



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**JEOMEKANİK PARAMETRELERİN DELME VE
PATLATMAYA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Jeoloji Müh. Ümit BOYRAZ
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Maden Mühendisliği Programı
2601070067**

**Danışman
Yrd.DoçDr. Ümit ÖZER**

Temmuz, 2010

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**JEOMEKANİK PARAMETRELERİN DELME VE
PATLATMAYA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Jeoloji Müh. Ümit BOYRAZ
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Maden Mühendisliği Programı
2601070067**

**Danışman
Yrd.DoçDr. Ümit ÖZER**

Temmuz, 2010

İSTANBUL

Bu çalışma/..../ 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Mühendisliği programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Danışman Adı (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Jüri Adı
Üniversite
Fakülte

Jüri Adı
Üniversite
Fakülte

Jüri Adı
Üniversite
Fakülte

Jüri Adı
Üniversite
Fakülte

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Ümit ÖZERE'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma ve çalışmamın uygulama kısmını destekleyen İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlilerine ve lisans öğrencilerine teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca, çalışmamın programlama kısmında bilgi ve deneyimini katkı olarak sunan kardeşim Yrd. Doç.Dr. Pınar BOYRAZ'a ve göstermiş olduğu sabır ve desteği için eşim Rana TATLISÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz, 2010

Ümit BOYRAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	İ
İÇİNDEKİLER	İİ
ŞEKİL LİSTESİ	V
TABLO LİSTESİ	VII
GRAFİK LİSTESİ	VIII
FOTOĞRAF LİSTESİ	IX
SEMBOL LİSTESİ	X
ÖZET	XII
SUMMARY	XIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. KAYAÇ VE KAYA ORTAMLARININ TANIMLANMASI	3
2.2. KAYAÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ.....	7
2.2.1. Kayaçların Jeolojik Özellikleri.....	7
2.2.2. Kayaçların Kimyasal Özellikleri.....	7
2.2.3. Kayaçların Fiziksel (İndeks) Özellikleri.....	8
2.2.4. Kayaçların Mekanik Özellikleri.....	10
2.2.4.1. Kayaçların Direnç Özellikleri	10
2.2.4.2. Kayaçların Deformasyon Özellikleri.....	16
2.3.1. Kayaçların Teknolojik Özellikleri.....	17
2.3. KAYAÇLARIN MÜHENDİSLİK SINIFLAMALARI.....	18
2.3.1. Kaya Yüğü (Terzaghi) Sınıflaması	19
2.3.2. Kaya Kalitesi İndeksi (RQD) Sınıflaması	20

2.3.3. Kayaçların Dayanımlarına Göre Sınıflaması	21
2.3.4. Kaya Kütlesi Derecelendirmesi (RMR) Sınıflaması	23
2.3.5. Norveç Jeoteknik Enstitüsü (NGI) Kaya Sınıflaması (Q).....	24
2.3.6. Jeolojik Dayanım İndeksi Sınıflaması (GSI)	28
2.3.6.a. Hoek – Brown Görgül Yenilme Ölçütü	29
2.3.6.b. GSI'nin RMR ve Q Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemleriyle İlişkisi	33
2.3.6.c. Hoek & Brown Görgül Yenilme Ölçütü ve GSI'nin Son Durumu	35
2.3.6.d. Modifiye Edilmiş Kantitatif GSI Abağı	41
2.4. DELME & PATLATMA OPERASYONLARI.....	44
2.4.1. Delme Operasyonları	46
2.4.2. Norveç Patlatma Operasyonları	49
2.4.2.a. Patlayıcı Maddelerin Tarihsel Gelişimi.....	49
2.4.2.b. Patlayıcı Maddelerin Tanım ve Özellikleri.....	50
2.4.2.c. Patlayıcı Madde Türleri.....	56
2.4.2.d. Ateşleme Sistemleri.....	60
2.4.2.e. Patlatma Teorisi.....	64
2.4.3. Basamak Patlatması Tasarımı Parametreleri	66
2.4.3.a. Delik Çapı.....	67
2.4.3.b. Delik Boyu ve Dip Delgi Mesafesi.....	68
2.4.3.c. Delik Hatası.....	69
2.4.3.d. Dilim Kalınlığı	70
2.4.3.e. Delikler Arası Mesafe.....	71
2.4.3.f. Basamak Yüksekliği.....	72
2.4.3.g. Sıkılama Boyu.....	72
2.4.3.h. Özgül Şarj	73
3. PATLATILABİLİRLİK VE PATLATMA DİZAYNI.....	75
3.1. PATLATMA MEKANİZMASI.....	76
3.2. PATLATILABİLİRLİĞE GELENEKSEL YAKLAŞIM.....	78
3.2.1. Kaya Sabiti “c”	78

3.2.2. Çatlak Mekanîği Çalışmaları	78
3.3. KAYA KÜTLESİNİN ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ.....	80
3.3.1. Parametrelerin Kontrolü	80
3.3.2. Dayanım Özellikleri	81
3.3.3. Deformasyon Özellikleri	82
3.3.4. Absorbsiyon Özellikleri	82
3.3.5. Yapısal Özellikler	83
3.3.6. Ufalanma Karakteristikleri.....	84
3.4. PATLATILABİLİRLİK.....	84
3.4.1. Amprik Yaklaşımlar	85
3.4.1.a. Ashby Yaklaşımı.....	86
3.4.1.b. Lilly Yaklaşımı	86
3.4.1.c. Birleştirilmiş Patlatma Sonuçları.....	87
4. MALZEME VE YÖNTEM	88
4.1. ARAZİ ÇALIŞMALARI	89
4.1.1. Cendere Bölgesi Arazi Çalışmaları.....	90
4.1.2. Darıca Bölgesi Arazi Çalışmaları.....	97
4.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	103
4.2.1. Yoğunluk Deneyi	103
4.2.2. Nokta Yükleme Deneyi	104
4.2.3. Tek Eksenli Basınç Direnci Deneyi.....	104
5. BULGULAR	106
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	118
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŞ	123

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Kaya niteliğindeki ortamların adlandırılması	4
Şekil 2.2	: Kayaçlarda gerilme türleri.....	11
Şekil 2.3	: İndirekt çekme /Brezilian) deneyi	13
Şekil 2.4	: Mohr daireleri ve Mohr kırılma zarfı ile tek eksenli basınç direnci (σ_B), çekme gerilmesi direnci (σ_C), kohesyon (c) ve içsel sürtünme açısının (Φ) tayini	15
Şekil 2.5	: Standart bir kaya için gerilme-gerinme eğrisi ve elastisite modülleri..	16
Şekil 2.6	: Terzaghi'ye göre tünel yükü kavramı.	19
Şekil 2.7	: Normal gerilme – düşey birim deformasyon ilişkisi.....	22
Şekil 2.8	: Birleştirilmiş mühendislik sınıflaması abağ.....	22
Şekil 2.9	: Sağlam ve masif kaya kütlesi ile foliasyonlu–laminalı–makaslanmış kayaçları da içerecek şekilde düzenlenmiş GSI sınıflama sistemi.....	36
Şekil 2.10	: GSI'nin ve mi sabitinin farklı değerlerine bağlı olarak (a) etkin kohezyon ve (b) etkin içsel sürtünme açısının değişimi	37
Şekil 2.11	: Farklı kaya malzemesi dayanımlarına göre kaya kütlelerinin deformasyon modülü ile GSI arasındaki ilişki.....	37
Şekil 2.12	: Sönmez ve Ulusay (1999)'ın önerdiği niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı'nın “Sağlam ve Masif” kaya grubunda eklendikten sonraki hali.....	42
Şekil 2.13	: Yaklaşık olarak birbirlerine dik konumlu 3 eklem takımını içeren bir kaya kütlelerinde gelişen altı yüzeyle prizmatik bloklar.....	43
Şekil 2.14	: Farklı tipteki delici ekipmanların darbe uygulama yerleri.	48
Şekil 2.15	: Patlayıcı Maddelerin İnfilak İşlemleri.....	52
Şekil 2.16	: İnfilaklı fitilin tip kesiti	61
Şekil 2.17	: Elektriksiz kapsülün yapısı.....	62
Şekil 2.18	: Kayacın sıkıştırılması	64
Şekil 2.19	: Şok dalgalarının geri yansıması	65
Şekil 2.20	: Basamak Patlatması Terimleri.....	66
Şekil 2.21	: Yarım kırılma açısı ve patlatma koni açısı.....	68
Şekil 2.22	: Basamak yüksekliği ve delik çapı arasındaki ilişki.....	72
Şekil 3.1	: Kaya ortamında şok dalgalarının etkisi	76
Şekil 3.2	: Kaya ortamında gazın yayılması	77
Şekil 3.3	: Hopkinson ayırma çubuğu.....	82
Şekil 3.4	: Boyut küçültme işlemi.....	83
Şekil 3.5	: Bougainville için patlatılabilirlik dizaynı.....	85
Şekil 4.1	: Cendere Bölgesinde çalışılan maden ruhsatlı sahasının jeoloji haritası (Ölçeksiz)	92
Şekil 4.2	: Darıca Bölgesinde çalışılan maden ruhsatlı sahasının jeoloji haritası (Ölçeksiz)	99
Şekil 5.1	: Çalışan kaya ortamlarının GSI abağında gösterimi.....	109
Şekil 5.2	: Tekil kütlenin (kayacın) hareket simülasyonu	112

Şekil 5.3	: M, K, B katsayılarının zaman göre değişimi	113
Şekil 5.4	: Patlama sonrasında kopan parçacıkların hareketi.....	114
Şekil 5.5	: Patlama sonrasında kopan parçacıkların mutlak konumları.....	115
Şekil 5.6	: Daha kırılğan (elastisitesi daha az) ve iç yapısında süreksizlikleri daha fazla olan yapının patlatılması sonucundaki mutlak konum değerleri.....	116

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	: Arazide kayaçların renklerinin tanımlanması için yararlanılan tablo	5
Tablo 2.2	: Arazide kayaçların dayanımlarını tayin ölçütleri	6
Tablo 2.3	: Tünel Kazısı ve desteklemesi için kaya yükü sınıflaması	20
Tablo 2.4	: RQD Sınıflamasına göre kaya kütle kaliteleri	21
Tablo 2.5	: Kayaçların dayanımlarına göre sınıflandırılması	21
Tablo 2.6	: Kaya kütlesi derecelendirmesi (RMR) sınıflama tabloları	22
Tablo 2.7	: Q Sisteminin gridi parametreleri ve değerleri	25
Tablo 2.8	: Patlatma (AB) ve başlıca zayıfluk düzlemleriyle (Aw) ilgili düzeltme katsayıları	21
Tablo 2.9	: Örselenme faktörü D'nin tahmini için kılavuz	44
Tablo 3.1	: Lilly' nin parametreleri	86
Tablo 4.1	: Cendere ve Darıca Bölgesinde kullanılan ANFO'ya ait teknik özellikler	89
Tablo 4.2	: Cendere Bölgesine ait arazi gözlemleri	95
Tablo 4.3	: Cendere bölgesine ait delme-patlatma performansı ortalama değerleri	96
Tablo 4.4	: Cendere bölgesine ait delme-patlatma tasarım parametreleri	96
Tablo 4.5	: Darıca Bölgesine ait arazi gözlemleri	101
Tablo 4.6	: Darıca bölgesine ait delme-patlatma performansı ortalama değerleri	102
Tablo 4.7	: Darıca bölgesine ait delme-patlatma tasarım parametreleri	103
Tablo 4.8	: Çalışma sahalarından elde edilen ortalama yoğunluk değerleri	103
Tablo 4.9	: Çalışma sahalarından elde edilen ortalama nokta yükleme deneyi sonuçları	104
Tablo 4.10	: Çalışma sahalarından elde edilen ortalama tek eksenli basınç deneyi sonuçları	105
Tablo 5.1	: İki ayrı sahadan elde edilen arazi ve deneysel veriler	108
Tablo 5.2	: M, K, B ifadelerinin benzetimdeki değerleri	112

GRAFİK LİSTESİ

Grafik 2.1	: Delik çapının detonasyon hızına etkisini gösterir grafik.....	48
Grafik 5.1	: Özgül Şarj – Çekme Dayanımı İlişkisi.....	106
Grafik 5.2	: Özgül Şarj – Yoğunluk İlişkisi.....	107
Grafik 5.3	: Özgül Şarj – GSI İlişkisi	110
Grafik 5.4	: Detonasyon ve basınç değişimi sonucu görülen kuvvet profili.....	111
Grafik 5.5	: Basınç profili hesabındaki parametreler.....	117

FOTOĞRAF LİSTESİ

Foto 4.1	: Cendere bölgesi açık işletmelerinin uydu görüntüsü.	90
Foto 4.2	: Cendere bölgesi açık ocak işletmesinden görünüm.	93
Foto 4.3	: Cendere bölgesinde kullanılan Dainong 2000 marka delici makina.	94
Foto 4.4	: Darıca bölgesi açık işletmelerinin uydu görüntüsü.	96
Foto 4.5	: Darıca bölgesi agrega ocağından görünüm	97
Foto 4.6	: Cendere bölgesinde kullanılan Atlas Copco marka delici makina...	100

SEMBOL LİSTESİ

γ	: birim hacim ağırlığı
γ_n	: doğal birim hacim ağırlıkları
γ_s	: katı kısımlarının birim hacim ağırlıkları
γ_d	: doygun birim hacim ağırlıkları
γ_k	: kuru brim hacim ağırlıkları
G	: özgül ağırlık
W_n	: doğal su içeriği
n	: porozite
e	: boşluk oranı
V_h	: boşluk hacmi
V_t	: tüm hacim
V_k	: katı kısımların hacmi
S	: doygunluk derecesi
W_w	: su hacmi
V_v	: boşluk hacmi
K	: geçirimsizlik
S_a	: ağırlıkça su emme
S_v	: hacimce su emme
σ_B	: Basınç direnci
P	: Kırılma anındaki yük
A	: Alan
P_k	: Kırılma anındaki yük
A_k	: Kırılma anındaki numune alanı
F	: kuvvet
D	: numune çapı
L	: numune boyu
σ	: normal gerilme
τ	: kesme direnci
σ_3	: en büyük asal gerilme
σ_1	: en küçük asal gerilme
Φ	: içsel sürtünme açısı
c	: kohezyon
S_o	: kayanın kesme direnci
M_c	: numuneye uygulanan monet
E_l	: çatlak kapanma evresindeki elastisite modülü
E_E	: elastik kısmın elastisite modülü
E_t	: teğetsel elastisite modülü
E_{ort}	: ortalama elastisite modülü
c	: poisson oranı
G	: rijitlik modülü

K	: bulk modülü
L_p	: karotların toplam uzunluğu
L_t	: toplam sondaj manevra uzunluğuna
ε_v	: düşey birim deformasyon
σ_v	: normal gerilim
J_n	: eklem takım sayısı
J_r	: eklem pürüzlülük sayısı
J_a	: eklem alterasyon sayısı
J_w	: eklem su azaltma faktörü
RQD	: kaya eklem göstergesi
SRF	: gerilme azaltma faktörü
m	: boyutsuz malzeme sabiti
s	: boyutsuz malzeme sabiti
a	: malzeme sabiti
R_r	: süreksizliklerin pürüzlülük puanı
R_w	: süreksizliklerin bozunma puanı
R_f	: süreksizliklerin dolgu puanı
d_f	: örselenme faktörü
A_B	: patlatma düzlemleriyle ilgili düzeltme kat sayısı
A_w	: başlıca zayıflık düzlemleriyle ilgili düzeltme
m_b	: kaya kütle sabiti
D_n	: tahmini süreksizlik seti sayısı
N	: kaya bloğunun yüzey sayısı
S	: ortalama süreksizlik aralığı
P_d	: patlatma basıncı
V_d	: patlatma hızı
V_p	: patlayıcı partikül hızı
P	: detonasyon basıncı
ρ	: yoğunluk
W	: gaz ürünlerinin hızı
D	: detonasyon hızı
BI	: patlatılabilirlik indeksi
M	: kütle
B	: sönmleme
K	: yaylanma katsayısı
t	: zaman
Pb (t)	: zamana göre değişen patlatma deliği basıncına bağlı kuvvet
ρ	: özgül şarj
VOD	: detonasyon hızı
rc	: patlayıcının etkin olduğu çap
B	: dilim kalınlığı
H	: basamak yüksekliği
J	: dip delgi mesafesi
ho	: sıkılama mesafesi
L	: delik boyu
S	: delikler arası mesafe

ÖZET

JEOMEKANİK PARAMETRELERİN DELME VE PATLATMAYA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Bu çalışmada kayaların jeomekanik özelliklerinin özellikle açık ocak maden işletmeciliği yönünden delme-patlatma operasyonlarına olan etkileri incelenmiştir. Çalışmayı üç bölüme ayırmak mümkündür. Birinci bölümde kayaların jeomekanik özellikleri ve kaya sınıflama sistemleri ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra ikinci bölümde açık ocak işletmelerinde delme-patlatma operasyonları ile ilgili bilgiler verilmektedir. Son bölümde ise arazi ve laboratuvarında tayin edilen kayaç jeomekanik özelliklerinin delme-patlatma operasyonlarındaki etkileri incelenmiştir.

Kayaların jeomekanik özelliklerinden bahsedildikten sonra kaya sınıflamaları üzerinde durulmuş, farklı kriterlere göre yapılmış sınıflamalar incelenmiştir. Özellikle kaya sınıflamalarında baz alınan kriterler ve bu sınıflamaların birbirleri ile olan bağlantıları üzerinde durulmuştur.

Açık ocak işletmeciliğinde yoğun olarak kullanılan delme-patlatma operasyonları ile ilgili teorik bilgiler ile mevcut uygulamalar hakkındaki bilgiler ise ikinci bölümde ayrıntılandırılmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde patlatılabilirlik konusu üzerinde durulmuş ve geleneksel yaklaşımlarla diğer yaklaşımlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca patlatılabilirlik kavramını etkileyen parametreler üzerinde durulmuştur.

Dördüncü bölümde ise arazi ve laboratuvar verilerinin çalışmanın amacına uygun olarak kullanılması, açık ocak aynalarından elde edilen saha gözlemleri ile laboratuvar ortamında kayaç numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları verilmiştir. Gözlemsel ve deneysel verilerle ortaya çıkan kaya parametreleri kullanılarak, patlatma sırasında oluşacak enerji ve buna bağlı konum, ivme ve hız dağılımını analiz eden indirgenmiş bir model incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında kullanılan model ile yapılan analizler ve bu analizlerden elde edilen sonuçların delme-patlatma operasyonlarındaki etkileri üzerinde durulmuştur.

Farklı kaya sınıflarında ve farklı jeomekanik özellikler için yapılan analizler sonucunda elde edilen değerler ile GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) sınıflaması kullanılarak grafiklerle birlikte sunulmuştur. Araştırmacıların bu konu üzerinde yapmış olduğu çalışmalardan elde ettikleri sonuçlara da yer verilmiştir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF EFFECTS OF GEOMECHANICAL PARAMETERS ON DRILLING AND BLASTING

In this study, the effect of rock's geomechanical characteristics on drilling–blasting operations, especially in open pit mine operating, are analyzed. The study is separated in three parts. In the first part, the general information is introduced about the geomechanical characteristics of rock and rock classification system, then in the second part the information is given related to drilling and blasting in open pit mine. Moreover, in the last part, the effects of rock's that is analyzed in land and laboratory, geomechanical characteristics affects on drilling–blasting operations are examined.

After mentioning geomechanical characteristics, detailed the rock classification and classifications which are made according to different criteria are analyzed. Furthermore, the criteria that are given importance during the rock classification and the relations of these classifications with each other are detailed.

The theoretical information related to drilling-blasting operations that are generally used in open pit mining and information of existing implementations are detailed in second part of the study.

In the third part of the study, blastibility is detailed, and the traditional approach compared with other approaches. Besides, the parameters that affect the blastibility concept is stressed.

In the fourth part, test results are explained that implementation of the data of the land and laboratory related to aim of the study, and land observations get in open bit mine's bevel drive and the test results which are made on rock sample in laboratory platform.

The reduced model that using the rock parameters that are emerged from the observations and test, increase the energy during the blasting and location and the acceleration and velocity is examined. The results of the model, its analysis and the conclusion of these analysis effects on the drilling–blasting operations are analyzed.

Geomechanical properties of rocks for different classes and different analysis of the results obtained using the GSI classification is presented with graphics. Researchers have done studies on this aspect of their results are also included.

1. GİRİŞ

Açık ocak işletmelerinde üretim prosesinin bir parçası olarak yürütülen delme-patlatma operasyonları, gerek mühendislik parametrelerinin kullanılması gerekse işletmenin ekonomisine olan etkisi nedeniyle günümüze kadar birçok yönüyle incelenmiş bir konudur. Bu çalışmada, kayaçlara ait jeomekanik özelliklerin ve buna bağlı olarak buldukları kaya sınıfının delme-patlatma operasyonları ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır.

Kaya, büyük kütleler veya parçalar şeklinde bulunan doğal ve katı haldeki mineral oluşuk (ASTM) veya büyük kütleler veya parçalar şeklinde bulunan mineral parçalarının doğal olarak meydana getirdiği oluşuk (ISRM), yapıya bağlı süreksizlikler ihtiva eden ve tabii olarak oluşan kütle (TSE) olarak tanımlanabilir. Bu tanıma göre kaya ortamlarının mühendislik özellikleri, kayaçların jeolojik oluşumlarından ve geçirdiği jeolojik süreçlerden etkilenimleri sonucu göstermiş oldukları özellikleri kapsamaktadır. Bunların başında jeolojik, kimyasal, fiziksel, mekanik, elastik, teknolojik ve ekonomik özellikleri gelmektedir. Kaya ortamlarında yapılan yapıların insanoğlunun ihtiyaçları arasına girmesinden sonra hızla gelişen kaya mühendisliği disiplini akademik olarak ilk 1773 yılında Coulomb tarafından çalışılmıştır. Daha sonrasında 1980’li yıllarda Hoek ve Brown tarafından kaya kütlelerinin özellikleri daha detaylı ele alınarak günümüze kadar gelen kaya sınıflamalarının oluşmasını sağlamıştır. Kaya ortamlarında yürütülen mühendislik çalışmalarından biri olan delme-patlatma işlerinde, bu kaya sınıflamalarının kullanılabilirliği bu çalışma ile araştırılmıştır. Araştırma sırasında kullanılan veriler ve sadelik göz önünde tutularak kaya sınıflama yöntemlerinden jeolojik kaya indeksi (GSI) sınıflaması üzerinde durulmuştur.

Açık ocak maden işletmelerinde çalışılan kaya ortamının özellikleri, delme-patlatma işleminin gerekli olup olmadığını belirlerken aynı zamanda bu işlemin yöntem, dizayn ve malzeme seçimini de belirlemektedir. İlk çağlarda kayaların ısıtılıp sonra soğuk su ile soğutulup çatlatılması yöntemi ile parçalanma sağlanırken 1864’de Alfred Nobel tarafından dinamitin keşfi ve nitrogliserin bazlı yüksek patlayıcıların ilk kez kullanımı ile patlayıcı madde teknolojisi başlamıştır. 1947 yılında Amerika’nın Teksas eyaletinde 30.000 ton amonyumnitrat yüklü geminin patlaması ve 576 kişinin ölümü ile sonuçlan

felaket ise patlayıcı maddelerin çok güçlü olduğunu ve kaya ortamlarında da parçalama etkisinin olabileceğini düşündürmüştür. Delme-patlatma işlemi günümüzde oldukça modern yöntemler kullanılarak yapılmakta olup gerek yer üstü gerekse yeraltı madenciliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

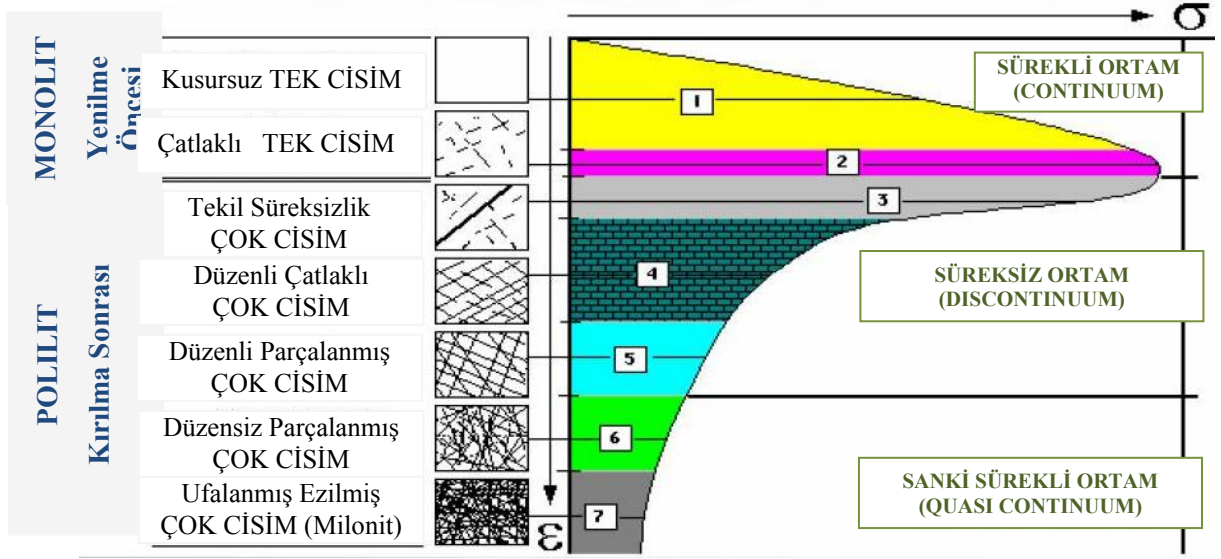
Herhangi bir açık ocak maden işletmesinde çalışılan kaya ortamının tanımlanması, özelliklerinin bilinip, kaya sınıflamasında yerine koyulduktan sonra ortama uygun delme-patlatma işleminin yapılabilmesi ayrıntılı bir çalışma gerektirmektedir. Bu çalışma ile kaya ortamlarının jeomekanik özellikleri ve kaya sınıfları tanımlanarak açık ocak işletmeciliğinin önemli bir operasyonu olan delme-patlatma işleri ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla bu çalışmada öncelikle kaya ortamlarının tanımlanması, mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve kaya sınıflamaları hakkında literatür bilgileri verilmiştir. Sonrasında delme-patlatma operasyonları ile ilgili olarak teorik bilgiler verilmiştir. Ocak aynalarından elde edilen gözlemsel verilerin ve kaya sınıflamasında oldukça önemli bir yer tutan süreksizliklerin belirlenmesi sağlanmıştır. Bunun dışında kaya ortamına ait jeomekanik özellikler olabildiğince laboratuvar verilerine dayandırılmış, laboratuvar verisi olmayan kaya ortamları için ise literatür çalışmalarındaki özellikler veri olarak kullanılmıştır. Kaya ortamının gözlemsel ve kantitatif olarak elde edilen jeomekanik özelliklerinden, jeolojik dayanım indeksi sınıflaması kullanılarak kaya sınıfı tespit edilmiştir. Ayrıca MATLAB 7.5 R2007B bilgisayar programı ile indirgenmiş dinamik modelleme yöntemleri kullanılarak, özellikleri ve sınıfı belirlenen kaya ortamında, tek bir delikte oluşacak basınç esas alınarak patlatma analizi yapılmıştır. Bu analizde patlatma girdisi olarak özgül şarj ve detonasyon hızı, kaya kütle özellikleri girdisi olarak ise elastisite (young) modülü, çekme dayanımı ve süreksizlik özelliklerini temsilen değerler alınmıştır. Program çıktısı olarak patlatmada oluşan parçaların ivme, hız ve lokasyonları alınabilmektedir. Ortaya çıkan veriler ışığında jeolojik kaya indeksi sınıflaması ve kaya ortamındaki patlatma analizi sonuçları kullanılarak patlatma dizaynı ve patlayıcı miktarı (özgül şarj) konusunda değerlendirme yapılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KAYAÇ VE KAYA ORTAMLARININ TANIMLANMASI

Başlıca mağmatik, sedimenter ve metamorfik olarak sınıflandırılan kayaçlar, yerkabuğunun oluşturucu gereçleri olan ve bileşim, yapı, köken bakımından aynı nitelikleri taşıyan mineral kütleleri olarak tanımlanabilir. Kaya kütlesi ise; eklemler, faylar, katmanlanma düzlemleri ve bunun gibi doğal kökenli süreksizlikler ile kesilmiş kayaç malzemesidir. Mühendislik yönünden kayaç; kaya kütlesinde eklem tabakalanma, şistozite fay vb. gibi doğal süreksizliklerin arasında kalan ve malzemenin çekilme dayanımının azalmasına neden olabilecek herhangi bir kırık veya zayıflık düzlemi içermeyen değişik boyutlardaki kaya parçalarıdır. (Ulusay & Sönmez, 2007)

Kayaç malzemesini oluşturan tanelerin fiziksel özellikleri ve bu tanelerin birbirine bağlanma biçimleri, aşağıda sıralanan parametreler yardımı ile tanımlanır. Kaya kütlesi ve kaya kütlelerinin davranışı ile ilgili olarak 1963'te Müller sonrasında ise 1986'da Yüzer ve Vardar tarafından önerilen kavramlar, kaya kütlelerinin davranışına yönelik olarak günümüze değin sürdürülmüş çalışmalar açısından önem taşımaktadır. Müller, süreksizliklerin durumunu da dikkate alarak, kayaların çatlaksız ortamdan (tek cisim ortamı) süreksiz parçalanmış ortama kadar değişen ortam özelliklerine sahip olabileceğini, dolayısıyla bu ortamların farklı davranış sergileyeceklerini belirtmiştir. Müller'in bu yaklaşımı Şekil 1'de verilen ve daha sonra Vardar (2005) tarafından önerilen ortam adlandırılmasında daha ayrıntılı şekilde tanımlanmaktadır. Şekil 2.1'de verilen kaya ortamlarının adları ve bunların sistem büyüklüğündeki görünüşleri yanısıra, gerilme – deformasyon grafiği üzerinde kayanın yenilme öncesi, yenilme sırası ve sonrasındaki idealize edilmiş davranışı görülmektedir. Müller'in yaklaşımının, 1980'de kaya kütleleri için önerilen Hoek-Brown yenilme ölçütünün (Hoek & Brown, 1980a ve 1980b) gelişiminde ve buna ilişkin kaya kütlesi kavramları açısından bir kaynak olduğu açıktır.



Şekil 2.1 :Kaya niteliğindeki ortamların adlandırılması (Vardar, 2005)

Kayaçların mekanik davranışları, genelde elasto-plastik davranış kısmen ideal olmayan elastik davranış olarak tanımlanabilir. Zamandan bağımsız olarak düşünüldüğünde süreksizliklerden tamamen arındırılmış kayaç önce elastik davranış, daha sonra da kısmen plastik davranış gösterir. Yükler altında öncelikle mikrosüreksizlikler sıklaştığı ve boşluklar kapandığı için düşük yük artışına karşın yüksek deformasyonlar oluşmaktadır. Sıkışma ve boşlukların kapanmasından sonra taneler ve kristaller birbiriyle kenetlenerek kayacın gerçek elastik davranışını diyagrama yansıtır.

Kristal veya taneler arasındaki bağ yapısı plastik davranışı denetleyen temel etkidir. Buna bağlı olarak önce elastik davranış gösteren kayaç yenilme gerilmesine kadar bu özelliğini devam ettirir. Yenilme gerilmesinden sonra çok az bir plastik deformasyon göstererek kırılırsa elastik gevrek davranış olarak tanımlanan deformasyon değişimini gösterir. Yine bağ yapısına bağlı olarak yenilme gerilmesinden sonra bir süre plastik davranış gösterip kırılıyorsa elastik sünek davranış olarak tanımlanan davranışı gösterir.

Mühendislik esaslı çalışmalarda kaya ortamlarının tanımlanması aşağıdaki özellikler kullanılarak yapılmaktadır (Ulusay, 1994). Bunlar ;

- Renk ; Kayacı oluşturan tanelerin özgün renklerinin bir araya gelerek oluşturduğu renktir. Örneğin, yüzlek rengi, ayrışma rengi, taze kayaç rengi ve çizgi rengi, tanımlayıcı belirtecilerdendir. Kayacın rengi, kantitatif olarak “Kayaç Renk Kartı” kullanılarak tanımlanır. Bu amaçla Geological Society of

America (1963) ve Munsell (1941) tarafından hazırlanmış kayaç renk kartları yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak kayaç renk tanımı için daha basit bir yöntem de kullanılabilir. Sübjektif değerlendirmeye dayanan bu yöntemde göre renk tanımı yapılırken Tablo 2.1'den yararlanılır. Tanımlama amacıyla 3 numaralı kolondan orijinal kayaç rengine uygun bir renk seçilir. Ayrıca, gerekiyorsa 2 ve/veya 1 numaralı kolondan tamamlayıcı bir tanım seçilerek asıl renk ile birleştirilir. Bu tablo kullanılarak yapılan tanımlamalardan birine örnek verirse; “açık sarımsı kahverengi” renk tanımlamasıdır.

Tablo 2.1 :Arazide kayaçların renklerinin tanımlanması için yararlanılan tablo (Ulusay, 1994)

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1. Açık	1. Pembemsi	1. Pembe
2. Koyu	2. Kırmızımsı	2. Kırmızı
	3. Sarımsı	3. Sarı
	4. Kahverengimsi	4. Kahverengi
	5. Yeşilimsi	5. Zeytin Yeşili
	6. Mavimsi	6. Yeşil
	7. Grimsi	7. Mavi
		8. Beyaz
		9. Gri
		10. Siyah

- Doku ; Bir kayacın dokusu denince, kayacı oluşturan taneler arasındaki karşılıklı ilişki ile bunların geometrik görünümü akla gelir. Bu görünümün öğeleri bir çökel kayaçta boy, şekil ile onu oluşturan tanelerin düzenlenmesi veya bir magmatik kayaçta onu oluşturan öğelerin kristalinliği ve taneliğidir.
- Süreksizliklerin Özellikleri ; kaya ortamının içerdiği süreksizliklerin türü, aralığı, devamlılığı, pürüzlülüğü, süreksizlik yüzeyinin açıklığı, dolgu malzemesinin özellikleri gibi özellikleri kapsamaktadır. Süreksizlikler, kaya kütlesi içerisinde bulunan eklem, tabaka düzlemi, fay, klivaj, foliasyon, çatlak gibi mekanik süreksizlikleri kapsamaktadır. Bu çalışma kapsamında ele alınan delme-patlatma operasyonlarını etkileyen kayaçların jeomekanik özelliklerinden en önemlilerinden biri süreksizliklerdir.
- Bozunmanın Derecesi ; kayacın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak su ve atmosferik koşullardan ne derece etkilendiğini belirten özelliğidir.
- İkincil Litolojik Özellikler ; kayacın daha ayrıntılı tanımlanabilmesi için, mümkün olduğu takdirde killi, siltli, kumlu, marnlı, karbonatlı, silisli, şeylli,

klastik, bio-klastik, metamorfoz gibi sözcükler kullanılabileceği gibi kayaç adının önüne mineral adı eklenebilir.

- Kayaçın Adı ; litolojik özellikler dikkate alınarak adlandırma yapılmalıdır.
- Kayaçın Tahmini Dayanımı ; Kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımları laboratuvarında tek eksenli basınç testi ile doğrudan veya arazide nokta yükü testi yapılarak dolaylı yoldan belirlenebilir. Bu testler yapılmadığı takdirde veya bir ön değerlendirme yapabilmek için kayaç örneklerinin dayanımları jeolog çekici kullanılarak Tablo 2.2'den yararlanılarak arazide kabaca tahmin edilebilir.

Tablo 2.2 :Arazide kayaçların dayanımlarını tayin ölçütleri (Ulusay, 1994)

Tanım	Dayanım Sınıfı Simgesi	Yaklaşık TekEksenli Basınç Dayanımı	
		Kgf/cm ²	*MPa
ÇOK ZAYIF KAYAÇ – Jeolog çekicinin sivri ucunun sert darbeleri altında parçalanır. Bıçakla kesilebilir.	R1	10-250	1-25
ZAYIF KAYAÇ – Bıçakla kesilmesi ve kazınması zordur. Jeolog çekicinin sivri ucu, sıkı bir darbe sonucu derince saplanır.	R2	250-500	25-50
AZ DAYANIKLI KAYAÇ – Bıçakla yüzeyi kazınmaz, jeolog çekicinin sivri ucunun sıkı bir darbesiyle sığ bir delik açılabilir.	R3	500-1000	50-100
DAYANIKLI KAYAÇ – Avuç içinde tutulan örnek, jeolog çekici ile vurulan sert bir darbeyle kırılır.	R4	1000-2000	100-200
ÇOK DAYANIKLI KAYAÇ – Çatlaksız bir örneğin kırılması için jeolog çekici ile çok sayıda darbe gerekir.	R5	>2000	>200

*1 MPa ~ 10 kgf/cm²

- İlksel Geçirimlilik ; Kayaç malzemesinin, süreksizlikler dışında, kendi doku ve fabriği nedeniyle gösterdiği geçirimliliğidir.

2.2. KAYAÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Kayaçların özellikleri ve dolayısıyla gerilmeler altındaki davranışları, kendilerini oluşturan minerallerin sayısız bir araya geliş biçimine bağlıdır. Kaya kütlelerinde ise kayacın özelliklerinin yanısıra ortamdaki süreksizlikler davranış biçimini ve mühendislik özelliklerini etkilemektedir. Dolayısıyla kaya malzemesi, kendisiyle birlikte süreksizlikleri ve bozunma profilini de içine alan kaya kütlesi kavramından farklıdır.

Bir mühendislik çalışması olan açık ocak maden işletme faaliyetlerinde, kaya ortamlarının birim elemanı olan kayaçların mühendislik özellikleri aşağıda ana çizgileriyle açıklanmıştır.

2.2.1. Kayaçların Jeolojik Özellikleri

Yerkabuğunu oluşturan kayaçların oluşum özellikleri jeolojik özelliklerini belirleyen temel unsurdur. Bu özelliklerin en önemlileri ;

- a) Zaman (stratigrafi, paleontoloji, jeokronoloji)
- b) Ortam (fasiyes, homojenlik, heterojenlik)
- c) Doku ve yapı (petrografik)
- d) Jeohidroloji olarak sıralanmaktadır.

2.2.2. Kayaçların Kimyasal Özellikleri

Kayaçların kimyasal özellikleri, minerolojik ve petrografik içeriği ile doğrudan ilişkili olup, erime, ayrışma ve suya karşı olan davranışları gibi her türlü mühendislik konularında araştırılması gereken özelliklerdir.

Kayaçların kimyasal ayrışması kayaç-su etkileşimi ile oluşmaktadır. Ayrışma boyunca, jeokimyasal olarak hareketli elementler (alkali ve toprak alkali elementler) kolayca kimyasal olarak yıkanır. Diğer taraftan, geriye kalan elementler atmosferdeki bileşenlerle birlikte yeni mineralleri meydana getirirler (Ceryan, 2008). Böylelikle kayaçların kimyasal özelliklerinin değişimi doğrudan mekanik özelliklerini de değiştirmiş olmaktadır. Bununla ilgili olarak yapılan çalışmalarda mekanik özelliklerin tahmini için kimyasal ayrışma indeksleri kullanılmaktadır.

2.2.3. Kayaçların Fiziksel (İndeks) Özellikleri

Kayaçların mühendislik işlerinde kullanılan başlıca fiziksel özellikleri şu şekilde sıralanmaktadır (Erguvanlı, 1995);

a) Birim Hacim Ağırlığı (γ) : herhangi bir birim hacimdeki kayacın toplam ağırlığı kayacın birim hacim ağırlığı olarak tanımlanır. Birim kaya elemanı olan kayacın birim hacim ağırlığı, tüm kaya kütlelerinin içerdiği süreksizlere bağlı olarak kaya kütlelerini temsil edebilir. Mühendislik hesaplarında kullanılan değerler, kayaçların doğada buldukları haldeki doğal birim hacim ağırlıkları (γ_n), katı kısımlarının birim hacim ağırlıkları (γ_s), bütün boşlukların su ile dolu olması halindeki doygun birim hacim ağırlıkları (γ_d) ile boşluklu kısımların hava ile dolu olması halinde kuru birim hacim ağırlıkları (γ_k) olarak tanımlanır.

b) Özgül Ağırlık (G) ; belirli bir hacimdeki ismin ağırlığının, aynı hacim ve +4 °C'de ki saf su ağırlığına oranıdır. Kaya kütlelerinin doğal özgül ağırlıkları, boşluk oranına ve su miktarına göre değişen bir değerdir. Fakat kayaçların tane özgül ağırlığı değişmez değerdir. Dolayısıyla, özgül ağırlık deyimini genellikle taneleri ve katı kısımları kapsar ve birimsiz olarak ifade edilir.

c) Doğal Su İçeriği (W_n) ; kayacın belirli bir hacimde kapsadığı su ağırlığının, katı (tane) kısmın ağırlığına oranıdır. Bu değer yüzdesel olarak şu şekilde ifade edilir ;

$$\% W_n = \frac{\text{Su Ağırlığı}}{\text{Katı (tane) Ağırlığı}} \times 100$$

d) Porozite (n) ve Boşluk Oranı (e) ; kayacın içinde bulunan boşlukların hacminin (V_h) tüm hacmine (V_t) oranı, porozitesi (n), boşluk hacmi (V_h) ile katı kısımların hacmi (V_k) oranı da boşluk oranı (e) olarak tanımlanmaktadır ve yüzdesel olarak şu şekilde ifade edilmektedirler ;

$$\% n = \frac{V_h}{V_t} \times 100$$

$$\% e = \frac{V_h}{V_k} \times 100$$

Son yıllarda yapılan çalışmalar kayaçların poroziteleri ile özgül ağırlıkları ve orjinleri arasında bazı bağıntıların bulunduğunu göstermiştir. Büyük basınçlar altında oluşan

granitlerin özgül ağırlıkları fazla, poroziteleri az, buna karşın volkanik tüflerin özgül ağırlıkları az, poroziteleri fazladır.

