



**AKSARAY İLİ MAGMATİK KAYAÇLARIN  
ÇATLATMA PERFORMANSINA ETKİ EDEN  
MİNERALOJİK-PETROGRAFİK, FİZİKSEL VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Haydar BAŞER

DANIŞMAN

Doç. Dr. İrfan Celal ENGİN

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

Bu tez çalışması 17.FEN.BİL.59 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AKSARAY İLİ MAGMATİK KAYAÇLARIN ÇATLATMA  
PERFORMANSINA ETKİ EDEN MİNERALOGİK-PETROGRAFİK,  
FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI**

**Haydar BAŞER**

**Danışman**  
**Doç. Dr. İrfan Celal ENGİN**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran 2019**

## TEZ ONAY SAYFASI

Haydar BAŞER tarafından hazırlanan “Aksaray İli Magmatik Kayaçların Çatlatma Performansına Etki Eden Mineralojik-Petrografik, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 26/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç.Dr. İrfan Celal ENGİN

**Başkan** : Prof.Dr. Ahmet YILDIZ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi .....

**Üye** : Prof.Dr. Yılmaz ÖZÇELİK  
Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Doç.Dr. İrfan Celal ENGİN  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi .....

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
...../...../..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

30/05/2019

  
Haydar BAŞER

**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

**AKSARAY İLİ MAGMATİK KAYAÇLARIN ÇATLATMA PERFORMANSINA  
ETKİ EDEN MİNERALojİK-PETROGRAfİK, FİZİKSEL VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI**

Haydar BAŞER

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. İrfan Celal ENGİN

Hidrolik çatlatma uygulamaları petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların üretim miktarlarını çarpıcı şekilde artırmış ve dünya enerji dengelerinin değişmesini sağlamıştır. Bu teknolojinin kullanım alanlarından biri de jeotermal enerjidir. Kızgın kuru kaya ortamlarında geçirimsizliği artırmak ve sıcak su elde etmek için hidrolik çatlatma uygulamaları yakın zamanda denemeye başlanmıştır.

Bu çalışmada, Aksaray ili magmatik kayalarında yapılacak hidrolik çatlatmaya kayaların mineralojik, petrografik, fiziksel ve mekanik özelliklerinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, çalışma sahasından 5 farklı granit örneği alınmış, her bir örnek için standart kaya mekaniği deneyleri yapılarak fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmiş, ayrıca ince kesit incelemeleri yapılarak mineralojik-petrografik özellikleri, kimyasal analizle de kimyasal bileşimleri tespit edilmiştir.

Su jeti, yüksek basınçlı suyun dar bir aralıktan çıkmaya zorlanması sonucunda elde edilen yüksek hızlı su demetini ifade etmektedir. Bu çalışmada, su jetinin hidrolik çatlatma uygulamasında standart deneylere ilave bir yöntem olarak kullanılabileceği düşünülmüş ve çatlatma deneyleri su jeti ile gerçekleştirilmiştir.

Granit örnekleri yüksek basınçta belli süre saf su jetine maruz bırakılarak suyun kayada nüfuz ettiği yayılma genişliği kaydedilmiştir. Daha sonra kayaç özellikleri ile hidrolik çatlatmada oluşan çatlak genişliği arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Böylelikle çatlatma

performansında en çok etkisi olan kayaç özellikleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

**2019, xiii + 73 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Çatlatma Performansı, Jeotermal, Aksaray, Granit Özellikleri



**ABSTRACT**  
M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MINERALOGICAL, PETROGRAPHIC, PHYSICAL AND  
MECHANICAL PROPERTIES OF THE FRACTURING PERFORMANCE OF THE  
MAGMATIC ROCKS IN AKSARAY PROVINCE.

Haydar BAŞER

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

**Supervisor:** Assoc.Prof. İrfan Celal ENGİN

Hydraulic cracking applications have dramatically increased the production amounts of fossil fuels such as petroleum and natural gas, and have changed the world energy balances. One of the uses of this technology is geothermal energy. In order to increase permeability in hot dry rock environments and to obtain hot water, hydraulic cracking applications have recently started to be tried.

In this study, the effects of mineralogical, petrographic, physical and mechanical properties of the rocks on the hydraulic fractures to be made in the igneous rocks of Aksaray province were investigated. For this purpose, 5 different granite samples were taken from the study area and physical and mechanical properties were determined by performing standard rock mechanics experiments for each sample. In addition, mineralogical-petrographical properties were determined by chemical analysis and chemical compositions were determined by thin section analyzes.

Water jet refers to a high-speed water beam obtained by forcing high-pressure water out of a narrow gap. In this study, it is considered that water jet can be used as an additional method in hydraulic cracking application and cracking experiments were carried out with water jet.

Granite samples were exposed to pure water jet at high pressure for a certain period of time and the spreading width of water penetrated into the rock was recorded. Then, the

relationship between rock properties and crack width in hydraulic cracking was investigated. In this way, rock properties which have the most effect on cracking performance were tried to be determined.

**2019, xiii + 73 pages**

**Keywords:** Fracturing Performance, Geothermal, Aksaray, Granite Properties



## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de Örnek edindiğim, yanında çalıőmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiő olduğu hoőgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam, Sayın Doç. Dr. İrfan Celal ENGİN'e teşekkür ederim.

Tez ve Ders aşamasında bilgileriyle ve itenlikleriyle üzerimde emeği bulunan Sayın Prof. Dr. Ahmet YILDIZ hocama ve tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Yüksek Lisans alıőmamı, 17.FEN.BİL.59 numaralı proje ile maddi olarak destekleyen bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAPK) desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Maddi ve manevi her türlü desteklerini esirgemeyen, hep sabırla yanımda olan ve beni bugünlere getiren Babam Yusuf BAŞER'e, Annem Binnaz BAŞER'e, Abim Emre BAŞER'e ve hayat arkadaőım Tuđba DEMİREL BAŞER' teşekkür ederim.

Haydar BAŞER  
AFYONKARAHİSAR, 2019

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYA MALZEMESİ DAVRANIŞI .....	3
2.1 İdeal Malzeme Davranışları .....	3
2.1.1 Elasto-Plastik Malzeme .....	3
2.1.2 Elastik-Gevrek-Plastik Malzeme .....	5
2.2 Kaya Davranışını Etkileyen Faktörler .....	5
2.2.1 Takviye (destek) Basıncı .....	5
2.2.2 Su (Nem) Oranı .....	6
2.2.3 Sıcaklık .....	7
2.2.4 Anizotropi Derecesi .....	7
2.2.5 Zaman .....	8
2.3 Kaya Maddesi Kırılma (Yenilme ) Türleri .....	8
2.4 Yenilmenin Geometrik Gösterimi .....	9
2.5 Kaya Dayanımı ve Yenilme Kriterleri.....	10
2.5.1 En Büyük Normal Gerilme Kriteri .....	11
2.5.2 En Büyük Kesme Gerilmesi (Coulomb) Kriteri.....	11
2.5.3 Mohr Kriteri.....	13
2.5.4 Griffith Kriteri .....	14
2.5.5 Tresca Kriteri (en büyük kesme gerilmesi) .....	14
2.5.6 Von Mises Kriteri .....	15
2.5.7 Hoek ve Brown Görgül Yenilme Kriteri .....	15
3. ÇATLAK İLERLEME MODELLERİ.....	17
3.1 İki Boyutlu Modeller .....	17
3.1.1 PKN Çatlak İlerleme Modeli .....	17
3.1.2 KGD Çatlak İlerleme Modeli .....	17

3.1.3 Radyal Çatlak İlerleme Modeli.....	18
3.2 Üç Boyutlu Modeller .....	19
3.3 İki ve Üç Boyutlu Modellerin Karşılaştırılması .....	20
4. KAYA ÇATLATMA YÖNTEMLERİ VE UYGULAMA ALANLARI .....	21
4.1 Kaya Çatlatma Yöntemleri .....	21
4.1.1 Hidrolik Çatlatma .....	21
4.1.2 Pnömatik Çatlatma .....	22
4.1.3 Dinamik Yükleme İle Çatlatma.....	22
4.1.4 Termal (kriyojenik) Çatlatma .....	23
4.2 Hidrolik Çatlatma Yönteminin Uygulama Alanları.....	24
4.2.1 Kaya Gazı Üretimi.....	24
4.2.2 Jeotermal Enerji Üretiminde Hidrolik Çatlatma Uygulamaları.....	25
5. SU JETİ YÖNTEMİ VE HİDROLİK ÇATLATMADA KULLANIMI .....	27
6. MALZEME VE YÖNTEM.....	30
6.1 Aksaray İli Jeolojisi .....	30
6.2 Deney Numunelerinin Karakterizasyonu.....	32
6.2.1 X-Işını Kırınımı (XRD) Çalışmaları: .....	33
6.2.2 Jeokimyasal Çalışmalar .....	33
6.2.3 Mineralojik ve Petrografik İncelemeler.....	34
6.2.3.1 Polarizan mikroskop incelemeleri: .....	34
6.2.4 Fiziksel Testler .....	34
6.2.4.1 Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini.....	34
6.2.4.2 Atmosfer Basıncında Su Emme Deneyi .....	35
6.2.4.3 Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Deneyi .....	36
6.2.4.4 Ultrases Hızı Tayini .....	38
6.2.5 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi .....	38
6.2.5.1 Schmidt çekici deneyi.....	38
6.2.5.2 Nokta Yükleme Dayanımı Tayini.....	40
6.2.5.3 Eğilme Dayanımı Tayini.....	40
6.2.5.4 Brazilian Deney Yöntemiyle Kayaçların Çekilme Dayanımı Tayini ...	41
6.2.5.5 Tek Eksenli Basınç Mukavemeti Testi .....	43
6.2.5.6 Üç Eksenli Basınç Mukavemeti Testi.....	44
6.3 Deneysel Bulgular.....	46
6.3.1. X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri .....	46

6.3.2 Jeokimyasal İncelemeler .....	50
6.3.3 Mineralojik-Petrografik İncelemeler .....	51
6.3.3.1 Polarizan Mikroskop İncelemeleri .....	51
6.4 Fiziko Mekanik Deney Sonuçları .....	54
6.4.1 Üç Eksenli Basınç Dayanımı .....	55
6.4.2 Elastisite Modülü ve Poisson Oranı.....	56
6.5 Hidrolik Çatlatma Uygulamaları .....	59
6.6 Kayaç Özellikleri ile Çatlatma Performansı İlişkileri.....	61
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	68
8. KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ.....	73

## SİMGELER DİZİNİ

### Simgeler

---

CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum karbonat (Kireçtaşı)
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Kalsiyum magnezyum karbonat (Dolomit)
SiO <sub>2</sub>	Silisyum dioksit
CO <sub>3</sub>	Karbonat
Hz	Hertz
M	Metre
cm	Santimetre
Mm	Milimetre
m/s <sup>2</sup>	Metre/saniye kare
kg/m <sup>3</sup>	Kilogram/metre küp
MPa	Megapaskal
A(8)	8 saatlik frekans ağırlıklı toplam titreşim değeri
°C	Santigrat derece

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1 İdeal elasto-plastik malzemede aksenal gerilme ve yanal birim deformasyon ile aksenal birim deformasyon ilişkileri.....	3
Şekil 2.2 İdeal elasto-plastik malzemede asal gerilme ve hacimsel birim deformasyon ile aksenal birim deformasyon ilişkileri.....	4
Şekil 2.3 Elastik- gevrek-plastik malzemede asal gerilme ve hacimsel birim deformasyon ile aksenal birim deformasyon ilişkileri.....	5
Şekil 2.4 Takviye basıcının kayaların davranışı üzerindeki etkileri. ....	6
Şekil 2.5 Anizotropi yönünün kaya dayanımı üzerindeki etkisi. ....	8
Şekil 2.6 Kaya maddesinin kırılma (yenilme) türleri.....	9
Şekil 2.7 Yenilmenin geometrik gösterimi. ....	10
Şekil 2.8 Coulomb kriterinin normal gerilme-kesme gerilmesi cinsinden gösterimi. ...	12
Şekil 2.9 Coulomb kriterinin asal gerilmeler cinsinden gösterimi.....	12
Şekil 2.10 Sürtünmeli coulomb kriterinin geometrik gösterimi.....	13
Şekil 2.11 Griffith yenilme kriterinin gösterimi.....	14
Şekil 2.12 Hoek ve Brown empirik yenilme kriterinin gösterimi. ....	16
Şekil 3.1 PKN modelinin geometrisi.....	17
Şekil 3.2 KGD modelinin geometrisi.....	18
Şekil 3.3 Üç kırılma yayılımı modelleri.....	19
Şekil 4.1 Hidrolik çatlatma yöntemi (Suthersan 1999). ....	21
Şekil 4.2 Pnömatik çatlatma sistemi (Suthersan 1999). ....	22
Şekil 4.3 Hidrotermal ve kızgın kuru kaya jeotermal sistemleri.....	26
Şekil 5.1 Çalışmada kullanılan su jeti kesme makinesi ve bileşenlerinin şematik görünümü (Engin 2006).....	27
Şekil 5.2 Aşındırıcılı su jetinin doğrultu eksenine dik şematik A-A'kesiti. ....	29
Şekil 6.1 Çalışma sahasının yer bulduru haritası. ....	30
Şekil 6.2 Aksaray ili ve çevresinin jeoloji haritası (Burçak vd. 2003).....	32
Şekil 6.3 Bruker D8 advance model X-ışını difraktometre cihazı. ....	33
Şekil 6.4 Leica marka Dm 2500P model polarizan mikroskop.....	34
Şekil 6.5 Su emme tayini.....	37
Şekil 6.6 Schmidt çekici ile yapılan ölçümler.....	39

<b>Şekil 6.7</b> Nokta yükleme deneyi yapılışı.....	40
<b>Şekil 6.8</b> Eğilme dayanımı deneyi.....	41
<b>Şekil 6.9</b> Brazilian deneyi yapılışı.....	42
<b>Şekil 6.10</b> Tek eksenli basınç mukavemeti testinin yapılışı.....	43
<b>Şekil 6.11</b> Üç eksenli basınç dayanımı deneyi. ....	45
<b>Şekil 6.12</b> RQ kodlu örneğin X-ışınları kırınımı (XRD) grafiği. ....	46
<b>Şekil 6.13</b> RQ1 ve RQ2 kodlu örneklerin X-ışınları kırınımı (XRD) grafiği. ....	47
<b>Şekil 6.14</b> RQ3 ve RQ4 kodlu örneklerin X-ışınları kırınımı (XRD) grafiği. ....	48
<b>Şekil 6.15</b> Y ve Y1-1 kodlu örneklerin X-ışınları kırınımı (XRD) grafiği. ....	49
<b>Şekil 6.16</b> Örneklerin Le Maitre vd. (2002) tarafından geliştirilmiş toplam alkali&silis (TAS) diyagramında gösterimi. ....	51
<b>Şekil 6.17</b> Granit örneklerinin polarizan mikroskop görüntüleri. (a) Y1-Çift nikol, (b) Y1-Tek nikol, (c) Y1-Tek nikol A, (d) Y1-1B-Çift nikol, (e) Y1-1B-Çift nikol, (f) Y1-1B-Tek nikol, (g) RQ1-Çift nikol, (h) RQ1-Tek nikol, Mineral Kısaltmaları: Kuvars (Qtz), Biyotit (Bio), Plajoklas (Plg), Alkali feldspat (Ksp). ....	52
<b>Şekil 6.18</b> Granit örneklerinin polarizan mikroskop görüntüleri. (a, b) RQ1-Çift nikol, (c) RQ2-Çift nikol, (d) RQ2-Tek nikol, (e) RQ3-Çift nikol, (f) RQ3-Tek nikol, (g, h) RQ4-Çift nikol, Mineral Kısaltmaları: Kuvars (Qtz), Biyotit (Bio), Plajoklas (Plg), Alkali feldspat (Ksp). ....	53
<b>Şekil 6.19</b> RQ1 Üç eksenli basınç deneyi. ....	55
<b>Şekil 6.20</b> RQ2 Üç eksenli basınç deneyi. ....	55
<b>Şekil 6.21</b> RQ3 Üç eksenli basınç deneyi. ....	56
<b>Şekil 6.22</b> Y1 Üç eksenli basınç deneyi. ....	56
<b>Şekil 6.23</b> Y1 Gerilme -yanal ve gerilme-düşey deformasyon ilişkisi.....	57
<b>Şekil 6.24</b> RQ1 Gerilme -yanal ve gerilme-düşey deformasyon ilişkisi.....	57
<b>Şekil 6.25</b> RQ2 Gerilme -yanal ve gerilme-düşey deformasyon ilişkisi.....	58
<b>Şekil 6.26</b> RQ2 Gerilme -yanal ve gerilme-düşey deformasyon ilişkisi.....	58
<b>Şekil 6.27</b> Su jeti makinesinde gerçekleştirilen hidrolik çatlatma uygulamalarından bir görünüm. ....	60
<b>Şekil 6.28</b> Çatlak yayılımı. ....	60
<b>Şekil 6.29</b> Tek eksenli basınç dayanımı çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.....	61

<b>Şekil 6.30</b> Elastisite modülü ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.....	62
<b>Şekil 6.31</b> Poisson oranı ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.....	62
<b>Şekil 6.32</b> Kohezyon ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi. ....	63
<b>Şekil 6.33</b> İçsel sürtünme açısı ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.....	63
<b>Şekil 6.34</b> Kılcal su emme ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.....	64
<b>Şekil 6.35</b> Eğilme dayanımı ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi. ....	64
<b>Şekil 6.36</b> SiO <sub>2</sub> içeriği ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.....	65
<b>Şekil 6.37</b> Örneklerin kuvars minerali içeriği ile çatlak yayılım miktarı ilişkisi. ....	65
<b>Şekil 6.38</b> Örneklerin alkali feldispat içeriği ile çatlak yayılım miktarı ilişkisi. ....	66
<b>Şekil 6.39</b> Örneklerin plajyoklas minerali içeriği ile çatlak yayılım miktarı ilişkisi. ....	66
<b>Şekil 6.40</b> Örneklerin mika minerali içeriği ile çatlak yayılım miktarı ilişkisi.....	67

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 5.1</b> Aşındırıcılı su demetiyle kesmede etkili olan etmenler (Engin 2006).....	28
<b>Çizelge 6.1</b> Örneklerin majör oksit (%) ve iz element (ppm) analiz sonuçları. ....	50
<b>Çizelge 6.2</b> Çalışmada kullanılan granit örneklerinin mineral içerikleri (% olarak) ....	54
<b>Çizelge 6.3</b> Fiziko-mekanik deneyler.....	54
<b>Çizelge 6.4</b> Üç eksenli basınç dayanımı kohezyon ve içsel sürtünme açısı sonuçları. ..	55
<b>Çizelge 6.5</b> Elastisite modülü ve poisson oranı.....	59
<b>Çizelge 6.6</b> Granit örneklerinde ölçülen ortalama çatlak yayılımı miktarları. ....	60



## 1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı teknolojik gelişmelere paralel olarak dünyada hızla artmaktadır. Gelişmişlik ölçütleri arasında kişi başına elektrik enerjisi tüketimi bir kriter olarak kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar olarak adlandırılan karbon içerikli petrol, doğalgaz, kömür gibi kaynaklar yüksek enerji dönüşümleri sağladıklarından günümüzde de enerji kaynaklarının başında gelmektedirler. Son yıllarda rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi vb. yenilenebilir enerji kaynakları artan çevresel kaygılarla birlikte önemli bir seviyeye gelmiştir.

Kullanılan motorlu araçların yakıt gereksiniminin temel kaynağı olan petrol 1850'li yıllardan bu yana önemini korumuş ve bu değerli kaynağa sahip olmak isteyen devletlerin yoğun mücadelelerine neden olmuştur. Uzun yıllar petrol üretimi Orta Doğu ülkeleri tarafından domine edilmiş olmasına rağmen 1947 yılındaki ilk denemelerden sonra 1950 yılında ticarileşen hidrolik çatlatma uygulaması petrol içeren geçirimsiz şeyl tabakalarının ekonomik bir şekilde işletilmesini ve petrol üretim dengelerinin değişmesini sağlamıştır. Bu gelişimde 1930'lu yıllarda yatay sondaj teknolojisindeki büyük gelişmelerin de payı mevcuttur (King 2012, Arop 2013). Petrol Mühendisleri Derneği (SPE) verilerine göre son 60 yılda dünya çapında yaklaşık 2,5 milyon hidrolik kırılma işlemi gerçekleştirilmiştir, yalnızca ABD'de on binlerce sayıda yatay kuyu sondajı yapılmıştır (King 2012). Hidrolik çatlatma uygulamasının yaygınlaşması sonucunda ABD 2013 yılı itibarıyla petrol üretiminde Suudi Arabistan'a geçmiştir. Yine bu teknolojinin kullanılmasıyla ABD 2017 yılı itibarıyla doğalgaz ithalat-ihracat dengesini sağlamıştır.

Hidrolik çatlatma uygulaması sadece kaya gazı veya kaya petrolü olarak adlandırılan özellikle şeyller içerisinde kapanım halinde bulunan fosil yakıtların değerlendirilmesinde kullanılmakla kalmamış, jeotermal enerji kaynaklarından biri olan kızgın kuru kayaların enerji kaynağı olarak değerlendirilmesinde de uygulanmaya başlanmıştır. Jeotermal enerji kaynağı olarak kullanılan sıcak sular atmosferik kaynaklı suların geçirimli/çatlaklı katmanlardan yeraltına inerek rezervuar kayacı olarak adlandırılan kaya yapıları içinde ısınması sonucu meydana gelmektedirler. Yeraltında

yüksek sıcaklığa sahip kaya ortamlarının bulunması ve suyun olmaması durumu kızgın kuru kaya olarak nitelendirilmektedir. Kızgın kuyu kaya ortamlarının geçirimsizliğinin artırılması ve yeryüzünden verilen suyun sıcak su olarak geri alınması son yıllarda yeni bir jeotermal enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu tip bölgeler geliştirilmiş jeotermal sahalar olarak isimlendirilmekte olup EGS olarak kısaca isimlendirilmektedir. Bu çalışmada, jeotermal potansiyele sahip Aksaray ili magmatik kayaların hidrolik çatlatma performansına etki eden mineralojik-petrografik, fiziksel ve mekanik özelliklerin araştırılmıştır. Hidrolik çatlatma testleri ise standart çatlatma uygulamalarına benzer bir mekanizmaya sahip olduğu düşünülen su jeti ile gerçekleştirilmiştir.



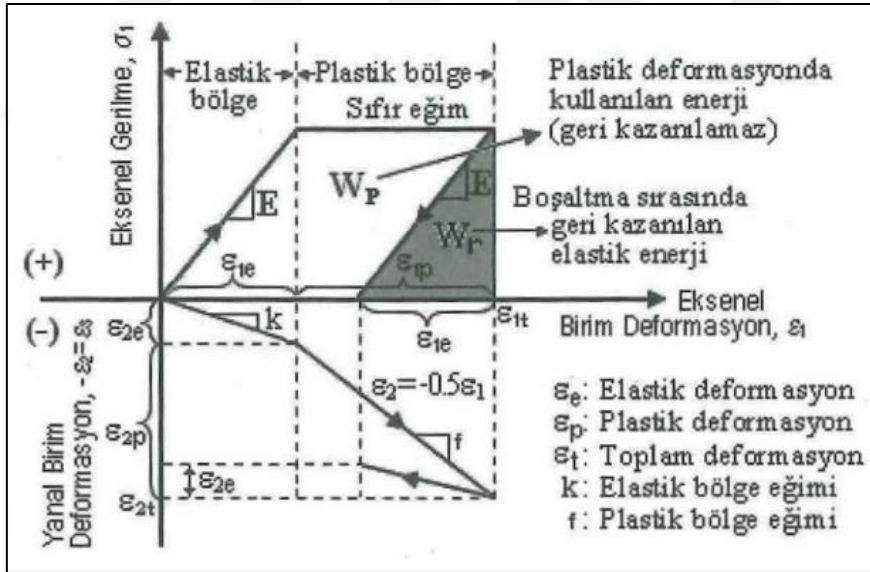
## 2. KAYA MALZEMESİ DAVRANIŞI

Kayaçların çatlatma mekaniğinin daha iyi anlaşılması kaya malzemesinin davranışının iyi anlaşılmasına doğrudan bağlıdır. Kaya malzemesinin davranışını açıklayabilmek için öncelikle malzemelerin davranışlarını genel olarak incelemek faydalı olacaktır. Malzemelerin davranışı ideal elastik, ideal plastik ve elasto-plastik davranış olarak üç temel gruba ayrılabilir.

### 2.1 İdeal Malzeme Davranışları

#### 2.1.1 Elasto-Plastik Malzeme

Çelik, çamur gibi malzemeler bu tür davranış gösterirler (Şekil 2.1). Şekilde  $W_p$  kazanılamayan, plastik deformasyonda kullanılan enerji değerini temsil etmektedir.



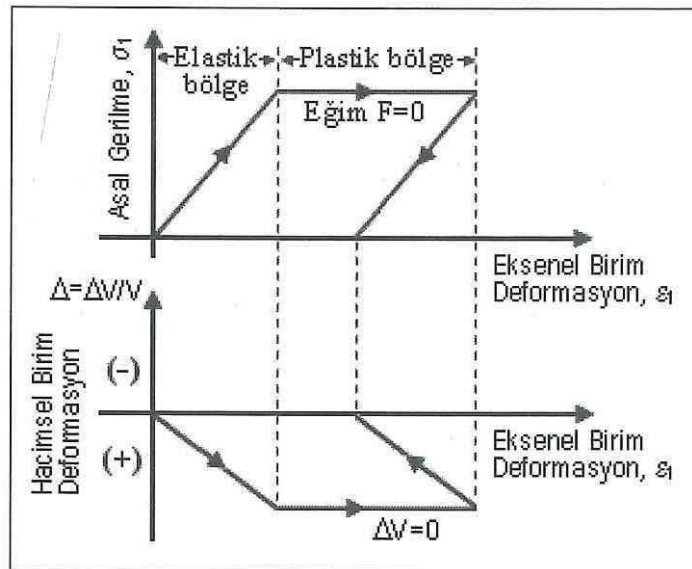
Şekil 2.1 İdeal elasto-plastik malzemedeki aksiyel gerilme ve yanıl birim defermasyon ile aksiyel birim defermasyon ilişkileri.

