ve oksijen üretimi için elektrolizör, kompresörlü gaz enjeksiyon ve çekim üniteleri, elektrik enerjisi üretimi için hidrojen gaz yakma ünitesinden oluşmaktadır. Günümüzde dünyada üç adet büyük ölçekli hidrojen gazı depolama tesisi işletilmekte olup, tamamı yeraltı tuz açıklıklarında bulunmaktadır (Özarıslan 2012). Yeraltı depolama açıklıkları gaz sanayisinin pik taleplerini güvence altına almak amacıyla işletilmekte ve dağıtım hidrojen boru hatları aracılığıyla gerçekleşmektedir. İngiltere ve ABD'de işletilen tesisler ile ilgili özet bilgiler Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Hidrojen yüksek basınç ve elektrik gerilimi etkisindeki elektrolizör aracılığıyla sudan üretilmektedir. Elektrik ihtiyacının rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması durumunda temiz bir hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemdeki en önemli olumsuzluk %40 civarındaki elektrikten-elektriğe dönüşüm verimliliğidir. Bu işlemler sırası, elektrolizden hidrojen üretimi, depolama ve gaz türbininde elektriğe dönüşüm işlemlerinden oluşmaktadır. Bu düşük verimlilik değerlerine karşın, yeraltında hidrojen depolama yöntemi günümüzde büyük ölçekli (GWh) ve uzun süreli (haftalar) elektrik enerjisi depolama uygulaması için en avantajlı yöntem olarak değerlendirilmektedir (Özarslan 2012).



Şekil 2.15 Yenilenebilir enerjiden (rüzgar, güneş) hidrojen üretimi ve tuz çözelti açıklıklarında depolama sisteminin şematik görünümü (Özarslan 2012).

Çizelge 2.7 Yeraltında hidrojen gazı depolama tesisleri ile ilgili özet bilgiler (Özarslan 2012).

Konum	Teeside-İngiltere	Chevron, Texas-ABD
Depo türü	Tuz açıklığı	Tuz açıklığı
Depo hacmi	3 x 150,000 m ³	580,000 m ³
Depo derinliği	≈ 370 m	850-1150 m
Gaz basıncı	45 bar* (sabit)	70-135 bar*
Enerji	24.4 GWh	83.3 GWh

* 10 bar ≈ 1 MPa

BÖLÜM 3

KAYA MALZEMELERİ İLE KAYA KÜTLELERİNİN DAYANIM VE DEFORMABİLİTELERİ

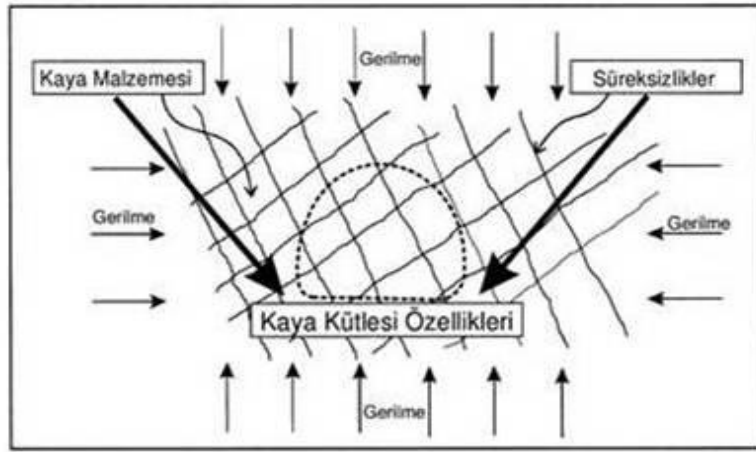
3.1 GENEL BİLGİLER

İleri derecede eklemli kaya kütlelerinde oluşturulan mühendislik yapılarının tasarımında karşılaşılan başlıca problemlerden biri de, kaya kütlelerinin dayanımı ve deformasyon özelliklerinin tayin edilmesi ile ilgili güçlüklerdir. Kaya kütleleri için bu özelliklerin nasıl tayin edileceği konusunda teorik ve deneysel güçlüklerle karşılaşmaktadır. İçerdiği süreksizliklerle birlikte kaya kütlelerinden laboratuvar deneyleri için örnek alınamaması, ayrıca kaya kütlelerinin davranışının hem kayaç malzemesi, hem de süreksizlikler tarafından ortaklaşa bir biçimde denetlenmesi bu güçlüklerin başında gelmektedir. Bununla birlikte, söz konusu güçlüklerin aşılması konusunda yapılan çalışmalar sonucunda kaya kütlelerinin dayanımının ve şekil değiştirme özelliklerinin tayinine yönelik amaçlarla görgül ölçütler geliştirilmiştir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Kaya malzemesi, kaya kütlelerinde eklem tabakalanma, şistozite fay vb. gibi doğal süreksizliklerin arasında kalan ve malzemenin çekme dayanımının azalmasına neden olabilecek herhangi bir kırık veya zayıflık düzlemi içermeyen değişik boyutlardaki kaya parçalarıdır. Diğer bir ifadeyle sağlam kaya malzemesi, herhangi bir kırık içermeyen en küçük kaya elemanıdır. Kaya malzemesinde bazen mikro kırıklar veya çatlaklar bulunmakla birlikte bunlar süreksizlik olarak dikkate alınmazlar. Bu kaya parçaları, birkaç milimetreden metrelerce uzunluğa kadar olabilirler ve genellikle bunların elastik ve izotrop davranış gösterdikleri kabul edilir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Kaya kütleleri veya yerindeki kaya, süreksizlik ağı ile kaya malzemesinin birlikte oluşturdukları kütle veya sistemdir (Şekil 3.1). Süreksizlikler, en genel anlamıyla, kaya kütleleri içinde bazı özelliklerin süreksizlik gösterdiği yüzeylerdir. Yapısal süreksizlikler ise

dayanımda zayıflığa sebep olan yüzeyler şeklinde ifade edilmektedir (Gerçek 2005). Kaya kütlelerinde süreksizliklerle sınırlanan kaya malzemesi blokları, taze kaya malzemesinden bozunmuş, ayrılmış kayaya kadar değişik özellikler gösterebilir. Kaya kütlelerinin belirli bir gerilme altındaki davranışı, genellikle kaya malzemesine ait bloklar ile süreksizlikler arasındaki etkileşim tarafından denetlenir. Dolayısıyla kaya malzemesi, kendisiyle birlikte süreksizlikleri ve bozunma profilini de içine alan kaya kütlesi kavramından farklıdır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, eklemli kaya kütlesi ortamında yeraltı açıklığının boyutu arttıkça, bu boyut kaya malzemesini temsil eden bloklardan daha büyük olacağı için, burada açıklığın davranışı tek başına kaya malzemesi veya süreksizlikler tarafından değil, her iki elemanı da içeren kaya kütlelerinin davranışıyla denetlenmektedir (Ulusay ve Sönmez 2007).



Şekil 3.1 Kaya malzemesi ve kaya kütlesi kavramları (Hudson 1989, Ulusay ve Sönmez 2007).

3.2 HOEK – BROWN GÖRGÜL YENİLME ÖLÇÜTÜ

İlk kez 1980 yılında önerilen ölçüt (Hoek ve Brown 1980), kaya mekaniğinin birçok alanında uygulanabilirliği sayesinde, seksenli yılların kaya mekaniği bilim dalındaki en ilginç gelişmelerden biri olmuştur. Ölçütün kaya malzemesinin yanı sıra, sık eklemli kaya kütlelerine de uygulanabilirliği, ayrıca bunların dayanım ve deformasyon sabitlerinin bazı pratik çizelgeler ve görgül ilişkiler aracılığıyla belirlenebilmesine olanak sağlaması, bu tür ortamlarda çoğu kez sınırlı sayıda veriyle çalışmak durumunda kalan tasarımcılar açısından ölçütü çekici hale getirmiştir (Gerçek 1996). Zaman içinde ölçüt, ölçütü geliştirenler ve diğer bazı araştırmacılar tarafından değişikliklere uğratarak uygulamadaki pratikliği arttırılmaya çalışılmıştır (Hoek et al. 2002, Ulusay ve Sönmez 2007).

Kayalar küçük ölçekte dikkate alındıklarında kaya malzemesi önem kazanırken, ölçek büyüdüğünde sağlam kaya malzemesinden eklemli kaya kütlelerine geçiş söz konusudur. Farklı yöntemlerle gelişmiş çok sayıdaki süreksizlik tarafından bölünmüş kaya kütlelerinin davranışı, kaya malzemesinin aksine, hem süreksizlikler, hem de kaya malzemesi tarafından denetlenir. Dolayısıyla kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin, kaya malzemesiyle birlikte süreksizlikleri de içerecek boyutlardaki örnekler üzerinde tayin edilmesi gerekir. Ancak bu tür ortamlardan, kaya malzemesiyle birlikte süreksizlikleri de içeren ve metre boyutuna ulaşan örneklerin alınması ve bunların laboratuvar deneyleri için hazırlanmaları mümkün olmadığı gibi, bu boyuttaki örnekler için laboratuvar kullanılabilecek büyük deney hücreleri de geliştirilmemiştir. Bu sınırlamalar, araştırmacıları kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin daha pratik şekilde belirlenebileceği yöntemlerin geliştirilmesine zorlamıştır. Seksenli yılların başında geliştirilen ve günümüze değin bazı değişikliklere de uğrayan Hoek–Brown (H-B) yenilme ölçütü görgül bir ölçüt olup, kaya kütlelerinin dayanımının belirlenmesiyle ilgili söz konusu sınırlamaların giderilmesi hedeflenmiştir. H-B yenilme ölçütünün tarihsel gelişimi ile ilgili olarak çeşitli kaynaklarda ayrıntılı bilgiler edinilebilir (Gerçek 1996, Hoek et al. 2002, Ulusay ve Sönmez 2007). Bu çalışmada H-B yenilme ölçütünün son durumunu içerecek şekilde bilgiler verilmiştir.

Eklemli kaya kütleleri için genelleştirilmiş H-B yenilme ölçüte aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

Genelleştirilmiş H-B yenilme ölçütü

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3.1)$$

$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$: Yenilme anında uygulanmakta olan en büyük ve en küçük asal etkin gerilmeler.

σ_{ci} : Sağlam ve çatlaksız (intact) kaya malzemesinin (laboratuvar örneklerinin) tek eksenli basınç dayanımı

m_b : Kaya kütleleri için H-B sabiti değeridir

s, a : Kaya kütlelerinin özelliklerine bağlı sabitlerdir.

İyi kenetlenmiş ve köşeli kaya parçalarından oluşan iyi kaliteli kaya kütlelerinde eşitlik 'a' üssel değeri 0.5 alınarak ölçüt özgün haline dönüştürülebilmektedir. Gerçek (2005) tarafından kaya kütlesi için jeolojik dayanım indeksi $GSI \geq 50$ olduğunda a değıştirgesinin 0.5 alınabileceği belirtilmektedir.

Özgün H-B yenilme ölçütü

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (3.2)$$

Sağlam ve çatlaksız (intact) kaya malzemesi için $m=m_i$ ve $s=s_i=1$; eklemli kaya kütlesi için $m=m_b$; kırılmış/yenilmiş kaya için $m=m_r$ ve $s=s_r$; tamamen kırılmış kaya için $s=0$ alınır (Gerçek 2005). Ölçüt $a=0.5$, m_i sabiti ve laboratuvar malzemesi için $s=1$ alınarak kaya malzemesi için de kullanılabilir.

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (3.3)$$

Belli bir kaya kütlesi için yenilme anındaki asal gerilmeler arasındaki ilişki, tek eksenli basınç dayanımı σ_{ci} ve m_i sabiti ile tanımlanmaktadır. Mümkün olan her durumda bu sabit değerler, dikkatlice hazırlanmış olan karot örnekleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçları kullanılarak istatistiksel çözümleme ile belirlenmelidir. Çeşitli kaya türleri için, deney verilerinin olmaması durumunda, kaya malzemesi m_i sabitini belirleme çizelgesi önerilmiştir. m_i sabitlerinin tayini için önerilen değerler Şekil 3.2'de verilmiştir.

Üç eksenli basınç dayanımı yapılamayan kaya birimleri için H-B sabiti olan m_i değeri belirlenmemektedir. Tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı deneylerinin yapıldığı bu durumlarda ise m_i Eşitlik 3.4 kullanılarak tahmin edilmiştir.

$$m_i = \frac{16\sigma_{tB}}{\sigma_{ci}} - \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{tB}} \quad (3.4)$$

Kaya türü	Sınıf	Grup	İri	Orta	İnce	Çok ince
SEDİMANTER	Klastik		Konglomera (22)	Kumtaşı 19	Silttaşı 9	Kiltaşı 4
	Klastik	Organik	← Grovak → (18)			
		Kimyasal	← Tebeşir Taşı → (18) ← Kömür → (18)			
		Karbonatlı	Breş (20)	Sparitik Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı 8	
			Jips (16)	Anhidrit (13)		
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9	Hornfels (19)	Kuarsit 24	
	Düşük foliasyonlu		Migmatit (30)	Amfibolit 31	Milonit (6)	
	Foliasyonlu*		Gnays 33	Şist (10)	Fillit (10)	Sleyt 9
MAĞMATİK	Açık	↑	Granit 33		Riyolit (16)	Obsidyen (19)
			Granodiyorit (30)		Dasit (17)	
	Koyu		Diyorit (28)		Andezit 19	
Gabro 27			Dolerit (19)	Bazalt (17)		
		Norit 22				
	Püskürtük piroklastik		Aglomera (20)	Breş (18)	Tüf (15)	

Parantez içindeki değerler tahminidir.

* Bu değerler, foliasyona dik yönde deneye tabi tutulmuş kaya malzemeleri için olup, yenilmenin foliasyon düzlemleri boyunca gerçekleşmesi halinde m_i önemli ölçüde farklı olacaktır.

Şekil 3.2 Kaya malzemesi için m_i sabitinin değerleri (Hoek et al. 1995, Ulusay ve Sönmez 2007).

m_i sabitinin değerleri Hoek (2007) tarafından güncellenmiştir. Güncellenen kaya türü içinden konglomera, kumtaşı, silttaşı ve kiltası değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Güncellenen kaya malzemesi için m_i sabiti değerleri (Hoek 2007).

Kayaç Türü	m _i sabiti değeri
Konglomera	22 ± 3
Kumtaşı	17 ± 4
Silttaşı	7 ± 2
Kiltaşı	4 ± 2

Örselenmemiş eklemli kaya kütleleri için m_b , s ve a değerleri aşağıdaki eşitliklerden bulunabilmektedir.

$$m_b = m_i \exp \frac{GSI-100}{28} \quad (3.5)$$




$$s = \exp \frac{GSI-100}{9} \quad (3.6)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (3.7)$$

Örselenmiş eklemli kaya kütlesi için aşağıdaki bağıntıların kullanılması önerilmiştir. Burada D simgesiyle gösterilen örselenme faktörü, patlatma hasarı ve kazı sırasında gelişen gerilme boşalmasına maruz kalan kaya kütlelerinin örselenme derecesine bağlı bir faktör olarak önerilmiştir. Hoek et al. (2002) tarafından D 'nin seçimi için önerilmiş kılavuz Şekil 3.3'de verilmiştir.

$$m_b = m_i \exp \frac{GSI-100}{28-14D} \quad (3.8)$$

$$s = \exp \frac{GSI-100}{9-3D} \quad (3.9)$$

Kaya kütlelerinin görünümü	Kaya kütlesi tanımı	Önerilen D değeri
	Yüksek kaliteli denetimli patlatma veya tünel açma makinesiyle yapılan kazı tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur.	D = 0
	Düşük kaliteli kaya kütlelerinde (patlatma yapılmamış) mekanik olarak veya elle yapılan kazı, tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur. Sıkışan zemin sorunu önemli derecede taban kabarmasına yol açar ve soldaki fotoğraftaki gibi geçici bir taban betonu dökülmediği takdirde önemli düzeyde örselenme olur.	D = 0 D = 0.5 Taban betonu yok
	Çok kötü kaliteli patlatma sert kaya tünellerinde çevre kayasının 2-3 m içine nüfuz edecek şekilde şiddetli yerel hasara neden olur.	D = 0.8

Şekil 3.3 Örselenme faktörü D'nin seçimi (Hoek et al. 2002, Ulusay ve Sönmez 2007).

3.3 JEOLJİK DAYANIM İNDEKSİ SINIFLAMASI (GSI)

Eklemlili kaya kütlelerinin dayanımı, sağlam kaya parçasının özelliklerine ve ayrıca farklı gerilme koşulları altında bu parçaların kayma ve dönme serbestliklerine bağlıdır. Bu serbestlik, sağlam kayanın geometrik şekli ve bu parçaların birbirinden ayıran yüzeylerin durumu ile kontrol edilmektedir. Temiz, kaba süreksizlik yüzeyleri içeren köşeli kaya parçaları, bozunmuş ve alterasyona uğramış malzemeler ile çevrili yuvarlak parçalar içeren kaya kütlelerinden çok daha sağlam kaya kütlelerini oluşturmaktadır. Hoek (1995) ve Hoek, Kaiser ve Bawden (1995) tarafından önerilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI Geological Strength Index), farklı jeolojik koşullar için kaya kütle dayanımındaki azalmayı kestiren bir sistem sağlamaktadır. Bu sistem Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Başlangıçta, RMR ve Q sınıflaması puanlarıyla ilişkilendirilen GSI, sonraki yıllarda yapılan değişikliklerle ayrı bir sınıflama sistemi olarak yerini almıştır. GSI, 85'den (kaya malzemeleri) 10'a (çok düşük kaliteli kaya kütleleri) kadar değişen değerler alabilmektedir (Ulusay ve Sönmez 2007).

JEOLJİK DAYANIM İNDEKSİ (GSI)		YÜZEY KOŞULLARI	
<p>Kaya kütesinin yapısı ve süreksizliklerin yüzey koşulları göz önünde bulundurularak bu çizimden uygun bir kutucuğu seçin. Konturları kullanarak ortalama bir GSI değeri kestirin. Çok hassas olmaya çalışmayın; GSI=38 yerine, GSI=35-40 aralığının belirtilmesi daha gerçekçidir. Hoek-Brown ölçütü yalnızca kaya blokları veya parçalarının boyutunun açıklık boyutuna kıyasla daha küçük olduğu kaya kütlelerine uygulanabilir. Ortamdaki blokların boyutu yeraltı açıklığı boyutunun yaklaşık dörtte birinden büyüğe, yenilme bireysel blok hareketleriyle oluşabilir ve bu durumda Hoek-Brown Ölçütü kullanılmamalıdır.</p> <p>KAYA YAPISI</p>		<p>AZALAN YÜZEY KALİTESİ →</p>	
<p>SAĞLAM VEYA MASİF - Sağlam, çatlaksız kaya malzemesi veya geniş aralıklı çok az sayıda süreksizlik içeren masif kaya kütesi.</p>		<p>KAYA PARÇALARININ AZALAN KİLİTLENME DERECESİ</p> <p>90</p> <p>80</p> <p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p> <p>5</p>	
<p>BLOKLU - Birbirine dik üç süreksizlik takımının oluşturduğu kübik bloklar içeren, çok iyi kilitlemiş ve örselenmemiş kaya kütesi.</p>		<p>UYGULANAMAZ</p>	
<p>ÇOK BLOKLU - Dört veya daha fazla süreksizlik takımının oluşturduğu çok yüzeyli ve köşeli bloklar içeren, kenetlenmiş ve kısmen örselenmiş kaya kütesi</p>		<p>UYGULANAMAZ</p>	
<p>BLOKLU/RAHATSIZ EDİLMİŞ - birbirini kesen bir çok süreksizlik takımının oluşturduğu, köşeli bloklar içeren kıvrımlanmış ve/veya faylanmış kaya kütesi.</p>		<p>UYGULANAMAZ</p>	
<p>DAĞILMIŞ - Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının karışımından oluşan, zayıfça kenetlenmiş ve aşırı derecede kırılmış kaya kütesi.</p>		<p>UYGULANAMAZ</p>	
<p>YAPRAKLANMIŞ/İNCE TABAKALANMIŞ - Kıvrımlanmaya ve tektonik olarak kesme hareketlerine maruz kalmış, yapraklanmış kaya kütesi. Diğer süreksizlik takımlarına kıyasla daha egemen olan ince tabakalanma, kaya kütesindeki bloklanmayı önler.</p>		<p>UYGULANAMAZ</p>	

Şekil 3.4 Jeolojik tanımlamalara dayalı Jeolojik Dayanım İndeksi'nin tahmin edilmesi (Hoek et al. 1998, Geniş 2002).

Kaya kütesi kalitesinin belirlenmesinde sondaj karotlarından yararlanılması durumunda Hoek ve Brown (1997), makul düzeyde kaliteli sayılabilecek kaya kütleleri (GSI>25) için en iyi

yaklaşımın RMR puanı sondaj karotlarından belirlendikten sonra GSI'nin RMR'dan belirlenmesi olduğunu belirtmektedirler. Zayıf kaya kütlerinde (GSI<25) boyu 100 mm'den daha büyük olan sağlam karotların genelde çok az miktarda alınabilmesi nedeniyle, RMR'ın sağlıklı şekilde tayini de güçleşmektedir. Bu nedenle aynı araştırmacılar, bu tür kaya kütlerinde GSI'nin karotların genel görünümünün değerlendirilerek tahmin edilmesini önermişlerdir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Özellikle kaya kütlelerinde süreksizlik içindeki su, kaya kütlelerinin kayma dayanımını azaltmaktadır. Özellikle çok zayıf süreksizlikler olduğunda ıslak durumlar için bu durum geçerlidir. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi zayıf ve su içeren kaya kütlelerinde GSI değeri için sağ doğru bir seçim yapılmasının daha uygun olacağı ifade edilmektedir (Marinos et al. 2005).

Ölçütün gerek 1995, gerekse 1997'deki versiyonlarında yer alan ve 3.5 ve 3.6 nolu eşitliklerde verilen bağıntılardan da görüleceği üzere, GSI'deki küçük bir değişim kaya kütleleri sabitlerini doğrudan etkilemektedir. Bu husus gözetilerek, Şekil 3.4'de verilen grafikten süreksizlik yüzeyi koşulunun ve kaya kütleleri yapısının doğru ve duyarlı bir şekilde tayini amacıyla ölçülebilen veya tanımlanabilen bir puanlama sistemine geçilmesi gerekli görülmüştür. Bu amaçla, Yapısal Özellik Puanı (SR) ve Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (SCR) olarak tanımlanan iki parametrenin sisteme dahil edilmesi önerilmiştir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Süreksizlik yüzey koşulunun tanımlanması amacıyla RMR Sınıflama Sistemi'nin dolgu, bozunma ve pürüzlülükle ilgili olarak önerdiği tanımlamalar ve Bieniawski (1989) tarafından bu parametrelere verilen puanlar kullanılmış olup, Süreksizlik Yüzey Koşulu için 0 ile 18 arasında değişen puanlar atanmıştır. Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı Eşitlik 3.10'dan hesaplanmaktadır.

$$SCR=R_r+R_w+R_f \quad (3.10)$$

Burada, R_r , R_w , ve R_f sırasıyla; süreksizliklerin pürüzlülük, bozunma ve dolgu puanları olup Şekil 3.6'da verilen modifiye edilmiş GSI grafiğinin sağ üst köşesindeki çizelgeden belirlenmektedir.

Blok büyüklüğü, kaya kütlelerinin yapısının tanımlanmasında kullanılan çok önemli bir göstergedir. Büyük blokların oluşturduğu kaya kütleleri, küçük bloklardan oluşan kaya kütlelerine oranla daha az deforme olurlar. Süreksizliklerin sayısı, aralığı ve devamlılığı kaya kütlelerini oluşturan blokların büyüklüğünü ve şeklini denetleyen parametrelerdir. Bir kaya kütlelerini bölen süreksizlik takımlarının aralığının düşük olması, blok boyutunun da küçük olması anlamına gelmektedir. GSI'nin hesaplanmasında kullanılan girdi parametrelerinin sayısının azaltılarak uygulamada kolaylık sağlanması açısından hem süreksizlik aralığını, hem de süreksizlik sayısını birlikte ifade eden hacimsel eklem sayısı (J_v), Yapısal Özellik Puanı (SR) belirlenmesi amacıyla önerilmiştir

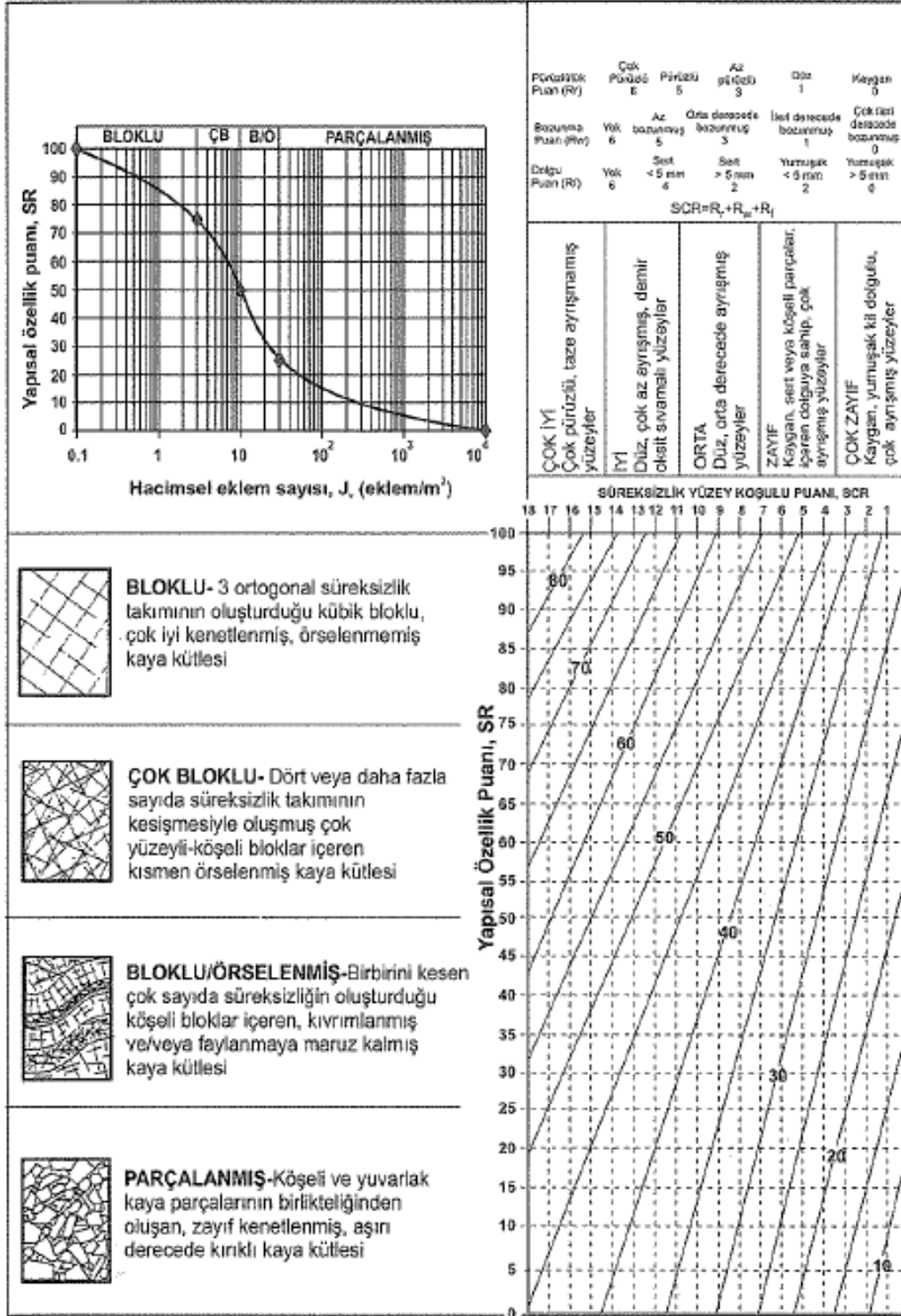
J_v için ISRM (1981) tarafından önerilen aralıklar (Çizelge 3.2) esas alınmış ve Yapısal Özellik Puanı (SR) GSI Sistemi'ne uyarlanmıştır. Buna göre, Yapısal Özellik Puanı (SR), hesaplanan J_v kullanılarak Şekil 3.6'nın sol üst köşesinde verilen abaktan tayin edilmektedir. Böylelikle GSI Sınıflama Sistemi abağı önerilen SR ve SCR parametrelerinin sisteme dahil edilmesiyle daha duyarlı ve özellikle uygulayıcıdan kaynaklanabilecek hatayı en aza indirecek şekilde düzenlenmiştir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Çizelge 3.2 Blok boyutu tanımlamaları ve J_v parametresi aralıkları (Sönmez ve Ulusay 1999, Ulusay ve Sönmez 2007).