Prozite ve boşluk oranı; delme – patlatma operasyonlarında, gerek patlayıcının türünün seçilmesi gerekse patlatma esnasında oluşan gaz basıncının parçalanmaya etkimesi konusunda oldukça üzerinde durulması gereken mühendislik özelliklerindedir.

e) Doygunluk Derecesi (S) ; doğal halde, süreksizlikleri ve boşlukları bulunan bir kayacın içindeki su hacminin, boşlukların hacmine oranı “doygunluk derecesi” (S) olarak tanımlanır ve yüzdesel olarak şu şekilde ifade edilir ;

$$S = \frac{W_w}{V_v} \times 100 = \frac{\text{Su hacmi}}{\text{Boşluk hacmi}} \times 100$$

f) Geçirimsizlik (Permeabilite) (K) ; kısaca kayacın su geçirme özelliğidir ve hidrojeolojide, olarak birim miktardaki bir yük kaybı altında, bu ortamın birim kesit ve birim uzunluktaki prizması içinden, birim zamanda geçen su miktarı olarak tanımlanmaktadır. Birimi $m^3/sn/m^2$ yani m/sn' dir.

g) Su Emme ; bir kayaç suya batırılacak olursa, içerisindeki boşluklar, yani poroziteleri oranında, belirli bir süre içinde ve sıcaklıkla su ile dolar. Fakat bazen numune içerde kalan hava boşluklarının birbirileri ile bağlantılı olmaması ve süreksizliklerde bulunan şişme potansiyelli killer nedeniyle suyun kayaç içine girmesi engellenir. Kayacın su emmesi şu şekilde hesaplanmaktadır ;

- Kayaç numunesi 105 °C’de 24 saat süre ile kurutulur, tartılır ve kuru ağırlık ($W_k=P_1$) bulunur,
- 24 ya da 48 saat suda bırakılıp su emdirilir ve havada tartılır ($W_t=P_2$),
- Ağırlık yüzdesi olarak su hesaplanır, ağırlıkça su emme (S_a) ;

$$S_a = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100$$

ve hacimce su emme (S_v) ;

$$S_a = \frac{(P_2 - P_1)/\gamma_w}{P_1/\gamma_s} \times 100$$

γ_w : Suyun Birim Hacim Ağırlığı = 1 gr/cm³

Birim kaya elamanı olan kayacın su muhteviyatını belirleyen bu özellikler kaya kütlelerinin özelliklerini de etkilemektedir. Örneğin su emmesi yüksek, poroz bir kaya

ortamı suyun mevsimsel olarak hacim değiştirmesinden ötürü mekanik deformasyona uğrayarak kaya kütlesinin genel mukavemet özelliklerini etkilemiş olur. Kaya ortamı içeirisinde yeni süreksizliklerin oluşmasına dolayısıyla süreç içinde mühendislik parametrelerinin değişmesine neden olur.

2.2.4. Kayaçların Mekanik Özellikleri

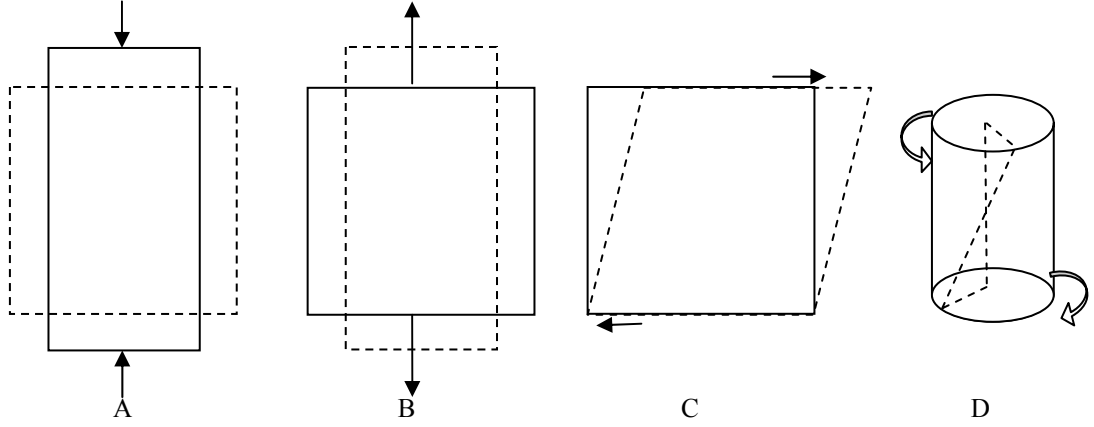
Kayaçların mekanik özellikleri ile kayaçların fiziksel özellikleri arasındaki ilişkinin, kayaçların doku özellikleri ile fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiden daha yoğun olduğu daha önce yapılan çalışmalarda belirlenmiştir (Kekeç ve diğ., 2004). Kayaçların çeşitli gerilmeler altında davranışlarını belirleyen mekanik özelliklerin en önemlileri tek ve üç eksenli basınç direnci, kesme, burulma vb. gibi direnç özellikleridir. Kayaçların direnç özelliklerinin beraberinde deformasyon özellikleride mekanik özellikleri altında incelenmektedir.

2.2.4.1. Kayaçların Direnç Özellikleri

Mühendislik çalışmalarında kaya ortamlarında birim alana düşen kuvvet miktarına gerilme adı verilmektedir. Bu kuvvetler basınç, çekme ve kesme şeklinde olmaktadır. Kayaçların, bu kuvvetlerin etkisi altında şekil ve hacim değiştirmeleri, genellikle dört tür gerilme etkisiyle oluşmaktadır. Bunlar; basınç gerilmesi, çekme gerilmesi, kesme-kayma gerilmesi ve burulma gerilmeleridir. Bunlar Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir. Bu gerilmelere uğrayan kayaçların davranışları, kayaçların dirençleri ile belirlenir.

Kayaçların direnci, çeşitli kuvvetlerin etkisi altında kırılmaya, göçmeye ve bozulmaya karşı gösterdikleri dayanıklılık olarak tanımlanır. Bu direnç, kayaçları oluşturan tane ve minerallerin iç yapılarına ve bunların dizilişlerine bağlı olduğu kadar kayaçların uğradıkları gerilme koşulları, zaman ve deformasyonla da ilgilidir.

Belirli bir gerilme hali için, kayaç direncinin, uygulandığı gerilme değerine oranı, o kayacın kırılmaya, göçmeye veya kaymaya karşı “güvenlik katsayısı olarak” tanımlanır (Erguvanlı, 1995).



Şekil 2.2 :Kayaçlarda gerilme türleri

A: Basınç Gerilmesi B :Çekme Gerilmesi C :Kayma-Kesme Gerilmesi D : Dönme-Burulma Gerilmesi

Doğada belirli bir derinlikte bulunan bir kayaç birim elemanı, üç doğrultu ile belirlenen üç asal gerilme altında bulunur. Dolayısı ile bir kayanın direnci ya da kırılmaya karşı gösterdiği dayanıklılık bu üç asal gerilmenin fonksiyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Kayaçların dayanım davranışlarını, kayan kütlelerinin dayanım davranışlarını, doğal sınır koşullarını saptamak, kaya yapısının duraylılığını denetlemek ve kaya yapısının optimal boyutlandırmasını yönlendirmek amaçlarıyla aşağıda açıklanan deneyler, ölçüm ve gözlemler yapılmaktadır.

Kayaçların kristallenme, çimentolanma, kompaksiyon, kenetlenme, süreksizliklerine ve ayrışma derecesine bağlı olarak, mekanik özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Laboratuvar deneyleri için hazırlanan numuneler, yukarıda söz edilen etkileyici unsurların çoğunu kapsayacak büyüklükte olmadıklarından, ayrıca numne alırken deformasyona uğrayabileceklerinden kaya kütlelerini temsil etmekte yetersiz kalabilirler. Bu nedenle arazide (in-situ) deneylerin yapılmasına, son yıllarda büyük bir önem verilmektedir. Ancak arazi deneylerinin pahalı, zaman alıcı ve standart problemleri olması nedeniyle halen laboratuvar deneyleri cazibesini korumaktadır. Laboratuvar deneylerini ;

- Statik ya da zaman bağlı olmayan deneyler,
- Zaman bağlı olan deneyler olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür.

Statik deneylerle, tek ve üç eksenli basınç ve kesme gerilmeleri altında bırakılan kayaçların deformasyonu ve kırılması incelenmektedir. Kayaçların sayısal olarak belirtilen basınç ve kayma dirençleri ile elastik özelliklerini karakterize eden değerleri bu deneyler sonucunda bulunmaktadır.

Zamana bağlı deneyler ise bir veya üç eksenli gerilmeler, uzun süreli yük altında, zamanın fonksiyonu olarak kayaçların deformasyonunu incelemektedir. Ayrıca ani değişmeler gösteren gerilmelerin etkisi altında kayaçların dinamik özellikleri de saptanmaktadır. Tüm bu gerilmelerle karşı kayaların gösterdiği davranışları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

A. Tek Eksenli Basınç Direnci : Belirli boyutlardaki küp ve silindirik numuneler üzerinde yapılan deneylerde kayaçların belirli doğrultularda kırıldığı görülmektedir. Tek eksenli basınç direnci, belirli boyutlardaki kayaçların belirli doğrultuda kırılmaya karşı gösterdikleri dayanıklılıktır. Basınç direnci;

$$\sigma_B = P/A$$

formülü ile ifade edilir ve birimi kg/cm^2 veya N/cm^2 'dir.

P : Kırılma anındaki yük

A : Alan

Gevrek malzemelerde, tek eksenli basınç deneylerinde numune alanında değişme olmadan kırılma meydana gelir. Ancak gevrek olmayan malzemelerde numune kırılma öncesi şekil değişikliğine uğrar. Kırılma yükü altında, kayma çatlakları meydana geldiği anda, deney altındaki numunenin kesit alanı büyü. Bundan dolayı bu tür kayaçlarda tek eksenli basınç direnci, kırılma yükünün, kırılma anındaki alana oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\sigma_B = P_k/A_k$$

P_k : Kırılma anındaki yük

A_k : Kırılma anındaki numune alanı

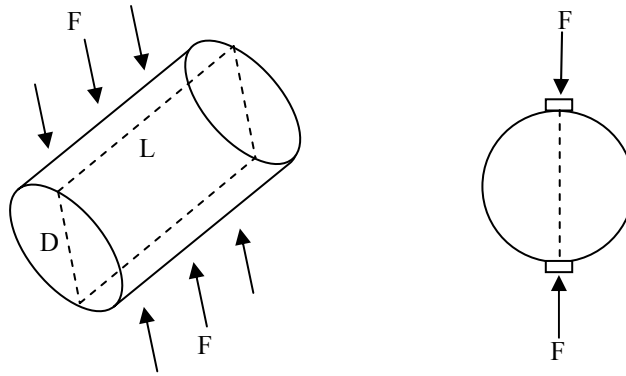
Bu çalışma kapsamında direk ve indirek laboratuvar yöntemlerinin yanısıra literatürde yapılan çalışmalardan da yararlanılarak, farklı kaya türlerinin tek eksenli basınç dayanımları ilerideki bölümlerde tablo halinde verilecektir.

B. Çekme Direnci : Basınç direncine oranla, mühendislik işlerinde daha az önemli olan bu direnç türü bir kayacın çekme gerilmesine karşı gösterdiği dayanıklılık olarak tanımlanmaktadır. Bu direnç, numuneyi kıran çekme kuvvetinin, kırılma alanına bölünmesi ile bulunur. Genellikle tek eksenli basınç direnci ile çekme direnci arasında lineer bir bağıntı vardır ve bu bağıntı ; $\sigma_C = K \cdot \sigma_B$ ($0,1 < K < 02,25$) şeklinde verilebilir.

Kayaçların çekme dirençleri direkt ve indirekt olarak iki ana yöntemle hesaplanmaktadır.

- Direkt Çekme Deneyi ; genellikle $L/D=2$ boyutlu) silindirik numuneler üzerinde yapılan bu deneyde numune, iki ucundan çekilerek içinde oluşturulan çekme gerilme altında kırılır. Ancak, kaya numunesi üzerinde çekme kuvveti uygulamak zor olduğu için daha çok indirekt çekme deneyi kullanılmaktadır.
- İndirekt Çekme Deneyi (Brazilian Deneyi) ; Bu deneyde, silindirik kaya numunesine, paralel iki yükleme plakası arasında basın kuvveti uygulanmaktadır (Şekil 2.3). Uygulanan bu çizgisel basınç kuvveti altında, numune içinde yükleme doğrultusundan geçen düşey düzlem boyunca çekme gerilmeleri oluşmakta ve numune bu düzlem boyunca kırılmaktadır. Numuneyi kıran kuvvet (F), numune çapı (D) ve boyu (L) ise kayacın çekme direnci şu şekilde hesap edilmektedir ;

$$\sigma_c = 2F / \pi DL$$



Şekil 2.3 :İndirekt çekme /Brazilian) deneyi.

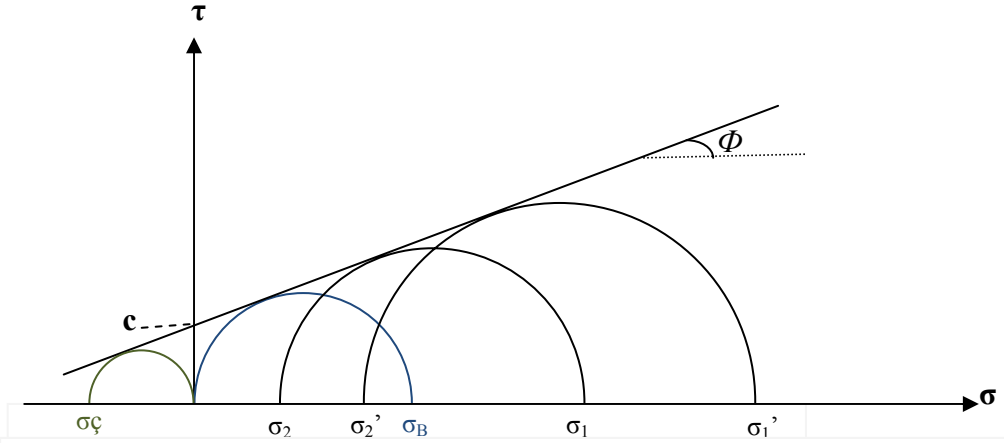
Kayaçların çekme dirençleri ile tek eksenli basınç dirençleri arasında sabit bir katsayı ilişkisi olmamakla beraber, çekme direncinin basma direncine oranla yaklaşık 10 kat daha az olduğu bilinmektedir.

C. Kesme (Kayma) Direnci : Kesme kuvveti altında kayaçların kırılma, kayma ve şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dayanıklılıktır. Kesme direnci değeri laboratuvarında üç eksenli basınç deneyi ve kesme kutusu deneyleri ile saptanırken arazide ise tek veya çift hidrolik krikolu aletler yardımı ile bulunabilmektedir. Kesme direnci deneylerinin esas amacı kayaçların kırılma zarfının bulunması yani, kırılma anında, normal (σ) ve kesme (τ) gerilmeleri arasındaki ilişkinin hesaplanması ve direnç parametrelerinin saptanmasıdır. Bu çalışma kapsamında kayaçların jeomekanik özellikleri arasında değerlendirilen içsel sürtünme ve kohezyon değerlerinin de olması nedeniyle üç eksenli basınç deneyi aşağıda açıklanmıştır.

- Üç Eksenli Basınç Deneyi ; Laboratuvarında, kayaç numuneleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyleri ile değişik değişik eksenel gerilmelere maruz kalan kayaçların kayma direnci özellikleri bulunur. Bu deneyler için hazırlanan $L/D=2$ boyutlu silindirik numunelere, basınç hücresi içinde değişik değerlerde yanal basınçlar (σ_3) uygulanır. Her değişik yanal basınç kademesinde, numune üzerinde uygulanan düşey gerilmeler (σ_1), kayaç numunesi kırılıncaya kadar artırılır. Belirli yanal gerilme (σ_3) altında numuneyi kıran eksenel basınç gerilmesi (σ_1) saptanır. Diğer bir numune üzerinde yanal basınç gerilmesi (σ_3) artırılarak aynı deney tekrarlanır. Ortaya çıkan (σ_1) ve (σ_3) değerleri, yatay eksen (X) normal gerilmeleri (σ), düşey eksen (Y) ise kesme gerilmelerini (τ) ifade eden bir koordinat sistemine yerleştirilip, her kırma deneyi için uygulanan (σ_1) ve (σ_3) değerlerinden bir daire geçirilir. Oluşan dairelere “Mohr Dairesi” bu dairelere teğet geçen doğruya da “Mohr Kırılma Zarfı” adı verilmektedir (Şekil 2.4). Mohr kırılma zarfının yatayla yaptığı açı, kayacın içsel sürtünme açısını (Φ), Y eksenini kestiği ordinat değeri ise kayacın kohezyon (c) değerini vermektedir. Kayaçların kesme direnci ile direnç parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme arasındaki ilişki, Coulomb (1776) tarafından aşağıdaki bağıntı ile ifa edilmiştir ;

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg } \Phi$$

τ : Kesme direnci (kg/cm^2)
 σ : Normal gerilme (kg/cm^2)
c : kohezyon (kg/cm^2)
 Φ : İçsel sürtünme açısı



Şekil 2.4 :Mohr daireleri ve Mohr kırılma zarfı ile tek eksenli basınç direnci (σ_B), çekme gerilmesi direnci (σ_ϕ), kohesyon (c) ve içsel sürtünme açısının (ϕ) tayini .

Kayaçların kesme dirençleri üç eksenli basınç testinin yanı sıra yine laboratuvar ortamında “kesme deneyi” yapılarak da bulunabilmektedir. Bu deneyde özel hazırlanmış kesme kutularına yerleştirilen silindirik veya prizmatik numuneler değişik düşey yükler altında, belirli yönde ve düzlemlerde kesme kuvvetlerine maruz bırakılarak kesme mukavemetleri bulunmaktadır.

D. Burulma Direnci : Kayaçların burulma kuvvetlerine karşı gösterdikleri dirençtir. Bu direnç endirek kesme deneyi ile bulunmaktadır. Silindirik kaya numunesi bir moment çifti etkisi altında deformasyona uğratarak, kayada kesme gerilmeleri oluşur ve bu gerilmeler belli bir sınırı aşınca kayaç kırılır. Kayaç kırıldığı kesme gerilmeleri ;

$$S_o = \frac{16.M_c}{\pi.D^3} \times 100$$

formülü ile bulunur. Burada;

S_o : Kayaçın kesme direnci (kg/cm^2)

M_c : Numuneye uygulanan moment ($kg.cm$)

D : Numunenin çapı (cm)'dir.

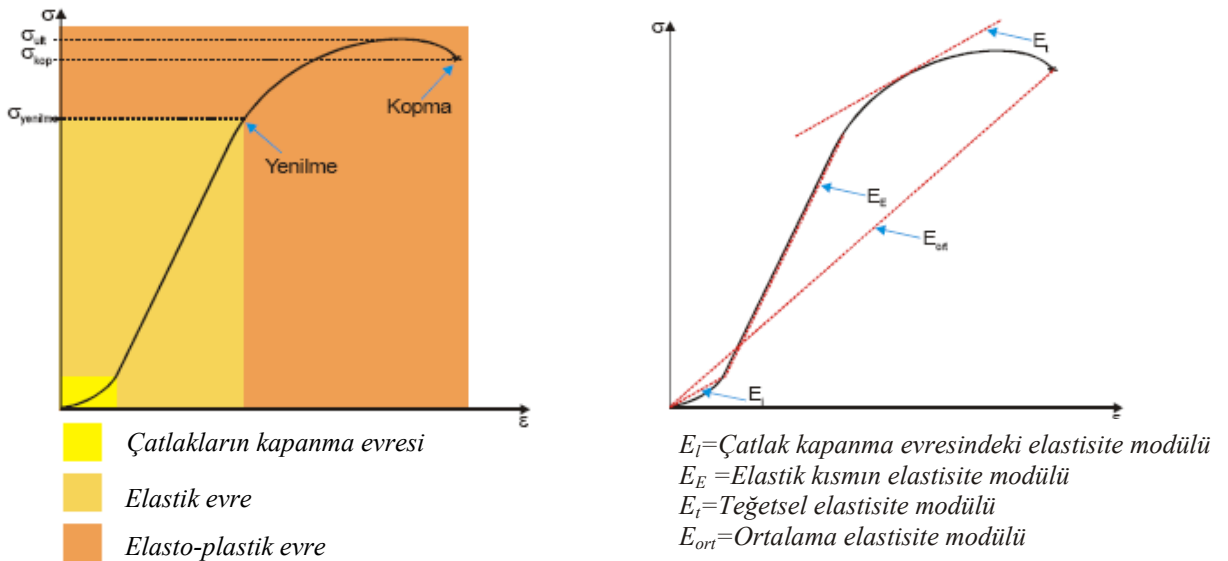
E. Diğer Kayaç Dirençleri : Kayaçların yukarıda bahsedilen direnç özelliklerinden başka, nokta yük direnci, suda dağılmaya direnç, eğilme direnci, darbe direnci, aşınma direnci özellikleri de vardır. Bu özellikler çeşitli mühendislik işlerinde projenin gereği doğrultusunda kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında bazı sonuçların elde

edilmesinde kullanılan kaya mekaniği deneylerinin detaylı anlatımı malzeme -yöntem bölümünde verilmiştir.

2.2.4.2. Kayaçların Deformasyon Özellikleri

Kayaçların elastik özellikleri, daha çok kaya ortamlarında yapılan mühendislik yapılarının zaman içerisinde etkilenimlerinin ortaya konulması amaçlı kullanılan parametrelerdir. Kaya ortamına gerilmeler etkilediğinde, kayada çeşitli şekil değişiklikleri meydana gelir. Bunlar genellikle boy uzaması, enine genişleme, hacimsel küçülme şeklinde ortaya çıkabilir. Basma ve çekme gerilmeleri, kayanın boyunda bir uzama veya kısalma meydana getirirler, bu durum deformasyon olarak tariflenmektedir. Kayaçların deformasyon özelliklerinin sayısal ifade edilebilmesi için aşağıdaki modüller kullanılmaktadır.

A. Elastisite (Young) Modülü (E) : Hooke yasası sınırları içerisinde, uygulanan doğrusal gerilme ile bu gerilmenin oluşturduğu gerilme arasında bir oran vardır. Belli boyutlu ($L/D=2$ ya da $10 \times 10 \times 20$ cm) silindirik veya prizmatik kaya numuneleri üzerine basınç gerilmeleri uygulanır. Numunedeki boy değişimleri ölçülür ve bunları oluşturulan gerilmeler hesaplanır. Numune, basınç direncinin %50-60 değerine kadar yüklenir. Bu değere erişince yük azaltımı yapılır. Deformasyondaki azalmalara bağlı olarak, numune üzerindeki yük değerleri okunur. Elde edilen değerler kullanılarak, gerilme-deformasyon grafiği çizilir. Çizilen grafiğin üzerinden farklı elastisite değerleri belirlenebilmektedir (Şekil 2.5)



Şekil 2.5 : Standart bir kaya için gerilme-gerilme eğrisi ve elastisite modülleri

B. Poisson Oranı (ν) : Kaya kütlesine tek yönlü bir gerilme etkidiğinde boyunda ve eninde bir değişim meydana gelecektir. Enine deformasyonun boyuna deformasyona oranı da “Poisson Oranı” olarak tanımlanmakta olup, boyutsuz olan bu değer aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir;

$$\nu = \epsilon_{enine} / \epsilon_{boyuna}$$

C. Rijitlik Modülü (G) : Elastik malzemelerde veya kayanın elastik davrandığı evrede, belirli limitler içerisinde kesme gerilmesi ile bunun oluşturduğu kesme gerinmesi arasında bir oran vardır. Kesme gerilmesinin, kesme deformasyonuna oranına rijidite modülü denir.

$$G = \tau / \alpha \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Rijitlik modülü ile elastisite modülü arasında aşağıdaki ilişki vardır:

$$E = 2G(1 + \nu)$$

D. Bulk Modülü (K) : Hidrostatik gerilme altında (tüm gerilmeler birbirine eşit) kayanın ilksel hacminde ΔV kadar bir değişim olur. Uygulanan gerilme ile hacimsel deformasyon arasında ise aşağıdaki gibi bir ilişki vardır.

$$K = \sigma / (\Delta V / V)$$

Bulk modülü, elastisite modülü cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$E = 3K(1 - 2\nu)$$

2.2.5. Kayaçların Teknolojik Özellikleri

Kayaçların üzerinde veya içinde, çeşitli mühendislik çalışmalarının emniyetle ve ekonomik yapılabilmesi için kayaçların teknolojik özellikleri oldukça önem arz etmektedir. Bu özelliklerin belirlenmesinde birim zamanda yapılan iş, birim miktarın elde edilmesi için gerekli zaman, enerji veya patlayıcı miktarı gibi parametreler ele alınmaktadır. Bu çalışma kapsamında delme-patlatma operasyonları incelendiği için özellikle patlatılabilir özellikleri üzerinde durulacak ve kaya kütle sınıflaması ile ilişkilendirilecektir.

2.3. KAYAÇLARIN MÜHENDİSLİK SINIFLAMALARI

Kaya kütlelerinde gerçekleştirilen mühendislik yapıları için teorik olarak günümüzde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Kaya mühendisliğini kapsayacak 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 – deformasyon ilişkilerinin analizi için yararlanılır. Gözleme dayalı yöntemler, kazı ve yakın çevresindeki yapılan incelemeleri, arazide ve laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler ile deformasyon, gerilme, su basncı vb. konularla ilgili aletsel izleme çalışmalarını kapsar. (Ulusay ve Sönmez, 2007). Görgül yöntemler ise, mühendislik çalışmalarında yapılan gözlemler ve elde edilen verilerin genellikle istatistiksel yöntemlerle veya korelasyonlarla değerlendirilmesi sonucunda mühendislik deneyimi esas alınarak geliştirilmiş yöntemlerdir.

Kelime 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 (Goodman, 1980; Hoek ve Brown, 1980 a; Bieniawski, 1988), 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 kütle sınıflama sistemleri, kaya mühendisliğinde tasarıma yardımcı olan ve ön tasarım amacıyla kullanılabilir birer araç olarak değerlendirilmelidir. Dolayısıyla bu sistemler, analitik-sayısal ve gözleme dayalı yöntemler ile mühendislik sezgilerinin yerini almak üzere geliştirilmemişlerdir. Kaya kütle sınıflama sistemlerinin bu çerçevede algılanması ve doğru kullanılması halinde, günümüzde bir çok mühendislik projesinin tamamlanmasında başarı ile kullanıldıkları bilinmektedir (Özkan ve Ünal, 1996).

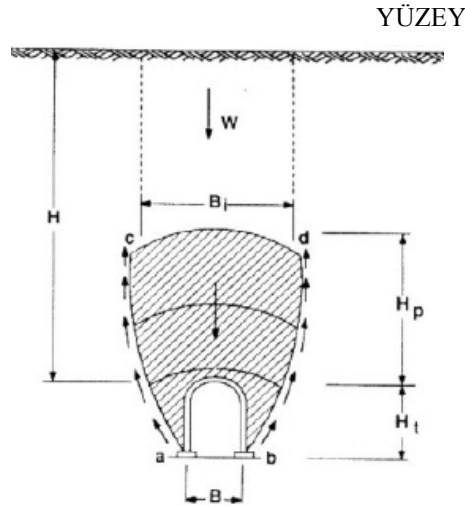
Aşağıdaki alt bölümlerde literatür çalışmalarından derlenen kaya kütle sınıflamaları tanıtılmış, bu çalışma kapsamında kullanılan “Jeolojik Kaya İndeksi (GSI)” sınıflaması üzerinde detaylı olarak durulmuştur.

2.3.1. Kaya Yüğü (Terzaghi) Sınıflaması

Terzaghi 1946 yılında, çelik destek sistemlerine uygun olarak geliştirilen ilk gerçekçi sınıflama yöntemini ortaya koymuştur. O tarihte 1900'lü yılların başından beri tünel kazılarında kullanılan çelik destekler nedeniyle bu sınıflama önemli bir ilerleme safhası olmuştur. Sınıflama çelik desteklerle desteklenen tünellerin üzerindeki kaya yüklerini tahmin etmek için tasarlanmıştır ve püskürtme beton, kaya bulonu gibi yöntemlerin kullanıldığı modern tüneller için uygun değildir. Terzaghi'nin tanımlamasından sonra çeşitli araştırmacılar tarafından bazı değişiklikler yapılmış ve şimdi kullanımda olan son hali aşağıda Şekil 2.6 ve Tablo 2.3 kullanılarak verilmiştir (Akyol, 2002).

Bu sınıflamada ;

1. Tünel tavanının su tablası altında bulunduğu varsayılmıştır. Eğer tünel su tablasının üzerinde ise, sınıf no'su 4,5,6 olanlar için verilen kaya yükü değerleri %50 azaltılabilir.
2. Kilden türemiş kayalar (kıltaşı, silttaşı, şeyl, fillit, şist) sıkılaşıma, çimentolanma ve metamorfizma derecesine bağlı olarak, 2 ile 9 nolu sınıflar arasında değişimler gösterebilirler.
3. Eğer kumtaşı veya kireçtaşı tabakaları, kıltaşı tabakaları ile ardalanmalı ise, tünelin iki yanındaki ve tavanın aşağı doğru hareketini kapsayan basınçlar tünel kazısını etkiler. Bundan başka, kıltaşı ile kireçtaşı veya kumtaşı sınırındaki kaymaya karşı daha düşük olan direnç, tünel tavanı üzerindeki kemerlenme yapan kayacın dayanımını önemli ölçüde azaltır. Bu durumdaki kayalarda tavan basıncı 5 no'lu sınıftaki kadar fazla olabilir.



Şekil 2.6 : Terzaghi'ye göre tünel yükü kavramı.

Tablo 2.3 :Tünel Kazısı ve desteklemesi için kaya yükü sınıflaması (Ulusay, 1994).

	Kayanın Durumu	RQD	Kaya Yükü (ft)	Açıklamalar
1	Sert, sağlam ve çatlaksız	95-100	0	Küçük parçalanma varsa hafif kaplama gerekir
2	Sağlam Tabakalı veya şistoziteli	90-99	0 – 0,5 B	Esas olarak kaya düşmelerini engellemek için hafif destek. Basınç ani değişiklikler gösterebilir
3	Masif, orta derecede eklemli	85-95	0 – 0,25 B	Yük bir noktadan diğerine ani olarak değişebilir
4	Parçalı çatlaklı-orta bloklu	75-85	0,25 B – 0,35 (B + H _t)	Yan basınç yok
5	Çok parçalı ve bloklu	30-75	(0,2 – 0,6) (B + H _t)	Yan basınç yok veya çok az
6	Tamamen parçalanmış, fakat kimyasal yönden ayrışmamış	3-30	(0,6 – 1,1) (B + H _t)	Önemli yanal basınç, sızan suyun kayayı yumuşatıcı etkisi, çelik desteklerin alt kısımlarında sürekli destek veya dairesel destek gerektirir. *Daha sonra yapılan değişikliklerle, suyun çok etkili olmadığı ve burada verilen değerlerin %50 azaltılması önerilmiştir.
6a	Kum ve çakıl	0-3	(1,1 – 1,4) (B + H _t)	
7	Sıkışan kaya (orta derinlikte)	-	(1,1 – 2,1) (B + H _t)	Yüksek yanal basınç, Dairesel çelik destekler tavsiye edilir
8	Sıkışan kaya (çok derinde)	-	(2,1 – 4,5) (B + H _t)	Yüksek yanal basınç, Dairesel çelik destekler tavsiye edilir
9	Şişen	-	4,5 (B + H _t) – 75 m'ye kadar bağımsız	Dairesel çelik destekler gereklidir. Aşırı durumlarda esnek destekler kullanılmalı

2.3.2. Kaya Kalitesi İndeksi (RQD) Sınıflaması

Bu sınıflama yöntemi Deere tarafından 1964 yılında geliştirilmiş ve 1967 yılında ilk defa sunulmuştur. RQD (Rock Quality Designation), 10 cm veya daha uzun karotların toplam uzunluğunun (L_p), karotlu ilerlemede toplam sondaj manevra uzunluğuna (L_t) oranı olarak tanımlanır ve yüzde olarak ifade edilir. Bu nitel gösterge düşük kaliteli kaya zonlarının basit ve hızlı biçimde belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. RQD'nin belirlenmesi için ISRM (International Society of Rock Mechanics) en az NX çaplı (54.7 mm) ve çift karot tüplü sondaj ekipmanının kullanılmasını tavsiye etmektedir.

$$RQD (\%) = (L_p / L_t) \times 100$$

Tablo 2.4 :RQD Sınıflamasına göre kaya kütle kaliteleri (Deere, 1964).

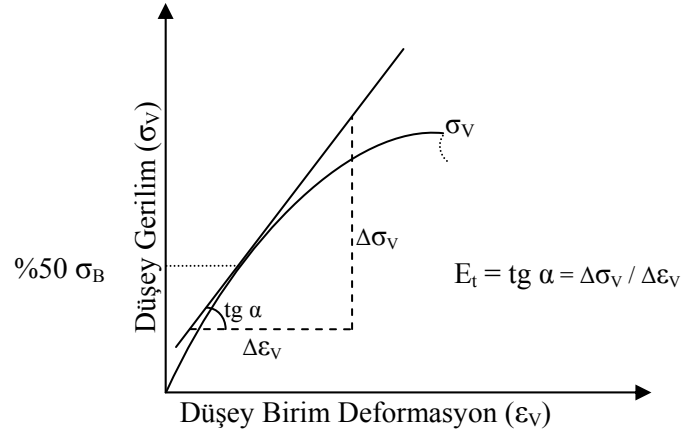
RQD (%)	Kaya Kütle Kalitesi
0 – 25	Çok Zayıf
25 – 50	Zayıf
50 – 75	Orta
75 – 90	İyi
90 - 100	Çok iyi (Mükemmel)

2.3.3. Kayaçların Dayanımlarına Göre Sınıflaması

Kayaçların dayanım özellikleri esas alınarak sınıflandırılmalarında Deere ve Miller (1966) sınıflaması yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Tablo 2.5). Bu sınıflama sisteminde, kayacın tek eksenli basınç dayanımı σ_B ve modül oranı (E_t / σ_B) değerleri esas alınır ve sınıflandırma bu parametrelere bağlı olarak iki bölümden oluşmaktadır. Modül oranında kullanılan E_t – teğetsel elastisite modülü değeri, “normal gerilim (σ_V) – düşey birim deformasyon (ε_V)” eğrileri üzerinde, en yüksek dayanımın %50’sindeki teğetin eğimi olarak hesaplanır. E_t değerinin hesaplanmasına ilişkin $\sigma_V - \varepsilon_V$ grafiği Şekil 2.7’de verilmiştir.

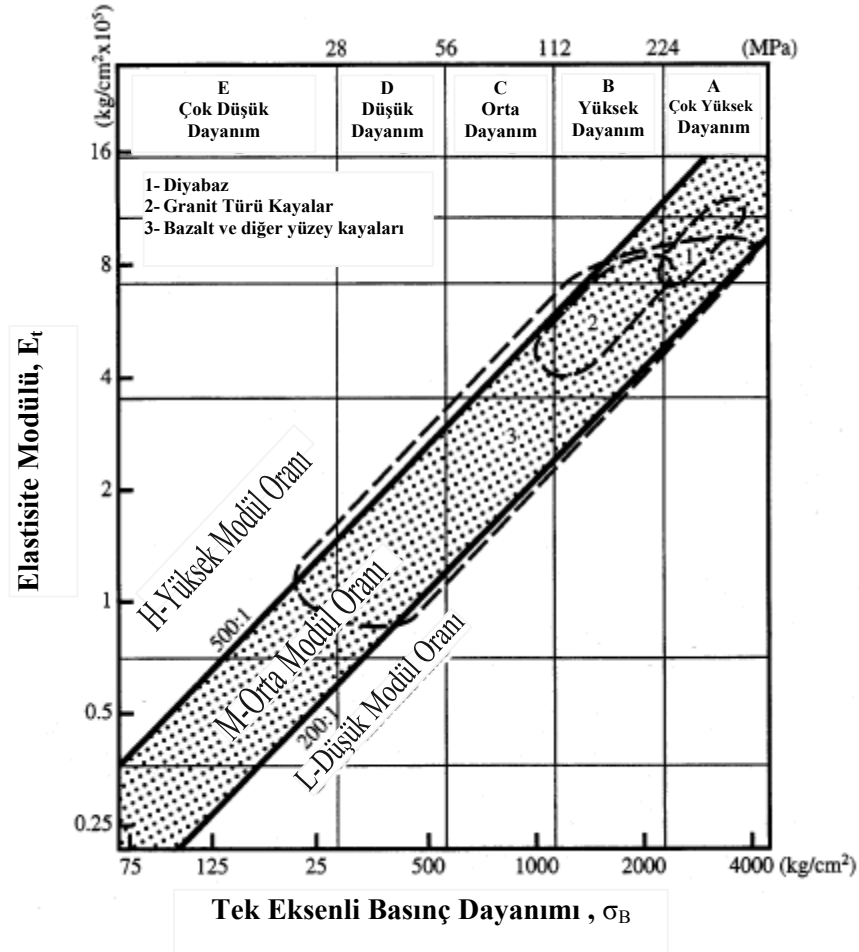
Tablo 2.5 :Kayaçların dayanımlarına göre sınıflandırılması (Deere & Miller, 1966).

(A) Tek Eksenli Sıkışma Dayanımına Göre		
Sınıf	Dayanım	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (kg/cm^2)
A	Çok Yüksek	> 2200
B	Yüksek	1100 – 2200
C	Orta	550 – 1100
D	Düşük	275 – 550
E	Çok Düşük	< 275
(B) Modül Oranına Göre		
Sınıf	Modül oranı	Değer
H	Yüksek	> 500
M	Orta	200 – 500
L	Düşük	< 200



Şekil 2.7 : Normal gerilme – düşey birim deformasyon ilişkisi.

Deer ve Miller (1966)'in iki bölümden oluşan sınıflaması birleştirilerek “Birleştirilmiş Mühendislik Sınıflaması” adıyla bir abak (Şekil 2.8) şekline getirilmiştir. Laboratuvar testleri ile belirlenen E_t ve σ_B değerleri bu abağa yerleştirilerek kayalar sınıflandırılabilir.



Şekil 2.8 : Birleştirilmiş mühendislik sınıflaması abağ (Deere & Miller, 1966).

2.3.4. Kaya Kütlesi Derecelendirmesi (RMR) Sınıflaması

Eklemlili kaya kütleleri için jeomekanik sınıflama sistemi olan RMR (Rock Mass Rating) sınıflaması 1972-1973 yıllarında Bieniowski tarafından geliştirilmiş ve zaman içerisinde değişiklikler yapılmıştır. RMR sınıflaması 350 farklı uygulamada denenmiş ve uygulanabilirliği kabul edilmiştir. RMR sınıflamasında kullanılan tanımlar ve derecelendirmeleri Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6 : Kaya kütlesi derecelendirmesi (RMR) sınıflama tabloları (Ulusay, 1994).

A. Sınıflama parametreleri ve dereceleri

1	Sağlam Kayacın Dayanımı	Nokta Yüklü Dayanım indeksi	>10 Mpa	4 – 10 Mpa	2 – 4 Mpa	1 – 2 Mpa	Düşük aralıklar için tek eksenli test		
		Tek Eksenli Basınç Dayanımı	>250 Mpa	100 – 250 Mpa	50 – 100 Mpa	25 – 50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
Derecelendirme			15	12	7	4	2	1	0
2	Kayaç kalite tanımı RQD		%90-100	%75-90	%50-75	%25-50	< %25		
	Derecelendirme		20	17	13	8	3		
3	Süreklilik aralığı		> 2m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Derecelendirme		20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin Durumu		Çok kaba yüzeyler, Sürekli değil, Ayrılma yok, Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler, Ayrılma <1mm, Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler, Ayrılma <1mm, Yumuşak eklem yüzeyi	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu, <5 mm veya 1-5 mm açık eklemeler, sürekli eklemeler	Yumuşak fay dolgusu, >5 mm kalınlıkta veya açık eklemeler, >5 mm devamlı süreksizlikler		
	Derecelendirme		30	25	20	10	0		
5	Yer altı Suyu	Tünelin 10 m’lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	<25 lt/dk	25-125 lt/dk	>125 lt/dk		
		Oran	Eklemdaki su basıncı	0	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5	
	Ana asal gerilme								
	Genel koşullar		Tamamen Kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
Derecelendirme		15	10	7	4	0			

B. Eklem yönlemine göre düzeltme

Eklem doğrultu ve yönelimi		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygundeğil
Derecelendirme	Tüneler	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

C. Kaya sınıflamaları ve eğim yönünün etkisi

Sınıflama No	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Derecelendirme	100---81	80---61	60---41	40---21	<20

2.3.5. Norveç Jeoteknik Enstitüsü (NGI) Kaya Sınıflaması (Q)

Özellikle tünel destek dizaynı için kaya kütlelerinin mühendislik sınıflamalarında kullanılan bu sınıflama 1974 yılında Barton ve arkadaşları tarafından Norveç Jeoteknik Enstitüsü'nde geliştirilmiş bir sınıflamadır. Sistem birbirinden bağımsızlıtı adet parametreyi esas almakta olup, Q değeri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Burada ;

RQD : Kaya eklem göstergesi

J_n : Eklem takım sayısı

J_r : Eklem pürüzlülük sayısı

J_a : Eklem alterasyon sayısı

J_w : Eklem su azaltma faktörü

SRF : Gerilme azaltma faktörü

Bu eşitlikte “RQD/ J_n ” kaya kütlelerinin yapısını ve blok boyutunu, “ J_r/J_a ” dolgu veya dolgunsuz süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük ve süreksizlik karkteristiklerini dolayısıyla makaslama dayanımını ve “ J_w/SRF ” etkin gerilme koşullarını temsil etmektedir. Bu sistem, mevcut tünellerden elde edilen 1000’den fazla olaya ait deneyimler esas alınarak geliştirilmiştir. Gerilme azaltma faktörü (SRF) ile ilgili olarak Grimstad ve Barton (1993) ve Barton ve Grimstad (1994) tarafından yapılan bir değişiklik dışında, Q sistemi önemli bir değişikliğe maruz kalmamıştır. SRF üzerinde yapılan değişikliği de içerecek şekilde, Q değerinin hesaplanması için kullanılan 6 parametreni değişik koşullara göre alacağı değerler Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7 : Q Sisteminin gridi parametreleri ve değerleri (Barton vd., 1974 ve Barton, 2000’den düzenlenmiştir).