Daha önce de tanımları verildiği gibi, yukarıdaki şekilde aksiyel gerilme-aksiyel birim defermasyonun ilişkisi Elastisite (Elastik) "E" değerini, yanıl birim defermasyon-aksiyel birim defermasyon ilişkisi de Poisson Oranı "v" değerini verir. Elastiğ bölgede E ve v değerleri (ilişki doğrusal olduğu için) sabittir. Boşaltmada yani gerilmenin

azaltılmasında hem yanal hem de aksel birim deformasyonlar tekrar kazanılır. Dolayısıyla yukarıdaki şekildeki taralı kısmın  $\varepsilon_1$  değeri ile ilişkinin elastik bölümünde kazanılan  $\varepsilon_1$  değerleri birbirlerine eşittirler. Benzer şekilde yanal birim deformasyon,  $\varepsilon_2$ , akselindeki ilk ve son kısımlarda birbirlerine eşittirler (Karpuz 2012).

Plastik bölgede ise, yine tanım gereği gerilmeye karşı direnç olmadığı (ve sürekli kalıcı deformasyon elde edildiği) için gerilme farkı sıfır ve dolayısıyla E de sıfırdır. Ayrıca bu bölgede örnekte sadece şekil değişimi olurken hacimsel değişim olmamaktadır. Dolayısıyla hacimsel birim deformasyon,  $\Delta$ , değeri de sıfırdır.

Plastik bölgede  $\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$  ve silindirik biçimli örnekler için  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$  olacağından,  $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$  yazılabilir. Diğer taraftan poisson oranının tanımı gereği,  $\nu = -(\varepsilon_2/\varepsilon_1)$  olduğundan,  $\Delta = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 = 0$  ve nihayet  $\Delta = \varepsilon_1 (1-2\nu) = 0$  yazılır. Buradan plastik davranış için her zaman poisson oranı,  $\nu = 0.5$  değeri elde edilir. Hacimsel birim deformasyon-eksel birim deformasyon ilişkisi (Şekil 2.2) incelendiğinde; elastik bölgede aksel birim deformasyonun yanal birim deformasyondan ( $\varepsilon_2 + \varepsilon_3$ ) daha büyük olduğu görülmektedir.



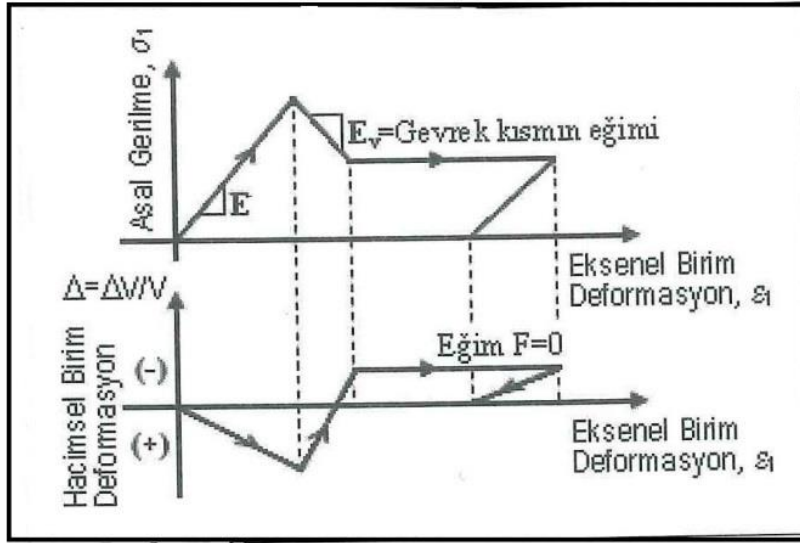
**Şekil 2.2** İdeal elasto-plastik malzemede asal gerilme ve hacimsel birim deformasyon ile aksel birim deformasyon ilişkileri.

Dolayısıyla bu bölgede hacimsel birim deformasyon değeri negatiftir. Plastik bölgede hacim değişikliği olmayacağına göre elastik bölgenin sonundaki toplam birim

deformasyon değeri, plastik bölge boyunca da aynen devam edecektir. Boşaltma sonrası da elastik bölgedeki toplam birim deformasyon tekrar kazanılacaktır (Karpuz 2012).

### 2.1.2 Elastik-Gevrek-Plastik Malzeme

Bu modelde, gevrek kısımda gerilme azalımı ve hacimsel birim deformasyon artışı izlenir. Elastik ve plastik özellikler yukarıdakinin aynısıdır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Elastik- gevrek-plastik malzemede asal gerilme ve hacimsel birim deformasyon ile eksenel birim deformasyon ilişkileri.

## 2.2 Kaya Davranışını Etkileyen Faktörler

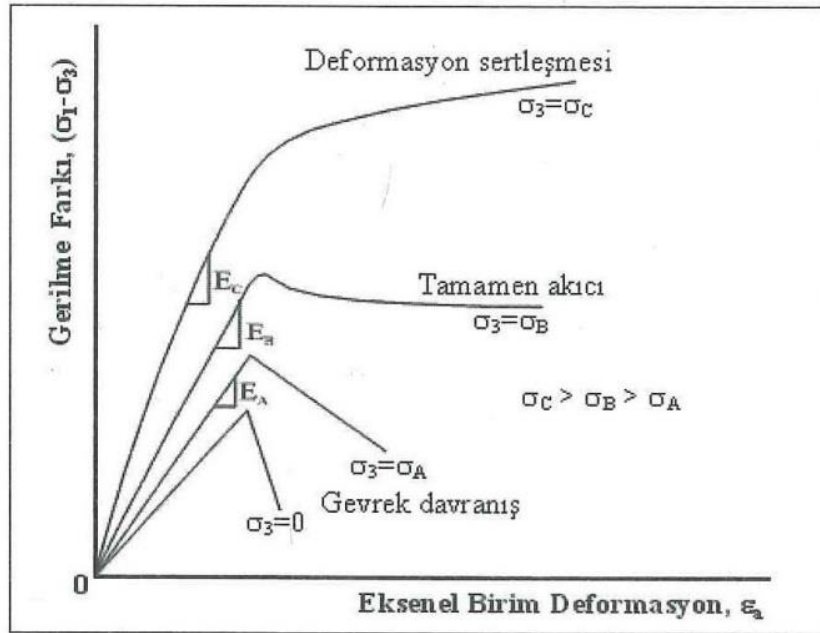
Kayanın temel özellikleri veya davranışı genelde iki elastik değişken (elastisite modülü,  $E$  ve poisson oranı,  $\nu$ ) ve dayanım değerlerinin değişimi ile nicel ve gevreklik-süneklik gibi nitel özelliklerle incelenir. Eğer çevre şartları değişmez ise bir kaya birimi için bu özellikler de değişmez. Kayanın davranışını etkileyen faktörler şöyle sıralanabilir.

### 2.2.1 Takviye (destek) Basıncı

Yer altında belli derinlikteki bir kaya birimi, yüzeye olan derinlik ve birim ağırlığın fonksiyonu olan bir gerilmenin etkisi altındadır. Poisson etkisiyle de yanal komşu kaya

elemanları üzerine bir birim deformasyon etkisi vardır. Aynı seviyede, bu elemana komşu olan elemandaki dikey gerilme ve poisson etkisiyle yanal açılma da yine büyüklük olarak birbirine eşittir. Ancak, yanal deformasyonların yönleri birbirlerine göre ters yönde olduğu için etkileri birbirlerini dengeleyecek, dolayısıyla da yanal bir hareket olmayacaktır. Bu etkiye takviye (destek) basıncı denir.

Takviye basıncının kayaların davranışı üzerindeki etkisi Şekil 2.4'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, takviye basıncının artmasıyla kayanın dayanımı artarken, gerilme-birim deformasyon ilişkisinin eğilimi de artmakta (Elastisite modülü de artmakta), kayanın davranışı gevreklikten sünümlüye doğru geçiş göstermektedir. Şekildeki  $\sigma_3 = \sigma_B$  seviyesine gevreklik-sünümlülük sınırı denir. Sonuç olarak, takviye basıncı arttıkça kayanın; dayanımı, elastisite modülü, plastikliği artar sonucuna ulaşılr (Karpuz 2012).



Şekil 2.4 Takviye basıncının kayaların davranışı üzerindeki etkileri.

## 2.2.2 Su (Nem) Oranı

Genellikle sedimanter kayaların türlerine bağlı olarak, su kayada yumuşamaya ve de arkasından kabarmalara yol açabilir. Örnek olarak, kömür ocaklarında görülen taban

kabarması verilebilir. Su içeriği, daha çok kil minerali içeren kaya birimleri için daha etkilidir. Çünkü su ile geri kazanılmayan deformasyonlar oluşur. Susuz (kuru) zamanlarda kazanılan hacim azalması, sulu zamanda elde edilen hacim artışından daha azdır. Bu periyodik kazanılmayan deformasyonlar kayalarda çatlakların oluşmasına, dayanımlarının azalmasına ve zamanla kırılmasına yol açar. Su içeriği arttıkça; dayanımı ve elastisite modülü azalırken plastikliği artar (Karpuz 2012).

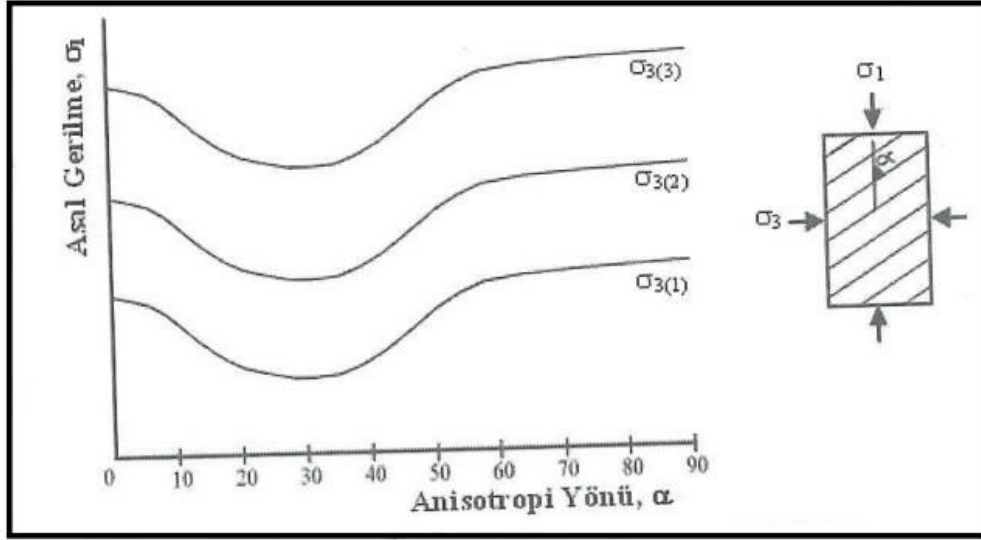
### **2.2.3 Sıcaklık**

Mühendislik yapıları açısından sıcaklık esas olarak nem oranı ile birleştiğinde etkili olur. Yer altı kömür ocaklarında iklimleme havalar periyodik olarak, kayalar üzerinde etkilidir. Yazın, dışarının sıcak ve nemli havası ocağa girdiğinde serin hava nemini yoğunlaştırarak kaya ve kömürü zayıflatır. Diğer taraftan, soğuk fakat kuru kış havası içerideki kayanın nemini alır. Bu periyodik değişim kayanın zayıflayıp yenilmesine neden olabilir. Genel olarak sıcaklık arttıkça, kayanın dayanım ve elastisite modülü azalırken plastikliği artar (Karpuz 2012).

### **2.2.4 Anizotropi Derecesi**

Kayaların fiziko- mekanik özelliklerinin tesbiti için laboratuvar deneylerinin, sağlam çatlaklardan uzak kaya maddeleri üzerinde yapıldığı daha önce belirtilmişti. Buna karşın; akım yönü, tabakalanma ve yapraklanma gibi kayanın iç özelliklerinin yükleme yönüne göre konumları sonuçlar üzerinde etkilidir.

Teorik olarak bu süreksizliklerin konumları, yükleme yönüne göre dik veya paralel ise aynı dayanımın elde edilmesi gerekir. Ancak pratik sonuçlar tabakalanma/yapraklanma ve benzeri jeolojik yapılara dik yüklemenin daha yüksek dayanım verdiğini göstermiştir. En düşük dayanım ise, ana gerilme yönüne göre  $30^0$  civarında elde edilmiştir (Şekil 2.5).



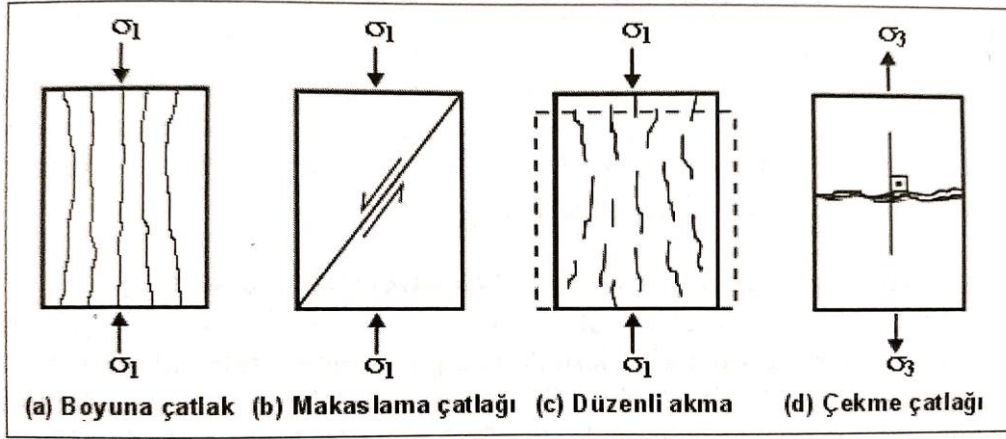
Şekil 2.5 Anizotropi yönünün kaya dayanımı üzerindeki etkisi.

### 2.2.5 Zaman

Gerilim-deformasyon ilişkileri ve diğer hesaplamalarda genellikle zamanın etkisi ihmal edilmektedir. Çoğu durumda kaya deformasyonları zamanın etkisi ihmal edilerek hesaplanabilir. Ancak uzun süreli yüklemelerde kaya dayanımı kısa süreli yüklemelere göre çok düşük çıkabilmektedir (Karpuz 2012).

### 2.3 Kaya Maddesi Kırılma (Yenilme) Türleri

Kayaçların belirli bir gerilme altında, belli çevre şartlarında kırılmasına kadar yüklenilmesine, o maddenin dayanımı denir. Kayaçlar basma yükleri altında yenilirken (kırılırken) üç ana yenilme tipi gösterirler (Şekil 2.6). Bunlar; (a) boyuna çatlaklar; (b) makaslama (kesme) çatlakları, ve (c) düzenli akmadır. Eğer çatlaklar, asal gerilme eksen ile aynı yönde oluşursa buna boyuna çatlak, asal eksenle belirli bir açı (örneğin 30° civarında) yapan bir düzlem boyunca yenilirse buna makaslama çatlakları ve makro düzeyde deformasyonlar gözlenirse buna da düzenli akma denir. Çekme gerilmesinde çatlak yönü asal gerilmeye diktir (Karpuz 2012).



Şekil 2.6 Kaya maddesinin kırılma (yenilme) türleri.

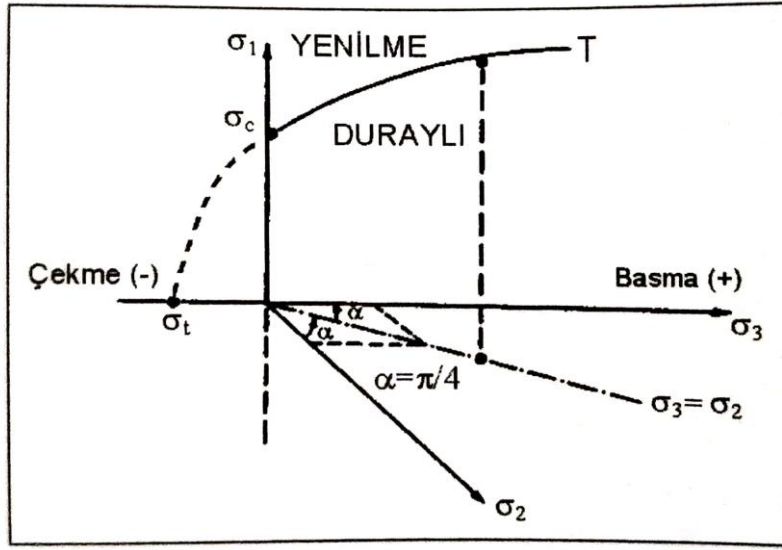
## 2.4 Yenilmenin Geometrik Gösterimi

Uzayda genel bir gerilme durumu  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  ile gösterilmiştir. Dolayısıyla yenilmenin oluşabilmesi de aşağıdaki gibi, malzemeye bağlı bir ilişkinin gerçekleşmesine bağlıdır (Eşitlik 2.1).

$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3) \quad (2.1)$$

Bu ilişki üç boyutlu  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  eksenleri sisteminde gösterilirse yukarıdaki genel tanıma uygun olarak, en uç noktalarda üç farklı yenilme şartı düşünülebilir. Bunlardan ilki tek eksenli basma dayanımı (kayaların basma dayanımlarının büyük olduğu ve bu nedenle pozitif alındığı belirtilmiştir),  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  ve  $\sigma_1 = \sigma_c$  koşuludur. Bu koşul koordinat sisteminde en büyük asal eksen  $\sigma_c$  olarak işaretlenir.

Tanım gereği bu noktadan daha büyük gerilmelerin etkimesi söz konusu değildir. Çünkü etkiyen gerilme tek eksenli basınç dayanımına ulaştığında kaya örneği zaten kırılmış olacaktır. Dolayısıyla üç boyutlu sistemde ilk üç değer Şekil 2.7'deki  $\sigma_c$  noktasıdır (Karpuz 2012).



Şekil 2.7 Yenilmenin geometrik gösterimi.

Benzer şekilde ikinci uç nokta, tek eksenli çekme dayanımı,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  ve  $\sigma_3 = -\sigma_1$  koşuludur. Kayaçların çekme dayanımları en küçük olduğundan, bu nokta da en küçük asal eksenle işaretlenir ve bu noktadan daha büyük çekme gerilmesi uygulanması da söz konusu değildir. Dolayısıyla üç boyutlu sistemde ikinci uç noktası  $-\sigma_t$  noktasıdır. Üçüncü uç nokta ise, dayanım üzerinde pozitif etkisi olan takviye basıncı ve onun eğrisidir.  $\sigma_c T$  eğrisinin anlamı  $\sigma_2 = \sigma_3$  değerinin her artan uygulamasında kayanın yenilenmesi için gerekli gerilme değerinin de artacağıdır. Diğer bir ifadeyle, bir nokta değil, bir eğridir. ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) değeri özel bir hal olup, yatay düzlemin açıortayını temsil eder.

Sonuç olarak, üç boyutlu bir gerilme sisteminde yenilme;  $-\sigma_t$ ,  $\sigma_c$  noktaları  $\sigma_c T$  ile tanımlanan bir yüzeyden oluşacaktır. Bunlardan daha büyük gerilme uygulaması halinde yenilme oluşur (Karpuz 2012).

## 2.5 Kaya Dayanımı ve Yenilme Kriterleri

Kayaçlarda yenilmenin gerçekleşebilmesi için kayacın etkisinde kaldığı gerilmenin kayacın dayanımından daha büyük olması gerekir. Diğer bir deyişle, kaya dayanımının aşılması şartı aranır. Bu şartın oluşması için de gerilmeler arasındaki farkın-deviatorik gerilme en büyük olması veya kesme gerilmesinin en büyük olması gerekir. Kayaya

etkiyen gerilmenin yönü basma veya çekme şeklinde olabilir. Ayrıca gerilmeler, tek eksenli olabileceği gibi üç eksenli de olabilir. Yenilmede en önemli iki parametre, gerilme ve deformasyondur. Tasarım aşamasında bunlardan en az biri girdi olarak kullanılır. Kaya maddeleri ve/veya kütleleri için aynı anda geçerli olabilecek bir kriter henüz yoktur. Daha önce de belirtildiği gibi, kayalar oldukça heterojen, gevrekten sönümlüye kadar değişen özellikler göstermektedir (Karpuz 2012).

### 2.5.1 En Büyük Normal Gerilme Kriteri

Kaya üzerine etkiyen asal gerilmelerden birisinin, kayanın çekme veya basma dayanımını aşması durumunda yenilmenin oluştuğunu belirten kriterdir (Eşitlik 2.2). Matematiksel ifade ile,

$$\begin{aligned} \sigma_3 &\geq -\sigma_t \text{ çekmede kırılğan (gevrek) yenilme koşulu} & (2.2) \\ \sigma &\geq \sigma_c \text{ basma yenilme koşulu} \end{aligned}$$

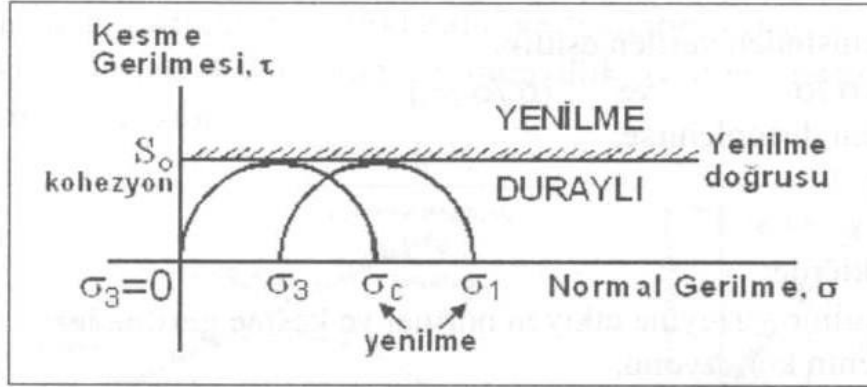
olarak tanımlanmaktadır.

### 2.5.2 En Büyük Kesme Gerilmesi (Coulomb) Kriteri

İki boyutlu yükleme durumunda, en büyük ve en küçük normal gerilmelerin farkının yarısı olan en büyük kesme gerilmesinin,  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ , kaya malzemesinin kesme dayanımını aşması halinde yenilme beklenir.

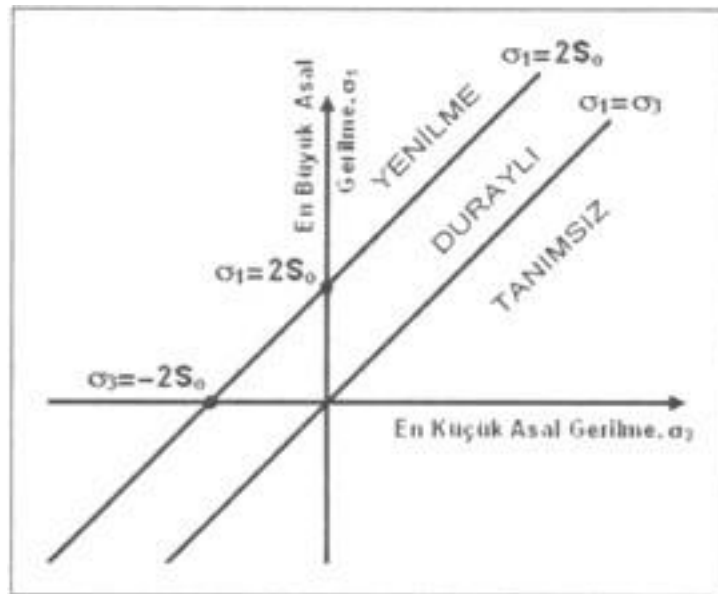
Şekil 2.8'deki kesme gerilmesi-normal gerilme ilişkisindeki yatay yenilme zarfının üzerine düşen gerilme durumları yenilme gösterirken altındakiler duraylıdır (Eşitlik 2.3).

$$T_{\max} = [(\sigma_1 - \sigma_3)/2] \geq S_0 \quad (2.3)$$



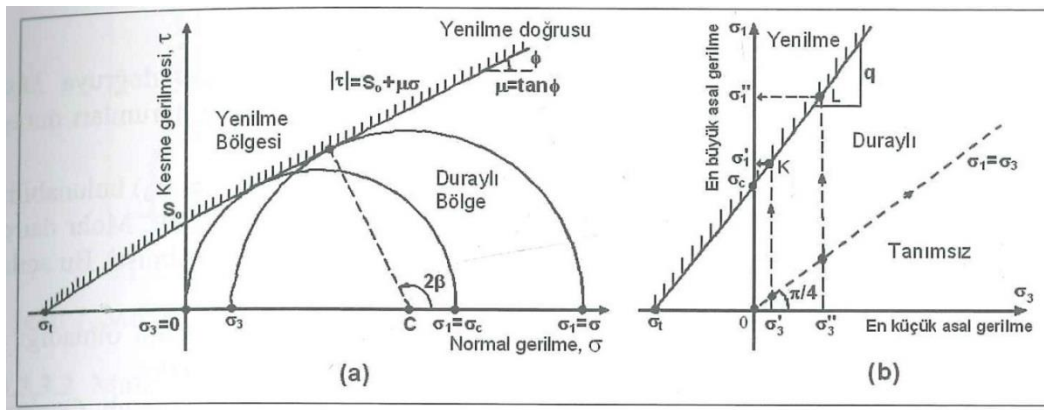
Şekil 2.8 Coulomb kriterinin normal gerilme-kesme gerilmesi cinsinden gösterimi.

Burada  $S_0$ ; malzemenin kohezyonu,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  asal gerilmelerdir. Bu kriterin asal gerilmeler cinsinden ifadesi de Şekil 2.8'de çizilmiştir. Şekil 2.8'deki  $[(\sigma_1 - \sigma_3)/2] \geq S_0$  doğrusunun (zarfının) üzerindeki gerilme durumları yenilmeyi verirken,  $(\sigma_1 = \sigma_3)$  doğrusunun altındaki gerilme durumları tanımsızdır. Çünkü bu bölgede  $\sigma_3 > \sigma_1$  koşulu sağlanır ki bu durum bizim baştan kabul ettiğimiz en büyük asal gerilme  $\sigma_1$ 'dir ilkesine uymaz. Bu iki doğrunun arasına düşen gerilme durumları ise duraylılık gösterirler.



Şekil 2.9 Coulomb kriterinin asal gerilmeler cinsinden gösterimi.

Coulomb yenilme kriteri ile ilgili olarak Şekil 2.9'da görüleceği üzere, yenilme zarfı (doğrusu) yatay olduğundan eğimi sıfırdır, dolayısıyla sürtünme açısı da sıfırdır. Bu kriterde sürtünmenin etkisi yoktur ve kaya örneği her koşulda en büyük asal eksenle her zaman 45°lik açı yaparak kırılır. Bu çok ideal bir durumdur ve pratikte gerçekleşmesi mümkün değildir. Dolayısıyla yenilmeyi tam temsil etmediği görülmektedir. Bu kriter, sürtünmeyi de içerecek şekilde modifiye edildiğinde  $\tau_{\theta} \geq S_0 + \mu\sigma_{\theta}$  eşitliği yazılır. Coulomb kriterinin asal gerilmeler cinsinden en genel yazılımını Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Karpuz 2012).