<u>ISRM (1981)'nin tanımları</u>	<u>J_v (eklem/m^3)</u>	<u>GSI için önerilen tanımlar</u>
Çok büyük bloklar	<1	BLOKLU (B)
Büyük bloklar	1-3	
Orta boyutlu bloklar	3-10	ÇOK BLOKLU (ÇB)
Küçük bloklar	10-30	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ(B/ Ö)
Çok küçük bloklar	30-60	PARÇALANMIŞ (P)
Parçalanmış/Ufalanmış	>60	

Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)		YÜZEY KOŞULLARI									
		Azalan yüzey niteliği →									
<p>Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)</p> <p>Kaya kütesinin yapısı ve süreksizliklerin yüzey koşulları göz önünde bulundurularak bu çizenekten uygun bir kutucuğu seçin. Konturları kullanarak ortalama bir GSI değeri kestirin. Çok hassas olmaya çalışmayın; GSI = 38 yerine, GSI için 35 - 40 aralığının belirtilmesi daha gerçekçidir. Hoek-Brown Ötçütü yalnızca kaya blokları veya parçalarının boyutunun açıklık boyutuna kıyasla daha küçük olduğu kaya kütelere uygulanabilir. Ortadaki blokların boyutu yer altı açıklığı boyutunun yakdağık dörtte birinden büyükse, yenilme bireysel blok hareketleriyle oluşabilir ve bu durumda Hoek-Brown Ötçütü kullanılmamalıdır.</p>		<p>ÇOK İYİ Çok pürüzlü, tuz, ayrışmamış yüzeyler.</p>	<p>İYİ Pürüzlü, hafifçe ayrışmış, köşeli yüzeyler.</p>	<p>ORTA Düzgün, orta derecede ayrışmış ve bozrumlu yüzeyler.</p>	<p>ZAYIF Kırılgan, köşeli parçacıklar içeren kaplamalı veya dolgu, ileri derecede ayrışmış yüzeyler.</p>	<p>ÇOK ZAYIF Kırılgan, yuvarlak kıl kaplamalı veya dolgu, ileri derecede ayrışmış yüzeyler.</p>					
<p>KAYA YAPISI Kaya parçalarının artan kemaleme derecesi ↑</p>	<p>SAĞLAM VEY AMASİF Sağlam, çatlaklız kaya malzemesinin veya geniş aralıklı çok az sayıda süreksizlik içeren masif kaya kütesi.</p>	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
	<p>BLOKLU Birbirine dik 3 süreksizlik takımının oluşturduğu kübik bloklar içeren, çok iyi kenetlenmiş ve örselememiş kaya kütesi.</p>										
	<p>ÇOK BLOKLU Dört veya daha fazla süreksizlik takımının oluşturduğu çok yüzeyli ve köşeli bloklar içeren, kenetlenmiş ve kısmen örselemiş kaya kütesi.</p>										
	<p>BLOKLU / ÖRSELENMİŞ Birbirini kesen bir çok süreksizlik takımının oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kırılmış ve/veya faylanmış kaya kütesi.</p>										
	<p>DAĞILMIŞ Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının karışımından oluşan, zayıfça kenetlenmiş ve aşırı derecede kırılmış kaya kütesi.</p>										
	<p>YAPRAKLANMIŞ İNCE TABAKALANMIŞ Kıvrımlanmaya ve tektonik olarak kesme hareketlerine maruz kalmış, yapraklanmış kaya kütesi. Diğer süreksizlik takımlarına kıyasla daha eğmen olan ince tabakalanma, kaya kütesindeki blokların boyutunu belirler.</p>										
		UYGULANAMAZ									

Şekil 3.5 Zayıf ve su içeren kaya kütesi koşullarında GSI değerinin değişimi (Marinos et al. 2005).



Şekil 3.6 Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından önerilen modifiye edilmiş GSI Sistemi (Ulusay ve Sönmez 2007).

3.4 KAYA KÜTLELERİNİN DAYANIMI (σ_{cm})

Kaya kütleleri için; tek eksenli basınç (sıkışma) dayanımının kestirimi için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen görgül ilişkiler ön plana çıkmaktadır. Bazı araştırmacılar kaya kütlelerinin çekme dayanımı için de bağıntılar önermiştir.

Genelde kaya kütleleri dayanımının (σ_{cm}) görgül ilişkiler aracılığıyla kestirimi için; kaya kütleleri sınıflama puanlarından (RMR, GSI, Q), kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımından (σ_{ci}) ve bazı eşitliklerde kaya kütlelerinin yoğunluğundan yararlanılmaktadır. Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının kestirimi için kullanılan önemli eşitlikler Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının (σ_c kütle) kestirimi için önerilen görgül bağıntılar (Genis et al. 2007).

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	Açıklamalar
Hoek ve Brown (1980)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \sqrt{e^{\frac{(RMR-100)}{9}}}$ (MPa)	
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{\frac{7.65(RMR-100)}{100}}$ (MPa)	σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{\frac{(RMR-100)}{18.75}}$ (MPa)	
Kalamaris ve Bieniawski (1995)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{\frac{7.65(RMR-100)}{24}}$ (MPa)	
Bhasin ve Grimstad (1996)	$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{100} 7\gamma Q^{1/3}$ (MPa)	γ kaya kütlelerinin yoğunluğu (t/m^3)
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{\frac{(RMR-100)}{20}}$ (MPa)	
Trueman (1998)	$\sigma_{cm} = 0.5e^{0.06RMR}$ (MPa)	
Aydan ve Dalgıç (1998)	$\sigma_{cm} = \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)} \sigma_{ci}$ (MPa)	$\beta = 6$
Barton (2000)	$\sigma_{cm} = 5\gamma(Q \frac{\sigma_{ci}}{100})^{1/3}$ (MPa)	
Hoek et al. (2002)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a$ (MPa)	

Hoek vd. (2002) kırılğan-gevrek kaya malzemelerinde tek eksenli çekme dayanımının iki eksenli (biaxial) çekme durumundaki çekme dayanımına eşit olduğunu ifade etmişlerdir. Özgün H-B ölçütünde bu durum ($\sigma_{max} = \sigma_{min} = \sigma_t$) aktarıldığında kaya kütlelerinin çekme dayanımı Eşitlik 3.11’den tahmin edilebilmektedir (Hoek et al. 2002).

$$\sigma_{tm} = -\frac{S\sigma_{ci}}{m_b} \quad (3.11)$$

Genel olarak süreksizlikler içeren bir kaya kütesinin süreksizlikler arası çekme dayanımı 0 olarak kabul edilebilmektedir.

3.5 KAYA KÜTLELERİNİN DEFORMASYON MODÜLÜ (E_m)

Kaya kütesi deformasyon (elastisite) modülünün (E_m) arazide belirlenmesi hem zor hem de maliyeti yüksek bir çalışmadır. Dolayısıyla deformasyon modülünün belirlenmesi için görgül eşitliklerin kullanılması genelde tercih edilir. Yaygın olarak kullanılan bazı eşitlikler aşağıda listelenmiştir (Geniş et al. 2007, Ulusay ve Sönmez 2007). Verilen eşitliklerde kaya kütesinin deformasyon modülünün kestiriminde kaya kütesi sınıflama puanlarından (RMR, Q, GSI), kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımından (σ_{ci}) yararlanılmaktadır. Bazı eşitliklerde kaya malzemesinin elastisite modülünden (E_i) de yararlanılmaktadır. Yine bazı araştırmacılar kazı esnasında (mekanik kazı, patlatma) kaya kütesinin olası örselenmesini göz önünde bulundurabilmek için örselenme faktörü (D) kavramını kullanmaktadır.

Çizelge 3.4 Kaya kütlesinin deformasyon modülünün (E_m) kestirimi için önerilen görgül bağıntılar (Ulusay ve Sönmez 2007).

Araştırmacı(lar)	Eşitlik	Açıklama
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$ (GPa)	RMR > 50 için
Serafim ve Pereira (1983)	$E_m = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}}$ (GPa)	RMR < 50 için
Grimstad ve Barton (1993)	$E_m = 25 \log Q$ (GPa)	$Q > 1$ için
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$	$\sigma_{ci} \leq 100$ MPa için
Read et. al. (1999)	$E_m = 0.1 \left(\frac{RMR}{10} \right)^3$	
Barton (2002)	$E_m = 10Q \frac{\sigma_{ci}^{1/3}}{100}$	
Hoek et al. (2002)a	$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$	$\sigma_{ci} \leq 100$ MPa için D örselenme faktörü
Hoek et al. (2002)b	$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\frac{GSI-10}{40}}$	$\sigma_{ci} > 100$ MPa için D örselenme faktörü
Hoek ve Diederichs (2006)a	$E_m = 100000 \left(\frac{1-D/2}{1+e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right)$	E_i bilinmiyorsa
Hoek ve Diederichs (2006)b	$E_m = E_i \left(0.2 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$	D örselenme faktörü
Sönmez vd. (2006)	$E_m = E_i 10^{\lfloor \frac{[RMR-100](100-RMR)}{4000 \exp(-RMR/100)} \rfloor \rfloor}$	

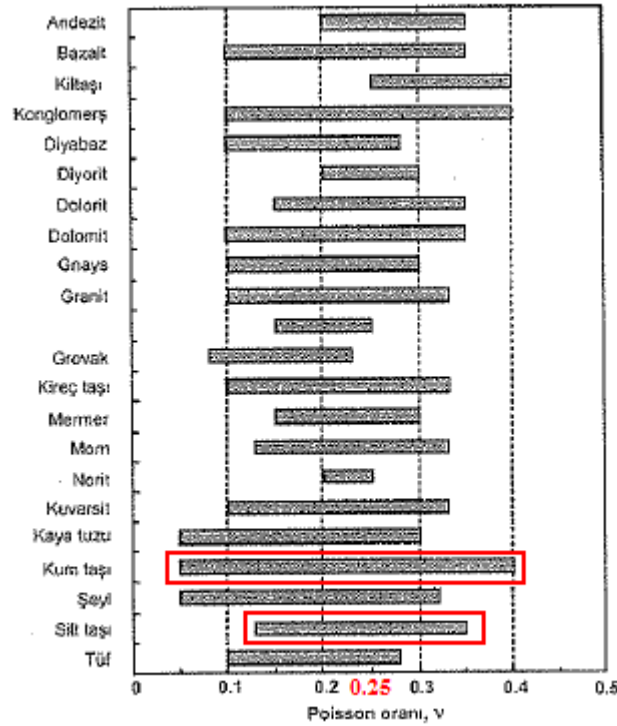
3.6 KAYA MALZEMESİ VE KAYA KÜTLELERİNİN POISSON ORANLARI

Elastik malzemelerin deformasyonunda rol oynayan Poisson oranı, kayaların deformasyonu ile ilgili kaya mühendisliği problemlerinde kullanılan mekanik bir parametredir. Bu parametre ile ilgili çok sayıda literatür bulunmakla birlikte, özellikle farklı kaya türleri için Poisson oranı değerleri ve kaya türlerinin Poisson oranının tayini gibi konular halen tartışmaya açıktır. Bu konuda Gerçek (2006) tarafından çok geniş bir literatür değerlendirmesi yapılarak bu parametreye dikkat çekilmiştir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Poisson oranının ISRM'in Terminoloji, Simgeler ve Grafik Sunumlar Komisyonu (ISRM 1975) tarafından "çekilme etkisi altındaki bir cisimde yatay yöndeki kısalmanın kuvvetin uygulandığı yöndeki uzamaya oranı" olarak tanımlanmasının hatalı olduğunu belirten Gerçek (2006), bu tanımda boyutsal değişim yerine birim deformasyon kullanılmasını ve Poisson

oranı eşitliğinde negatif işaret eksikliğini olduğunu vurgulamaktadır. Bu açıdan Gerçek (2006), en yalın haliyle Poisson oranını “tek eksenli gerilmeye maruz kalan elastik bir malzemede yatay yöndeki birim deformasyonun eksenel yöndeki birim deformasyona oranı” olarak tanımlayarak, bu oranın önünde negatif işaret bulunması gerektiğini belirtmektedir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Kaya malzemelerinin Poisson oranı laboratuvarında dolaylı olarak dinamik yöntemlerle veya doğrudan statik deneylerle belirlenebilmektedir. Bazı kaya türlerinin Poisson oranları için tipik değişim aralıkları Şekil 3.7’de verilmiştir (Gerçek 2006, Ulusay ve Sönmez 2007). Kaya malzemelerinin Poisson oranı değeri üzerinde porozite rol oynamakla birlikte, gözeneklerin geometrisinin, yönelim, dağılım ve bağlantılarının da bu etkiyi karmaşık hale getirdiğini belirtmektedir.



Şekil 3.7 Bazı kaya türleri için Poisson oranı değerlerinin tipik değişim aralıkları (Gerçek 2006, Ulusay ve Sönmez 2007).

Kaya malzemelerinin Poisson oranlarının tayinine ilişkin laboratuvarında çalışmalar olmasına karşın, kaya kütleleri için konu daha sınırlıdır. Eklemlili kaya kütlelerinin Poisson oranı değerlerinin tayinine yönelik sayısal çözümleme teknikleriyle yapılan çalışmalarını değerlendiren Gerçek (2006), bu çalışmaların çoğunda kaya kütlelerinin Poisson oranının kaya

malzemesinininkinden daha büyük olduğunu, bazen beklenmedik yüksek değerler ($\nu > 0.5$) elde edildiğini ve bunun da süreksizliklerden kaynaklanan yönserlikle ilgili olduğunu belirtmektedir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Kaya malzemesinin bazı mekanik, fiziksel ve indeks özellikleri için çok sayıda sınıflama olmakla birlikte, herhangi bir Poisson oranı sınıflamasının bulunmadığını dikkate alan Gerçek (2006), laboratuvar deney sonuçlarının niteliksel anlamda değerlendirilmesinde yararlı olabilecek bir Poisson oranı sınıflaması önermiştir. Bu amaçla kurumsal olarak Poisson oranı sınırlarının 0 ile 0.5 arasında değişeceğini belirtmiştir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Bununla ilgili iki alternatif sınıflama önerilmiştir (Çizelge 3.5). Birinci sınıflamada her sınıf aralığı 0.1 olarak alınmış, ikinci alternatifte ise üç sınıf önerilerek her sınıf için 1/6 aralığı esas alınmıştır (Ulusay ve Sönmez 2007).

Çizelge 3.5 Kaya malzemesi için Poisson oranı sınıflaması önerisi (Gerçek 2006, Ulusay ve Sönmez 2007).

a) Beş kategorili sınıflama	
Kategori	Poisson oranı
Çok düşük	$0 \leq \nu < 0.1$
Düşük	$0.1 \leq \nu < 0.2$
Orta	$0.2 \leq \nu < 0.3$
Yüksek	$0.3 \leq \nu < 0.4$
Çok yüksek	$0.4 \leq \nu < 0.5$
b) Üç kategorili sınıflama	
Düşük	$0 \leq \nu < 1/6$
Orta	$1/6 \leq \nu < 1/3$
Yüksek	$1/3 \leq \nu < 1/2$

BÖLÜM 4

KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ

4.1 GENEL BİLGİLER

Kaya kütlelerinde gerçekleştirilen kazılar ile oluşturulan mühendislik yapıları için gerekli araştırma ve uygulamalarla ilgili olarak günümüzde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Yeraltı maden işletmeciliği amaçlı galeriler ve düşey kuyular, otoyol ve demiryolu ağları, radyoaktif atık depolama projeleri, hidroelektrik santral projeleri ve yeraltı enerji istasyonları için inşa edilen yeraltı açıklıkları, derin kazı şevleri gibi mühendislik uygulamaları bu kapsamda yer almaktadır. Söz konusu uygulamalarda mühendislik yapılarının güvenli ve ekonomik bir şekilde hazırlanması ve kullanımı açısından en önemli araç mühendislik tasarımıdır. Kaya mühendisliğini de içerecek şekilde ve daha genel anlamda jeoteknik çalışmalarda tasarım yöntemleri; analitik-sayısal, gözleme dayalı ve görgül (amprik) olmak üzere üç ana başlık altında toplanır. Genel anlamda analitik ve sayısal yöntemlerden, yapıların ve kazıların duraylılık koşullarının araştırılması ve kazı çevresindeki gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin analizleri için yararlanır. Bu yöntemler başlıca, limit denge çözümleri, sayısal yöntemler (sonlu elemanlar, sonlu farklar, sınır elemanları vb.), benzetişim yöntemleri (elektriksel ve fotoelastik) ve fiziksel modellerdir. Gözleme dayalı yöntemler, kazı ve yakın çevresinde yapılan incelemeleri, arazide ve laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler ile deformasyon, gerilme, su basıncı vb. hususlarla ilgili aletsel izleme çalışmalarını kapsar. Görgül yöntemler ise, kazılarda yapılan gözlemler ve elde edilen verilerin genellikle istatistikler yöntemlerle değerlendirilmesi sonucunda mühendislik deneyimi esas alınarak geliştirilmiş yöntemlerdir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Genel sözcük anlamı olarak sınıflama, nesnelerin ortak özelliklerine göre gruplandırılması şeklinde tanımlanır. Kaya mekaniği alanında da kaya kütlelerinin sınıflandırılmasına gereksinim duyulmuş ve bu amaçla çeşitli sınıflama sistemleri önerilmiştir. Bu sistemler, kaya mühendisliğinde tasarımın ayrılmaz bir parçası olmakla birlikte uzun yıllar süren gözlemlere

bağlı deneyimler ve istatistiksel değerlendirmeler esas alınarak önerilmiş görgül yöntemlerdir. Çoğu kez, doğrudan bir tasarım yöntemi oldukları şeklinde yanlış algılanarak kullanılan kaya kütlesi sınıflama sistemleri, kaya mühendisliğinde tasarıma yardımcı olan ve ön tasarım amacıyla kullanılabilecek birer araç olarak değerlendirilmelidir. Dolayısıyla bu sistemler, analitik-sayısal ve gözleme dayalı yöntemler ile mühendislik sezgilerinin yerini almak üzere geliştirilmemişlerdir. Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin bu çerçevede algılanması ve doğru kullanılması halinde günümüzde birçok mühendislik projesinin tamamlanmasında başarı ile kullanıldıkları bilinmektedir (Özkan ve Ünal 1996).

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, görgül tasarım yaklaşımlarının temel harcıdır ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde açılmakta olan tünellerin birçoğunda sınıflama sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bunlardan en eskisi, tanınmış ve kullanılanı, günümüzden 66 yıl önce ortaya atılan Terzaghi (1946) sınıflama sistemidir. Terzaghi'nin sınıflama sonucu önerdiği çelik-bağ tahkimatına karşılık yeni sistemler, bugün kullanılmakta olan kaya saplama ve püskürtme beton gibi tahkimat elemanları önerilerini getirmiştir. Yeni sınıflama sistemleri, sadece tünellerde uygulamalarında kalmamış, büyük yeraltı boşlukları, yeraltı ocakları, şevler ve temellerin tasarımı gibi değişik mühendislik uygulamalarında da kullanılmış ve kullanılmaktadır (Karpuz ve Hindistan 2008).

Bieniawski (1989), kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin başlıca amaçlarını aşağıdaki şekilde belirtmektedir.

- Kaya kütlesinin davranışını etkileyen önemli değişirgeleri belirlemek
- 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 karşılaşılan koşullarla karşılaştırıp ilişki kurmak
- Mühendislik tasarımı için sayısal veri tabanı ve bir kılavuz oluşturmak
- Mühendisler arasında ortak temele dayalı teknik iletişimi sağlamak

Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden elde edilebilecek kazanımlar ise aşağıda verilmiştir.

- Tasarıma yönelik amaçlar için sayısal veri sağlanması,

- En az sayıda sınıflama değiştirgesi esas alınarak, toplanan verilerle saha çalışmasının kalitesinin arttırılması,
- Daha doğru mühendislik kararlarının alınabilmesi ve projelerde daha etkin bir iletişimin sağlanması

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, tasarım hedefleri ve sahanın jeolojisi de dikkate alınarak, gözleme dayanan yararlı tasarım araçlarıdır. Günümüze kadar çeşitli araştırmacılar tarafından değişik kaya kütlesi sınıflama sistemleri geliştirilmiş ve önerilmiştir. Bunların bir kısmı önerilmiş olan sistemlerin yeniden düzenlenmesi veya geliştirilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu sistemler arasında tünelcilik ve madencilik uygulamalarında kaya kütlesi puanlama (Rock Mass Rating-RMR), Q kaya tünelcilik kalitesi veya Norveç Jeoteknik Enstitüsü (Norwegian Geotechnical Institute-NGI) sınıflama sistemi, ve Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index-GSI) kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

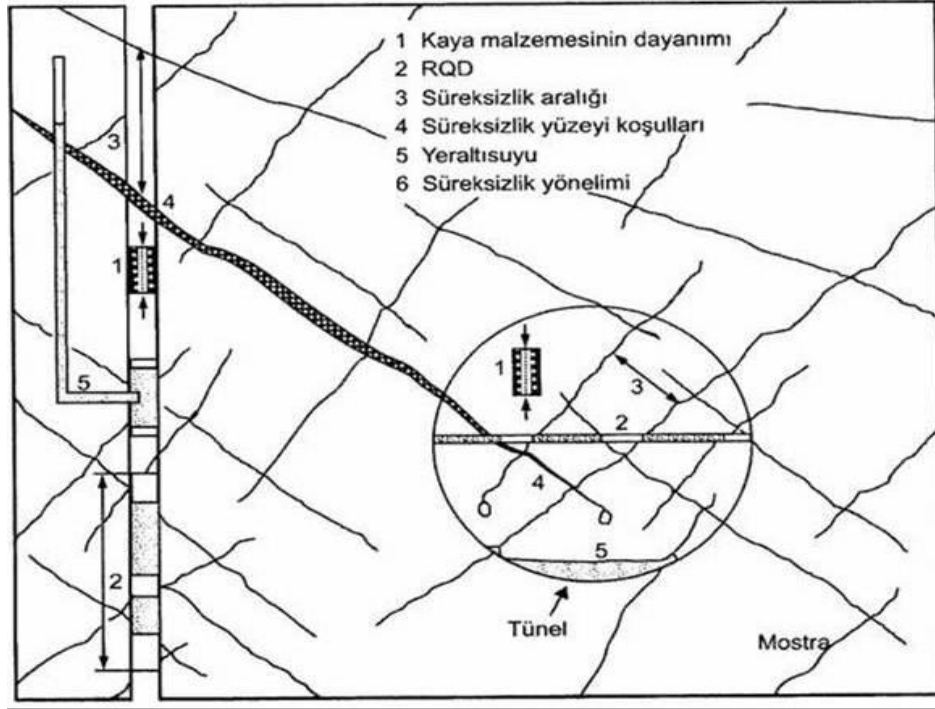
Bu bölümde Kaya Kütlesi Puanlama Sistemi (RMR), Q sınıflama sistemi, RMI sınıflama sistemi ve M-RMR sınıflama sistemi hakkında özet bilgiler verilmiştir. Ayrıca, sınıflama sistemlerinin kendi aralarındaki ilişkileri, jeolojik dayanım indeksi (GSI) ile ilişkileri hakkında bilgiler sunulmuştur. Bunun yanında su ile etkileri tartışılmış ve araştırmacılar tarafından önerilen abak ve çizelgeler ile bilgiler verilmiştir. Belirtilen sınıflama sistemlerinin gelişimi ve kullanımı ile ilgili ayrıntılı bilgiler için Ulusay (2001), Ulusay ve Sönmez (2007) ve Karpuz ve Hindistan (2008) kaynaklarından yararlanılabilir.

4.2 KAYA KÜTLESİ PUANLAMA SİSTEMİ (RMR)

RMR kaya kütlesi puanlama sınıflama sistemi (Rock Mass Rating-RMR) Bieniawski (1973) tarafından geliştirilmiş olup kazanılan deneyimler çerçevesinde son şeklini 1989 yılında almıştır. Bu sisteme göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında; kayaç malzemesinin dayanımı, kayaç kalitesi göstergesi (RQD), süreksizlik aralığı, süreksizliklerin durumu, yeraltı suyu koşulları ve süreksizliklerin yönelimine göre düzeltme, değiştirgelerinden yararlanılmaktadır. Ayrıca özellikle madencilik uygulamalarında patlatma, yerindeki gerilimler ve fayların durumu gibi faktörler de dikkate alınarak ilave düzeltmelerin yapılması önerilmektedir. Tünel, büyük yeraltı açıklıkları (odalar), maden işletmeleri, şevler ve temellerle ilgili 351 değişik uygulamadan derlenen verilerin ve yapılan gözlemlerin

istatistiksel olarak değerlendirilmesi, yöntemin bugünkü şeklini almasında en önemli araçlar olmuştur (Ulusay 2001).

RMR sistemine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında aşağıda belirtilen ana değişirgeler esas alınmaktadır (Şekil 4.1). Değişirgeler ile ilgili sınıflandırmalar ve puanlar ise Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Kaya kütlesi puanlama sistemi (RMR) değişirgeleri (Hudson 1989, Ulusay ve Sönmez 2007).

- Kaya malzemesinin tek eksenli basınç (sıkışma) dayanımı (σ_c),
- RQD,
- Süreksizlik aralığı,
- Süreksizliklerin durumu (devamlılık, pürüzlülük, dolgu, bozunma, açıklık),
- Yeraltı suyu koşulları,
- Süreksizliklerin yönelimi.

Kaya kütlelerine ait mekanik özelliklerin kestiriminde kullanılan görgül bağıntılarda süreksizlik yönelimi için düzeltme yapılmamış toplam temel RMR değeri, yeraltı açıklıklarının duraylılığıyla ilgili görgül bağıntılarda ise düzeltilmiş nihai RMR değerlerinin kullanılması önerilmektedir (Ulusay ve Sönmez 2007).

Kaya malzemesinin dayanımı, RQD ve süreksizlik aralığına ait puanların, sınıflama değiştirgeleri çizelgesinde verilen aralıklara kıyasla daha hassas kestirimi için puanlama amacıyla grafikler de hazırlanmıştır. RMR kaya kütlesi sınıflandırma sisteminde süreksizlik koşuluna ait; süreksizlik aralığı, devamlılığı ve pürüzlülüğü ile dolgu ve bozunmanın derecesi gibi değiştirgeler ise ISRM tarafından önerilen tanımlamalara göre gruplandırılmaktadır.

Sistemin uygulanması aşamaları:

- a) Geçki boyunca kaya kütlesi “yapısal bölge”lere ayrılır.
- b) Her bir yapısal bölge için, 6 değiştirge belirlendikten sonra veri toplama formuna işlenir.
- c) Jeomekanik Sınıflama Sistemi puanlama çizelgeleri veya grafikleri kullanılarak ilk 5 değişkenin puanları tayin edilir. Bunların toplamına “Temel RMR” denilmektedir.
- d) Süreksizliklerin konumunun tünelin doğrultusu ve ilerleme yönüne göre değerlendirmesi yapılarak ham RMR elde edilir.
- e) Bir takım düzeltme çarpanları (AB, S, AS) kullanılarak “Düzeltilmiş RMR” değeri belirlenir.
- f) “Kazı Açıklığı-Tahkimatsız Durma Zamanı (Kendini Tutma Süresi)” diyagramı kullanılarak, planlanan açıklığın tahkimatsız olarak göçmeden durabileceği süre kestirilir.
- g) Projenin koşulları da dikkate alınarak, kazı ve tahkimat önerileri göz önünde bulundurulur (Bieniawski 1989, Gerçek 2000).

Çizelge 4.1 Jeomekanik Sınıflama Sistemi'nde Kaya Kütlesi Puanı'nın (RMR) belirlenmesinde kullanılan değişkenler ve puanları (Bieniawski 1989, Gerçek 2000).

A. Sınıflama değişkenleri ve puanları.

DEĞİŞTİRGE			DEĞER ARALIKLARI VEYA TANIMLAR						
1	Sağlam Kaya Malzemesinin Dayanımı (MPa)	Nokta yükü dayanım indeksi	>10	4-10	2-4	1-2	Daha düşük aralık için tek eksenli basınç dayanımı deneyi önerilir		
		Tek eksenli basınç dayanımı	>250	100-250	50-100	25-50	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puan	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD Kaya Niteliği Göstergesi		% 90-100	% 75 - 90	% 50 - 75	% 25 - 50	< % 25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik aralığı		> 200 cm	60-200 cm	20-60 cm	6-20cm	< 6 cm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin durumu		Çok pürüzlü yüzeyler	Hafifçe pürüzlü yüzeyler	Hafifçe pürüzlü yüzeyler	Kaygan yüzeyler veya	Ayrılma >5 mm veya		
			Ayrılma yok	Ayrılma	Ayrılma	Ayrılma: 1-5 mm veya			
			Bozunmamış	< 1mm	< 1mm	5mm'den ince fay dolgusu	5 mm'den kalın ve yumuşak fay dolgusu		
	Devamsız	Hafifçe bozunmuş yüzeyler	Çok bozunmuş yüzeyler	Devamlı	Devamlı				
Puan			30	25	20	10	0		
5	Yeraltı Suyu Durumu	Tünelin 10 mm'lik kısmına gelen su miktarı	Yok	< 10 lt	10 - 25 lt	25-125 lt	> 125 lt		
		Eklem suyu basıncı / Büyük asal gerilme oranı	Veya 0	Veya < 0.1	Veya 0.1 - 0.2	Veya 0.2 - 0.5	Veya > 0.5		
		Genel durum	Veya Tamamen kuru	Veya Nemli	Veya Islak	Veya Damlama	Veya Akan su		
	Puan			15	10	7	4	0	

Çizelge 4.1 (devam ediyor).