1. RQD	Kaya Kalitesi Göstergesi Tanımı
0 – 25	A. Çok zayıf
25 – 50	B. Zayıf
50 – 75	C. Orta
75 – 90	D. İyi
90 – 100	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 Takım Sayısı	J_n
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0,5 – 1,0
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	12
H. Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok fazla sayıda, küp şeker görünümünde	15
İ. 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) kullanılır.	
3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	J_r
<i>(a) Süreksizlik – kaya dokanağı ve (b) 10 cm'lik bir makaslama öncesi süreksizlik – kaya dokanağı</i>	
A. Süreksiz eklemler	4
B. Pürüzlü ve 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.	
<i>(c) Makaslanmış kesimde süreksizlik – kaya dokanağı yok</i>	
H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1,0
İ. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki kumlu, çakıllı ya da parçalanmış zon.	1,0
Not: (5) İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3 m'den büyükse 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.	

4. Eklem Alterasyon Sayısı	J_a	Φ (yaklaşık)
<i>(a) Kaya – süreksizlik dokanağı (mineral dolgusu yok, sadece yüzey kaplaması)</i>		
A. Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars ve 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. Siltli 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 bd. İl az miktarda şişen killer	4	8-16°
<i>(b) 10 cm'lik makaslamadan önceki süreksizlik kaya dokanağı (ince mineral dolguları)</i>		
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 aşırı konsolidasyona maruz kalmış, yumuşamayan kil mineral dolguları (sürekli ancak kalınlığı <5mm)	8	12-16°
İ. Şişen kil mineralleri – örneğin montmorillenit (sürekli ancak kalınlığı <5 mm) J_a 'nın değeri şişen kil tane boyutundaki malzemenin miktarına ve su girşine bağlı	8-12	6-12°
<i>(c) Makaslanma durumunda süreksizlik yüzeylerinin teması yok (kalın mineral dolguları)</i>		
J, K, L. Bozunmuş veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşulunun tanımı için G, H ve İ'ye bakınız)	6-8 veya 8-12	6-24°
M. Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	10	6-24°
N, O, P. Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları (kil koşulunun tanımı için G, H ve İ'ye bakınız)	10-13 veya 13-20	6-24°

5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Yaklaşık Su Basıncı (kgf/cm²)	J_w	
A. Kısmi kazı ve düşük su geliri (örneğin genel olarak <5 lt/dk)	<1	1,0	
B. Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	1-2,5	0,66	
C. Dolgusuz eklemler 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 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 alınırsa J _w artar. (9) Buz oluşumundan kaynaklanabilecek özel sorunlar dikkate alınmamıştır.			
6. Gerilme Azaltma Faktörü		SRF	
<i>(a) Tünel açılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar</i>			
A. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)		10	
B. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤ 50 m)		5	
C. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50 m)		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 eklemler, ileri derecede eklemlerle "küp şeker" görünümlü (herhangi bir derinlikte)		5,0	
<i>(b) Dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları</i>	σ_B/σ_C	σ_θ /σ_B	SRF
H. Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemeler	>200	<0,01	2,5
İ. Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200-10	0,01-0,3	1
J. Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir.	10-5	0,3-0,4	0,5-2
K. Masif kayada birkaç dakika sonra 1 saatlik sonrasında orta derecede dilimlenme	5-3	0,5-0,65	5-50
L. Masif kayada birkaç dakika sonra dilimlenme ve kaya patlaması	3-2	0,65-1	50-200
M. Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani	<2	>1	200-400

dinamik deformasyon			
Not: (10) Oldukça anizotrop bakir gerilme alanı (ölçülebilirse) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ koşulunda σ_B , $0,75 \cdot \sigma_B$ 'ye, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise $0,5 \cdot \sigma_B$ 'ye düşürülür. Burada σ_B tek eksenli basınç dayanımı, σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_θ en büyük teğetsel gerilmedir (elastik kuramdan tahmin edilen) (11) Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarda ilgili birkaç olay kaydı mevcuttur. Bu gibi durumlar için H maddesindeki SRF'nin 2,5'tan 5'e artırılması önerilir.			
<i>(c) Sıkışan kaya; yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma</i>		σ_θ / σ_B	SRF
N. Az sıkıştırıcı kaya basıncı		1-5	5-10
O. Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı		>5	10-20
Not : (12) Sıkışan kaya olayları $H > Q^{1/3}$ derinlik koşulunda meydana gelebilir. Kaya kütlelerinin sıkışma dayanımı $q = 0,7 \times \gamma \times Q^{1/3}$ (Mpa) eşitliğinden tahmin edilebilir. Burada γ kayanın birim hacim ağırlığıdır (kN/m ³).			
<i>(d) Şişen kaya; suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği</i>			SRF
P. Düşük şişme basıncı			5-10
Q. Çok yüksek şişme basıncı			10-15

2.3.6. Jeolojik Dayanım İndeksi Sınıflaması (GSI)

Kaya kütlelerinde güvenilir gerilme – deformasyon karakteristiklerini tahmin etmek için tüm yüzey kazılarında kullanılan analizlerin hemen hemen tümü gereklidir (Marinos, Hoek, 2000). Hoek ve Brown(1980 a, 1980 b) çalışmalarında süreksizliklerle birbirine bağlı olan kaya blokları ve bu blokların yüzeyleri üzerinde yapıtları gözlemlerle bazı tahminlerde bulunmak için bir metod geliştirmişlerdir. Bu metod daha sonraki yıllarda proje uygulamalarında karşılaşılan ihtiyaçlara göre modifiye edilmiştir (Hoek 1983, Hoek & Brown 1988). Zayıf kaya yapılarında bu metodun uygulanması farklı değişikliklerin yapılması ile beraber nihayetinde yeni bir sınıflama metodu oluşmuş oldu (Hoek, Wood & Shah, 1992). Bu metod son yıllarda heterojen kaya kütlelerinin sınıflamasında sıkça kullanılan Jeolojik Kaya İndeksi sınıflamasıdır. (Hoek 1994, Hoek, Kaiser & Bawden 1995, Hoek & Brownm 1997, Hoek, Marinos & Benissi 1998).

2.3.6.a. Hoek – Brown Görgül Yenilme Ölçütü

Jeolojik kaya indeksi sınıflamasının daha iyi anlaşılması için Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünün temel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Kayalar küçük ölçekte dikkate alındıklarında kaya malzemesi önem kazanırken, ölçek büyüdüğünde sağlam kaya malzemesinden eklemlili kaya kütesine geçiş söz konusudur. Farklı yönelimlerde gelişmiş çok sayıdaki süreksizlik tarafından bölünmüş kaya kütlelerinin davranışı, kaya malzemesinin aksine, hem süreksizlikler hem de kaya malzemesi tarafından denetlenir. Dolayısıyla kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin, kaya malzemesiyle birlikte süreksizlikleri de içerecek boyutlardaki örnekler üzerinde tayin edilmesi gerekmektedir. Ancak bu tür ortamlardan, kaya malzemesi ile birlikte süreksizlikleri de içeren ve metre boyutuna ulaşan örneklerin alınması ve bunların laboratuvar deneyleri için hazırlanmaları mümkün olmadığı gibi, bu boyutlara uygun deney araçları da geliştirilmemiştir. Bu sorunu dikkate alan Hoek-Brown (1980a ve 1980b), tasarım mühendisleri tarafından kullanılmak üzere aşağıdaki koşulları sağlayabilecek bir ölçütün yararlı olacağını düşünmüşlerdir;

- Ölçüt, kaya malzemesinin uygulamada karşılaşılan gerilme koşulları altında göstereceği davranışı tam olarak tanımlamalıdır,
- Ölçüt, kaya kütlelerinin içerdiği zayıflık düzlemleriyle ilgili olarak kütlelerin dayanımında yönsellikten kaynaklanabilecek değişimleri dikkate alabilmeli,
- Ölçüt, yaklaşık da olsa, çok sayıda süreksizlik takımını içeren kaya kütlelerinin dayanımı hakkında bilgi verebilmelidir,
- Laboratuvarında tayin edilen dayanım verileriyle uyumlu olmalıdır,
- Kullanıcıya kolaylık sağlaması açısından, mümkün olduğunca boyutsuz parametrelere bağlı, basit bağıntılarla ifade edilmeli,
- Eklemlili kaya kütlelerinin yenilmesiyle ilgili uygulama olanaklarını da sağlaması gerekmektedir.

Hoek-Brown, çalışmalarının sonucunda en büyük asal gerilme (σ_1) ile en küçük asal gerilme (σ_3), diğer bir ifadeyle normal gerilme (σ) ile makaslama (τ) arasındaki ilişkinin eğrisel olduğunu belirlemişler ve yenilme ölçütünü bir karekök parabolü olan aşağıdaki

bağıntıyla ifade etmişlerdir. Bu ilişki, özgün Hoek-Brown yenilme ölçütü olarak da bilinmektedir.

$$\sigma_1 / \sigma_B = (\sigma_3 / \sigma_B) + \sqrt{(m \times (\sigma_3 / \sigma_B)) + s}$$

σ_1 ve σ_3 : Yenilme anındaki en büyük ve en küçük asal gerilmeler,

σ_B : Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı,

m ve s : Boyutsuz malzeme sabitleridir.

Yukarıdaki eşitliğin her iki tarafı da σ_B ile çarpılarak, bu özgün ilişki aşağıdaki gibi de ifade edilmektedir.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(m \times \sigma_3 \times \sigma_B) + (s \times \sigma_B^2)}$$

Bu formüldeki “s” sabiti, kaya kütesinin içerdiği bloklar/taneler arasındaki çekilme dayanımına ve süreksizlikler tarafından sınırlanan kaya malzemesi parçalarının birbirleriyle kenetlenme derecesine bağlı bir sabittir. Kaya malzemesi için s=1 iken, bu sabit, kaya kütesinin kalitesine göre 1’den 0’a doğru azalmaktadır. “m” sabiti ise; kayanın türüne, kayayı oluşturan tanelerin büyüklüğüne, geometrisine ve kenetlenme derecesine bağlı olarak değişmektedir.

Çok zayıf kütleleri için yine de yetersiz kalan ölçütün zayıf kaya kütlelerini hedef alan değişim sürecinin başlangıcı olarak kabul edilen 1992 yılında, aşağıda belirtilen değişiklikler yapılmıştır;

- Özgün ölçütten belirlenen tek eksenli çekme dayanımının sık eklemli kaya kütlelerinde sıfır olması gerektiği düşünülerek, bu parametre ölçütten çıkarılmıştır,
- Modifiye edilmiş ölçütteki parametrelerin tayini için basitleştirilmiş kalitatif bir kaya kütesi sınıflaması ölçüte dahil edilmiştir,
- Belirli bir etkin normal gerilme düzeyi için etkin anlık makaslama dayanımı parametrelerinin (c'_i , Φ'_i) belirlenmesi ve Mohr yenilme zarfının çizilmesi için Bray’ın eşitlikleri yerine Balmer (1952)’in eşitliklerinin kullanılması önerilmiştir.

Hoek vd. (1992), kaya mekaniği ile ilgilenen mühendislerin önemli bir bölümünün Hoek-Brown yenilme ölçütünün uygulanabileceği eklemli kaya kütlelerinin tek eksenli

çekme dayanımlarının olmadığını düşündüklerini belirtmektedirler. Ayrıca, son 30 yılda kaya mekaniğinde yaygın şekilde kullanılan sonlu elemanlar gibi sayısal çözümlerinde çekme gerilmelerinin modeldeki komşu elemanlara aktarıldığı varsayılarak, modellere herhangi bir çekme gerilmesi seçeneği dahil edilmemiştir. Yenilme ölçütünün kullanımı sırasında dikkati çeken diğer bir husu da, en küçük etkin asal gerilmenin (σ'_3) önemli miktarda sıkıştırıcı bir büyüklüğe sahip olduğu koşullarda, ölçütten belirlenen dayanım değerlerinin kabul edilebilir olduğudur. Buna karşın, küçük σ'_3 değerleri için ölçüt oldukça yüksek eksenele gerilme ve aynı zamanda sınırlı tek eksenli çekme dayanımı değerleri vermektedir. Özgün ölçütü ilgili bu sorun tek eksenli çekme dayanımı ihmal edilerek yapılan değişiklikler ile giderilerek, ölçüt 1992'den itibaren “modifiye edilmiş” sıfatıyla anılmaya başlamış ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmeye başlamıştır.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_B (m_b \times \sigma'_3 / \sigma_B)^a$$

Özgün Hoek-Brown yenilme ölçütü, sıkı kenetlenmiş köşeli kaya parçalarından oluşan iyi ve orta kaliteli kaya kütlelerinde iyi sonuç vermesine karşın, zayıf ve çok zayıf kaya kütlelerinde temsil edici sonuçlar vermemektedir. Bu sorunun giderilmesi amacıyla 1992'ye kadar bazı modifikasyonlar yapılmış olmakla beraber, ölçütün modifiye edilmiş son hali bile özgün bir bütünlük sağlayamamıştır. Bu sorunu dikkate alan Hoek vd. (1995), hem özgün hemde modifiye edilmiş ölçütü içerecek şekilde bir düzenleme yaparak, ölçütü aşağıda verilen genel bağıntıyla tanımlamışlardır;

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_B \left((m_b \times \sigma'_3 / \sigma_B) + s \right)^a$$

İyi kenetlenmiş ve köşeli kaya parçalarından oluşan iyi kaliteli kaya kütlelerinde yukarıdaki eşitlikte “a” üssel değeri 0,5 alınarak, ölçüt özgün haline dönüştürebilmektedir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_B \left((m_b \times \sigma'_3 / \sigma_B) + s \right)^{0,5}$$

Makaslama hareketi veya bozunma nedeniyle kaya malzemesine ait bloklar arasındaki kenetlenmenin zayıflamış olduğu zayıf kaya kütleleri çekme dayanımına veya kohezyona sahip değildir. Bu tür kaya kütleleri için modifiye edilmiş ölçüt çok daha uygun olmakta ve s=0 alınıp söz konusu eşitlik ;

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_B (m_b \times \sigma'_3 / \sigma_B)^a$$

şeklinde düzenlenerek, ölçütün 1992'de önerilen bir önceki modifikasyonunda verilen eşitliğe dönüşmektedir.

Genelleştirilmiş haliyle ölçüt, $a=0,5$ ve $s=1$ alınarak, aşağıda verilen şekliyle kaya malzemesi için de kullanılabilir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_B ((m_b \times \sigma'_3 / \sigma_B) + 1)^{0.5}$$

Maden, jeoloji ve inşaat mühendisliği uygulamalarında yerüstü ve yer altı kazıları için kaya kütlelerinden uygun ölçekte hazırlanmış örnekler üzerinde üç eksenli sıkışma deneylerinin yapılması pratik olarak mümkün değildir. Bu güçlüğü bir ölçüde aşılabilmesi amacıyla, kaya bloklarından veya elemanlarından oluşan küçük ölçekli modellerle ilgili çalışmalardan yararlı bilgiler elde edilmişse de, bu çalışmalar sırasında yapılan bazı varsayımlar ve basitleştirmeler nedeniyle sınırlamalarla karşılaşmıştır. Dolayısıyla, eklemli kaya kütlelerinin dayanımının tayininde kullanılacak kütle sabitlerinin doğrudan deneylerle veya model çalışmalarıyla belirlenmesi mümkün olamamıştır. Bu açıdan, malzeme sabitleri m_b , s ve a 'nın belirlenmesi için herhangi bir yöntemle veri elde edilmediği takdirde, yukarıdaki eşitliklerin anlamı kalmamaktadır. Söz konusu sabitlerin kaya kütlesi sınıf puanı RMR'a bağlı olarak belirlenmesi amacıyla Hoek ve Brown (1988) tarafından ölçüte dahil edilen; (örselenmiş kaya kütlesi için)

$$m/m_i = \exp((RMR-100) / 14)$$

$$s = \exp((RMR-100) / 6)$$

(örselenmemiş kaya kütlesi için)

$$m/m_i = \exp((RMR-100) / 28)$$

$$s = \exp((RMR-100) / 9)$$

eşitliklerin, $RMR > 25$ olan kaya kütleleri için geçerli olmasına karşın, 25'ten küçük RMR puanına sahip çok zayıf kaya kütleleri için bu bağıntılardan sonuca gidilememektedir. Bu sorunun giderilebilmesi amacıyla, Hoek vd. (1995) tarafından önerilen ve Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index, GSI) adı verilen yeni bir kavram, 1995 yılında RMR'ın yerine ölçüte dahil edilerek kaya kütlesi sabitlerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlamıştır. Bu indeksin kısaltılmış haliyle

GSI şeklinde verilen simgesi, uluslararası kullanımı dikkate alınarak Türkçeleştirilmemiş ve bu çalışmada aynı simge kullanılmıştır. Başlangıçta, RMR ve Q sınıflaması puanlarıyla ilişkilendirilen GSI, daha sonraki yıllarda yapılan değişikliklerle tek başına bir sınıflama sistemi olarak ölçütteki yerini korumuştur. GSI, 85'den (kaya malzemeleri), 10'a (çok düşük kaliteli kaya kütleleri) kadar değişen değerler almaktadır.

Hoek vd. (1995), önerdikleri son değişikliklerde m_b , s ve a parametrelerinin belirlenmesi için, kaya kütlelerinde meydana gelebilecek örselenme durumuyla ilgili herhangi bir açıklamaya gerek olmaksızın ve ölçütün 1988 versiyonundakikate alınan iki örselenme koşulundan sadece örselenmemiş kaya kütleleri koşulunu gözeterek, kaya sabitleri ile GSI arasında aşağıdaki ilişkileri önermişlerdir.

$$m_b/m_i = \exp((GSI-100) / 28)$$

(GSI>25 ve örselenmemiş kaya kütleleri için, $a=0,5$)

$$s = \exp((GSI-100) / 9)$$

(GSI<25 ve örselenmemiş kaya kütleleri için, $s=0$)

$$a = 0,65 - (GSI / 200)$$

2.3.6.b. GSI'nin RMR ve Q Kaya Kütleli Sınıflama Sistemleriyle İlişkisi

Görgül yenilme ölçütünü geliştiren Hoek ve Brown, ölçütün gelişim süreci içinde m ve s kaya kütleli sabitlerini arazi gözlemleri ve ölçümleriyle ilişkilendirerek belirleme çabası içinde olmuşlardır. Bu araştırmacılar, kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyonunu denetleyen özelliklerin Bieniawski (1973-1989) ve Barton vd.(1974) tarafından geliştirilen kaya kütleli sınıflama sistemlerinin esas aldığı özelliklerle olan benzerliklerini gözönünde bulundurarak, bu sınıflama sistemlerinin yenilme ölçütünün malzeme sabitleri m ve s 'in belirlenmesi amacıyla kullanılabileceğini düşünmüşleridir. Bu düşüncelerini yenilme ölçütüne yansıtmakla birlikte, araştırmacılar söz konusu

sınıflama sistemlerinin ölçüt tarafından kullanılmasıyla ilgili bazı sorunların ortaya çıkabileceğini de farketmişlerdir.

GSI'nin tayini için RMR'ın 1976 versiyonunun kullanılması halinde, kaya kütlesi tamamen kuru varsayılarak, yeraltısuyu koşulu için 10 puan ve süreksizlik yönelim koşulu için ise "çok uygun" tanımlaması seçilmekte ve 0 puan verilmektedir. Bu varsayımlara göre RMR₇₆'dan elde edilecek en düşük puan 18 olmaktadır. Buna göre RMR₇₆>18 olması koşuluyla,

$$GSI = RMR_{76}$$

Alınabilir. RMR sisteminin 1976 versiyonuna göre 18'den küçük değerler (RMR₇₆<18) elde edilememesinden dolayı, daha düşük kaliteli kaya kütleleri için GSI'nin tahmininde RMR sistemi yerine Q sisteminin kullanılması önerilmiştir. (Hoek vd., 1995; Hoek 1995a).

GSI'nin, Baron vd. (1974) tarafından önerilen ve daha sonra Grimstad ve Barton (1993) tarafından sadece tünel destek seçim kılavuzu modifiye edilen Q sisteminden belirlenmesi halinde; RQD, eklem set sayısı (J_n), eklem pürüzlülük sayısı (J_r) ve eklem alterasyon sayısı (J_a) parametreleri dikkate alınmaktadır. Q sisteminin diğer iki parametresi olan su azaltma faktörü (J_w) için kuru kaya kütlesi ve gerilme düzeltme faktörü (SRF) için ise orta derecede gerilme koşulları varsayılarak, bu parametrelere 1 puan verilir. Gerilme koşulları ile su basıncının, Hoek-Brown ölçütünden yararlanılarak yapılan analitik ve sayısal çözümlerinde de dikkate alınması nedeniyle, bunların bir de sınıflamaya katılarak ikinci kez kullanılmasının önlemek amacıyla bu yaklaşıma gidilmektedir. Bu nedenle, GSI'nin tahmini amacıyla Q sisteminin klasik ifadesi aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

$$Q' = (RQD / J_n) \times (J_r / J_a)$$

Modifiye edilmiş Q değeri (Q'), GSI'nin tahmini için aşağıdaki eşitlikle kullanılır (Hoek vd., 1995).

$$GSI = 9 \log_e Q' + 44$$

En küçük Q' değeri 0,0208 olup, bu değerden yaklaşık 9 gibi bir GSI hesaplanır.







2.3.6.c. Hoek & Brown Görgül Yenilme Ölçütü ve GSI'nin Son Durumu

Görgül yenilme ölçütünün GSI'ni bir sınıflama olarak kabul ettiği 1997 versiyonunda, patlatmayla veya makinayla kazı yapılması sırasında kaya kütlelerinde meydana gelebilecek örselenmenin etkisi dikkate alınmamış, kaya kütle sabitlerinin hesaplanmasında kullanılan ve GSI'ni de içeren eşitlikler için, ölçütün 1995'teki versiyonunda olduğu gibi sadece "örselenmemiş kaya kütle" koşulu geçerli kabul edilmiştir. Bununla birlikte Hoek ve Brown (1997) patlatmaya bağlı olarak kaya kütlelerinde gerçekleşecek örselenmenin, kaya kütlelerinin örselenmeden önceki GSI puanını ortalama 10 civarında düşüreceğini belirtmişler ve bu etkinin dikkate alınması için Şekil 2.9'daki grafiklerden belirlenen GSI değerinin aynı kolonda bir satır yukarı çıkılarak tekrar saptanmasını önermişlerdir. Örneğin; kötü bir patlatma uygulamasında ayrılmış bir kaya kütle yüzeyi, görünüm itibarı ile Şekil 2.9'daki "bloklu / örselenmiş" şeklinde tanımlanan bir kaya kütle iken, aslında ayrılmamış ve örselenmemiş halde "çok bloklu" olarak tanımlanacak bir kütlelerdir.

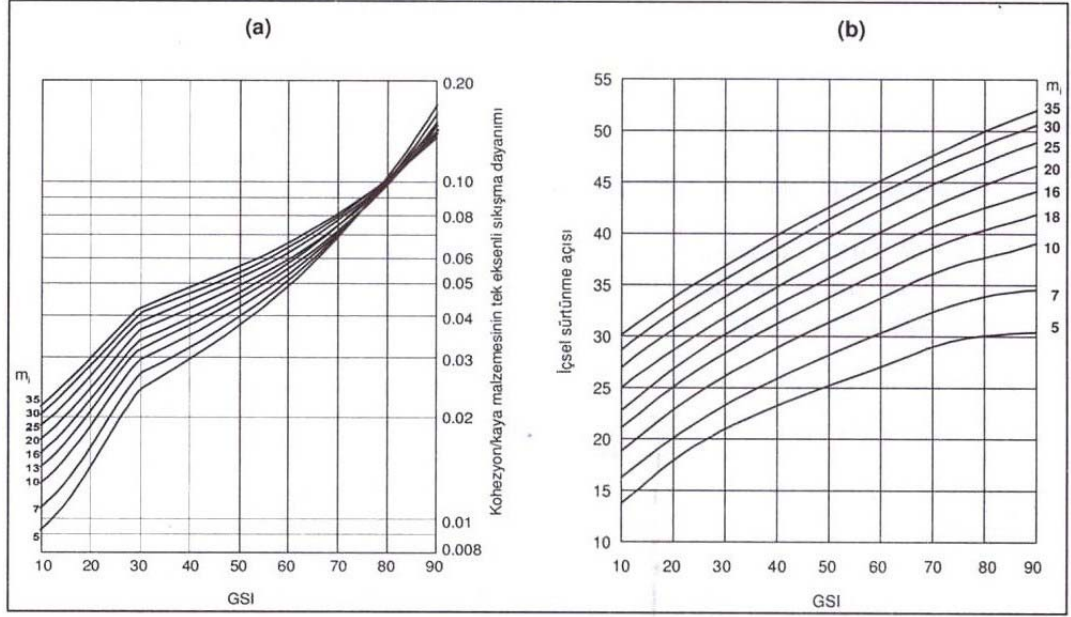
Çok sayıda mühendislik uygulamalarında kazanılan deneyimler ve geriye dönük analizler sonucunda GSI ile σ_B , m_i ve kaya kütle sabitleri arasında bazı ilişkiler geliştirilmiştir. Hoek ve Brown (1997) tarafından tanımlanan bu ilişkiler; kohezyon, içsel sürtünme açısı ve deformasyon modülünün gelirlenmesi amacıyla Şekil 2.10 ve 2.11'de grafikler halinde verilmiştir.

Yukarıda verilen eşitliklerde görüleceği üzere, GSI'deki küçük bir değişim kaya kütle sabitlerini doğrudan etkilemektedir. Bu husus gözetilerek, süreksizlik yüzey koşulunun ve kaya kütle yapısının doğru ve duyarlı bir şekilde tayini amacıyla ölçülebilen ve/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 (Sönmez ve Ulusay, 1999; Ulusay ve Sönmez, 2000).

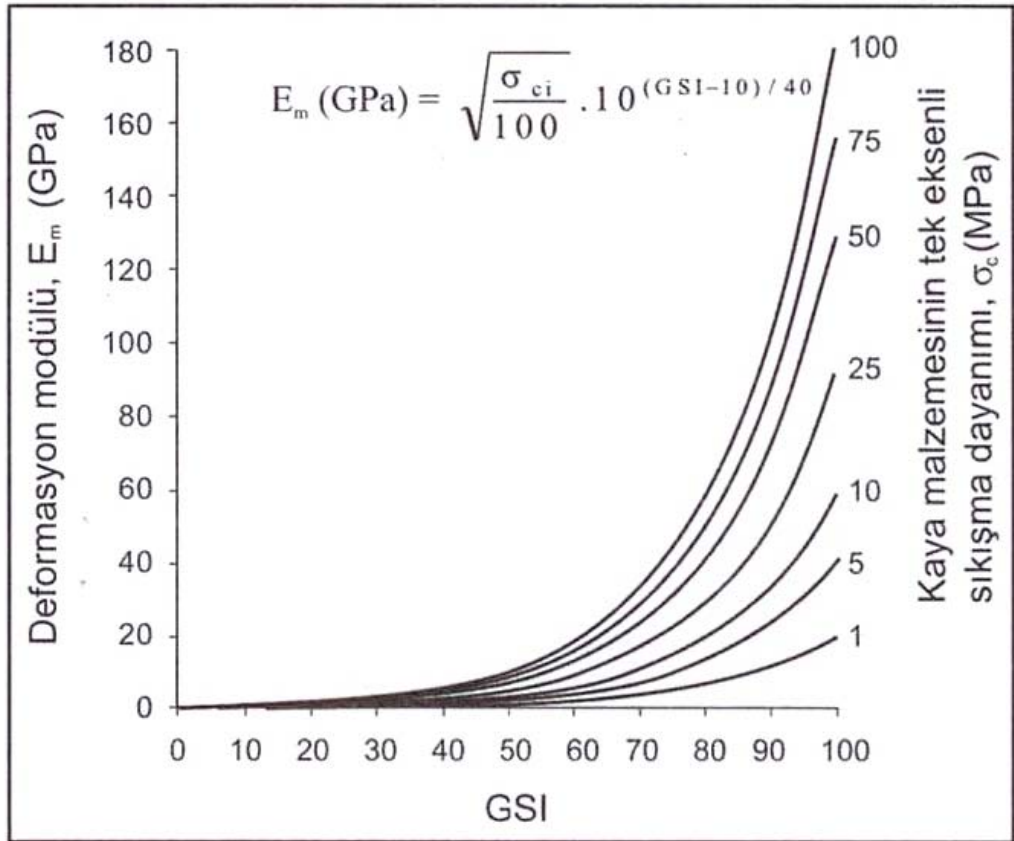
Süreksizlik yüzey koşulunun tanımlanması amacıyla RMR Sınıflama Sistemi'nin dolgu, bozunma ve pürürlülükle ilgili olarak önerdiği tanımlamalar ve Bieniawski (1989)

JEOLOJİK DAYANIM İNDEKSİ		SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULU	
Kaya kütlelerinin yapısını ve yüzey koşullarını tanımlayan harf kodları belirlenerek uygun kutu seçilir ve ortalama Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'nin değeri abaktaki konturlardan tayin edilir.		AZALAN YÜZEY KALİTESİ →	
YAPI		KAYA PARÇALARININ KENETLENME DERECEİNDE AZALMA	
	SAĞLAM VEYA MASİF - Kaya malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütlesi	90	UYGULANMAZ
	BLOKLU - 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütlesi	80	
	ÇOK BLOKLU - Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik takımlarının keşişmesiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütlesi	70	
	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ -Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütlesi	60	
	PARÇALANMIŞ -Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birlikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi	50	
	FOLİASYONLU-LAMİNALİ-MAKASLANMIŞ İnce laminalı veya foliasyonlu ve makaslanmış zayıf kayalar. Diğer süreksizlik takımlarına oranla daha egemen olan sık aralıklı sistozite yüzeyleri kayada bloklanmanın gelişmesini önlemiştir.	40	
		30	
		20	
		10	
			UYGULANMAZ

Şekil 2.9 : Sağlam ve masif kaya kütlesi ile foliasyonlu – laminalı – makaslanmış kayaları da içerecek şekilde düzenlenmiş GSI sınıflama sistemi (Hoek, 1999a).



Şekil 2.10 : GSI'nin ve m_i sabitinin farklı değerlerine bağlı olarak (a) etkin kohezyon ve (b) etkin içsel sürtünme açısının değişimi (Hoek ve Brown, 1997).



Şekil 2.11 : Farklı kaya malzemesi dayanımlarına göre kaya kütlelerinin deformasyon modülü ile GSI arasındaki ilişki (Hoek, 1998).

tarafından bu parametrelere verilen puanlar kullanılmış olup, Süreksizlik Yüzey Koşulu için 0 ile 18 arasında değişen puanlar atanmıştır. Süreksizlik Yüzey Koşulu puanı;

$$SCR = R_r + R_w + R_f$$

ifadesinden hesaplanmaktadır. Burada R_r , R_w , R_f sırasıyla; süreksizliklerin pürüzlülük, bozunma ve dolgu puanları olup Sönmez ve Ulusay (1999)'ın önerdiği ve Şekil 2.12'de verilen modifiye edilmiş GSI grafiğinin sağ üst köşesindeki çizelgeden belirlenmektedir.

Uygulanan kazı yöntemi, makaslama zonlarının varlığı ve teknik girişim sırasında gerilme alanında meydana gelen değişimler gibi yerel etkiler, kaya kütlelerinin dayanımını azaltmaktadır. Patlatma ile yapılan kazılarda doğal süreksizliklerin açıklıkları artmakta, aynı zamanda patlatma sırasında gelişen çatlaklar nedeniyle kaya kütlesi doğal durumuna oranla daha zayıf bir özellik kazanmaktadır. 1988'de yenilme ölçütüne dahil edilen, ancak 1995'te ölçütten çıkarılan örselenme etkisinin dikkate alınmasının gerekli olup olmadığının araştırılması amacıyla Ulusay ve Reşat (2007)'de dört farklı yaklaşım öngörülmüş ve örselenme faktörü (d_f) adı verilen bir katsayı önerilmiştir. Örselenme faktörü (d_f) için, incelenen her kaya kütlesinde uygulanan kazı yönteminin türü dikkate alınarak, bu tür kazı yöntemleri için ayrıntısı Tablo 2.8'de verilen ve 1 ile 0,8 arasında değişen değerler kullanılmıştır. Analizlerde dikkate alınan yaklaşımlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

1. Yaklaşım : Kaya kütlelerinin makaslama dayanımı, örselenme etkisi için herhangi bir düzeltme yapılmadan daha önce bahsi geçen aşağıdaki eşitlikler kullanılarak belirlenmiş olup, geriye dönük analizlerde de bu veriler esas alınmıştır.

$$m_b/m_i = \exp((GSI-100) / 28)$$

(GSI>25 ve örselenmemiş kaya kütlesi için, a=0,5)

$$s = \exp((GSI-100) / 9)$$

Tablo 2.8 : Patlatma (A_B) ve başlıca zayıfluk düzlemleriyle (A_w) ilgili düzeltme katsayıları (Kendorski, 1983).

(A) Patlatma Düzeltmesi (A_B)			
Koşullar / Yöntem		Uygulanabilir Terim	Düzeltilme Katsayısı A_B
1.	Makinayla kazı	Hasarsız	1,00
2.	Denetimli patlatma	Çok az hasar	0,94 – 0,97
	a. Pratik olarak patlatmada tüm deliklerin izleri görülebilir.		
	b. Gevşemiş bloklar veya açılmış süreksizlikler söz konusu değildir.		
	c. Aşırı sökülme: Genellikle 15 cm'den az, en derin olarak 30 cm'den azdır.		
	d. Eklemler arasında yeni kırıklar yok veya çok azdır.		
3.	İyi klasik patlatma	Orta derecede hasar	0,90 – 0,94
	a. Bazı patlatma deliklerinin izleri görülebilir.		
	b. Az sayıda gevşek bloklar söz konusu olabilir ve bazı eklemler açılabilir.		
	c. Aşırı sökülme: Yaygın olarak 30 cm, yerel olarak 30 cm'yi aşabilir.		
	d. Sağlam kaya bloklarında ve eklemler arasında kılıcık çatlaklar gelişebilir.		
4.	Kötü klasik patlatma	Şiddetli hasar	0,90 (en iyi) 0,80 (en kötü)
	a. Patlatma deliklerinden sadece birkaçı gözlenir.		
	b. Açıklığın tavanında çok sayıda gevşemiş blok gözlenir. Çok sayıda eklem açılmış ve bloklar düşebilecek hale gelmiştir.		
	c. Aşırı sökülme: Genellikle 30'den büyük, yerel olarak 1 m veya daha fazladır.		
	d. Patlatmayla ilgili herhangi bir bilgi yok.	Orta derece hasar	0,90 (göreceli)
(B) Başlıca Zayıflık Düzlemleriyle İlgili Düzeltme (A_w)			
Koşul			Düzeltilme Katsayısı A_w
1.	Zayıflık düzelmi yok		1,00
2.	Set dayklar		0,90
3.	Yumuşak cevher zonları		0,85
4.	Ana kaya/cevher dokanak zonları veya homojen olmayan tavan katsayısı		0,80
5.	Kıvrımlar (senklinal ve antiklinaller)		0,75
6.	Münferit fay zonları		0,70

2. Yaklaşım : Kazı yöntemine bağlı olarak, 1'den küçük bir değer alan örselme faktörü (d_f) GSI değeri ile çarpılarak GSI azaltılmış (indirgenmiş) ve bu GSI değeri yukarıdaki eşitliklerde kullanılarak geriye dönük analizler gerçekleştirilmiştir.

$$m_b = m_i \times \exp(((GSI \times d_f) - 100) / 28)$$

(GSI>25 ve örselenmemiş kaya kütlesi için, $a=0,5$)

$$s = \exp(((GSI \times d_f) - 100) / 9)$$

$$a = 0,65 - ((GSI \times d_f) / 200)$$

3. Yaklaşım : İncelenen her şev duraysızlığında kaya kütlesindeki örselenmenin türü dikkate alınarak, seçilen örselme faktörlerinin 1. Yaklaşımındaki eşitliklerin paydalarıyla çarpımından hesaplanan kaya kütlesi sabitleri (m_b ve s) geriye dönük analizlerde kullanılmıştır.

$$m_b = m_i \times \exp((GSI - 100) / (28 \times d_f))$$

$$s = \exp((GSI - 100) / (9 \times d_f))$$

4. Yaklaşım : Ölçütün 1995 versiyonuna kadar kaya kütlesi sabitlerinin (m_b ve s) hesaplamalarında 1. Yaklaşımındaki eşitliklerin paydalarında örselenmemiş ve örselenmiş kaya kütlesi koşullarına göre sırasıyla m_b için 28 ve 14, s için ise 9 ve 6 değerleri kullanılmakta idi. Bununla birlikte, bu üst ve alt sınır değerleri arasında kalan ve farklı örselenme derecelerini de yansıtan azaltma faktörlerinin kullanılmasının daha gerçekçi olacağı dikkate alınarak, bu eşitliklerin paydalarının yukarıda verilen alt ve üst sınır değerlerinin arasında değişmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu amaçla, her iki eşitliğin de paydasına b_m ve b_s gibi iki katsayı eklenerek eşitlikler aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir.

$$m_b = m_i \times \exp((GSI - 100) / b_m) \quad (b_m = 14-28)$$

$$s = \exp((GSI - 100) / b_s) \quad (b_s = 6-9)$$

2.3.6.d. Modifiye Edilmiş Kantitatif GSI Abağı

Yukarıda bahsi geçen Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından önerilen sayısal GSI abağına (Şekil 2.12) Hoek (1990) tarafından eklenen “sağlam ve masif kaya” sınıfı dikkate alınarak modifiye edilmiştir (Şekil 2.9) (Sönmez ve Ulusay, 2002). Hoek-Brown yenilme ölçütü en az üç eklem takımına sahip, homojen ve izotrop kaya kütleleri ile kaya malzemelerinin dayanımlarının belirlenmesi amacıyla önerilmiştir. Laminalı – foliasyonlu kaya kütlelerinde dayanım yönserliliğinin daha da önem kazanması, ölçütün bu tür kaya kütlelerinde uygulanmasına olanak sağlamamaktadır. Bu nedenle, Sönmez ve Ulusay (2002) sayısal GSI abağıyla ilgili değişiklikleri yaparken laminasyonlu-foliasyonlu kaya kütlelerini dikkate almamışlardır. Ayrıca sayısal GSI abağında yer alan J_v -SR ilişkisi (Şekil 2.9), “sağlam veya masif” kaya grubunu da içerecek şekilde ISRM (1982) tarafından $J_v < 1$ eklem/m³ olan kaya kütleleri için yapılan “çok geniş bloklar” tanımını da dikkate alarak yeniden düzenlenmiştir. Sayısal GSI sisteminin bu son şekli Şekil 2.12’de verilmiştir.

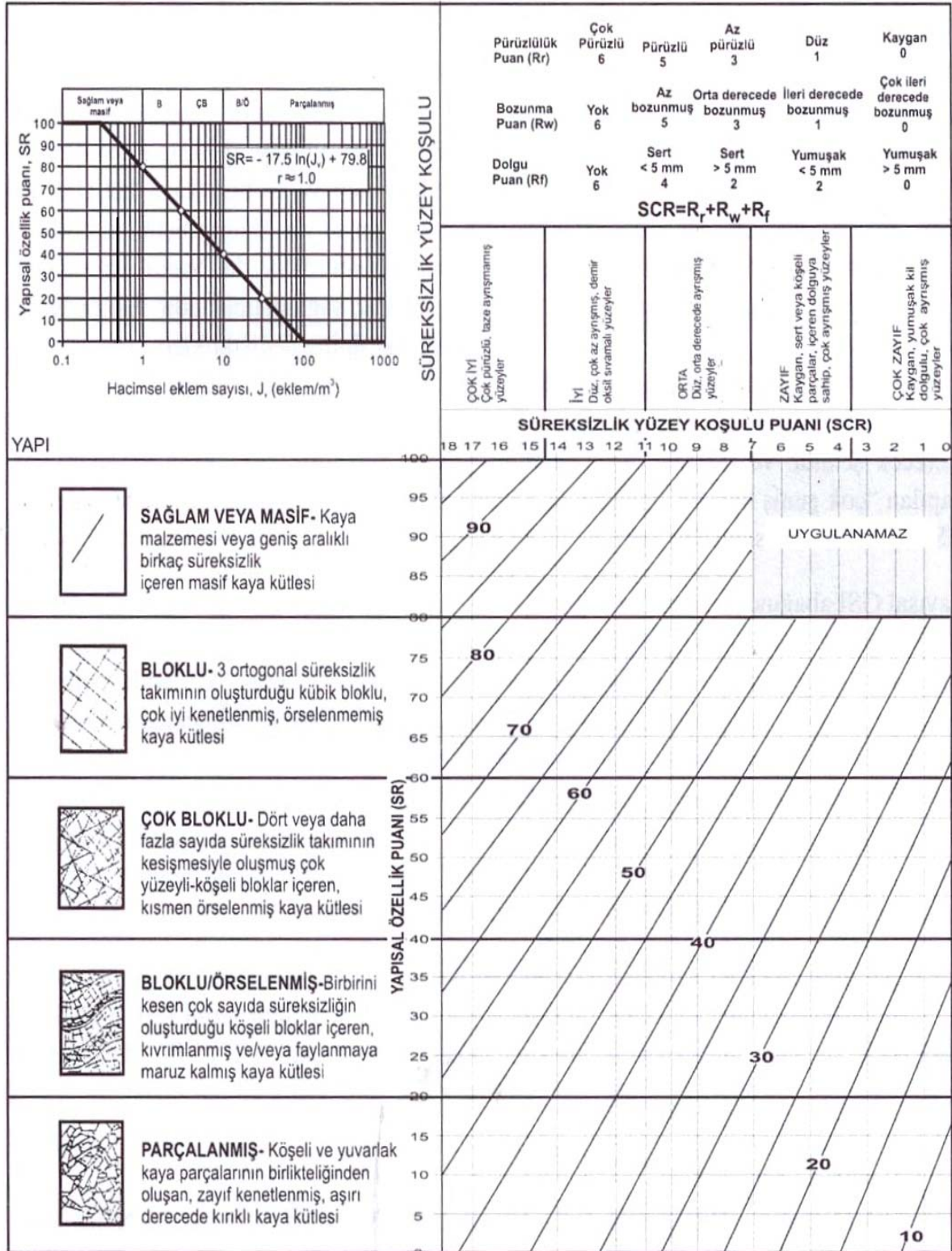
Sayısal GSI abağında kullanılan J_v parametresinin belirlenmesi için Sönmez ve Ulusay (2002) yeni önerilerde bulunmuşlardır. Daha önce bilinen ilişkilerden oldukça yüksek J_v değerleri elde etmişlerdir. Bir kaya bloğunda aynı süreksizlik setine ait iki süreksizlik, çoğu kez bloğun karşılıklı iki yüzünde gözlenir. Birbirine yaklaşık dik konumlu üç eklem setini içeren kaya kütlelerinde, 6 yüzeyli prizmatik bloklar gelişecektir (Şekil 2.13). Bu düşünceden hareketle ve pratik bir yaklaşımla bir kaya kütlelerinde süreksizlik takımı sayısı;

$$D_n = N/2$$

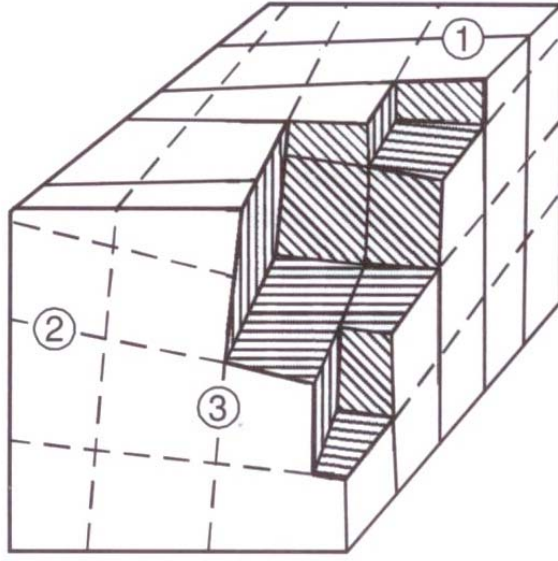
ifadesinden tahmin edilebilir. Burada; D_n tahmini süreksizlik seti sayısı, N ise kaya bloğunun yüzey sayısıdır. Sık eklemli kaya kütlelerinin J_v parametresi; kaya kütlelerinin homojen ve izotrop olduğu kabul edilerek ve ortalama süreksizlik aralığı (S) esas alınarak;

$$J_v = D_n \times (1/S)$$

şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2.12 : Sönmez ve Ulusay (1999)'ın önerdiği niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı'nın "Sağlam ve Masif" kaya grubunda eklendikten sonraki hali (Sönmez ve Ulusay, 2002)



Şekil 2.13 : Yaklaşık olarak birbirlerine dik konumlu 3 eklem takımını içeren bir kaya kütleğinde gelişen altı yüzeyli prizmatik bloklar (ISRM, 1981'den düzenlenmiştir).