Şekil 2.10 Sürtülmeli coulomb kriterinin geometrik gösterimi.

### 2.5.3 Mohr Kriteri

Mohr kriteri; kesme gerilmesinin artarak belli bir kritik değere (kesme dayanımı), veya asal gerilmelerin en küçüğünün çekme dayanımına ulaşması halinde yenilmenin olacağını ifade eder (Eşitlik 2.4). Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki şekilde belirtilmektedir;

$$T_{\theta} = f(\sigma_{\theta}) \quad \text{veya} \quad T_{\theta} \geq S_0 + \sigma_{\theta} \tan \phi \quad (2.4)$$

$$\sigma_3 \geq -\sigma_t \quad \sigma_3 \geq -\sigma_t$$

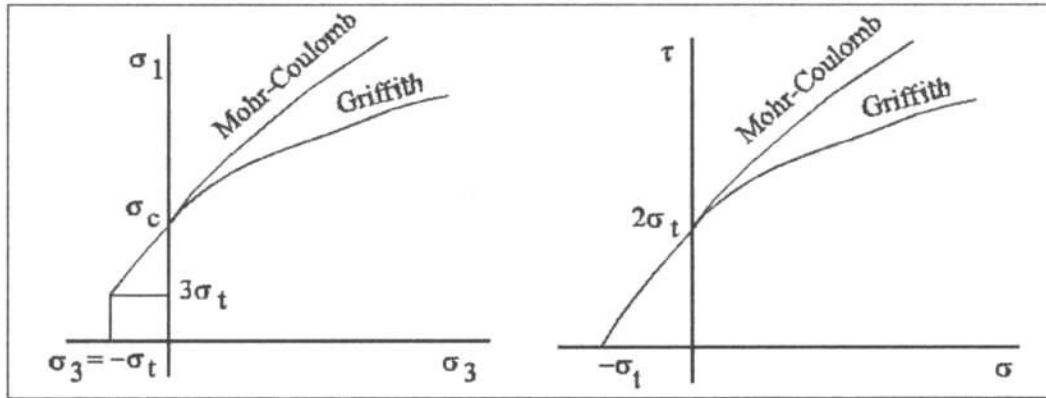
- Mohr dairelerine teğet olan doğruya Mohr Yenilme Zarfı Doğrusu denir. Bu doğrunun altında kalan kısım duraylı iken, üzerindeki kısım (kırılma) bölgesidir.
- Mohr kriteri kullanılarak, yenilme halindeki gerilme değerlerine ulaşılabilir ( $\sigma_1, \sigma_3$ ).

c. Mohr kriteri kullanılarak, yenilme sırasındaki kırılma açısına ulaşılabilir.

$\tan\Phi=\mu$  olduğundan dolayı, Mohr kriterinin, sürtülmeli Coulomb kriterinin aynı olduğu kolayca görülmektedir. Bu yüzden bu iki kriter birleştirilerek Mohr-Coulomb kriteri olarak anılmaktadır (Karpuz 2012).

#### 2.5.4 Griffith Kriteri

Yenilme kriterlerinin en eskilerinden biri olarak bahsedilmekte olan bu kriter ve çekme dayanımını esas alır. Griffith kriterine göre, bir malzeme, çekme gerilmesine tabi tutulduğunda, içinde ucunda büyük gerilme yoğunlaşmaları oluşan mikro çatlaklar (Griffith çatlağı) oluşur. Bu çekme gerilmeleri söz konusu malzemenin çekme dayanımını geçerse çatlak oluşumuna sebebiyet verir ve çatlaklar büyüyerek yenilgiyle sonuçlanır. Griffith kriteri hem asal gerilmeler hem de - cinsinden Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11 Griffith yenilme kriterinin gösterimi.

#### 2.5.5 Tresca Kriteri (en büyük kesme gerilmesi)

Tresca kriterine göre yenilme,  $\sigma/2$  değerine en büyük kesme gerilmesinin ulaştığı durumda gerçekleşir (Eşitlik 2.5). Bu kriter gereğince;

$$\sigma_1 - \sigma_3 = S_1 - S_3 = \sigma_0 \quad (2.5)$$

Burada, asal gerilme sapmalarını S1 ve S3 temsil etmektedir. Buna göre çekme ve basma durumlarında yenilme gerilmeleri her iki durum için  $\sigma_0$  de değeridir. Ancak, bu yaklaşım metaller için doğru kabul edilse de kaya malzemesi için uygun değildir (Tresca 1968).

### 2.5.6 Von Mises Kriteri

Bu kriter, J2 (gerilme sapma sabiti) değeri sabit alınarak tanımlanmıştır (Eşitlik 2.6). Buna göre;

$$2\sigma_0^2 = (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 \quad (2.6)$$
$$\sigma_3 = -\sigma_1 \cdot \sigma_2 = 0 \text{ ve } \sigma_1 = \left(\frac{\sigma_0}{3}\right)^{1/2}$$

şeklinde tanımlanır. Daha çok metal üzerine yapılan çözümler için uygun olan bu kriter çatlaklar üzerine yapılan deneysel çalışmalarda zaman zaman kullanılmaktadır.

### 2.5.7 Hoek ve Brown Görgül Yenilme Kriteri

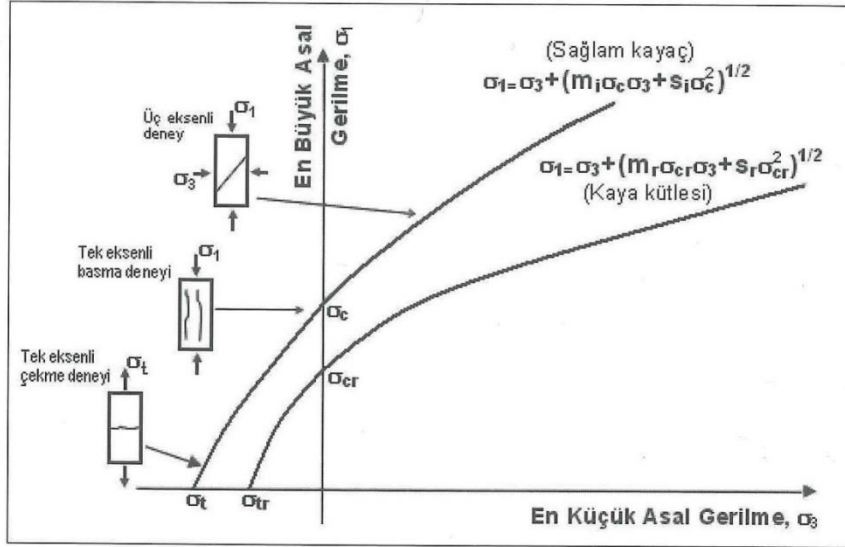
Hoek ve Brown (1980) yenilme kriteri, kaya kütesinin yenilmesini temsil etmesi açısından önemli ve araştırmacıların deneyimlerine de dayanan görgül bir kriterdir. Söz konusu araştırmacılar, deney verileri ile yenilmenin ve kaya davranışını irdeleyerek aşağıda verilen görgül ilişkiyi önermişlerdir (Eşitlik 2.7).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2} \quad (2.7)$$

Burada,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ : yenilme anında uygulanmakta olan en büyük ve en küçük asal gerilmeler,

$\sigma_c$  : kaya maddesi tek eksenli basma dayanımı,

$m$ ,  $s$  : kayanın özelliklerine, cinsine ve  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  maruz kalmadan önceki süreksizliklerin derecesine bağlı istatistiksel parametrelerdir. Diğer bir deyişle, diğer kriterlerde olan sürtünme açısı ve kohezyonun karşılığı olarak denk gelmektedirler (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Hoek ve Brown empirik yenilme kriterinin gösterimi.

' $m$ ' ve ' $s$ ' için kaya örnekleri çatlaklıysa ve  $m_r$  ile  $S_r$  biliniyorsa, çatlaklı kaya kütlelerinin tek eksenli basma ve çekme dayanımları aşağıdaki formülden bulunur (Eşitlik 2.8).

$$\sigma_{cr} = \sigma_c \sqrt{S_R} \quad ve \quad \sigma_{tr} = \frac{\sigma_c}{2} \left[ m_r - (m_r^2 + 4S_R)^{1/2} \right] \quad (2.8)$$

Laboratuvar deneyleri ile belirlenen çatlaksız kaya maddelerinin tek eksenli basma dayanımlarının aksine kaya kütlelerinin basma dayanımları yukarıda verilen eşitliklerden hesap edilirler.

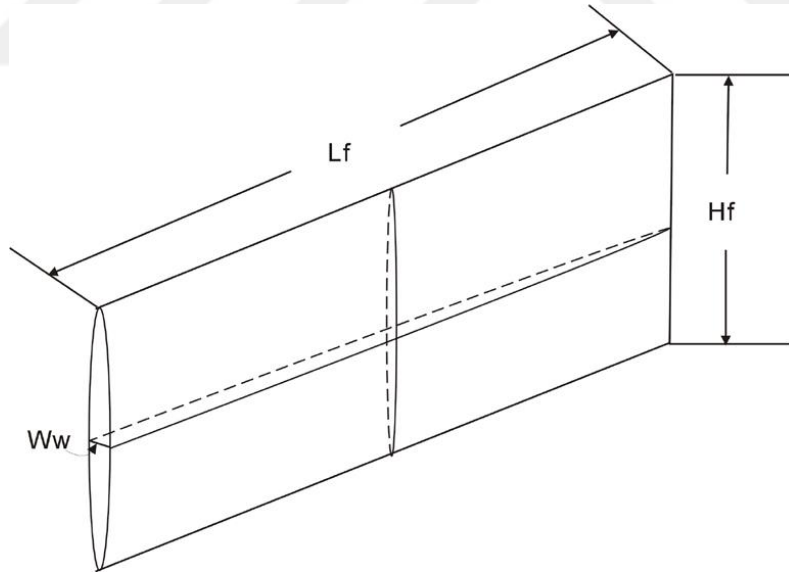
### 3. ÇATLAK İLERLEME MODELLERİ

Kayaçlarda çatlak oluşumunun ardından bu çatlakların kontrollü olarak ilerletilmesi konusu Çatlak ilerleme modelleri iki boyutlu modeller ve üç boyutlu modeller olmak üzere ikiye ayrılabilir.

#### 3.1 İki Boyutlu Modeller

##### 3.1.1 PKN Çatlak İlerleme Modeli

Perkins ve Kern (1961), kırılma uzunluğunu ve sabit bir yüksekliğin genişliği hesaplamak için denklemler geliştirmiştir. Daha sonra Nordgren (1972), çözeltiye sıvı kaybı ekleyerek modelini geliştirmiştir. PKN modeli, kırığın hem yatay düzlemde hem de dikey düzlemde sabit bir yüksekliğe ve eliptik bir enine kesite (Şekil 3.1) sahip olduğu varsayımına dayanmaktadır.

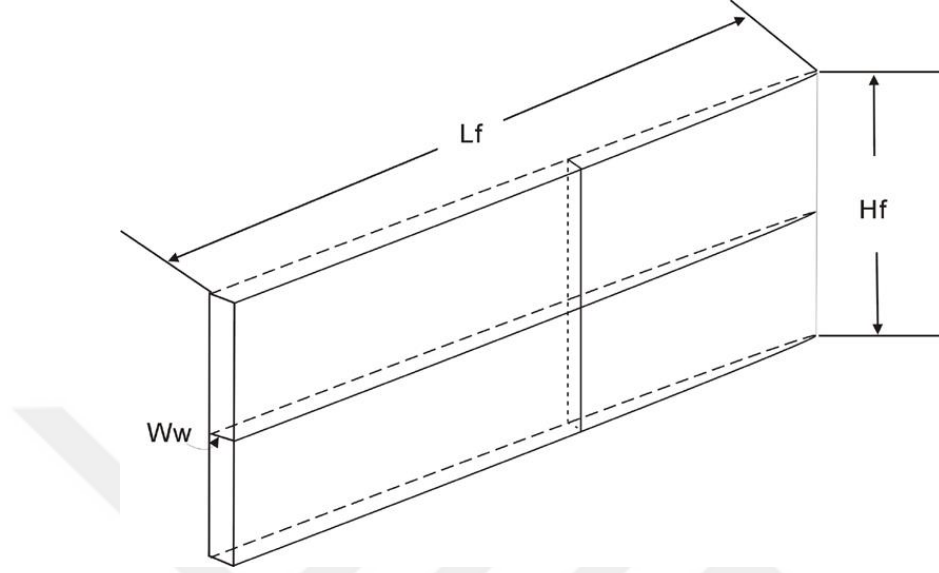


Şekil 3.1 PKN modelinin geometrisi.

##### 3.1.2 KGD Çatlak İlerleme Modeli

KGD modeli Khristianovic ve Zheltov (1955) ve Geertsma ve de Klerk (1969) tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde, kırılma deformasyonunun ve yayılımının bir

düzlem gerilme durumunda geliştiği varsayılmaktadır. Geleneksel bir KGD kırılma yayılma modelinin geometrisi, Şekil 3.2 'de gösterilmiştir.

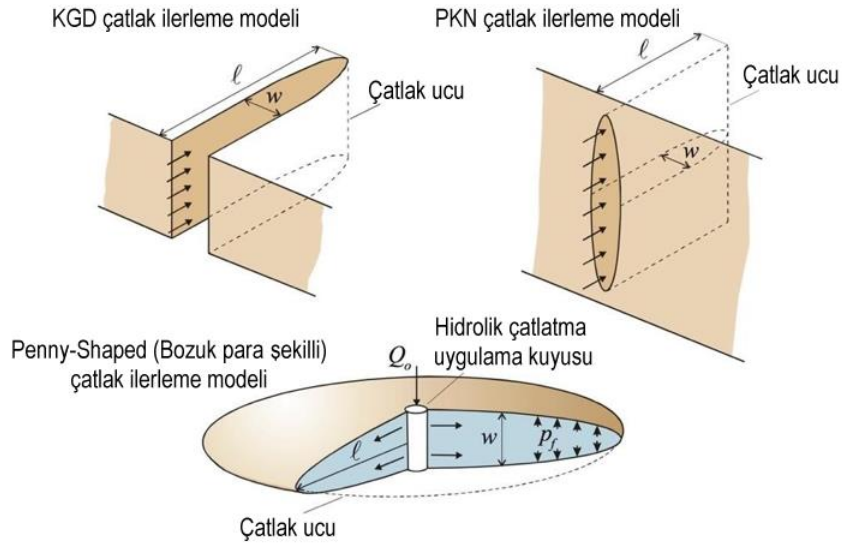


Şekil 3.2 KGD modelinin geometrisi.

KGD modeli altı varsayımda oluşur; kırılma, yatay düzlemde eliptik bir enine kesite sahiptir. Her yatay düzlem bağımsız olarak deforme olur. Kırılma yüksekliği,  $h_f$  sabittir, yayılma yönünde akışkan basıncı, değişken genişlikte dar bir dikdörtgen, dikey yarıktaki akış direnci ile belirlenir. Akışkan tüm kırılma uzunluğu üzerinde etkili değildir ve dikey düzlemdeki enine kesit dikdörtgendir (kırılma genişliği yüksekliği boyunca sabittir) (Geertsma 1969).

### 3.1.3 Radyal Çatlak İlerleme Modeli

Penny-Shaped model kırılmanın belirli bir düzlemde yayıldığını tanımlar. Adlandırıldığı gibi radyal şeklindeki kesiti, sıvının enjekte edildiği bir nokta ile simetriktir ve hidrolik kırılma simülasyonunda sabit sıvı enjeksiyon hızı ve basıncı varsayılır (Abe 1976). Şekil 3.3' de aşağıdaki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Üç kırılma yayılımı modelleri.

### 3.2 Üç Boyutlu Modeller

Teknolojinin ve jeo-mekanik yorumlamanın ilerlemesi birlikte, kırılma gelişiminin simülasyonu, 2D modelden yarı üç boyutlu modele (P3D) ve üç boyutlu modele (3D) kadar önemli ölçüde ilerlemiştir. P3D modeli, 2B modelden sabit yükseklik varsayımını, kırık ve pompalama süresi boyunca bir konum işlevi olarak değiştirir ve 3D model, P3D modelinden daha fazla varsayımı uygulanabilir. Tel örgü modeli ve geleneksel olmayan kırılma modeli (UFM), hidrolik kırılma simülasyonu için popüler 3D modellerdir. Tel örgü modeli, ağdaki kırık boyutlarını ve propant yerleşimini simüle edebilir. Bununla birlikte bu modelde iki sınırlama vardır; Birincisi, önceden var olan doğal kırıkların elipsoidel kırık modeli ile doğrudan bağlantılı olmaması; diğer bir sınırlama, ağ modelinin, enjeksiyon noktasına göre simetrik olması ve kesit şeklinin eliptik olmasıdır, bu varsayım, gerçek mikro sismik incelemelerde karşılaşılan asimetri ve düzensiz şekliyle çelişmektedir. Bununla birlikte, rezervuar karakterizasyonu, jeo-mekanik modelleme, mikro sismik yorumlama ve üretim-simülasyon araçları entegrasyon teknolojileri ile UFM, bir yazılım platformu olarak daha güçlü hale gelmektedir. Sonuçta, hidrolik kırılma gelişmeye devam ettikçe daha gerçekçi 3D simülasyon yazılımı elde edilir (Hao 2015).

### 3.3 İki ve Üç Boyutlu Modellerin Karşılaştırılması

2B kırılma modeli basitleştirilmiş varsayımlara sahip pratik matematiksel simülasyondur. Ancak, basitleştirilmiş varsayımlar, kesit sabit yüksekliğinde veya penny-shaped olarak adlandırılan bozuk para şekilli değildir. Üç boyutlu modeller daha fazla çatlak ilerleme parametresini simüle ettiklerinden daha gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir (Hao 2015).

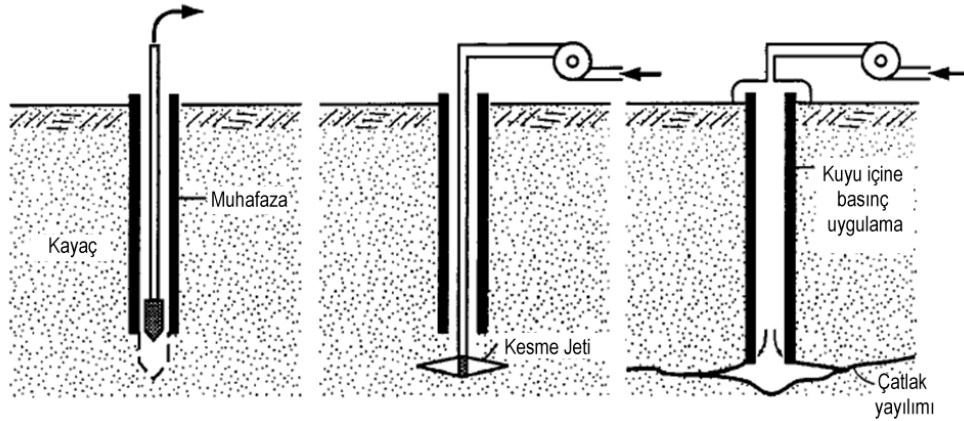
## 4. KAYA ÇATLATMA YÖNTEMLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

### 4.1 Kaya Çatlatma Yöntemleri

Kaya çatlatma yöntemlerinin başında hidrolik ve pnömatik çatlatma yöntemleri gelmekle birlikte bunların dışında da çatlatma yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler içinde hidrolik çatlatma yöntemi en geniş uygulama alanı bulmuştur.

#### 4.1.1 Hidrolik Çatlatma

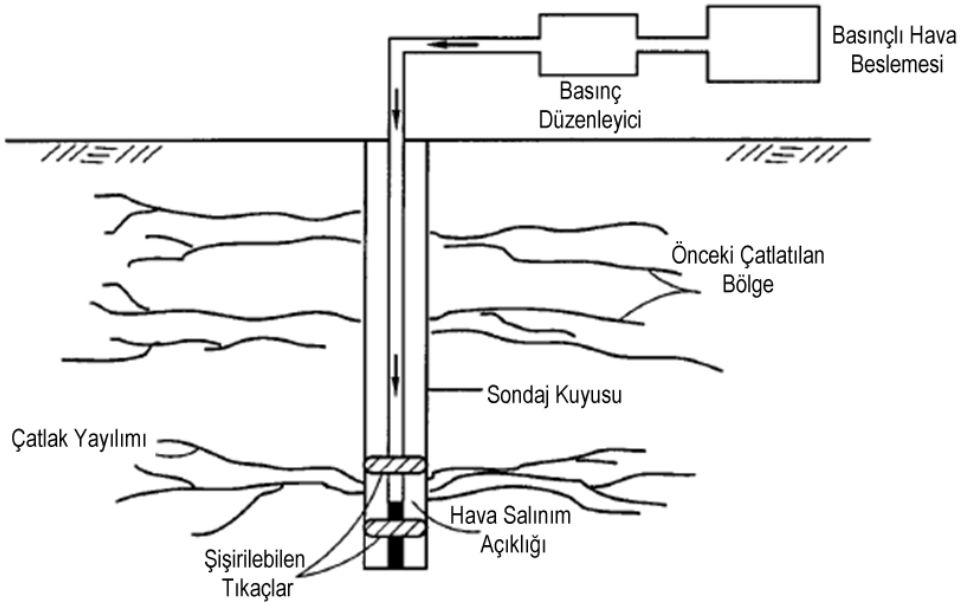
Hidrolik çatlatma terimi günümüzde yaygın olarak su bazlı akışkanlar ile kayaçların kırılması sürecini ifade etmek için kullanılmaktadır. Gerçekten, hidrolik kırılma için temel sıvı olarak su kullanmak daha yeni bir gelişmedir (Montgomery and Smith 2010). İlk kırık uygulamaları kerosen ile gerçekleştirilmiştir. 1952'nin sonunda, rafine ve ham yağlarla birçok kırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu akışkanlar ucuz olduğundan uygulama alanı bulabilmiştir. 1953 yılında su, kırılma sıvısı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Hidrolik çatlatma uygulamalarında suya çeşitli kimyasal malzemeler ve katı parçacıklar ilave edilerek çatlatma performansının artırılması yoluna gidilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Hidrolik çatlatma yöntemi (Suthersan 1999).

#### 4.1.2 Pnömatik Çatlatma

Pnömatik çatlaklar, hava veya diğer herhangi bir gazın, doğal kuvvetleri aşan bir basınçta ve aynı zamanda formasyonda bulunan in situ gerilmeler içinde enjekte edildiği jeolojik formasyonlarda üretilebilir (Suthersan 1999). Normalde sıg oluşumlarda kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde yüksek basınçlı saf azot gazı kullanılmaktadır. Azot gazının bu uygulamada seçimi düşük viskoziteli, inert ve sıkıştırılabilir bir gaz olması nedeniyle dayanmaktadır (Şekil 4.2). Düşük geçirgenliğe ve gözenekliliğe sahip derinliği düşük şeylerde uygulanan bir tekniktir (Air Products 2013).



Şekil 4.2 Pnömatik çatlatma sistemi (Suthersan 1999).

#### 4.1.3 Dinamik Yükleme İle Çatlatma

Bu uygulamalar, akışkanlardan yararlanmayan kırılma tekniklerini içermekte olup kuyuların dibine yerleştirilen patlayıcılar veya elektriksel impulslar uygulanarak elde edilen dinamik bir yüklemeyle kayaçlar kırılmaktadır. 1860'lardan 1940'ların sonlarına kadar, patlayıcılar kayaçların kırılmasında kullanılmıştır. Uygulamada, bir teneke silindirin içindeki sıvı nitrogliserin kuyudan aşağı indirilmiş ve patlatılmıştır. Teknik oldukça etkili olmasına rağmen çok tehlikelidir (Hyne 2001).

1960'ların sonunda nükleer enerji, doğal gazın geri kazanımını arttırmak için kaya oluşumlarını kırmak için bir araç olarak test edilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, Gasbuggy Projesi (Lemon and Patel 1972; American Oil and Gas Historical Society 2012), 1288 metre yeraltı derinliğinde 29 kiloton nükleer bir patlatmayı test etmiştir. Patlama, yaklaşık 333 metre boyunda erimiş cam kaplı bir mağara yaratmış ve bu da saniyeler içinde çöktü. Sonraki ölçümler, kırıkların tüm yönlerde 60 m'den fazla yayıldığını ve doğal gaz üretiminin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Colorado'da ayrıca iki yeni nükleer patlama (Project Rulison ve Project Rio Blanco) da gerçekleştirilmiştir. Doğal gazın ticari olarak uygulanabilir olması için fazla radyoaktif olduğu kanıtlandı. Rusya'da petrol ve gaz kuyularını kırmak için yapılan benzer testlerin de olduğu bildirilmektedir. Sovyetler Birliği de Program 7 olarak da anılan benzer bir program uygulamıştır. Bu program, barışçıl faaliyetlerde kullanılmak üzere endüstriyel nükleer araştırmaların test edilmesini içeriyordu. Program 7 ile petrol üretimin geliştirilmesi amacıyla 12 patlatma ve gaz uyarımı için 9 patlatma gerçekleştirilmiştir (Nurdyke 2000).

Son zamanlarda, çalışmalar, itici gazların patlayıcılara göre güçlü avantajlara sahip olduğunu göstermiştir. İtici maddeler, patlatılmak yerine deflagrasyona uğrayan maddelerdir. İtici teknikler, şeyl gazı çıkarımı için potansiyel bir kullanım sunmakta gibi görünmektedir.

#### **4.1.4 Termal (kriyojenik) Çatlatma**

Kayaçların çatlatılması rezervuardan daha soğuk bir sıvı kullanılarak sağlanabilir. Bu, kayayı kırılabilir termal stresler yaratacaktır. Bu yöntemde bir sıvı kullanılıyor olsa da kırılma sıvının yüksek basıncı neticesinde olmamaktadır. Yeraltında belli derinliklerdeki kaya kütleleri derinliğe bağlı olarak yüksek sıcaklıklara sahiptirler. Bu derinliklere soğuk su enjeksiyonu uygulandığında formasyonlarda kırılmalar gözlenmektedir (Svendson and Wright 1991; Charlez and Lemonnier 1996). Son zamanlarda, önemli miktarlarda kırılmaya neden olan termal stresler yaratmak için büyük miktarlarda soğuk su yerine soğuk CO<sub>2</sub>'nin enjekte edilmesine dayanan bir kırılma tekniği önerilmiştir (Mueller and Amro 2012).