B. Tünelde süreksizlik eğim ve doğrultunun etkisi

Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		Doğrultuya bakılmaksızın, eğim 0 ⁰ -20 ⁰ arasında
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 45 ⁰ -90 ⁰
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	Orta	Orta

C. Süreksizliklerin durumunun detaylı olarak puanlandırılması.

DEĞİŞTİRGE		DEĞER ARALIKLARI VEYA TANIMLAR				
4.a	Süreksizliklerin Boyu (Devamlılık)	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
	Puan	6	4	2	1	0
4.b	Süreksizlik Yüzeylerinin Ayrılması (Açıklık)	Yok	< 0.1mm	0.1-1 mm	1–5 mm	> 5mm
	Puan	6	5	4	1	0
4.c	Süreksizlik Yüzeylerinin Pürüzlülüğü	Çok Pürüzlü	Pürüzlü	Hafifçe Pürüzlü	Düz	Kaygan
	Puan	6	5	3	1	0
4.d	Süreksizlik Dolgusu	Yok	Katı Dolgu		Yumuşak Dolgu	
			< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm
	Puan	6	4	2	2	0
4.e	Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunması (Ayrışması)	Bozunmamış	Hafifçe Bozunmuş	Orta Derece Bozunmuş	Çok Bozunmuş	Tamamen Ayrışmış
	Puan	6	5	3	1	0

D. Süreksizlik yönelimine göre düzeltme

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

Çizelge 4.1 (devam ediyor).

E. Kaya sınıfları ve puanları

Sınıf no	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	<20

Güncel RMR Sistemi'nde, yeraltı suyu koşulları da bir parametre olarak dikkate alınmakla birlikte, suyun ince tabakalı ve kil içeren zayıf kaya kütlelerinde yapacağı olumsuz etkileri de tanımlayacak bir parametre bulunmamaktadır. Ayrıca, sistemde kaya kütlelerinin bozunma derecesinin tayini için kullanılan ölçütler de görsel tanımlamalara dayanmakta, dolayısıyla bir ölçüde öznel değerlendirmelere neden olmaktadır. Bu özelliklerin sisteme dahil edilmemiş olması, özellikle zayıf kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında bazı sınırlamalarla karşılaşılmasına yol açmaktadır. Suyun zayıf kaya kütlelerindeki tahrip edici etkisinin de tanımlanabilmesi amacıyla Ünal ve Özkan (1990)'ın M-RMR Sistemi'nde suda dağılma dayanımı deneyinin yapılarak, bu deneyden elde edilecek suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi aracılığıyla bir bozunma katsayısı önermişlerdir. Bu indeks, M-RMR puanının hesaplanmasında bir çarpan olarak kullanılmakta ve suyun söz konusu olumsuz etkisi de dikkate alınabilmektedir (Ulusay ve Sönmez 2007).

GSI'nin tayini için RMR_{89} 'un kullanılması halinde, yeraltı suyu puanı olarak 15, süreksizlik yönelimi puanı için ise 0 değerleri esas alınmaktadır. $RMR_{89} > 23$ olmak koşuluyla, GSI'nin 4.1'de verilen eşitlikten tahmin edilmesi önerilmiştir (Ulusay ve Sönmez 2007).

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (4.1)$$

4.3 Q SINIFLAMA SİSTEMİ

Q veya NGI (Norveç Jeoteknik Enstitüsü) sistemi Barton vd. (1974) tarafından geliştirilmiştir. Sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin destek seçimlerine yönelik bölümü Grimstad ve Barton (1993) ve en son Barton (2002) tarafından revize edilmiştir. Q değerinin hesaplanmasında Eşitlik 4.2'de kullanılan değiştirgeler; kayaç kalitesi göstergesi (RQD), eklem takımı sayısı (J_n), eklem pürüzlülük sayısı (J_r), eklem yüzeyi araştırma sayısı (J_a), eklem su azaltma faktörü (J_w), gerilim azaltma faktörü (SRF) şeklindedir. Kaya tünelcilik kalitesi Q değerinin hesaplanması için 6 temel değiştirge kullanılmaktadır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2’de;

RQD : Kaya kalite göstergesi

J_n : Eklem takımı sayısı

J_r : Eklem pürüzlülük sayısı

J_a : Eklem alterasyon sayısı

J_w : Eklem su azaltma faktörü

SRF : Gerilme azaltma faktörü

Eşitlik 4.2’de, “RQD/ J_n ” kaya kütlelerinin yapısını ve blok boyutunu, “ J_r/J_a ” dolgu veya dolgusuz süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük ve süreksizlik karakteristiklerini dolayısıyla makaslama dayanımını ve “ J_w/SRF ” etkin gerilme koşullarını ifade etmektedir. Sistem, mevcut tünellerden elde edilen 1000’den fazla olaya ait tecrübeler esas alınarak geliştirilmiştir. Gerilme azaltma faktörü (SRF) ile ilgili olarak, Grimstad ve Barton (1993) ve Barton ve Grimstad (1994) tarafından gerçekleştirilen bir değişiklik dışında, Q sistemi önemli bir değişikliğe maruz kalmamıştır (Ulusay ve Sönmez 2007).

Bu sınıflama sistemine göre, Q değerinin hesaplanması amacıyla kullanılan 6 parametre Çizelge 4.2’de yer almaktadır.

Çizelge 4.2 Q sisteminin girdi parametreleri ve değerleri (Barton et al. 1974 ve Barton 2000, Ulusay ve Sönmez 2007).

1. RQD (%)	KAYA KALİTE GÖSTERGESİ TANIMI
0-25 25-50 50-75 75-90 90-100	A. Çok zayıf B. Zayıf C. Orta D. İyi E. Çok iyi (mükemmel)
Not: (1) RQD<10 (0 dahil) ise Q'nun hesaplanmasında RQD için 10 gibi nominal bir değer kullanılır. RQD için 100, 95, 90... vb. gibi 5'lik aralıklar yeterlidir.	
2. EKLEM TAKIMI SAYISI	(J _n)
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1.0
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir takımı ve gelişigüzel eklemeler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	12
H. Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok fazla sayıda, küp şeker görünümünde	15
I. Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20
Not: (2) Arakesitler (kesişen tüneller) için (3.0 x J _n) kullanılır. (3) Tünel girişleri için (2.0 x J _n)	
3. EKLEM PÜRÜZLÜLÜK SAYISI	(J _r)
(a) Süreksizlik-kaya dokanağı ve (b) 10 cm'lik bir makaslamadan önceki süreksizlik-kaya dokanağı	
A. Süreksiz eklemeler	4
B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C. Düz, dalgalı	2
D. Kaygan, dalgalı	1.5
E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5
F. Düz, düzlemsel	1.0
G. Kaygan, düzlemsel	0.5
Not: (4) Bu sıralamada tanımlamalar, küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.	
(c) Makaslanmış kesimde süreksizlik-kaya dokanağı yok	
H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1.0
I. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki kumlu, çakıllı ya da parçalanmış zon	1.0

Çizelge 4.2 (devam ediyor).

<p>Not: (5) İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3 m'den büyük ise, J_r'ye 1.0 eklenebilir. (6) Çizgiselliklerin en düşük dayanımı verecek şekilde yönlendirilmesi koşuluyla, çizgisellik içeren düzlemsel ve kaygan süreksizlik yüzeyleri için $J_r = 0.5$ alınabilir. (7) J_r ve J_a sınıflaması, yönelim ve makaslama dayanımı ($\tau = \sigma_n \tan (J_r / J_a)$) açısından duraylılık için hiç uygun olmayan eklem takımına veya süreksizliklere uygulanır.</p>		
4. EKLEM ALTERASYON SAYISI	J_a	Φ (yaklaşık)
(a) Kaya-süreksizlik dokanağı (mineral dolgusu yok, sadece yüzey kaplaması)		
A. Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu (örneğin, kuvars veya epidot)	0.75	–
B. Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	25-30°
C. Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vb.	2	20-25°
D. Silti veya kumlu kil kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği	3	20-25°
E. Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama (örneğin kaolinit veya mika). Ayrıca klonit, talk, jips, grafit vd. ile az miktarda şişen killer	4	8-16°
(b) 10 cm'lik makaslama öncesi süreksizlik kaya dokanağı (ince mineral dolguları)		
F. Kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vd.	4	25-30°
G. Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı < 5 mm)	6	16-24°
H. Orta ve düşük derecede konsolidasyona maruz kalmış, yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli ancak kalınlığı < 5 mm)	8	12-16°
J. Şişen kil mineralleri, örneğin; montmorillonit (sürekli, ancak kalınlığı < 5 mm) J_a 'nın değeri şişen kil tane boyutundaki malzemenin miktarına ve su girişine bağlı	8-12	6-12°
(c) Makaslanma durumunda süreksizlik yüzeylerinin teması yok (kalın mineral dolguları)		
K, L, M. Bozunmuş veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşulunun tanımı için G, H ve J'ye bakınız)	6-8 veya 8-12	6-24°

Çizelge 4.2 (devam ediyor).

N. Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	5.0	–
O, P, R. Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları (kil koşulunun tanımlanması için G, H ve J'ye bakınız)	10-13 veya 13-20	6-24°
5. EKLEM SU AZALTMA FAKTÖRÜ	Yaklaşık su basıncı (kgf/cm²)	J_w
A. Kısmi kazı veya düşük su geliri (örneğin, genel olarak < 5 l/dk)	< 1	1.0
B. Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	1-2.5	0.66
C. Dolgusuz eklemeler içeren sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	2.5-10	0.5
D. Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	2.5-10	0.33
E. Çok ileri derecede su geliri veya patlama sırasında zamanla azalan yüksek su basıncı	> 10	0.2-0.05
F. Zamanla azalmaksızın devam eden son derece fazla su geliri veya su basıncı	> 10	0.1-0.05
Not: (8) C, D, E ve F'deki faktörler kaba tahminlerdir. Eğer drenaja yönelik önlemler alınır, J _w artar.		
(9) Buz oluşumundan kaynaklanabilecek özel sorunlar dikkate alınmamıştır.		
6. GERİLME AZALTMA FAKTÖRÜ	SRF	
(a) Tünel açılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar		
A. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	10	
B. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤ 50 m)	5	
C. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50m)	2.5	
D. Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5	
E. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği ≤ 50 m)	5.0	
F. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m)	2.5	
G. Gevşek ve açık eklemeler, ileri derecede eklemli "küp şeker" görünümlü (herhangi bir derinlikte)	5.0	

Çizelge 4.2 (devam ediyor).

(b) dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları	σ_{ci}/σ_t	$\sigma_\theta/\sigma_{ci}$	SRF
H. Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler	> 200	< 0.01	2.5
J. Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200-10	0.01-0.3	1
K. Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir.	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L. Masif kayada 1 saatlik bir süre sonrasında orta derecede dilimlenme	5-3	0.5-0.65	5-50
M. Masif kayada birkaç dakika sonra dilimlenme ve kaya patlaması	3-2	0.65-1	50-200
N. Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	< 2	>1	200-400
<p>Not: (11) Oldukça yönsel (anizotrop) bakir gerilme alanı (ölçülebilirse) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ koşulunda σ_c $0.75 \sigma_c$'ye, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise $0.5 \sigma_c$'ye düşürülür. Burada σ_c, tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_θ en büyük teğetsel gerilmedir (elastik kuramdan tahmin edilen). (12) Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarla ilgili birkaç vaka kaydı mevcuttur. Bu gibi durumlar için SRF'nin 2.5'tan 5'e artırılması önerilir (H maddesine bakınız).</p>			
(c) Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma	$\sigma_\theta/\sigma_{ci}$	SRF	
O. Az sıkıştıran kaya basıncı	1-5	5-10	
P. Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı	> 5	10-20	
<p>Not: (13) Sıkışan kaya vakaları $H > Q^{1/3}$ derinlik koşulunda meydana gelebilir (Singh vd., 1993). Kaya kütlelerinin basınç dayanımı $\sigma_{cm} = 0.7 \gamma Q^{1/3}$ (MPa) eşitliğinden tahmin edilebilir. Burada γ, kayanın birim hacim ağırlığıdır (kN/m^3) (Singh, 1993).</p>			
(d) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği	SRF		
R. Düşük şişme basıncı	5-10		
S. Çok yüksek şişme basıncı	10-15		

Q Sistemi'nden GSI tahmini için Eşitlik 4.3'te bir eşitlik önerilmiştir.

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \quad (4.3)$$

Modifiye edilmiş (Q'), GSI'nin tahmini için Eşitlik 4.4 kullanılır (Hoek et al. 1995, Ulusay ve Sönmez 2007).

$$GSI = 9 \log_e Q' + 44 \quad (4.4)$$

En küçük Q' değeri 0.0208 olup, bu değerden yaklaşık 9 gibi bir GSI hesaplanır.

4.4 R_{Mi} SINIFLAMA SİSTEMİ

Kaya yapılarının mühendislik tasarımı için güvenilir veri girişi sağlanması, mühendislik jeologlarının ve tasarım mühendislerinin karşılaştığı en zorlu görevlerden birisidir (Bieniawski 1984).

Bieniawski (1984)'ye ek olarak, Hoek ve Brown (1980), Nieto (1983) gibi diğer bazı yazarlar da kaya kütle dayanım karakterizasyonu için bir gereksinim olduğunu belirtmişlerdir. Kaya Kütle İndeksi (R_{Mi}), sayısal gözlemsel verileri elde etmede daha iyi pratik kuralları da içeren kaya kütle tanımlama yöntemlerini geliştirmek ve bu ihtiyacı karşılamak için çalışma yapmaktadır (Palmström 1996a).

Çeşitli süreksizliklerin varlığı durumunda, kaya kütlelerinin doğal dayanımı azalma eğilimindedir ve davranışı ana özelliğini oluşturmaktadır. Kaya kütle indeksi bu ana ilke ile Eşitlik 4.5'te gösterildiği gibi ifade edilir;

$$R_{Mi} = \sigma_c \times JP \quad (4.5)$$

Burada;

σ_c : Sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı

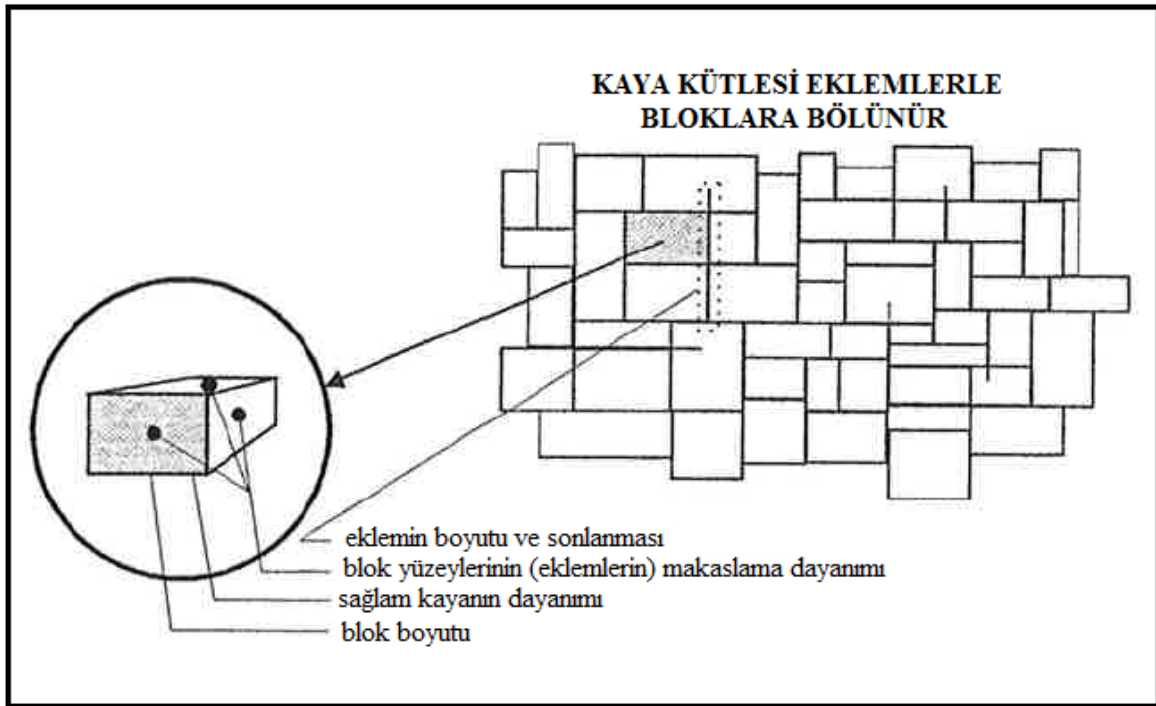
JP: Eklem parametresi. Bir kaya kütleindeki eklemlerin etkisini temsil eden bir azaltma katsayısıdır. JP değeri çatlaklı kayadan sağlam kayaya, 0 ile 1 arasında değişmektedir.

Hoek et al. (1992), eklemli kaya kütleleri için dayanım özelliklerinin blok şekli ve boyutu gibi kesişen süreksizlikler tarafından belirlenen yüzey özellikleri tarafından kontrol edildiği görüşündedir. Benzer fikirler; Tsoutrelis et al. (1990), Matula ve Holzer (1978), Patching ve Coates (1968), ve Milne et al. (1992) tarafından ortaya konmuştur (Palmström 1996a). Bu düşünceler eklem parametresinin aşağıdaki özelliklerinin seçiminde kullanılmıştır (JP):

- a) Eklemlerin blok boyutu, eklem hacmi olarak ölçülür.
- b) Blok yüzlerinin makaslama dayanımı, sürtünme açısı olarak ölçülür.
- c) Eklemlerin boyutu, uzunluğu ve sürekliliği olarak ölçülür (Palmström 1996b).

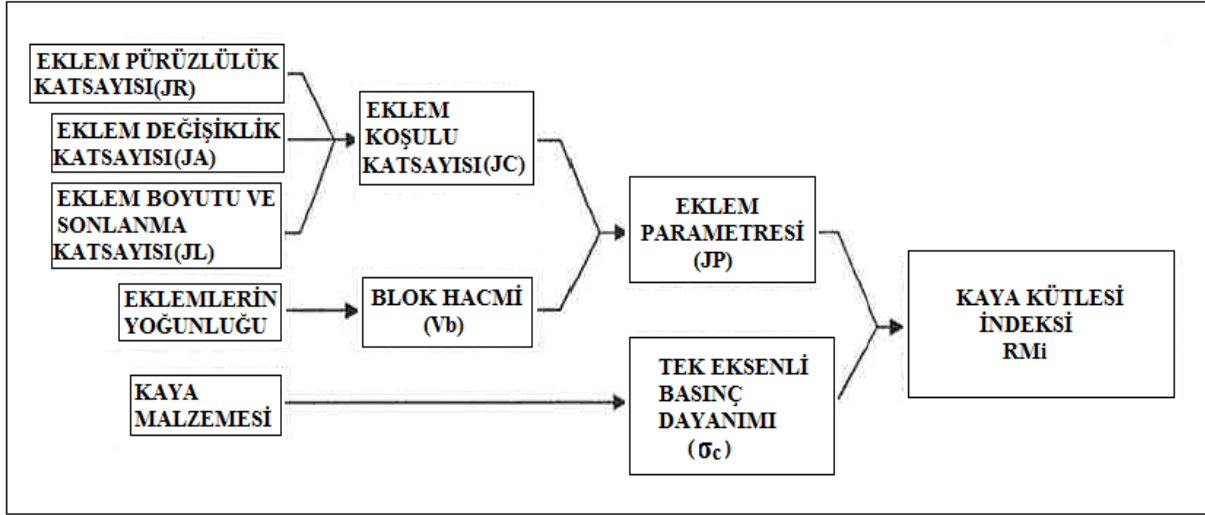
Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, RMi aşağıdaki girdi parametrelerini kullanır.

- a) Sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
- b) Blok hacmi
- c) Eklem özellikleri (pürüzlülük, bozunma/ayırışma ve boyut).



Şekil 4.2 RMi uygulanan tipik bir kaya kütlesi ve başlıca parametrelerinin idealleştirilmiş yapısı (Palmström 1995a).

RMi’ye dahil olan bu parametrelerin kombinasyonu, Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Bunların tümü, kaya kütlesinin gerçek parametreleridir. Kaya kütlesi özelliklerini karakterize eden böyle parametrelerin kullanılması gerekliliğini daha öncelerden Deere et al. (1969) ile Patching ve Coates (1968) vurgulamışlardır (Palmström 1995a).



Şekil 4.3 RMI ve bileşenleri için girdi parametreleri (Palmström 1995a).

Sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_c), laboratuvar deneylerinden ya da standart dayanım çizelgelerinden tahmin edilerek belirlenebilmektedir. Eklem parametresi (JP), aşağıdaki özelliklerin bir birleşimidir (Palmström 1995b).

a) Blok hacmi (V_b); eklem yoğunluğunun (miktarının) veya eklem derecesinin bir ölçüsüdür. Dolaylı olarak üç boyutlu bir ölçüm olduğu gibi, aynı zamanda kaya kütlelerinin tüm geometrisini de ifade eder. Çeşitli arazi ölçümleri ile belirlenebilmektedir.

b) Eklem koşulu faktörü (JC); bloklar arası sürtünme özelliklerini temsil eder. Barton et al. (1974), Q sisteminde eklemlerin makaslama dayanımı ve dilatasyonunu temsil etmek için pürüzlülük ve ayrışma katsayılarını (J_r ve J_a) seçmiştir. İki parametrenin oranı (J_r/J_a), bu faktörlerin normal varyasyonlar içerisinde eklem için gerçek kayma dayanımı için adil bir yaklaşımı ifade eder (Barton et al. 1974 ile Barton ve Bandis 1980, Palmström'den 1995b). RMI eklem koşulu katsayısı bu parametrelerin aynı değerlendirme ve birlikte kullanımı yapması nedeniyle mantıklı görünür. Eklem boyutu ve sonlandırma için bir katsayı, eklemler için bir boyut düzeltme katsayısı olarak eklenmiştir. Bunun nedeni; daha büyük eklemler kaya kütleleri davranışı üzerinde, daha küçük eklemlerden belirgin bir şekilde daha güçlü bir etkiye sahiptir. Uzunluğunun yanı sıra, eklem sona ermesi (veya süreklilik) dahil edilmiştir (Palmström 1995b). Bu önemli eklem karakteristikleri Eşitlik 4.6'da birleştirilmiştir.

$$jC = jL \times jR / jA \quad (4.6)$$

Burada;

jL = Eklem boyutu ve süreklilik katsayısı

jR = Eklem düzlemsellik ve eklem duvar yüzeyinin eklem pürüzlülük katsayısı (Q-sistemindeki Jr 'ye benzer)

jA = Olası dolgu ve aşınma varlığında eklem duvarının özelliğini temsil eden eklem ayrışma katsayısı (Q sisteminde ki Ja 'ya benzer) (Palmström 1995b).

RMi sınıflama sistemi ile GSI arasındaki ilişkiyi Russo (2009) şöyle tanımlamaktadır.

$$RMi: \sigma_{cm} = \sigma_c JP \quad (4.7)$$

$$GSI: \sigma_{cm} = \sigma_c s^a \quad (4.8)$$

Buradan,

$$JP = s^a = [\exp((GSI - 100)/9)]^{(1/2) + (1/6) * [\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3)]} \quad (4.9)$$

eşitliği sağlanmaktadır (Russo 2009).

4.5 M-RMR SINIFLAMA SİSTEMİ

Ünal ve Özkan, 1989-2005 yılları arasında yapmış oldukları bazı çalışmalarda RMR ve Q sınıflama indeks değerlerini belirlemeye çalışmışlar ancak, özellikle zayıf, anizotropik, tabakalı, kil içerikli ve çatlaklı kaya bölgelerinde kütle parametrelerinin belirlenmesinde RMR ve Q sistemlerinin yetersiz kaldığını tespit etmişlerdir. Diğer sınıflama sistemlerinde olduğu gibi, RMR Sistemi'nde de özellikle RMR puanı 40'ın altında olan zayıf ve kil içeren kaya kütlelerinin değerlendirilmesi açısından, sınıf aralıklarının üniform (20 puanlık aralıklar) olması da diğer bir sınırlamadır. Çünkü $RMR < 40$ olan kaya kütleleri için daha dar aralıklar esas alınarak önerilecek kaya sınıflarının kullanılmasıyla, destek türlerinin daha sağlıklı olarak belirlenmesi mümkün olabilir (Özkan 2012, Ulusay ve Sönmez 2007).

Karşılaşılan problemi aşmak amacıyla araştırmacılar tarafından M-RMR sınıflama sistemini geliştirmişlerdir. Bieniawski 1996 yılında yapmış olduğu bir değerlendirmede $RMR < 20$ olması koşulunda M-RMR değerlerinin dikkate alınmasının yerinde olacağını belirtmektedir

(Bieniawski 1996). Benzer bir uyarı Ulusay tarafından $RMR < 40$ olması durumunda M-RMR sınıflama sonuçlarına itibar edilmesi yönünde yapılmıştır (Ulusay 1991, Özkan 2012).