“a” ve “s” sabitlerinin hesaplanmasında Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen $GSI=25$ eşik değeri ölçütün son veriyonunda kaldırılarak, GSI 'nin tüm değerleri için sürekli bir form haline getirilmiş olan aşağıdaki yeni eşitlikler önerilmiştir;

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

$$b = \exp((GSI-100)/(9-3D))$$

Ölçütü geliştirenler tarafından daha önce dikkate alınmayan örselenme faktörü, ölçütün son versiyonuna dahil edilmiş ve yukarıdaki eşitlikte “D” simgesiyle gösterilmiştir. “D”, patlatma hasarı ve kazı sırasında gelişen gerilme boşalmasına maruz kalan kaya kütlelerinin örselenme derecesine bağlı bir faktördür. “D” faktörü, örselenme koşulu içindaha önce Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından önerilen b_m ve b_s parametreleriyle benzerlik taşımaktadır. Bu faktör, örselenmemiş kaya kütleleri için “0” dan örselenmiş kaya kütleleri için “1” e kadar değişen değerler almakta olup, “D” nin seçimi için önerilmiş kılavuz çizelgesi Tablo 2.9’da verilmiştir.

$$m_b = m_i \times \exp((GSI - 100) / (28 - 14D))$$

Tablo 2.9 : Örselenme faktörü D'nin tahmini için kılavuz (Hoek vd., 2002).

Kaya Kütleli Tanımı	Önerilen "D" Değeri
Yüksek kaliteli denetimli patlatma veya tünel açma makinasıyla yapılan kazı tüneline 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 bir taban betonu dökülmediğinde 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 hasralara neden olur.	D=0,8
İnşaat mühendisliğiyle ilgili şev kazılarında küçük ölçekli patlatma kaya kütlelerinde orta derecede hasara neden olur.	D=0,7 İyi patlatma D=1,0 Kötü (zayıf) patlatma
Çok uzun açık işletme şevleri, üretim amaçlı aşırı patlatmadan ve örtü kazısı nedeniyle oluşan gerilme azalımından dolayı önemli düzeyde örselenmeye maruz kalırlar. Daha yumuşak bazı kayalarda kazı işlemi ripperleme ve dozer ile yapılabilir ve bu durumda şevin maruz kalacağı örselenmenin derecesi daha düşük olur.	D=1,0 Üretim patlatması D=0,7 Mekanik kazı

2.4. DELME & PATLATMA OPERASYONLARI

Delme – patlayma denildiğinde ilk akla gelen madencilik faaliyetleridir. Ancak günümüzde delme-patlatma operasyonları madencilik dışında bir çok alanda yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bu uygulama alanlarına kısaca göz atarsak (Salgır, 1993; Ceylanoglu vd., 1993) ;

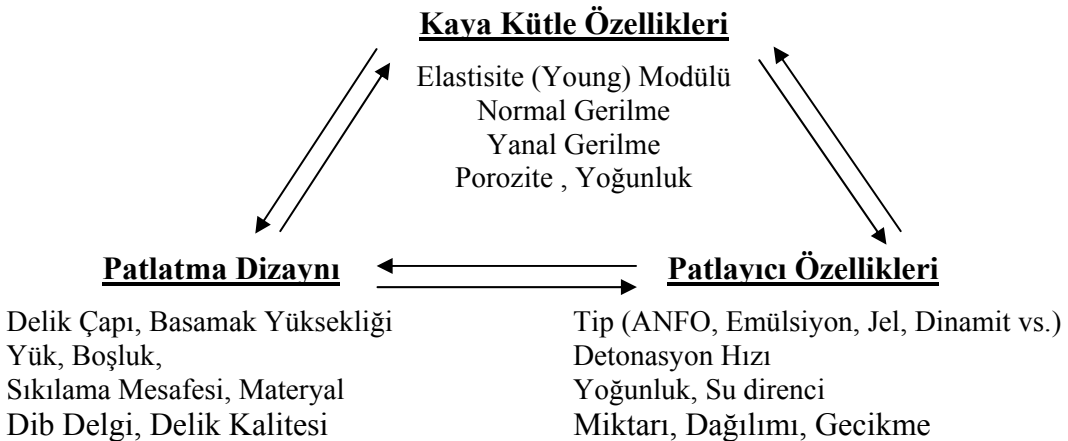
- Madencilik alanı : Maden arama faaliyetleri, açık ve yer altı maden işletmeciliği, kırmataş (agrega), kuyu ve galeri açma, jeofizik araştırmalar, sismik patlatmalar vs.
- İnşaat alanı : Özellikle son yıllarda ulaşım amaçlı tüneller, barajlar, karayolları, boru hatları, temel kazılarının yanı sıra bina veya yapıların kontrollü yıkılması vs.
- Petrol alanı : Sismik araştırmalar, rezervuarların genişletilmesi, boru hatlarının yerleştirileceği kanalların açılması vs.
- Enerji alanı : Yaraltı güç santralleri, yer altı petrol ve doğalgaz depoları, yer altı nükleer atık ve basınçlı hava depolarının inşası vs.

- Tarım ve ormancılık alanı : Su kuyusu açma, sulama ve drenaj amaçlı kanal açma, ağaç köklerinin sökülmesi vs.
- Askeri alan : Çeşitli tahrip ve imha faaliyetleri, mevzi hazırlama, yer altı sığınakları vs.
- Diğer alanlar : Su altı atımları, buz ve buz altı çalışmaları vs.

Madencilik faaliyetleri kapsamında yürütülen delme-patlatma operasyonları gerek maliyetler gerekse iş güvenliği yönünden oldukça önem arzeden bir süreci kapsar. Dopal olarak belirli kayaç dayanımlarına kadar kazı faaliyetleri doğrudan ya da ripperleme ile yapılabildiği halde pek çok kayaç kazısında delme ve patlatma zaruri olarak ortaya çıkmakta ve bu haliyle işletme faaliyetlerine yönelik üretim sürecinin ilk işlemini oluşturmaktadır. Bu kapsamda delme-patlatmanın işletme çıktıları öncelikle açık işletmelerde olmak üzere madencilik faaliyetlerinde birbirini takip eden, patlatma, kazı, yükleme, nakliye, kırma-eleme işlemlerinin tümünü etkilemektedir. Bu nedenle bir maden işletmesinin verimliliği, delme – patlatma operasyonlarının verimliliği ve iş güvenliği açısından başarılı olarak yürütülmesi ile doğru orantılıdır. Teknik, ekonomik ve emniyetli bir delme – patlatma operasyonunda başlıca dört parametre grubu etkili olmaktadır ;

- Kaya kütle özellikleri (fiziksel, dokusal, jeomekanik, yapısal vs. özellikler),
- Kullanılan delicinin tipi ve kaya ortamına uygunluğu,
- Kullanılan patlayıcıların tipi, özellikleri ve miktarı (özellikler, şarj),
- Patlatma geometrisi (paterni) ve hatasız uygulama.

Patlatma operasyonu döngüsel olarak aşağıdaki parametrelerin kontrolü altında gerçekleşmektedir.



Bu temel parametre gruplarından kaya kütle özellikleri dışındaki tüm gruplara müdahale edilebilir ve değiştirilebilir. Bu nedenle bu çalışmada değiştirilme özelliği olmayan kaya kütle özellikleri dikkate alınarak diğer değiştirilebilir parametrelerin etkilenimleri üzerinde durulmuştur. Özellikle kaya kütlelerinin jeomekanik özelliklerinden yoğunluk ve dayanım kriterlerinin delme-patlatma operasyonu üzerindeki etkileri araştırılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda bundan sonraki bölümlerde, agrega üretiminde oldukça yaygın olarak karşımıza çıkan bir kumtaşı ve bir kalker açık işletmesinden alınan bazı patlatma verileri, GSI kaya sınıflaması ile beraber değerlendirilecektir. Bunun için ise delme ve patlatma operasyonlarına dair genel bilgiler aşağıda sunulmuştur.

2.4.1. Delme Operasyonları

Açık ocak işletmeciliğinde patlatma operasyonunun hazırlık aşaması, aynı zamanda da bir parçası olan delme işleri günümüzde genellikle rotary yöntemle çalışan delici makinalar ile yapılmaktadır. Bu nedenle delici ve ekipmanların seçimi oldukça önemlidir. Kaya kütle özelliklerine ve istenilen üretim miktarına göre hangi tür makinadan kaç adet çalıştırılması gerektiğine karar verilmelidir. Delici makina fiyatlarının genel yatırım giderleri arasında azımsanmayacak bir yer tutması ve bu delici makinaların amortisman giderlerinin minimize edilmesi için verimli çalıştırılmaları işletme giderlerinin üzerinde doğrudan etkilidir.

Özellikle düzgün basamak sistemi ile üretim yapılan açık işletmelerde basamak tasarımı kullanılan delicinin özelliklerine göre değişebilmektedir. Örneğin kısa basamak yüksekliği ile çalışmaya elverişli bir açıkişletmede delme operasyonundan sağlanan avantajları ;

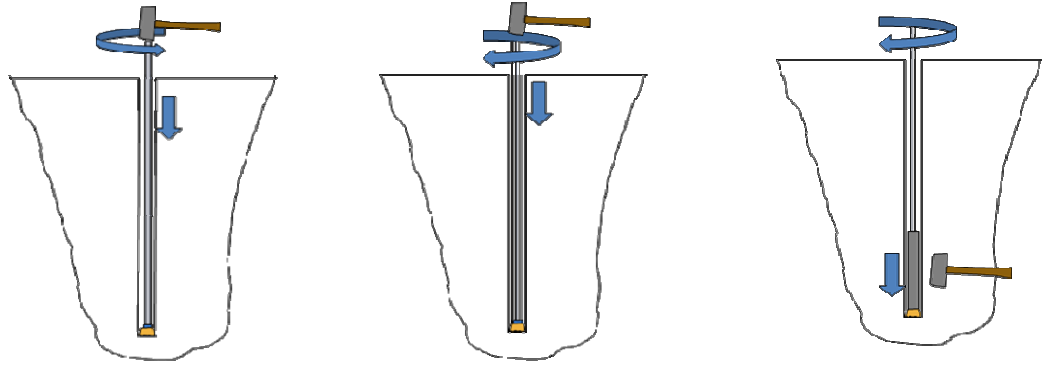
- Delik sapmasında minimizasyon
- Bit üzerinde yüksek kontrol gücü
- Tijler üzerinde düşük eğilme gerilmesi
- Tijlerin daha az yorulması
- Delik dibinde kesme ile oluşan kırıntıların temizlemesi için daha az hava ihtiyacı,
- Uzun bit ömrü olarak sayılabilir.

Delme verimliliğini etkileyen faktörleri kısaca şu şekilde özetleyebiliriz;

- Delik yerleri tasarıma uygun şekilde arazide applike edilmeli,
- Uygun delik çapı seçilmeli (açık ocak işletmelerinde 89 – 102 mm)
- Delikler delik yükü ile paralel olmalı,
- Dip delgi yapılmalı ve deliklerin alt kotu aynı olmalı,
- Delik sapması omaması için merkezleme işlemine özen gösterilmeli,
- Delici operatörü delme işlemi sırasında ortamı (kaya kütleindeki kırık, çatlak, formasyon değişimi vs.) sürekli takip etmeli,

Açık işletmelerde kullanılan başlıca daberli delici ekipmanlarını üçe ayırmak mümkündür (Şekil 2.14).

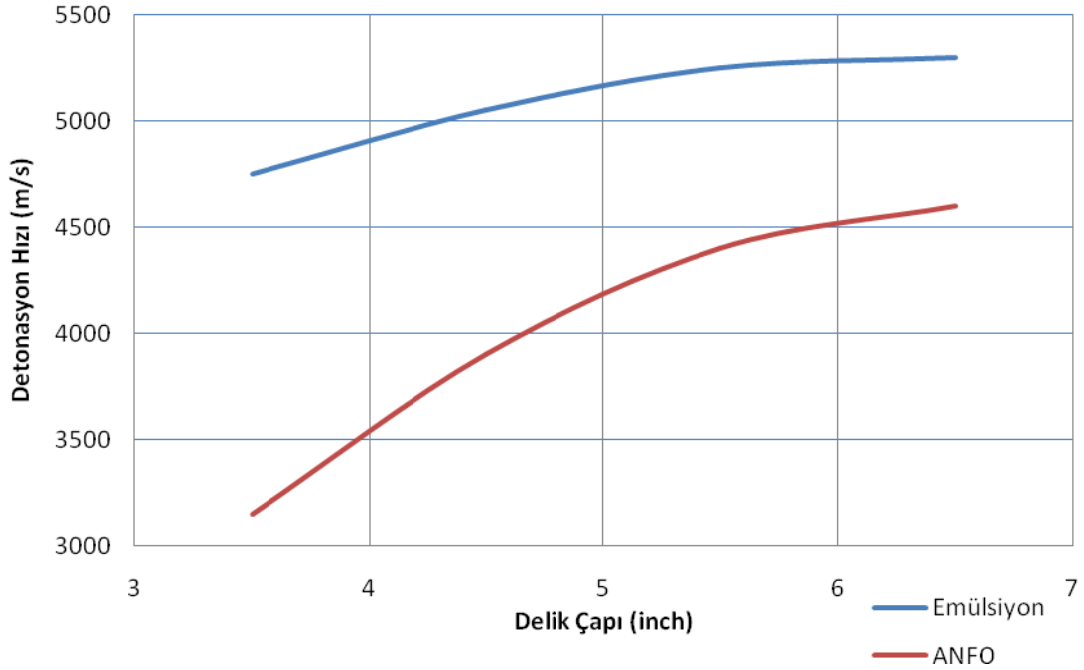
1. Hidrolik üstten darbeli (top hammer) tip deliciler; Delici takım üzerinde konumlandırılmış ve delme takımının üstünden darbe uygulayarak delme işlemini yapar. Delici pistonun darbe enerjisi delici kısmına şok dalgaları olarak iletilir. Kaya kütle özellikleri bakımından GSI sınıflamasında iyi-çok iyi yüzey koşullarına sahip ve GSI>70 olan ortamlarda kullanılması verimlidir. Pnömatik delicilerin en büyük avantajı, basit, sağlam ve güvenilir oluşudur. Basitliklerden daha düşük ilk yatırım fiyatları da kastedilmektedir. Büyük bir kompresör dahil, delici sistem gözönüne alındığında, verimliliğe oranla fiyat oldukça yüksektir. Daha düşük verimliliğe ek olarak, daha fazla sarf malzeme, yüksek enerji gereksinimi, daha zor delme kontrolü ve mekanizasyon, bu sistemin dezavantajları olarak sayılabilir
2. Hidrolik üstten darbeli ikili tüplü tip deliciler; Bu tip delicilerde çekiç yine delici takım üzerinde konumlandırılır, ancak enerjisini hatveleri olmayan darbe tijleri ile aktarır ve bu tijlerde hatveli delici tijleri içerisine yerleştirildiğinden dönmeyi sağlayan tijler çekiç darbe etkisinden etkilenmezler. Bu sistemle rotasyon işini yapan tijler daha verimli çalışacağından delme hızı yüksek olmaktadır. Kaya kütle özelliği açısından çok bloklu/ örselenmiş ve karstik boşluk içeren ortamlarda idealdir.
3. Delik için çekiçli tip deliciler; Son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılan bu tip delicilerde bit ile çekiç deliğin dibinde doğrudan temastadır. Çekicinin bit kısmına olan yakınlığı dengeli bir darbe etkisi sağlayarak kılavuzluk yapmış olur ve delik sapmasını minimize eder. Özellikle derin delme işlemlerinde ve GSI<70 olan kaya ortamlarında diğer tiplere göre daha verimlidir.



Şekil 2.14 : Farklı tipteki delici ekipmanların darbe uygulama yerleri.

Delici bit seçiminde basit olarak; aşındırıcılığı yüksek (abrasif) – sert kaya ortamlarında yuvarlak uçlu bitler kullanılırken, daha yumuşak – orta derecede abrasif kayalarda sivri uçlu bitler kullanılmalıdır.

Delme – patlatma operasyonlarında belirlenen delik çapı kullanılan patlayıcının türüne göre detonasyon hızını etkileyen bir faktördür (Grafik 2.1). Bu nedenle uygun tasarıma uygun delik çapı seçimi oldukça önemlidir. ANFO kullanılacak bir patlatmada delik çapı küçüldükçe detonasyon hızı emülsiyon patlayıcılara göre daha fazla etkilenmektedir.



Grafik 2.1. Delik çapının detonasyon hızına etkisini gösterir grafik (Lafarge, 2008).

2.4.2. Patlatma Operasyonları

Patlatma kısaca, kolay kazılabilir olmayan kaya kütlelerini patlayıcı kullanarak kontrollü bir biçimde ana kaya kütesinden ayırma prensibine dayanan bir kazı yöntemidir. Bir patlatmanın amacı, minimum delme, patlatma ve yükleme maliyeti ile güvenli bir şekilde, istenilen şartlarda maksimum malzemenin elde edilmesidir (Orica, 2002).

Çalışmanın bu kısmında, patlatma operasyonlarının başlıca girdisi olan patlayıcıların tarihsel gelişimi, patlayıcı maddelerin özellikleri ve tipleri, ateşleme sistemleri ile patlatma teorisi ve üzerinde durulacaktır.

2.4.2.a. Patlayıcı Maddelerin Tarihsel Gelişimi

Günümüzde oldukça gelişmişliğe sahip patlayıcı maddeler ilk olarak 600 yıl önce kullanılmaya başlanmıştır. Patlayıcı madde endüstrisi 13. Yüzyıl civarında karabarutun icadı ve geliştirilmesiyle başlar. Karabarutun hazırlanmasını ilk olarak Roger Bacon (1214-1292) tanımlamıştır, fakat geliştirilmesi Berthold Schwartz (13.yy)'ın tüfeği icadı ile olmuştur. Karabarut kaya patlatma işleminde ilk defa 1627'de Macaristan'da kullanılmıştır (Kahraman, 1997).

Avrupa'da 17. yüzyılın başlarında karabarutun bulunmasıyla kaya gevşetme olayında yakma işlemi yerine patlatma işlemi kullanılmaya başlandı. Karabarut bulunmadan önce kaya gevşetme olayında kullanılan yakma işleminde kaya yüzeyi odunla yakılarak ısıtılıyor, bu ısıtılan kaya yüzeyine su dökülerek kaya yavaş yavaş kırılıyordu. William Bickford'un 1831 yılında Emniyetli Fital'i bulmasıyla karabarutun yemleme işleminin emniyet ve güvenilirliği arttı. Piyasada daha güçlü patlayıcılara talebin artmasıyla, 1846 yılında Ascanio Sobrero Nitrogliserini keşfetti. 1864 yılında Alfred Nobel ilk Nitrogliserin üreten fabrikayı kurdu, ancak Nitrogliserinin tek başına kullanımı çok riskli olduğundan 1867 yılında kapsülü keşfetti. Kapsüller Nitrogliserinin yemlenmesinde emniyetli fitil ile birlikte kullanıldı ve Nitrogliserin üretimi dünyada yaygınlaştı. 1866 yılında Alfred Nobel, Nitrogliserin'i absorbe etmek ve şoka karşı hassasiyetini azaltmak adına Kieselguhr'u keşfetti; ve sonrasında da karabaruttan 20 kere daha güçlü olan dinamit keşfedildi. 1875 yılında Alfred Nobel Nitroselülozu Nitrogliserine çözdürdü, ve böylece blasting gelatine'leri (patlatma jelatinleri) buldu. 1920 yılında Nitrogliserin

dinamite eklenerek, dinamitin donma noktası düşürüldü. Dinamitin keşfedilmesi ile birlikte, dinamiti ateşlemek için yeni metodlar araştırıldı. 1922 yılında ilk elektrikli gecikmeli kapsüller pratik kullanıma sunuldu. Yüksek patlatma hızından dolayı karabaruta göre çok daha fazla verimli olan dinamit, amonyumnitrat bileşimlerinin yaygın olarak kullanılmaya başladığı 1950'li yıllara kadar oldukça fazla miktarda tüketilmiştir.

Patlayıcı üretiminde amonyumnitrat (AN) ilk defa 1867'de İsveç'te kullanılmıştır. 1950'li yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlayan AN bileşimleri çok ekonomik olmalarına rağmen suya dayanıksız idi. Suya dayanımlarını artırma çalışmaları sınırlı kalmış ve çare olarak watergel ya da slurry patlayıcılar geliştirilmiştir. Bunların başlıca avantajları yüksek su direnci ve yüksek şarj yoğunluğunun getirdiği iyi performans ile düşük duyarlılığa bağlı olarak daha emniyetli olmalarıdır. Bileşim elemanlarının yeteri kadar ince yapılmasının patlayıcı verimini önemli derece artırdığının anlaşılmasıyla emülsiyon türü patlayıcılar geliştirilmiştir (Knowles, 1989; Anon, 1987)

2.4.2.b. Patlayıcı Maddelerin Tanım ve Özellikleri

Patlayıcı maddeler ısı, darbe ve ya sürtünme sonucu çevreden herhangi bir elemanın kimyasal etkisi olmaksızın çok hızlı bir biçimde reaksiyona giren, genellikle gaz ürünler veren organik veya inorganik bileşimler / karışımlardır. Reaksiyon sonucu 4500 °C civarında bir ısı ve 250.000 bar'a kadar ulaşan gaz çıkış olur. Bu yüksek basınçlı gaz parçalama, kesme ve çatlamaya sebep olmaktadır (Erkoç, 1990; Naapuri, 1990, Anon, 1987).

Çözünme reaksiyon hızları patlayıcı maddelerin türünü tayin eder. Reaksiyon hızı sesaltı (subsonik) olursa patlayıcı maddeler, sesüstü (süpersonik) olursa patlayıcı maddeler olarak tanımlanırlar (Erkoç, 1990).

Açık işletmelerde kullanılan patlayıcıların teknik özelliklerini yedi ana başlık altında şu şekilde toplamak mümkündür ;

1- Patlatma Gücü ve Verimi ;

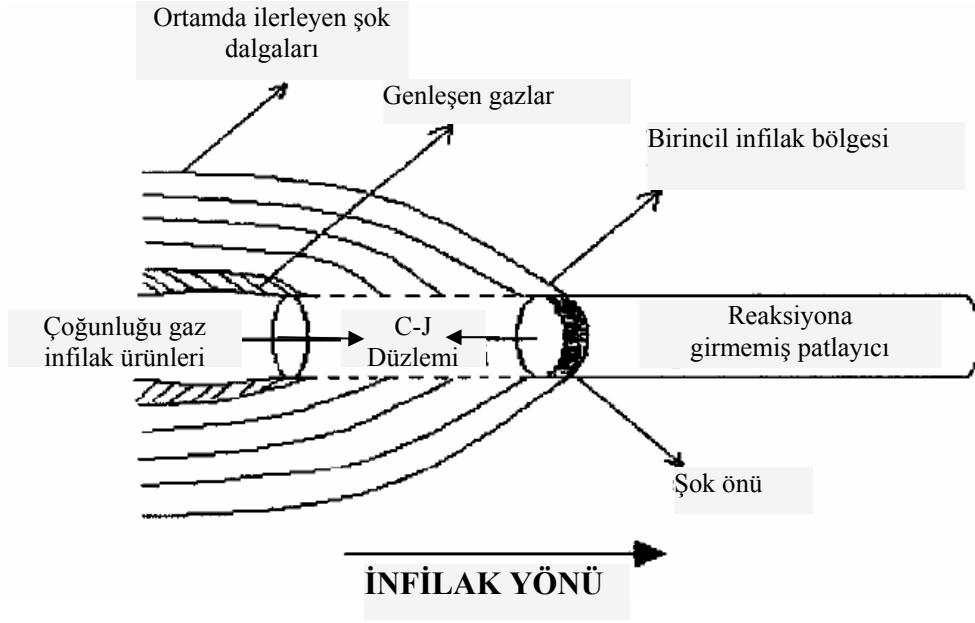
a. Patlatma hızı : Patlatma dalgasının patlayıcı kartuşu içinde ilerleme hızıdır. Diğer bir deyişle reaksiyonun hızı olarak yani detonasyon olarak tanımlanabilir. Detonasyon patlayıcı kolonunda ateşleme noktasında başlar ve sesüstü hızda hareket eder.

Detonasyon hızı, şok önünün (cephesinin) patlayıcı kolonu boyunca ilerleme hızıdır. Birimleri genellikle m/sn veya ft/sn'dir. Patlayıcı madde detonasyon hızı ve şarj kolonu çapı arasında yakın ilişki vardır. Her patlayıcı maddenin bir kritik çapı vardır ve o çapın altına inildiği zaman patlama olayı gerçekleşmez (Özer, 2009). Günümüz ticari patlayıcılarının detonasyon hızları 1500-7900 m/sn arasında değişmektedir. Yüksek patlatma hızlı patlayıcılar sert ve dayanımı yüksek kaya ortamlarında daha iyi sonuçlar vermektedir. Yumuşak ve düşük dayanımlı kaya ortamlarında ise düşük patlatma hızlı patlayıcılar kullanılmalıdır (Anon, 1987).

Burada kritik bir nokta detonasyon hızının yüksek olabilmesi için yeterli miktarda ateşleyici ve yemleyici kullanılmalıdır.

b. Patlatma stabilitesi : Patlayıcı şarjının tamamında patlatmanın kesintisiz olarak devam etmesi anlamına gelir. Delik çapı büyüdükçe patlatma sürekliliği artmaktadır. Çok hassas patlayıcılarda delikler arasında oldukça mesafe olsa da patlatma yayılabilmektedir. Ancak yine de bu uduş jeolojik özelliklere, patlayıcı cinsine, şarj byutuna ve delik paternine göre değişkenlik göstermektedir (Gusstaffson, 1993, Naapuri, 1990)

c. Patlatma basıncı : Genellikle kbar cinsinden ölçülen patlatma basıncı, Chapmen Jourquet (C-J) düzleminde patlatma hattı arkasında bulunan reaksiyon zonundaki basınçtır (Şekil 2.15). Bu basınç, istenilen parçalanmayı elde etmede, patlayıcının yeteneğinin önemli bir göstergesidir. Yemleme olarak kullanılacak bir patlayıcıda yüksek patlatma basıncı önemli kriterlerin başında gelir.



Şekil 2.15 : Patlayıcı Maddelerin İnfilak İşlemleri (Esen ve Bilgin, 1998)

Patlatma basıncı akvaryum testinden aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilir ;

$$P_d = 129,1 \times V_d \times V_p$$

Burada,

P_d : Patlatma basıncı (kbar)

V_d : Patlatma hızı (m/sn)

V_p : Patlayıcı partikül hızı (m/sn)

- d. Patlatma ısı : Patlayıcı ateşlendiği zaman verdiği ısı enerji miktarını gösterir ve genellikle "kj / kg" şeklinde ifade edilir. Ortaya çıkan ısının %30-40'ı ısı genişmesi olarak mekanik işe çevrilir. Artan ısı, gazları genişlettiği için gaz hacmi artmakta ve patlatma daha etkin olmaktadır (Naapuri, 1989).
- e. Özgül gaz hacmi : Normal şartlarda (0 °C ve 760 mmHg) 1 kg patlayıcının litre olarak ortaya çıkardığı gaz miktarıdır ve patlayıcı maddenin bileşim elemanları yardımıyla hesaplanabilir. Gaz hacminin fazla olması daha güçlü ve etkili bir patlatmayı sağlamaktadır (Gustaffson, 1973).
- f. Patlayıcı gücü : Patlayıcı enerjisi kimyasal olarak depolanmış olup, patlatma ile ortaya çıkar. Bu enerjinin kullanımı, enerjinin korunumu kanunu, kütle ve zaman

ile kontrol edilir. Bir delikteki patlatma enerjisi, delik çevresini ezme, çatlak oluşturma, kesme, ısı ve ışık, kütle hareketi, vibrasyon ve hava şoku etkilerini meydana getirir. Delik basıncı ise gaz artışından dolayıdır ve yavaş hareketlidir. Parçalanmaya az da olsa etki vardır, ancak asıl görevi ötleme yapmaktır (Anon, 1987).

Bir patlayıcının performansı sadece patlamayla ortaya çıkan enerji ile belirlenmez, performans aynı zamanda enerji çıkış hızına ve bu enerjinin kayacı parçalama ve ötlemede ne kadar etkin olarak kullanıldığına bağlıdır. Yani, patlayıcı performansını patlayıcı özelliği ve kaya ortamının özellikleri birlikte belirlemektedir (Kahraman, 1997).

- g. Patlayıcı yoğunluğu : Patlayıcı maddelerin birim hacminin ağırlığıdır. Detonasyon sürecinde birim zamanında devreye giren kütleyi işaret ettiği için önemlidir. Ayrıca patlayıcının duyarlılığının ve detonasyon basıncının oluşmasında da önemli rol oynar. Ayrıca aşağıda verilen formülde görüleceği gibi artan yoğunlukla, detonasyon basıncı ve dolayısı ile patlayıcının performansı artar.

$$P = \rho \times D \times W \quad (1)$$

$$P = 2.5 \times \rho \times D^2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

P=Detonasyon basıncı (kilobar)

ρ =yoğunluk(gr/ml)

W=Gaz ürünlerinin hızı

D=Detonasyon hızı(m/san.)

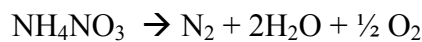
Böylelikle, denotasyon hızına paralel olarak patlayıcı madde yoğunluğunda, denotasyon basıncını nasıl etkilediği matematisel olarak görülebilir. Denebilir ki, artan yoğunluk ile beraber detonasyon basıncında dolayısı ile performansında artış beklenebilir. Bu nedenle bazı patlayıcılar kalıplama ve presleme yolu ile yüksek yoğunluklarda imal edilirler. Böylelikle T.N.T.:1,64; Hexogen:1,82; Octagen:1,96 yoğunluğunda, kalıplar halinde, yüksek tahrip güçlü patlayıcılar olarak hazırlanabilirler. Ülkemizde çoğu ateşçinin, delik içindeki patlayıcı malzemeyi tapalar kullanarak sıkılamaya çalışması, konunun gözlemsel olarak fark

edildiğinin işaret etmektedir. Ne var ki son gelişmeler göre, özellikle ANFO gibi, harç patlayıcılar (slurry explosives) gibi, günümüzde kullanılan patlayıcı maddelerde yoğunluğun ters etkileri de gözlenmiştir. Yoğun priller halinde hazırlanan ANFO'nun detonasyon hızı, poroz priller halinde hazırlanan ANFO'dan düşük ölçülmüştür. Yine, birincisinin duyarlılığı, ikincisinden daha az olmaktadır. Harç patlayıcılarda karışımlar, cam baloncukları, hava veya gaz kabarcıkları katılmadığı takdirde hiç bir şekilde detone olmamaktadırlar. Bu gibi elemanların miktarı karışımın yoğunluğunu azalttığı gibi, detonasyon hızını, duyarlılığını ve kritik çapını etkilemektedir.

Olayın tek açıklanabilir yolu, düşen yoğunlukta, artan porozite ile birlikte patlayıcı maddenin yapısındaki alan (bir dantel örgüdeki gibi) artmaktadır. Olasıdır ki artan yüzey ile reaksiyon hızı doğru orantılıdır. Daha önce açıklandığı gibi reaksiyon hızı, detonasyon hızı ile birlikte patlayıcı maddenin karakterini tayin eden bir parametredir.

2- Kolay Patlama ve Duyarlılık ; ANFO, amonit ve slurry dışındaki tüm ticari patlayıcılar kapsüle duyarlıdır. Bazı durumlarda ANFO ve amonit de kapsülle patlatılabilir, fakat çoğunlukla yemlemeye gerek vardır. Duyarlılık önemli bir patlayıcı özelliğidir. Duyarlılığın düşük olması durumunda, eğer patlayıcı kolunda boşluk ya da bir engel varsa reaksiyon kesilebilir. Duyarlılığın fazla olması durumunda, eğer delikler birbirine yakınsa, bir delikteki patlatma şoku komşu delikteki patlayıcıyı da ateşleyebilir. Bu durumda gecikmeli düzen bozulur ve kötü parçalanma, aşırı hava şoku ve vibrasyon olur (Anon, 1987).

3- Oksijen Dengesi : Patlayıcı maddelerin CO₂, H₂O, Al₂O₃ ve N₂ gibi dengeli ürünler oluşturmak üzere salabilecekleri oksijen miktarının kendi ağırlığı içindeki yüzdesidir. Amonyumnitrat bozuştığında;



denkleme göre bir atom O₂'i serbest bırakmaktadır. Bir atom O₂, 16 g olduğuna göre, 80 g olan AN içinde %20'ye eşdeğerdir. Bu durumda AN oksijen dengesi +20

olmaktadır. Oksijen denge değerinin pozitif olması oksijen verdiği, negatif olması ise oksijene gerek duyduğu anlamına gelir (Erkoç, 1990).

4. Enerji Aktarma Oranı: Patlayıcı maddeler tüm enerjilerini kaya ortamına iletmezler. Bu, bir ölçüde patlayıcının özellikleri ile kayanın özelliklerinin uyuşmından kaynaklanır. Enerji aktarma oranı empedans ile açıklanabilmektedir. Empedans, fiziksel olarak bir sistemin uygulanan bir kuvvete gösterdiği tepkidir. Teorik olarak patlayıcı empedansı / kayaç empedansı oranı ne kadar 1'e yaklaşırsa ideal enerji aktarımı gerçekleşmektedir. Marn ve benzeri kayaçlarda yoğunluk ve dakga yayılma hızı düşüktür. Dolayısıyla empedansları da düşüktür. Böylesi kaya ortamlarında yüksek patlatma hızlı patlayıcılar kullanmak verimli olmamaktadır. Aksine, bu tür patlayıcılar pahalı olduğu için maddi kayıplara sebep olmaktadır (Erkoç, 1990).
5. Emniyet : Patlayıcılarda aranan önemli özelliklerden biri de taşıma ve şarj esnasında emniyetli olmaları ve insanların hayatını riske sokmamalarıdır. Emniyet derecesini ölçmek için birçok yöntem geliştirilmiştir, darbe duyarlılığı testi, mermi testi, sürtünme testi, ısı testi, yanma testi bu testlerdendir (Naapuri, 1990; Anon, 1987).
6. Suya Karşı Direnç : Bir çok durumda sulu ortamlarda patlatma yapmak gerekebilmektedir. Ayrıca açık işletmelerde deliklerde yer altı suyuna sık sık rastlanılmaktadır. Ortamdaki suyun varlığı patlayıcı verimini düşürür. Plastik patlayıcılar suya karşı yüksek dirençlidirler. Diğer bazı patlayıcılar da suya dayanıklı malzeme ile kaplanarak su dirençleri artırılmaktadır. Günümüzde genellikle bu tür ortamlarda suya karşı dirençlerini yüksek olması nedeniyle emülsiyon tip patlayıcılar tercih edilmektedir.
7. Depolanma Özellikleri : Patlayıcılar nem, yüksek ve düşük sıcaklık gibi olumsuz şartlar altında bile uzun süre depolanabilir özellikte olmalıdır. Patlayıcıların depolanabilme özellikleri sürekli gelişmekte olsa da uzun süreli depolamalardan kaçınılmalıdır.

2.4.2.c. Patlayıcı Madde Türleri

Patlayıcıları özellikleri dikkate alınarak başlıca iki ana gruba ayırmak mümkündür. Bunlar;

1. Yüksek Patlayıcılar: Yüksek detonasyon hızı (VOD), yüksek basınçlı şok dalgası, yüksek yoğunluk ve kapsül ile ateşlenebilme hassasiyetleri olan patlayıcılar.

2. Patlayabilir Karışımlar: Fuel ve oksijen verici maddelerin bir karışımı olup, solüsyona giren katkı maddelerinin hiçbiri başlı başına bir patlayıcı özellik göstermezler ve 8 Nolu kapsül ile patlatılamazlar. Patlayabilir karışımların patlatılabilmesi için yüksek patlayıcıların kullanılmasına ihtiyaç vardır. ANFO tipik patlayabilir karışımdır. Bu iki ana grubun açılımı olarak aşağıdaki patlayıcı madde türleri sıralanabilmektedir ;

Yüksek Patlayıcılar :

A. Dinamitler ; Alfred Nobel'in insanlığın kullanımına sunduğu nitrogliserin bazlı bu patlayıcılar, günümüzde bile temel patlayıcı madde olarak kullanılmaktadır. Değişik amaçlar için çok değişik türleri üretilmektedir. İlk önceleri diatomit toprağı ile karıştırılıp duyarlılığı (dengesizliği) kontrol altına alınan nitrogliserin esaslı patlayıcılarda ,daha sonra jelatinleştirici, donmayı önleyici katkılar katılmaya başlanmıştır. Zaman zaman gereğinden kuvvetli patlayıcı üretmemek , buna bağlı olarak gereksiz maliyet artışından kaçınmak için, Amonyumnitrat katkılı olanları üretilmeye başlanmıştır.

Nitrogliserin bazlı dinamitlerde, depolama şartları hayati önem göstermektedir. Uygun şartlarda yapılmayan depolamalrda veya süresinden uzun bekletilmiş ürünlerde, Nitrogliserin kusması görülebilmektedir. Serbest kalan Nitrogliserin ise en ufak bir darbeye karşı duyarlıdır. Nitrogliserin bazlı dinamitlerin yarattığı diğer bir olumsuz olayda, insanlarda şiddetli baş ağrısına neden olmasıdır. Tüm bu nedenler ile, günümüzde nitrogliserin bazlı dinamitlerden vazgeçilmekte, harç patlayıcılar veya emülsiyon patlayıcılar kullanılmaktadır.

B. Slurry (Waterngel) Patlayıcılar ; Temel hammaddesi amonyumnitrat olan karışımlardır. Amonyumnitrat oksijen verici bir rol oynamakta karışım %10-30 arasında su içermektedir. TNT, alüminyum veya methylamin nitrat (M.A.N) gibi organik bileşiklerle duyarlı hale getirilmiştir. Kapsüle duyarlı veya kapsüle duyarlı olmayan türlerde üretilmektedir.

C. Emülsiyon Patlayıcılar ; Suya dayanıklı amonyumnitrat esaslı patlayıcı üretebilme çabaları sonucu emülsiyon patlayıcılar gündeme gelmiştir. Genelde organik veya mineral yağların çok büyük bir yüzdesi, su içinde çözünmezler. Ancak özel katkı maddeleri aracılığı ile emülsiyon haline getirilebilirler. Emülsiyonlar iki tür oluşurlar; birinci türde esas ortamı su oluşturur ve yağ zerrecikleri bu ortam içerisinde bulunur (su içinde yağ emülsiyonu). İkinci türde ise esas ortam yağdan oluşur ve su zerrecikleri bu ortam içerisinde bulunur (yağ içerisinde su emülsiyonu).

Emülsiyon patlayıcının içeriği:

Amonyumnitrat	%58
Su	%17
Sodyumnitrat	%15
Yağ/ Mazot	%6
Emülsifer	%2
Mikrocam balonlar	%2

Yüksek konsantrasyondaki amonyumnitrat çözeltisi, yakıt olarak kullanılan yağ veya mazot içerisinde ikinci tür bir emülsiyon haline getirilebilir, suya dayanıklı bir karışım haline gelirler. Böylesine elde edilen emülsiyon kıvamı, yağ ve emülsiyon ajanının oranı ile ayarlanabilmektedir. Eğer emülsiyon yüzdesi düşük ise akıcı pompalanabilir bir kıvam elde edilmektedir. Tersine emülsiyon ajanının yüzdesi yüksek tutulur ise pompalanamayan, ancak kartuşlar şekline getirilebilen katı bir kıvam elde edilmektedir. Emülsiyon patlayıcıların duyarlandırılması için içi boş mikro balonlar ile karıştırılması gerekmektedir. Bu yapılmadığı sürece detonasyona giremezler. Yine enerjileri arttırmak için, gereken yüzdelere alüminyum tozuda katılabilmektedir.