## 4.2 Hidrolik Çatlatma Yönteminin Uygulama Alanları

Hidrolik çatlatma yöntemi ilk olarak petrol ve doğalgaz içeren şeyl ve kumtaşı gibi kayaların çatlatılarak gözenekleri içerisinde yer alan kaynakların üretime kazandırılması amacıyla uygulanmıştır. Kaya gazı olarak isimlendirilen bu kaynakların üretime alınmasıyla dünya petrol ve doğalgaz üretiminde üretici ülkelerin sıralamasında dahi önemli değişiklikler meydana gelmiştir. Hidrolik çatlatma uygulamaları özellikle ABD’nde kumtaşları içerisinde kapanım şeklinde bulunan kaya gazı ve kaya petrolünün üretiminde kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda alınan müspet sonuçlar ABD’nin petrol üretiminde Suudi Arabistan’ın bile önüne geçmesini sağlamıştır.

### 4.2.1 Kaya Gazı Üretimi

Konvansiyonel olmayan gaz basitçe geçirgenliği çok düşük olan ve doğrudan kaynaktaki kayalardan üretilen gaz olarak tanımlanabilir. Günümüzde ticari olarak üretimleri gerçekleştirilen üç tür konvansiyonel olmayan gaz türü bulunmaktadır. Bunlar; geçirgen olmayan gaz, kömür yatağı metanı ve kaya gazıdır.

Konvansiyonel olmayan gaz türleri arasında en hızlı gelişme kaya gazı üretiminde yaşanmıştır. Kaya gazı yoğun bir şekilde kayalar arasında sıkışmış ve yer altındaki geniş alanlara yayılmış halde bulunmaktadır. 2000’li yıllardan önce kaya gazının ekonomik olarak ticari ölçekteki üretimi yaygın değildi. Bu alanda geliştirilen yatay sondaj ve hidrolik çatlatma teknolojileri kaya gazı üretimini ekonomik olarak mümkün kılmıştır (Sevim 2013).

Kömür, petrol, doğal gaz gibi kaynaklar konvansiyonel enerji kaynakları olarak anılırlar. Son yıllarda kömür ve bitümlü şeyl gibi alternatif fosil enerji kaynağı arayışları sırasında şeyl gazı (kaya gazı) gündeme gelmiştir. Konvansiyonel olmayan enerji kaynakları sınıflamasında yer alan ve kaya gazı olarak da anılan gaz, adını içinde bulunduğu kayaç türünden almaktadır. Kaya gazı, şeyl adı verilen, kil ile kuvars ve

kalsit minerallerinden oluşan tortul kayacın küçük gözeneklerinde bulunan gazdır (Şengüler 2013).

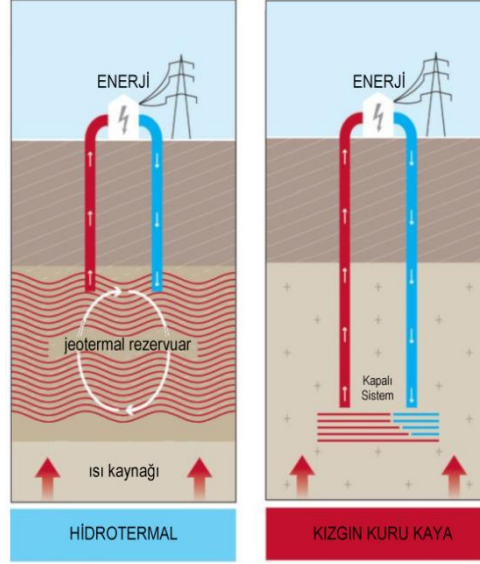
Yatay sondaj işlemi sırasında öncelikle sondaj yapılacak bölgeye yaklaşık 2,5-3 km dikey sondaj yapılmakta sonra elmas uçlu özel sondaj matkaplarıyla 1-1,5 km kadar yatay her iki yöne sondaj uygulaması yapılmaktadır. Sonrasında sondaj kuyularına yüksek basınç ve hacimle enjekte edilen sondaj sıvısı kaya üzerinde dar çatlaklar yaratmaktadır. Sıvıya nüfuz eden kum arkada kalmakta ve çatlaklar genişlemektedir. Böylece doğal gazın kuyudan çıkması sağlanmaktadır. Hidrolik çatlatma sıvısının bileşimi % 98-99,5 arasında su + kum ve % 2-0,5 arasında özel kimyasallardan oluşmaktadır (Sevim 2013).

#### **4.2.2 Jeotermal Enerji Üretiminde Hidrolik Çatlatma Uygulamaları**

Yağmur, kar, deniz ve magmatik suları yeraltındaki gözenekli ve çatlaklı kayaç kütlelerini besleyerek, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısının etkisiyle jeotermal rezervuarları (sıcak sulu sistem) oluştururlar. Jeotermal rezervuarlar kimyasallar içeren sıcak su, buhar ve gazlardan meydana gelir. Yeraltı ve reenjeksiyon koşulları devam ettiği müddetçe yenilenebilir ve sürdürülebilir özelliklerini korurlar. Kısa süreli atmosferik koşullardan etkilenmezler.

Meteorik su dolaşımı jeotermal sistemlerin yanında, içinde bulunulan jeolojik ortamın karakterine göre hidrotermal sistemler, jeopressed sistemler, Kızgın Kuru Kaya (KKK) ve Geliştirilebilir Jeotermal Sistemler (GJS-EGS) de jeotermal enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir (Şekil 4.3). Doğal çatlak ve gözenek geçirimsizliği olmayan ve yüksek sıcaklığa sahip kayaçlar (örneğin granit) “Kızgın Kuru Kaya” olarak adlandırılmaktadır. Doğal çatlak ve gözenek geçirgenliği içeren ancak ekonomik miktarda akışkan içermeyen sistemler ise “Geliştirilebilir Jeotermal Sistemler” olarak adlandırılır. KKK ve GJS sistemleri sıcak kayaçlar içinde açılan enjeksiyon ve üretim kuyuları arasında hidrolik tahrik ile var olan çatlakların açılması veya yeni çatlaklar oluşturma yoluyla yapay geçirgenlik oluşturularak, su dolaşımı sağlanarak ısının elde edilmesi esasına dayanır. Böylece elde edilen yüksek sıcaklıklı sıcak su/ buhar jeotermal

santral tesisine gönderilir. Son zamanlarda GJS sistemleri her ikisini de kapsayacak bir terim olarak da kullanılmaktadır. Aradaki tek fark kayaç tipi olup, KKK sistemlerinde sıcak kayaç granitik bir kayaç, GJS sistemlerinde ise mağmatik olmayan düşük geçirgenlikte kayaçlardır (Burçak 2006).

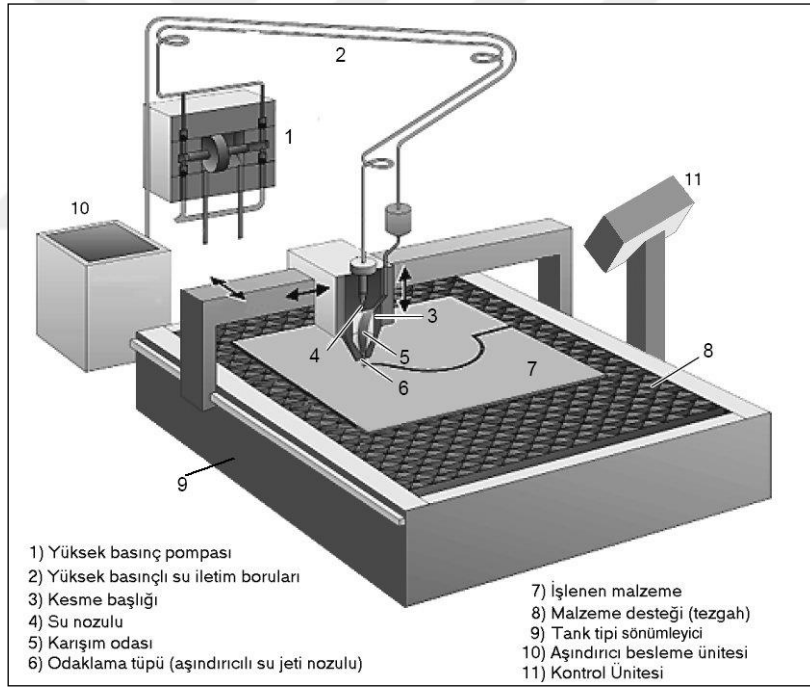


**Şekil 4.3** Hidrotermal ve kızgın kuru kaya jeotermal sistemleri.

Türkiye’de jeotermal kaynaklar, bulunduğu jeolojik ortama ve ısı kaynağının türüne göre sınıflandırılmıştır. Buna göre yedi grup kaynak tanımlanmış olup, bunlardan dört grup kaynak bölgesinin yüksek gradyan nedeniyle KKK/GJS sistemleri için uygun oldukları belirtilmiştir. Bunlardan ortak özellikleri ile tanımlanan dört bölgenin KKK/GJS projesi için uygun bölgeler olabileceği ortaya konmuştur. Bunlar, 1) Kısmi ergime ve Migmatitleşme/anateksi ile ilgili Batı Anadolu Jeotermal kaynakları, 2) Tersiyer yaşlı dalma batma kökenli granitlerle ilgili KB Anadolu jeotermal kaynakları, 3)Gömülü intrüziyonlarla ilişkili İç Batı Anadolu-Güney Marmara bölgesi jeotermal kaynakları 4) Genç volkanik kuşakla ilgili Orta ve Doğu Anadolu jeotermal kaynakları olarak tanımlanmıştır. Bu bölgelerde uygun lokasyonlar seçilmesi durumunda, KKK/GJS projeleri için, 5.000 m derinlikte, sırasıyla 450-500°C, 350°C, 325°C ve 375°C kuyu taban sıcaklıkları beklenmektedir (Burçak 2006)

## 5. SU JETİ YÖNTEMİ VE HİDROLİK ÇATLATMADA KULLANIMI

Su jeti adından da anlaşılacağı gibi yüksek hızlı (800-1000 m/s) su demetini ifade etmektedir. Su jeti, çok yüksek basınçlardaki suyun (300-400 MPa) orifis olarak adlandırılan çok dar bir aralıktan (0,25 mm) çıkmaya zorlanmasıyla elde edilirler. Su jeti makinasının şematik görünümü Şekil 5.1’de verilmektedir. Su jeti kesme makinasının en önemli bileşeni 300-400 MPa basınç üreten yüksek basınç pompasıdır. Böylesine yüksek bir basıncı üretmenin yanında muhafaza etmek de büyük bir başarıdır. Sistemin diğer önemli bir bileşeni ise suyun çıktığı açıklığın bulunduğu kesme kafasıdır. Burada saf suyun çıktığı açıklık aşınımları minimize etmek üzere safir veya elmaştan yapılmaktadır (Engin 2006).



Şekil 5.1 Çalışmada kullanılan su jeti kesme makinesi ve bileşenlerinin şematik görünümü (Engin 2006)

Su jeti, kesilecek malzemeye göre saf veya aşındırıcı ilave edilerek elde edilen aşındırıcılı su jeti formunda olabilir. Gıda malzemeleri, köpük vb. yumuşak malzemelerin kesilmesi için saf su jeti yeterli olurken, çelik, mermer, granit vb. sert

malzemelerin kesilebilmesi için içine granat minerali aşındırıcı olarak ilave edilir. Böylelikle su jeti ile neredeyse her tip malzeme kesilebilir.

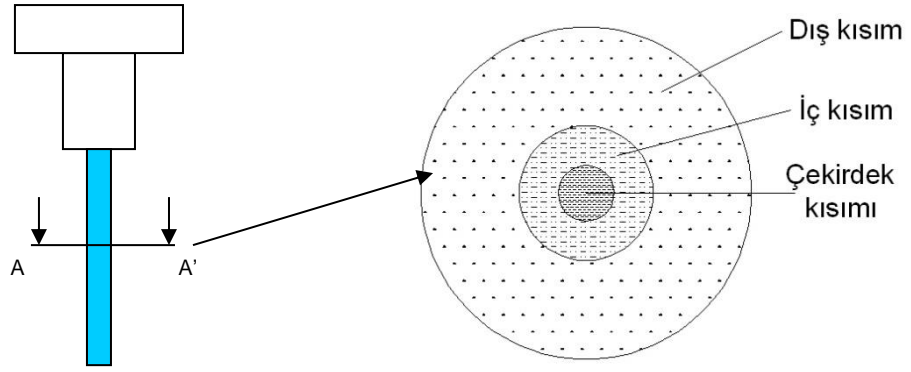
Aşındırıcılı su demetiyle kesmede etkili olan doğal taş, makine-teçhizat ve kesme koşulları etmenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

**Çizelge 5.1** Aşındırıcılı su demetiyle kesmede etkili olan etmenler (Engin 2006).

A. Değiştirilemez kayaç etmenleri	B. Yarı değiştirilebilir etmenler
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Kimyasal bileşenleri</li><li>➤ Mineralojik bileşenleri</li><li>➤ Mineralojik özellikleri</li><li>➤ Fiziksel özellikleri<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Yoğunluk</li><li>▪ Gözeneklilik</li><li>▪ Su emme</li><li>▪ Sertlik</li></ul></li><li>➤ Mekanik özellikleri<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Tek eksenli basma dayanımı</li><li>▪ Elastisite modülü</li><li>▪ Çekme dayanımı</li><li>▪ Aşınma dayanımı</li></ul></li></ul>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Su demetli kesme makinesi etmenleri<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pompa türü ve basıncı</li><li>➤ Su demeti püskürtme memesi ve özellikleri<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Boyu</li><li>▪ Çapı</li><li>▪ Geometrisi</li></ul></li><li>➤ Püskürtme memesi yanal hızı</li><li>➤ Püskürtme memesi - malzeme arası mesafe</li></ul></li><li>2. Kesme ortam koşulları<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Karışım malzemeleri ve kimyasallar</li><li>➤ Karışım miktarları</li><li>➤ Uygulanan kesme yöntemi</li></ul></li></ol>

Su jeti doğaltaş kesme-işlemede de kullanılmaktadır. Su jeti saf su jeti formunda granit ocaklarında blok kesme işlemlerinde kullanılmaktayken, aşındırıcılı su jeti plaka şeklinde her tip doğaltaşın istenilen formlarda kesilmesi işleminde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, su jetinin aşındırıcı besleme ünitesi kapatılarak saf su jeti formu alması sağlanmış ve yüksek hızlı su demetinin granit yüzeyine yüksek hız basıncıyla etki etmesi sağlanarak hidrolik çatlatma işlemini simüle etmesi amaçlanmıştır.

Su jetinin kesme kafasından çıktıktan sonraki formu Şekil 5.2’de verilmektedir.



Şekil 5.2 Aşındırıcılı su jetinin doğru eksenine dik şematik A-A' kesiti.

Şekil 5.2'de verilen su jetinin yapısında çekirdek kısmı asıl enerjiyi taşıyan kısım olup aşındırıcı beslemesi kapalı tutulduğundan iç ve dış kısmın çapının oldukça küçük olduğu düşünülmektedir.

Hidrolik çatlatma uygulamaları farklı boyutlarda ve şekillerde (küp veya silindir) kayaç örneklerinde bir silindirik delik açarak içerisine 210 MPa'a kadar yüksek basınçta su vererek çatlak ilerlemesini sağlamak ve bu ilerlemeyi akustik emisyon (AE) gibi çeşitli araçlarla kaydetmeye dayanmaktadır. Bazı cihazlarda yeraltındaki gerilme ortamını simüle etmeye yarayan gerçek üç eksenli basınç ünitesi ve yeraltındaki sıcaklık şartlarını simüle eden ısıtma tertibatı bulunmaktadır. Çatlatma uygulaması 1-2 dakika arasında değişmektedir. Hidrolik çatlatma ile ilgili standart bir test yöntemi dünya genelinde kabul edilmemiştir. Yeni test cihazları ve uygulamaları gelişmeye devam etmektedir.

Bu çalışmada, 300 MPa basınçtaki su jeti, hazırlanan 20x20x20 cm ebatlarındaki granit örneklerinin yüzeyine 2 dakika süresince uygulanmış ve daha sonra oluşan çatlakların yanal yayılımı çatlak ilerleme miktarı olarak kaydedilmiştir.

## 6. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, kızgın kuru kaya olarak jeotermal enerji üretiminde bir potansiyele sahip Aksaray ili çevresindeki granitik kayaların çeşitli özelliklerinin hidrolik çatlatma performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, çalışma sahasından makroskobik incelemeler sonucu farklı özelliklere sahip oldukları düşünülen granit örnekleri alınarak bunlar üzerinde kimyasal analiz, fizikomekanik testler ve mineralojik-petrografik incelemeler yapılarak bunlardan elde edilen sonuçlarla hidrolik çatlatma performansları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Çalışma sahasının yer bulduru haritası Şekil 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6.1 Çalışma sahasının yer bulduru haritası.

### 6.1 Aksaray İli Jeolojisi

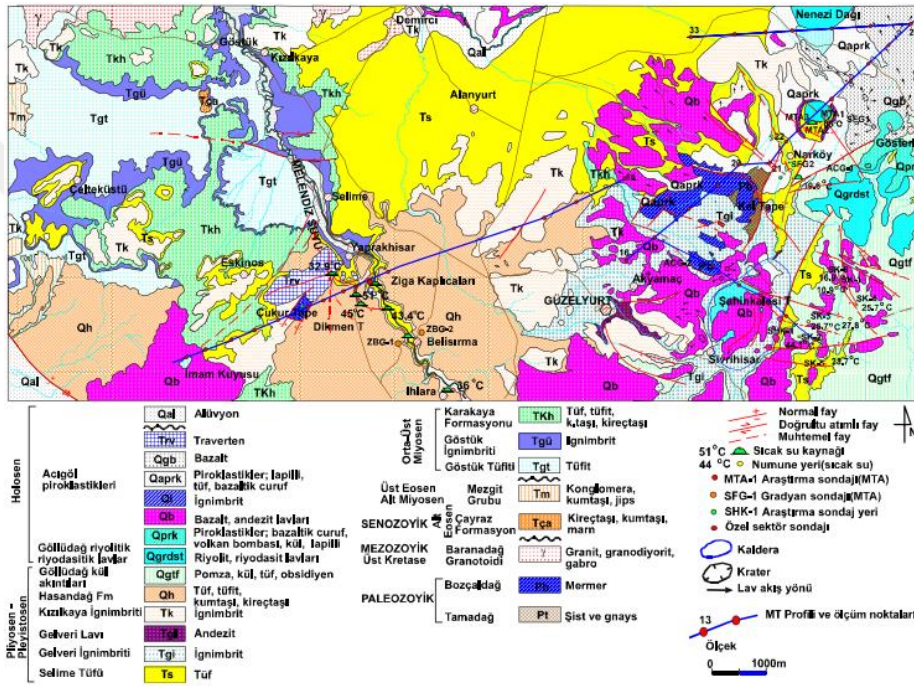
Çatlatma deneylerinde kullanılacak kayaç numuneleri Aksaray ili, Şahin kalesi, Ziga ve Acıgöl mevkieinden alınmıştır. Çalışmalarda Aksaray ilinin seçilmesinin nedeni bu bölgede yapılan manyetotellürik (MT), mikrogravite ve manyetik gibi jeofizik çalışmalarda yüzeyden itibaren 8000m derinlikten itibaren henüz soğumamış magma sokulumuna benzer jeolojik yapıların gözlenmesidir. Ayrıca bölgede yapılan jeotermal sondajlarda yaklaşık 150°C'lik kuyu dibi sıcaklığı ölçülmüştür.

Bölgede jeolojik temeli Paleozoyik yaşlı Tamadağ şist ve gnaysları ile daha üste yer alan Bozçaldağ mermerleri oluşturur. Kretase yaşlı Baranadağ granitoid-gabroid intrüzyonu bu birimleri keserek yerleşir. Temel birimler, Alt Eosen yaşlı denizel kireçtaşı, kumtaşı ve marnlardan oluşan Çayraz formasyonu; Üst Eosen-Alt Miyosen yaşlı gölsel-karasal çökel kayalardan oluşan Mezgit grubu kayaları ve Orta Miyosen Kuvaterner yaşlı volkanik kayalar ve bunlarla ara tabakalı sedimanter birimler tarafından uyumsuz olarak örtülür (Şekil 6.2). Bölgede tektonik çizgisellikler KB-GD ve KD-GB olmak üzere iki doğrultuda gruplaşırlar. KB-GD doğrultulu olan çizgiselliklerden en belirgin olanları, Aksaray Tuz Gölü fayı olup, buna paralel olarak görülen Melendiz Vadisi çizgiselliği muhtemelen genç volkanitlerle örtülü eski bir fay zonu üzerinde yer almaktadır. KD-GB doğrultulu kırıklar Ziga güney ve kuzeyinde, Melendiz Dağı-Altunhisar ve Şahinkalesi-Acıgöl arasında yer alan çizgiselliklerdir. KD-GB ve KB-GD kırıkların kesişme yerleri volkanik çıkış yerleri ile örtüşmektedir. Melendiz Dağı kuzeyindeki iki önemli volkanik çıkış yeri Melendiz vadisinin üzerinde bulunduğu çizgisellik ile Acıgöl-Şahinkalesi kalderalarını birleştiren çizgiselliğin kesişme iz düşümünde yer almıştır. Hasan Dağı, Melendiz ve Acıgöl-Şahinkalesi kaldera ve kraterleri ile bunlar çevresinde yeralan piroklastik koniler KD-GB doğrultulu bir hat üzerinde yer almaktadır (Burçak 2006).

Bölgedeki jeotermal sistemin geçirimsiz kayaçlarını Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı ignimbrit, tuf ve bunlarla yaşıt karasal gölsel tortullar oluşturmaktadır. Bu birimler bölgede yapılan manyetotellürik (MT) çalışmalarında 1000m derinliğe kadar uzandığı belirlenmiştir. Sığ rezervuarı Üst Eosen-Alt Miyosen yaşlı, çakıltaşı-kumtaşı ve jipsten oluşan Mezgit Grubu kayaçları; derin rezervuarı (500-1750m) ise Paleozoyik yaşlı mermer şist ve gnaysların oluşturduğu düşünülmektedir. Bölgeye ait manyetotellürik (MT) sonuçlarında yaklaşık 5-16 km derinliğinde düşük rezistiviteye (<27ohm.m)sahip kütlelerin kabuk içine sokulmuş, kısmen ergiyik veya katı; fakat henüz sıcaklığını kaybetmemiş magmatik sokulum olarak yorumlanmıştır. Burçak (2006)'ya göre bu magmatik sokulum bölgedeki jeotermal sistemin ısıtıcı kayacıdır.

Bölgedeki en önemli magmatik kayaçlar Baranadağ granitoid-gabroid intrüzyonu olup, birim içindeki gabro türündeki kayaçlar “Karakaya ultramafiti” plütonik kayaçlar ise

“Baranadağ granit ve granodiyorit plütönu” olarak isimlendirilmiştir (Burçak 2006.) Tez çalışması kapsamında kullanılacak olan magmatik kayalar “Baranadağ granit ve granodiyorit plütönu” olarak adlandırılan plütönik kayalardan alınmıştır. Baranadağ intrüzyonu başta granit ve granodiyorit olmak üzere, mikrodiorit, metakuvarslı diyorit ve mikromonzogranit bileşiminde magmatik kayalar oluşturmaktadır. Söz konusu kayalar inceleme alanının kuzeyinde yer alan Demirci bölgesinde yayılım sunmaktadırlar.



Şekil 6.2 Aksaray ili ve çevresinin jeoloji haritası (Burçak vd. 2003).

## 6.2 Deney Numunelerinin Karakterizasyonu

Bu çalışma kapsamında, Aksaray ili, Şahin kalesi, Ziga ve Acıgöl mevkieinden makroskopik görünüşlerinde farklılıklar gözlenen 7 farklı granit örneği alınmıştır. Bu örnekler, Y, Y1, RQ, RQ1, RQ2, RQ3, RQ4 olarak kodlanmıştır. Deneylerde kullanılacak numuneler, jeokimyasal, minerolojik-petrografik ve fizikomekanik deneylere tabi tutulacak ve malzeme özellikleri net bir şekilde ortaya konulmuştur. Bu işlem neticesinde elde edilen veriler ile daha sonra çatlatma deneylerinden alınan veriler

eşleştirerek malzemelerin çatlama performanslarının malzeme özellikleri ile ilişkileri değerlendirilmiştir.

### 6.2.1 X-Işını Kırınımı (XRD) Çalışmaları

XRD analizleri için 100 mikron altına öğütülmüş örnekler kullanılmıştır. Numuneler  $2\theta^{\circ}$ /dak hızda taranarak  $2^{\circ}$ - $70^{\circ}$  ( $2\theta$ ) goniometre kırınım açısı aralığında 1200-3000 cps (intensity) pik yoğunluğunda analiz edilecektir. XRD analizleri A.K.Ü Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi (TUAM)'nde Shimadzu marka XRD-6000 model bu cihaz Bakır X – ışını tüpüne sahip olup analizlerde  $1.544 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip Cu - K X-ışınları kullanılmaktadır. Maksimum 60 KV ve 50 mA' de çalıştırılmaktadır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Bruker D8 advance model X-ışını difraktometre cihazı.

### 6.2.2 Jeokimyasal Çalışmalar

Jeokimyasal çalışmalar için numuneler  $-90 \mu\text{m}$  boyutuna kadar öğütülecek ve numuneler Kanada ACME laboratuvarlarına gönderilerek burada ICP-MS cihazı ile majör oksit, iz ve nadir toprak elementleri analizleri yapılmıştır.

## 6.2.3 Mineralojik ve Petrografik İncelemeler

Çatlatma deneylerinin uygulanacağı örneklerin mineralojik-petrografik özellikleri polarizan mikroskop, ve x- ışını difraktometresi (XRD) analizleri uygulanacaktır. Söz konusu deneylere ait prosedürler aşağıda verilmiştir.

### 6.2.3.1 Polarizan mikroskop incelemeleri

Örneklerin mineralojik-petrografik özelliklerinin belirlenmesi için polarizan mikroskopta detaylı olarak incelemeler yapılmıştır. Polarizan mikroskop incelemelerinde A.K.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ndeki Leica DM2500P model polarizan mikroskop kullanılmıştır. Polarizan mikroskop incelemeleri için deneylerde kullanılacak olan magmatik kayalardan ince kesitler Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü Mineralojik Analizler Laboratuvarı'nda yapılmıştır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Leica marka Dm 2500P model polarizan mikroskop.