M-RMR sınıflama sistemi için Ünal ve Özkan (1990) tarafından önerilen eşitlik aslında iki parçadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla Temel M-RMR ve Tasarım M-RMR olarak adlandırılabilir (Özkan 2012). Bunlar aşağıda sunulmuştur.

$$\text{Temel M-RMR} = F_c * \{ [I_{PLT}] + [I_{RQD}] + [I_{JC}] \} + [I_{JS}] + [I_{GW}] + [I_{OI}] \quad (4.10)$$

Burada;

- F_c : Suda dağılma dayanımına bağlı bir katsayı (0.7-1.15)
- I_{PLT} : Nokta yükleme dayanımına bağlı indeks değeri (0-15)
(I_{sc} : Tek eksenli basınç dayanımına bağlı indeks değeri (0-15))
- I_{RQD} : RQD (Rock Quality Designation) değerine bağlı indeks değeri (0-20)
- I_{JS} : Süreksizlikler arası mesafeye bağlı indeks değeri (0-20)
- I_{JC} : Süreksizlikler arası durum indeks değeri (0-30)
- I_{GW} : Yeraltı su durumuna bağlı indeks değeri (0-15)
- I_{OI} : Eklem takım konumuna bağlı indeks değeri (maden galeri ve tüneller için : 0-(-12))

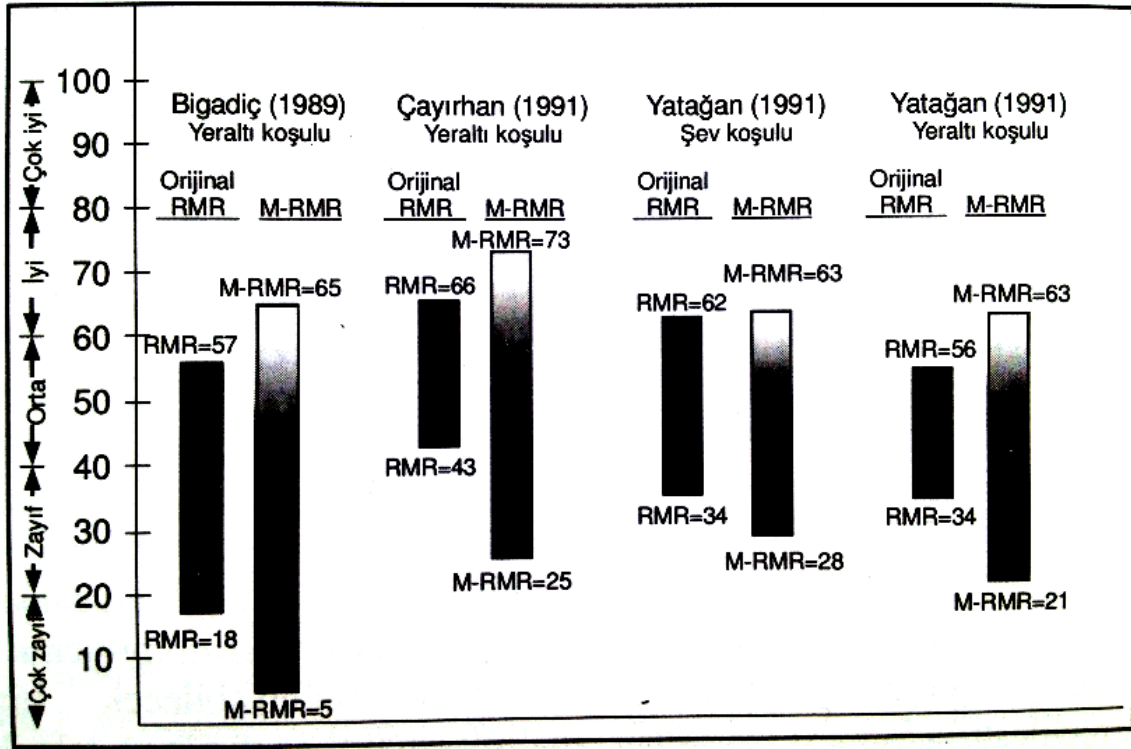
Yukarıdaki eşitlikte belirtilen parametreler Çizelge 4.3 ve Şekil 4.5 yardımıyla belirlenebilmektedir. Eşitlik 4.10'da sunulan ifade RMR sistemindeki Düzeltmiş RMR'a karşılık gelmektedir. Tasarım M-RMR değerini belirlemek için arazi gerilmeleri, jeolojik unsurlar (fay, süreksizlik gibi) ve galeri açma yöntemi (galeri açma makineleri veya delme-patlatma) ile ilgili indeks değerlerinin Temel M-RMR değeri ile çarpılması gerekmektedir. Ancak M-RMR sisteminde önerilen bu parametre indeks değerleri, RMR sisteminden farklıdır (Çizelge 4.4) (Özkan 2012).

$$\text{Tasarım M-RMR} = [\text{Temel RMR}] * [A_b * A_w] \quad (4.11)$$

Burada;

- A_b : Patlatmaya dayalı düzeltme katsayısı (0.80-1.0)
- A_w : Büyük süreksizlik düzlemi ve zayıflık düzlemlerine dayalı düzeltme katsayısı (0.70-1.0)

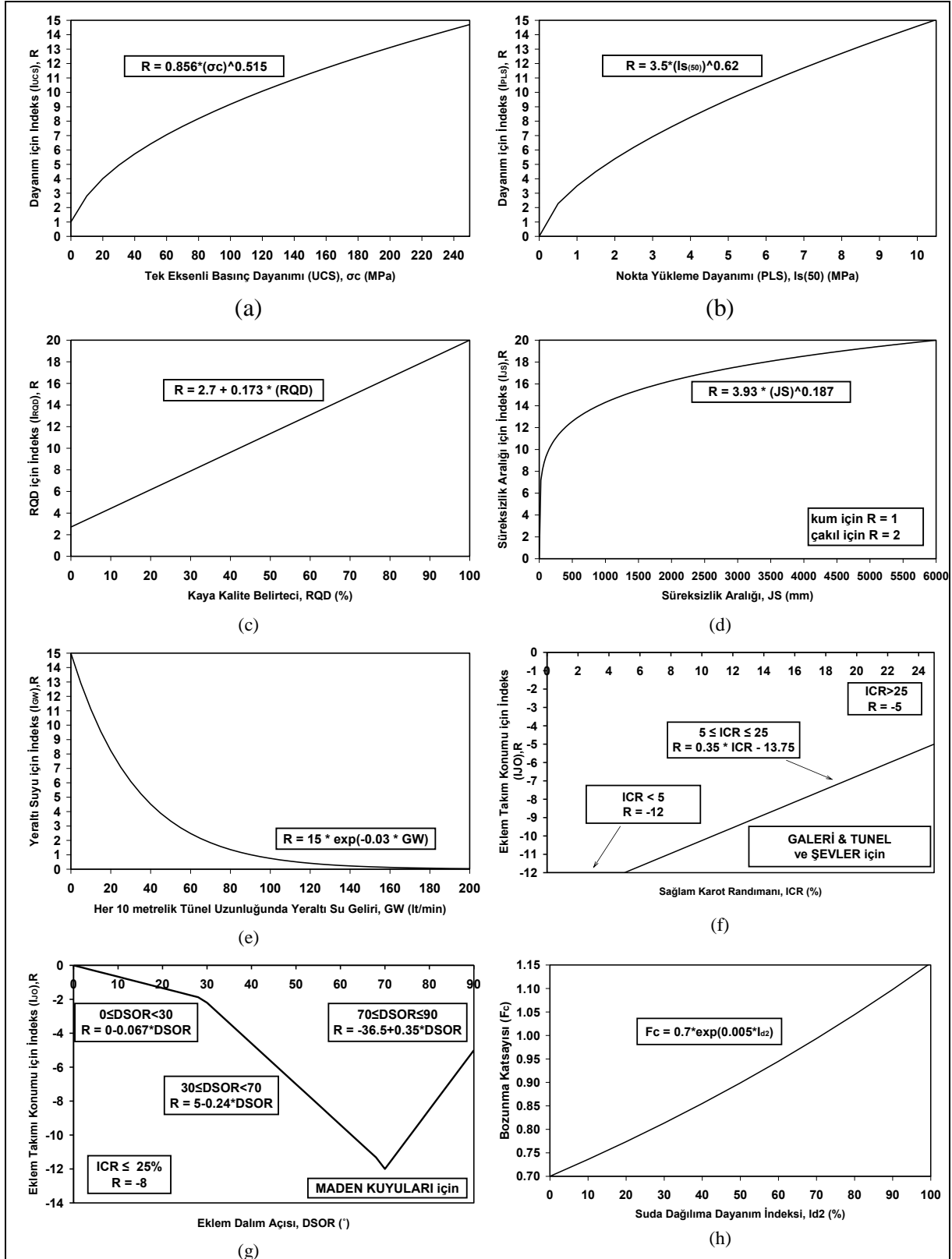
RMR VE M-RMR Sınıflama Sistemlerine göre hesaplanan orta-çok iyi (RMR>40) kaya sınıfı puanlarının önemli bir bölümü genelde birbirlerine yakın değerler vermektedir. RMR 40 ın altındaki zayıf kaya kütleleri koşullarında ise RMR ve M-RMR puanları arasında belirgin bir farklılaşmanın olduğu belirlenmiştir. Türkiye’de bazı maden işletmelerindeki zayıf kaya kütleleri için bir karşılaştırma yapılmış olup bu karşılaştırmanın sonuçları Şekil 4.4’de histogram şeklinde sunulmuştur (Ünal et al. 1992, Ulusay ve Sönmez 2007). Karşılaştırma, sondajların her ilerleme aracılığıyla ayrı ayrı yapılmış ve değerlendirmede sınıf puanlarının değişim aralıkları esas alınmıştır. M-RMR Sistemi sınıflama puanlarının üst sınır değerinde RMR’a göre daha iyi kaya kütleleri puanları ve buna karşı alt sınır bölgesinde ise daha düşük puanlar vermektedir. Bu değerlendirmelerde saptanan farklılıklar, M-RMR Sistemine özellikle zayıf kaya kütlelerinin tanımlanması amacıyla bazı yeni parametrelerin dahil edilmiş olmasından ve tanımlama amacıyla daha dar aralıklarla değişen bir puanlama ölçütünün esas alınmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4 Türkiye’de değişik maden işletmelerindeki kaya kütleleri için RMR ve M-RMR sınıflama sistemlerinden elde edilen sınıf puanlarının karşılaştırılması (Ünal et al. 1992, Ulusay ve Sönmez 2007).

Çizelge 4.3 Eklem takımları arası duruma ait indeks değerlerin belirlenmesi - I_{JC} (Özkan 2012).

I_{JC} sağlam kaya bölgeleri için -ISTR ($ICR \geq 25\%$)			I_{JC} kırıklı kaya bölgeleri için -BSTR ($ICR < 25\%$)			
Parametre	Koşul		İndeks	BSTR	Tanım	İndeks (bs)
Bozunma W	Hiç Bozunmamış		8	BSTR1	Eğer toprak yapısında ise (büyük kum-çakıl)	0
	Az Bozunmuş		7	BSTR2	Eğer kırıklı kaya ve küçük çakıl taneleri içeriyorsa (~1cm)	2
	Orta Bozunmuş		6			
	Çok Bozunmuş		4	BSTR3	Eğer 2-3 cm boyutlarında kırıklı kaya parçaları içeriyorsa	4
	Çok Fazla Bozunmuş		2			
Çok Aşırı Bozunmuş		0				
Pürüzlülük R	Dalgalı	Çok Pürüzlü	8	BSTR4	Eğer 10cm'den daha kısa karot parçaları içeriyorsa	6
		Pürüzlü	6			
		Az Pürüzlü	4			
		Düz	2			
		Kaygan	1			
	Düzlemsel	Çok Pürüzlü	4	BSTR5	Eğer 10 cm'den daha büyük bir yada daha fazla karot parçaları içeriyorsa	8
		Pürüzlü	3			
		Az Pürüzlü	2			
		Düz	1			
		Kaygan	0			
Devamlılık C	Çok Az Devamlı		3.5	Eklem takımları arası duruma ait Eşitlikler 1) Eğer $ICR > 25\%$ ve $F=1$ (dolgu yok) $I_{JC} = W+R+(C*A*F)$ 2) Eğer $ICR > 25\%$ ve $F \neq 1$ (dolgu var) $I_{JC} = 0$ F=0 $I_{JC} = 2+(C*F)$ F=2 $I_{JC} = 4+(C*F)$ F=3 $I_{JC} = 6+(C*F)$ F=3.5 $I_{JC} = 8+(C*F)$ F=4 3) Eğer $ICR \leq 25\%$ ve $F=1$ (dolgu yok) $I_{JC} = bs+(W/2)+8$ 4) Eğer $ICR \leq 25\%$ ve $F \neq 1$ (dolgu var) $I_{JC} = 0$ F=0 $I_{JC} = 4$ F=2 $I_{JC} = (bs/2)+(W/2)$ F=3 $I_{JC} = (bs/2)+(W/2)+4$ F=3.5 $I_{JC} = bs+(W/2)+4$ F=4		
	Az Devamlı		3			
	Orta Devamlı		2			
	Yüksek Devamlı		1.5			
	Çok Yüksek Devamlı		1			
Açıklık A	0.0-0.01 mm		4			
	0.01-1 mm		3			
	1.0-5.0 mm		2			
	> 5mm		0			
	Dolgu F	Dolgu Yok				
0.0-1.0 mm		4				
1.0-5.0 mm (sert)		3.5				
1.0-5.0 mm (yumuşak)		3.0				
> 5.0 mm (sert)		2.0				
> 5.0 mm (yumuşak)		0.0				



Şekil 4.5 M-RMR sistemi tarafından sınıflandırma parametreleri için önerilen aralıklar ve indeks değerleri (Özkan 2012).

Çizelge 4.4 Patlatma (A_b) ve büyük süreksizlik düzlemleri için düzeltme katsayıları (A_w) (Özkan 2012).

Patlatma Hasarı için Düzeltme (A_b)		Büyük Süreksizlikler ve Zayıflık Düzlemleri için Düzeltme (A_w)	
Patlatma Hasarı	Düzeltilme Katsayısı (A_b)	Zayıflık	Düzeltilme Katsayısı (A_w)
Patlatma Yok	1.0	Zayıflık Düzlemi Yok	1.0
Az Hasarlı Patlatma	0.95	Katı Dayk	0.90
Orta Hasarlı Patlatma	0.90	Yumuşak Cevherli Zonlar	0.85
Kötü Patlatma	0.85	Ana Kaya ile Cevher Kontak Zonları ya da	
Çok Kötü Patlatma	0.80	Homojen Olmayan Tavan Kayası	0.80
		Kıvrımlar, Senklinal, Antiklinal	0.75
		Fay Zonu	0.70

Tez çalışmasında kömür çevre kayaçlarının kaya malzemesi ve kütlesi özellikleri incelenmiştir. Bu tür kayalar için en uygun sınıflandırma sistemi M-RMR olmasına karşın, tez çalışması kapsamında sınıflama için gerekli verilerin araziden ve madenden temin edilememesi nedeniyle sınıflandırma çalışması yapılamamıştır. Bundan dolayı tez çalışmasında basit gözlemler ve yorumlamalara dayalı olan GSI Jeolojik Dayanım İndeksi Sistemi tercih edilmiştir.

BÖLÜM 5

YERALTI KÖMÜR MADENİ ANA GALERİLERDE DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ

Tez çalışması kapsamında yeraltı kömür madenlerinin, gelecekte üretim çalışmalarının sona ermesinden sonra, pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerde (PHES) su depolama amaçlı alt rezervuar olarak kullanılma olanakları araştırılmıştır. Bu kapsamda çeşitli işletme koşulları altında ana galeriler için duraylılık analizleri yapılmıştır. Bartın ili Amasra ilçesinin rüzgar enerji potansiyeli açısından çok olumlu koşullar içermesi nedeniyle Amasra taşkömür madenine ait yeraltı ana galeri açıklıklarının çeşitli işletme koşulları altında duraylılıkları incelenmiştir.

5.1 AMASRA BÖLGESİ JEOLJİSİ

Karadeniz sahilindeki Ereğli'den başlayarak, Kandilli, Zonguldak, Amasra, Pelitovası, Azdavay ve Söğütözü'ne kadar devam eden alanın tamamı Zonguldak Taşkömür Havzası olarak isimlendirilmektedir. Ülkemizde derin taşkömürü madenleri sadece Zonguldak havzasında işletilmektedir. Havza, karbonifer yaşlı, otokton kökenli olup çok kıvrımlı ve faylıdır. Havza, karbonifer devrinde Hersinyen, Kretase devrinde alpin orojenezleri ile kıvrılmış ve kırılanmıştır. Bölgede çok sayıda fayın bulunması çalışabilir panoları çok küçük boyutlara bölmekte ve çalışma koşullarını zorlaştırmaktadır (Kural 1991).

Amasra bölgesinde, kömür damarlarını içeren karbonifer yaşlı birimler diskordans ile doğuda Permian ve Kretase yaşlı, batıda Kretase yaşlı birimler ile örtülmüştür. Karbonifer sonu (Permian öncesi) Hersinyen tektonik hareketi ile Karbonifer yaşlı birimler sıkışmaya maruz kalmıştır. Bu sıkışma sonucu sahayı batıdan sınırlayan kuzey-güney yönlü bir ters fay, sahayı ortadan doğu ve batı blokları olarak ayıran kuzey-güney yönlü bir ters fay (Merkez Bindirme Fayı), doğu bloğunda birbirine paralel birkaç ters fay oluşmuştur (Acun 2009).

Merkez fayı batısında bindirmenin etkisiyle karbonifer birimleri yükselmiş ve üstteki Karadon Serisi aşınmıştır. Kretase örtü birimleri altında Karbonifer Kozlu serisinden başlamaktadır. Merkez Fayı doğusunda Karadon Serisi korunmuş, Kozlu Serisi derinlerde kalmıştır. Sahanın makro fayları çoğunlukla Hersiniyen tektonizmasına bağlıdır ve yaklaşık olarak bilinmektedir. Makro fayları oluşturan tektonik etkiler birçok mikro fay oluşturmuştur (Saltık 2012). Kretase sonrası Alpin tektonik hareketi sahanın kuzeyinde etkili olmuştur. Bu tektonik hareketin etkisiyle kuzeyde yükselen bloklardaki Kretase örtü zamanla aşınmış ve yer yer Karbonifer penceresi ortaya çıkmıştır (Şekil 5.1) (DMT 2005, Acun 2009). Amasra bölgesi Üst kretase, Alt Kretase, Permian ve Karbonifer yaşlı formasyonlardan oluşmuş olup genel stratigrafisi Şekil 5.2’de verilmiştir (Akyüz 2007, Acun 2009).

5.1.1. Üst Kretase

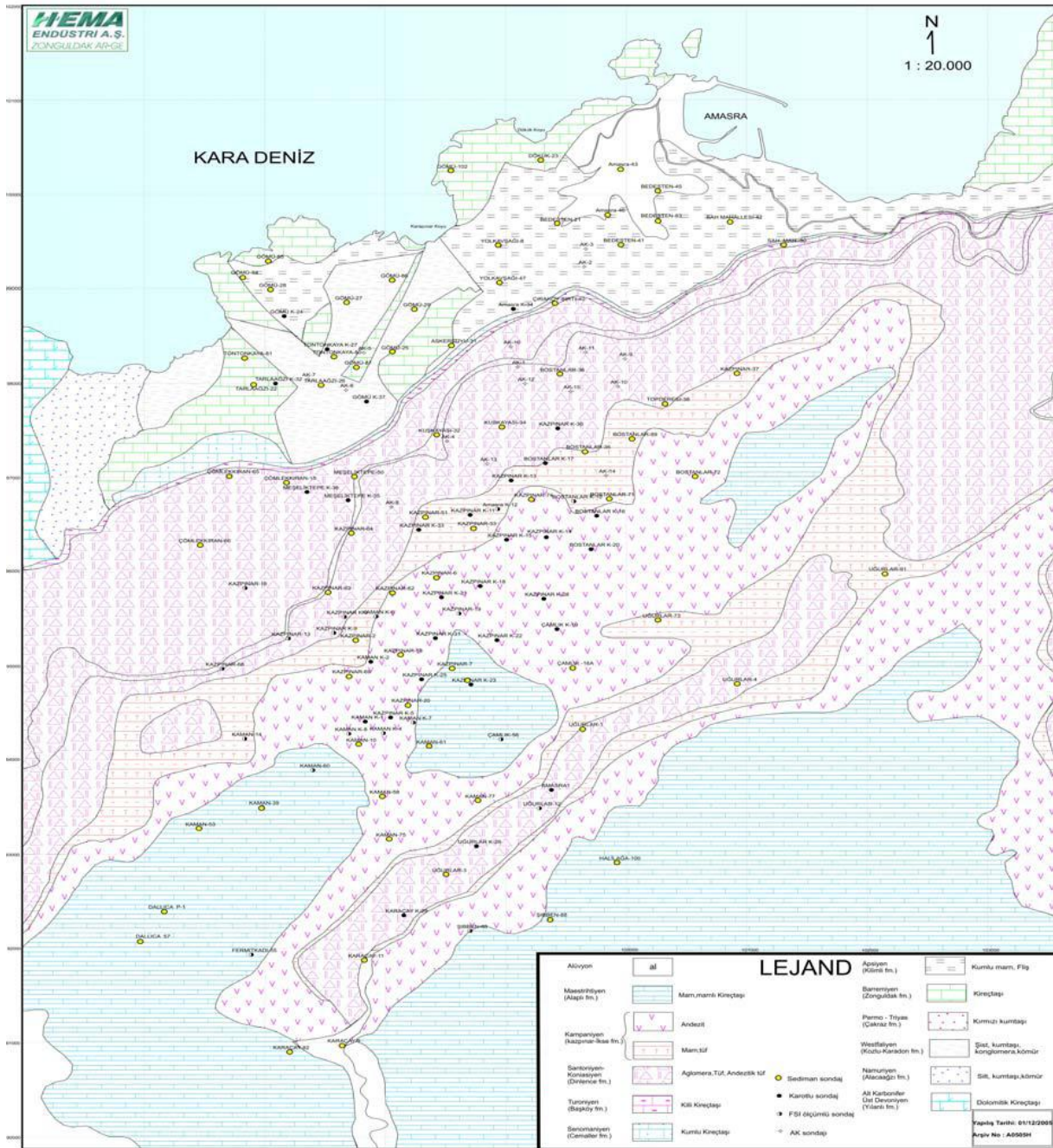
Üst Kretase yaşlı formasyonlar aşağıda verilmiştir:

- Kazpınar Formasyonu: Temel kayaç cinsi andezittir.
- İkse Formasyonu: Tüfit ve tüfit-marn ardalanmasından oluşmuştur. Kalınlığı 15-130 m olarak değişmektedir.
- Dinlence Formasyonu: Temel kayaç cinsi aglomeradır. Kumtaşları ikincil kayaçtır. Yer yer marn görülmektedir.
- Başköy Formasyonu: Temel kayaç cinsi marndır. Marn içinde ince kil bantları mevcuttur. Kireçtaşı ve kil-marn ardalanması ikincil kayaçlardır.
- Cemaller Formasyonu: Temel kayaç cinsi kumlu kireçtaşıdır. Karbonatlı kumtaşı ikincil kayaçtır.

5.1.2 Alt Kretase

Alt Kretase yaşlı formasyonlar aşağıda verilmiştir:

- Kilimli Formasyonu: Temel kayaç cinsi ince taneli kumtaşıdır.
- Zonguldak Formasyonu: Temel kayaç cinsi kireçtaşıdır.



Şekil 5.1 Amasra bölgesi genel jeolojisi (HEMA 2006, Acun 2009).

5.1.3 Permian

Permian yaşlı Çakraz formasyonunun temel kayaç cinsi kırmızı renkli kumtaşıdır. Diğer yan kayaç birimleri ise konglomera ve silttaşıdır. Kalınlığı 35 m ve 350 m arasında değişmektedir.

5.1.4 Karbonifer

Karbonifer yaşı formasyonlar aşağıda verilmiştir (Şekil 5.2) (Acun 2009):

- Karadon Formasyonu (Westfaliyen BCD): Temel kayaç cinsi kumtaşıdır. İkincil kayaç silttaşıdır. Kalınlığı 10 cm'den 250 cm'ye kadar değişen kömür damarları mevcuttur. Kömür damarlarının tavanında, tabanında ve yakın civarında şeyllere rastlanmaktadır. Yer yer kil bantları ve yer yer de konglomera görülmektedir.
- Kozlu Formasyonu (Westfaliyen A): Temel kayaç cinsi kumtaşıdır. İkincil kayaç silttaşıdır. Konglomera da sık sık görülmektedir. Kalınlığı 10 cm'den 250 cm' ye kadar değişen kömür damarları mevcuttur. Kömür damarlarının tavanında, tabanında ve yakın civarında şeyl birimlerine rastlanmaktadır. Ayrıca yer yer kil bantları görülmektedir.

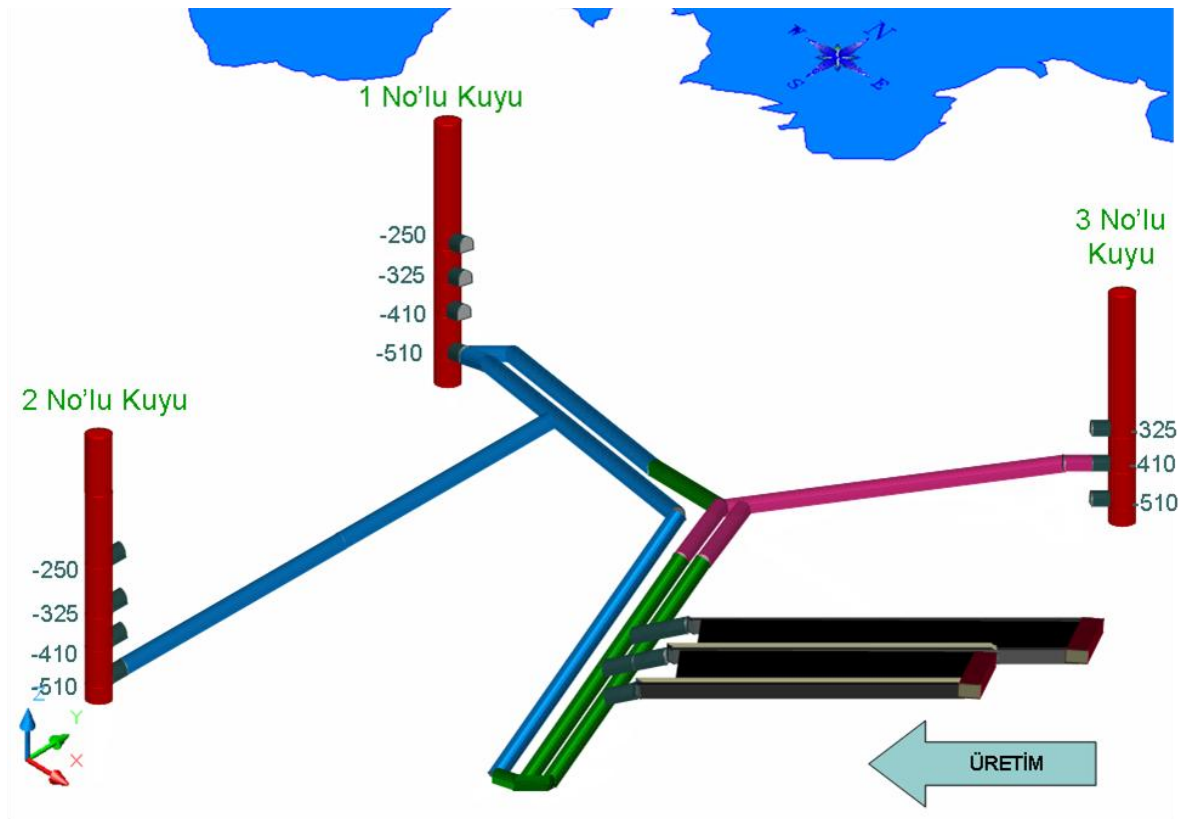
Üst Sistem	Sistem	Seri	Kat	Formasyon	Kalınlık (m)	Sütun Kesiti	Litoloji ve Açıklama	Orojenik Fazlar		
Senozoik	Kuvaterner						Alüvyon yamaç molozu	Alp Orojenezi		
Mesozoik	Kretase	Üst Kretase	Meastrihtiyen	Alaplı	15-200		Marnlı kireçtaşı			
			Kampaniyen	Kazpınar	60-200		Andezit			
			İkse	İkse	15-130		Marnlı kireçtaşı			
			Santoniyen Koniasiyen	Dinlence	30-350		Aglomera , andezitik tüfit			
			Turoniyen	Başköy	5-25		Marnlı kireçtaşı			
			Senomaniyen	Cemaller	5-350		Kumlu kireçtaşı			
		Alt Kretase	Apsiyen	Kilimli	0-300		Fliş			
		Barremiyen	Zonguldak	35-500		Kireçtaşı				
		Paleozoik	Permian			Çakraz	35-350			Konglomera kumtaşı siltaşı
			Karbonifer	Üst Karbonifer	Westfalye BCD	Karadon	200-780		Konglomera kumtaşı siltaşı kömür	
Westfalyen A	Kozlu				100-1000		Konglomera kumtaşı kilitaşı kömür			
Namuriyen	Alacağzı				100-570		Kumtaşı kilitaşı kömür			
Alt Karbonifer	Vizeen		Yılanlı			Dolomitik kireçtaşı				

Şekil 5.2 Amasra genel stratigrafisi (HEMA 2006, Acun 2009).