Yoğunluk ve emülsiyon patlayıcıların duyarlılığı kontrol eden veya cam baloncukların görevi denotasyon şok dalgasındaki enerjinin kimyasal reaksiyon üretmek için ısı enerjisine dönüşmesini sağlamaktır. Diğer geleneksel patlayıcılar (dinamit) kimyasal duyarlaştırıcılarla (Nitrogliserin-Nitroglikol) harekete geçmektedir.

Şok dalgası patlayıcının içinde ilerlerken gaz baloncuğu çarpar ve baloncuğu sıkıştırır. Gaz baloncuğu sıkıştıran basınç 7000 atmosfer civarındadır. Gaz baloncuk sıkışınca 3000 ile 7000 °K arasında ısı açığa çıkarır. Gaz baloncuktaki bu anlık ısı oluşumu patlayıcı moleküllerinin iyonlara parçalanmasına sebebiyet verir. Patlayıcı iyonlaşınca dah çabuk reaksiyona girer. Gaz baloncuk reaksiyona girince şok enerjisini reaksiyonun önüne iletir, bu da reaksiyonu bir sonraki gaz baloncukla yeniden başlatır.

Emülsiyon patlayıcılar yüksek hızlarda detonasyona girerler ve termodinamik enerjilerinin büyük bir bölümü denotasyona yardımcı olur. Bazı uygulamalarda yüksek hız bir avantajdır,yüksek kırma gücü sağlar. Emülsiyon patlayıcıların yoğunlukları 1,25-1,45 gr/cm³ arasında olup, detonasyon hızları 5000-6000 m/s arasında değişir.

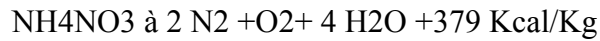
Emülsiyon patlayıcılar, darbe ve sürütünme ile patlamaya karşı son derece dayanıklıdır. Üzerlerine kazma ile vurulması veya delicilerin sürtünmeleri ile patlamazlar. Emülsiyon patlayıcıların raf ömrü 12 ay olup bu süreden sonra patlayıcı patlama özelliğini yitirmekte, hiçbir tehlikesi olmayan atıl bir malzemeye dönüşmektedir.

Emülsiyon patlayıcılar denotasyona girdiğinde açığa çıkan zehirli gazlar (NO_x,CO) NG'li patlayıcılara göre daha azdır. Bu zehirli gazların azalması ile patlatma sonrası ocağa girme zamanı kısalmakta ve ekonomi sağlanmaktadır. Bu özellikle yer altında havalandırmanın zayıf olduğu yerlerde önemli bir avantajdır. Emülsiyon patlayıcılar 8 No'lu kapsüle ve 10 gr/m lik fitile duyarlıdır.

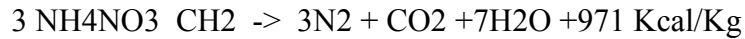
Patlayabilir Karışımlar : Özellikle yemleyici kullanılmadan patlama özelliği olmayan bir karışım olan ANFO bu grup patlayıcıların en önemli temsilcisidir. Amonyumnitrat ile Fuel Oil'in ağırlıkça yüzde olarak 94,3/5,7 oranında karıştırılması sonucu üretilen bir patlayıcı bir karışımdır.Amonyumnitrat'ın "AN" ve Fuel Oil'in "FO" harflerinin birleştirilmesi sonucu "ANFO" ismini almıştır.

Amonyumnitrat(NH₄NO₃), tüm dünya ülkelerinde farklı iki alanda en çok kullanılan kimyasal maddelerin başında gelir. Amonyumnitrat, % 20 - % 33 azot içeren gübre olarak zirai amaçlı kullanılmanın yanı sıra temel hammadde olarak ticari patlayıcılarda kullanılır. Amonyumnitrat, oksijen taşıyıcı özelliğinin yanı sıra su içerisinde çok çabuk çözünmekte ve higroskopik (nem kapan) bir kimyasal maddedir.

Amonyumnitrat 1000 °C'a kadar ısıtıldığı zaman;



Isı vererek ve oksijen çıkartarak bozunur. Araştırmacıların dikkatini bu oksijen çekmiş ve amonyumnitrata fuel oil (mazot) katılması sonucu bu oksijenin tüketerek ek enerji kazanmak amaçlanmıştır.



Amonyumnitrata mazot katıldıktan sonra enerjisi 971 Kcal/Kg' ya çıkmıştır;enerjisi yaklaşık 2.5 kat artmıştır. Bu durumda Amonyumnitratın tüm dünya ülkelerinde patlayıcı sektöründe yaygın olarak kullanılması sonucunu doğurmuştur.

Anfo'nun denotasyon hızı, patlatma deliğinin çapına bağlı olarak değişir.En yüksek denotasyon hızına 250 mm. çaplı deliklerden ulaşmaktadır.(4400 m/sn) 25 mm.'den daha küçük çaplı deliklerde ise stabil bir patlatma göstermektedir.Bu nedenle Anfo'nun orta ve geniş çaplı deliklerde (75-250 mm) ve kuru ortamda kullanılması halinde en uygun verim alınabilmektedir (Nitromak, 2007; Orica Nitro, 2008).

ANFO'nun verimli bir patlayıcı olarak kullanılabilmesi için aşağıdaki özelliklerin bulunmasına özen gösterilmelidir ;

- Homojen bir mazot karışımı
- Optimum detonasyon hızını verecek bir yoğunluk
- Akıcı granüllerden oluşan görünüm

2.4.2.d. Ateşleme Sistemleri

Dünya’da ilk kez 1831 yılında William Bickford tarafından bulunan Emniyetli fitilden önce karabarutu ateşleme işlerinde çok riskli yöntemler uygulanmaktaydı.1867 yılında Alfred Nobel’in civa fülminatlı kapsülü bulması ile günümüzde kullanılan kapsüllerin temeli atılmıştır.

Ateşleme sistemleri 2 gruba ayrılmaktadır:

1) Elektriksiz Ateşleme Sistemleri

- a) Emniyetli fitil-Adi Kapsül ;
- b) İnfilaklı fitil-Gecikme röleleri
- c) Elektriksiz kapsüller

2) Elektrikli Ateşleme Sistemleri

- a) Gecikmesiz elektrikli kapsüller
- b) Gecikmeli elektrikli kapsüller

1.a. Emniyetli Fitil – Adi Kapsül : Pamuk ipliği ile sıkıca örülmüş karabarut dolgusundan oluşmaktadır ve dışı neme karşı su geçirmez PVC gibi bir yalıtım malzemesi ile kaplanmış olup, aynı zamanda çok esnektir.

Emniyetli fitilin teknik özellikleri ;

Yanma Süresi: 100-130 m/sn

Çap : 5 mm (+/- 0.1 mm)

İntikal Hassasiyeti : 3-5 cm

Emniyetli fitilin kullanım alanları kısaca şu şekilde sıralanabilir ;

- İkincil Patlatmalarda
- Küçük Hacimli Operasyonlarda
- Mermer Ocaklarında
- Kaya Tuzu Ocaklarında

Emniyetli Fitil patlayıcı maddeyi tek başına ateşleyemediğinden adi kapsül ile birlikte kullanılmalıdır. Adi kapsüller ise ; içerisine yüksek hassasiyetli patlayıcı doldurulmuş bir ucu açık metal kapsüldür.Elektrik,sürtünme ve darbeye karşı çok duyarlıdır.

Adi kapsülün teknik özellikleri

Çap : 6.8 mm.

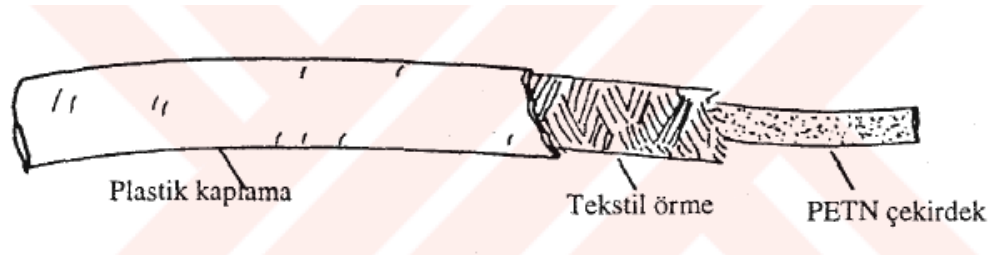
Boy : 45.5 mm.

Patlama Hızı : 7500 m/sn

Tahrip Gücü : 5 mm kalınlığında kurşun plakada minimum 5 mm çapında bir delik açar

Suya Direnci : Yoktur

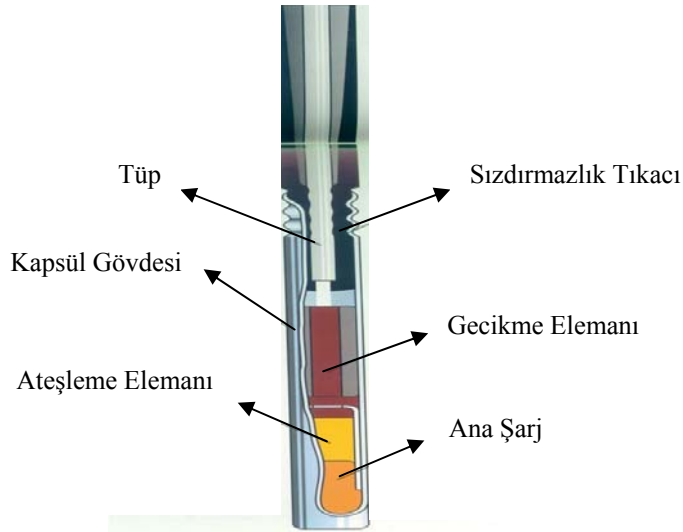
1.b. İnfilaklı Fital – Gecikme Röleleri : Elektrik tehlikelerinden dolayı, delik içerisinde elektrikli ateşleme sistemi kullanımı tercih edilmediği durumlarda, elektrikli ateşlemeye alternatif olarak kullanılmaktadır. İnfilaklı fitil, dış kısmı muhtelif tekstil, plastik ve rutubete dayanıklı diğer kombinasyonlardan takviye edilmiş koruyucu bir tabaka içerisine yerleştirilmiş, PETN dolgu maddeli yüksek patlayıcılardan ibarettir (Şekil 2.16). İnfilaklı fitil dolgu maddesi PETN 0.2 gr PETN/m – 80 gr PETN/m arasında değişmektedir. İnfilaklı fitillerin tümü adi kapsül ile patlatılabilir. İnfilak hızı 6500-7000 m/sn arasındadır. Yerüstü patlatmalarının hemen hemen hepsinde kullanılabilir. Sulu bir ortamda kullanıldığı takdirde infilaklı fitillerin uç kısımları sudan korunmalıdır. PETN suyu yavaş yavaş absorbe etmekte, bunun sonucunda ateşlemeye duyarsız hale gelmektedir. Fital ıslak olsa bile, kuru uç kısmından ateşlendiği takdirde patlar.



Şekil 2.16 :İnfilaklı fitilin tip kesiti (Özer, 2001).

Yüzey gecikme röleleri sınırsız sayıda gecikme aralığı sunmaktadır. Tipik gecikme süreler 5, 9, 17, 25, 35, 45 ve 65 msn'dir. Tek bir delikteki patlayıcı şarj kolonunun patlamasıyla, daha sonra ateşlenecek olan delikler arası yüzey gecikme rölelerinde, kaya kütlelerinin krater yada başka bir hareketinden ötürü kesme problemi çıkabilir. Bu durumu gidermek için ana hatların ve gecikme elemanlarının paterni tasarlanırken, atımın ateşleme noktasından her bir patlatma deliğine iki yol ile ulaşılması gerekmektedir.

1.c. Elektriksiz Kapsüller ; Düşük enerji iletim hattı olan bir elektriksiz ateşleme sistemidir. Geçtiğimiz yüzyılda, patlatma teknolojisindeki önemli bir buluştur. Patlatma işlemlerinde daha ileri seviyede emniyete ve daha iyi atım sonuçları elde etmeye yardımcı olmuştur. Kapsüllerin çoğunda hem primer hemde ikinci ateşleyici bulunmaktadır. Primer patlayıcılar atmosferik basınç altında çok hızlı bir şekilde yanarlar. Bu yanma birkaç milisaniye içerisinde patlamayla sonuçlanır. Konvansiyonel kapsüllerde gecikme elemanındaki nispeten yavaş olan yanma, primer şarj kanalıyla ana şarjın patlamasıyla sonuçlanır. Bu sistemlerde, No.8 gücünde NPED (primersiz) kapsül kullanılmaktadır. Kapsül gövdesi alüminyumdan imal edilmiş olup, gecikme zamanına bağlı olarak 45mm'den 90 mm'ye kadar olan uzunluklarda üretilmektedir. Gecikme elemanı içi piroteknik kompozisyon ile dolu olan bir alüminyum tüpten oluşmaktadır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 : Elektriksiz kapsülün yapısı (Nitromak, 1990).

2.a. Gecikmesiz Elektrikli Kapsüller ; Açık ve kapalı ocak türü işletmelerde kullanılabilen gecikmesiz elektrikli kapsüller manyeto ile ateşlenebilir. Alüminyum ve bakır yüzüklü olarak üretilirler. Bakır yüzüklü olanlar, grizu emniyetli olarak kullanılabilir. Bu kapsüllerin ateşlenmesi için en az 3 mWs/ohm enerjiye ihtiyaç vardır. Ateşleme manyetolarının periyodik kontrollerinin mutlaka yapılması gerekir. Kapsüllerin ambalajları üzerinde belirtilen omaj gruplarının büyük önemi vardır. Aynı seride farklı omaj grupları kesinlikle kullanılmamalıdır. Aksi takdirde yüksek omaj grupları önce patlayarak devreyi kopartması dolayısı ile düşük omaj grubundan olan

kapsüllerin patlatılmaması ile karşılaşılabilir. Toplam devre direncinin (patlatma kablosu dahil) manyeto kapasitesinin altında olmasına özen gösterilmelidir. Ateşleme öncesi gerekli tedbirler alındıktan sonra devre kontrolü yapılmalıdır. Devre kontrolleri rastgele ohmmetre ile değil, bu maksatla üretilmiş ohmmetrelerle yapılması gerekmektedir.

2.b. Gecikmeli Elektrikli Kapsüller ; 30 msn gecikme aralığı 16 sıra ve 500 ms. gecikme aralıklı 10 sıra olmak üzere üretilirler. Bir atımda daha fazla patlatma yapmak, daha fazla verim almak ve çevreye verilecek zararı minimuma indirmek için kullanılırlar. Bakır ve Alüminyum yüzüklü olmak üzere iki farklı çeşitte üretilirler. Elektrikli gecikmeli kapsüllerin birbirine bağlantısı üç şekilde olmaktadır. Bunlar ; seri – paralel ve karışık bağlama şeklindedir.

Gecikmeli elektrikli kapsülleri kullanırken ;

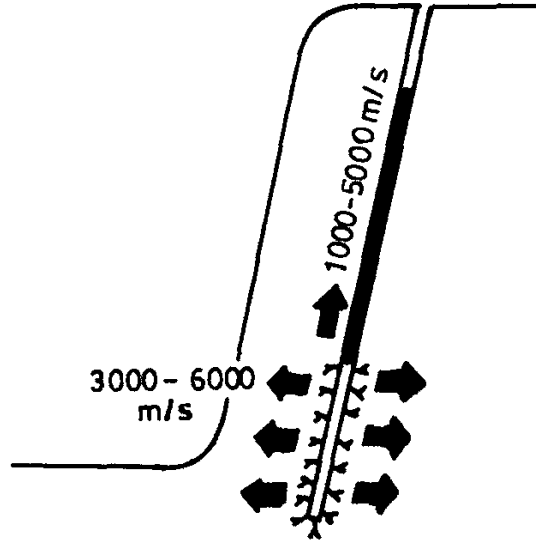
- Amaca uygun patlatma devresini seçmek, Seçilen patlatma devresine gereken enerjiyi verebilecek özellikte güç kaynağı kullanmak,
- Elektrik kaçaklarının yok edilmesi, gerekli korunma önlemlerinin alınması,
- Patlatma devresinde ölçülen toplam direnç ile hesaplanan toplam direncin eşitlenmesi gerekmektedir.

Elektrikli gecikmeli kapsül kullanılan patlatmalarda; patlatma akımı = 0.8 amper, patlatma enerjisi = 3 mili watt-saniye/ohm gerekmektedir. Çok sayıda elektrikli kapsülün bir anda patlatılması için gerekli akımın birkaç milisaniye süre ile tatbik kibritbaşındaki krom-nikel köprü teli ısınarak akkor haline gelmektedir. Oluşan ısının kibrit başı eczasına transfer edilmesi ile birlikte kuvvetli bir kıvılcım oluşmakta ve bu kıvılcım kapsülü patlatmaktadır. Köprü teli kalınlığı 0.030 mm olup, 0.8 amperlik bir akım ile çok çabuk ısınmakta ve eczayı ateşlemektedir. Bazı patlatma devrelerinde direnç farkından dolayı kapsülden kapsüle küçük akım farklılıkları oluşmakta, bunun sonucu olarak kapsüllerin patlama zamanları arasında farklılıklar meydana gelmektedir. Sonuç olarak ilk patlayan kapsül devreyi kopartmakta ve patlamayan kapsüllerle karşılaşılabilir. Bu nedenden ötürü kapsüller direnç gruplarına göre tasnif edilmelidir. Aynı seride farklı direnç gruplarını kesinlikle kullanılmamalıdır.

2.4.2.e. Patlatma Teorisi

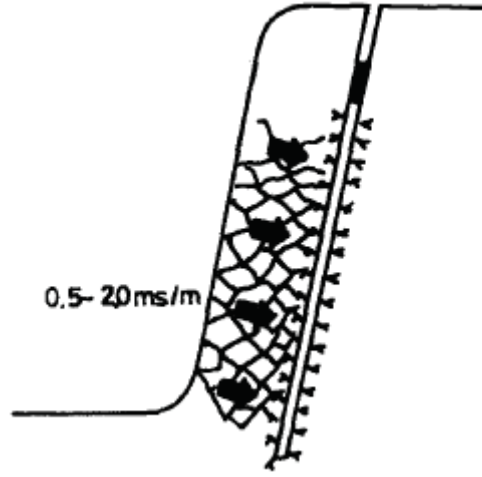
Literatürde ve pratikte yapılan çalışmalar göstermiştir ki, bir delikteki şarjın patlamasındaki enerji çıkışı patlatma anında çevredeki kayaca dinamik yük olarak etkir. Bu nedenle patlatma hızını ve süresini kontrol etmek özellikle önemlidir. Bir delikteki patlama üç ayrı faza bölünebilir (Naapuri, 1990). Bunlar ;

1. Kayacın Sıkıştırılması : Patlatmanın meydana getirdiği şok dalgası büyük ölçüde kayacın jeolojisine bağlı olarak 3000-6000 m/s hızla kayaca geçer. İlk önce kaya basınç gerilmesine uğrar. Şok dalgası kayacı parçalamaz, sadece ikinci aşamada parçalanmaya yardımcı olacak mikro çatlakları üretir (Şekil 2.18).



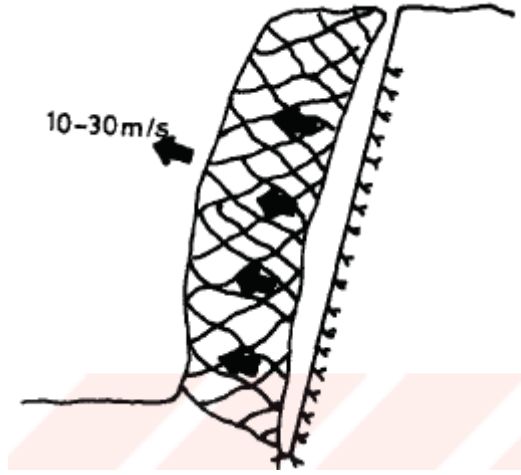
Şekil 2.18 : Kayacın sıkıştırılması (Naapuri, 1990).

2. Şok Dalgalarının Yüzeyle Yansıması : Serbest yüzeye ulaşan şok dalgaları geri yansıyor kayacın çekme gerilmesini yenmeye çalışır. Yansıma hızı yaklaşık 500-2000 m/sn olup, dilim kalınlığının metresi başına 0,5-0,2 msn'ye karşılık gelir. Çekme gerilmeleri, deliğin merkezinden yayılan ve genellikle radyal olan küçük birincil çatlaklara neden olur (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : Şok dalgalarının geri yansıması (Naapuri, 1990).

3. Gazların Genleşmesi : Patlama sonu fazla miktarda yüksek basınçlı gaz oluşur. Hızlı ısı çıkışı ile genişleyen gaz birincil çatlaklara ayrılır. Çatlakların genişlemesiyle dilim ileri doğru hareket eder, basınç düşer ve birincil çatlaklardaki gerilme artar. Sonra birincil çatlaklar yüzeye doğru ve tamamen dağılır (Şekil 2.20).



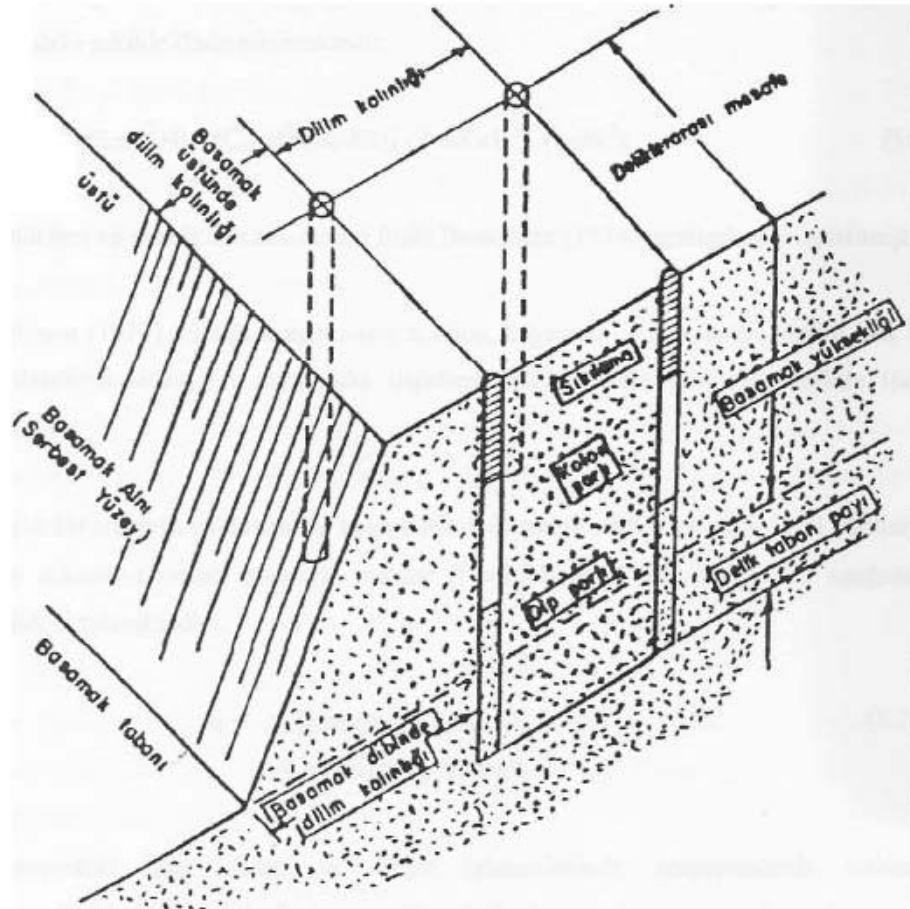
Şekil 2.19 : Şok dalgalarının geri yansıması (Naapuri, 1990).

2.4.3. Basamak Patlatması Tasarımı Parametreleri

Açık ocak işletmelerinde yürütülen delme-patlatma operasyonları basamak patlatması tasarımı ile yapılmaktadır. Bundan önceki dönemlerde yapılan galeri yöntemi oldukça tehlikeli ve kontrol edilebilir parametre sayısının az olması nedeniyle neredeyse tamamen terk edilmiş olup ilgili kanunlarda da yasaklı hale gelmiştir. Basamak patlatmalarının avantajları şu şekilde sıralanabilir ;

- Birim hacimde kullanılan patlayıcı madde (ölgül şarj) denetlenebilir,
- Ölgül delik (birim hacimde kullanılan delik metrajı) denetlenebilir,
- Elde edilen pasada tane boyu denetlenebilir,
- Örtü malzeme iş makinaları ile alınabileceğinden kaliteli üretim yapılır,
- Örtü geometrisi ve gevşekliğı kontrol edilebildiğı için, yükleyicilerin verimi denetlenebilir, mekanik zorlamalar azaltılabilir.

Basamak patlatmalarında patlatma geometrisi parametreleri aşğıdaki başlıklar altında toplanmış olup Şekil 2.20’de gösterilmiştir ;



Şekil 2.20 : Basamak Patlatması Terimleri (Kahrıman, 1999).

2.4.3.a. Delik apı

Delik apı, formasyon özellikleri, istenilen parça boyutu, yükleyici ve taşıyıcı ekipman, delici ve kırıcı makine özellikleri dikkate alınarak belirlenmelidir. Genellikle delme-patlatma maliyeti delik çapı büyüdükçe azalmaktadır. Açık ocak işletmelerinde patlayıcı olarak en fazla kullanılan ANFO'nun verim artışı delik çapı ile doğru orantılıdır. Az atlaklı kaya kütle özelliklerine sahip bir alanda küçük aplı delik kullanımı delikler arasında kalan çatlak sayısını azaltır ki, bu da şok dalgalarının daha az sönümlenmesini sağlar ve özellikle sert kayalarda daha küçük parça boyutu elde edilir. Böylesi formasyonlarda büyük delik çapı uygulamasında iki çatlak arasında kalan kısım blok olarak alınır. Bu sebeple, böyle formasyonlarda küçük delik çapı kullanarak her iki çatlak arasına bir delik gelecek şekilde delik düzeni hazırlamak daha avantajlıdır (Naapuri, 1990 ; Erkoç, 1990, Anon, 1987).

Her ne kadar pek çok işletmede, belirli bir makine parkı varlığı dolayısıyla delik çapı seçimi kısıtlı ise de; yeni oluşturulacak projelerde delik çapının çok iyi tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Yukarıda özetlenen tüm etkili parametrelere karşın, araştırmacıların çoğu, delik çapının (d), daha çok basamak yksekliliğinin (K) bir fonksiyonu olarak ifade etmektedirler. Patlayıcı madde üreten kuruluşların bazıları ise iyi bir parçalanma ve tasarım kontrolü için delik çapının basamak yksekliliğinin onda biri kadar olmasını önermektedirler (Zeigler, 1991; Dick ve Ark., 1983).

Bazı araştırmacılar da açık işletmelerde seçilebilecek delik çapları (d) için pratik olarak aşağdaki verilen aralıkları önermektedirler.

$$d = 51\text{mm}-425\text{mm} \text{ (Dick ve Ark, 1973)}$$

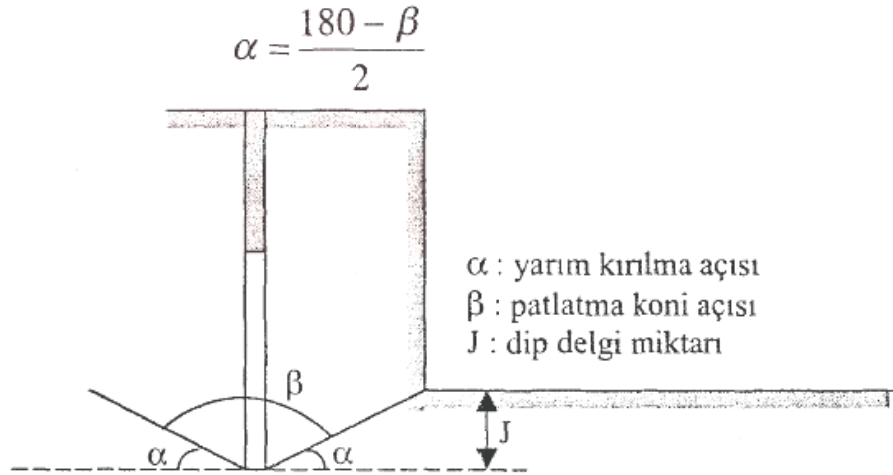
$$d = 30\text{mm}-400\text{mm} \text{ (Olofsson, 1988)}$$

$$d \text{ (m)} = K / (100-200) \text{ (Tamrock, 1978)}$$

Bazı araştırmacılar ise delik çapının, basamak yksekliliğinin 40 ta biri ile 80 de biri arasında değiştiğini, yaptıkları çalışmalar sırasında gözlemlemişlerdir. Tamrock'a (1984) göre; eğer kesme derinliği herhangi bir çaptaki deliğin kullanılmasına izin veriyorsa ve çevresel unsurlara (binalar v.s.) yeterince uzaksa, delik çapını tayin edici nihai faktör olarak ekskavatör kepe hacmi dikkate alınabilmektedir (Tamrock, 1984).

2.4.3.b. Delik Boyu ve Dip Delgi Mesafesi

Açık ocak basamak yüksekliğine ve delik eğimine göre değişen bir faktör olan delik boyu hem tabanda tırnak kalmaması hemde ocak geometrisinin korunması açısından oldukça önemlidir. Basamak tabanında tırnak kalmaması için delik boyunun basamak yüksekliğinden bir miktar fazla olması gerekir ki buna dip delgi mesafesi denir. Ancak dip delginin fazla olması durumunda hem vibrasyon miktarı artmakta hem de bir alt basamakta üst kesimlerde kırık-çatlaklar oluşturmaktadır. Bu da alt basamakta yapılacak bir sonraki delme operasyonlarını ve toplamda operasyon maliyetini olumsuz etkilemektedir. Dip delgi miktarını etkileyen faktörlerden biri olarak yarım kırılma açısı sayılabilir (Şekil 2.21). Normal olarak yarım kırılma açısı (α) 10 ile 30 derece arasında değişmektedir (Özer, 2001).



Şekil 2.21 :Yarım kırılma açısı ve patlatma koni açısı (Özer, 2001).

Yapılan bazı araştırmalarda dip delgi miktarının belirlenmesine yönelik aşağıdaki pratik formüller geliştirilmiştir ;

- Langefors ve Kihlström (1963) ; Olofson (1990)

$$J = 0,3x B_{max}$$

- Tamrock (1984)

$$J = 0,3 \dots 0,4xB$$

- Atlas Powder Co (1987)

$$J = 0,2 \dots 0,5xB$$

- Konya ve Walter (1990)

$$J = 0,3xB$$

- Ash (1968)

$$J = 0,2 \dots 0,4xB$$

- Gusstaffson (1973)

$$J = 0,3xB$$

- Hino (Arıoğlu, 1990)

$$J = 0,3xBx (H/B)$$

- atlaklı Kayada (Demirci, 1984)

$$J = 0,3xB$$

J : Dip delgi mesafesi

B : Dilim kalınlığı

B_{max} : Maksimum dilim kalınlığı

H : Basamak yüksekliği

Delik boyu basmaka yüksekliği ve delik eğimine bağlı olabilen bir değişkendir. Delik boyunun tespiti için verilen bir bağıntı ise şöyledir ;

- Langefors ve Kihlström (1963)

$$L = H + J + (0,05 (H+J))$$

2.4.3.c. Delik Hatası

Arzu edilen parçalanma derecesinde bir yığının elde edilmesinde önemli unsurlardan bir diğeri, deliklerin planlanan geometrik büyüklüklerde delinmesidir. Bu konuda ne kadar ihtimam gösterilirse gösterilsin yine bazı sapmalar olmaktadır. Önemli olan bu sapma miktarlarının kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasıdır. Bazı araştırmacıların delik hata payı için önerdikleri tolerans değerleri aşığıdaki şekildedir;

- Langefors, (1970)

$$E = 0,05 + 0,03xH$$

- Tamrock, (1984)

$$E = 0,05 + 0,03xL$$

- Olofson, (1988)

$$E = (d/1000) + 0,03xH$$

- E : Delik hatası (m)
H : Basamak yüksekliği (m)
L : Delik boyu (m)
d : Delik çapı (mm)

2.4.3.d. Dilim Kalınlığı

Makul bir dilim kalınlığı belirlenmesi ardından diğer parametrelerin dilim kalınlığının fonksiyonu olarak ifade edilebileceği birçok araştırmacının ortak görüşüdür. Ancak dilim kalınlığının farklı kaya ortamı için deneme yanılma yoluyla tespit edilmesi güncelliğini korumaktadır. Aşağıda çeşitli araştırmacıların önerdikleri bağıntılar verilmiştir ;

- Hustrulid, (1999)

$$B = 25 - 40xd$$

- Arıoğlu, (1986)

$$B = 26xd - 0,41$$

- Olofson (1988)

$$B_{\max} = 1,36 \times (I_b)^{0,5} \times R_1 \text{ (Olofsson, 1988)}$$

- Gusstaffson (1973)

$$B_{\max} = 0,045 \times d$$

B : Dilim kalınlığı (m)

d : Delik çapı (mm)

I_b : Şarj yoğunluğu (kg/m)

R_1 : Delik eğimi düzeltme faktörü

Genel bir değerlendirme yapıldığında dilim kalınlığının delik çapının fonksiyonu olarak yapılan yaklaşımların pratikte olumlu sonuçlar verdiği ve yaklaşımların hemen hemen bir birine yakın olduğu görülmektedir.

2.4.3.e. Delikler Arası Mesafe

Delikler arası mesafe patlama tasarımının önemli bir unsurudur. Bazı araştırmacılar delikler arası mesafeyi, basit bir şekilde yan yana iki delik (aynı sırada) arası mesafe olarak kabul ederken, bazıları delikler arasındaki (bitişik delikler) gecikme aralığı olarak tanımlamaktadırlar. Delikler arası mesafenin belirlenmesinde birçok faktör etkin olmakla birlikte, yaygın kabul ile daha çok dilim kalınlığının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Çeşitli araştırmacıların konuya yaklaşımları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Olofson (1988)

$$S = 1,25 \times B$$

- Langefors & Kihlstrom (1978)

$$S = (1,15 - 1,25) \times B$$

- Dick (1983)

$$S = 2 \times B$$

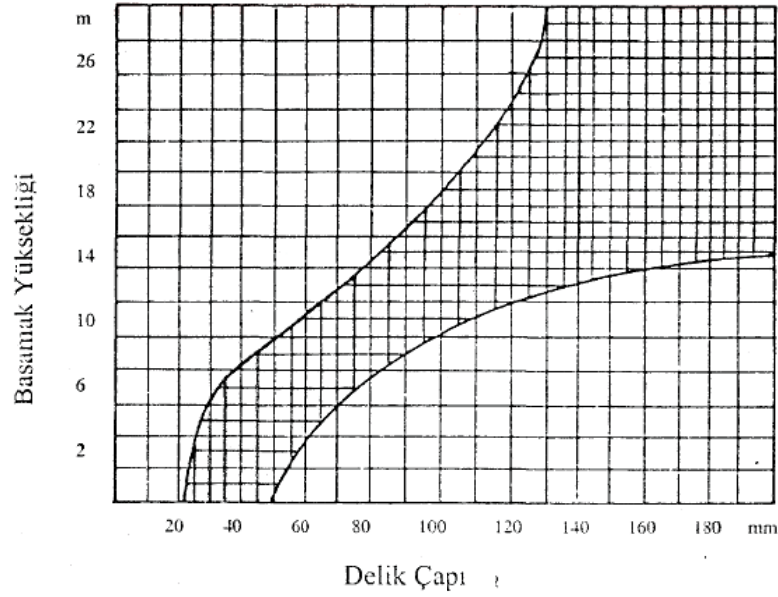
S : Delikler arası mesafe (m)

B : Dilim kalınlığı (m)

Genel bir değerlendirme ile araştırmacıların çoğu delikler arası mesafenin dilim kalınlığına oranının 1 – 1,50 arası olması gerektiği konusunda ortak fikirdedirler. Eğer delikler arası mesafenin dilim kalınlığına oranı 1'den küçük olursa, sıkılama malzemesinin erken boşalması nedeniyle delikler arasında çok erken çatlaklar oluşacaktır. Bunun sonucu, gaz çıkışının hızlanması, hava şoku, gürültü ve iri blok oluşumu gibi sorunlar ortaya çıkacaktır. Tersine bu oran büyük olursa, uygun olmayan parçalanma ve /veya hiç parçalanmama nedeniyle iri bloklar ortaya çıkacaktır.

2.4.3.f. Basamak Yüksekliği

Patlatma tasarımındaki en önemli iki kriter dilim kalınlığı ve basamak yüksekliğidir. Basamak yüksekliği delik çapı ve dilim kalınlığının bir fonksiyonudur. Delik boyu arttıkça, delme sırasında oluşacak delik sapması da artacaktır. Bu durum basamak alt kısımlarında dilim kalınlığı ve delikler arası mesafeleri bozar (Langefors & Kihlström, 1963 ; Olofson, 1990). Basamak yüksekliği ile delik çapı arasındaki ilişki Şekil 2.22’de verilmiştir.



Şekil 2.22 :Basamak yüksekliği ve delik çapı arasındaki ilişki (Özer, 2001).

2.4.3.g. Sıkılama Boyu

Uygun parçalanma derecesinde bir yığın elde etmenin yanında, hava şoku ve kaya fırlaması gibi çevre etkenlerinin en aza indirilmesi bakımından önemli unsurlardan biri, sıkılama boyu ve sıkılama malzemesinin cinsidir. Sıkılama boyu ve etkileri konusunda yapılan araştırmalarda; araştırmacıların çoğu sıkılama boyunun, dilim kalınlığının bir fonksiyonu olduğunu kabul ederek aşağıdaki yaklaşımlarda bulunmuşlardır.

- Tamrock (1987)

$$h_o = (0,7 - 1) \times B$$

- Hoek ve Bray (1990)

$$h_o = (0,67 - 2) \times B$$

- Langefors (1978)

$$h_o = B$$

- Bilgin ve diğ. (1986)

$$h_o = (20 - 60) \times d$$

2.4.3.h. Özgül Şarj

İstenen parçalama derecesini elde etmek için deliğe konulması gereken patlayıcı madde miktarını belirten özgül şarj miktarı, büyük oranda kaya özelliklerine bağlı olup bu çalışmanın arazi çalışmaları esnasında kaya ortamlarındaki değişkenliği gözlenebilmiştir. Genel olarak benimsenen görüş, özgül şarjın her bir kaya birimi için deneme yanılma yoluyla belirlenmesi olmakla birlikte bu çalışma kapsamında GSI kaya sınıflama abağından yararlanılarak özgül şarjın belirlenebileceği görüşü benimsenmiştir. Kayaların jeomekanik özellikleri ile optimum özgül şarj arasında güvenilir bir ilişki kurmak geliştirilmesi bu çalışma ile de sınırlı kalmamalı, daha fazla araştırılmalarak arazi deneyimleri ile pekiştirilmelidir.

Literatürdeki çalışmalardan, Langefors ve Kihlstrom (1978) tarafından geliştirilen ve patlama geometrisi ile kaya patlama sabiti arasındaki ilişki şu şekildedir;

$$q = (1,4 \times C_o \times B^3) (0,4 \times C_o \times B^2) (K-2B) / (n \times K \times B^2) \quad (\text{kg/m}^3)$$

Ülkemizde ise bazı demir ve linyit işletmelerinde yapılan araştırmalar sonucu özgül şarj ve çeşitli kaya özellikleri arasında bağıntılar geliştirilmiştir (Bilgin vd, 1993).

Basma dayanımı ile özgül şarj arasındaki ilişki;

$$q = 0,474 + 0,004 \times \sigma_B$$

Çekme dayanımı ile özgül şarj arasındaki ilişki;

$$q = 0,369 + 0,0224 \times \sigma_C$$

İçsel sürtünme açısı ile özgül şarj arasındaki ilişki ;

$$q = 0,2349 \times (\tan \emptyset)^{0,557}$$

Kohezyon ile özgül şarj arasındaki ilişki ;

$$q = 0,1156 + c \times 0,0072$$

Darbe dayanımı ile özgül şarj arasındaki ilişki ;

$$q = 0,414 + 9,55 \times 10^{-7} \times DD$$

Kaya yoğunluğu ile özgül şarj arasındaki ilişki ;

$$q = 0,019 + 2,038 \times 10^{-4} \times d_r$$

Delme performanslarından elde edilen kaya kalite endeksinin (RQD), patlatılabilirlikle olan ilişki bazı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur (Kahrıman, 2001) ;

$$q = (RQD - 24,9) / 7,1 \text{ (kg /ton)}$$

Kou ve Rustan tarafından ise özgül şarj kavramına yakın olarak kabul edilen patlayabilirlik faktörünün (C_o), kayanın tek eksenli basma dayanımı (σ_B), dinamik elastisite modülü (E_d) ve referans patlayıcı maddenin ısı enerjisiyle (Q_{er}) değişimi incelenmiştir.

$$C_o = (\sigma_B)^2 / (2 \times E_d \times Q_{er})$$

Burada kullanılan semboller;

q: Özgül şarj, (kg/m^3)

C_o : Kaya patlatma katsayısı, (kg/m^3)

B: Dilim kalınlığı, (m)

σ_B : Kayanın tek eksenli basma dayanımı, (Mpa)

σ_C : Kayanın tek eksenli çekme dayanımı, (Mpa)

Φ : Kayanın içsel sürtünme açısı, (derece)

c: Kohezyon

DD: Darbe dayanımı, ($\text{kg.m /m}^3 \cdot 10^{-5}$)

d_r : Kayanın yoğunluğu, (KN /m^3)

RQD: Kaya kalite indeksi

E_d : Dinamik elastisite modülü, (Mpa)

Q_{er} : Referans patlayıcı maddenin ısı enerjisi, (kj/kg)

3. PATLATILABİLİRLİK VE PATLATMA DİZAYNI

Patlatma performansını büyük ölçüde kayaç özellikleri belirler. Yıllardır kayaç özelliklerinin patlatmadaki rolünü belirlemeye yönelik olarak yapılan çalışmalar olmasına karşın bu özellikler patlatma dizaynının belirlenmesinde yeterince kullanılmamıştır. Patlatma tasarımında kayaç özelliklerini içeren yöntemler bulunmadığı için değişik kayaç tiplerinde uygulanacak olan patlatma tasarımını belirleyebilmek üzere patlatma mühendislerinin sahayı iyi gözlemleyerek belirleyeceği bölgesel patlatma planlarının kullanılması gerekmektedir.