## 6.2.4 Fiziksel Testler

### 6.2.4.1 Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini

Deneylerde kullanılan doğaltaş örneklerinin görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini TS EN 1936 standardına göre yapılmıştır. Standarda bağlı olarak deneylerde şu adımlar uygulanmıştır. 5×5×5 cm boyutunda ocaklardan alınan temsili

numuneler  $70\pm 5$  °C etüvde kurutulmuştur. Sabit tartıma ( $m_d$ ) ulaşan numuneler su emme tayini için uygun bir kaba yerleştirilmiş ve  $20\pm 5$ °C' de su eklenerek 24±2 saat su içinde muhafaza edilmiştir (Şekil 6.5). Daha sonra numuneler su içerisinde tartılmış ve sudaki kütlesi ( $m_h$ ) ve suya doymun ( $m_s$ ) kütlesi tartılmıştır.

Görünür yoğunluk ( $P_b$ ) Eşitlik 6.1'e, açık gözeneklilik ( $P_o$ ) Eşitlik 6.2'ye ve toplam gözeneklilik ( $P$ ) Eşitlik 6.3'e göre hesaplanmıştır.

$$P_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} P_{rh} \quad (6.1)$$

$$P_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} 100 \quad (6.2)$$

$$P = \left(1 - \frac{P_h}{P_r}\right) 100 \quad (6.3)$$

$P_b$ : Numunenin görünür yoğunluğu,  $\text{kg/m}^3$

$m_d$ : Kuru numune kütlesi, g

$m_s$ : Doygunlaştırılmış numune kütlesi, g

$m_h$ : Su içerisine batırılmış numunenin kütlesi, g

$P_{rh}$ : Suyun yoğunluğu,  $\text{kg/m}^3$

$P_o$ : Numunenin açık gözenekliliği, %

$P_r$ : Numunenin gerçek yoğunluğu,  $\text{kg/m}^3$

$P$ : Numunenin toplam gözenekliliği, %

#### 6.2.4.2 Atmosfer Basıncında Su Emme Deneyi

Doğaltaş örneklerinin atmosfer basıncında su emme deneyleri TS EN 13755 standardına göre yapılmıştır. Standarda göre;  $5\times 5\times 5$  cm boyutlarındaki düzgün yüzeyli temsili numuneler  $70\pm 5$ °C sıcaklıkta sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur ( $m_d$ ). Numuneler hassasiyeti 0.01 gr olan hassas terazi ile tartılmıştır. Uygun bir kaba alınan numuneler yarısına kadar  $25\pm 5$ °C sıcaklıkta su ilave edilmiştir. Zaman olarak 60 dakikaya gelindiğinde numune yüksekliğinin  $\frac{3}{4}$ 'ü su içerisinde kalacak şekilde su ilavesi

yapılmıştır. 120 dakika sonra numuneler 25±5 mm derinlikte kalacak şekilde kaba su ilave edilerek 48 saat sonra tartılmıştır. Sabit tartıma ulaşan deney numuneleri arşimet terazisinde 0,1 gr hassasiyetle tartılarak kaydedilmiştir ( $m_s$ ). Sonuçlar % 0,1 yaklaşımla yüzde (%) olarak ifade edilmiştir (Eşitlik 6.4).

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (6.4)$$

#### 6.2.4.3 Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Deneyi

Bu standard, kılcal (kapiler) etkiye bağlı olarak doğal taşlarda su emme katsayısının tayini için bir metodu kapsar. Bu metod, EN 1936'ya göre belirlenmiş açık gözenekliliği % 1'den daha küçük kayalar için uygun değildir. Deney numunesi, sabit kütleye kadar kurutma sonrası yüzeylerinden (çalışma yüzeyi olmamak kaydıyla) (3±1) mm su içerisine daldırılarak su emdirilir ve kütledeki artış, zamanının fonksiyonu olarak ölçülür. Deney numuneleri, kenar uzunluğu (70±5) veya (50±5) mm olan küp veya (70±5) mm veya (50±5) mm çapında veya çapı boyuna eşit silindir olmalıdır. Deney numuneleri (70±5)<sup>0</sup>C'da havalandırmalı etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmalıdır. Birbirini izleyen (24±2) saat fasıllı iki tartım arasındaki fark, numune kütlelerinin % 0.1'inden az ise numunenin sabit kütleye ulaştığı kabul edilir. Numuneler, (20±5) <sup>0</sup>C oda sıcaklığına erişinceye kadar bir desikatörde tutulur.

Kurutma sonrası numuneler 0.01 g yaklaşımla ( $m_d$ ) ve 0.1 mm yaklaşımla küp şekilli numunelerde kenar ortaylar, silindirik numunelerde ise birbirine dik iki çap ölçülerek su emdirilecek yüzey hesaplanır. Bu alan m<sup>2</sup> cinsinden ifade edilir. Deney numuneleri yalnızca altlarında kısmen mesnet vazifesi görececek olan, tanktaki dayanakların üzerine yerleştirilir. Suyun yükselişine bağlı olarak istenilen anizotropi düzlemlerinin pozisyonu şartlara uygun olarak ayarlanır. Numune tabanı (3±1) mm derinliğe daldırılır ve zaman ölçer çalıştırılır. Deney boyunca gerektiği kadar su eklenerek tanktaki su seviyesinin sabit tutulması sağlanır ve numuneleri nemini buharlaşma yoluyla kaybetmemeleri amacıyla tankın kapağı kapatılır. Zaman aralıklarında, başlangıçta çok kısa, sonra uzun olacak şekilde her bir numune sudan çıkarılır, kuru bölümden hafifçe tutularak nemli bir bez kullanılarak bütün su damlacıkları yüzey üzerinden uzaklaştırılır ve hemen 0.01 g

yaklaşım ile tartılır. Sonra yeniden tanka yerleştirilir. Deney başlangıcından itibaren her bir tartım arasında geçen zaman kaydedilir. Zamanların seçimi kayacın tipine göre değişmektedir. Oldukça yüksek emişli bir kayaç için uygun  $t_1$  (1, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 1480, ve 1440) dakika. Düşük emişli bir kayaç için uygun süreler: 30, 60, 180, 480, 1140, 2880 ve 4320 dakika. Bu süreler % 5 yaklaşımla ölçülür (Eşitlik 6.5). Minimum 7 ölçüm gereklidir. Ardışık iki tartım arasında fark, numunenin emdiği su kütlesinin % 1'inden az ise deneyin sona erdiği kabul edilir (Şekil 6.5).

$$C_1 \text{ veya } C_2 = \frac{m_i - m_d}{A\sqrt{t_i}} \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5} \quad (6.5)$$

$m_d$  = Kuru deney numunesinin kütlesi, g

$m_i$  = Deney numunesinin deneydeki su emmiş kütlesi, g

$A$  = Suyu batırılmış yüzeyin alanı,  $\text{m}^2$

$t_i$  = Deney başlangıcından ardışık  $m_i$  kütlelerinin ölçüldüğü süreler, s

$c_1$  = Kayacın anizotropi düzlemlerine dik kılcak etkiye bağlı su emme katsayısı,  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$

$c_2$  = Kayacın anizotropi düzlemlerine paralel kılcak etkiye bağlı su emme katsayısı  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$



Şekil 6.5 Su emme tayini.

#### 6.2.4.4 Ultrases Hızı Tayini

Ultrases hızı ile ölçüm ASTM C 597'ye göre AKÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılacaktır. Granit numunenin bir ucuna ultrasesi oluşturan verici, diğer ucuna da malzeme içinden geçen ses dalgalarını alan bir alıcı yerleştirilecektir. Ölçüm noktaları, cihazın gönderici ve alıcı uçları karşılıklı, paralel olacak şekilde seçilecektir.

Numune ölçüm noktaları arasındaki (cihazın alıcı ve gönderici uçlar) uzaklık (l) ölçülür. Alıcı ve gönderici uçlara kontak maddesi sürülür, cihazın alıcı ve gönderici uçları numune ölçüm noktalarına sıkıca bastırılır ve alıcı tarafından tutulan ses dalgaları nakledilerek sesin örnek içinden geçiş zamanı (t) tespit edilir. Bulunan bu değerler aşağıdaki bağıntıya yazılarak numunelerin ultrases hızı hesaplanır (Eşitlik 6.6).

$$V_c = \frac{l}{t} \text{ m/sn} \quad (6.6)$$

$V_c$ =Ultrases geçiş hızı (m/sn)

$t$ =Deney numunesi içerisinde ses geçiş süresi (sn)

$l$ =Deney numunesi ölçüm noktaları arasındaki uzaklık (m)

#### 6.2.5 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

##### 6.2.5.1 Schmidt çekici deneyi

Bu deney, Schmidt çekici kullanılarak, kayaların Schmidt geri sıçrama değerinin tayini ve dolaylı olarak tek eksenli sıkışma dayanımlarının saptanması amacıyla yapılır. Deney yöntemi olarak, ISRM (2007) tarafından izlenmesi önerilen yöntemle yapılacaktır. Deneye başlamadan önce varsa, çekici üreten firmanın sağladığı örs kullanılarak Schmidt çekicinin kalibrasyonu yapılır. Bu amaçla alınan 10 adet sertlik ölçümünün ortalaması hesaplanır. Çekiç en az NX çapındaki karot örnekleri veya bir kenarı en az 6 cm olan blok örnekleri üzerinde kullanılmalıdır. Karot veya bloğun yüzeyleri düzgün

olmalı ve herhangi bir çatlak içermemelidir. Çekicinin ucu deney yüzeyine dik konumda olacak şekilde yavaş bastırılır ve çekicinin içindeki yaydan geri tepme sesi geldiği anda, çekicinin gövdesi üzerindeki gösterge sabitleme tuşuna basılarak, geri sıçrama değeri çekicinin gövdesindeki göstergeden okunur. Aynı işlem, deney örneğinin üzerindeki birbirinden uzaklığı en az çekicinin uç çapına eşit olan, en az 10 farklı noktada tekrarlanarak okunan geri sıçrama değerleri kaydedilir. Deney aşağıda gösterilen şekilde (Şekil 6.6) yapılmıştır.



**Şekil 6.6** Schmidt çekici ile yapılan ölçümler.

Deney sırasında herhangi bir çatlak oluşması veya gözle görülebilir bir yenilmenin oluşması halinde deney iptal edilir. Laboratuvarında veya arazide elde edilen geri sıçrama değerleri, en büyükten en küçük değere doğru sıralanır ve bu değerlerin en küçük % 50'si iptal edilir. Geri kalan sıçrama değerlerinin aritmetik ortalaması alınır. Kayacın veya süreksizlik yüzeyinin Schmidt geri sıçrama değeri bu ortalama değer ile verilen düzeltme katsayısının çarpımından elde edilir. Eğer çekicinin kalibrasyonu ile ilgili bir kuşku yoksa ortalama değere düzeltme uygulanmaz ve bu değer doğrudan Schmidt geri sıçrama değeri olarak alınır.

### 6.2.5.2 Nokta Yükleme Dayanımı Tayini

Bu deney için ISRM (1981) tarafından belirtilen standartlar kullanılmıştır. Nokta yükleme dayanım deneyleri, mermer türünün kayaç kalite sınıflamaları için, kullanılan indeks değerini belirlemek için aşağıdaki Şekil 6.7'deki gibi yapılır. Ancak, deney sonucunda, tek eksenli basınç dayanım değerini de tahmin edebilmek mümkün olabilmektedir.



Şekil 6.7 Nokta yükleme deneyi yapılışı.

### 6.2.5.3 Eğilme Dayanımı Tayini

Mermer örneklerinin sabit moment altında eğilme dayanımı TS EN 12372 standardına göre belirlenmiştir (Şekil 6.8). Deneylerde 50x50x300 mm boyutlarında her seriden 6 adet granit numunesi kullanılmıştır.



**Şekil 6.8** Eğilme dayanımı deneyi

Etüvde  $70 \pm 5$  °C sıcaklıkta sabit tartıma getirilen örneklere  $0,25$  MPa/s'lik hızda kuvvet uygulanmış ve kırılma yükleri belirlenmiştir. Numunelerin eğilme dayanımı Eşitlik 6.7 ile hesaplanmıştır.

$$R_{tf} = \frac{3fL}{2bh^2} \text{ Mpa} \quad (6.7)$$

$R_{tf}$  = Eğilme dayanımı (MPa)

$f$  = Kırılma anındaki maksimum yük (kN)

$b$  = Numunenin genişliği (mm)  $h$  = Numunenin kalınlığı (mm)

$L$  = Destek mesnetleri arasındaki mesafe (mm)

#### **6.2.5.4 Brazilian Deney Yöntemiyle Kayaçların Çekilme Dayanımı Tayini**

Bu deney, disk şeklindeki hazırlanmış kaya örneklerinin çapsal yükleme altında çekilme dayanımlarının dolaylı yoldan tayini amacıyla yapılır. Bu yöntemle, silindirik kayaç örneklerinin uçlarından sabitlenerek çekilmesi şeklinde uygulanan doğrudan çekme

deneyine göre, genellikle biraz daha yüksek çekilme dayanımları elde edilmektedir. Bununla birlikte, örneklerin deneye hazırlanması ve deneyin yapılışı açısından daha pratik olması nedeniyle, Brazilian yöntemi daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Deney yöntemi olarak ISRM (2007) ve CANMET (1977)'in önerdiği yöntemler esas alınmıştır.

Çapı en az  $NX$  ve kalınlığı yarıçapıyla hemen hemen aynı olan, sağlam ve çatlaksız silindirik örnek hazırlanır. Örneğin alt ve üst yüzeyleri birbirlerine paralel olmalıdır. Deneyde kullanılacak toplam örnek sayısı, pratik değerlendirmelere bağlı olmakla birlikte, her kayaç biriminden 10 adet örneğin deneye tabi tutulmasında yarar vardır. Örneğin çapı ( $D$ ) ve kalınlığı ( $t$ ) birbirine dik iki yönde kumpasla ölçülerek bu değerlerin ortalaması alınır. Örnek, yan yüzeyleri yükleme çenelerinin arasında kalacak biçimde, yükleme başlığının altına konan çenelerin, nokta yükleme aleti kullanılıyor ise silindirik plakaların arasına yerleştirilir. Aşağıdaki Şekil 6.9'da gösterildiği gibi yapılmıştır. Örnek, yenilme 15-30 saniye arasında gerçekleşecek şekilde sabit hızlı yüklenir. Bu amaçla 200 N/s'lik bir yükleme hızı önerilir. Örneğin yenildiği andaki yük ( $F$ ), yükleme ünitesinde okunur (Şekil 6.9).



**Şekil 6.9** Brazilian deneyi yapılışı.

Örneğin çekilme dayanımı ( $\sigma_1$ ) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır (Eşitlik 6.8).

$$\sigma_1 = \frac{0.636 \cdot F}{Dt} \quad (6.8)$$

Burada,

F : Örneğin yenilmesi anında uygulanan yük (kN)

D : Örnek çapı (mm)

t : Örnek kalınlığı (mm)

#### 6.2.5.5 Tek Eksenli Basınç Mukavemeti Testi

TS EN 1926 (2000) tarafından belirtilen standartlara göre AKÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında daha önce hazırlanmış silindirik şeklindeki numunelerin alanlarının hesaplanması için 0,1 mm duyarlı kumpas ile en ve boyları ölçülecek ve bu ölçümlerden yararlanarak numunenin alanı (A) hesaplanmış olup, Şekil 6.10 gösterildiği gibi deney sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 6.10 Tek eksenli basınç mukavemeti testinin yapılışı.

Deney numunesine yük ( $1 \pm 0.5$ ) MPa/s sabit bir gerilme hızıyla devamlı olarak uygulanarak numunenin kırıldığı maksimum yük (F) tespit edilir. Bulunan bu değerler aşağıdaki bağıntıya yazılarak numunelerin basınç dayanımı hesaplanacaktır (Eşitlik 6.9).

$$\sigma = F/A \quad (6.9)$$

Burada;

$\sigma$ =Basınç dayanımı (MPa)

F=Kırılma anındaki maksimum yük (N)

A=Deney numunesinin alanı (mm<sup>2</sup>).

#### 6.2.5.6 Üç Eksenli Basınç Mukavemeti Testi

Bu deney, üç eksenli sıkışmaya maruz kalan silindirik kaya örneklerinin makaslama dayanımı parametrelerinin saptanması amacıyla yapılır. Deney verileri kullanılarak kayacın yenilme zarfı çizilir ve bu zarftan kayaç malzemesinin içsel sürtünme açısı (f) kohezyon (c) parametreleri belirlenir.

Deneyde boy/çap oranları 2.0 ve 3.0 arasında değişen, silindirik örnekler kullanılmalı ve tercihan örnek çapı 54 mm (NX)' den küçük olmamalıdır. Örnekler hoek hücrelerine yerleştirilir. Örneğin üstüne ve altına küresel başlıklar konduktan sonra hücre yükleme presine yerleştirilir ve presin alt tablası yükselttilerek üstteki başlıkla presin küresel başlığı arasındaki boşluk giderilir. Şekilde 6.11 gösterildiği gibi, eksenel yükün ve yanal basıncın uygulanmasına aynı anda başlanır ve önce belirlenmiş bir yanal basınç değerine ulaşılan değin, eksenel bir gerilme ve yanal basınç eşit olacak şekilde birlikte arttırılır. İstenilen yanal basınç değerine ulaşıldıktan sonra, kayaç örneği yenilinceye kadar eksenel yüklemeye devam edilir.



**Şekil 6.11** Üç eksenli basınç dayanımı deneyi.

Eksenel yükleme hızı deneyin başında ve kayaç 5-15 dakika arasında yenilecek veya gerilim hızı 0.5 ile 1 MPa/s olacak şekilde yükleme presinden ayarlanmalıdır.

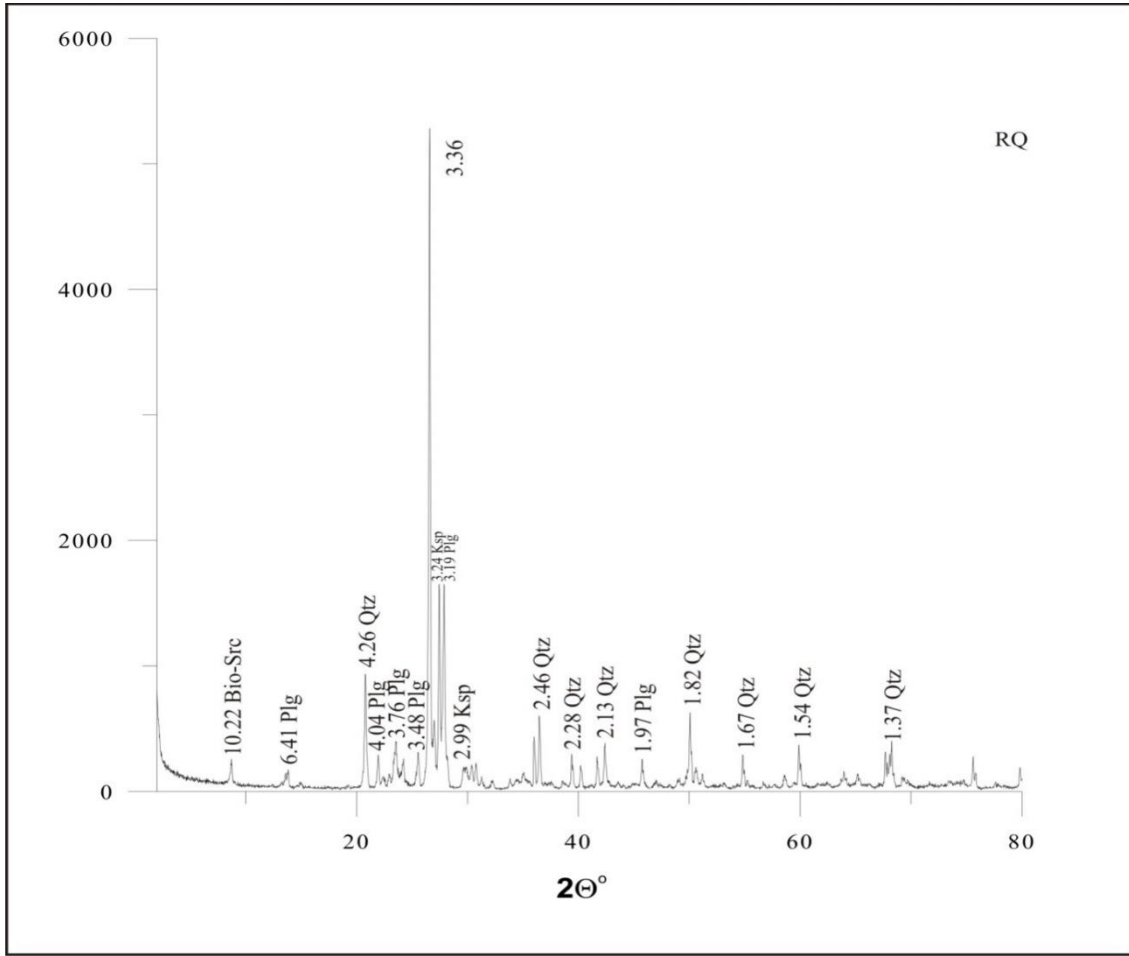
Yenilenme anındaki en büyük asal gerilim,  $\sigma_1$ ;  $\sigma_1=F/A$  eşitliğinden hesaplanır. Burada, F: Yenilenme anında uygulanan yük; A: Örneğin kesit alanıdır.

Her deneyin sonuçları ( $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  veri çiftleri ) kullanılarak, mohr daireleri ve daha sonra tüm dairelerin ortak teğeti çizilir. Eğer çizilen yenilme zarfı doğrusal ise, zarfın yatayla yaptığı açı içsel sürtünme açısı, makaslama gerilmesi eksenini kestiği noktadaki değer ise kohezyon olarak belirlenir.

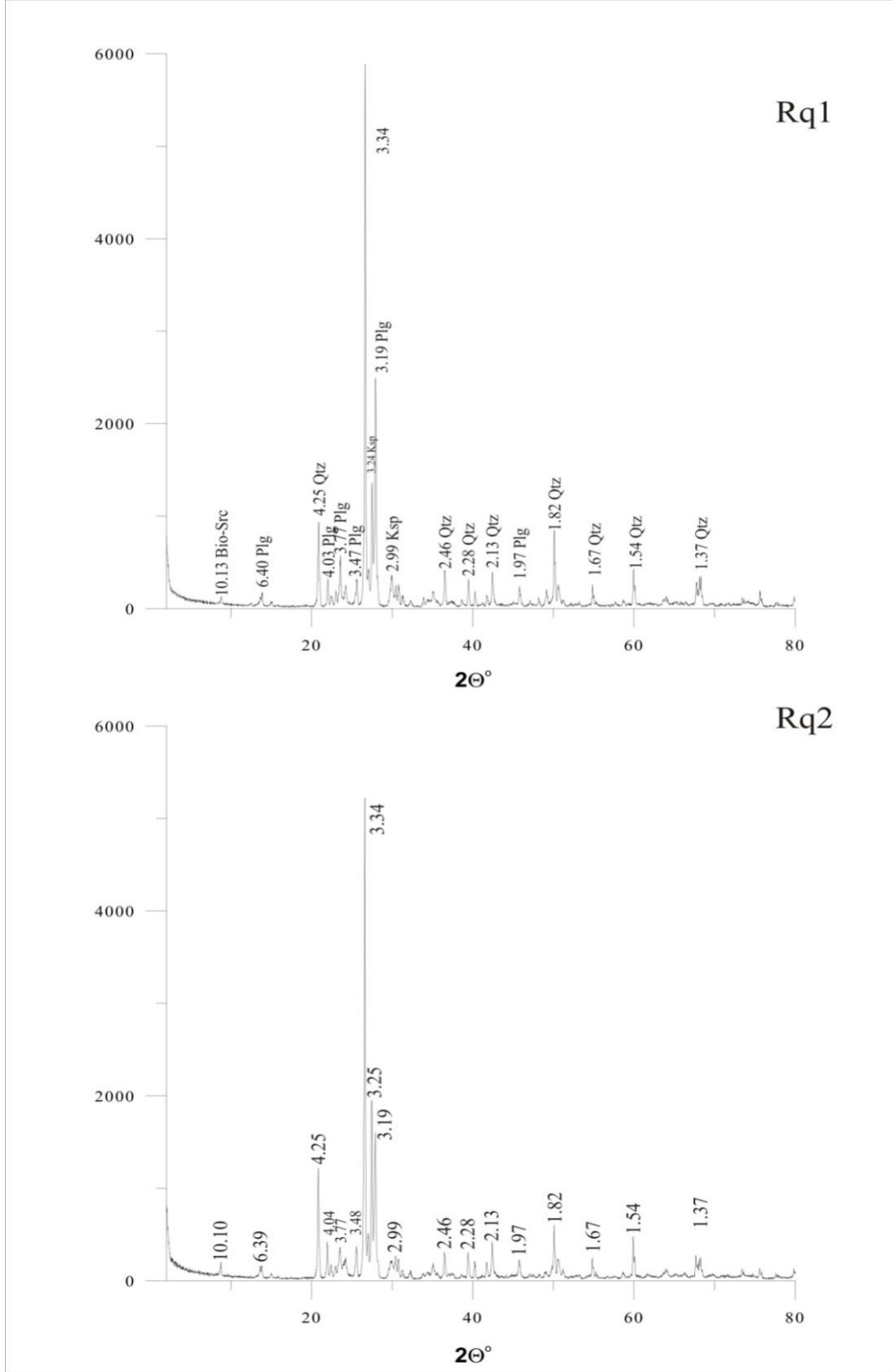
## 6.3 Deneysel Bulgular

### 6.3.1 X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri

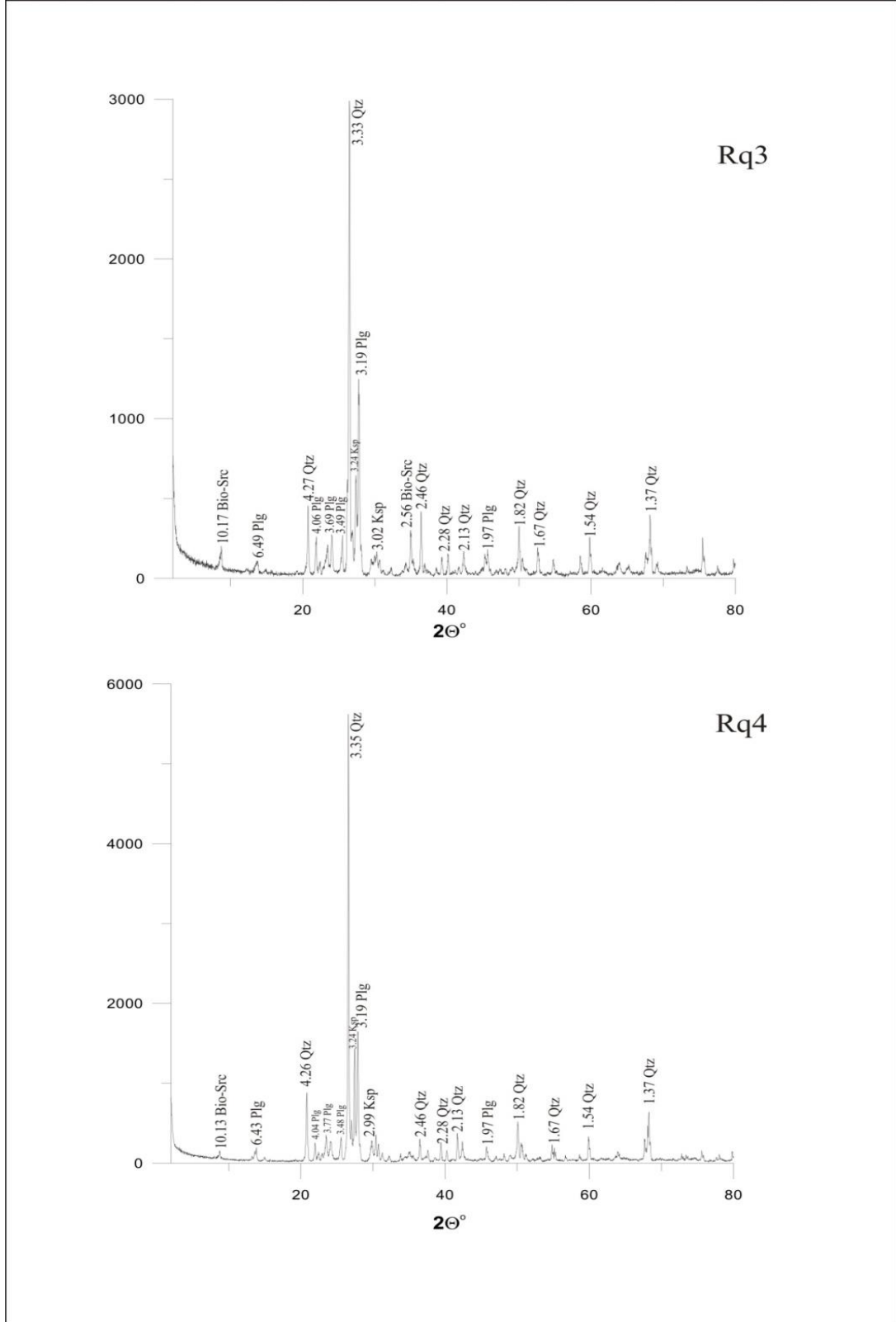
X-ışınları kırınımı incelemelerinde, örneklerdeki başlıca kayaç yapıcı mineralleri kuvars (Qtz), alkali feldspat (Ksp), plajiyoklas (Plg) ve biyotit (Bio-Src)'in oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu minerallere ve amfibol (Amp) minerali eşlik etmiştir (Şekil 6.12-15).