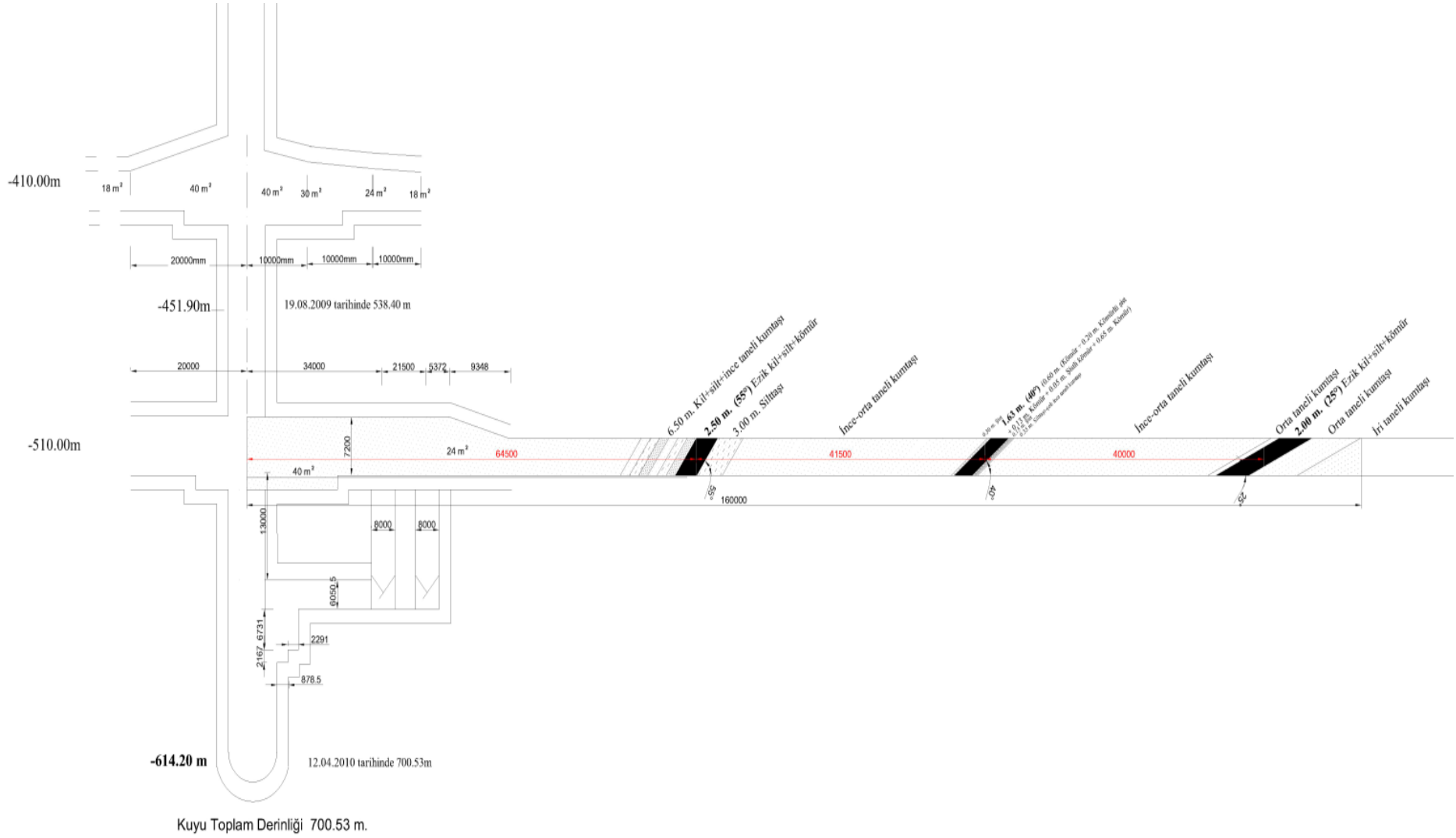
5.2 İNCELENEN İŞLETME KOŞULLARI

Amasra bölgesi, HEMA tarafından hazırlık çalışmaları devam eden Amasra taşkömürü projesinde 3 adet derin kuyu açılmış olup kuyuların ve ana kat galerilerin bağlantılarını sağlayacak galeri açma çalışmaları devam etmektedir (Soyer 2013). Kuyular, inset ve ana galerilerin konumları Şekil 5.3'te şematik olarak verilmiştir. Tez çalışması kapsamında

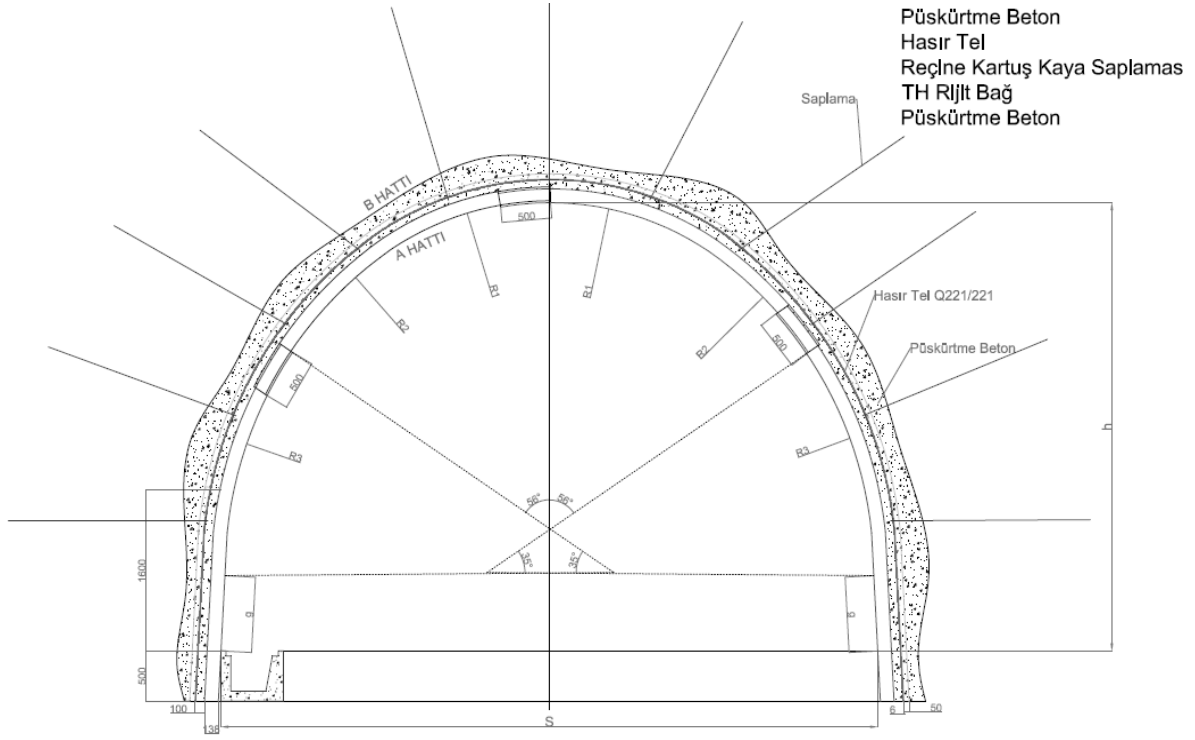
incelenmiş olan -510 ana kat galerisinin yer üstünden derinliği yaklaşık 600 m olarak belirlenmiştir. -510 ve -410 katlarında açılmakta olan 24 m² kesitli ana galeri ve bağlantı galerilerinin toplam uzunluğu yaklaşık 5 km olacaktır (Soyer 2013). Atnalı kesitli B24 ana galerilere ait örnek bir görünüm, uygulanmakta olan tahkimat elemanları ile birlikte, Şekil 5.5'te verilmiştir. Amasra taşkömürü havzasında ana galeriler genellikle temel kayaç olarak kumtaşı içinde sürülmektedir. İkincil kayaç silttaşıdır. Yer yer konglomera ve kilitaşı birimleri ile de karşılaşmaktadır. Kömür damarlarının olduğu yerlerde kumtaşı, silttaşı, kilitaşı, şeyl bantları mevcuttur (Şekil 5.4). Ayrıca fay ve zayıflık zonları ile karşılaşmaktadır (Saltık 2012).



Şekil 5.3 Kuyular, inset ve ana galerilerin konumları (HEMA 2012).

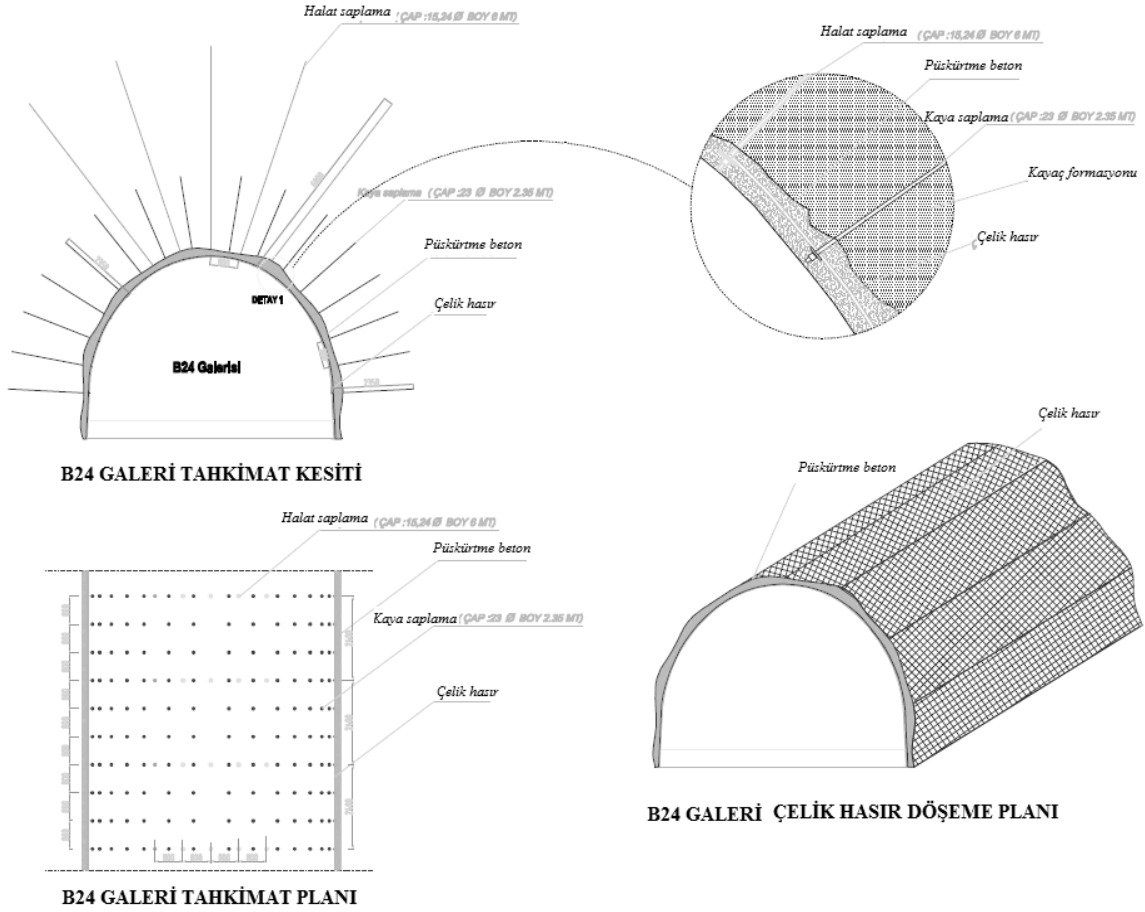


Şekil 5.4 Kuyu inseti ve ana galeri kesiti (Saltık 2012).



Şekil 5.5 B24 galeri kesiti ve tahkimat elemanları (HEMA 2012).

Ana galerilerde kullanılan başlıca tahkimat elemanları çelik hasır, püskürtme beton ve reçineli kaya saplamalarından oluşmaktadır. Kullanılan tahkimat elemanları Şekil 5.6'da şematik olarak gösterilmektedir. Kaya saplamaları 2.35 m uzunlukta olup 23 mm çapa sahip nervürlü demirler kullanılmaktadır. Saplama patern aralıkları kesit içi ve kesit dışında genellikle 0.8 m olarak uygulanmaktadır. Yaklaşık 2.4 m aralıklarla açıklık tavanında 6 m uzunluğunda ve 15 mm çaplı halatlı saplamalar da kullanılmaktadır. İnce tabakalı, şeyl ve bozunmuş formasyonlardan geçerken esneyen çelik bağlar da takviye tahkimat elemanları olarak kullanılmaktadır. Uygulanan püskürtme beton kalınlığı en az 15 cm olup, tek eksenli basınç dayanımının en düşük 15 MPa olması ön görülmektedir. Yerinde yapılan testlerde basınç dayanımı genelde 20 MPa civarında ölçülmüştür. Reçineli kaya saplamalarında çekme mukavemeti ortalama 150 kN civarında hesaplanmıştır (Soyer 2013).



Şekil 5.6 Ana galeri genel tahkimat şekli (HEMA 2012).

5.3 İNCELENEN KAYA KÜTLESİ KOŞULLARI

Tez çalışması kapsamında kumtaşı ve siltaşı kaya malzemesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Sayısal çözümlenmelerde ihtiyaç duyulan girdi parametreleri için Zonguldak Endüstri Destekleme Merkezi (ZEDEM 1994) veri tabanından yararlanılmıştır. Veri tabanında yer alan deneysel çalışmalar Uluslararası Kaya Mekaniği (ISRM) deney yöntemleri önerilerine uygun olarak yapılmıştır (Ulusay and Hudson 2007) Kumtaşı kaya malzemesi ile ilgili 74 adet deney veri serisi incelenmiş olup, ortalama tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}), dolaylı çekme dayanımı (σ_{tB}), elastisite modülü (E_1) ve poisson oranı (ν) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, ZEDEM veri tabanında yer alan siltaşı verileri de kullanılmış ve 12 adet deneysel verilerin değerlendirmeleri duraylılık çözümlenmeleri için kullanılmıştır. Kumtaşı ve siltaşı verileri kullanılarak elde edilen mekanik özellikler değerlendirilip yorumlanmıştır. Çalışmada sonsuz uzunluktaki dairesel, atnalı ve invert tabanlı atnalı yeraltı açıklık şekilleri için sayısal elastik ve elasto-plastik çözümlenmeler yapılmıştır. Kumtaşında ve siltaşı için sayısal çözümlenmelerde kullanılmış olan değerler Çizelge 5.1 de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Çözümlenelerde kullanılan ortalama değerler.

a. Tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve H-B m_i sabiti değerleri

	Veri sayısı (n)	σ_{ci} (MPa)	σ_{tB} (MPa)	m_i^*
Kumtaşı	74	96.7 ± 28.1	7.6 ± 2.6	12.3 ± 4.6
Silttaşı	12	66.4 ± 22	6.2 ± 2.2	10 ± 4.7

$$*m_i = 16 (\sigma_{tB} / \sigma_c - \sigma_c / \sigma_{tB})$$

b. Elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri

	Veri sayısı (n)	E_i (MPa)	Poisson oranı (ν)
Kumtaşı	44	30240	0.25
Silttaşı	12	26297	0.25

ZEDEM verilerine göre 74 adet kumtaşı kaya malzemesi için yapılan istatistiksel analizler sonucunda tek eksenli basınç dayanımı (UCSi) ortalama 96.7 MPa, standart sapma değeri (SD) 28.1 olarak hesaplanmıştır. Değerler birbirinden uzak olup düzgün bir dağılıma sahip değildir. Buradaki değerler ortalamaya göre %29.0'luk bir değişim göstermektedir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 Kumtaşı kaya birimi için tek eksenli basınç dayanımına ait özet istatistik değerleri.

Özet istatistik değerleri									
n	Min	Q1	Ortanca	Q3	Mak	Ortalama	Varyans	Std Sapma	Değişim katsayısı
74	40	77.3	98	110	195	96.7	787.5	28.1	29.0

ZEDEM verilerine göre 74 adet kumtaşında yapılan deneysel sonuçların istatistiksel analizinden dolayı (Brazilian) çekme dayanımı ortalama 7.6 MPa, standart sapma değeri 2.6 olarak hesaplanmıştır. Değerler birbirinden uzak olup düzgün bir dağılıma sahip değildir. Buradaki değerler ortalamaya göre %34.0'lük bir değişim göstermektedir (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3 Kumtaşı kaya birimi için dolaylı çekme dayanımına ait özet istatistik değerleri.

Özet istatistik değerleri									
n	Min	Q1	Ortanca	Q3	Mak	Ortalama	Varyans	Std Sapma	Değişim katsayısı
74	2.3	5.7	7.8	9.3	13.94	7.6	6.7	2.6	34.0

ZEDEM verilerine göre 74 adet kumtaşından elde edilen deneysel sonuçların istatistiksel analizinden m_i değeri ortalama 12.3, standart sapma değeri 4.6 olarak hesaplanmıştır. Değerler birbirinden uzak olup düzgün bir dağılıma sahip değillerdir. Buradaki değerler ortalamaya göre %37.4'lük bir değişim göstermektedir (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4 Kumtaşı kaya birimi için m_i sabitine ait özet istatistik değerleri.

Özet istatistik değerleri									
n	Min	Q1	Ortanca	Q3	Mak	Ortalama	Varyans	Std Sapma	Değişim katsayısı
74	3.09	9.0	11.7	15.3	24.5	12.3	21.2	4.6	37.4

ZEDEM verilerine göre 44 adet kumtaşı kaya malzemesi deneysel verilerin istatistiksel analizi sonucunda elastisite (Young) modülü (E_i) değeri ortalama 30.2 GPa, standart sapma (SD) değeri 7.1 olarak hesaplanmıştır. Değerler birbirinden uzak olup düzgün bir dağılıma sahip değillerdir. Buradaki değerler ortalamaya göre %23.3'lük bir değişim göstermektedir (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.5 Kumtaşı kaya birimi için elastisite modülü (E_i) verilerine ait özet istatistik değerleri.

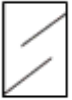





Özet istatistik değerleri									
n	Min	Q1	Ortanca	Q3	Mak	Ortalama	Varyans	Std Sapma	Değişim katsayısı
44	9.2	26.7	30.3	34.9	46.2	30.2	49.7	7.1	23.3

ZEDEM verileri sadece kuru örnekler üzerinde elde edildiğinden, sınırlı sayıda kaya malzemesi örneği üzerinde kuru ve doymuş olarak dayanım deneyleri yapılmıştır. Özellikle doymuş örneklerde dayanımda azalma görülmektedir. Dayanımdaki azalma özellikle siltaşında belirgin olarak görülmektedir. Dayanımdaki bu azalmanın başlıca nedenleri olarak siltaşın sahip anizotropik özellikler ve kaya malzemesinin zayıflık düzlemleri gösterilmektedir. Az sayıda yapılan deneylerin tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımı sonuçları Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 Az sayıdaki örnek üzerinde kuru ve doymun halde yapılan dayanım deneylerin ortalama sonuçları.

Litoloji	Kuru		Doymun	
	σ_{ci} (MPa)	σ_{tB} (MPa)	σ_{ci} (MPa)	σ_{tB} (MPa)
Kumtaşı	109.6	9.2	98.4	6.1
Silttaşı	25.0	5.5	9.5	1.0

Tez kapsamında kumtaşı ve silttaşı kaya kütlelerinin tanımlanması ve puanlandırılması için, basit gözlemlere dayalı olarak uygulanabilen, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) tercih edilmiştir. GSI değerleri sahanın sorumlu Jeoloji mühendisi ile birlikte yapılan değerlendirmeler sonucunda tespit edilmiştir (Saltık 2012). Kumtaşı kaya kütlesi için uzun süreli gözleme dayalı inceleme ve değerlendirmeler neticesinde GSI değerleri sırasıyla; 85, 55 ve 30 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.7). İnceleme alanındaki Amasra-B projesi ana galerilerde ağırlıklı olarak kumtaşı kaya kütlesinde çok bloklu yapı ve iyi yüzey koşulları (pürüzlü, hafifçe ayrılmış, lekeli yüzeyler) gözlenmiştir. Özellikle zayıflama zonlarında bloklu/örselenmiş yapı ve orta-zayıf yüzey koşulları ile karşılaşmaktadır. Yer yer kumtaşı kaya kütlesinde masif yapı ve iyi yüzey koşulları gözlenebilmektedir. Silttaşı kaya kütlesi için uzun süreli gözleme dayalı inceleme ve değerlendirmeler neticesinde GSI değerleri sırasıyla; 55 ve 30 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.8). Ana galerilerde silttaşı kaya kütlesinde çok bloklu yapı ve iyi yüzey koşulları (pürüzlü, hafifçe ayrılmış, lekeli yüzeyler) ile birlikte, özellikle kömür damarları ve zayıflama zonlarına yakın konumlarda, bloklu/örselenmiş yapı ve orta-zayıf yüzey koşulları gözlenmektedir. Fay bölgeleri ile zayıflık zonlarında ise dağılmış/ince tabakalanmış yapılar ile ayrılmış/bozunmuş zayıf yüzey koşulları ile karşılaşmaktadır (Saltık 2012).

Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)		YÜZEY KOŞULLARI				
		Azalan yüzey niteliği				
<p>Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)</p> <p>Kaya kütesinin yapısı ve süreksizliklerin yüzey koşulları göz önünde bulundurularak bu çizimden uygun bir kestirimi seçin. Konturları kullanarak ortalama bir GSI değeri kestirin. Çok hassas olmaya çalışmayın; GSI = 38 yerine, GSI için 35 - 40 aralığının belirtilmesi daha gerçekçidir. Hoek-Brown Ölçütü yalnızca kaya blokları veya parçalarının boyutunun açıklık boyutuna kıyasla daha küçük olduğu kaya kütlelerine uygulanabilir. Ortamdaki blokların boyutu yer altı açıklığı boyutunun yaklaşıktır dörtte birinden büyükse, yenilme bireysel blok hareketleriyle oluşabilir ve bu durumda Hoek-Brown Ölçütü kullanılmamalıdır.</p>		<p>ÇOK İYİ Çok pürüzlü, tuz, ayrışmamış yüzeyler.</p>	<p>İYİ Pürüzlü, hafifçe ayrışmış, ekeli yüzeyler.</p>	<p>ORTA Düzgün, orta derecede ayrışmış ve bozarmış yüzeyler.</p>	<p>ZAYIF Kırılgan, köşeli parçacıklar içeren kaplamalı veya dolgu, ileri derecede ayrışmış yüzeyler.</p>	<p>ÇOK ZAYIF Kırılgan, yuvarlak kıl kaplamalı veya dolgu, ileri derecede ayrışmış yüzeyler.</p>
<p>KAYA YAPISI Kaya parçalarının ortamı kenetlenme derecesi</p>	 <p>SAĞLAM VEYAMAŞIF Sağlam, çatlaksız kaya malzemesinin veya geniş aralıklı çok az sayıda süreksizlik içeren masif kaya kütesi.</p>	90	85	UYGULANAMAZ		
	 <p>BLOKLU Birbirine dik 3 süreksizlik takımının oluşturduğu kübik bloklar içeren, çok iyi kenetlenmiş ve örselenmiş kaya kütesi.</p>	80	70	UYGULANAMAZ		
	 <p>ÇOK BLOKLU Dört veya daha fazla süreksizlik takımının oluşturduğu çok yüzeyli ve köşeli bloklar içeren, kenetlenmiş ve kısmen örselenmiş kaya kütesi.</p>	70	60	55	UYGULANAMAZ	
	 <p>BLOKLU / ÖRSLENMİŞ Birbirini kesen bir çok süreksizlik takımının oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kırılmamış ve veya faylanmış kaya kütesi.</p>	60	50	40	UYGULANAMAZ	
	 <p>DAĞILMIŞ Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının karışımından oluşan, zayıfça kenetlenmiş ve ağır derecede kırılmış kaya kütesi.</p>	50	40	30	UYGULANAMAZ	
	 <p>YAPRAKLANMIŞ İNCE TABAKALANMIŞ Kıvrımlanmaya ve tektonik olarak kesme hareketlerine maruz kalmış, yapraklanmış kaya kütesi. Diğer süreksizlik takımlarına kıyasla daha eğmen olan ince tabakalanma, kaya kütesindeki blokların boyutlarıdır.</p>	40	30	25	20	10
		30	20	10	5	0

Şekil 5.7 Kumtaşı kaya kütesi için seçilen GSI değerleri.

Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)		YÜZEY KOŞULLARI				
		Azalan yüzey niteliği →				
<p>Kaya kütesinin yapısı ve süreksizliklerin yüzey koşulları göz önünde bulundurularak bu çizenden uygun bir kutucuğu seçin. Konturları kullanarak ortalama bir GSI değeri kestirin. Çok hassas olmaya çalışmayın; GSI = 38 yerine, GSI için 35 - 40 aralığının belirtilmesi daha gerçekçidir. Hoek-Brown Ölçütü yalnızca kaya blokları veya parçalarının boyutunun açıklık boyutuna kıyasla daha küçük olduğu kaya kütlelerine uygulanabilir. Ortamdaki blokların boyutu yer altı açıklığı boyutunun yarıya kadar dörtte birinden büyükse, yenilme bireysel blok hareketleriyle oluşabilir ve bu durumda Hoek-Brown Ölçütü kullanılmamalıdır.</p>		<p>ÇOK İYİ Çok pürüzlü, tuz, ayrışmamış yüzeyler.</p>	<p>İYİ Pürüzlü, hafifçe ayrışmış, köşeli yüzeyler.</p>	<p>ORTA Düzgün, orta derecede ayrışmış ve bozunmuş yüzeyler.</p>	<p>ZAYIF Kırılgan, köşeli parçacıklar içeren kaplamalı veya dolgu, ileri derecede ayrışmış yüzeyler.</p>	<p>ÇOK ZAYIF Kırılgan, yunusnak, kıl kaplamalı veya dolgu, ileri derecede ayrışmış yüzeyler.</p>
<p>KAYA YAPISI Kaya parçalarının aralıklı kenetlenme derecesi ↑</p>	<p>SAĞLAM VEYAMAŞIF Sağlam, çatlaksız kaya malzemesinin veya geniş aralıklı çok az sayıda süreksizlik içeren masif kaya kütesi.</p>	90				UYGULANAMAZ
	<p>BLOKLU Birbirine dik 3 süreksizlik takımının oluşturduğu kübik bloklar içeren, çok iyi kenetlenmiş ve örselenmemiş kaya kütesi.</p>	80				
	<p>ÇOK BLOKLU Dört veya daha fazla süreksizlik takımının oluşturduğu çok yüzeyli ve köşeli bloklar içeren, kenetlenmiş ve kısmen örselenmiş kaya kütesi.</p>	70				
	<p>BLOKLU / ÖRSELENMİŞ Birbirini kesen bir çok süreksizlik takımının oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kırılmış ve/veya faylanmış kaya kütesi.</p>	60	55			
	<p>DAĞILMIŞ Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının karışımından oluşan, zayıfça kenetlenmiş ve aşırı derecede kırılmış kaya kütesi.</p>	50				
	<p>YAPRAKLANMIŞ/İNCE TABAKALANMIŞ Kırılmış ve tektonik olarak kesme hareketlerine maruz kalmış, yapraklanmış kaya kütesi. Diğer süreksizlik takımlarına kıyasla daha egemen olan ince tabakalanma, kaya kütesindeki blokların boyutunu belirler.</p>	40		30		
		30	25	20	10	5
						UYGULANAMAZ

Şekil 5.8 Siltaşı kaya kütesi için seçilen GSI değerleri.

Örselenmemiş eklemli kaya kütleleri için genelleştirilmiş Hoek-Brown (H-B) yenilme ölçütü parametreleri m_b , s ve a değerleri aşağıdaki eşitliklerden yararlanılarak elde edilmiştir. Hoek ve Brown kaya kütesi parametrelerinin elde edilmesinde çok iyi patlatma yapıldığı varsayılmış olup örselenme faktörü (D) sıfır olarak kabul edilmiştir.

$$m_b = m_i \exp \frac{GSI-100}{28} \quad (5.1)$$

$$s = \exp \frac{GSI-100}{9} \quad (5.2)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (5.3)$$

Tez çalışması kapsamında kaya kütesinin deformasyon modülü tahmini için Hoek ve Diederichs (2006) tarafından önerilen Eşitlik 5.4 kullanılmıştır. Kaya kütesinin basınç dayanımı Eşitlik 5.5 ile tahmin edilebilmektedir. Çok iyi patlatma yapıldığı varsayıldığından örselenme faktörü (D) sıfır alınmıştır. Sayısal çözümler için kaya kütesinin poisson oranı (v_M) ise, kumtaşı ve silttaşı için sabit kabul edilip, 0.25 olarak alınmıştır.

$$E_m = E_i \left(0.2 + \frac{1}{1 + e^{((60-GSI)/11)}} \right) \quad (5.4)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} S^a \quad (5.5)$$

Sayısal duraylılık çözümlerinde kumtaşı ve silttaşı için kullanılan kaya malzemesi ile kütesi parametreleri Çizelge 5.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.7 Çözümlerinde kumtaşı ve silttaşı için kullanılan kaya malzemesi ile kütesi parametreleri.

GSI	Kumtaşı			Silttaşı	
	55	85	30	55	30
UCS _i	96.7 MPa	96.7 MPa	96.7 MPa	66.4 MPa	66.4 MPa
UCS _M	7.8 MPa	42.0 MPa	1.7 MPa	5.3 MPa	1.1 MPa
m _i	12	12	12	10	10
m _b	2.406	7.023	0.985	2.005	0.821
s	0.0067379	0.1888756	0.0004189	0.0067379	0.0004189
a	0.5040	0.5004	0.5223	0.5040	0.5223
E _i	30240 MPa	30240 MPa	30240 MPa	26297 MPa	26297 MPa
E _M	12346.4 MPa	28020.2 MPa	2461.0 MPa	10736.6 MPa	2140.1 MPa
v _M	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

i = kaya malzemesi M = kaya kütesi

UCS = tek eksenli basınç dayanımı

E = elastisite (Young) modülü

v = Poisson oranı

5.4 DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ

Tez çalışmasında çözümlenmelerde PHASE2 ver. 8.0 (Rocscience 2012) sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. PHASE2 programı, jeomekanikte karşılaşılan düzlem birim deformasyon durumu ile iki boyutlu yeraltı açıklıklarının (tünel, maden vb.) gerilme ve duraylılık çözümlenmelerinde kullanılabilen bir sonlu elemanlar bilgisayar yazılımıdır. Program; sayısal modelin hazırlanmasını sağlayan "MODEL", sayısal çözümlerin yapılmasını sağlayan "COMPUTE" ve sonuçların değerlendirilmesini/yorumlanmasını sağlayan "INTERPRET" kısımlarından meydana gelmektedir. Program hakkında detaylı bilgiler kullanım kılavuzlarında verilmektedir. PHASE2 programında sayısal gerilme çözümlenmesinde, kaya kütlelerinin elastik ve çeşitli yenilme ölçütlerine göre elasto-plastik malzeme davranışları modellenmektedir. Bunlar sırasıyla; Mohr-Coulomb (M-C), Hoek-Brown (H-B) ve Drucker-Prager (D-P) yenilme ölçütleridir (Rocscience 2012). Çalışmada PHASE2 programı ile incelenen yeraltı ana galeri duraylılık çözümlenmelerinde, çeşitli işletme koşulları (birincil gerilme, kaya kütlelerinin mekanik özellikleri, açıklık şekli, tahkimat şekli, içsel su basıncı) için, elastik ve ideal elasto-plastik çözümlenmeler gerçekleştirilmiştir. Kaya yenilme ölçütü olarak genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılmıştır. Ayrıca, girdi parametrelerindeki değişkenliklerin çözümlenme sonuçlarına etkileri duyarlılık analizleri aracılığıyla incelenmiştir.