Kaya patlatma sistemlerinde 4 kritik unsur vardır: Kaya kütlesi, patlayıcı, patlayıcının dağılımı ve detaylı gecikme zamanıdır. Son yıllardaki bilgisayar tabanlı patlatma programları ve modellerin gelişmesi ile son iki unsur daha özenli şekilde analiz edilmektedir. Patlatma performansı, konusunda uzman olan az sayıdaki insanın karmaşık gecikme düzenlemelerini tanımlayabilmesi ve bunlar arasındaki bağlantıyı kullanabilmesi ile ortaya konulabilmektedir. Patlatma performansları büyük oranda kayaç özelliklerine bağlı olmasına karşın aralarındaki ilişkiyi belirleyebilmek ve patlatma tasarımına yansıtılabilmek çok karmaşıktır.

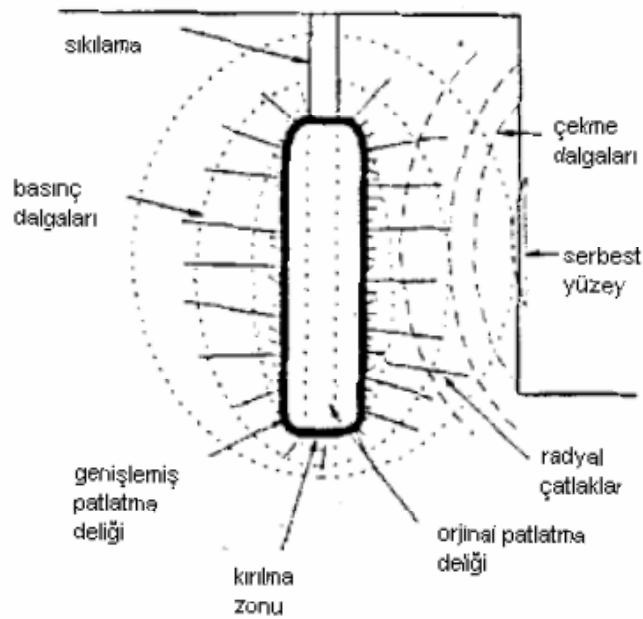
Yer bilimci mühendisleri bu probleme farklı bir açıdan yaklaşmaktadır. Maksimum kayacı kazabilmek için gerekli dizaynı belirleyebilmek üzere kayaçlar sistematik olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada kayaç özelliklerinin kolaylıkla ölçülebilmesi göz önünde tutulmaktadır. Ayrıca bu özellikler kritik mühendislik gerekliliklerini de karşılayabilmelidir. Her özellik, genel analizdeki ağırlığı oranında etkilidir. Benzer yaklaşım Avustralya'da bulunan ve The Queensland Üniversitesi'ne bağlı olarak faaliyet gösteren JKMRC (Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre) tarafından kayaçların patlatıldığı andaki davranışlarını belirlemeye yönelik olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemin prensibinde; patlatma performansında en çok ağırlığı olan parametrelerin bir araya getirilerek patlatılabilirlik indeksi tanımlanmaktadır. Ortaya çıkan bu sonuç daha sonra farklı patlatma durumlarına göre uyarlanabilecektir.

3.1. PATLATMA MEKANİZMASI

Kaya kütlesinin özellikleri patlatma tasarımında önemli yere sahiptir. Kayaç özellikleri ihmal edilerek yapılacak tasarımlarda, patlatma performansında tutarsızlıklar oluşacaktır. Ancak tanelerin oluşması ve yakın kayaçlarda hasar oluşması ortak özelliktir. Kayaç özellikleri ihmal edilerek yapılan patlatmaların getirdiği ekstra maliyet toplam delme patlatma maliyetlerinin birkaç katına ulaşabilmektedir (Scott, 1992). İstenilen patlatma sonuçlarına ulaşılması durumunda, tespit edilebilen ve gerekli görülen kayaç özelliklerinin patlatma tasarımına dahil edilmesi uygun olacaktır.

Kayacın özellikleri patlatma performansında önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle patlatma mühendisleri, hangi kayaç özelliklerinin patlatma performansı üzerindeki etkisinin en fazla olduğu ve farklı jeolojik koşullar altında patlatma tasarımının nasıl uygulanması gerektiği konularında ayrıntılı olarak çalışmak zorundadır (Ünal, 2005).

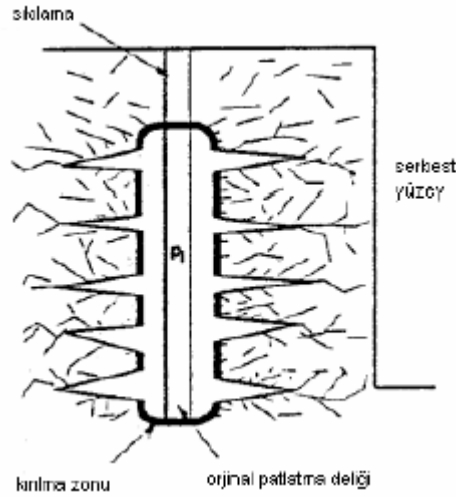
Sarma, 1994 yılında patlayıcı ile kayaç etkileşim modellemesine temel olacak patlayıcıyı referans alan bir yaklaşım ortaya koymuştur. Sarma'nın modeline göre, patlayıcı madde ateşlendiğinde patlayıcının içeriği yüksek sıcaklık ve basınç altında hızlıca gaz ürünlerine dönüşmektedir. Yüksek basınçtaki gaz patlama deliğinin cidarına etki etmekte ve Şekil.3.1'de görüldüğü gibi kayacı saracak şekilde şok dalgaları oluşturmaktadır.



Şekil 3.1 : Kaya ortamında şok dalgalarının etkisi (Scott, 1996).

Bölüm 2.4.2.e’de bahsetildiği üzere şok dalgalarının sıkışması sonucu oluşan baskı ile patlatma deliğine yakın bölgedeki kayalarda mikro çatlakların oluşması gerçekleşir. Sonrasında şok dalgalarının yüzeyden yansımalarıyla kırılmış ve sıkıştırılmış olan kayalardan dolayı patlatma deliğinin hacmi artacak ve bu hacim içine patlatma deliğinin basıncına eşit oluncaya kadar patlayıcı gazı ile dolacaktır. Kırılma zonunun ötesinde, şok dalgaları malzemeyi sıkıştırmakta ve teğetsel baskıları oluşturmaktadır. Bu baskıların yoğunluğu kayacın dinamik dayanımının yüksek olması durumunda kayada radyal çatlaklar oluşturacaktır.

Baskı dalgalarının yayılması sırasında ve sonrasında, yüksek basınçlı patlayıcı gazları Şekil 3.2’de gösterildiği gibi çatlakları genişletmekte ve uzatmaktadır. Bu genişleme hacim artışına, kayada süreksizliğe ve patlayıcı gaz basıncının düşmesine neden olur.



Şekil 3.2 : Kaya ortamında gazın yayılması (Scott, 1996).

Serbest yüzeylerde dengesiz kuvvetlerin oluşmasına engel olunamadığından bu kuvvetler örtü tabakasını hareket ettirmektedir. Patlayıcı gazları genellikle çatlak takımları veya sıkılama içinden atmosfere ulaşır. Sınırlanmış basınç, patlayıcı gazların atmosfere ulaşmasından sonra hızla düşer ve kaya parçaları momentumun etkisi ile hareketine devam eder.

Patlatma prosesinin bu modeli, patlatma performansına etki eden birkaç önemli kayaç özelliğini tanımlayabilmektedir. Bu özellikler;

- Patlatma deliği cidarındaki bükülmeleri kontrol eden kaya sertliği
- Patlatma deliği cidarında görülen çatlakları kontrol eden dinamik basma dayanımı,
- Baskı dalgalarının enerjisinin birincil kırılma enerji düzeyine düşene kadar ilerleyebileceği uzaklığı kontrol eden kayacın kırılma parametreleri,
- Kırılmanın gaz ve şok evrelerinde yeni çatlak oluşumunun büyüklüğüne etki eden kayacın dinamik gerilme dayanımı,
- Patlayıcı gazlarının hareketini, şok dalgalarının kırılma etkisini ve blok boyut dağılımını belirleyen çatlak sıklığı, kökeni ve karakteri,
- Kayacın ataletini ve buna bağlı olarak patlatma ile uygulanan kuvvetlere vereceği tepkiyi belirleyen kayacın yoğunluğudur.

Değişik patlatma koşullarında, yukarıdaki özelliklerde değişme olması durumunda, bu değişmelere bağlı olarak patlatma tasarımında düzenlemeler yapılmalıdır. Patlayıcıdan elde edilecek verimli enerjiyi belirleyen patlatma geometrisi ve gecikme düzenlemeleri, patlatma mühendisi tarafından belirlenmelidir. Tüm bu tasarım parametreleri patlatma sonunda ortaya çıkması istenen şekil, gevşeklik ve tane boyutuna bağlı olarak düzenlenmelidir (Scott,1996).

3.2. PATLATILABİLİRLİĞE GELENEKSEL YAKLAŞIM

3.2.1. Kaya Sabiti “c”

Langefors ve Kihlström (1978) patlatma mühendisliğinin modern çağını başlatan kişiler olmuşlardır. 1963 yılında ilk baskısını yaptıkları “ Kaya Patlamasındaki Modern Teknikler” adlı kitaplarında, verimli patlatma performansı için gerekli şarj miktarını belirleyen kaya sabitini (c) tanımlamışlardır. Ortaya koydukları formülde, farklı patlatma geometrileri için kabarma faktörü ve diğer patlatma parametrelerinin belirlenmesini sağlamışlardır. Langefors ve Kihlström genellikle kırılğan ve sert olan İskandinav kayaçlarında çalışmışlar ve bir çok tasarım için uygun olacak başlangıç noktası olarak nominal değer $c = 0,4 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlemişlerdir. Sertliği ve yapısal

karakteri standart İskandinav granitlerinden farklı olan alanlarda yapılacak uygulamalarda bu sabitin optimize edilmesini önermişlerdir.

Bu yaklaşım 1993 yılında, 1 m³ kayacın gevşetilmesi ve yerinden çıkarılması için gerekli olan spesifik şarjın belirlenmesine yönelik test patlatmalarını tanımlayan Persson tarafından geliştirildi. Çatlak ve tabakaların kökenine ve genişlemesine bağlı olarak “c” değeri 0,2 ile 1 kg/m³ arasında değişmesine karşın bir çok kayaç için bu değer 0,4 kg/m³ olduğu belirtilmiştir. Bir kez belirlenecek bu sabit gerekli örtü tabakası ve diğer tasarım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir (Scott,1996).

3.2.2. Çatlak Mekanîği Çalışmaları

Küçük kayaç numunelerinin kontrollü patlatılmasına yönelik çalışmalara hayli çaba harcanmıştır (örneğin 1983 yılında Rustan). Kritik örtü tabakası, kritik şarj, kırılma açısı ve patlatma sonrası tane boyut dağılımı gibi parametreler bu deneysel çalışmalarla ilişkilendirilmiştir. Her deneyden değişik parametrelerin ilişkilendirilmesi ile elde edilen verilerin sonucunda, malzeme özelliklerine bağlı birbiri ile uygun patlatma performansının tanımlanması elde edilmemiş ve patlatma tasarım parametreleri planlanmıştır. Her parametre için çok fazla seçim olmasından dolayı Hagan (1983) ve Hoek ile Bray’ın (1981) özetlediği tasarım önerilerinden farklılaşmaktadır.

Birçok teorik ve küçük ölçekli patlatma araştırmaları, homojen ve bozulmamış kayaçlarda yapılmasına karşın gerçekte patlatılacak olan kayaç eklemler, çatlaklar ve yataklanmalardan etkilenecektir. Bu özelliklerin birçoğu kaya kütlelerinin statik davranışında ve kazılabilirliğin stabilitesinde belirtilmemiş olup çoğunlukla jeoteknik yaklaşımlarla açıklanmaya çalışılmıştır. Öte yandan bu özellikler kayacın patlatma anındaki davranışlarını belirleyen kritik parametrelerdir (Scott,1996).

Patlatma operasyonlarının birçoğu önceden yapılmış patlatmalardaki performanslara bağlı olarak tasarımların yeniden düzenlenmesini kapsamaktadır. 1983 yılında Hagan, patlatma parametrelerinin patlatma performansına etkisi konusunda kapsamlı bir yorum ortaya koymuştur. Bu yorum sayesinde kayacın daha masif daha sert veya daha dayanıksız olduğu farklı durumlarda patlatma tasarımının nasıl olması gerektiğini

belirtmektedir. Patlatma tasarımları ile ilgili ticari kitap 1987 yılında Dupont Blaster's Handbook adıyla yayınlanmıştır. Fakat bu kitapta farklı kayaç türlerinde uygulanacak yeni patlatma tasarımları ile ilgili çok az bilgi vardır. Birçok açık ocakta patlatma tasarımları deneme – yanılma yöntemi ile bulunmakta ve bu tasarım tüm ocak için standart olarak kullanılmaktadır.

Bununla birlikte kaya kütlesinin özellikleri sürekli olarak değişmekte ve farklı kayaç özelliklerine bağlı olarak patlatma tasarımları yeniden düzenlenmelidir. Birçok açık işletmede patlatma tasarımı belirlenirken ocak içindeki en zor materyal göz önüne alınmaktadır. Bunun sonucu olarak ocakta bir çok bölgede gereğinden fazla patlatma enerjisi ortaya çıkmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için ocaktaki farklı kayaç tiplerine yönelik birkaç farklı patlatma tasarımı geliştirilmelidir.

3.3. KAYA KÜTLESİNİN ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ

3.3.1. Parametrelerin Kontrolü

Kaya kütlesinin özelliklerinin patlatma performansına etkisi, genellikle kayaç numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin laboratuvarında ölçülmesine yönelik çalışmalarla yapılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalar genellikle kayaç numunesinin kaya kütle özelliklerinin tümünü taşınamaması nedeniyle başarılı sonuç vermemiştir. Hagan (1983), kaya kütle yapısının etkisini de bu karmaşık mekanizmaya dahil etmiştir. Bununla birlikte kayaçla patlama arasındaki ilişki şu şekilde verilmiştir ;

- Sert kayaçlarda yeni çatlaklar oluşturabilmek için büyük şok enerjisine gereksinim vardır,
- Çatlakların ve süreksizliklerin yokluğu istenen tane boyutuna ulaşmak için gerekli patlatma çabalarını arttırır,
- Yumuşak veya plastik kayaçlar şok enerjisinin emilmesine yol açar. Gevşemiş kayaçların oluşması için daha fazla enerjinin verilmesi zorunludur.

Bu ilişkiler kayacın patlatma karakteristiğini (patlatılabilirliğini) tanımlamak için kullanılabilir. Tanımlamanın sağlıklı olabilmesi için kayaçla ilgili ölçümler bahsi geçen

ilişkiler doğrultusunda yapılmalı ve analizlere dahil edilmeyen fakat sonuca etkisi olan “dolgu” faktörünün yokluğunda uygulanmalıdır.

Kaya kütlesi; birden fazla kaya tipini, farklı çatlak ve baskı koşullarını kapsayabilir. Farklı kayaç türü sayısına bağlı planlar jeoteknik çalışmalar kapsamında geliştirilmiş olup bu çalışmalar Bölüm 2.3’de “Kayaçların Mühendislik Sınıflamaları” başlığı altında ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu sınıflamalardan her biri, patlatma tasarımlarının belirlenmesi için kullanılabilir olsa da bu çalışma kapsamında arazi verilerinden özellikle süreksizlikleri daha fazla değerlendirme içersine alan GSI sınıflaması tercih edilmiştir.

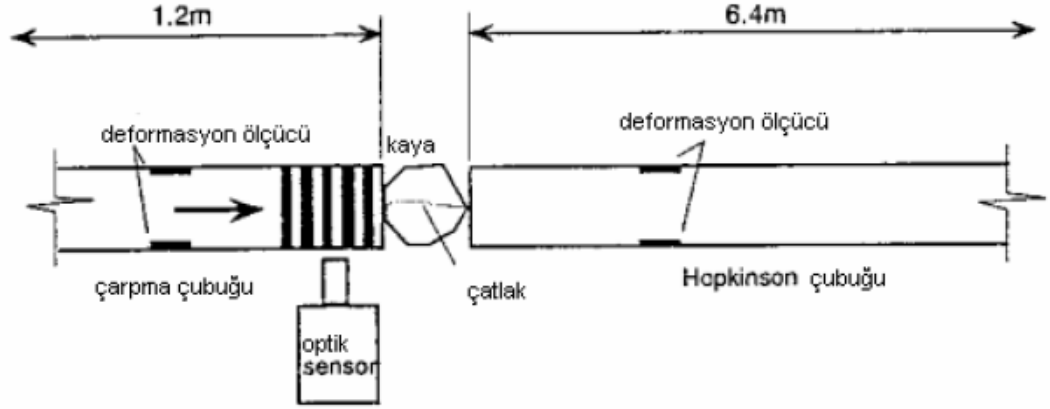
Patlatma konusundaki tecrübeler göre kaya ortamlarının aşağıda belirtilen parametreleri patlatma performansını etkilemektedir ;

- Dayanım parametreleri,
- Deformasyon parametreleri,
- Absorbsiyon parametreleri,
- Yapısal parametreler,
- Ufalanma parametreleri.

3.3.2. Dayanım Özellikleri

Diğer bir çok malzeme gibi kaya da gerilme oranına duyarlıdır. Kayacın dayanımı, yükleme oranının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Bunun anlamı patlatma analizleri için uygun olan dayanım, klasik statik “örselenme” testlerinden biraz farklıdır. Araştırmacılar dinamik dayanımın, statik dayanımdan 10 kat fazla alındığı genel ayarlamaların yanlış olduğunu belirten, zayıf kayaçların gerilme oranının sert kayaçlara nazaran daha fazla duyarlı olduğunu bulmuşlardır.

Hopkinson ayırma çubuğunun kullanıldığı (Şekil 3.3) teknikte kayacın patlatma durumundaki çekme ve yükleme oranlarını belirlemeye yöneliktir. Sonuçta bulunan kırılma enerjisi, ilerki bölümlerde de bir indirenmiş modeli verilecek olan patlatma analizlerinde kullanılabilir. Ayrıca bu enerji, tane boyutunu belirlemekte ve Kuz – Ram gibi kırılma modellemelerinde de kullanılabilir.



Şekil 3.3 : Hopkinson ayırma çubuğu (JKMRC, 1996).

3.3.3. Deformasyon Özellikleri

Elastisite (young) modülünün mekanik özellikleri ve Poisson oranı, kayacın yükleme ve patlayıcı enerjisi altında nasıl davranacağını belirler. Bu özelliklere dair bilgiler “Kayaçların Deformasyon Özellikleri” başlığı altında bölüm 2.2.4.2.’de verilmiştir. Eğer kritik gerilme yenilmenin sınırı olarak kabul edilirse, elastisite modülünün değeri artacak, patlayıcıdan elde edilen baskı ve gerilme enerjileri de artacaktır. Ayrıca elastisite modülü, kaya ortamındaki gerilme durumu, yükleme oranı ve yataklanma, tabakalanma ve mikro yapısal gibi heterojen özelliklere bağlıdır (Scott,1996).

Kayaçların mühendislik özellikleri içerisinde dayanım özellikleri ile deformasyon özellikleri bir arada jeomekanik özellikleri temsil etmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında yapılan deneysel ve literatür çalışmalarında patlatma performansı ile ilişkilendirilecek iki önemli özellik olarak ele alınmışlardır.

3.3.4. Absorbsiyon Özellikleri

Kayacın patlayıcı enerjisini absorbe etmesi veya geçirebilmesinde patlayıcı seçimi, patlayıcı dağılımı ve gecikmelere bağlıdır. Sismik itmelerin (hareketin) “ivme” si kayaç içinde ilerledikçe azalır. Bu olay iki mekanizma doğurur;

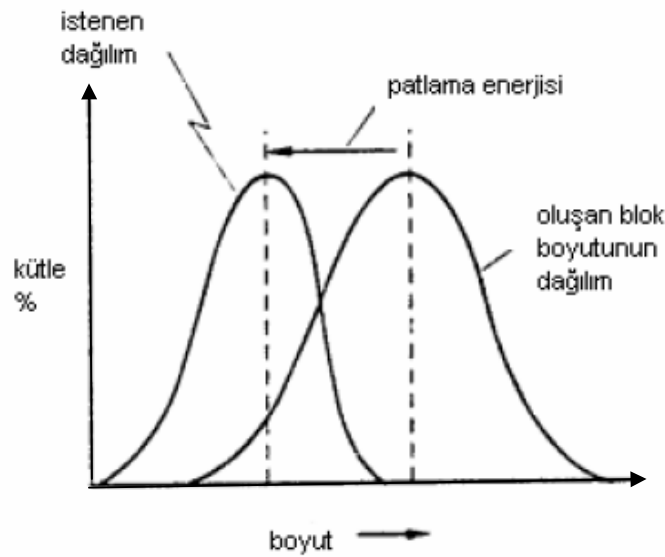
- Toplam enerjide bir kayıp olmamasına karşın, geometrik olarak genişleme birim kaya hacmi başına düşen enerjiyi azaltır,

- Enerji dağılıma mekanizması enerjiyi itmelerden uzaklaştırır. Bu enerji kaybı malzemede içsel sürtünmelere sebep olur ki bu kayıp malzeme içinde oluşabilir veya ısı kaybı olarak açığa çıkabilir.

Patlatma enerjisinin hızla yayılarak kayaçta içsel sürtünmelere sebep olması sonucunda kayaçta şok dalgaları oluşacaktır. Kaya ortamlarının sismik karakteristiği detaylı patlatma görüntüleri ile ölçülebilir.

3.3.5. Yapısal Özellikler

Patlatma prosesinde, Şekil 3.4' te gösterildiği gibi, fazla patlayıcı dolayısıyla fazla patlatma enerjisi gereksiz boyut küçültme işlemine sebep olmaktadır. Kayacın istenildiği boyutlarda parçalanması için gerekli patlatma enerjisinin belirlenmesinde bozulmamış kayaç ve süreksizlikler önemli rol oynamaktadır. Doğal blokların şekil ve boyut dağılımı ve kayaçları birbirine bağlayan bozulmamış köprülerin patlatma performansına ve parçalanmaya etkisi büyüktür. Birçok patlatmada açığa çıkan malzemenin çoğunluğunu patlatmanın etkisiyle kolayca gevşeyen ve serbest kalan kaya parçaları oluşturmaktadır. Eğer doğal blok boyutları, patlatmadan elde edilecek parça boyutlarından çok büyükse, istenen parça büyüklüğünü sağlamak için önemli miktarda patlatma enerjisine ihtiyaç olacaktır (Scott,1996).



Şekil 3.4 : Boyut küçültme işlemi (Scott, 1996)

Jeoteknik haritalama ve kayaçtaki çatlakların belirlenmesi genellikle şevin veya basamağın stabilitesini belirlemeye yönelik açık ocak işletmelerinde mutlaka yapılması gereken bir mühendislik çalışmasıdır.. Patlatma için önemli olan birçok süreksizlik, küçük ölçekli olup stabiliteye etkisi fazla değildir. Bunun sonucu olarak masif veya az sayıda eklem içeren olarak tanımlanan kayaçlar gerçekte, parçalanmaya etkisi büyük olan ve Şekil 2.9'da verilen GSI sınıflama abağında en altta yer alan foliasyonlu – laminalı kaya ortamları olabilmektedir.

3.3.6. Ufalanma Karakteristikleri

Patlatma mekanizması, kayacın dinamik çatlaklarına ve patlayıcıya yakın olan patlatma deliği cidarındaki parçalanmaya yönelik olarak, gaz ve şok mekanizmaları yardımı ile tanımlanmıştır. Ufalanma, partiküllere enerjinin uygulanması ile yapılan boyut küçültmedir. Bu terim madencilik işlemlerinde genellikle parçalanma ve öğütme işlemlerine yönelik olarak kullanılır. Bununla beraber, parçalanma veya ufalanma anındaki kırılma davranışları kayacın patlatmadaki kırılabilirliğini belirlemeye yönelik olarak kullanılabilir (Kojovic, 1995).

3.4. PATLATILABİLİRLİK

Basit kaya özelliklerini temel alan, patlatmanın belirlenmesine yönelik kanıtlanmış teorik yaklaşım bulunmamaktadır. Kanıtlanmış olan kaya metaryalinin ve patlatmanın karmaşıklığıdır. Bununla beraber kayacın patlatılabilirliğini belirlemeye yönelik birçok çalışma vardır. Bunların birçoğu kayacın homojen ve kırılğan olduğunu kabul edip, farklı kaya tiplerindeki gözlemlere dayanır. Bunlarla ilgili örnekler 1996 yılında Fraekel tarafından bulunan, patlatma geometrisinde gerekli çapı ve yüksekliği ortaya koyan ampirik formülleri ve patlatılabilirliği içermektedir.

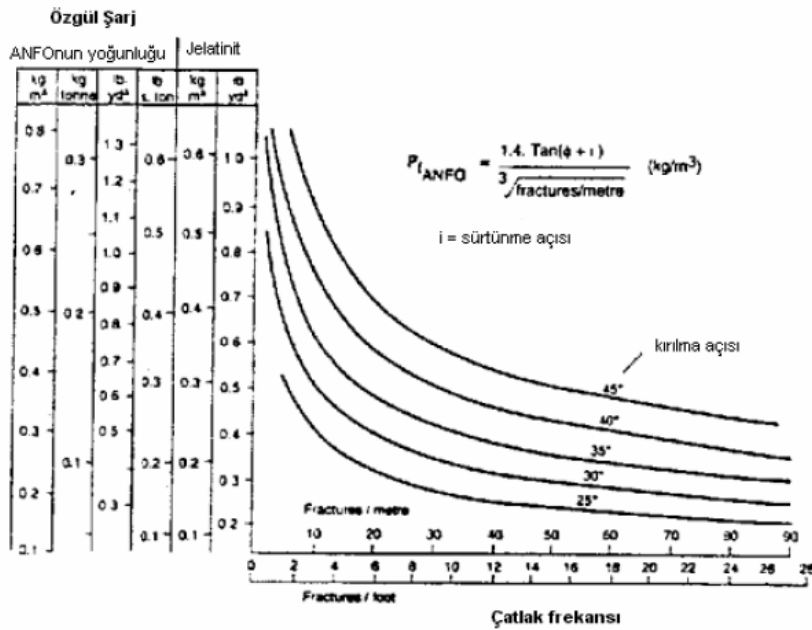
Farklı patlatma koşullarındaki patlatma tasarımlarına yönelik kullanılan birçok tanımlama bulunmaktadır. Bunların yaklaşımı aşağıda açıklanmıştır (Scott,1996).

3.4.1. Ampirik Yaklaşımlar

3.4.1.a. Ashby Yaklaşımı

Birçok araştırmacı; farklı materyallerdeki patlatmaları tanımlamak için kendi yaklaşımlarını geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımlardaki sorun, bunların sistematik bir yapıya veya forma dahil edilmemiş olması ve lokal koşullara göre doğruluklarının tartışılıyor olmasıdır. Yine de bu araştırmalar yıllardır madencilik sektörü için olumlu olarak kullanılmaktadır. Bunlar içinde oldukça yaygın fazla kullanılan bir yaklaşımın sahibi olan Ashby, Bougainville Bakır Ocağı'nda ampirik patlatılabilirlik tasarımlar geliştirmiştir (Scott,1996).

Ashby, Şekil 3.5' teki gibi Bougainville' de çatlak sıklığı ve sürtünme açısını temel alan, gerekli kabarma faktörü için kullanılması gereken patlayıcı miktarını belirlemiştir. Ashby' e göre çatlak yoğunluğu ve kayaç dayanımının (sürtünme açısı olarak belirtilmiştir) patlatma performansına etkisi çok fazladır. Bu kayaç tanımlamaları ocaktaki farklı birçok bölgeden alınan numuneler ile belirlenmiştir. Bu yöntem ile hedeflenen kabarma faktörüne ulaşmak için gerekli tasarımın belirlenmesi kolaylaşmıştır.



Şekil 3.5 : Bougainville için patlatılabilirlik dizaynı (Scott,1996).

3.4.1.b. Lilly Yaklaşımı

1986 yılında Lilly, eklem yoğunluğu ve kökeni, kayaç yoğunluğu ve sertliğe bağlı olarak patlatma indeksi geliştirmiştir. Bu indeks açık ocak demir madenlerindeki patlatmalar sonucundaki kabarma faktörüne bağlı olarak düzeltilmiştir. Lilly' nin parametreleri Tablo 3.1.' de tanımlanmıştır.

$$BI = 0,5. (RMD+JPS+JPO+SGI+H)$$

BI : Patlatılabilirlik İndeksi

Lilly' nin patlatılabilirlik modelini patlatma tasarım aracı olarak kullanabilmek için kayacın kırılması için gerekli olan kabarma faktörü ile patlatılabilirlik indeksi arasındaki ilişkiyi geliştirmek gerekir. Bu ilişki çeşitli kayaçlarda yapılan bir dizi patlatmalar ve daha önce başkaları tarafından yapılmış patlatma verileri kullanılarak geliştirilebilir.

Tablo 3.1 : Lilly' nin parametreleri (Lilly, 1986)

Parametre			Derece
RMD	Kaya Kütlesi Türü	Toz Halinde	10
		Blok Halinde	20
		Masif Kütle Halinde	50
JPS	Eklem Düzlemlerinin Mesafesi	Çok yakın (<0,1 m)	10
		Normal (0,1-1 m)	20
		Açık (>1 m)	50
JPO	Eklem Düzlemlerinin Konumu	Yatay	10
		Yüzeğe doğru dalımlı	20
		Aynaya doğru dik dalımlı	30
		Dibe doğru dalımlı	40
SGI	Etkin Spesifik Yoğunluk	$SGI = 25 \times SG - 50$ $SG : (t/m^3)$
H	Sertlik		1-10

3.4.1.b. Birleştirilmiş Patlatma Sonuçları

Patlatma performansına etkisi olduğu bilinen kayaç özelliklerini sınıflandıran ve bunları patlatmanın bir parçası olarak ele alan yaklaşımlar olumlu sonuçlanmıştır. Kömür tabakası için geliştirilen patlatılabilirlik analizinde şu parametreler bulunmaktadır:

- Kaya kütlesi : Dayanım, yoğunluk, (elastisite) young modülü
- Yapı : Ortalama blok boyutu, yapının etkisi
- Tasarım : Hedeflenen parça boyutu, istenen kabarma, kapanmanın sağlanması, operasyon büyüklüğü
- Çevre : Su

Bu parametreler sahada ölçülebilir ya da yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Kaya kütlesi dışındaki parametreler istenilen sonucu verip vermemelerine bağlı olarak patlatmayı zorlaştıran veya kolaylaştıran ve tasarımın yeniden düzenlenmesine neden olan parametrelerdir. Bu parametrelerin patlatma performansına etkisinin belirlenebilmesi için kesin bir yapıya sahip olmak ya da çok fazla deneme yapmak gerekir.

Basma dayanımı, yoğunluk ve elastisite modülü kayacın sertlik karakterini temel dayanımını tanımlayan verilerdir. Yapısal haritaların analiz edilmesi veya kayaçtaki açılmaların gözlenmesi ile sahadaki ortalama blok boyutu belirlenebilir. İstenen parça boyutunun oranı ve sahadaki blok boyutu, tasarımda gerçekleşmesi istenen kırılmaların ölçülmesini sağlar. Kabarma, kapanma ve operasyonun ölçü parametreleri; bir patlatmadan elde edilecek verilerin farklı bir bölgede yapılacak olan patlatmalara aktarılmasını sağlar. Küçük hacimli yükleme makinaları, büyüklere nazaran daha düşük kırılma gücüne sahiptir. Gevşek ve daha fazla kabarmış patlatma yığınları bu makinaların verimliliğini artırır. Kayacın gevşetilmesi, patlamadan elde edilecek kabarmanın büyüklüğüne bağlıdır ve bu kabarma parametreleri patlatılabilirlik analizlerinde hesaba dahil edilebilir.

3.4.1.c. Önerilen Patlatılabilirlik Yaklaşımı

Lilly tarafından geliştirilen patlatılabilirlik planı; malzemenin sertliği, eklem sıklığı ve kökeni üzerinde önemlidir. Ashby' nin Bougainville madeni için hazırladığı patlatılabilirlik planı eklem sıklığı ve eklem kesme dayanımına ve ölçülen dayanım, kırılma açısı, patlatma çevresi ve hedeflenen patlatma performansı gibi yukarıda açıklanan parametrelere bağlıdır. Farklı koşullardaki kayaçların çokluğu, farklı madencilik operasyonları ve beklenen sonuçların farklı olmasından dolayı tek bir

patlatılabilirlik planının verimli olması mümkün değildir. Yapılan çalışmalar genel planlar ve farklı bölgelerdeki farklı uygulamalar için yol gösterici olabilir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında agrega üretimi amaçlı olarak açık işletme basamak yöntemi ile işletilen Gebze/Darıca'da bulunan dolomit sahası ile Kemerburgaz/Cendere'de bulunan kumtaşı sahasından alınan örnekler ve deme-patlatma verileri kullanılmıştır. Burada sahadan alınan örnekler üzerinde özel bir beton şirketinin laboratuvar imkanları ve İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarları kullanılarak yapılan tek eksenli basınç, deneyi, nokta yük dayanım deneyi ve yoğunluk deneyleri ile elde edilen iki farklı kaya ortamına ait değerler kaya ortamlarının mühendislik özellikleri ve sınıflarını belirlemek amacıyla saha gözlemleri ile beraber kullanılmıştır. Ayrıca bu iki ayrı kaya ortamında yapılan delme patlatma operasyonları kayıtları tutulmuş, özellikle patlatma sonrası agrega üretimine gönderilen malzeme miktarı ile bu malzemenin elde edilmesi için yapılan patlatmada kullanılan özgül şarj miktarı ile birim derinlikte delik delme süreleri kaydedilmiştir.

Her iki açık ocak işletmesinden alınan delme- patlatma kayıtları, arazi gözlemleri ve laboratuvarında elde edilen kaya ortamlarına ait jeomekanik özellikler GSI Kaya Sınıflaması abağında bir araya getirilerek "patlatılabilirlik" kavramı bu abak üzerinde gösterilmeye çalışılmıştır. Laboratuvar verilerinin Cendere bölgesi için olan kısmı, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde lisans tezi çalışması olarak Köse (2010)'dan alınmış olup bu deneyler kaya mekaniği laboratuvarında yapılmıştır.

Ayrıca MATLAB 7.5 R2007B bilgisayar programı ile indirgenmiş dinamik modelleme yöntemleri kullanılarak, özellikleri ve sınıfı belirlenen kaya ortamında, tek bir delikte oluşacak basınç esas alınarak patlatma simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyonda patlatma girdisi olarak basınç, kütle, sönümleme ve yaylanma katsayısı olarak herhangi bir ölçüte dayanmayan ve gerçek ortamları temsil etmeyen sayısal girdiler kullanılmıştır. Program çıktısı olarak ise ivme, hız ve hareket grafikleri elde edilmiştir. Burada sönümleme ve yaylanma katsayılarının, kaya yoğunluğu – elastisite modülü ve ortamdaki süreksizlikler ile ilgili olduğu varsayımı ile çalışmanın daha kapsamlı ve gerçek ortamlarla ilişkilendirilebilecek hale gelmesi ayrı bir çalışma ile ele alınabilir.

4.1. ARAZİ ÇALIŞMALARI

İstanbul Avrupa yakası ve Kocaeli ili Gebze İlçesi Darıca Taşlıman mevkiinde bulunan iki ayrı açık ocak işletmesinde sürdürülen arazi çalışmaları, bu tesislerin aynı zamanda çalışanı olarak bulunmaktan kaynaklı olarak uzun dönem deneyimsel gözlemleri de kapsamaktadır. Yapılan arazi çalışmalarında kaya kütle özelliklerine yönelik olarak özellikle laboratuvar ortamında belirlenmesi mümkün olmayan süreksizlik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra delme patlatma operasyonlarında birim zamanda delik delme mesafeleri, patlatma dizaynı parametreleri ve özgül şarj değerleri kayıt altına alınmıştır. Her iki tesisinde aylık ve yıllık performans değerlendirmeleri çalışmaları kapsamında tutulan bu kayıtlardan bu çalışmanın amacına en uygun olanları seçilerek arazi verisi olarak kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında her iki bölgede temsilci olması bakımından 5'er adet arazi verisi üzerinde çalışılmıştır.

Temsilci olarak alınan patlatmaların yaz mevsiminde ve delik içlerinin kuru olması dolayısıyla emülsiyon tip patlayıcıya ihtiyaç olmadan sadece ANFO kullanılarak yapılmış olmasına dikkat edilmiştir. Özgül şarj hesaplarında yemleme amaçlı olarak kullanılan dinamitin ağırlığı ihmal edilmiştir. Her iki sahada da kuru deliklerde kullanılan patlayıcıyı temin eden firma aynı olmakla beraber bu firma tarafından verilen ANFO'ya ait teknik özellikler Tablo 4.1.'deki gibidir.

Tablo 4.1 : Cendere ve Darıca Bölgesinde kullanılan ANFO'ya ait teknik özellikler

Yoğunluk(gr/cm^3)	0,77-0,82
Enerji(Mj/kg)	3,90
Gaz Hacmi(lt/kg)	974
Patlatma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)	2838
V.O.D.(m/s)	4000*
Suya Direnci	Yok

* Sıkıştırılmış 125 mm plastik boruda

4.1.1. Cendere Bölgesi Arazi Çalışmaları

Cendere bölgesi açık işletmeleri Avrupa yakasının agrega ihtiyacının yaklaşık % 30-35 kadarını karşılamakta olup Eyüp İlçesi, Kemerburgaz Cendere mevkiinde bulunmaktadır. Ölçümlerin yapıldığı açık işletme sahası 65 ha'lık maden ruhsatına sahip olup bölgedeki en büyük tesislerden biridir (Foto 4.1).

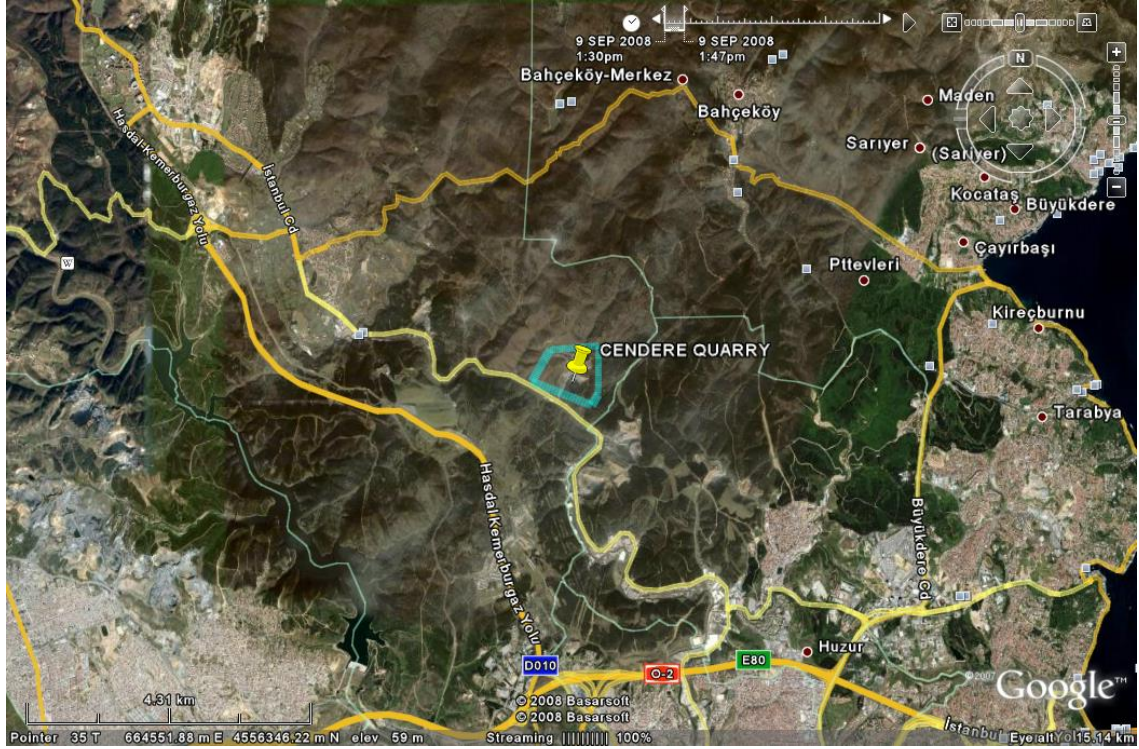


Foto 4.1 . Cendere bölgesi açık işletmelerinin uydu görüntüsü.

Cendere Bölgesi ve çevresi İstanbul 'un büyük bir alanında yaygın olarak mostraları bulunan Paleozoyik yaşlı kayalardan oluşmaktadır. Paleozoyik istifin İstanbul'daki en genç birimi olan Trakya formasyonu başlıca 3 üyeye ayrılmıştır. Bu birimin üzerinde İstanbul'un batı kesiminde oldukça geniş alanlarda yüzeylenen neojen çökelleri bulunmaktadır.

Trakya formasyonu yanal ve düşey yönlerde değişim gösteren kalın şeyl, grovak ve litik - konglomera ardışıklı istifinden yapıldır; hakim olarak fliş fasiyesindedir. Karadan türeyen materyalin ve karbonatların dağılımına göre Trakya formasyonu üç üyeye bölünür, alttan üste: Cebeci Kireçtaşı, Küçükköy Kumtaşı Üyesi ve Çamurluhan Şeyl

Üyesi. İnceleme sahasındaki genel formasyon kumtaşıdır. Kumtaşı silisli bir yapıdır ve kum taneciklerinin çökmesi ve bunların çimentolanması ile oluşmuş sert bir kayadır. Ancak sahada tam oluşmamış kayalar da bulunmaktadır.