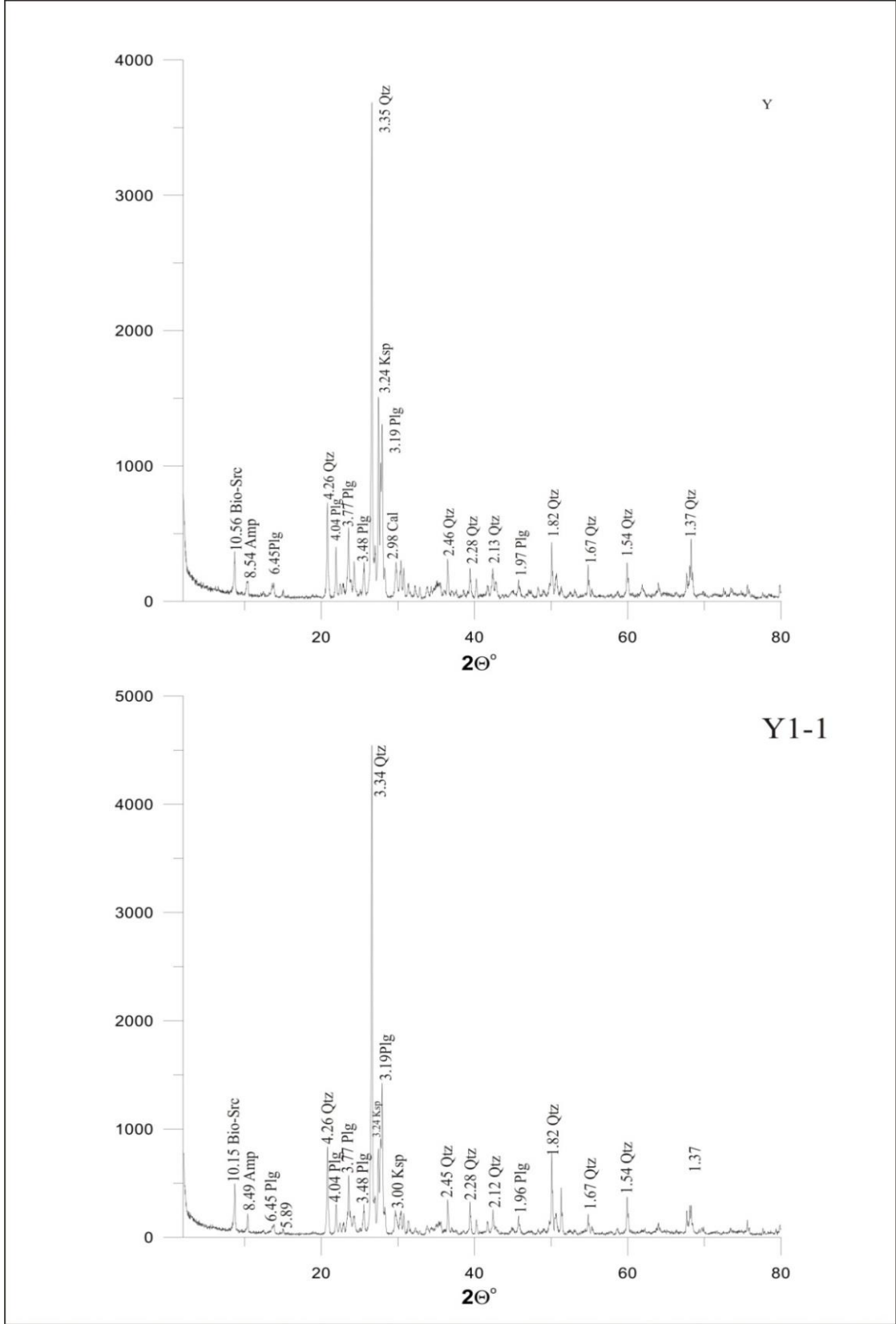
Şekil 6.12 RQ kodlu örneğin X-ışınları kırınımı (XRD) grafiği.



Şekil 6.13 RQ1 ve RQ2 kodlu örneklerin X-ışınları kırınımı (XRD) grafiği.



Şekil 6.14 RQ3 ve RQ4 kodlu örneklerin X-ışınları kırınımı (XRD) grafiği.



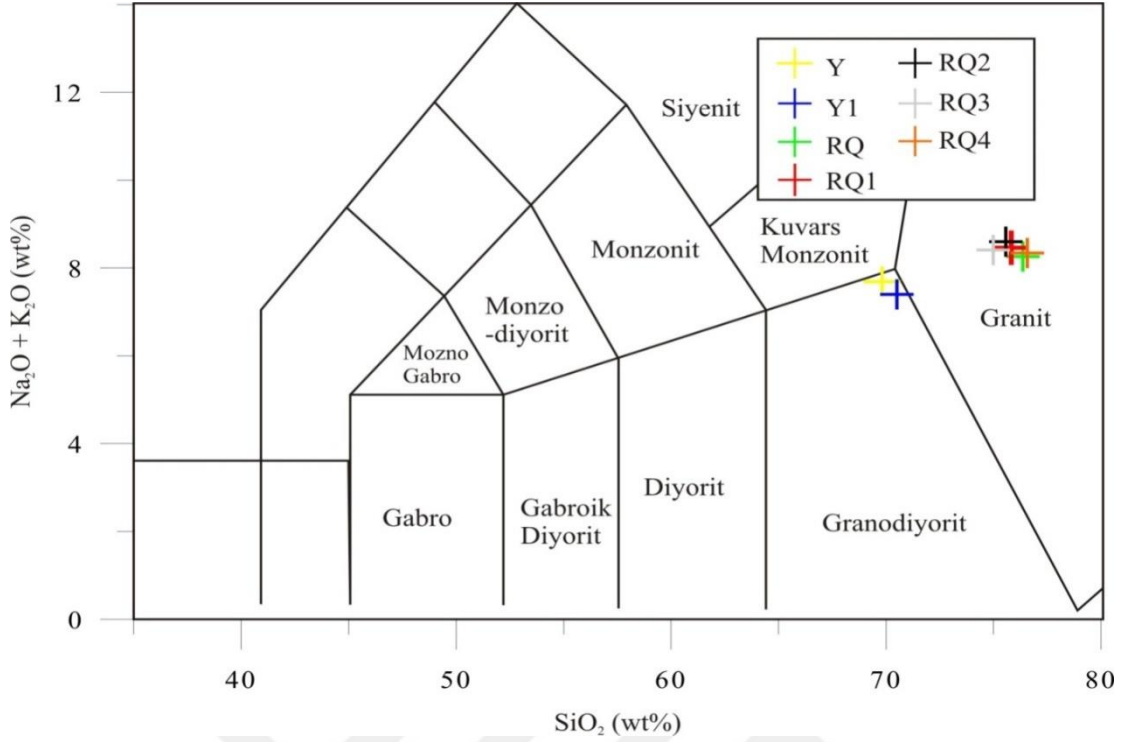
Şekil 6.15 Y ve Y1-1 kodlu örneklerin X-ışınları kırınımı (XRD) grafiği.

### 6.3.2 Jeokimyasal İncelemeler

Granitlerin jeokimyasal karakteristiklerinin belirlenmesi ve adlanmalarının yapılabilmesi için gerekli olan majör oksit, minör ve iz element analiz sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Analiz sonuçları Le Maitre vd. (2002) tarafından geliştirilmiş toplam alkali&silis (TAS) diyagramına yerleştirilmiştir (Şekil 6.16). Söz konusu grafik incelendiğinde, Y ve Y1 kodlu örneklerin granodiyoritik alana düştüğü ve bu nedenle granodiyoritik bileşimli, diğer örneklerin ise silis oranının yüksek olmalarından dolayı granit alanına düştüğü ve bu nedenle granitik bileşimde oldukları görülmüştür. Granitik kayaların ateş kaybı oranları bunların ayrışma durumlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Gupta ve Rao, 1998; 2001). Buna göre analiz sonuçları incelendiğinde, ateş kaybı oranının % 0.2 ile % 0.5 arasında değiştiği ve bu nedenle örneklerin ayrışma derecelerinin son derece düşük olduğu görülmüştür (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1 Örneklerin majör oksit (%) ve iz element (ppm) analiz sonuçları.

Bileşen	Y	Y1	RQ	RQ1	RQ2	RQ3	RQ4
SiO <sub>2</sub>	69.81	70.50	76.36	75.82	75.57	74.98	76.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.00	14.53	12.65	12.94	13.22	13.54	12.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.05	3.06	1.30	1.29	1.21	1.22	1.16
MgO	0.76	0.77	0.18	0.16	0.15	0.22	0.15
CaO	2.73	2.69	0.83	0.68	0.86	1.03	0.69
Na <sub>2</sub> O	3.30	3.13	3.17	3.42	3.35	3.54	3.14
K <sub>2</sub> O	4.40	4.28	5.10	5.05	5.26	4.88	5.21
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.23	0.09	0.08	0.08	0.09	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.06	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01
MnO	0.08	0.08	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002
Ba	841	719	163	108	190	169	102
Ni	<20	<20	<20	<20	80	<20	<20
Sr	182	175	37	32	44	70	25
Zr	128	136	93	73	72	79	82
Y	14	15	31	50	27	29	38
Nb	10	10	21	21	15	9	21
Sc	3	3	3	4	3	3	4
Ateş Kaybı	0.4	0.5	0.2	0.4	0.2	0.4	0.3
<b>TOPLAM</b>	<b>99.97</b>	<b>99.97</b>	<b>99.99</b>	<b>99.98</b>	<b>99.99</b>	<b>99.99</b>	<b>99.99</b>



**Şekil 6.16** Örneklerin Le Maitre vd. (2002) tarafından geliştirilmiş toplam alkali&silis (TAS) diyagramında gösterimi.

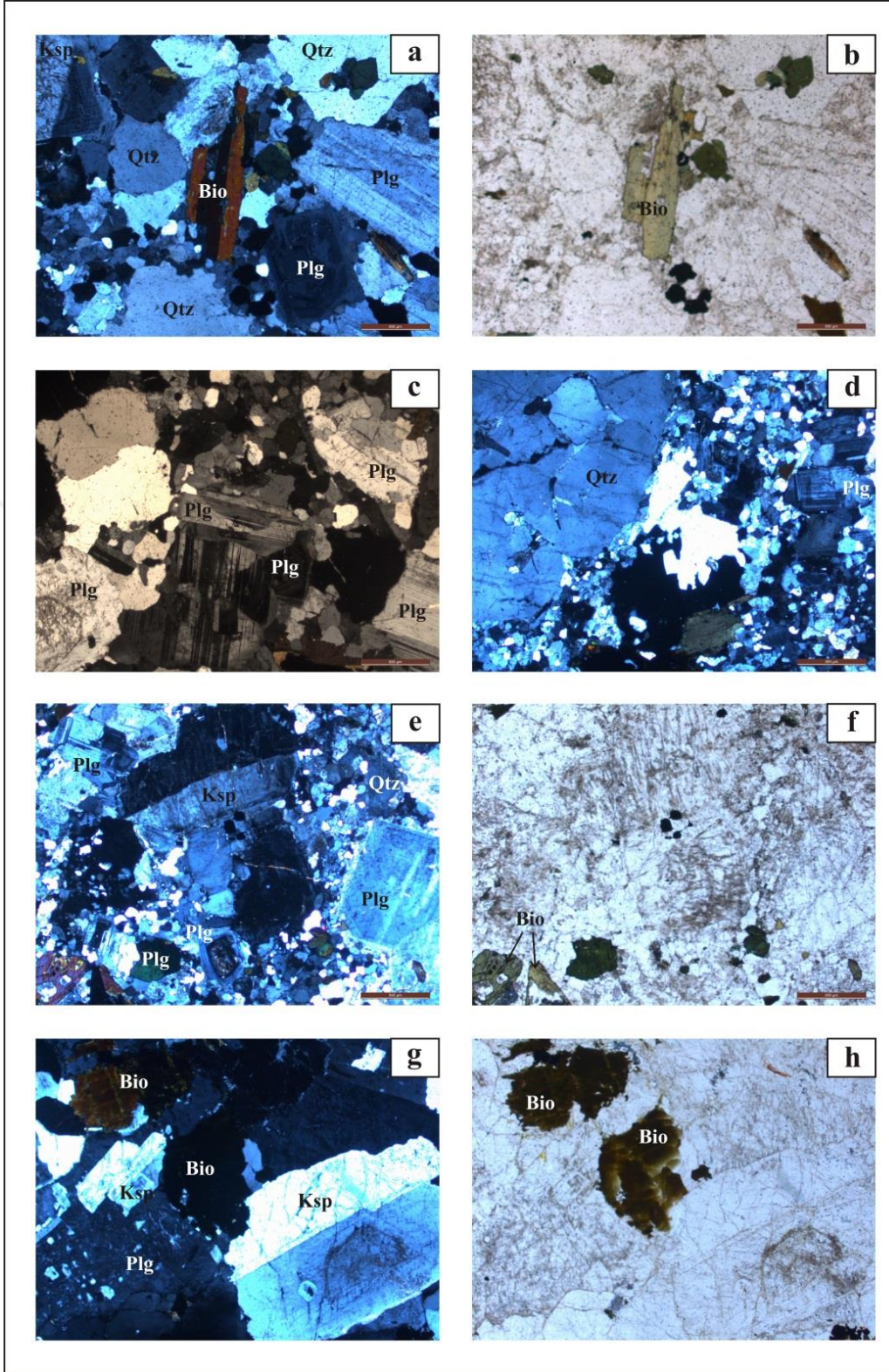
Çalışmada alınan granit örneklerinden bazılarının kimyasal ve mineralojik bileşimleri birbirine çok yakın olduğundan daha detaylı çalışmalar bu örneklerden 4 tanesi (Y1, RQ1, RQ2, RQ3) seçilerek devam ettirilmiştir.

### 6.3.3 Mineralojik-Petrografik İncelemeler

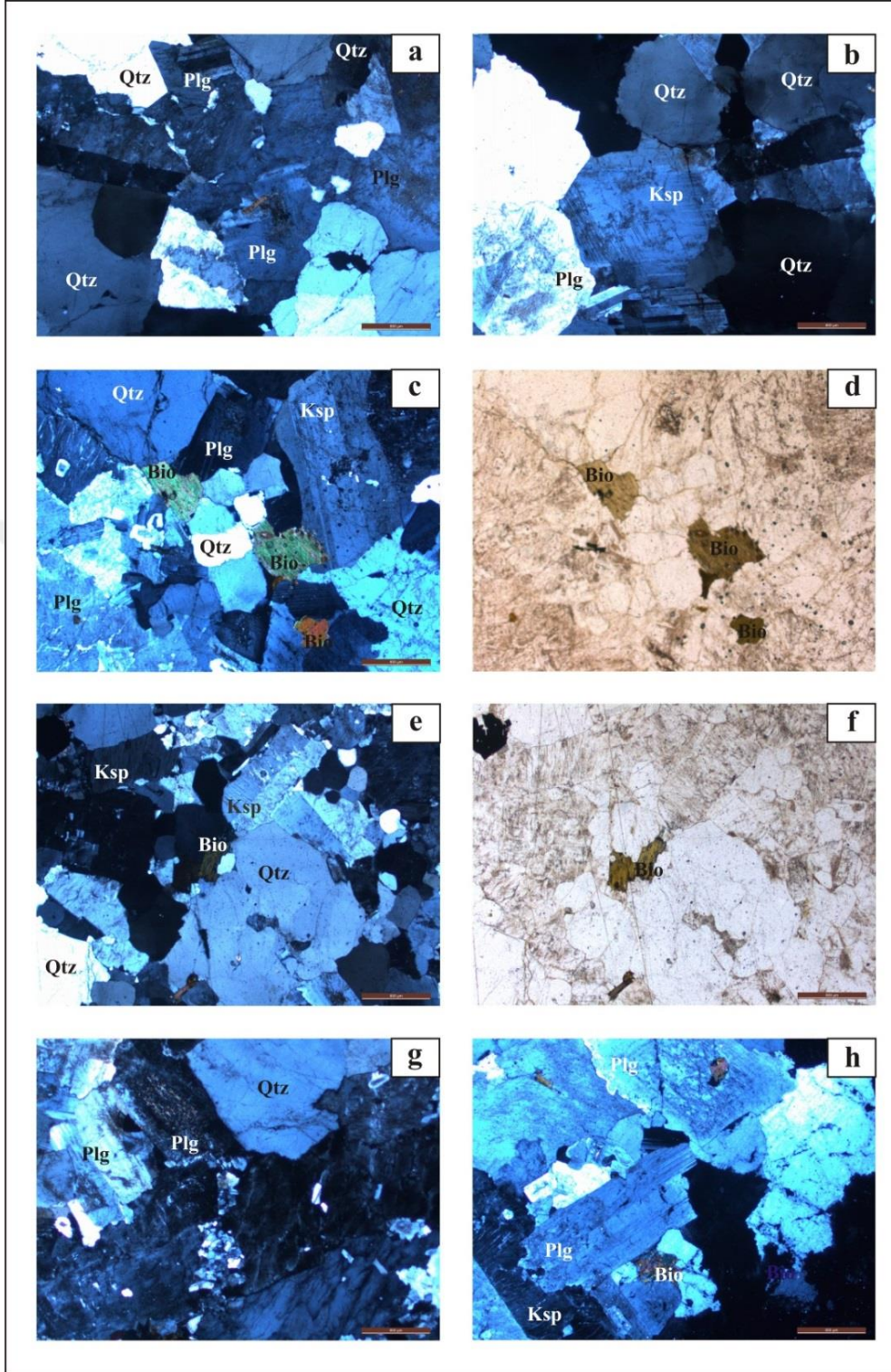
Örneklerin mineralojik-petrografik incelemeleri polarizan mikroskop altında yapılmıştır.

#### 6.3.3.1 Polarizan Mikroskop İncelemeleri

Çalışmada kullanılan granitler başlıca plajoklas (oligoklas-andezin), alkali feldispat, kuvars, biyotit, hornblend minerallerinden oluşmaktadır. Plajoklas mineralleri polisentetik ikizlenme ve zonlu yapılarıyla karakteristiktir. Mikroklin ve ortoklas örneklerdeki başlıca alkali feldispat mineralleridir. Biyotitler ise yeşilimsi sarı renkli pleokroizmasıyla belirgindirler (Şekil 6.17-18).



**Şekil 6.17** Granit örneklerinin polarizan mikroskop görüntüleri. (a) Y1-Çift nikol, (b) Y1-Tek nikol, (c) Y1-Tek nikol A, (d) Y1-1B-Çift nikol, (e) Y1-1B-Çift nikol, (f) Y1-1B-Tek nikol, (g) RQ1-Çift nikol, (h) RQ1-Tek nikol, Mineral Kısaltmaları: Kuvars (Qtz), Biyotit (Bio), Plajjoklas (Plg), Alkali feldspat (Ksp).



**Şekil 6.18** Granit örneklerinin polarizan mikroskop görüntüleri. (a, b) RQ1-Çift nikol, (c) RQ2-Çift nikol, (d) RQ2-Tek nikol, (e) RQ3-Çift nikol, (f) RQ3-Tek nikol, (g, h) RQ4-Çift nikol, Mineral Kısaltmaları: Kuvars (Qtz), Biyotit (Bio), Plajjoklas (Plg), Alkali feldspat (Ksp).

Plajjoklas ve alkali feldspat minerallerinde yer yer ayrışma izlerine rastlanmıştır. Ayrıca ayrışmanın etkisi düşük oranlarda biyotit ve hornblend minerallerinde de gözlenmiştir. Kristallerdeki mikro çatlaklar granitlerdeki tektonizmanın etkisini göstermektedir (Şekil 6.18). Polarizan mikroskopta yapılan kantitatif analiz sonucunda granit örneklerindeki minerallerin oranları % olarak hesaplanmış ve Çizelge 6.2’de verilmiştir.

**Çizelge 6.2** Çalışmada kullanılan granit örneklerinin mineral içerikleri (% olarak)

Mineral türü	Numune Kodu			
	Y1	RQ1	RQ2	RQ3
Alkali feldispat	50.01	54.34	68.94	55.56
Kuvars	7.44	1.08	1.53	3.80
Plajjoklas	32.86	37.45	16.69	34.15
Mika	6.57	4.80	2.70	0.50
Toplam	96.87	97.68	89.87	94.01

#### 6.4 Fiziko Mekanik Deney Sonuçları

Ocaklarda alınan temsili numunelerin fiziko-mekanik özelliklerin tesbiti için sonuçları Çizelge 6.3’de verilmiş deneyler yapılmıştır.

**Çizelge 6.3** Fiziko-mekanik deneyler

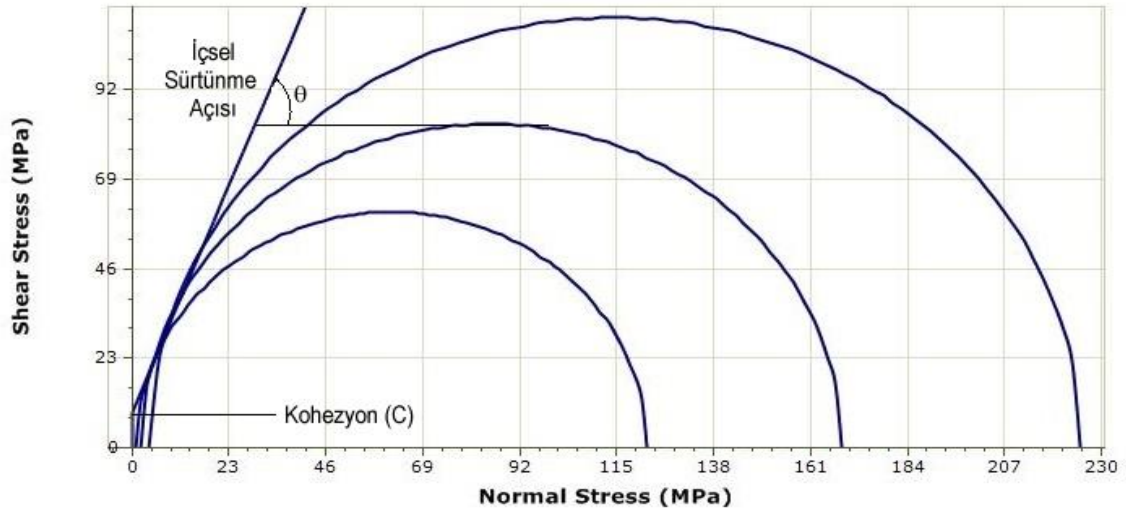
Deney Numuneleri	Y <sub>1</sub>	RQ <sub>1</sub>	RQ <sub>2</sub>	RQ <sub>3</sub>
Ultra Ses Deneyi (m/s)	3233	3040	2766	3442
Schmidt Çekici Deneyi	70.0	69.30	59.4	72.1
Kılcal su emme deneyi	0,54	0,76	1,18	0,55
Görünür yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2552	2490	2525	2496
Açık gözeneklilik (%)	0,79	1	1,34	0,90
Toplam gözeneklilik (%)	5,83	8,13	6,83	7,89
Eğilme dayanımı (MPa)	10.97	9.57	6.26	10.05
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	138,729	118,57	70,1621	97,5039

### 6.4.1 Üç Eksenli Basınç Dayanımı

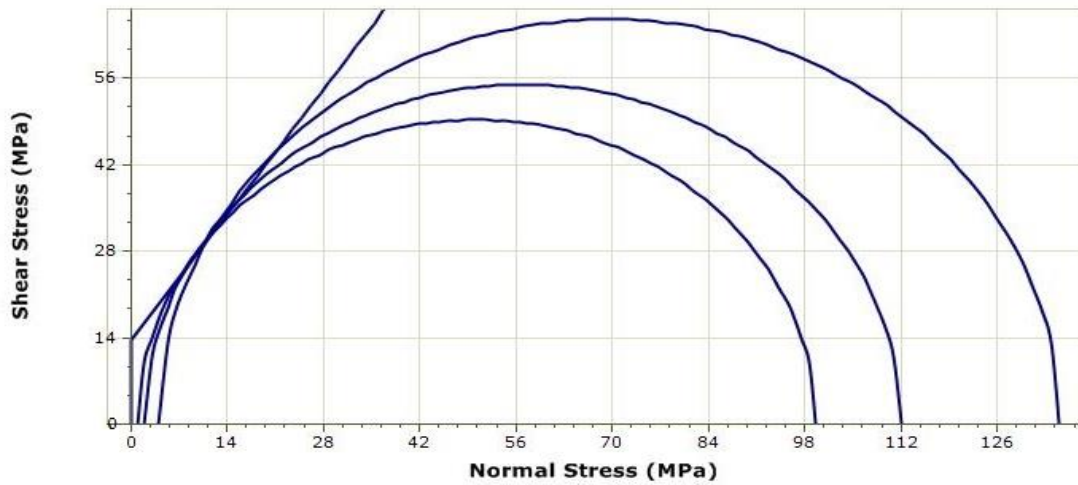
Üç eksenli basınç dayanımı deneyi sonucunda alınan veriler aşağıdaki Şekil (6.19, 6.20, 6.21, 6.22) ve Çizelge 6.4’de verilmiştir.