5.4.1 Birincil Gerilme ve İçsel Su Basıncı Durumu

Çözümlenmelerde, yeraltı açıklığının oluşturulduğu bölgedeki üç adet asal birincil gerilmeler bileşenlerinden birinin düşey konumda (P_v), diğerlerinin de yatay konumlarda (kesit düzlemi ve kesit düzlemine dik) olduğu varsayılmıştır. PHASE2 programında, iki boyutlu düzlem birim şekil değiştirme çözümlenmelerinde düşey (P_v) ve iki adet yatay asal birincil gerilmeler tanımlanabilmektedir (P_h). Tez çalışmasında, 600 m derinlikteki ana galeri açıklıkları çevresinde, hidrostatik birincil gerilme durumunun etkili olduğu varsayılmıştır. Hidrostatik birincil gerilme durumunda tüm asal birincil gerilme bileşenleri birbirine eşit olmaktadır ($P_v = P_{h_{max}} = P_{h_{min}}$). Düşey birincil gerilmeler üst örtü tabakalarının ortalama birim hacim ağırlıkları (γ_{ort}) ve yerüstünden derinlik (H) değerlerinden yararlanılarak hesaplanabilmektedir. Derin kömür madenleri için düşey birincil gerilmenin tahmininde Eşitlik 5.6 kullanılabilir. Sayısal çözümlenmelerde yerüstünden 600 m derinlikteki ana

galeri açıklıkları için hesaplanan sabit ve hidrostatik birincil arazi gerilme değerleri Çizelge 5.8’de verilmiştir.

$$P_v \text{ (MPa)} = 0.025 \text{ (MPa/m)} \times H \text{ (m)} \quad (5.6)$$

Çizelge 5.8 Çözümlenelerde kabul edilen 600 m derinlikte sabit birincil gerilme değerleri.

Birincil gerilme durumu	Düşey birincil gerilme P_v^* (MPa)	Yatay birincil gerilme P_h (MPa)	k oranı (P_h/P_v)
Hidrostatik	15	15	1

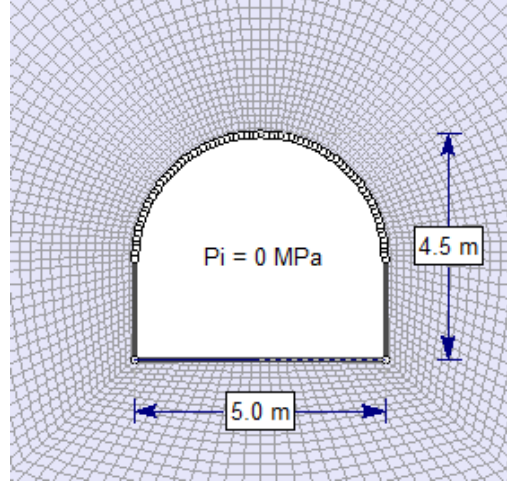
$$* P_v = \gamma h = 0.025 \text{ MPa/m} \times 600 \text{ m} = 15 \text{ MPa}$$

PHES tesisleri için derinlerde, üst ve alt su depolama rezervuarlarındaki su düşü veya yükseklik farkına (H) bağlı olarak, etkili olan içsel statik su basıncı Eşitlik 5.7 aracılığıyla hesaplanabilmektedir (Hoek 2006). Tez çalışması kapsamında incelenen 600 m derinlikteki yeraltı açıklıklarında etkili olacak olan maksimum içsel statik su basıncı (P_i) 6 MPa olarak hesaplanmıştır.

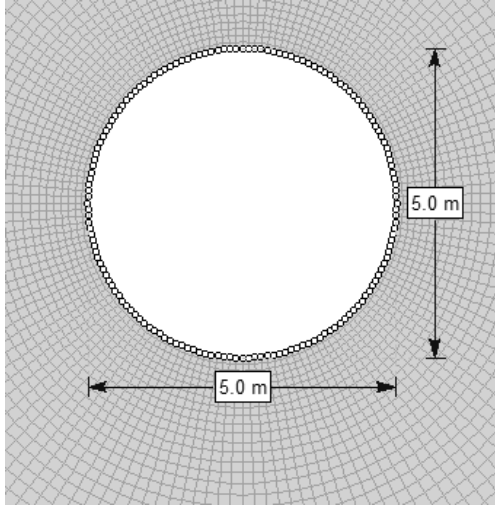
$$P_i \text{ (MPa)} = 0.01 \text{ (MPa/m)} \times H \text{ (m)} \quad (5.7)$$

5.4.2 İncelenen Açıklık Şekilleri

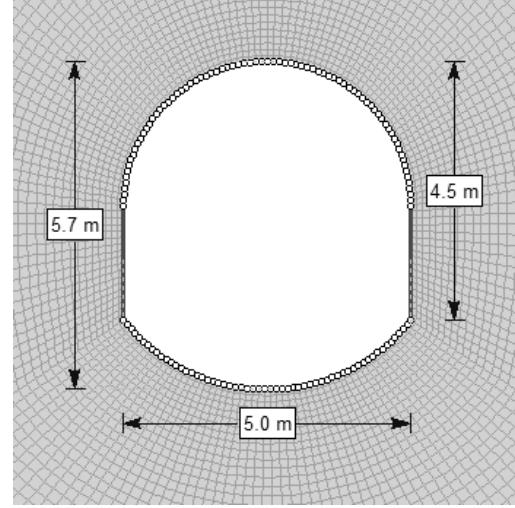
Zonguldak taşkömürü havzası Amasra-B proje sahasında ana galeriler B24 atnalı kesitte oluşturulmaktadır. Tez çalışması kapsamında, atnalı kesit dışında, dairesel ve invert tabanlı atnalı yeraltı açıklık şekilleri için de sayısal çözümleneler yapılmıştır (Şekil 5.9). Sonsuz uzunluktaki ve sabit şekilli yeraltı açıklık varsayımı ile iki boyutlu düzlem birim deformasyon durumu çözümleneleri yapılmıştır. Sonsuz uzunluktaki açıklıklar için yeraltı açıklıkları modelin ortasında yer almakta olup, sabit birincil gerilme koşulları için, modelin yanıl sınırları yer değiştirmeye karşı sabitlenmektedir. Modellerin yanıl sınırları, modellemelerde kenar etkilerinin sınırlandırılması için, yeraltı açıklık kenarlarından, açıklık çapının yaklaşık 9 katı uzaklıkta alınmıştır (Şekil 5.10). Düzgün dağılımlı ve sınır koşullarına doğru genişleme özelliği gösteren bir ağ (mesh) elde etmek için açıklık çevresinde radyal ağ yöntemi tercih edilmiştir.



a. Atnalı açıklık modeli.



b. Dairesel açıklık modeli.



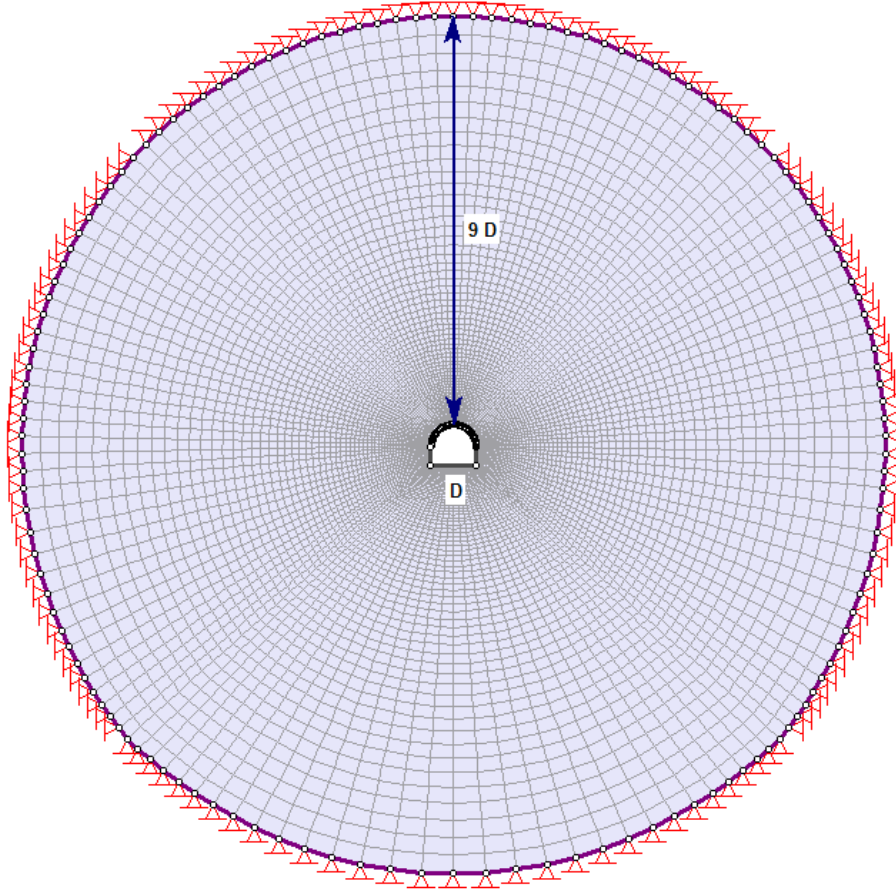
c. İvert tabanlı atnalı açıklık modeli.

Şekil 5.9 İncelenen yeraltı açıklık şekilleri.

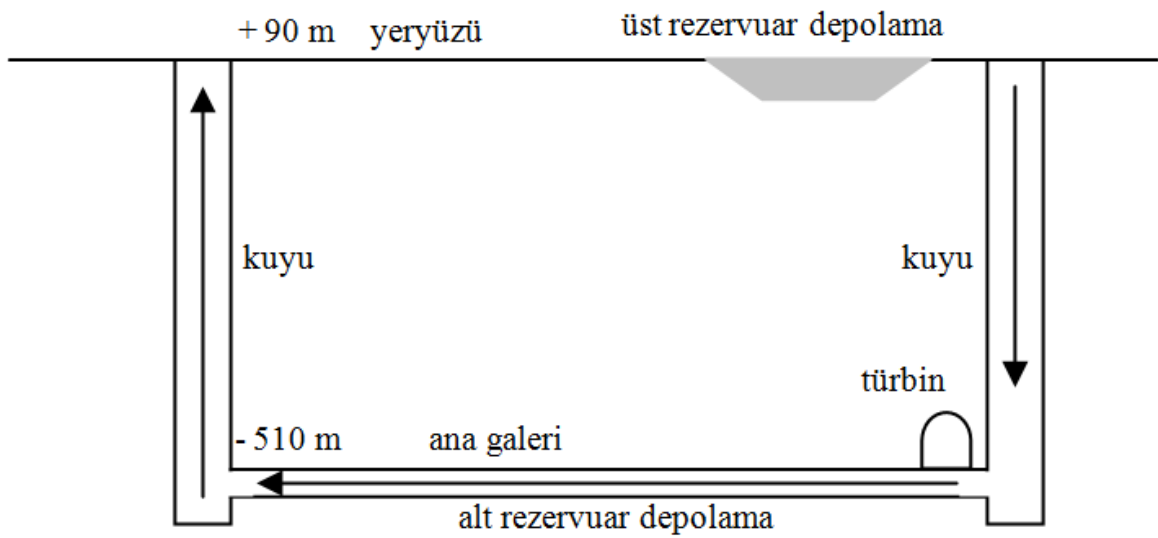
5.4.3 Farklı İşletme Durumları için Duraylılık Çözümlenmeleri

Tez çalışması kapsamında Amasra-B sahası derin yeraltı kömür madeninde, gelecekte kömür üretiminin sona ermesinden sonra, ana galeri açıklıklarından PHES'ler için alt rezervuar depolama uygulamalarında yararlanılma olanakları araştırılmıştır. Yeraltı kömür madeninde PHES depolama yöntemi basitleştirilmiş olarak Şekil 5.11'de verilmiştir. Kömür çevre kayaları olarak Amasra kömür madeninde ana galerilerde temel kaya türünü teşkil eden kumtaşı ve ikincil kaya türünü oluşturan silttaşı incelenmiştir. Madenin yerüstünden derinliği 600 m ve hidrostatik birincil gerilmeler 15 MPa alınmıştır. PHES su depolama amaçlı rezervuara yönelik olarak ana galerilerin jeomekanik uygunluğu sayısal duraylılık

çözümleri aracılığıyla incelenmiştir. Duraylılık çözümleri için farklı kaya kütlesi ve işletme koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

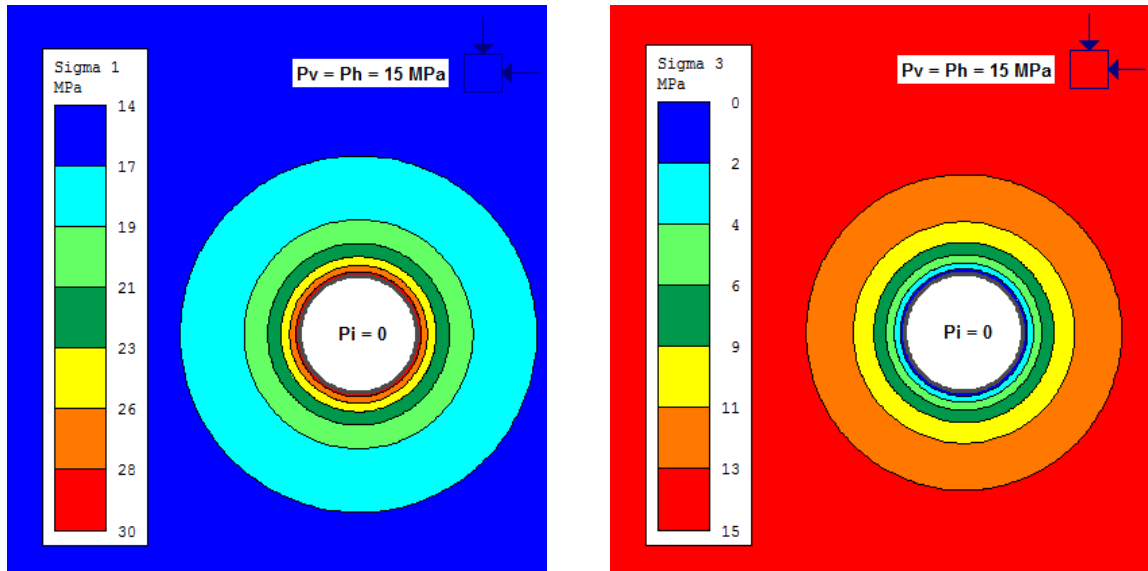


Şekil 5.10 Sayısal çözümlerde kullanılan radyal sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları.



Şekil 5.11 İncelenen yeraltı kömür madeni için PHES su depolama yönteminin görünümü.

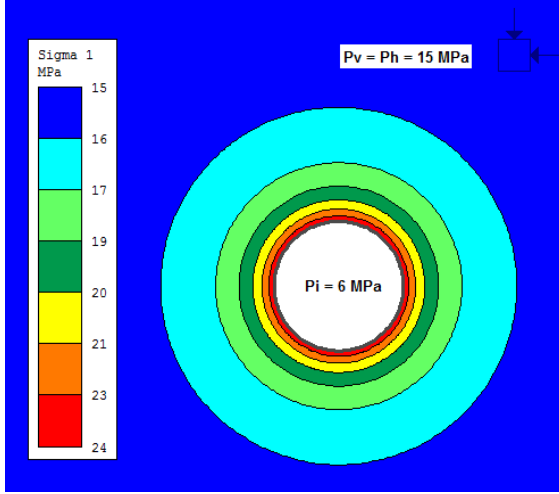
Çalışmada önce dairesel açıklık çevresinde elastik çözümler ile en büyük ve en küçük asal ikincil gerilme dağılımları incelenmiştir. Asal ikincil gerilme dağılımları hem içsel su basıncı ($P_i=0$) etkisi olmadan (Şekil 5.12) hem de 600 m derinlik için en büyük statik su basıncı etkisinde ($P_i=6$ MPa) incelenmiştir (Şekil 5.13). Hidrostatik birincil gerilme altında içsel basınçsız dairesel açıklık çevresinde oluşan en büyük elastik gerilme birincil gerilmenin 2 katı olmaktadır. 6 MPa'lık içsel su basıncı etkisi altında ise en büyük elastik gerilme 24 MPa civarında oluşmaktadır. Açıklığın yakın çevresinde etkili olan en büyük asal ikincil gerilme açıklıktan uzaklaştıkça birincil gerilmelere yakınsamaktadır. Yeraltı açıklık duvarında en küçük asal ikincil gerilme içsel basınç değerine eşit olup açıklıktan uzaklaştıkça birincil gerilmelere yakınsamaktadır. İçsel su basıncı etkisindeki açıklık duvarında üç eksenli gerilme durumu oluşurken, su basıncı etkisi olmadığında yaklaşık tek eksenli gerilme durumu oluşmaktadır.



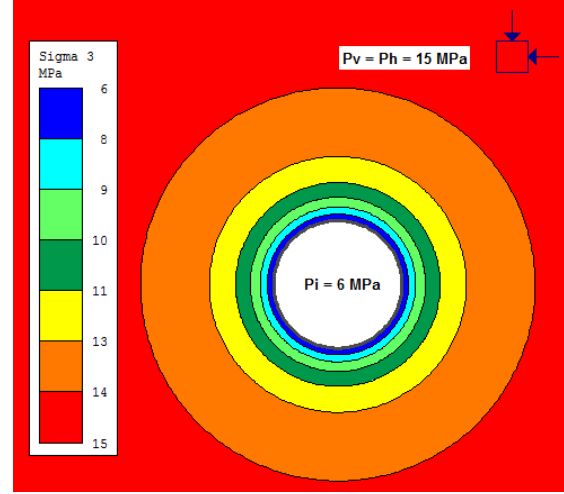
a. En büyük asal ikincil gerilme.

b. En küçük asal ikincil gerilme.

Şekil 5.12 İçsel su basıncı ($P_i=0$) etkisi olmadan dairesel açıklık çevresinde asal ikincil gerilme dağılımları.



a. En büyük asal ikincil gerilme.



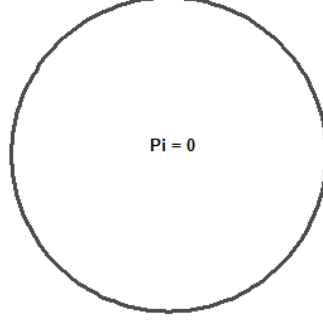
b. En küçük asal ikincil gerilme.

Şekil 5.13 İçsel su basıncı etkisinde ($P_i=6$ MPa) dairesel açıklık çevresinde asal ikincil gerilme dağılımları.

Tez çalışmasında Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ile bağlantılı olarak ifade edilen kaya kütlesi kalitesinin değişimi ile açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerini incelemek için elasto-plastik çözümler yapılmıştır. Çözümler kumtaşı (GSI 85, GSI 55, GSI 30) ve silttaşı (GSI 55, GSI 30) kaya kütleleri için ayrı elde edilmiştir. Hem kumtaşı hem de silttaşı için yeraltı kömür madeni ana galerilerde en yaygın kaya kütlesi koşulları GSI 55 değerini temsil eden koşullardır. Elasto-plastik çözümlerde kullanılan GSI değerleri, Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü dayanım parametreleri, ve kaya kütlesi elastik özellikleri Çizelge 5.8’de verilmiştir. Şekil 5.13’de dairesel açıklık çevresinde farklı kumtaşı kaya kütlesi koşullarında oluşan yenilme bölgelerine ait görünüm yer almaktadır. Şekil 5.14’de ise farklı silttaşı kaya kütlesi koşullarında oluşan yenilme bölgelerine ait görünüm yer almaktadır. İncelenen durumlarda yeraltı açıklığında içsel su basıncı etkisinin olmadığı ($P_i=0$) ve çevre kayaların kuru olduğu varsayılmıştır. GSI 85 koşulunda, mevcut kaya ve işletme koşulları altında, açıklık çevresinde yenilme oluşmadığı görülmektedir. GSI 55 durumunda açıklık çevresinde bir miktar yenilme oluştuğu belirtilmektedir. Bu yenilme kaya saplaması ve püskürtme beton destekleme elemanları ile kontrol altına alınabilmektedir. GSI 30 koşulunda ise açıklık çevresinde yenilme bölgesi önemli ölçüde büyümekte ve duraysızlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu koşullarda kaya saplaması ve püskürtme betondan oluşan destekleme sistemine ek olarak çelik bağ tahkimatına da ihtiyaç duyulabilmektedir. Aynı koşullar altında açıklık çevresindeki silttaşı kaya kütlesinde kumtaşına kıyasla daha büyük bir yenilme bölgesi oluşmaktadır.

Kumtaşı
GSI = 85
UCSi = 96.7 MPa
mi = 12
Ei = 30.24 GPa

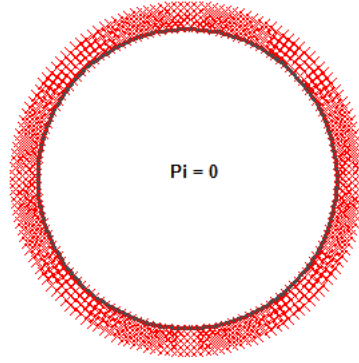
$$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$$



a. GSI 85 kaya kütlesi durumu.

Kumtaşı
GSI = 55
UCSi = 96.7 MPa
mi = 12
Ei = 30.24 GPa

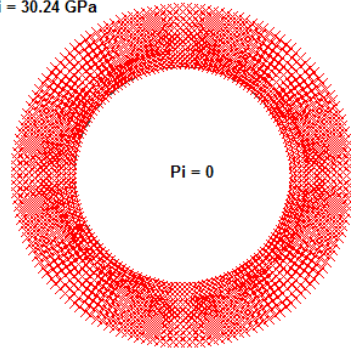
$$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$$



b. GSI 55 kaya kütlesi durumu.

Kumtaşı
GSI = 30
UCSi = 96.7 MPa
mi = 12
Ei = 30.24 GPa

$$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$$

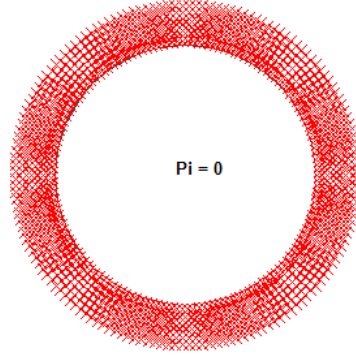


c. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.14 Kumtaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında dairesel açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.

Silttaşı
GSI =55
UCSi = 66.4 MPa
mi = 10
Ei = 26.3 GPa

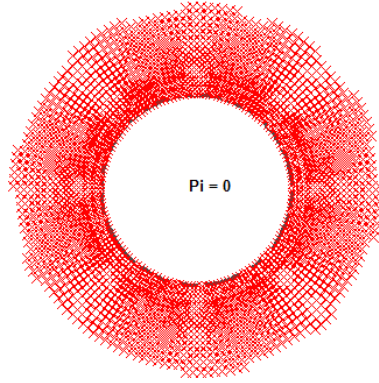
$$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$$



a. GSI 55 kaya kütlesi durumu.

Silttaşı
GSI =55
UCSi = 66.4 MPa
mi = 10
Ei = 26.3 GPa

$$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$$

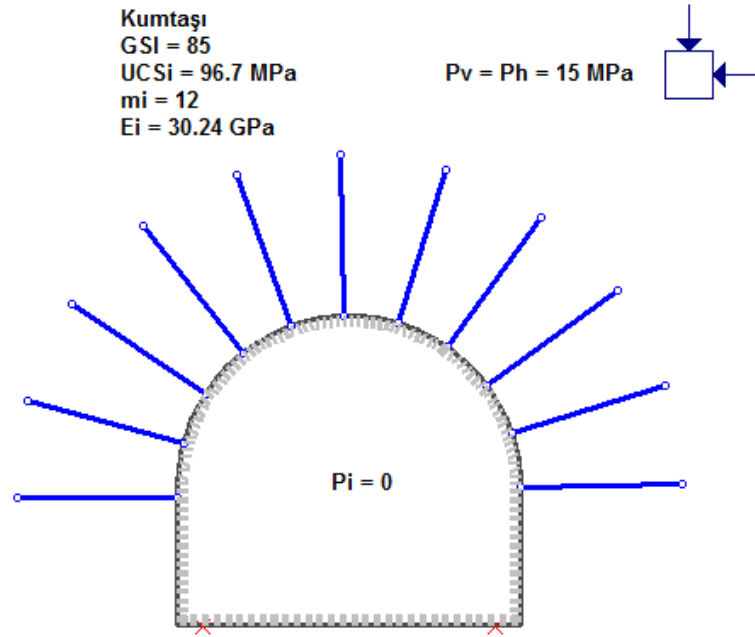


b. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.15 Silttaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında dairesel açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.

Amasra yer altı kömür madeninde -510 ve -410 ana bağlantı katlarında ana galeriler 24 m² kesitli atnalı yeraltı açıklıklarından oluşmaktadır. Ana galeriler genelde reçineli kaya saplamaları ve püskürtme beton destekleme sisteminden meydana gelmektedir. GSI ile bağlantılı olarak ifade edilen kaya kütlesi kalitesinin değişimi ile açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerini incelemek için atnalı kesitli yeraltı açıklık için elasto-plastik çözümler yapılmıştır. Çözümleme modelinde kaya saplamaları ve püskürtme betondan oluşan tahkimat sistemi göz önünde bulundurulmuştur. Çözümler kumtaşı (GSI 85, GSI 55, GSI 30) ve silttaşı (GSI 55, GSI 30) kaya kütleleri için ayrı elde edilmiştir. Şekil 5.16'da incelenen durumlarda yeraltı açıklığında içsel su basıncı etkisinin olmadığı ($P_i=0$) ve çevre

kayaların kuru olduğu varsayılmıştır. Kumtaşıda GSI 85 koşulunda, taban ile yan duvar birleşme zonu dışında, açıklık çevresinde yenilme oluşmadığı görülmektedir (Şekil 5.16). GSI 55 durumunda açıklık çevresinde bir miktar yenilme oluştuğu belirtilmektedir. Açıklık tavanı ile yan duvar bölgesinde oluşan yenilme kaya saplaması ve püskürtme beton destekleme elemanları ile kontrol altına alınabilmektedir. En büyük yenilme zonu ise, kaya saplamaları ile desteklenmeyen açıklık tabanında oluşmaktadır. GSI 30 koşulunda ise açıklık çevresinde yenilme bölgesi önemli ölçüde büyümekte ve duraysızlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu koşullarda kaya saplaması ve püskürtme betondan oluşan destekleme sistemine ek olarak çelik bağ tahkimatına da ihtiyaç duyulabilmektedir. Aynı koşullar altında açıklık çevresindeki silttaşı kaya kütlelerinde kumtaşına kıyasla daha büyük bir yenilme bölgesi oluşmaktadır (Şekil 5.17). Özellikle GSI 30 koşulunda kaya saplaması yenilme bölgesi içinde kalmaktadır. Bundan dolayı kaya saplaması ve püskürtme betondan oluşan destekleme sistemine ek olarak çelik bağ tahkimatına ve tavan bölgede halatlı saplamalara ihtiyaç duyulabilmektedir.

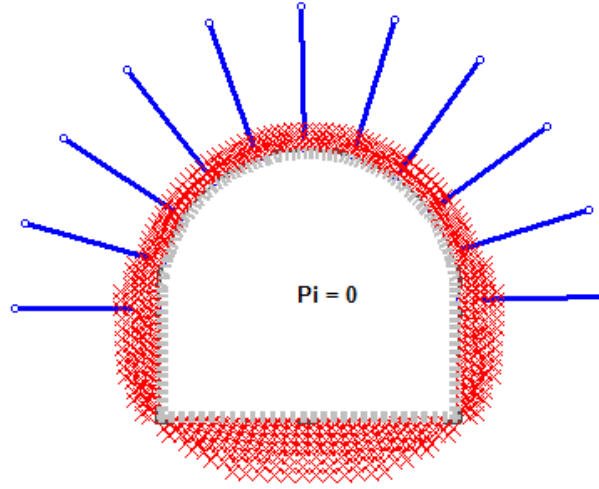
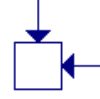


a. GSI 85 kaya kütleli durumu.

Şekil 5.16 Kumtaşı için farklı kaya kütleli koşullarında atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi

Kumtaşı
GSI = 55
UCSi = 96.7 MPa
mi = 12
Ei = 30.24 GPa

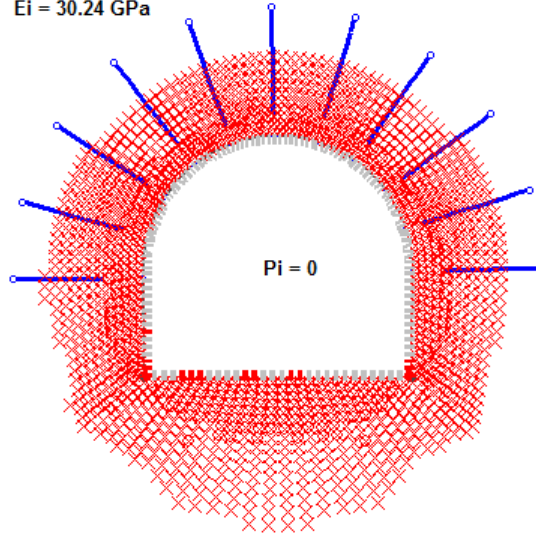
$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$



b. GSI 55 kaya kütlesi durumu.