Arazinin geneline hakim olan “Kumtaşı” silisli bir yapıdır ve kum taneciklerinin çökmesi ve bunların çimentolanması ile oluşmuş sert bir kayadır. Mikroskop altında yapılan petrografik analizi incelemelerinde söz konusu malzemede farklı tane boyutlarında iri-orta ve ince olmak üzere, köşeli, yarı köşeli veya az yuvarlatılmış tane şekillerine sahiptir. Mikroskop altında iri taneli kuvars ve feldspat (plajiyoklas) kristallerini bir çimento gibi çevreleyen kuvars, plajiyoklas ile klorit; serizit gibi mika grubuna giren ince taneli birbirleriyle girift yapıları bulunmaktadır.

Mineral oranlarına bakıldığında %70 Kuvars, %10 Plajiyoklas, %8, Klorit Serizit ve %4-5 İmpüne (Opak) demiroksitler yer almaktadır. Mika grubundan olan ve inceleme konusu malzeme içinde yer alan Klorit ve Serizit, mikroskop altında matris içinde, 0,3 mm-0,7 mm gibi oldukça küçük taneler, diğer Kuvars ve Plajiyoklas kristalleri ile iç içe girmiş (Kuvars+Plajiyoklas+Klorit beraberce sıkışmış) tek mineral halinde izlenirler. Kumtaşı malzemesi kompakt masif yapısı içinde teknolojik özellikler açısından bakıldığında yoğun (2,720 kg/cm³) Porozite ve boşluk oranları %1 'in altında, su içeriği. %0,5 gibi çok düşük, tek eksenli basınç dayanımı 1340 - 1350 kg/cm² oldukça yüksek Los Angeles aşınma deneyi 500 devirde % 18-20 oranında kayıp vermektedir. Bu özellikleriyle söz konusu malzeme; kompakt yüksek dayanımlı ve diğer bir deyimle granit eşdeğer bir Kuvars - Feldspatik kumtaşı (Gre) özelliğindedir. Ayrıca sahada tektonizmanın etkisi rahatlıkla görülmekte olup, yapısal unsurlardan senklinal ve antiklinal oluşumlarına rastlamak mümkündür. Kalın – orta ve ince tabakalı olan formasyonun ruhsat sahasında başlıca kumtaşı – silttaşı ile temsil edilmesine ek olarak, özellikle kiltası-silttaşı tabakalarında düşük derece metamorfik özellik gösteren şistleşmeler ve yapraklı yapı dikkat çekmektedir (Foto 4.2).

Cendere bölgesinde incelenen maden ruhsatlı sahanın ölçeksiz jeoloji haritası Şekil 4.1.'de verilmiştir.

Şekil 4.1. Cendere Bölgesinde çalışılan maden ruhsatlı saharmın jeolojik haritası (ölçeksiz).

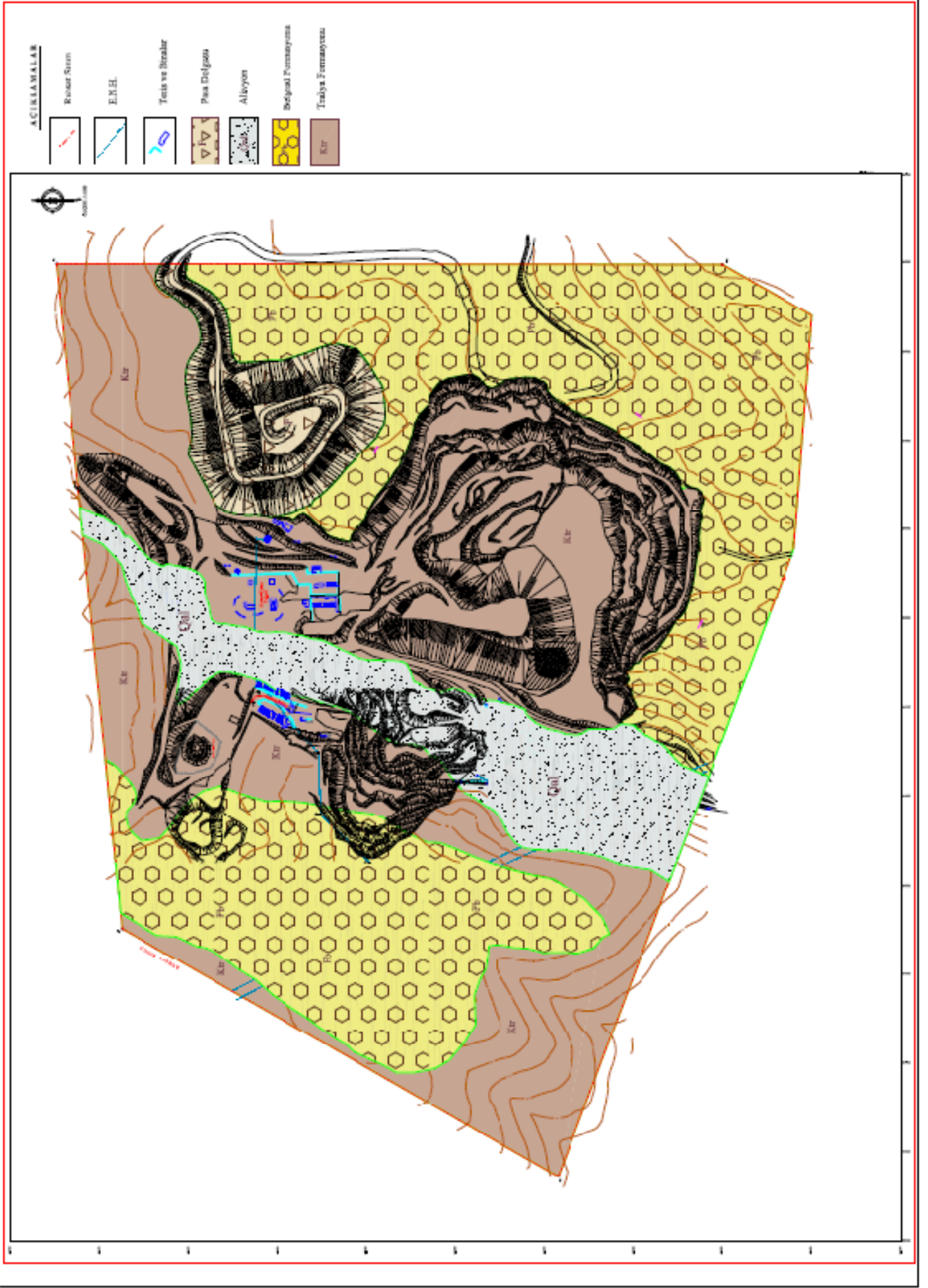




Foto 4.2. Cendere bölgesi açık ocak işletmesinden görünüm (B-D).

Cendere bölgesinde kumtaşı – silttaşı – şey ardalanmalarının yanı sıra kayacın öz yapısını bozarak bugünkü konumlarına getiren yapısal unsurlar sonucu zayıf zonlara inklüzyon sonucu yerleşen mağmatik kökenli, farklı bileşimli ve özellikle volkanik bazik bileşimli kayalar “Dayk” olarak adlandırılmış ve masif kalın tabakalı olarak gözlemlenmişlerdir.

Agrega üretiminde kullanılan gri – siyahımsı gri renkli bu birimin üzerinde ise tabanı grovaklarla başlayan, üste doğru ayrılmış yada tutturulmamış özellik sunan kahverengi – sarımsı gri renkli Belgrad Formasyonu gelmektedir. Belgrad formasyonuna ait birimler saha genelinde 10-40 m arasında değişken kalınlık sunmakta olup, beton agregası üretiminde kullanılacak özelliğe sahip değildir.

Cendere bölgesinde 5 ayrı patlatma operasyonu (Foto 4.3) öncesinde yerinde yapılan kaya tanımlarında ve süreksizlik ölçümlerinde Tablo 4.2’deki veriler elde edilmiştir.



Foto 4.3 : Cendere bölgesi açık ocak işletmesinde ölçüm yapılan bölgeler.

Burada 4 ve 5. Bölge olarak tariflenen ve agrega üretimi konusunda işletmenin oldukça problemlili alanlarını oluşturan kesimlerde zaman zaman hiç patlatma yapılmaksızın doğrudan 52 ton'luk ekskavatörler ile kazılarak üretim yapılmaktadır. Bu bölgeler kaya özellikleri bakımından orta-zayıf olmakla beraber yapısal özellik bakımından tektonizmanın ve düşük derecede gelişmiş şistozite ile metaforfizmaya bağlı foliasyonlanmanın etkisi nedeniyle agrega üretiminde kaliteyi olumsuz yönde etkileyen yapraksı malzeme üretimine neden olmaktadır. Ancak ocak işletme ömrünün ve rezervin optimizasyonu için ocak sahasındaki iyi – çok iyi sınıftaki kayalarla birlikte üretime verilmek zorundadır. Bu nedenle agrega kalitesi belirli bir seviyede tutulmuş ve tek başına agrega olamayacak kadar kötü niteliklere sahip kayalarda üretime dahil edilmiş olmaktadır.

Tablo 4.2 : Cendere Bölgesine ait arazi gözlemleri

	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4	Bölge 5	
Kayacın adı	Kumtaşı	Kumtaşı- Siltaşı	Silttaşı – Kumtaşı	Silttaşı- Kiltaşı	Kiltaşı – Şeyl	
Renk	Gri – grimsi yeşil	Koyu gri- Gri	Gri – Koyu Yeşilimsi Gri	Siyahımsı Gri	Siyamsı Gri	
Doku	Düzensiz tabakalı	Düzensiz tabakalı	Düzensiz tabakalı	Düzensiz tabakalı - Foliasyonlu	Düzensiz tabakalı- Foliasyonlu	
Süreksizliklerin Özellikleri	Tipi	Eklem - Tabakalanma	Eklem – Tabakalanma	Eklem – Tabakalanma	Eklem – Tabakalanma – Foliasyon	
	Durumu	Kapalı	Kapalı	Kapalı – Kuvars Dolgulu	Kuvars – Kil dolgu	Kapalı
	Hacimsel eklem sayısı (J_v : eklem/m ³)	4	5	4	11	12
	Yapısal Özellik puanı (SR)	55,53	51,63	55,53	37,86	36,31
	Süreksizlik Yüzey Koşulu (SCR)	Pürüzlülük (R_r)	Pürüzlü (5)	Az Pürüzlü (3)	Az Pürüzlü (3)	Düz (1)
Bozunma Puanı (R_w)		Az bozunmuş (5)	Az bozunmuş (5)	Az bozunmuş (5)	Az bozunmuş (5)	Orta derecede bozunmuş (3)
Dolgu Puanı (R_f)		Yok (6)	Sert (4)	Sert (4)	Yumuşak (2)	Yumuşak (2)
Toplam SCR ($R_r + R_w + R_f$)		Çok iyi, 16	İyi, 12	İyi, 12	Orta, 8	Zayıf (6)
Yaklaşık GSI Değeri	65-70	50-55	55-60	35-40	30-35	

Cendere bölgesindeki açık işletmede Dainong 2000 model delici kullanılmakta olup (Foto 4.4), Delme patlatma operasyonlarına dair kaydedilen yıllık verilerden elde edilen ortalama değerler Tablo 4.3'deki gibidir ;

Tablo 4.3 : Cendere bölgesine ait delme-patlatma performansı ortalama değerleri.

	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4	Bölge 5
Ort. Delik Delme Süresi (cm/dk)	540	500	510	530	550
Ort. Özgöl Şarj (gr/m ³)	330	305	310	290	285



Foto 4.4 : Cendere bölgesinde kullanılan Dainong 2000 marka delici makina.

Cendere bölgesindeki ölçüm alınan beş patlatmaya ait delme – patlatma tasarım parametreleri Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4 : Cendere bölgesine ait delme-patlatma tasarım parametreleri.

	I. BÖLGE	II.BÖLGE	III.BÖLGE	IV.BÖLGE	V.BÖLGE
Delik Çapı (m)	0,089	0,089	0,089	0,089	0,089
Delik Boyu (m)	12,50	13,10	11,89	13,70	11,37
Dip Delgi (m)	1,50	1,60	1,39	1,70	1,37
Dilim Kalınlığı (m)	3,00	3,25	2,75	3,50	2,75
Delikler Arası Mesafe (m)	3,60	3,90	3,30	4,20	3,30
Basamak Yüksekliği (m)	11,00	11,50	10,50	12,00	10,00
Sıkılama Boyu (m)	2,40	2,60	2,20	2,80	2,20

4.1.2. Darıca Bölgesi Arazi Çalışmaları

Darıca bölgesinde yapılan çalışmalar toplamda 200 hektarı bulan bir çimento fabrikası hammadde sahası içerisinde yürütülmüştür. Ancak burada çimento hammaddesi olarak kullanılmayan ve yaklaşık olarak 4,5 ha'lık bir alanda görülen dolomitik birimler içinde agrega üretim amaçlı açılan açık ocak işletmesi verileri dikkate alınmıştır. Taşocağı, Kocaeli, Gebze ilçesi, Danca Yelkenkaya Burnu dolayındadır. Alanın kuzeyinde Bayramoğlu, batısında Tuzla koyu, güneyinde izmit Körfezi girişi, doğusunda Darıca yer alır. Yerleşim yerlerinin giderek fabrika hammadde sahasına yaklaşmış olmasından ötürü yakın mesafede hammadde temini açısından sınırlandırılmıştır ve maden ruhsatını geliştirme imkanı bulunmamaktadır (Foto 4.5).

Çimento fabrikasında hammadde sahasını kapsayacak şekilde bölgedeki tortul yığılım, tektonik açıdan (allokton) taşınmış ve (otokton) yerli olup, çeşitli kaya birimlerden oluşmuştur. Yerli birimler alttan üste; a- Triyas yaşlı dolomitler, b- Üst Kretase yaşlı konglomera-kumtaşları ve killi kireçtaşları c- Pliyosen yaşlı kırıntıları şeklindedir. Triyas yaşlı dolomitlerin alt seviyelerinde $CaCO_3$ oranının artması nedeniyle yer yer dolomitik kireçtaşı tanımlaması da yapılabilmektedir.



Foto 4.5 : Darıca bölgesi açık işletmelerinin uydu görüntüsü.

Taşınmış durumlu olarak da Karbonifer yaşlı çamurtaşı ve çamurtaşı aratakatmanlı kireçtaşlarından oluşmuştur (LAFARGE, 1991) Mesozoyik (Triyas+Kretase) birimleri içinde gelişmiş katmanlar doğu-batı gidişli, güneye dike yakın eğimli ve yerçekimsel yırtılma kırıklarıyla yoğun biçimde parçalanmıştır. Üst Kretase Paleosen yaşlı birimler, Paleosen sonrasında biçim değişikliği sırasında kuzeyden güneye hareketle bindirme fayı ve kilipleri oluşturduğu sanılmaktadır . Ayazma Tepe ile Yelkentepe arasındaki batı ocağında jeolojik birimler güneyden kuzeye doğru yaşlanır. Genelde katman gidişleri DB, KD-GB, eğimleri ise G,GD yadır. Ayazma tepe dolayında Kuzeydeki Triyas dolomitlerinin doğrultuları K10°-80° B, eğimleri 10°-32° GB'ya doğrudur. İnceleme alanının bulunduğu ruhsatlı sahanın jeoloji haritası ölçeksiz olarak Şekil 4.2'de verilmiştir.

Bölgenin jeolojik ve tektonik yapısı nedeniyle ruhsatlı alanın yaklaşık 4,5 ha'lık kısmında çimento hammaddesi olarak değerlendirilemeyen ve yukarıda bahsedilen Triyas yaşlı dolomitik birimler batıya ve güneybatıya doğru marn-killi kireçtaşı birimleri ile, doğuya ve kuzeye doğru ise konglomeratik kumtaşları, güneydoğuda ise kireçtaşları ile sınırlanmaktadır. Ayrıca dolomitler bölgedeki ana tektonik yapıyı oluşturan Kuzey Anadolu Fay'ının aktivitesinden oldukça fazla etkilenmiştir ve içerisinde bol miktarda faylanma ihtiva etmektedir. Bu faylanmalarda hem fay kili hem de breşik yapılara rastlamak mümkündür (Foto 4.6).

Şekil 4.2. Darıca Bölgesinde çalışan maden ruhsatlı sahaların jeolojî haritası (ölçeksiz).

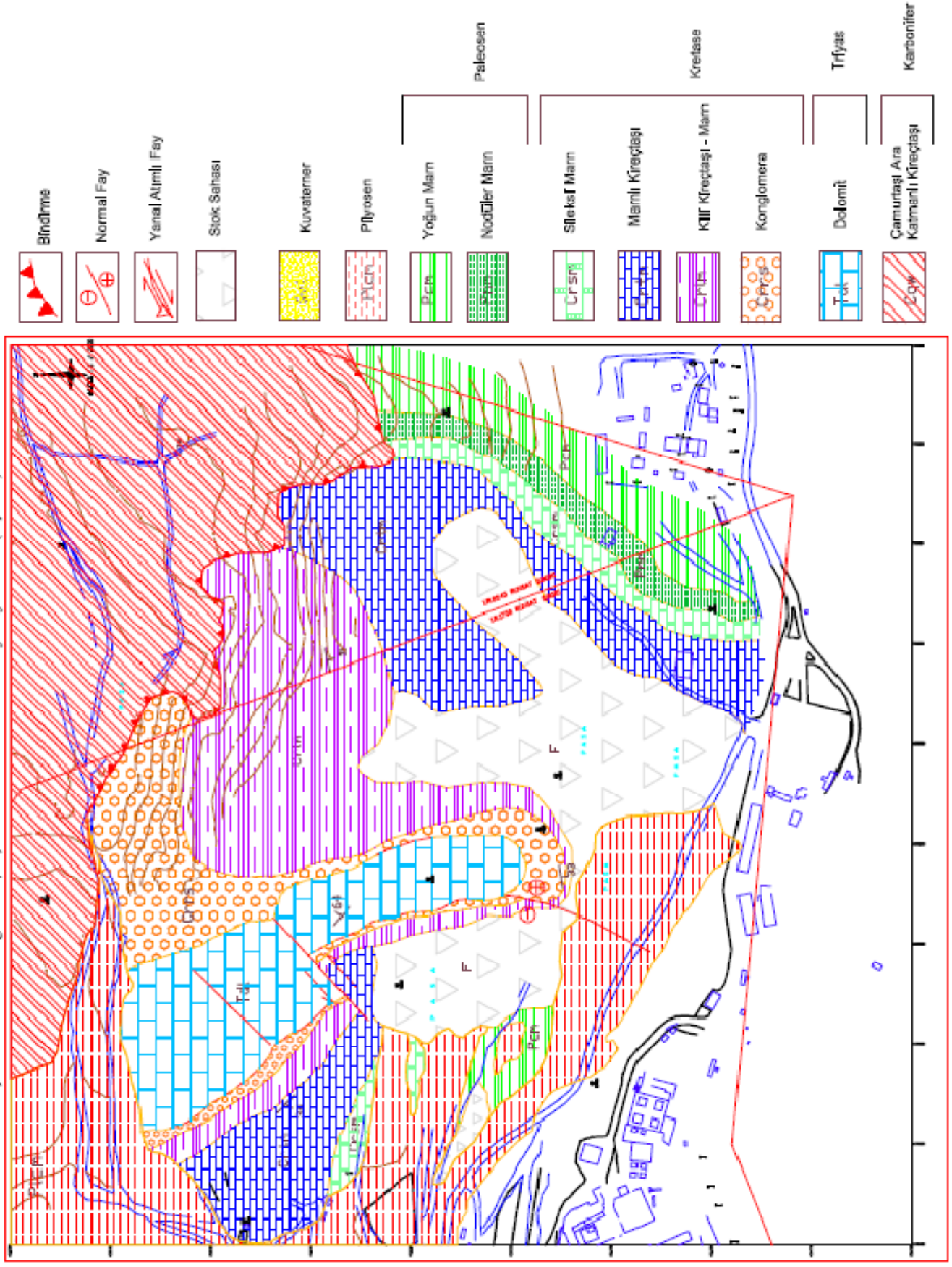




Foto 4.6 : Darica bölgesi agrega ocağından görünüm (KB-GD).

Darica bölgesinde farklı jeomekanik parametrelere sahip 5 ayrı bölgede (Foto 4.7) patlatma operasyonu öncesinde yerinde yapılan kaya tanımlarında ve süreksizlik ölçümlerinde Tablo 4.5'deki veriler elde edilmiştir.



Foto 4.7 : Darica bölgesi açık ocak işletmesinde ölçüm yapılan bölgeler.

Burada özellikle 3 ve 4 Bölgelerde kireçtaşı özelliği gösteren masife yakın birimler agrega üretimi için en elverişli özelliği taşımaktadırlar. 5 nci Bölgede GSI değeri her ne kadar düşük çıksa da makine ile kazarak üretim yapmak mümkün değildir. Çünkü makinanın sökme gücünün üzerinde büyük bloklar mevcuttur. Ancak patlatma yapılması ile de faylanmalar arasına yerleşmiş kil dolgular homojenliği olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle yağışlı havalardan önce bu tür alanlarda yapılan patlatmalardan elde edilen yığın tümüyle atık olarak dekapaj sahasına da gönderilebilmektedir. Bu da işletmenin maliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Tablo 4.5 : Darıca Bölgesine ait arazi gözlemleri

		Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4	Bölge 5
Kayacın adı		Dolomit	Dolomit	Dolomitik Kireçtaşı	Dolomitik Kireçtaşı	Dolomit
Renk		Bej – Açık kahvemsi Gri	Açık Gri - Bej	Açık Gri – Mavimsi Gri	Mavimsi Gri	Kahvemsi Bej
Doku		Düzensiz tabakalı	Düzensiz tabakalı	Düzenli tabakalı	Düzenli tabakalı	Düzensiz tabakalı- Eklemlerli
Süreksizliklerin Özellikleri	Tipi	Eklem – Faylanma - Tabakalanma	Eklem – Tabakalanma	Tabakalanma	Tabakalanma	Eklem – Faylanma– Tabakalanma
	Durumu	Kil Dolgulu	Kil dolgulu	Kapalı	Kapalı - Kalsit Dolgulu	Kil Dolgulu
	Hacimsel eklem sayısı (Jv : eklem/m ³)	0,8	0,4	0,4	0,5	1
	Yapısal Özellik puanı (SR)	83,70	95,83	95,83	91,93	79,80
	Süreksizlik Yüzey Koşulu (SCR)	Pürüzlülük (R _r)	Pürüzlü (5)	Pürüzlü (5)	Az Pürüzlü (3)	Az Pürüzlü (3)
Bozunma Puanı (R _w)		Az bozunmuş (5)	Az bozunmuş (5)	Yok (6)	Az bozunmuş (5)	Orta derecede bozunmuş (3)
Dolgu Puanı (R _f)		Yumuşak (2)	Yumuşak (2)	Yok (6)	Sert (4)	Yumuşak (2)
Toplam SCR (R _r + R _w + R _f)		İyi, 12	İyi, 12	Çok İyi, 15	İyi, 12	Orta (8)
Yaklaşık GSI Değeri		55-60	65-70	75-80	60-65	45-50

Bu işletmede delik delme işlemi sırasında delikten çıkan kırıntılar ve delik delme güçlüğü takip edilerek gerekli görüldüğünde delik iptal edilmekte veya patern değiştirilmektedir. Bu işletmede delici makine olarak Atlas Copco D7 marka ve modele sahip delici kullanılmaktadır. Çalışma ilkesi olarak Cendere bölgesindeki delici ile aynı olsa da performans açısından daha yüksek değerlere sahip bir delici makinedir (Foto 4.8).



Foto 4.8 : Cendere bölgesinde kullanılan Atlas Copco marka delici makina.

Darıca bölgeindeki bu agrega amaçlı açık ocak işletmesine dair delme-patlatma operasyonlarında kaydedilen yıllık verilerden elde edilen ortalama değerler Tablo 4.6'daki gibidir ;

Tablo 4.6: Darıca bölgesine ait delme-patlatma performansı ortalama değerleri.

	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4	Bölge 5
Ort. Delik Delme Süresi (cm/dk)	650	750	700	680	600
Ort. Özgül Şarj (gr/m3)	430	470	490	460	420

Darıca bölgesindeki ölçüm alınan beş patlatmaya ait delme – patlatma tasarım parametreleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7 : Darıca bölgesine ait delme-patlatma tasarım parametreleri.

	I. BÖLGE	II.BÖLGE	III.BÖLGE	IV.BÖLGE	V.BÖLGE
Delik Çapı (m)	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
Delik Boyu (m)	20,00	22,18	17,82	15,65	16,70
Dip Delgi (m)	2,00	2,18	1,82	1,65	1,70
Dilim Kalınlığı (m)	3,50	3,75	3,25	3,00	3,00
Delikler Arası Mesafe (m)	4,20	4,50	3,90	3,60	3,60
Basamak Yüksekliği (m)	18,00	20,00	16,00	14,00	15,00
Sıkılama Boyu (m)	2,80	3,00	2,60	2,40	2,40

4.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında her iki sahayı temsil edecek şekilde belirlenen numuneler üzerinde yoğunluk, tek eksenli basınç ve nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Bu deneyler ve sonuçları aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

4.2.1. Yoğunluk Deneyi

Cendere bölgesine ait yoğunluk deneyleri açık işletme içerisinde kurulu bulunan agrega deney laboratuvarında, Darıca bölgesinin deneyleri ise aynı şirkete ait beton kalite laboratuvarında yapılmıştır. Yapılan deneyler arazi çalışmalarında ayrılan bölgelere göre takip edilmiş olup, rutin olarak her gün yapılan deney sonuçlarının ortalaması değerlendirilerek aşağıdaki Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8 : Çalışma sahalarından elde edilen ortalama yoğunluk değerleri

Bölge	Cendere Numuneleri Ort. Yoğunluk Değerleri (ton/m ³)	Darıca Numuneleri Ort. Yoğunluk Değerleri (ton/m ³)
I	2,71	2,65
II	2,66	2,70
III	2,68	2,77
IV	2,65	2,68
V	2,61	2,64

4.2.2. Nokta Yükleme Deneyi

Patlatma mekanizması içerisinde kayaya ait en önemli değerlerden biri olan çekme gerilme direncini tespit etmek amacıyla nokta yükleme deney sonuçları kullanılmıştır. Çalışma sahalarından Cendere Bölgesine ait nokta yükleme deney sonuçları bölge olarak aynı bölge çalışılması nedeniyle Köse (2010)'nin hazırladığı lisans tezi deney sonuçlarından alınmıştır. Darıca bölgesinin nokta yükleme deney sonuçları ise yine şirkete ait beton deney laboratuvarında yaptırılmıştır. Elde edilen nokta yük dayanımları ve buna bağlı olarak aşağıdaki amprik formüller kullanılarak ortalama tek eksenli basınç dayanımları ile çekme dirençleri Tablo 4.9'da verilmiştir.

$$\sigma_B = I_s 50 \times 22$$

$$\sigma_C = I_s 50 / 0,80$$

Tablo 4.9 : Çalışma sahalarından elde edilen ortalama nokta yükleme deney sonuçları

Bölge	Cendere Bölgesi			Darıca Bölgesi		
	Ortalama $I_s 50$ (kgf/cm ²)	Ortalama Tek eksenli basma dayanımı (kgf/cm ²)	Ortalama Tek eksenli çekme dayanımı (kgf/cm ²)	Ortalama $I_s 50$ (kgf/cm ²)	Ortalama Tek eksenli basma dayanımı (kgf/cm ²)	Ortalama Tek eksenli çekme dayanımı (kgf/cm ²)
I	26,63	585,86	33,29	43,26	951,72	54,07
II	23,05	507,76	28,81	54,37	1196,14	67,96
III	24,58	540,76	30,72	61,46	1352,12	76,82
IV	19,99	439,78	24,99	48,76	1072,72	60,95
V	14,90	327,80	18,63	38,55	848,10	48,18

4.2.3. Tek Eksenli Basınç Direnci Deneyi

Nokta yükleme deneyinde olduğu gibi Cendere numuneleri Köse (2010) çalışması kapsamında deneye tabi tutulmuş, Darıca numuneleri ise beton laboratuvarındaki tek eksenli basınç deney düzeneği kullanılarak tek eksenli basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 4.10'da her iki bölge için ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 4.10 : Çalışma sahalarından elde edilen ortalama tek eksenli basınç deneyi sonuçları

Bölge	Cendere Numuneleri Ort. Tek eksenli basma dayanımı (kgf/cm ²)	Darıca Numuneleri Ort. Tek eksenli basma dayanımı (kgf/cm ²)
I	876,28	1058,96
II	848,94	1220,25
III	852,82	1380,42
IV	563,95	1128,56
V	349,62	986,62

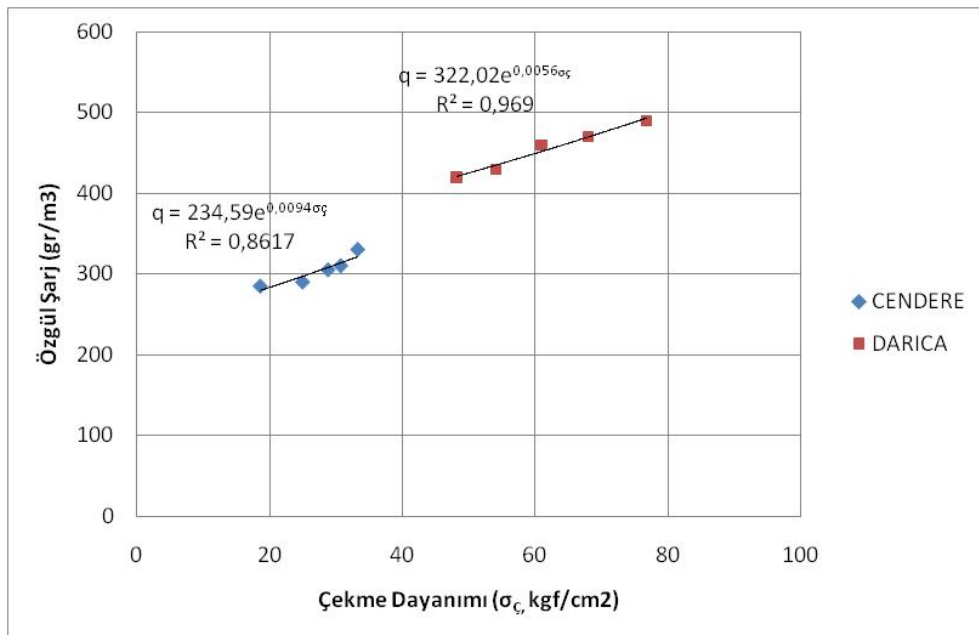
Bu çalışmada ele alınan kayaçların jeomekanik özellikleri ile delme-patlatma oprasyonlarının etkileşimi burada verilen ortalama değerler kullanılarak aşağıdaki bölümde GSI Kaya sınıflama abağı üzerinde yerleştirilmeye çalışılmıştır.

5. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında aşağıdaki bulgular elde edilmiş olup, elde edilen bulguların bu bölüm içerisinde anlatılan ve geliştirilmesi mümkün olan bir bilgisayar programı ile ilişkilendirilebileceği görülmüştür.

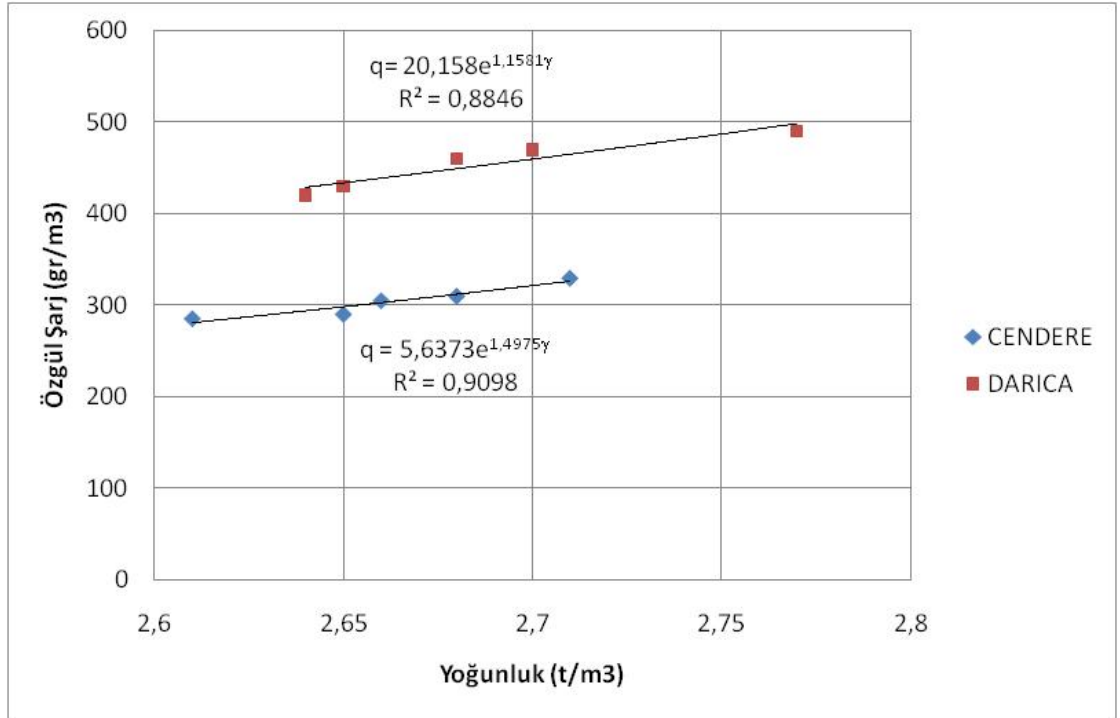
Delme – patlatma operasyonlarının performansını etkileyen başlıca etkenlerden biri olarak kayaların jeomekanik özelliklerinin olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle arazi verilerini de kaya sınıflandırma kriterleri içine alan GSI Sınıflandırma abağı kullanılarak ;

- Açık işletmelerde orta dayanıklı – dayanıklı kayalarda yürütülen istihraç çalışmaları delme – patlatma operasyonları yapılmadan ekonomik görünmemektedir.
- Daha az dayanıma sahip kayalarda güçlü iş makinaları yardımıyla sökme şlemi yapılabilir. Ancak burada kaya ortamında bulunan süreksizlikler, kayacın sertliği gibi faktörler önemli rol oynamaktadır.
- Çekme dayanımı ile özgül şarj arasında, iki ayrı saha içinde grafiksel bulgulardan da görüleceği üzere bir ilişki vardır (Grafik 5.1). Burada kaya ortamının çekme dayanımının artması özgül şarjın da artmasına neden olmaktadır. İki sahanın değerlerini kendi içinde ve birbirileri ile mukayase ettiğimizde de bu sonuç değişmemektedir. Elde edilen grafiklerde korelasyon katsayıları Cendere bölgesi için $R^2_{Cendere}=0,86$ Darıca bölgesi için ise $R^2_{Darıca}=0,97$ olarak elde edilmiştir.



Grafik 5.1. Özgül Şarj – Çekme Dayanımı İlişkisi .

- Çekme dayanımı – Özgül şarj arasındaki ilişkiye benzer bir ilişki Yoğunluk ile Özgül şarj arasında da görülmekte olup, ancak numunlerden elde edilen yoğunluk değerlerinin birbirine yakın değerler olması nedeniyle ilişki daha az belirgindir (Grafik 5.2). Ancak aradaki ilişki üstel bir fonksiyonla ifade edildiğinde, korelasyon katsayıları Cendere bölgesi için $R^2_{\text{Cendere}}=0,90$ Darıca bölgesi için ise $R^2_{\text{Darıca}}=0,88$ olarak elde edilmiştir. Buradan özgül şarj ile kaya ortamının yoğunluk değeri arasında da bir ilişki olduğunu söylemek mümkündür. Daha yüksek kayaç yoğunluğu olan ortamlarda daha fazla özgül şarj değeri olan patlatmalara ihtiyaç vardır. Ancak kayacın yoğunluk değeri, diğer parametreler gibi tek başına belirleyici değildir.



Grafik 5.2. Özgül Şarj – Yoğunluk İlişkisi .

- Karşılaştırma yapılabilmesi için çalışma kapsamında laboratuvarında elde edilen kaya jeomekanik özelliklerine dair veriler, bu veriler kullanılarak elde edilen GSI değerleri ile her iki sahadan alınan delme-patlatma verileri aşağıdaki tabloda toplu olarak verilmiştir.

Tablo 5.1. İki ayrı sahadan elde edilen arazi ve deneysel veriler.

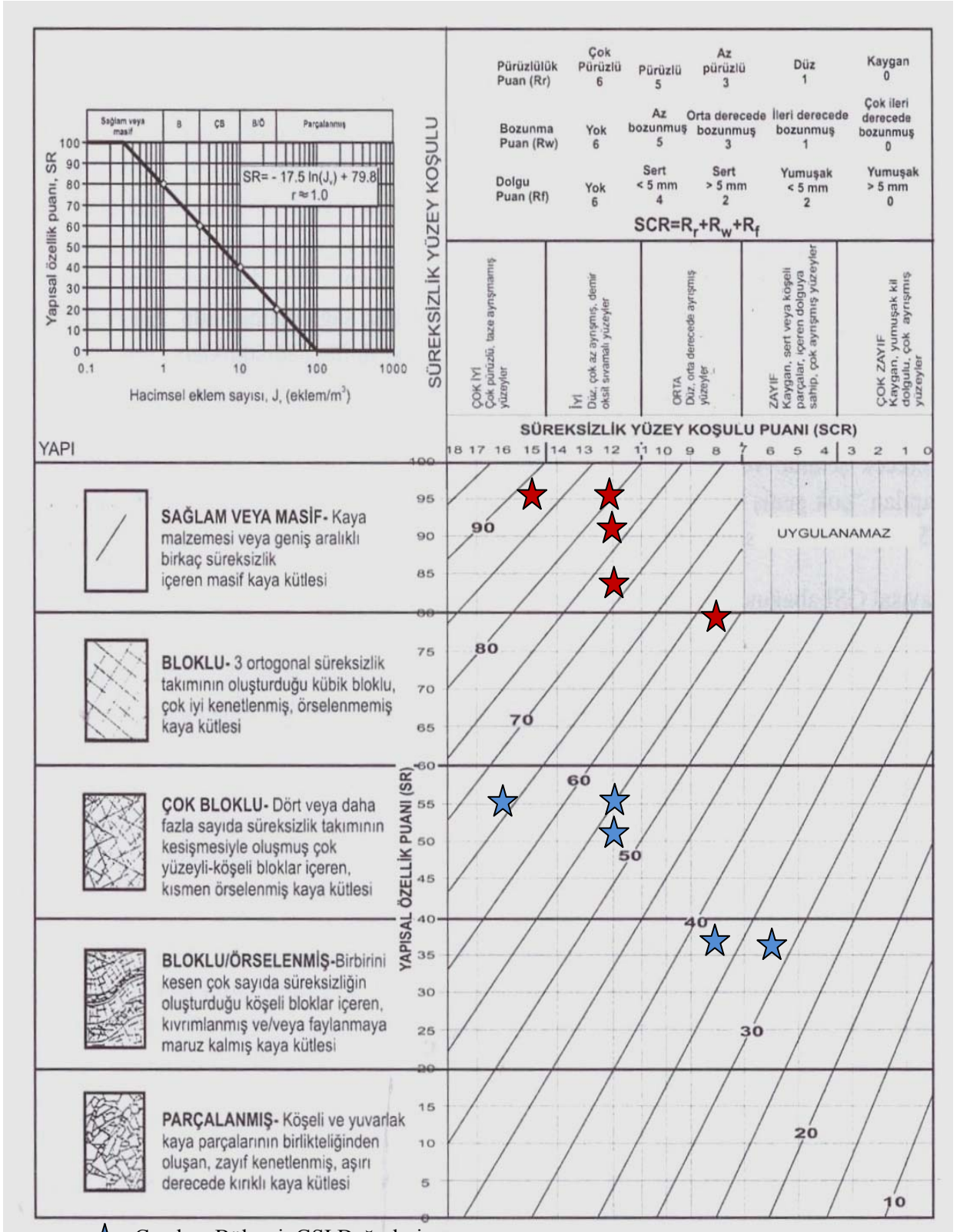
Cendere	GSI	Yoğunluk	Çekme Dayanımı	Özgül Şarj	Delik Delme Süresi
		t/m ³	kgf/cm ²	gr/m ³	m/dk
I	65	2,71	33,29	330	540
II	50	2,66	28,81	305	500
III	55	2,68	30,72	310	510
IV	35	2,65	24,99	290	530
V	30	2,61	18,63	285	550

Darıca	GSI	Yoğunluk	Çekme Dayanımı	Özgül Şarj	Delik Delme Süresi
		t/m ³	kgf/cm ²	gr/m ³	m/dk
I	70	2,65	54,07	430	650
II	80	2,7	67,96	470	750
III	85	2,77	76,82	490	700
IV	75	2,68	60,95	460	680
V	55	2,64	48,18	420	600

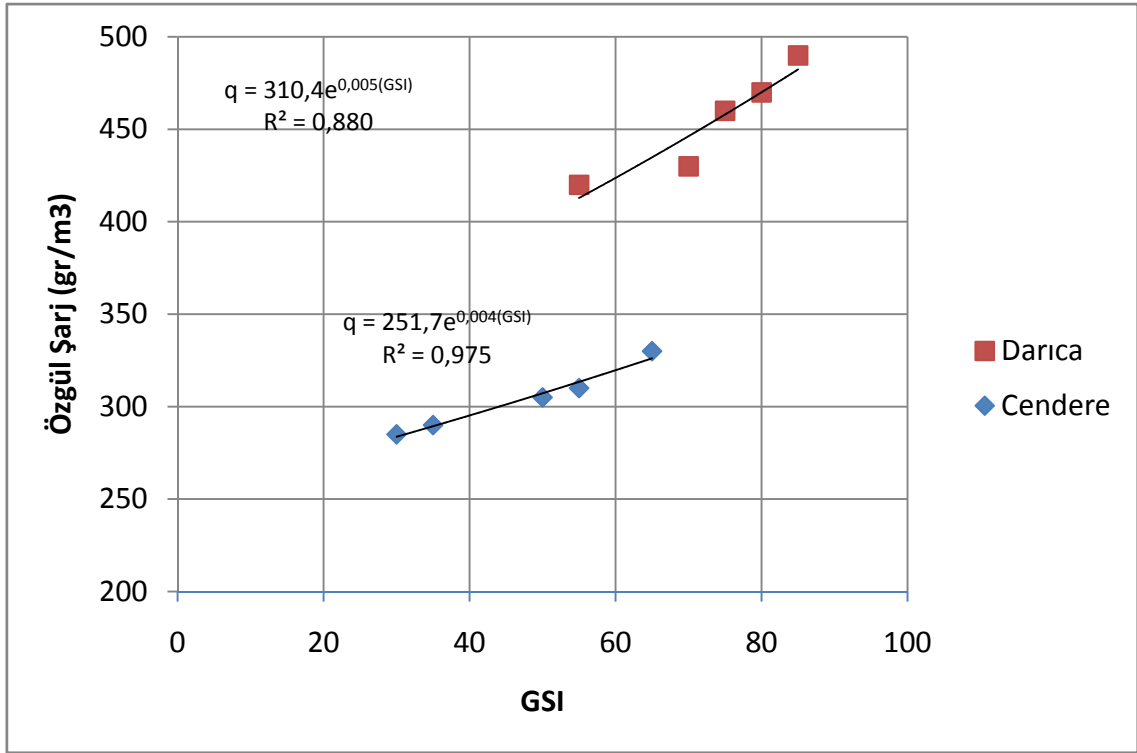
Bu çalışma kapsamında yukarıdaki değerler kullanılarak bazı yorumlar ve çıkarımlarda bulunmak mümkündür. Çalışmanın amacına yönelik olarak delme – patlatma operasyonlarında, kaya ortamının jeomekanik özelliklerinin etkisinin belirlenmesine yönelik olarak kaya sınıflamalarından GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) kullanılarak bu yorumlar yapılmaya çalışılmıştır. Kavramsal olarak kayaların jeomekanik özelliklerinin etkisini “patlatılabilirlik” kavramı ile özdeş tutmak mümkündür.