**Çizelge 6.4** Üç eksenli basınç dayanımı kohezyon ve içsel sürtünme açısı sonuçları.

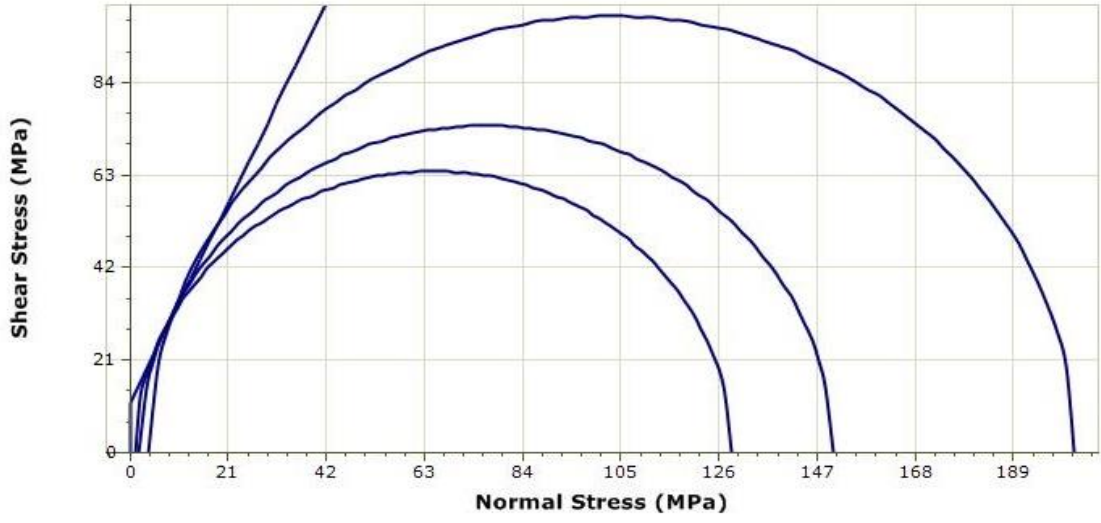
Deney Numuneleri	RQ1	RQ2	RQ3	Y1
Kohezyon(MPa)	9.09	13.58	11.47	10.72
İçsel Sürtünme Açısı( $^{\circ}$ )	68.50	55,40	65.08	69.19



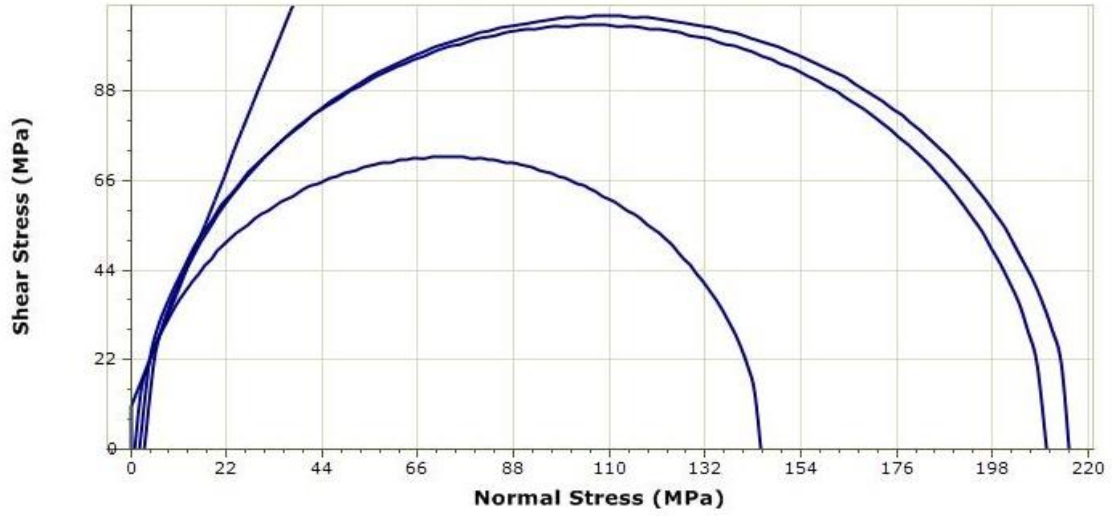
Şekil 6.19 RQ1 Üç eksenli basınç deneyi.



Şekil 6.20 RQ2 Üç eksenli basınç deneyi.



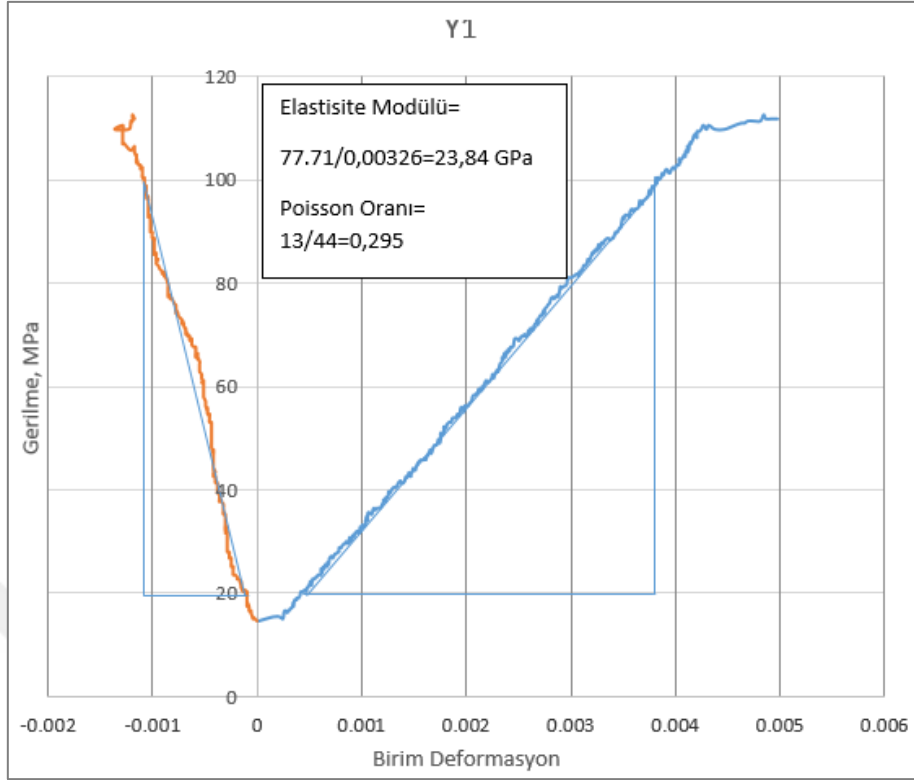
Şekil 6.21 RQ3 Üç eksenli basınç deneyi.



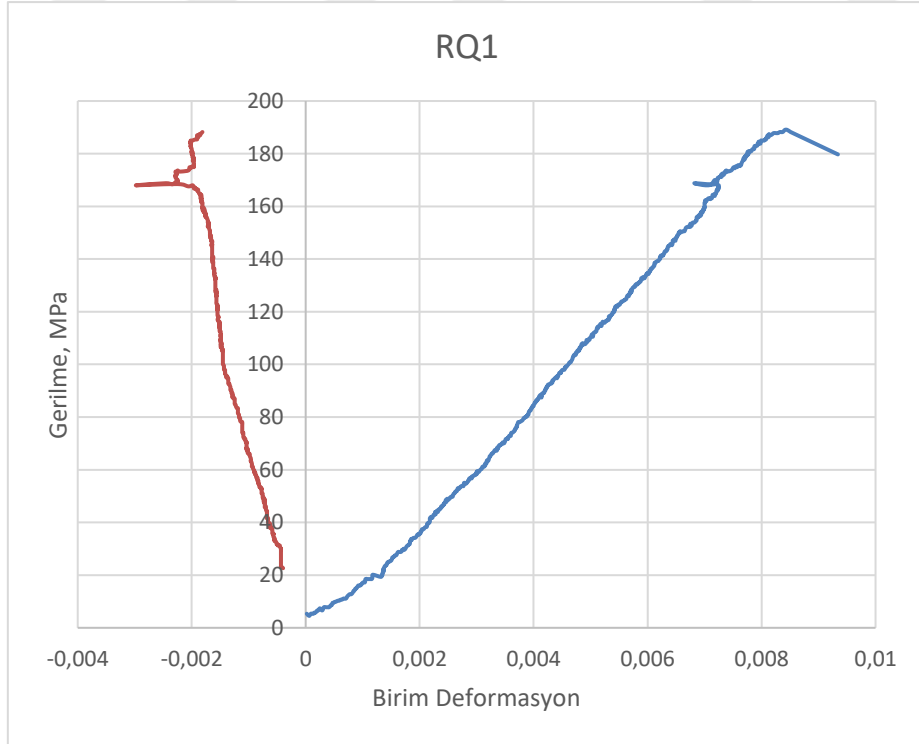
Şekil 6.22 Y1 Üç eksenli basınç deneyi.

#### 6.4.2 Elastisite Modülü ve Poisson Oranı

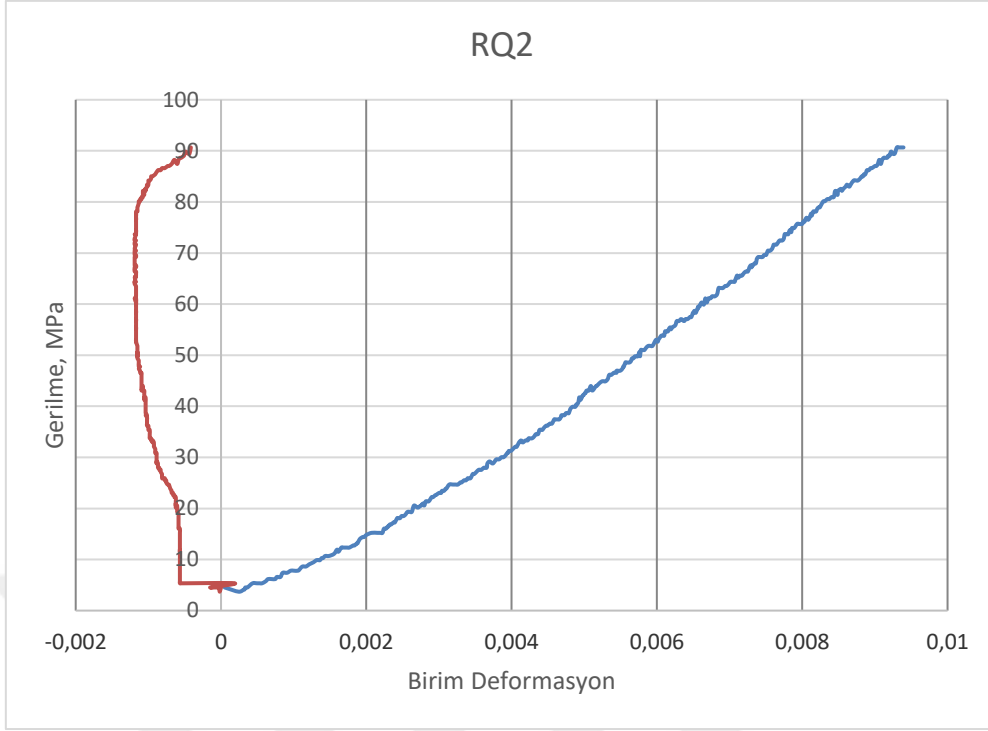
Elastisite modülü ve poisson oranı deneyi sonucunda alınan veriler aşağıdaki Şekil 6.23-26 ve Çizelge 6.5'de verilmiştir.



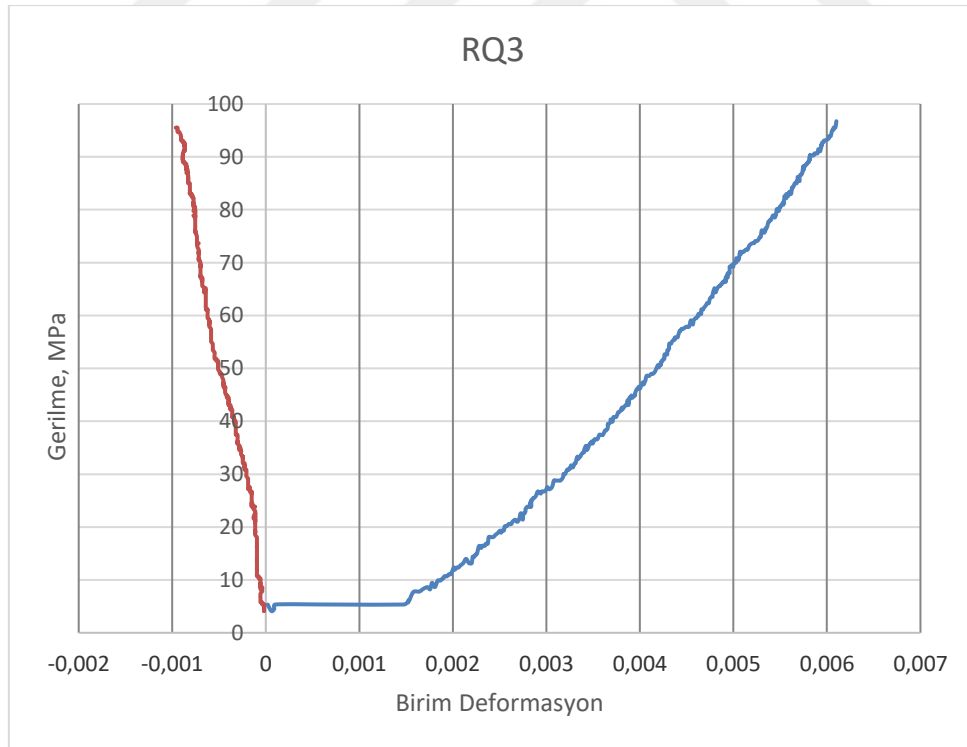
Şekil 6.23 Y1 Gerilme -yanal ve gerilme-düşey deformasyon ilişkisi.



Şekil 6.24 RQ1 Gerilme -yanal ve gerilme-düşey deformasyon ilişkisi.



Şekil 6.25 RQ2 Gerilme -yanal ve gerilme-düşey deformasyon ilişkisi.



Şekil 6.26 RQ2 Gerilme -yanal ve gerilme-düşey deformasyon ilişkisi.

**Çizelge 6.5** Elastisite modülü ve poisson oranı.

Deney Numuneleri	RQ1	RQ2	RQ3	Y1
Elastisite Modülü(GPa)	12,17	10,94	23,33	23,84
Poisson Oranı	0,230	0,134	0,24	0,295

### **6.5 Hidrolik Çatlatma Uygulamaları**

Hidrolik çatlatma uygulamaları Afyon Büyük Sanayi Sitesinde faaliyetlerini sürdüren Afsujet firmasında bulunan basınç yükselticili aşındırıcılı su jeti kesim ünitesinde gerçekleştirilmiştir.

Hidrolik çatlatma ile ilgili standard deney bulunmakla birlikte, hâlihazırda yürütülen bir proje çerçevesinde Afyon Kocatepe Üniversitesinde gerçek üç eksenli basınç ünitesi ve buna bağlı olarak hidrolik çatlatma makinesi yapım aşamasında olup bu tez çalışmalarına yetişmediğinden benzer bir uygulama su jeti makinesi ile gerçekleştirilmiştir.

Su jeti makinesinde yüksek basınçta (3600 bar) saf su yaklaşık iki dakika süresince 5 mm mesafeden granit örnekleri yüzeyine uygulanmış ve deney sonucunda granit örnekleri kesilerek çatlak yanal ilerleme miktarı hassas bir şekilde ölçülmüştür. Uygulamaların yapılışına örnek resim Şekil 6.27’de verilmiştir.

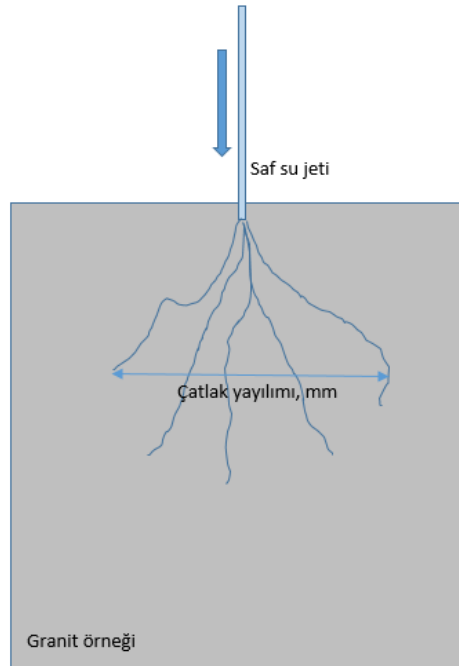
Deneyler sonrasında alınan numuneler dairesel testere ile ortadan ikiye ayrılarak su jetinin yanal olarak yayılım miktarı mm olarak ölçülmüştür. Çatlak yayılımı miktarı çatlatma performansı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 6.28). Granit örneklerinin çatlak yayılımı miktarları Çizelge 6.6’da verilmiştir.



**Şekil 6.27** Su jeti makinesinde gerçekleştirilen hidrolik çatlatma uygulamalarından bir görünüm.

**Çizelge 6.6** Granit örneklerinde ölçülen ortalama çatlak yayılımı miktarları.

Deney Numuneleri	RQ1	RQ2	RQ3	Y1
Çatlak Yayılımı, mm	21,09	43,93	30,17	11,67

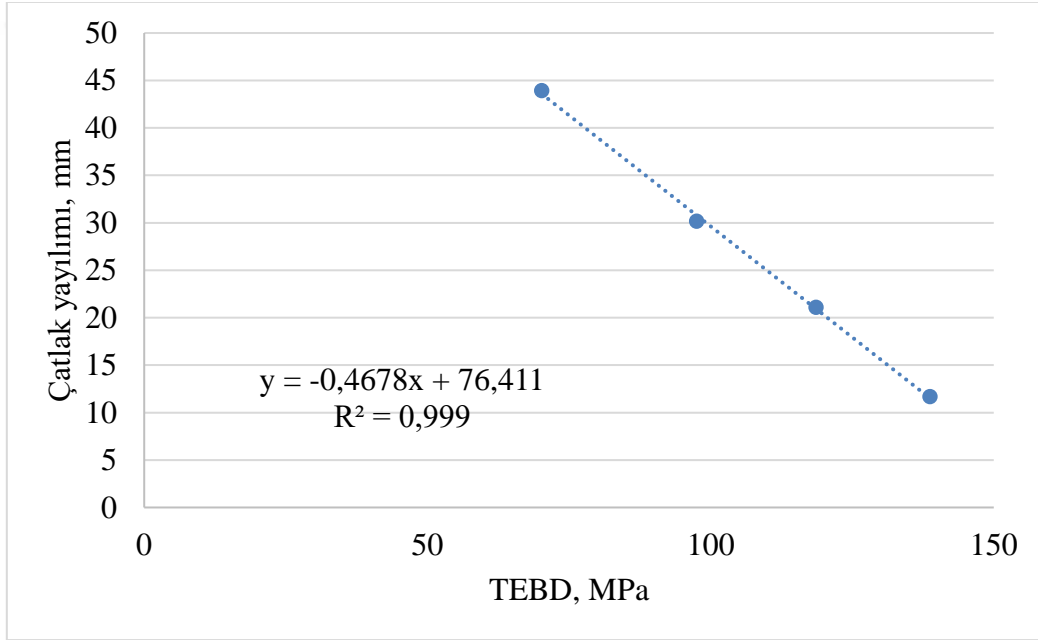


**Şekil 6.28** Çatlak yayılımı.

## 6.6 Kayaç Özellikleri ile Çatlatma Performansı İlişkileri

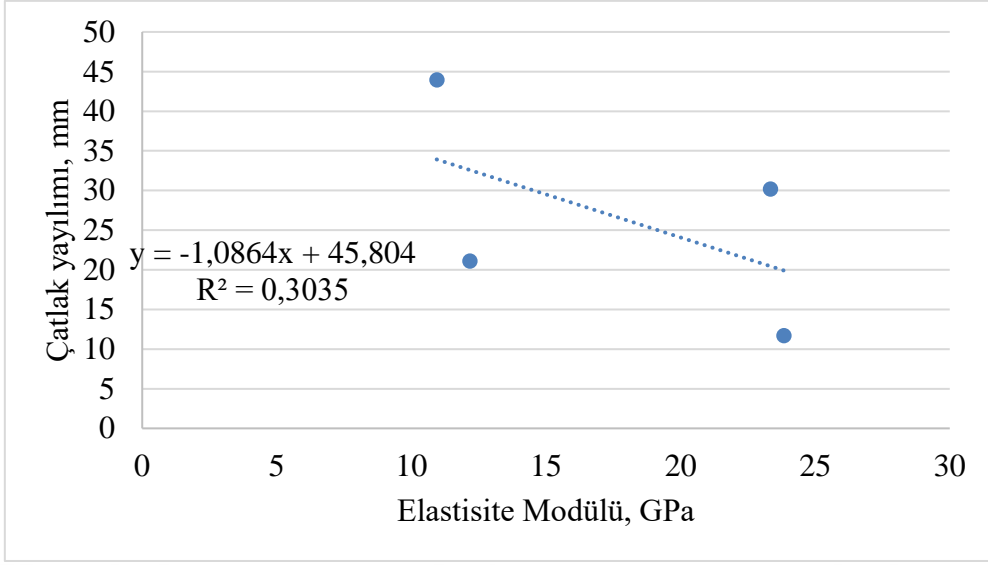
Tez kapsamında alınan granit örneklerinin karakterizasyonu ile elde edilen fiziksel, mineralojik-petrografik, kimyasal, mekanik özelliklerinin çatlatılabilirliği üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla bu özellikler ile çatlak yayılımı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Şekil 6.29’de çatlak yayılımı ile granit örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı ilişkisi verilmiştir.



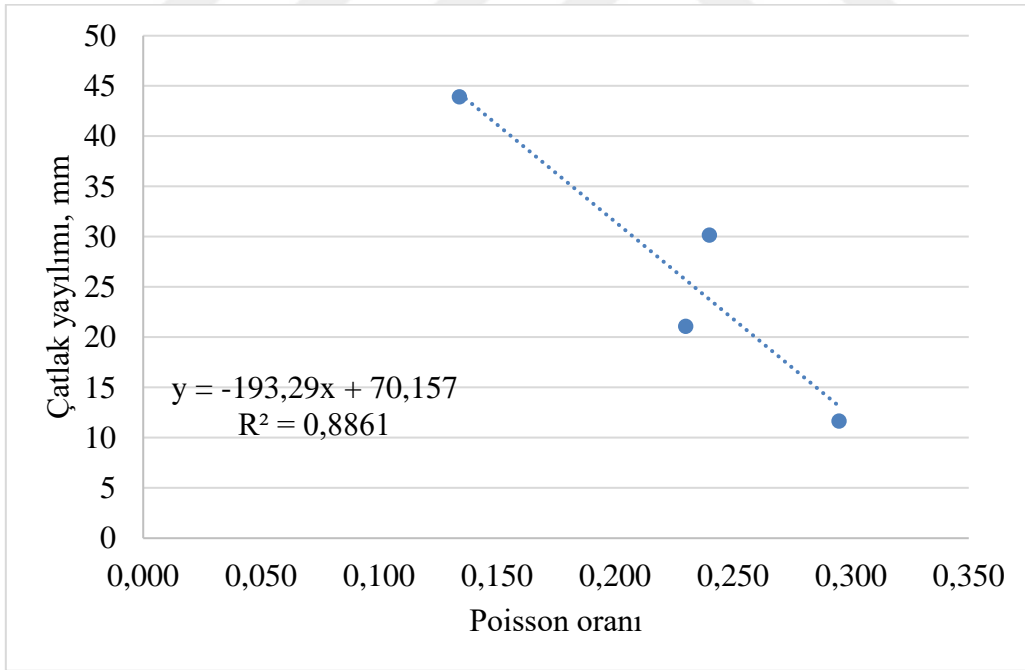
Şekil 6.29 Tek eksenli basınç dayanımı çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.

Granit örneklerinin elastisite modülü ile çatlak yayılımı miktarının ilişkisi ise Şekil 6.30’de verilmiştir.



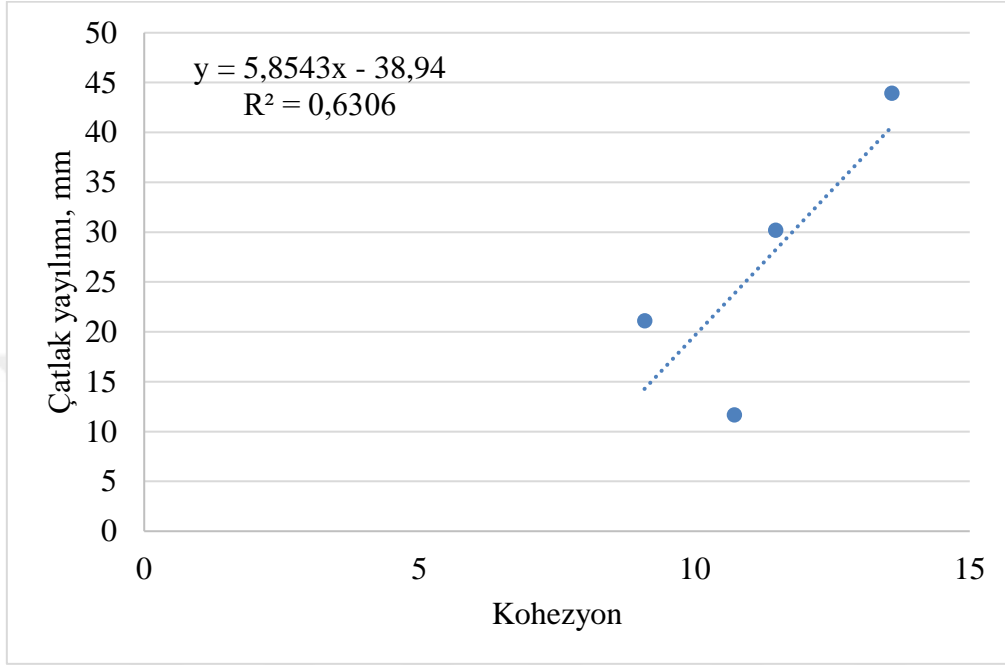
Şekil 6.30 Elastisite modülü ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.