Kumtaşı
GSI = 30
UCSi = 96.7 MPa
mi = 12
Ei = 30.24 GPa

$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$

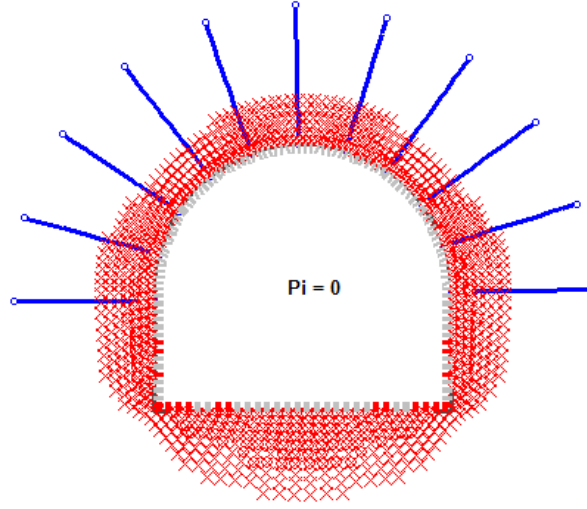


c. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.16 (devam ediyor).

Silttaşı
GSI = 55
UCSi = 66.4 MPa
mi = 10
Ei = 26.3 GPa

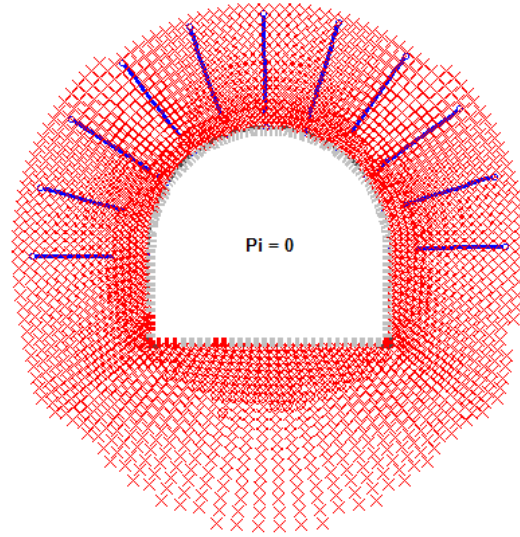
$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$



a. GSI 55 kaya kütlesi durumu.

Silttaşı
GSI = 30
UCSi = 66.4 MPa
mi = 10
Ei = 26.3 GPa

$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$

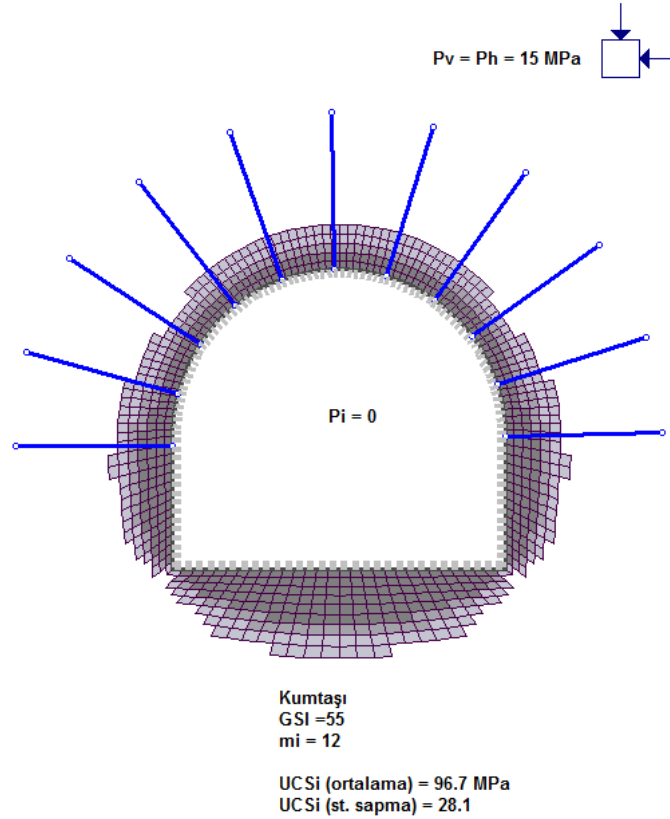


b. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.17 Silttaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.

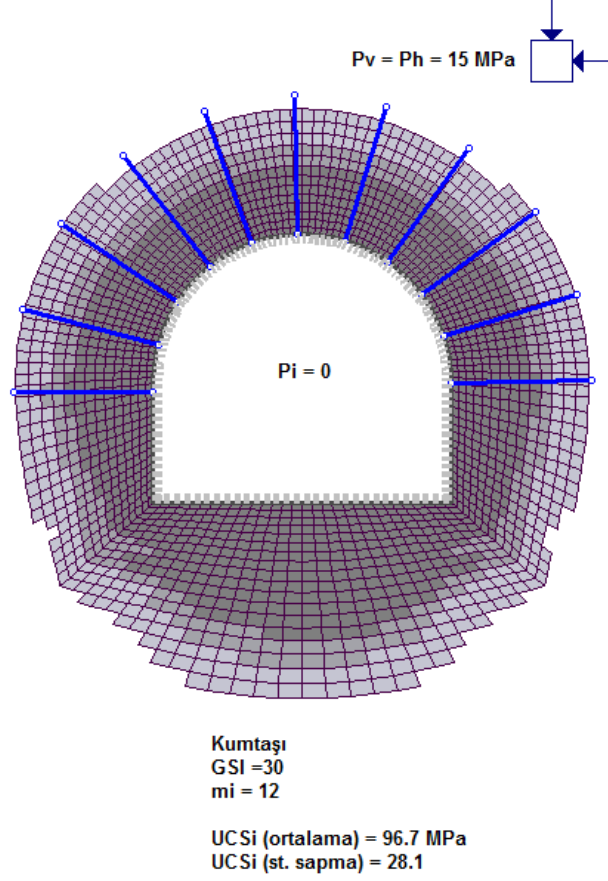
Benzer kaya kütlesi koşullarında, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımındaki (UCSi) değişimin, yenilme bölgesinin oluşumuna etkilerini incelemek için istatistiksel parametrelere (ortalama değer, standart sapma) dayalı atnalı kesit şekli için sayısal duyarlılık çözümlenmeleri yapılmıştır. Kumtaşı kaya için çözümlenme sonuçları GSI 55 ve GSI 30

durumları için Şekil 5.18’de verilmiştir. Şekilde koyu renkli bölge yüksek UCSi (124.8 MPa), açık renkli bölge ise düşük UCSi (68.6 MPa) durumunu temsil etmektedir. Kumtaşı için ortalama UCSi 96.7 MPa durumuna kıyasla düşük UCSi durumu kaya malzemesinin suya doymun dayanım azalmasını temsil edebilmektedir. PHES tesisinde su depolama öncesi kaya malzemesi genelde kuru durumda bulunurken, içsel su basıncı etkisi ve ana galerideki alt rezervuardan su pompalama aşamalarından sonra ise suya doymun durumda bulunmaktadır. Bu durumun kaya malzemesinde dayanım azalmasına ve dolaylı olarak kaya kütlesi kalitesindeki azalmaya da bağılı olarak yenilme bölgesinin büyüme göstereceğı dikkate alınmalıdır. Özellikle GSI 30 gibi daha düşük kaliteli kaya kütlesi koşulunda bu durum oldukça etkili olmaktadır. Kuru koşulları temsil eden koyu yenilme bölgesinde, mevcut destekleme elemanları (kaya saplaması, püskürtme beton) ile birlikte açıklığın duraylılığı sağlanabilirken, açık renkli bölge ile gösterilen suya doymun koşullarda oluşan yenilme bölgesinde açıklık duraylılığı mevcut destekleme elemanları ile sağlanamayabilmektedir. Bu durumun özellikle derin kömür madenlerinde ana galerilerin alt rezervuar olarak kullanılmak istenilmesi durumunda göz önünde bulundurulması gerekmektedir.



a. GSI 55 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.18 Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımındaki değişimin yenilme bölgesinin oluşumuna etkileri.

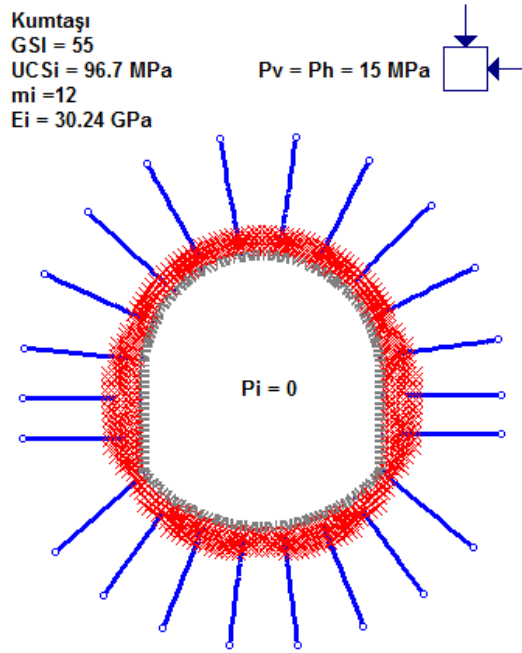


b. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.18 (devam ediyor).

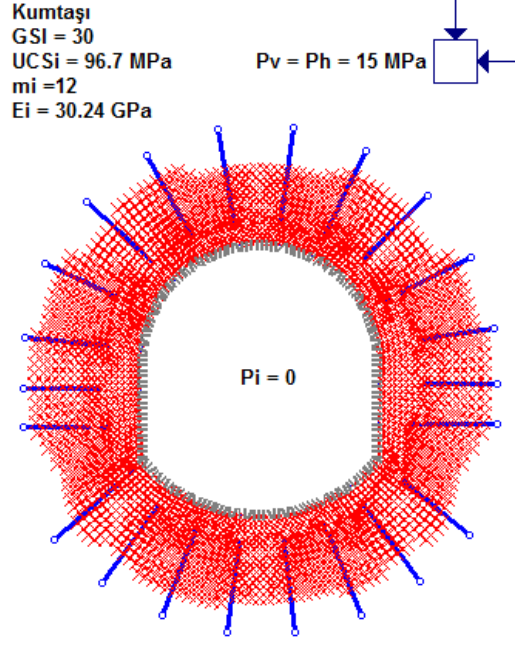
Atnalı açıklık şekli taban ile yan duvarın birleştiği bölgedeki köşeli yapısı nedeniyle, hidrostatik birincil gerilme durumunda, köşelerde yüksek gerilme yığılmalarına yol açmaktadır. Bu bölgede yenilme bölgesi genişliği genelde daha sınırlı olmasına karşın, yüksek gerilme ve yer değiştirmelerin de etkisiyle, püskürtme ve kaplama betonda çatlamalara ve yenilmelere yol açabilmektedir (Şekil 5.16-5.18). Bu durum aynı zamanda açıklık tabanında, kaya koşullarına da bağlı olarak, önemli miktarda taban kabarmalarına ve yenilmelere yol açabilmektedir. Atnalı kesitte açıklık tabanında genelde destekleme elemanları (kaya saptaması vb.) kullanılmaması nedeniyle bu bölge, yan duvar ile tabanın birleştiği zon ile birlikte, açıklık duraylılığı açısından zayıf bölgeleri oluşturmaktadır. Yeraltı açıklıkların özellik hidrolik yapılar (basıncılı su tüneli vb.) amacıyla tasarlanması durumunda bu sakinler daha da artmaktadır. Bundan dolayı, özellikle hidrolik yapılarda açıklık duraylılığı ve işlevselliği açısından en uygun kesit şeklini dairesel açıklık oluşturmaktadır. Madenlerde ana bağlantı galerilerinde ve ulaşım tünellerinde genellikle, açılma kolaylığı ve maliyetin de etkisiyle, atnalı kesit şekli tercih edilmektedir. Bu durumda klasik atnalı kesit

şekline yuvarlatılmış bir invert taban şekli verilerek sorunlar kısmen azaltılabilmektedir (Şekil 5.9). Açıklık tabanında ve yan duvar ile birleşme bölgelerinde ilave destekleme elemanları (kaya saplamaları, püskürtme beton vb.) kullanılması durumunda, açıklık duraylılığı önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Şekil 5.19'da kumtaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin değişimi verilmiştir. Şekil 5.20'de ise silttaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin değişimi görülmektedir. GSI 30 koşulunda, özellikle silttaşı kaya durumunda, açıklık çevresinde kaya saplamalarından oluşan destekleme sisteminin işlevini de sınırlandıracak büyük yenilme bölgeleri oluşmaktadır. Bu tür zayıf kaya kütlesi koşullarında, açıklık duraylılığı ile ilgili sorunların sınırlandırılması için, enjeksiyon uygulamaları ile (reçineli, çimentolu vb.) kaya yapısı iyileştirilmeli ve yenilme bölgesi sınırlandırılmalıdır.



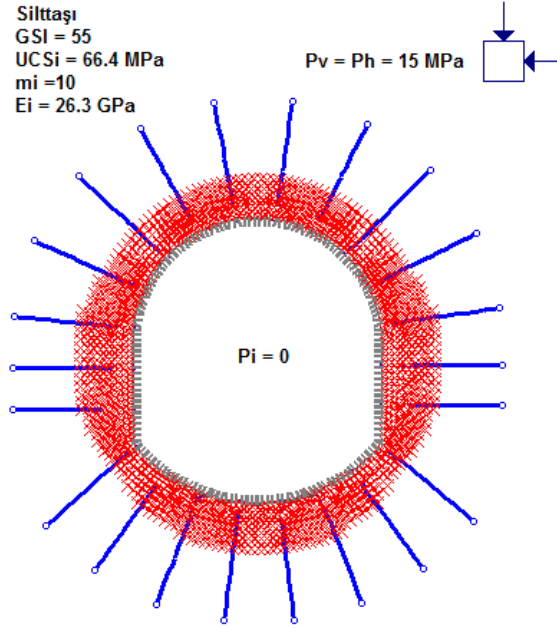
a. GSI 55 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.19 Kumtaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.



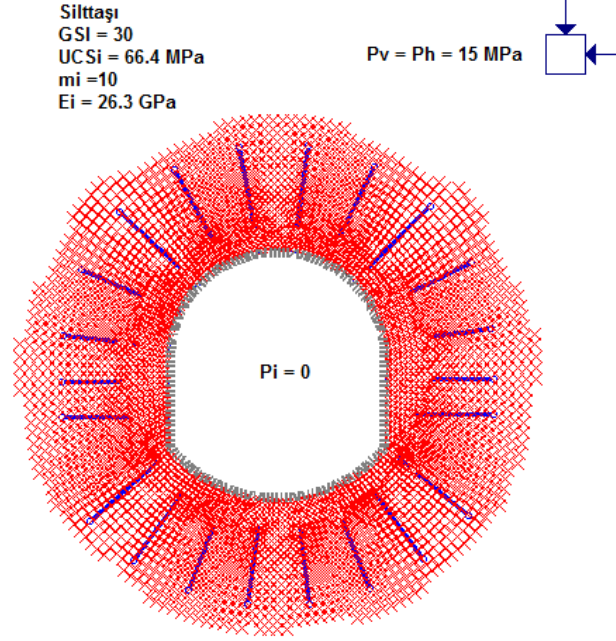
b. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.19 (devam ediyor).



a. GSI 55 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.20 Silttaşı için farklı kaya kütlesi koşullarında invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.

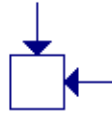


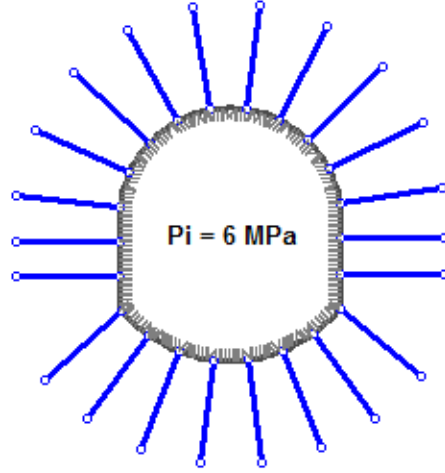
b. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.20 (devam ediyor).

Tez çalışması kapsamında 600 m derinlikteki ana galerilerin PHES tesisleri için alt su depolama rezervuarı olarak kullanılmak istenmesi durumunda yaklaşık olarak 6 MPa'lık bir statik içsel su basıncının oluşacağı tahmin edilmektedir. Ana galerinin tamamen basınçlı su ile dolu olması durumu aynı zamanda açıklık duraylılığı üzerinde güçlü bir tahkimat basıncı etkisi yaratmaktadır. Bu durum açıklık çevresinde yenilme bölgesini, kaya kalitesine de bağlı olarak, oldukça sınırlandırmaktadır (Şekil 5.21). Bu durum aynı zamanda açıklık kaplamasını oluşturan püskürtme betonun genelde geçirimsiz özellikler taşımaması ve açıklık çevresinde etkili olan yüksek içsel su basıncının da etkisiyle suyun açıklık çevresinde kaya kütlesine nüfuz etmesine yol açmaktadır. Bundan dolayı kaya malzemesi ile kütlesinde dayanım azalması ve kalite kaybı oluşmaktadır. Bu etki silttaşı gibi sudan belirgin bir şekilde etkilenen (dayanım azalması vb.) kaya türlerinde daha belirgin olmakta ve açıklık çevresinde yenilme bölgesinin artmasına yol açmaktadır (Şekil 5.22). GSI 55 durumu kuru kaya koşullarında içsel basınç etkisiyle yenilme oluşmazken, suya doygun koşulda açıklık çevresinde yenilme oluşmaktadır. Kuru ve suya doygun kaya koşulları arasındaki fark özellikle GSI 30 gibi zayıf kaya kütlesi koşullarında daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.

$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$

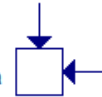


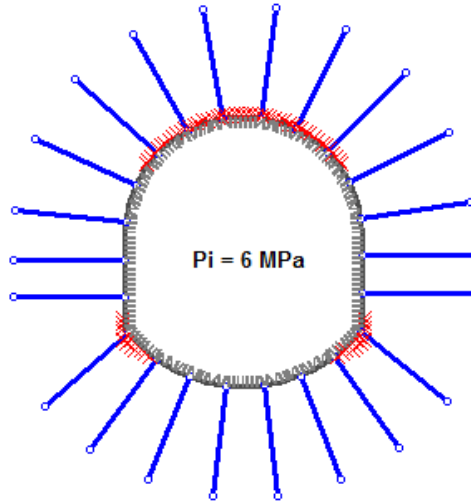


Silttaşı
GSI = 55
UCSi kuru = 66.4 MPa
mi = 10

a. GSI 55 kaya kütlesi durumu.

$P_v = P_h = 15 \text{ MPa}$

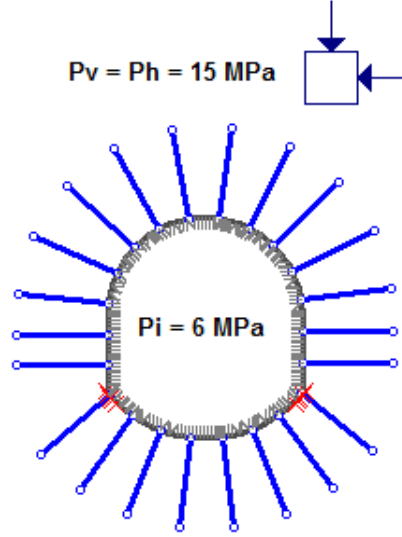




Silttaşı
GSI = 30
UCSi kuru = 66.4 MPa
mi = 10

b. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

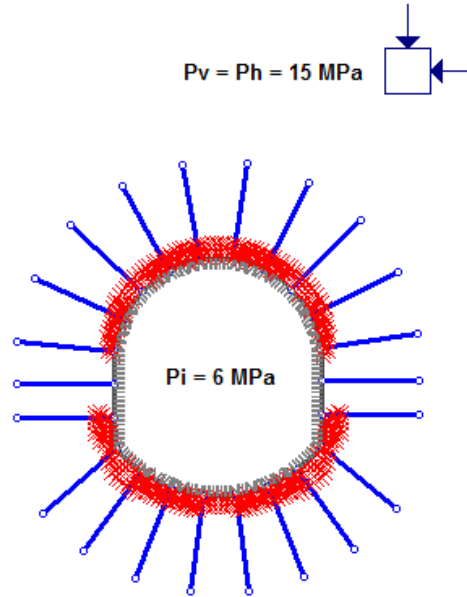
Şekil 5.21 Silttaşı için kuru kaya malzemesi ve içsel basınç etkisi durumunda invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.



Silttaşı
 GSI = 55
 UCSi doymun = 33.2 MPa
 mi = 10

(UCSi doymun = 0.5 UCSi kuru)

a. GSI 55 kaya kütlesi durumu.



Silttaşı
 GSI = 30
 UCSi doymun = 33.2 MPa
 mi = 10

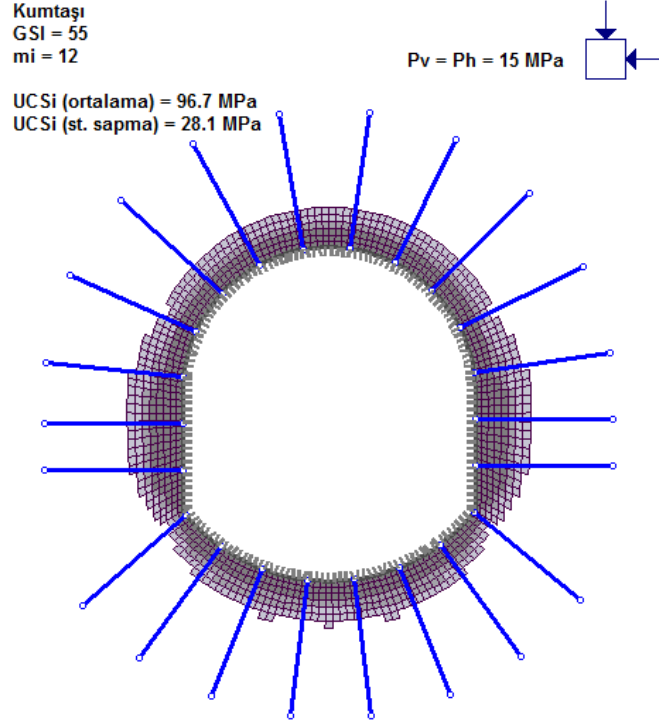
(UCSi doymun = 0.5 UCSi kuru)

b. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

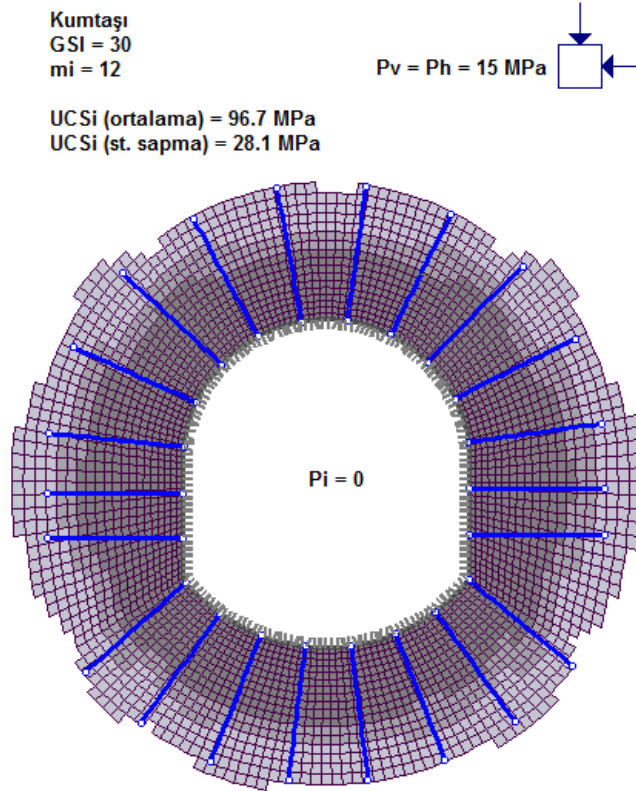
Şekil 5.22 Silttaşı için suya doymun kaya malzemesi ve içsel basınç etkisi durumunda invert tabanlı atnalı açıklık çevresinde yenilme bölgesinin değişimi.

Tez çalışması kapsamında 600 m derinlikteki ana galerilerin PHES tesisleri için alt su depolama rezervuarı olarak kullanılmak istenmesi durumunda en kritik durum ana galerilerde suyun pompalanarak uzaklaştırılmasından sonra oluşmaktadır. Bu durumda güçlü bir tahkimat basıncı etkisi yaratan statik içsel su basıncı mevcut olmadığından ve suyun açıklık çevresinde kaya kütlesine nüfuz etmesinden sonra kaya malzemesi ve yapısında oluşan olumsuz etkilenmeler neticesinde (dayanım azalması, kalite kaybı vb.) açıklık duraylılığının sağlanması güçleşmektedir. PHES tesislerinin işletme döneminde bu su döngüsünün sürekli tekrarlanacak olması nedeniyle ana galeri açıklıkları da değişken işletme koşullarına maruz kalacaktır. Bu durum açıklık kaplamasını oluşturan püskürtme betonun geçirimsiz özellikler taşınamaması ve kaya yapısının enjeksiyon uygulamaları ile iyileştirilmemesi durumunda çok daha belirgin olacaktır.

Benzer kaya kütlesi koşullarında, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımındaki (UCSi) değişimin, yenilme bölgesinin oluşumuna etkilerini incelemek için istatistiksel parametrelere (ortalama değer, standart sapma) dayalı invert tabanlı atnalı kesit şekli için sayısal duyarlılık çözümlenmeleri yapılmıştır. Kumtaşı kaya birimi için çözümlenme sonuçları GSI 55 ve GSI 30 durumları Şekil 5.23'te verilmiştir. Şekilde koyu renkli bölge yüksek UCSi (124.8 MPa), açık renkli bölge ise düşük UCSi (68.6 MPa) durumunu temsil etmektedir. Kumtaşı için ortalama UCSi 96.7 MPa durumuna (orta koyuluğa sahip bölge) kıyasla düşük UCSi durumu (açık renkli bölge) kaya malzemesinin suya doymuş dayanım azalmasını temsil edebilmektedir. PHES tesisinde su depolama öncesi kaya malzemesi genelde kuru durumda bulunurken, içsel su basıncı etkisi ve ana galerideki alt rezervuardan su pompalama aşamalarından sonra ise suya doymuş durumda bulunmaktadır. Bu durumun kaya malzemesinde dayanım azalmasına ve dolaylı olarak kaya kütlesi kalitesindeki azalmaya da bağlı olarak yenilme bölgesinin büyüme göstereceği dikkate alınmalıdır. Özellikle GSI 30 gibi daha düşük kaliteli kaya kütlesi koşulunda bu durum oldukça etkili olmaktadır. Kuru koşulları temsil eden koyu yenilme bölgesinde, mevcut destekleme elemanları (kaya saptaması, püskürtme beton) ile birlikte açıklığın duraylılığı sağlanabilirken, açık renkli bölge ile gösterilen suya doymuş koşullarda oluşan yenilme bölgesinde açıklık duraylılığı mevcut destekleme elemanları ile sağlanamayabilmektedir. Bu durumun özellikle derin kömür madenlerinde ana galerilerin alt rezervuar olarak kullanılmak istenilmesi durumunda göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Önlem alınmaması durumunda, özellikle zayıf kaya kütlesi koşullarında, yeraltı kömür madenlerinde ana galerilerin PHES su depolama amaçlı alt rezervuar hacmi olarak kullanılma olanağı oluşmayacaktır.



a. GSI 55 kaya kütlesi durumu.



b. GSI 30 kaya kütlesi durumu.

Şekil 5.23 Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımındaki değişimin yenilme bölgesinin oluşumuna etkileri.

5.5 BULGULAR VE GENEL DEĞERLENDİRMELER

Tez çalışmasında derin yeraltı kömür madenlerinde ana galerilerin, gelecekte üretim çalışmalarının sona ermesinden sonra, pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerde (PHES) su depolama amaçlı alt rezervuar olarak kullanılma olanakları araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında incelenmiş olan -510 ana kat galerisinin yerüstünden derinliği yaklaşık 600 m olarak belirlenmiştir. -510 ve -410 katlarında açılmakta olan 24 m² kesitli ana galeri ve bağlantı galerilerinin toplam uzunluğu yaklaşık 5 km olacaktır. Bu durum PHES alt rezervuar olarak kullanılabilen 120 bin m³'lük bir boşluk hacmine karşılık gelmektedir. 600 m derinlikte etkili olacak hidrostatik birincil gerilmeler 15 MPa ve en büyük statik su basıncı 6 MPa olarak belirlenmiştir.