Buna göre, GSI Sınıflama abağı üzerinde “patlatılabilirlik” kavramı, elde edilen değerlerin abak üzerine yerleştirilmesi ile Şekil 5.1’de olduğu gibi görülmektedir.

Şekil 5.1. Çalışılan kaya ortamlarının GSI abağında gösterimi.



- GSI abağından alınan değerler ile özgül şarjların karşılaştırılması Grafik 5.3'de yapılmış olup, buradan da anlaşılacağı üzere GSI değeri yükseldikçe özgül şarj miktarının da üstel bir ilişki ile arttığı söylenebilir. Burada MS Office Excel programı kullanılarak elde edilen üstel fonksiyonlara göre hesaplanan korelasyon katsayıları Cendere bölgesi için $R^2_{Cendere} = 0.97$ Darıca için $R^2_{Darıca} = 0.88$ 'dir. Burada Cendere için elde edilen üstel fonksiyon $q = 310,42e^{0,0052(GSI)}$, Darıca için elde edilen ise $q = 251,75e^{0,004(GSI)}$ olarak elde edilmiştir.

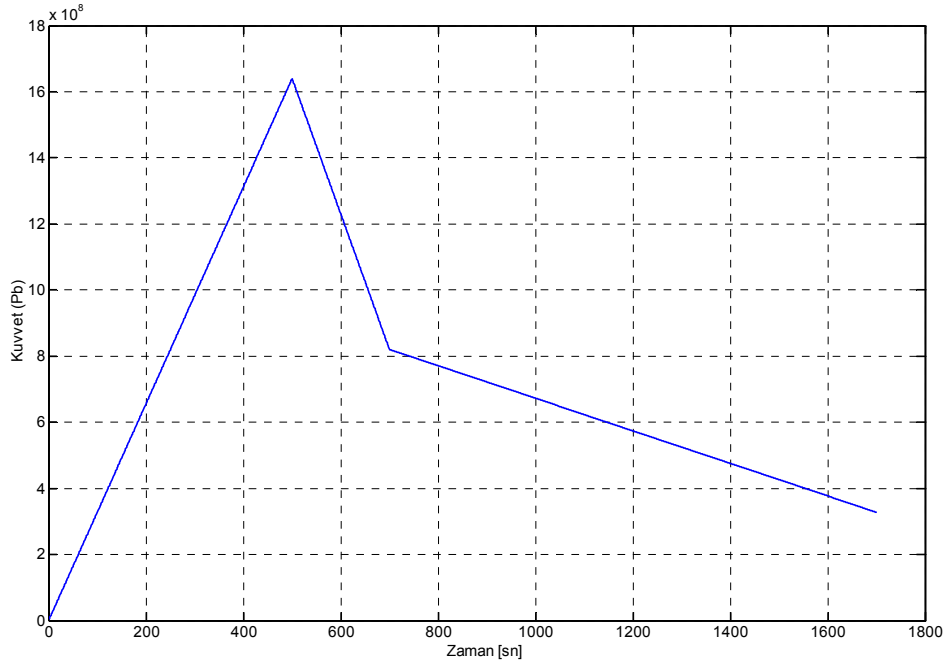


Grafik 5.3. Özgül Şarj – GSI İlişkisi .

- Arazi ve laboratuvar çalışmalarından bağımsız olarak, patlatma teorisinden yola çıkılarak basit fizik kurallarını temel alan indirgenmiş bir model ele alınmıştır. Bu modelde basit hareket denklemi kullanılmıştır. Burada, patlatma basıncı özgül şarja göre değişkenlik gösterebilecek bir değer olarak ele alınmıştır. Detonasyon başladıktan sonra oluşan patlatma basıncı ile, süreksizliklerin olduğu bir kaya kütesinin bütünsel olarak ivmesini, hızını ve mutlak konumunu etkileyen ortam parametrelerinin etkisi ele alınmıştır. Ortam parametresi olarak ele alınan değerler ise kütle, viskoz sürtünmeden dolayı oluşan sönümlenme ve yaylanma katasyısı değerleridir. Burada kaya ortamının yoğunluğu ile kütle kavramı arasında, süreksizlikler ile sönümlenme arasında, dayanım

parametreleri ile yaylanma katsayısı arasında fiziksel ilişki kurulmaya çalışılmıştır. İlk olarak iki durum değerlendirilmiştir: (1) Kütle içinde süreksizlik olmadığı düşünülmüş ve kırılma koşulu olarak çekme dayanımı ile kıyaslama kullanılmıştır. (2) Kütlenin süreksizlikler içerdiği, bu durumda her bir parçanın hareketi, tüm kütle, yaylanma ve sönümleyici modeli olarak alınmıştır. Kütle içinde süreksizlik varsa (2.1) sürtünme kuvveti ezilme bölgesinde giderek artar, (2.2) kırılma zonunda sürtünme kuvveti kalmaz ve kütleler bağımsız bir şekilde dağılırlar.

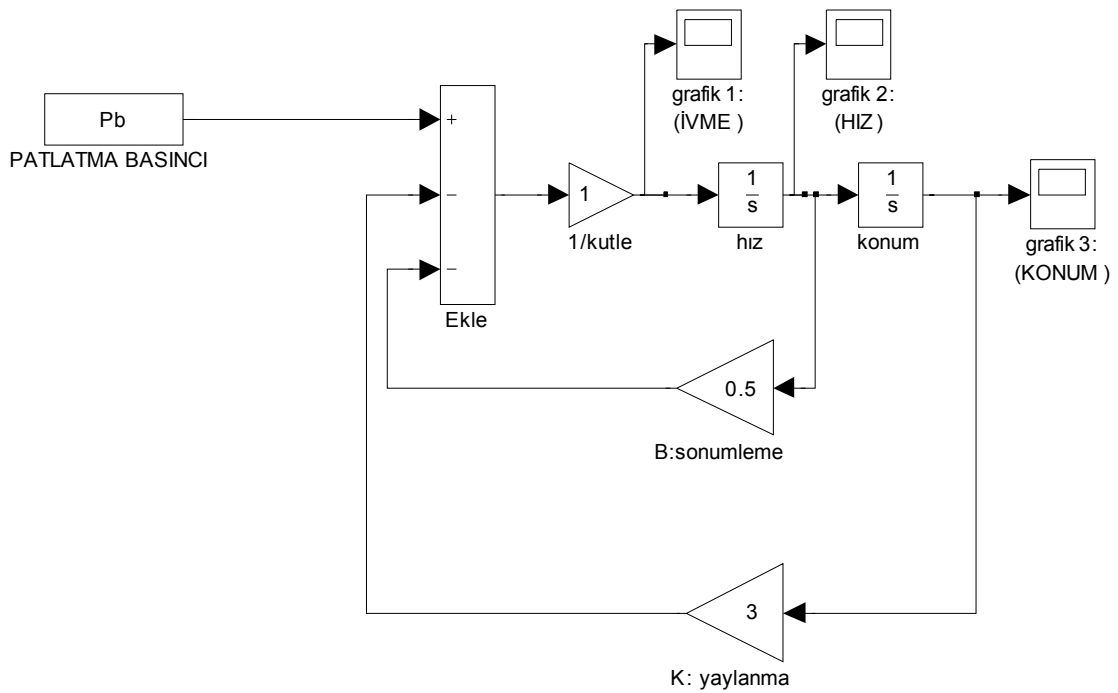
- Detonasyon ve basıncın değişimi göz önüne alınarak hesaplanan kuvvet profili Grafik 5.4'de verilmiştir.



Grafik 5.4. Detonasyon ve basınç değişimi sonucu görülen kuvvet profili

- Ezilme bölgesi boyunca kütleler birleştiği için kütle, yaylanma katsayısı ve sönümleme artarken yaylanma katsayısı azalır. Burada kütle parçacıklarının yine elastik davrandığını kabul edilmektedir ve burada önemli bir parametre patlatma ile oluşan süreksizliklere ilaveten kaya ortamının içerdiği süreksizliklerdir. Ezilme bölgesi bittiğinde kütle parçacıklarının birbirinden kopup saçıldığı kısım başlar. Burada ise toplu kütle hareketi azalan bir kütle, yaylanma katsayısı ve sönümleme ile devam eder. Nihayetinde ise yer çekimi ivmesinin etkisi ile her bir parçacık ya bağımsız olarak ya da önünde getirdiği kütle ile birlikte yere iner.

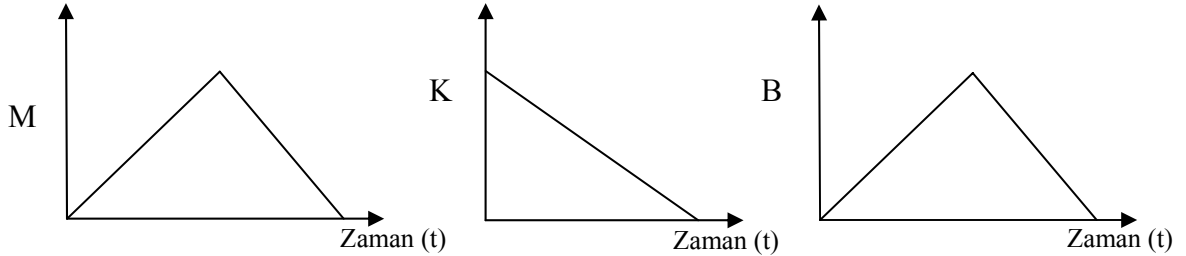
- Tek bir kütlenin (kusursuz tek cisim) hareket denklemini ifade eden benzetim Şekil 5.2’de verilmiştir. Burada “Pb” patlatma basıncı olup bilgisayar programının girdisi olarak alınmıştır. Yazılan programda, grafiksel olarak “grafik-1”den ivme, “grafik 2”den hız ve son olarak da “grafik-3”den konum değerleri elde edilebilir. Burada malzemeye ait özellikler olarak atfedilen değerler ;
M: kütle,
B: sönümlenme ve
K: yaylanma katsayısıdır.



Şekil 5.2 : Tekil kütlenin (kayacın) hareket simülasyonu.

Bu simülasyon döngüsünde itici kuvvet olarak Pb (Patlatma Basıncı), karşı kuvvet olarak ise sönümlenme ve yaylanma etkisi alınmıştır. Programda kütle (M) belirli bir basınç ile harekete geçirilmiş, bu hareketin ivmesi “grafik 1” den elde edilmiştir. İntegrali alınan (1/s) ivme değerinden hız değeri elde edilmiş, sonrasında ise patlama etkisi ile oluşan süreksizliğin sönümlenme (B) değeri devreye girmektedir. Son olarak oluşan süreksizlerle parçalı bir yapıya kavuşan kütlede meydana gelen yaylanma (K) etkisi karşı kuvvet olarak simülasyona dahil edilmiştir.

- Detonasyonla başlayan patlatma sürecinde oluşan süreksizlikler ve bu süreksizliklere bağlı parçaların arasındaki kütle (M), yaylanma (K) ve sönümlenme (B) değerlerinin zamana göre nasıl değiştiği şematik olarak Şekil 5.3.'de gösterilmiştir.



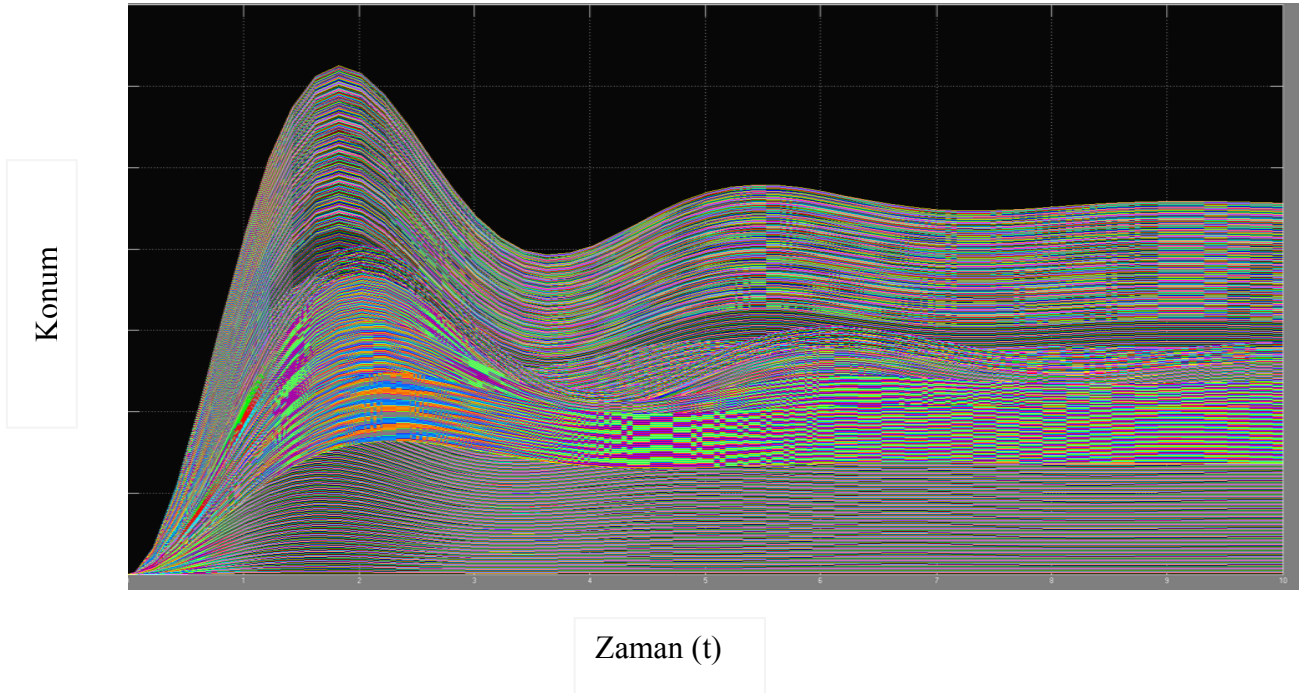
Şekil 5.3 : M, K, B katsayılarının zaman göre değişimi.

- Daha iyi bir karşılaştırma için Şekil 5 ve Şekil 6 da kullanılan temsili M, K ve B değerlerinin benzetimdeki değerleri ve değişimleri Tablo 5.2'te verilmiştir.

Tablo 5.2. M, K, B ifadelerinin benzetimdeki değerleri.

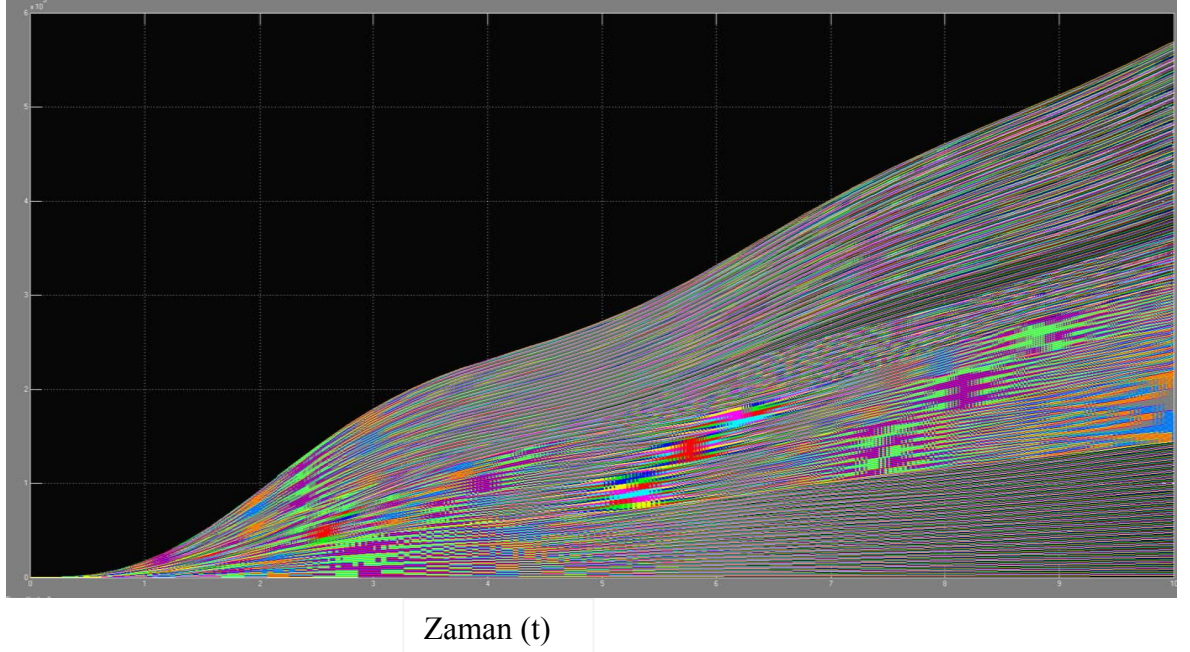
	Malzeme 1: Temel (Şekil 5.5)					Malzeme 2: Kırılgan/süreksiz (Şekil 5.6)				
M	1	0.8	0.6	0.8	1	2	1.8	1.6	1.8	2
B	0.5	0.6	0.7	0.6	0.5	0.7	0.6	0.5	0.6	0.7
K	3	2.8	2.6	2.4	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2

- Şekil 5.3'de verilen M, K ve B profillerine göre basınç değişimi boyunca zaman eksenini beş ayrı bölgeye ayırılmış ve çoklu sistemin yer değiştirmesi Şekil 5.4'de verilmiştir. Program çıktısı halindeki bu grafikten anlaşılan; detonasyon başladıktan sonra Pb kuvvetine en yakın kütle konumsal olarak en ileriye gitmek isteyen kütle ise de süreksizliklerle önünde bulunan diğer kütlelerin sönümlenme etkisine maruz kalmakta ve konum olarak yaylanmakta ve geri gelmektedir. Pb kuvvetine en uzak nokta ise uygulamada ayna yüzeyindeki kütle olarak değerlendirilebilir ve bu kütle önünde sönümleyici etki olmadığı için patlatma sürecinde geriye dönen hareket göstermemektedir.



Şekil 5.4. Patlama sonrasında kopan parçacıkların hareketi.

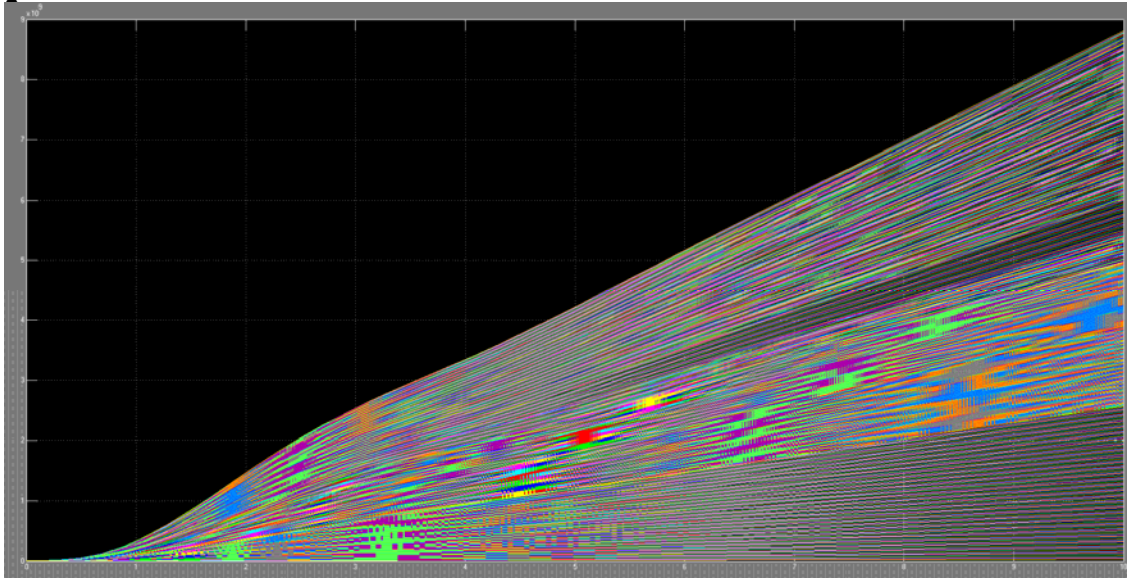
- Patlamanın başında oluşan kırılmadan sonra kütleler birleşerek sönümlenme etkisi de yaratırlar. Bu etki belirli bir noktadan sonra ortadan kalkar ve tüm kütleler aynı yönde birbirini sönümlenmeden hareket eder.
- Şekil 5.4'te patlatma deliğinden farklı uzaklıklardaki kaya parçacıklarının izlediği konum değişiklikleri verilmiştir. Dalgalı hareketin sebebi her bir kütle için bir önündeki kütle ile çarpıştığında bir miktar hız kaybetmesidir. Modellemede konum değişimi en fazla olan kütleler patlatılacak yapının en ön yüzeyinde yer alırken en az olanlar en arkasındakilerdir. Elde edilen konum değişikliğinin sayısal değerinden çok kütle hareketi bizi ilgilendirmektedir. Şekil 5.5'te parçacıkların mutlak konumlarını veren grafik elde edilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere en ön yüzeyde bulunan parçacık en uzak mesafeye düşmüştür. Ancak gerçek patlatma uygulamalarında kaya ortamının değişken parametreleri, sıkılama ve düşey kuvvet bileşenleri nedeniyle böyle olmamaktadır. İdeal olan bu modeli yakalamak için ortam parametrelerinin dikkate alınarak, özgül şarj ve patlatma geometrisinin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 5.5. Patlama sonrasında kopan parçacıkların mutlak konumları.

- Benzetim parametrelerinin değişmesiyle patlama sonucunda meydana gelecek değişimler daha kolay incelenebilir. Bu parametreler daha önceden de belirtildiği gibi malzemenin çekme dayanımı, patlatma basıncı, malzemenin yoğunluğu ve patlayıcının kütlesi olarak verilmiştir. Bunlardan çekme dayanımı ve patlama basıncı kırılma sonunda oluşacak kütlelerin sayısını belirler. Ayrıca patlatma basıncına bağlı olarak kütleye verilen enerji miktarı da değişir bu da patlayıcı miktarına bağlıdır. Buna göre benzetimde kullanılan B ve K patlamaya karşı koyan karşıt kaya kütesinin büyüklüğü ve süreksizlik miktarı ile orantılıdır. Bu aşırı basitleştirilmiş model Saharan ve Mitri (2008)'nin öne sürdüğü sayısal modelin kullandığı patlama basıncı hesabını kullanarak kuvvet profilini elde eder. Sonlu elemanlar metodu yerine indirgenmiş dinamik model kullanılmış ve var olan varsayımlar altında bazı giriş parametreleri sağlandığında kütlelerin nasıl hareket edeceğini veren bir model oluşturulmuştur.

- Örneğin Şekil 5.5'teki sonucun elde edildiği değerler esas alınarak daha az esnek (daha kırılğan) ve iç yapısında daha fazla süreksizlik bulunan bir yapı patlatıldığında maksimum mutlak konum Şekil 5.5'teki birimsiz 6'dan 9'a çıkmıştır. Yapısında daha fazla süreksizlik bulunan ve daha kırılğan olan yapının benzetim sonucu Şekil 5.6' da verilmiştir.



Zaman (t)

Şekil 5.6. Daha kırılğan (elastisitesi daha az) ve iç yapısında süreksizlikleri daha fazla olan yapının patlatılması sonucundaki mutlak konum değerleri

- Çalışmanın ileri safhalarında gelecekte yapılması gereken kısım olarak bu benzetimde kullanılan B, K ve M değerlerinin kayaların elastiklik modülü ve iç yapısındaki süreksizliği (J_v) arasında bağlantı kurmak sayılabilir. Böylece araziden ölçülen değerlerle burada kullanılan fiziksel değerler arasında bağlantı sağlanmış olur. Bu benzetimin yapılmasında kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir:

Kütle hareket denklemi:

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + Cx = Pb(t)$$

m: kütle,

B: viskoz sürtünmeden dolayı olan sönümlenme,

K: yaylanma katsayısı,

$Pb(t)$ zamana göre değişen patlatma deliği basıncına bağlı kuvvet.

Basıncın maksimum değerini veren formül:

$$Pb = \rho \left(\frac{VOD^2}{8} \right) (r_c^{2\gamma}) \quad [\text{Pa}]$$

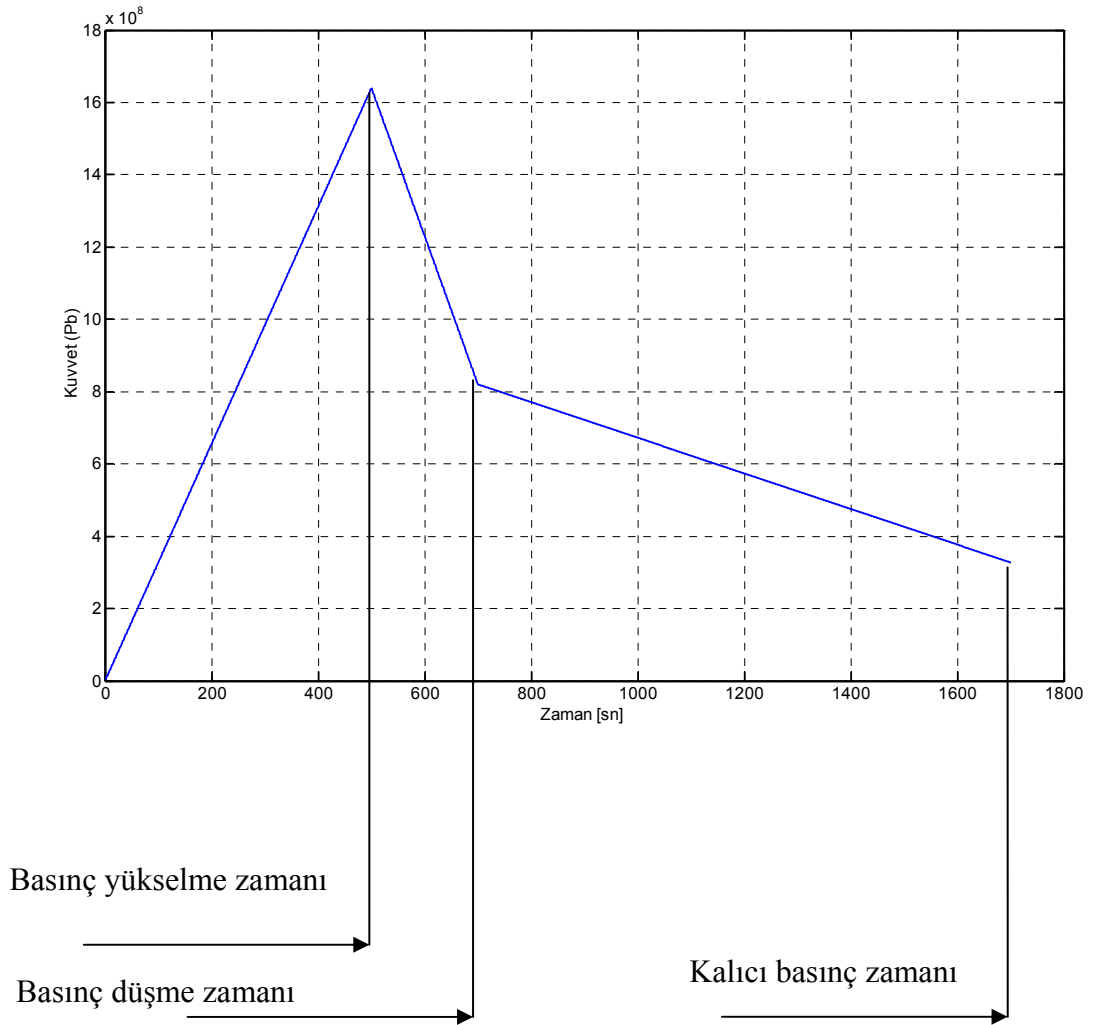
P : patlayıcının yoğunluğu [kg/m³]

VOD : detonasyon hızı [m/s]

r_c : patlayıcının etkin olduğu çap (patlayıcı çapı/delik çapı)

γ : adyabatik genişleme katsayısı : burada 1.5 olarak sabit alınmıştır.

- Basınç profili hesaplanırken değiştirebileceğimiz parametreler ise Grafik 5.5’de gösterilmiştir. Burada gösterilen bu zaman aralıkları patlayıcı türüne göre değiştirilebilir. Hesaplamalarda kullanılan profil ideal detonasyonu baz almıştır. İdeal durumda yükselme zamanı azdır, ideal olmayan detonasyon ise daha yaygın bir profil izler.



Grafik 5.5. Basınç profili hesabındaki parametreler

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışmanın sonucu olarak aşağıdaki maddeleri sıralamak mümkündür. Ancak oldukça karmaşık bir yapı sunan kayaların “jeomekanik özellikleri” ve “dele-patlatma operasyonları” iki ayrı konu olarak farklı disiplinlerce çalışılsa da mutlaka beraber ele alındığı çalışmalarda yürütülmelidir. Özellikle sahada çalışan mühendisler edindikleri veri birikimini literatür çalışmalarına uyarlıyarak bir takım ampirik çıkarımlara ulaşabilirler. Sahaya özel kullanımı olabilecek bu formüller sayesinde işletmelerde delme-patlatma operasyonları kayaç özelliklerine göre de değişkenlik göstermiş olacaktır. Sonuçta ;

- Tekil kayaç malzemeler, içinde buldukları kaya kütlelerinin ortamsal özelliklerini yansıtmadığı için, her zaman temsilci olmayabilirler.
- Kaya ortamının özelliklerinin belirlenmesinde kayaç numuneleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar yeterli olmamakla beraber mutlaka arazi gözlemleri de değerlendirilerek mühendislik sınıflandırmalarından yararlanılmalıdır.
- Delme – patlatma operasyonlarının performansını belirleyen başlıca etkenler;
 - Kaya kütle özellikleri (fiziksel, dokusal, jeomekanik, yapısal vs. özellikler),
 - Kullanılan delicinin tipi ve kaya ortamına uygunluğu,
 - Kullanılan patlayıcıların tipi, özellikleri ve miktarı (ölgül şarj),
 - Patlatma geometrisi (paterni) ve hatasız uygulamadır.
- Kaya kütle özelliklerinden yoğunluk, çekme dayanımı ile süreksizlik özellikleri bir arada değerlendirilerek GSI Kaya sınıflama sisteminde abak üzerine yerleştirildiğinde iki farklı sahadan alınan verilerde GSI değeri ile ölgül şarj arasında bir ilişkinin olduğu açıktır. Yine aynı şekilde ölgül şarj ile kayanın tek eksenli basınç dayanımı ve yoğunluğu arasında da bir ilişkinin olduğu saptanmıştır.
- İndirgenmiş patlatma modeli sayesinde patlatma açısından çok önemli olan parametreler hesaplamaya dolaylı da olsa dahil edilebilir. Bunlar arasında en önemlileri malzemenin çekme dayanımı, patlatma basıncı, malzemenin yoğunluğu ve ölgül şarj sayılabilir. Bu açıdan model, malzeme özellikleri düşünüldüğünde farklı kaya yapılarını patlatılabilirlik açısından kıyaslamanın kolay bir yolunu sağlamış olur. Ancak modelin, değişik kaya ortamlarında çalışılarak daha kapsamlı hale getirilmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- AKYOL, E., 2002, "*Kaya Mekaniği -1*" Kitabı , Denizli, 2-163.
- ANON, S., 1985, *Suggested Method for Determining Point Load Strength*, Int. J.R. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, 2, 53-60.
- BARTON, N., 2000, *TBM Tunneling in Jointed An Faulted Rock*, A.A. Balkema, Rotterdam, 173.
- BARTON, N. & GRIMSTAD, E., 1994, The Q-System following twenty years of application in NTM support selection Felsbau, 12 (6), 428-36.
- BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J., 1974, Engineering classification of rock masses for design of tunnel support, *Rock Mechanics*, V.6, 189-236.
- BIENIAWSKI, Z.T., 1984, *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. A.A. Balkema, Rotterdam, 97-133.
- CERYAN, Ş., 2008, *New Chemical Weathering Indices for Estimating the Mechanical Properties of Rocks: A Case Study from the Kürtün Granodiorite, NE Turkey*, Turkish Journal of Earth Sciences (Turkish J. Earth Sci.), Vol. 17, 2008, 187–207
- CEYLANOĞLU, A., KAHRİMAN, A., DEMİRCİ, A., (1993), Delme ve patlatmanın kullanıldığı alanlar, önemi ve maden mühendisliği ile ilgisi, 1. Delme ve Patlatma Sempozyumu, 2-3 Aralık, Ankara, 127-138.
- DEERE, D.U., (1964), "Technical description of rock cores", *Rock Mechanics Engineering Geology*, 1 (16-22)
- DEERE, D.U. & MILLER, R.P., 1966, Classification and index properties of intact rock. Tech. Report AFWL, TR-65-116, AF Special Weapons Center, Kirtland Air Force Base, New Mexico.
- ERGUVANLI, K., 1995, "*Mühendislik Jeolojisi*" Kitabı, İstanbul, 14-72.
- ERKOÇ, Ö.Y., 1990, *Kaya Patlatma Tekniği*, İstanbul, 164.
- GOODMAN, R. E., 1980, *Introduction to Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, 362.

- GRIMSTAD, E. & 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, Oslo, Norwegian Concrete Association.
- GUSTAFSSON, R., 1973, *Swedish Blasting Technique*, Gothenburg, 23.
- HAGAN, T.N., 1983. *The influence of controllable blast parameters of fragmentation and mining costs*, Proc. First Int. Symp. On Rock Frag. By blasting Lulea, Sweden
- HOEK, E., 1983, Strength of jointed rock masses, *23rd Rankine Lecture, Geotechnique* 33(3), 187-223.
- HOEK, E., 1994, Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- HOEK, E., 1999, Putting numbers of geology-an engineer's viewport. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 1-19.
- HOEK, E. & BRAY, J.W., (1981). *Rock Slope Engineering*, 3th Ed., The Institute of Mining and Metallurgy, London
- HOEK, E. & BROWN, E.T., 1980, a) *Underground excavations in rock*. London, Inst. Min. Metall.
- HOEK, E. & BROWN, E.T., 1980, b) *Empirical strength criterion for rock masses*. *J. Geotech Eng. Div.*, ASCE, 106 (GT 9), 1013-1035
- HOEK, E. & BROWN, E.T., 1988, The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update. In *Rock Engineering for Underground excavations, Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp.*, Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto, 31-38.
- HOEK, E. & BROWN, E.T., 1997, Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186.
- HOEK, E., KAISER, P.K. & BAWDEN, W.F, 1995, *Support of underground excavations in hard rock*, Rotterdam, Balkema.
- HOEK, E., MARINOS, P. & BENISSI, M., 1998, Applicability of Geological Strength Index classification for very weak and sheared rock masses. *The case of the Athens Schist Formation. Bull. Engg. Geol. Env.* 57(2), 151-160.
- HOEK, E., WOOD, D. & SHAH, S., 1992, A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. *Proc Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech., Eurock'92 (Edited by Hudson J.A.)*, London, Brit. Geotech. Soc., 209-214.
- KAHRAMAN, S., 1997, Açık işletmelerde uygun delme-patlatma şartlarını veren bir modelin geliştirilmesi, Doktora tezi, İTÜ, 114-152.

- KAHRİMAN, A., 1999, “Açık Maden ve Taş Ocaklarında Kaya Patlatma Teknolojisi Eğitim Semineri”, 20-38
- KEKEÇ, B., ÜNAL, M., ŞENSÖĞÜT, C., 2004, Kayaçların doku özellikleri ile kırılma ve öğütülme özellikleri arasındaki ilişkinin incelenmesi, *VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Sivas.
- KENDORSKI, F.S., CUMMINGS, R.A., BIENIAWSKI, Z.T. & SKINNER, E.H., 1983, Rock mass classification for block caving mine drift support. *Proceedings of the 5th International Congress on Rock Mechanics*, ISRM, Melbourne, pp. B51-B63.
- KNOWLES, D., 1989, Emulsion Explosives, WME, September, 39.
- KOJOVIĆ, T., MİCHAUX, S. & MCKENZEİ, C., 1995. Impact of blast fragmentation on crushing and screening operations in quarrying, EXPLO 95 Conference, AusIMM, Brisbane, September, pp 427 – 436.
- KÖSE, S., 2010. Bir kırmataş işletmesinde kırma-eleme tesisindeki enerji tüketimlerini formasyonlara bağlı olarak incelenmesi, Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü.
- LAFARGE ASLAN ÇİMENTO A.Ş., 1991, “Darıca Ruhsatları Hammadde Araştırmaları”, Kocaeli, 10-30.
- LANGFORS & KİHLSTRÖM, 1978. *The modern technology of rock blasting*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 438 pp.
- MARINOS, P. & HOEK, E., 2000, *Estimating the mechanical properties of heterogeneous rock masses such as flysh*.
- MUNSELL, A.H., 1941, *A color notation*, Munsell Soil Charts, Baltimore (Munsell Color Comp. Inc.).
- NAAPURI, J., 1990, *Surface Drilling and Blasting*, Tamrock Company.
- NİTROMAK A.Ş., 2005, “Patlatma Teknikleri Eğitimi” Seminer Kitabı, Ankara, 25-60.
- ORICA-NITRO A.Ş., 2008, "*Kaya Patlatma Tekniği*" Seminer Kitabı, Ankara, 17-19.
- ÖZER, Ü., 2001, Patlatma kinematiğinin araştırılması ve patlatma simülasyonu, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 32-50.
- ÖZER, Ü., 2009, Patlatma Mühendisliği Ders Notları, 4, 2.
- ÖZKAN, İ. ve ÜNAL, E., 1996, Kaya kütlesi sınıflama sistemleri üzerine kritik bir değerlendirme. 3. *Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, 181-193.

- SARMA, K.S., 1994. Models of explosives, PhP Thesis, The University of Queensland.
- SALGIR, H., (1993), Türkiye’de ve dünyada üretilen ve kullanılan patlayıcılar ve kullanım alanları, 1. Delme ve Patlatma Sempozyumu, 2-3 Aralık, Ankara, 27-40.
- SCOTT, A., 1992. A Technical and operational approach to the optimisation of blasting operations, Proceedings Massmin 92, South African Institute Of Mining And Metalurgy, Johannesburg
- SCOTT, A., (1996).Blastibility and blast design, Rock Fragmentation by Blasting, Mohanty (ed.). Balkema, Rotterdam
- TAMROCK, 1984, “Handbook on Surface Drilling and Blasting”, PainoFactirit Filland, 310 page.
- TAŞLICA, A.H., 1979, "*Mühendislik Amaçları için Kaya Kütlelerinin Tanımlaması*". EİE Yayını, Ankara, No: 81-82. 03-84,.
- ULUSAY, R. & SÖNMEZ, H., 2007, "*Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*". JMO Yayını, Ankara, No: 60. 2-46, 163-225,.
- ULUSAY, R., 1994, "*Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler*". JMO Yayını, Ankara, No: 38.1-13, 65-75.
- ÜNAL, D., 2005, Açık İşletmelerde Kullanılan Patlayıcılar Ve Patlamalardaki Yeni Teknolojiler ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniv., 25-47.
- VARDAR, M., 2005, Time dependent stability problems in tunnels and time-dependent behaviour of the rock mass, *ITA/AITES – Training Coruse Tunnel Engineering*, Istanbul, 42.

ÖZGEÇMİŞ

Ümit BOYRAZ, 15 Temmuz 1978'de Sivas'ta doğdu. İlköğrenimini Sivas'ta tamamladıktan sonra, 1995 yılında Düzce Lisesi'nden mezun oldu. 1995-199 yılları arasında öğrenim gördüğü İstanbul Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nü birinci derece bitirdikten sonra 2000 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Bölümünde yüksek lisans programına kayıt oldu. Son olarak 2007 yılında İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Bölümünde öğrenim gördü. Özel sektörde 1998 yılında A Mühendislikte başlayan profesyonel iş yaşamı, 1999-2000 yılları arasında Demir Sigorta'da Risk Mühendisliği, 2000-2002 yılları arasında ASM Mühendislik Ltd.Şti.'nde Saha ve Şantiye Şefi, 2002-2010 yılları arasında Lafarge Agregat Operasyonlarında İş Geliştirme ve Tesis Sorumlusu ve son olarak Tekno İnşaat Mak. Tic. Ve A.Ş.'de proje satış yöneticiliği görevlerinde bulundu.