İnceleme alanındaki Amasra-B projesi yeraltı taşkömürü madeninde, ana galeriler ağırlıklı olarak kumtaşı içinde açılmaktadır. İkincil kayaç türü silttaşı olup, yer yer konglomera ve kilttaşı birimleri ile de karşılaşmaktadır. Kömür damarlarının olduğu yerlerde kumtaşı, silttaşı, kilttaşı, şeyl bantları mevcuttur. Ayrıca fay ve zayıflık zonları ile karşılaşmaktadır. İnceleme alanındaki ana galerilerde kumtaşı kaya kütlelerinde genelde çok bloklu yapı ve iyi yüzey koşulları (pürüzlü, hafifçe ayrılmış, lekeli yüzeyler) gözlenmiştir. Zayıflama zonlarında ise bloklu/örselenmiş yapı ve orta-zayıf yüzey koşulları ile karşılaşmaktadır. Yer yer kumtaşı kaya kütlelerinde masif yapı ve iyi yüzey koşulları da belirlenmiştir. Kumtaşı kaya kütleleri için GSI değerleri sırasıyla; 85, 55 ve 30 olarak tespit edilmiştir. Ana galerilerde silttaşı kaya kütlelerinde çok bloklu yapı ve iyi yüzey koşulları (pürüzlü, hafifçe ayrılmış, lekeli yüzeyler) ile birlikte, özellikle kömür damarları ve zayıflama zonlarına yakın konumlarda, bloklu/örselenmiş yapı ve orta-zayıf yüzey koşulları gözlenmektedir. Silttaşı kaya kütleleri için GSI değerleri sırasıyla; 55 ve 30 olarak tespit edilmiştir. Fay bölgeleri ile zayıflık zonlarında ise dağılmış/ince tabakalanmış yapılar ile ayrılmış/bozunmuş zayıf yüzey koşulları ile karşılaşmaktadır.

Genel olarak elde edilen sayısal çözümlene sonuçları değerlendirildiğinde, açıklık çevresinde oluşan asal ikincil gerilmeler ve yenilme bölgeleri birincil gerilmelere, açıklık geometrisine, çevre kaya kütlelerinin mekanik özelliklerine ve açıklık içerisinde etkili olan içsel su basıncına bağlıdır. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri karşılaştırıldığında dairesel açıklık şekli duraylılık açısından en iyi durumu yansıtmaktadır. Ana galerilerde uygulanacak invert tabanlı atnalı açıklık şekli, klasik atnalı açıklık şekline kıyasla duraylılık açısından daha olumlu bir

görünüm sergilemektedir. Atnalı açıklıkların taban ile yan duvarın birleştiği bölgedeki köşeli yapıları nedeniyle, köşelerde yüksek gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Bu bölgede, yüksek gerilme ve yer değiştirmelerin de etkisiyle taban kabarmaları, püskürtme ve kaplama betonda çatlamlar ve yenilmeler meydana gelebilmektedir. Yeraltı açıklıkların özellik hidrolitik yapılar (basınçlı su tüneli vb.) amacıyla tasarlanması durumunda bu sakıncalar daha da artmaktadır. Bundan dolayı, özellikle hidrolitik yapılarda açıklık duraylılığı ve işlevselliği açısından en uygun kesit şeklini dairesel açıklık oluşturmaktadır. Klasik atnalı kesit şekline yuvarlatılmış bir invert taban atnalı şekil verilerek beklenen sorunlar azaltılabilmektedir. Açıklık tabanında ve yan duvar ile birleşme bölgelerinde ilave destekleme elemanları (kaya saptamaları, püskürtme beton vb.) kullanılması durumunda, açıklık duraylılığı önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Ayrıca, bu açıklık şeklinin uygulanması durumunda su depolama amaçlı kullanılabilecek daha fazla faydalı hacim elde edilecektir.

Ana galeriler PHES tesisleri için alt su depolama rezervuarı olarak kullanıldığında galerilerde güçlü bir tahkimat basıncı etkisi yaratan basınçlı su etkisi oluşacaktır. Bu durum aynı zamanda açıklık kaplamasını oluşturan püskürtme betonun genelde geçirimsiz özellikler taşımaması ve açıklık çevresinde etkili olan yüksek içsel su basıncının da etkisiyle suyun açıklık çevresinde kaya kütesine nüfuz etmesine yol açmaktadır. Bundan dolayı kaya malzemesi ile kütesinde dayanım azalması ve kalite kaybı oluşmaktadır. Bu etki silttaşı gibi sudan belirgin bir şekilde etkilenen (dayanım azalması vb.) kaya türlerinde daha belirgin olmakta ve açıklık çevresinde yenilme bölgesinin artmasına yol açmaktadır. Ana galerilerin PHES tesisleri için alt su depolama rezervuarı olarak kullanılması durumunda en kritik aşama ana galerilerde suyun pompalanarak uzaklaştırılmasından sonra oluşmaktadır. Bu durumda güçlü bir tahkimat basıncı etkisi yaratan statik içsel su basıncı mevcut olmadığından ve suyun açıklık çevresinde kaya kütesine nüfuz etmesinden sonra kaya malzemesi ve yapısında oluşan olumsuz etkilenmeler neticesinde (dayanım azalması, kalite kaybı vb.) açıklık duraylılığının sağlanması güçleşmektedir. PHES tesislerinin işletme döneminde bu su döngüsünün sürekli tekrarlanacak olması nedeniyle ana galeri açıklıkları da değişken işletme koşullarına maruz kalacaktır. Bu durum açıklık kaplamasını oluşturan püskürtme betonun geçirimsiz özellikler taşımaması ve kaya yapısının enjeksiyon uygulamaları ile iyileştirilmemesi durumunda çok daha belirgin olacaktır. Özellikle zayıf kaya kütesi (GSI<40) koşullarında, açıklık duraylılığı ile ilgili sorunların sınırlandırılması için, enjeksiyon uygulamaları ile (reçineli, çimentolu vb.) kaya yapısı iyileştirilmeli ve yenilme bölgesi sınırlandırılmalıdır.

İnceleme sahasındaki ana galerilerde kullanılan başlıca tahkimat elemanları çelik hasır, püskürtme beton ve reçineli kaya saplamalarından oluşmaktadır. Açıklık tavanında belirli aralıklarla halatlı saplamalar da kullanılmaktadır. Zayıf kaya kütlesi formasyonlarından ve bozunmuş/faylanmış bölgelerden geçilirken esneyen çelik bağlar da takviye tahkimat elemanları olarak kullanılmaktadır. Uygulanan püskürtme beton kalınlığı en az 15 cm olup, yerinde yapılan testlerde basınç dayanımı genelde 20 MPa civarında ölçülmüştür. Kuru koşulları temsil eden kaya kütlesi durumlarında, mevcut destekleme elemanları (kaya saplaması, püskürtme beton) ile birlikte açıklığın duraylılığı sağlanabilirken, suya doymuş koşullarda oluşan yenilme bölgesinde açıklık duraylılığı mevcut destekleme elemanları ile sağlanamayabilmektedir. Bu durumun özellikle derin kömür madenlerinde ana galerilerin alt rezervuar olarak kullanılmak istenilmesi durumunda göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ana galerilerin PHES tesislerinde alt rezervuar olarak kullanılma olasılığında iyileştirme sağlanabilmesi için; çelikli lifli nispeten geçirimsiz kalın (> 25 cm) püskürtme beton kaplama kullanılması, enjeksiyon ile kaya yapısının iyileştirilmesi, atnalı açıklık şekli yerine invert tabanlı açıklık şeklinin kullanılması, açıklık tabanının püskürtme beton ve kaya saplamaları uygulamaları ile güçlendirilmesi, önerilmektedir. Önlem alınmaması durumunda, özellikle zayıf kaya kütlesi koşullarında, yeraltı kömür madenlerinde ana galerilerin PHES su depolama amaçlı alt rezervuar hacmi olarak kullanılma olanağı oluşmayacaktır.

Derin yeraltı taşkömürü madenlerinde ana galerilerin, gelecekte üretim çalışmalarının sona ermesinden sonra, pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerde (PHES) su depolama amaçlı alt rezervuar olarak kullanılma olanakları geniş kapsamlı olarak araştırılmalıdır. Tez çalışması kapsamında incelenen kaya mekaniği ve tabaka kontrolü ile ilgili konuların dışında, mutlaka teknolojik, ekonomik, güvenlik, yasal ve çevresel faktörlerin ayrıntılı olarak incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak tüm koşulların uygun bulunması durumunda yeraltı derin kömür madenleri ve ana galerilerden PHES tesisi olarak yararlanılması kararı verilebilmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Derin yeraltı kömür madenlerinde ana galeriler, gelecekte kömür üretim çalışmalarının sona ermesinden sonra, PHES için su depolama amaçlı alt rezervuarlar için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.

İnceleme alanındaki Amasra-B projesi yeraltı taşkömürü madeninde, ana galerilerde kumtaşı kaya kütlelerinde genelde çok bloklu yapı ve iyi yüzey koşulları (pürüzlü, hafifçe ayrılmış, lekeli yüzeyler) gözlenmiştir. Zayıflama zonlarında ise bloklu/örselenmiş yapı ve orta-zayıf yüzey koşulları ile karşılaşmaktadır. Yer yer kumtaşı kaya kütlelerinde masif yapı ve iyi yüzey koşulları da belirlenmiştir. Kumtaşı kaya kütlesi için GSI değerleri sırasıyla; 85, 55 ve 30 olarak tespit edilmiştir.

Ana galerilerde silttaşı kaya kütlelerinde çok bloklu yapı ve iyi yüzey koşulları (pürüzlü, hafifçe ayrılmış, lekeli yüzeyler) ile birlikte, özellikle kömür damarları ve zayıflama zonlarına yakın konumlarda, bloklu/örselenmiş yapı ve orta-zayıf yüzey koşulları gözlenmiştir. Silttaşı kaya kütlesi için GSI değerleri sırasıyla; 55 ve 30 olarak tespit edilmiştir.

Fay bölgeleri ile zayıflık zonlarında dağılmış/ince tabakalanmış yapılar ile ayrılmış/bozunmuş zayıf yüzey koşulları gözlenmiştir. Özellikle zayıf kaya kütlesi koşullarında (GSI<40), açıklık duraylılığı ile ilgili sorunların sınırlandırılması için, enjeksiyon uygulamaları ile (reçineli, çimentolu vb.) kaya yapısı iyileştirilmelidir.

Hidrolik yapılarda açıklık duraylılığı ve işlevselliği açısından en uygun kesit şeklini dairesel açıklık oluşturmaktadır. Yeraltı kömür madenlerinde ana galerilerde invert tabanlı atnalı açıklık şekli, klasik atnalı açıklık şekline kıyasla duraylılık ve su depolama potansiyeli açısından daha avantajlıdır.

Derin kömür madenlerinde ana galerilerin PHES tesisleri için alt su depolama rezervuarı olarak kullanılması durumunda en kritik aşama ana galerilerde suyun pompalanarak uzaklaştırılmasından sonra oluşmaktadır. PHES tesislerinin işletme döneminde bu su döngüsünün sürekli tekrarlanacak olması nedeniyle ana galeri açıklıkları da değişken işletme koşullarına maruz kalmaktadır. Bu durumda güçlü bir tahkimat basıncı etkisi yaratan statik içsel su basıncı mevcut olmadığından açıklık duraylılığının sağlanması güçleşmektedir.

PHES tesislerinde işletme aşamasındaki su döngüleri nedeniyle açıklık çevresindeki kaya yapısı sürekli ıslanma-kuruma süreçlerine maruz kalacaktır. Kuru koşulları temsil eden kaya kütlesi durumlarında, mevcut destekleme elemanları (kaya saplama, püskürtme beton) ile birlikte açıklığın duraylılığı genelde sağlanabilirken, suya doygun koşullarda (kayada dayanım azalması, kaya kütlesi kalite azalması vb.) açıklık duraylılığı mevcut destekleme elemanları ile sağlanamayabilmektedir. Bu durumun derin kömür madenlerinde ana galerilerin alt rezervuar olarak kullanılmak istenilmesi durumunda göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Ana galerilerin PHES tesislerinde alt rezervuar olarak kullanılma olasılığında iyileştirme sağlanabilmesi için; çelikli lifli nispeten geçirimsiz kalın (> 25 cm) püskürtme beton kaplama kullanılması, enjeksiyon ile kaya yapısının iyileştirilmesi, atnalı açıklık şekli yerine invert tabanlı açıklık şeklinin kullanılması, açıklık tabanının püskürtme beton ve kaya saplama uygulamaları ile güçlendirilmesi önerilmektedir. Önlem alınmaması durumunda, özellikle zayıf kaya kütlesi koşullarında, yeraltı kömür madenlerinde ana galerilerin PHES su depolama amaçlı alt rezervuar hacmi olarak kullanılma olanağı oluşmayacaktır.

Derin yeraltı taşkömürü madenlerinde ana galerilerin, gelecekte üretim çalışmalarının sona ermesinden sonra, pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerde (PHES) su depolama amaçlı alt rezervuar olarak kullanılma olanakları geniş kapsamlı olarak araştırılmalıdır. Tez çalışması kapsamında incelenen kaya mekaniği ve tabaka kontrolü ile ilgili konuların dışında, mutlaka teknolojik, ekonomik, güvenlik, yasal ve çevresel faktörlerin ayrıntılı olarak incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak tüm koşulların uygun bulunması durumunda yeraltı derin kömür madenleri ve ana galerilerden PHES tesisi olarak yararlanılması kararı verilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- Acun D** (2009) Amasra-Tarlaağızı Kuyusu Çevre Kaya Özellikleri ve Duraylılığının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, Zonguldak, 157 s.
- Bieniawski Z T** (1989) *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley and Sons, 237 p.
- Brekke T L and Ripley B D** (1993) Design of Pressure Tunnels and Shafts, *Comprehensive Rock Engineering* Vol: 2, New York, pp. 349-368
- Crotogino F** (2010) Grid scale energy storage based on pumped hydro, compressed air and hydrogen, KBB Underground Technologies.
- Crotogino F, Donadei S, Bünger U, Landinger H.** (2010) Large-scale hydrogen underground storage for securing future energy supplies. *Proceedings of 18th World Hydrogen Energy Conference (WHEC2010)*, Essen, Germany.
- EİE** (2009) Elektrik İşleri Etüd İdaresi, <http://www.eie.gov.tr/>
- EPDK** (2011) Enerji Yatırımcısı El Kitabı, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Ankara.
- EURACOAL** (2013) Country Profiles Turkey, European Association for Coal and Lignite, www.euracoal.be/
- Geniş M** (2002) Geometrik tasarım değiştirgelerinin derin yeraltı açıklıklarında yenilme bölgesinin boyutlarına etkilerinin statik ve dinamik koşullarda araştırılması. Doktora Tezi (yayımlanmamış), ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, Zonguldak, 352 s.
- Geniş M, Başarır H, Özarlan A, Bilir E and Balaban E** (2007) Engineering Geological Appraisal of the Rock Masses and Preliminary Support Design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey. *Eng Geo*, 92: 14-26.
- Gerçek H** (1996) Hoek-Brown yenilme ölçütünün gelişimi. 3. *Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, Ankara, s. 251-262.
- Gerçek H** (2000) Tünelcilik Ders Notları (yayımlanmamış), ZKÜ Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak.
- Gerçek H** (2005) Kaya Mekaniği Ders Notları (yayımlanmamış), ZKÜ Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Gerçek H** (2006) Poisson's ratio values for rocks. *Int. J. Rock Mec. and Mining Sci.*, 44 (1): 1-13.
- HEMA** (2012) *Amasra Kömür Projesi*, Brifing Notları (yayımlanmamış), HEMA A.Ş. Bartın.
- Hoek E** (2006) *Kaya Mühendisliği* çev. M. Karakuş ve H. Başarır, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ümit Ofset Matbaacılık, Ankara, 319 s.
- Hoek E** (2007) Practical rock engineering. <http://www.rocscience.com>. p 342
- Hoek E and Brown E T** (1997) Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 34(8), 1165-1186.
- Hoek E, Kaiser P K and Bawden W F** (1995) *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema, Rotterdam, 214 p.
- Hoek E, Carranza-Torres C and Corkum B** (2002) Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of North American Rock Mechanics Society Meeting*, Toronto, pp. 267-273.
- Hubner S, Crotagino F, Zander-Schiebenhofer D** (2008) Druchluftspeicher-Kraftwerke zum Ausgleich fluktuierender Windenergie. Tagung Erneuerbare Energien 2008-Chancen und Perspektiven, *KBB Underground Technologies*, Potsdam, Germany.
- ISRM** (1981) ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. ed. E. T. Brown, Pergamon Press, London, 211 p.
- Karpuz C ve Hindistan M A** (2008) *Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları: 116, Yeniden Grup Matbaacılık, Ankara, 346s.
- Kepplinger J, Crotagino F, Donadei S, Wohlers M** (2011) Present trends in compressed air energy and hydrogen storage in Germany. *Solution Mining Research Institute SMRI Fall 2011 Conference*, York, United Kingdom.
- Kural O** (1991) *Kömür*, Özgün Ofset Matbaacılık.
- Marinos P and Hoek E** (2000) GSI: A Geologicaly friendly tool for rock mass strength estimation, *Proceedings of the International Conferences on Geotechnical and Geological Engineering GEOENG2000*, Melbourne, pp. 1422-1440.
- Marinos V, Marinos P and Hoek E** (2005) The geological strength index: applications and limitations, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 64: 55 – 65.
- Mazman M, Biçer E, Kaypmaz C, Yıldız A, Uzun D, Tırıs M** (2010) Yenilenebilir enerji için elektrik enerjisi depolama teknolojileri, *Solar Future 2010 Bildiriler Kitabı*, s. 113-118.
- Meiwes H** (2009) Technical and economic assessment of storage technologies for powersupply grids. *Acta Polytechnica*, 49(2–3): 34-9.
- MGM** (2013) Türkiye Rüzgar Atlası, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, www.mgm.gov.tr/

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Niemann A** (2011) Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Anlagen des Steinkohlebergbaus als Pumpspeicherwerke, Präsentation, Duisburg-Essen, 24p.
- Özarılan A** (2012) Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Büyük lekli Enerji Depolama Yöntemleri, *Türkiye 12. Enerji Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara.
- Özarılan A ve Gerçek H** (2002) Doğal Gaz Depolama Amaçlı Tuz zelti Açıklıklarının Tasarımında Bazı nemli Hususlar. *VI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TUKMD, Konya, s. 267-274.
- Özkan İ** (2012) M – RMR (Modified - RMR) Sınıflama Sistemi (yayımlanmamış), S Maden Mühendisliği Bölümü, Konya
- Özkan İ ve nal E** (1996) Kaya kütlesi sınıflama sistemleri üzerine kritik bir değerlendirme. *3. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, Ankara, s. 181-193.
- Palmström A** (1995a) RMI - A Rock Mass Characterization System For Rock Engineering Purposes, http://www.rockmass.net/phd/contents_all_text.pdf
- Palmström A** (1995b) RMI - A System For Characterizing Rock Mass Strength For Use in Rock Engineering, http://www.rockmass.net/ap/46_Palmstrom_on_RMI_for_rockmass_strength.pdf
- Palmström A** (1996a) RMI - A New Practical Characterization System For Use In Rock Engineering, http://www.rockmass.net/ap/51_Palmstrom_on_RMI_in_rock_engineering.pdf
- Palmström A** (1996b) Characterizing Rock Masses By The RMI For Use In Practical Rock Engineering. Part 1: The Development Of The Rock Mass Index (RMI), http://www.rockmass.net/ap/53_Palmstrom_on_RMI_for_practical_use-1.pdf
- Palmström, A.** (2006) Norwegian Development and Experience with Unlined Pressure Tunnels and Shafts, http://www.rockmass.net/misc/norw/norwegian_unlined_pressure_tunnels.pdf
- Rocscience** (2012) Phase2 (ver. 8.0), Toronto, Canada, <http://www.rocscience.com/>
- Russo G** (2009) A New Rational Method for Calculating the GSI, *Tunnel and Und. Space Tech.*, 24: 103 – 111
- Saltık A** (2012) Kişisel Görüşme, HEMA Endsti A.ř. Bartın.
- Saraç M** (2009) Pompaj depolamalı hidroelektrik santraller, *Doğu Karadeniz Bölgesi Hidroelektrik Enerji Potansiyeli ve Bunun lke Enerji Politikalarındaki Yeri*, Trabzon, s. 90 - 98.
- Saraç M** (2012) Enerji Depolama Sistemleri ve Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller, *Türkiye 12. Enerji Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Schreiber U, Wagner H J, Perau E and Niemann A** (2011) Nutzung von Anlagen des Bergbaus zur Speicherung regenerativer Energien durch Unterflur-Pumpspeicherwerke, Präsention, Essen, 16 p., Mercator Research Center Ruhr.
- Soyer E** (2013) Kişisel Görüşme, HEMA Endüstri A.Ş. Bartın.
- TWEA** (2012) Wind Business in Turkey: An outlook for investors, Turkish Wind Energy Association. 38 p.
- Ulusay R** (2001) *Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler*. 4. basım, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 38, Ankara, 385 s.
- Ulusay R ve Sönmez H** (2007) *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*. Genişletilmiş 2. baskı, TMMOB Jeoloji Müh. Odası Yayınları: 60, Kozan Ofset Matbaacılık, Ankara, 292 s.
- YEGM** (2013) Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, www.eie.gov.tr/
- Yorgancılar N S ve Kökçüoğlu H** (2009) *Pompaj Depolamalı Santrallerin Türkiye’de Gelistirilmesi*, Türkiye 11. Enerji Kongresi, www.dektmk.org.tr/pdf/enerji_kongresi_11/111.pdf
- ZEDEM** (1994) Establishment of an Industrial Support Centre in Zonguldak, Final Report, 104 p.

BİBLİYOGRAFYA

- Akyüz A** (2007) Kişisel görüşme. HEMA Endüstri A.Ş, Bartın.
- Aydan Ö and Dalgıç S** (1998) Prediction of deformation behaviour of 3-lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anatolian fault zone (NAFZ). *Proceedings Regional Symposium Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, pp. 228-233.
- Barton N** (2000) TBM Tunelling in Jointed and Faulted Rock, Balkema, Rotterdam, 173 p.
- Barton N** (2002) Some new Q-value correlations to assist in rock masses for the design of tunnel design. *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 39: 185-216.
- Barton N and Bandis S** (1980) Some effects of Scale on the shear strength of joints. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 17: 69 - 73.
- Barton N R, Lien R and Lunde I** (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mech.*, 6 (4): 189 - 239.
- Barton N and Grimstad E** (1994) The Q-system following twenty years of application in NTM support selection. *Felsbau.*, 12 (6): 428-36.
- Bhasin R and Grimstad E** (1996) The use of stress– strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Tunnel and Und. Space Tech.*, 11(1): 93–98.
- Bieniawski Z T** (1973) Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. South African Inst. of Civil Eng.*, 15: 335-344.
- Bieniawski Z T** (1978) Determining rock mass deformability: experience from case histories, *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 15: 237–47.
- Bieniawski Z T** (1984) Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 97 – 133.
- Bieniawski Z T** (1989) Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York.
- Grimstad E and Barton N** (1993) Updating the Q-System for NMT. *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Norwegian Concrete Association, Oslo.
- Deere D U, Peck R B, Monsees J E and Schmidt B** (1969) Desing of tunnel liners and support system. *Office of high speed ground transportation*, U.S. Department of transportation, PB 183799.

BİBLİYOGRAFYA (devam ediyor)

- DMT** (2005) *Development of the Amasra-B Mine Complex*. Amasra B Mine Final Report (unpublished), HEMA A.Ş, Bartın.
- HEMA** (2006) *Amasra B Taşkömür Projesi Rezervleri*. Araştırma Raporu (yayımlanmış), HEMA A.Ş., Bartın.
- Hoek E** (1995) Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2 (2): 4 – 16
- Hoek E** (1999) Putting numbers to geology an engineer's viewpoint. *Quart. J. Eng. Geology.*, 32: 1-19.
- Hoek E and Brown E T** (1980) *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons, London, 527 p.
- Hoek E and Brown E T** (1998) Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 34 (8): 1165–1186.
- Hoek E and Diederichs M S** (2006) Empirical estimation of rock mass modulus. *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 43: 203-215.
- Hoek E, Marinos P and Benissi M** (1998) Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57: 151-160.
- Hoek E, Wood D and Shah S** (1992) A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses. *Proceedings International Conferences Eurock'92*, Chester, England, pp. 209 - 214.
- Hudson J A** (1989) *Rock Mechanics Principles in Rock Engineering Practice*. Butterworth, 72 p.
- ISRM** (1975) Terminology (English, French, German). Lisbon: ISRM
- Kalamaris G S and Bieniawski Z T** (1995) A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. *Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics*, Melbourne, Rotterdam, Balkema 1: 295-302.
- KBB** (1988) Untertagespeicher. Kavernen Bau und Betriebs GmbH.
- Matula M and Holzer R** (1978) Engineering topology of rock masses. *Proceedings of Felsmechanik Kolloquium*, Grundlagen und Anwendung der Felsmechanik, Karlsruhe, Germany, pp. 107 - 121.
- Milne D, Germain P and Potvin Y** (1992) Measurement of rock mass properties for mine design. *Proceedings International Conferences Eurock'92*, London, pp. 245 – 250.
- Nieto A S** (1983) Some geologic factors in the locations design and construction of large underground chambers in rock. *Proceedings Rapid Excavation & Tunnelling Conferences*, AIME 1983, pp. 569 - 596.

BİBLİYOGRAFYA (devam ediyor)

- Patching T H and Coates D F** (1968) *A recommended rock classification for rock mechanics purposes*. CIM Bull., pp. 1195-1197.
- Ramamurthy T** (1986) Stability of rock mass. 8th Annual Lecture. Indian Geotechnical Journal, pp.1-74.
- Read, S A L, Richards L R and Perrin N D** (1999) Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proceedings 9th International Society for Rock Mechanics Congress*, Paris, pp. 655-660.
- Serafim J L and Pereira J P** (1983) Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proceedings Int. Symposium Engineering Geology and Underground Construction*, Rotterdam, pp. 1133-1142.
- Sheorey P R** (1997) *Empirical Rock Failure Criteria*. Balkema, Rotterdam.
- Sönmez H and Ulusay R** (1999) Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *Int.. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 43: 671-676.
- Sönmez H, Nefeslioğlu H A, Gökçeoğlu C and Kayabaşı A** (2006) Estimation of rock mass modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation *Int J Rock Mech and Mining Sci*, 43: 224-235.
- Terzaghi K** (1946) *Rock Defect and Loads on Tunnel Supports in R.V. Proctor and T.L White*, Rock Tunneling with Steel Supports, Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, OH.
- Trueman R** (1998) An evaluation of strata support techniques in dual life gateroads. PhD Thesis, University of Wales, Cardiff.
- Tsoutrelis C E, Exadactylos G E and Kapanis A P** (1990) Study of rock mass discontinuity system using photoanalysis. *Proceedings from Symposium on Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, pp. 103 - 112.
- Ulusay R** (1991) Geotechnical evaluations and deterministic design considerations for pitwall slopes at Eskihisar (Yatağan – Muğla) strip coal mine. PhD Thesis (unpublished), Middle East Technical University, Geological Engineering Department, Ankara, Turkey, 340 p.
- Ünal E ve Özkan İ** (1990) Determination of classification parameters for clay – bearing and stratified rock mass. *Proceedings of the 9th International Conference on Ground Control in Mining*, West Virginia University, pp. 250-259.
- Ünal E, Özkan İ and Ulusay R** (1992) Characterization of weak, stratified and clay – bearing rock masses, *ISRM Symposium: EUROCK '92 Rock Characterization*, Chester, UK, J. ed. A. Hudson, British Geotechnical Society, London, pp. 330-335.

BİBLİYOGRAFYA (devam ediyor)

Yudhbir R K, Lemanza W and Prinzl F (1983) An empirical failure criterion for rock masses. *Proceedings of the 5th International Congress on Rock Mechanics*, Melbourne, Rotterdam, Balkema 1: B1-B8.

ÖZGEÇMİŞ

Halil Yalçın AYDINER 1985'te İstanbul'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini Tekirdağ'da tamamladı; Tekirdağ Namık Kemal Lisesi (YDA)'nden mezun olduktan sonra 2004 yılında ZKÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 2009 yılında "iyi" derece ile mezun olduktan sonra aynı yıl BEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans'ına başladı; halen aynı Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : SGS Supervise Gözetme Etüd Kontrol Servisleri A.Ş.
Bağlar Mah. Osmanpaşa Cad. No:95
İş İstanbul Plaza A Girişi
Güneşli 34209 İSTANBUL

Tel : (+90) 546 491 1853

E-posta: halilaydiner85@hotmail.com