Granit örneklerinin poisson oranı ile çatlak yayılımı miktarı arasındaki ilişki ise Şekil 6.31’da verilmiştir.

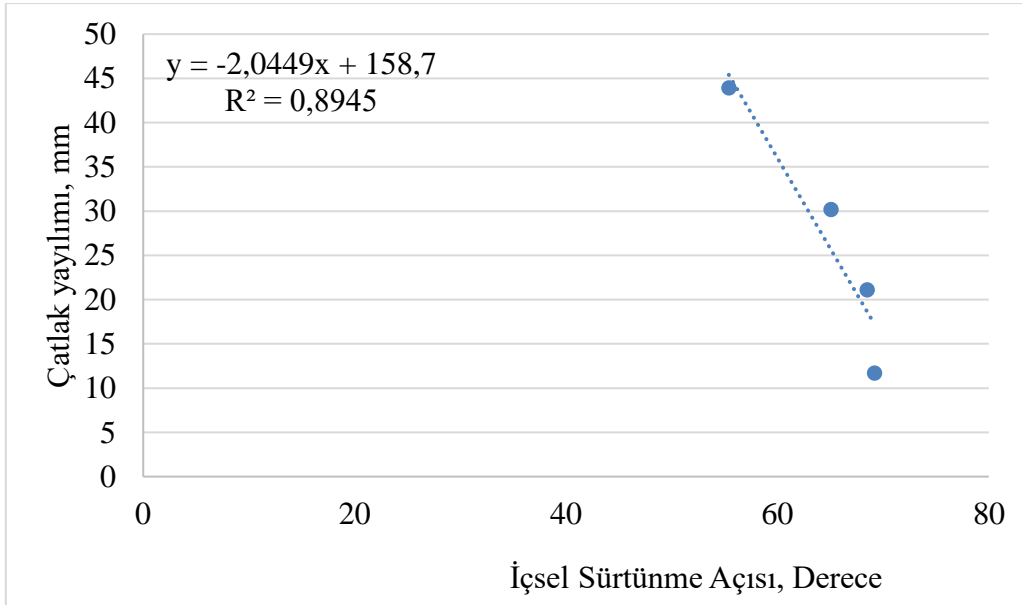


Şekil 6.31 Poisson oranı ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.

Granit örnekleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyleriyle elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı ile çatlak yayılımı arasındaki ilişki ise Şekil 6.32 ve Şekil 6.33’de verilmektedir.

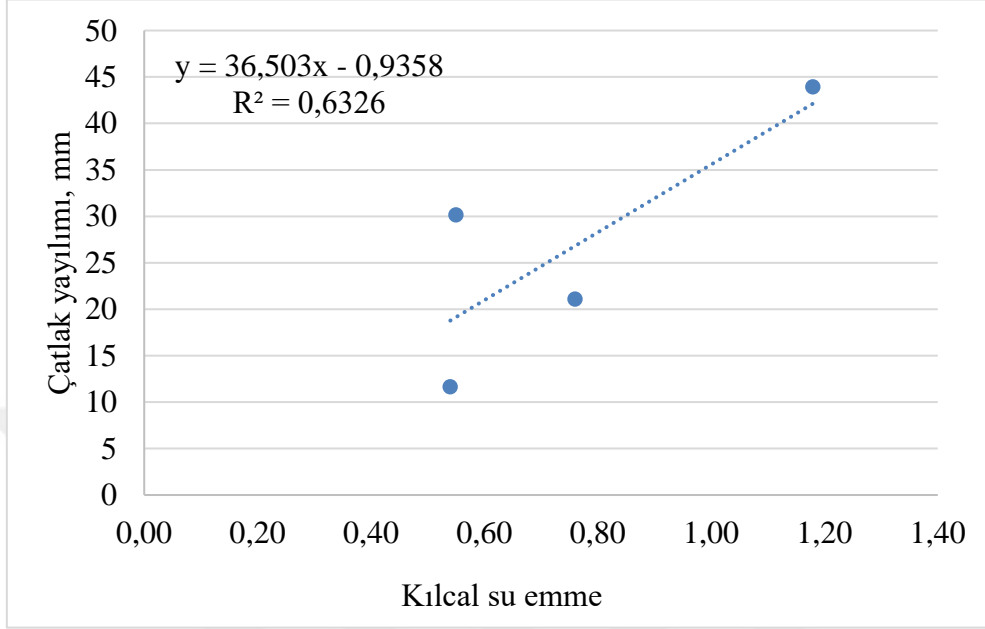


Şekil 6.32 Kohezyon ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.



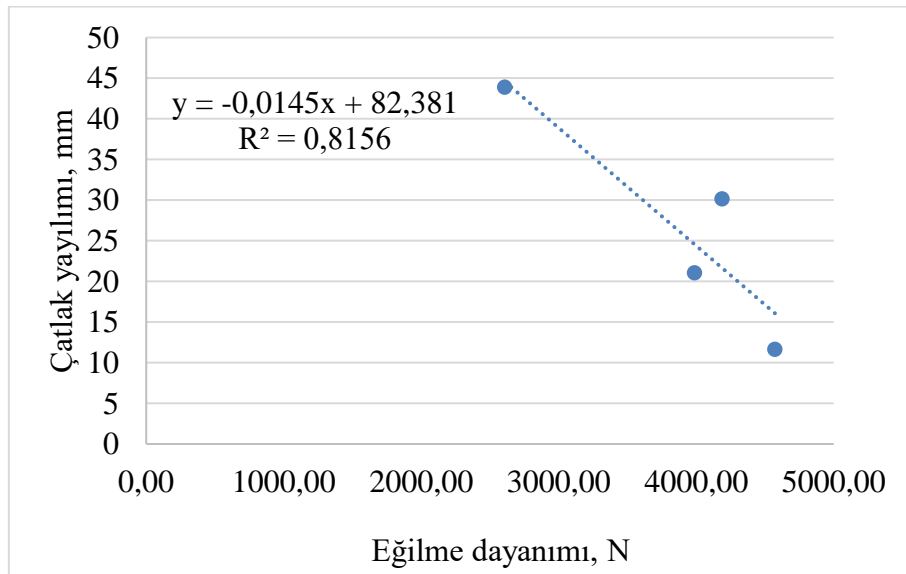
Şekil 6.33 İçsel sürtünme açısı ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.

Kılcal su emme miktarlarıyla çatlak yayılımı arasında bir ilişki olması beklenmekte olup bu ilişki Şekil 6.34’de verilmiştir.



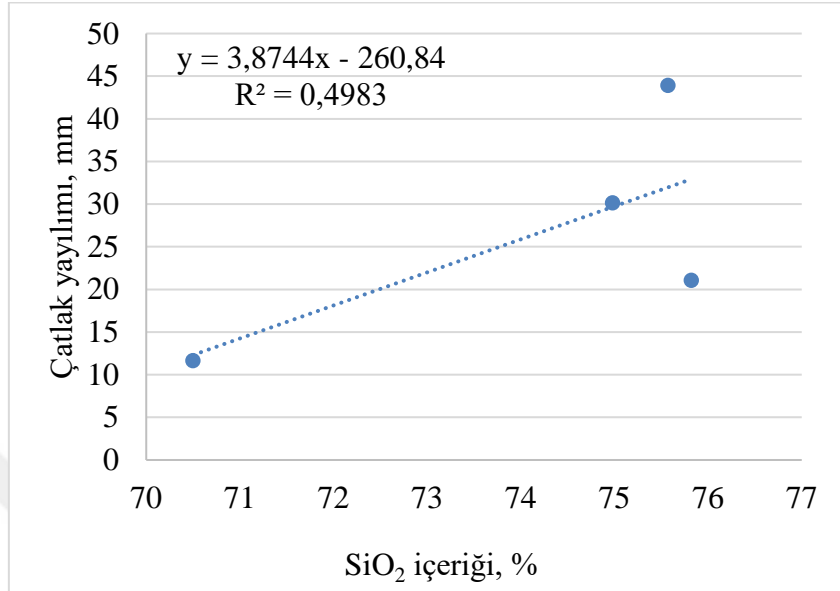
Şekil 6.34 Kılcal su emme ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.

Eğilme dayanımı ile çatlak yayılımı miktarı arasındaki ilişki ise Şekil 6.35’de verilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı gibi eğilme dayanımı ile de yüksek korelasyon katsayısı veren bir ilişki tespit edilmiştir.



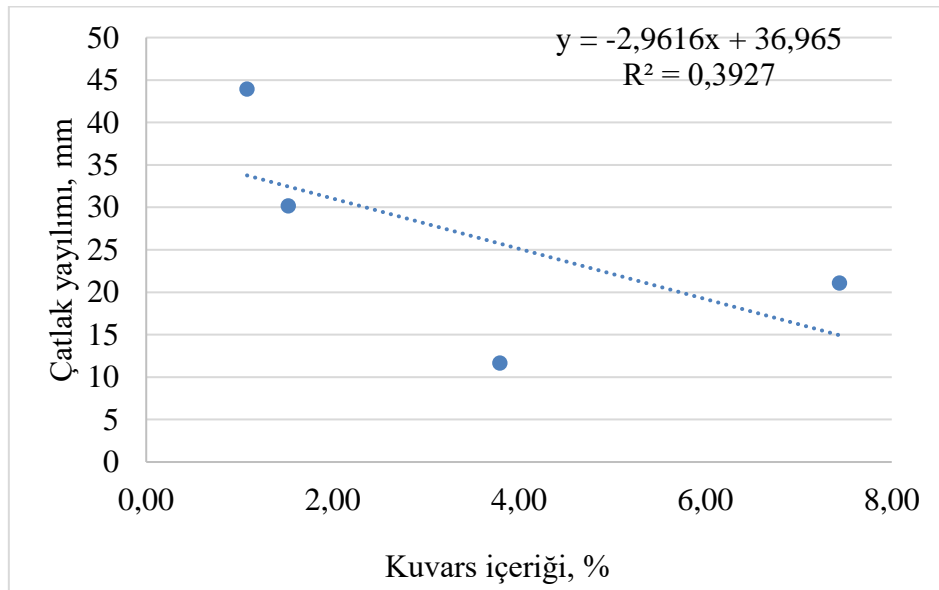
Şekil 6.35 Eğilme dayanımı ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.

Granit örneklerinin SiO<sub>2</sub> içeriği ile çatlak yayılımı miktarı arasındaki ilişki ise Şekil 6.36'de verilmiştir.



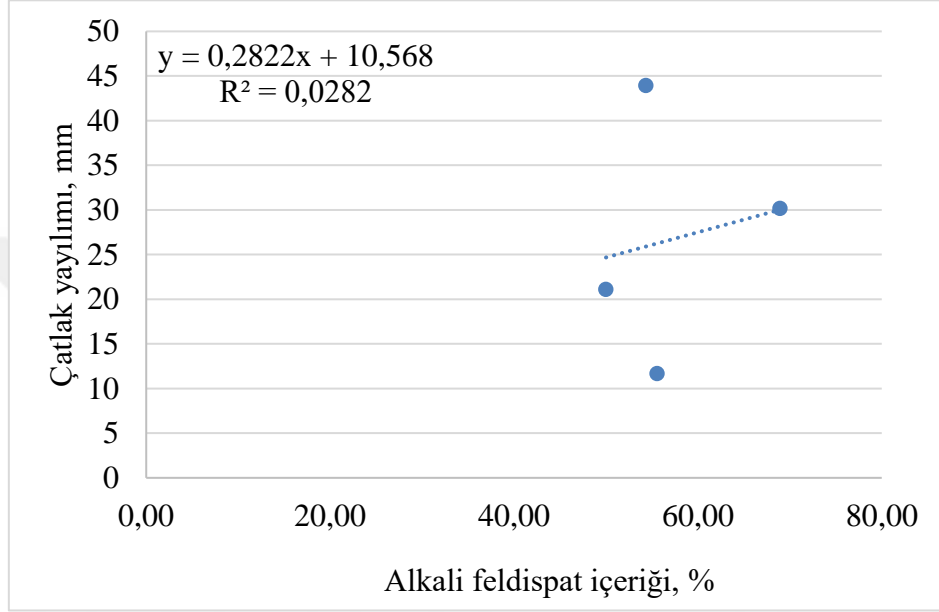
Şekil 6.36 SiO<sub>2</sub> içeriği ile çatlak yayılımı miktarı ilişkisi.

Şekil 6.37'de görülebileceği gibi kuvars içeriğinin artışıyla çatlak yayılımı artmaktadır. Fakat, bunu daha net söyleyebilmek için daha fazla örnek üzerinde çalışmak gerekmektedir.

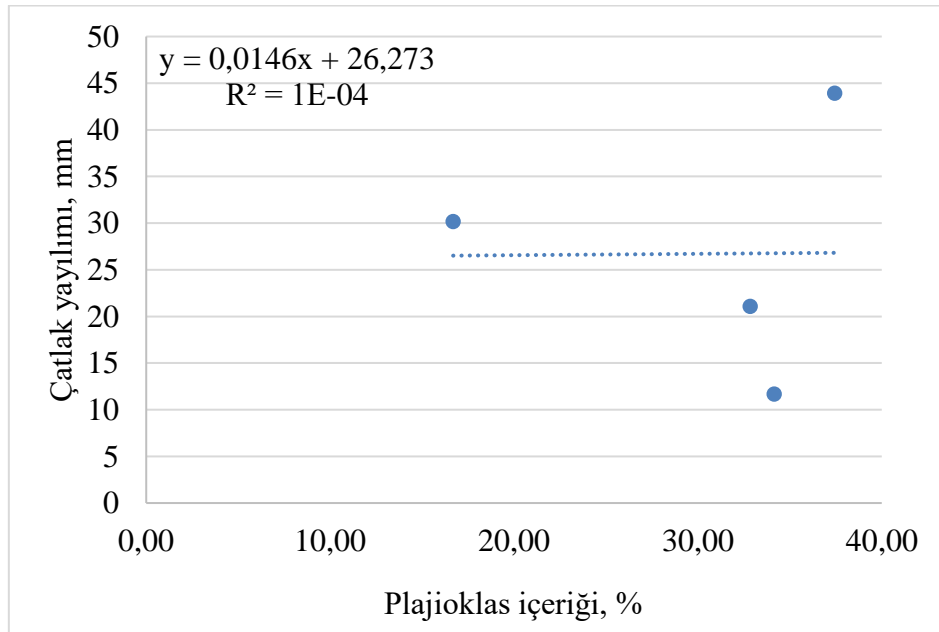


Şekil 6.37 Örneklerin kuvars minerali içeriği ile çatlak yayılım miktarı ilişkisi.

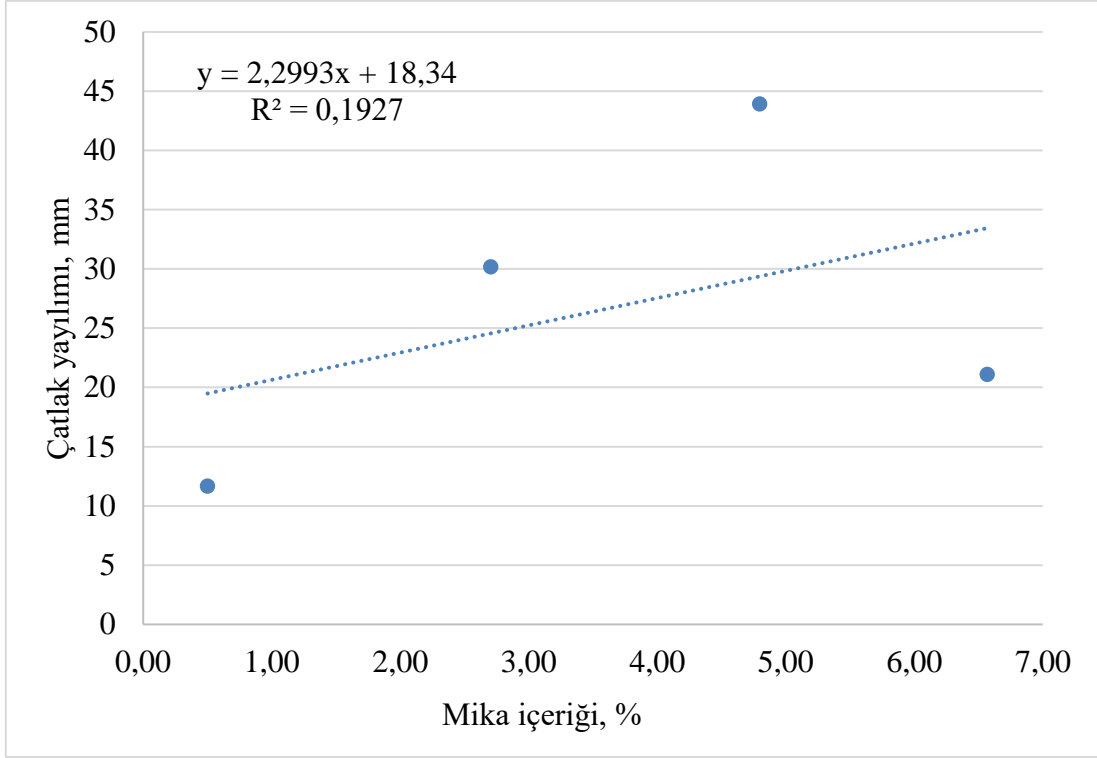
Mineralojik bileşimin çatlak yayılımına etkisi incelendiğinde, özellikle kuvars minerali oranındaki artışın çatlak yayılımında zorluk yarattığı söylenebilir. Mika minerali tam ters bir etki yaratmakla birlikte aralarındaki ilişkinin korelasyon katsayısı oldukça düşüktür. Diğer mineral içerikleriyle anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir (Şekil 6.38-40).



Şekil 6.38 Örneklerin alkali feldispat minerali içeriği ile çatlak yayılım miktarı ilişkisi.



Şekil 6.39 Örneklerin plajiolklas minerali içeriği ile çatlak yayılım miktarı ilişkisi.



Şekil 6.40 Örneklerin mika minerali içeriği ile çatlak yayılım miktarı ilişkisi.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hidrolik çatlatma, Amerika Birleşik Devletleri başta olmak üzere dünya genelinde çok ilgi çekmiş ve atıl durumdaki enerji kaynaklarının ekonomiye kazandırılmasında önemli bir rol üstlenmiştir. Hidrolik çatlatma başta petrol ve doğalgaz olmak üzere fosil yakıtların üretiminde kilit rol üstlenmiş olsa da jeotermal enerji üretiminde de faydalanılması planlanmaktadır. Sıcak su bulunmayan fakat ısı kaynağının bulunduğu sıcak kuru kaya ortamlarında geliştirilmiş jeotermal saha uygulaması yapılarak enerji üretilmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışma, kızgın kuru kaya ortamı olduğu düşünülen ve ileride saha geliştirme uygulamasının yapılması planlanan Aksaray ili ve çevresindeki volkanik kayaların çatlatma performanslarına kayaç özelliklerinin etkisi araştırılmıştır.

Alınan granit örneklerinden kaya mekaniği deneylerine uygun numuneler hazırlanmış ve kimyasal analiz, sertlik, basma dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı, kılcal su emme ve gözeneklilik gibi özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, Afyonkarahisar'da faaliyet gösteren Afsujet firmasında granit örnekleri yüksek basınçlı su altında çatlatma deneylerine tabi tutulmuşlardır. Oluşan çatlakların ortalama yayılımları hesaplanarak çatlatılabilirlikleri olarak hesaplamalara dahil edilmişlerdir.

Daha sonra tez çalışmasının asıl amacı olan kayaç özelliklerinin çatlatılabilirliği üzerindeki etkisini araştırabilmek için kayaç özellikleri ile çatlak yayılımları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bunlar içerisinde en yüksek ilişkileri veren 0,99 korelasyon katsayısı ile tek eksenli basınç dayanımı olmuştur. Daha sonra 0,82 ile eğilme dayanımı gelmektedir. Açık gözeneklilik ile 0,78 korelasyon katsayısına sahip bir ilişki elde edilmiştir ki çatlatma mekanizmasına bakıldığında mantıklı bir ilişki olarak değerlendirilebilir. Benzer durum kılcal su emme ile ilişkisinde elde edilmiştir, korelasyon katsayısı 0,63 olarak bulunmuştur. Granitlerin sertliği ile çatlak yayılımı arasında 0,54 korelasyon katsayısını veren bir ilişki elde edilmiştir. En çarpıcı sonuçlardan biri çatlak yayılımı ile poisson oranı arasında gerçekleşmiştir. 0,89 korelasyon katsayısı ile çok yüksek bir ilişki elde edilmiştir.

Çatlak yayılımı miktarı en yüksek RQ2 numaralı granit örneğinde, en düşük ise Y1 numaralı örnekte elde edilmiştir. Bu durumda hidrolik çatlatma uygulamasının en kolay olacağı granitin RQ2 numaralı granit olduğu söylenebilir. Diğer bir deyişle kızgın kuru kaya ortamı olarak RQ2 numaralı örneğin bulunduğu saha çalışılmak üzere önerilebilir.

Hidrolik çatlatma uygulaması su jeti ile yapılmış olup, daha sonra sahadan alınan aynı örneklerin hidrolik çatlatma deney düzeneklerinde de teste tabi tutularak alınan sonuçların bu çalışmada alınan sonuçlarla karşılaştırılması daha sonraki çalışmalara bir yol gösterecektir.

Bu çalışmada sadece kayaç özelliklerinin çatlatma performansına etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık, arazi gerilmeleri, hidrolik basıncı, hidrolik sıvısı vb. diğer çatlatma parametrelerinin etkisinin araştırılması bölgedeki gerçek boyutlarda yapılacak hidrolik çatlatma uygulamaları için önemli veriler sağlayacaktır.

Kayacın genel dayanım özelliklerini belirleyen yapı-doku özelliklerinin çatlatma performansını da belirlediği düşünülmektedir. Çalışmaların daha fazla sayıda bölgeden alınan örneklerle genişletilmesi önerilmektedir.

## 8. KAYNAKLAR

- Abe, H., Mura, T. and Keer, L.M. (1976). Growth rate of a penny-shaped crack in hydraulic fracturing of rocks. *Journal of Geophysical Research*, **29**: 5335-5340.
- Air Products and Chemicals. (2013). Enhanced unconventional oil and gas production with nitrogen fracturing.
- Arop, J.B. (2013) Geomechanical review of hydraulic fracturing technology, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering, 291.
- Burçak, M. (2006). Aksaray jeotermal sahaları (Acıgöl-Ziga-Şahinkalesi) jeotermal ısı kaynaklarının araştırılması ve jeotermal sistemlerin kavramsal modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 85.
- Engin, İ.C. (2006). Bazı Türk mermerlerinin aşındırıcılı su demetiyle kesilebilirlik özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 170.
- Geertsma, J. and Klerk, F.D. (1969). A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures. *SPE Journal of Petroleum Technology*, **12**: 1571-1581.
- Hao, F. (2015). A model analysis of sand insertion in hydraulic fractures Yüksek Lisans Tezi, 22-35.
- Hyne, N.J. (2001). Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling and production, Pennwell Books; 2. Edition, **3**: 25-32.
- Karpuz, C. and Hindistan, M.A. (2012). Kaya mekaniği ilkeleri, uygulamaları ve kaya malzemesi davranışı, Ankara, 39-45.
- Khristianovitch, S.A. and Zheltov, Y.P. (1955). Hydraulic fracture of an oil-bearing *Doklady Akademii Nauk SSSR*, **5**: 3-41.
- King G.E. (2012) “What every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells”. In the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference held in the Woodlands, Texas, USA from 6 to 8 February, SPE 152596.

- Le Maitre R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lamere, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H. and Woolley, A.R. (2002). Igneous rocks: a classification and glossary of terms, recommendations of the international union of geological sciences, subcommission of the systematics of igneous rocks. Cambridge University Press, UK.
- Lemon, R.F. and H.J.Patel. (1972). The effect of nuclear stimulation on formation permeability and gas recovery at project gasbuggy. *Journal of Petroleum Technology* **10**: 1199-1206.
- Montgomery, C.T. and M.B. Smith. (2010). "Hydraulic fracturing: history of an enduring technology. *Journal of Petroleum Technology*, **12**: 7-10.
- Mueller, M., Amro M., et al. (2012). Stimulation of tight gas reservoir using coupled hydraulic and CO<sub>2</sub> cold-frac technology. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Perth, Australia, Society of Petroleum Engineers.
- Nordgren, R.P. (1972). Propagation of a vertical hydraulic fracture. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **4**: 306-314.
- Nordyke, M. D. (2000). The soviet program for peaceful uses of nuclear explosions, 60-62.
- Perkins, T.K. and Kern, L.R. (1961). Widths of hydraulic fractures. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **9**: 937-949.
- Sevim, C. (2013). Kaya (Şeyl) gazının uluslararası enerji politikalarına etkileri, *Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi*, **1**: 49-64.
- Suthersan, S.S. (1999). Hydraulic and pneumatic fracturing. Remediation Engineering: Design Concepts. B.R. CRC Press LLC, 237-254.

## **İnternet Kaynakları**

1. [http://www.mta.gov.tr/v2.0/birimler/redaksiyon/ekonomibultenleri/2012\\_13/MTA\\_EkonomiBulteni\\_13\\_8-ilkersenguler.pdf](http://www.mta.gov.tr/v2.0/birimler/redaksiyon/ekonomibultenleri/2012_13/MTA_EkonomiBulteni_13_8-ilkersenguler.pdf) (Eriřim Tarihi: 26.09.2013)



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Haydar BAŞER  
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara, 02.02.1990  
Yabancı Dili : İngilizce– Orta Düzey  
İletişim (Telefon/e-posta) :05466737515/ haydar\_bsr@hotmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Keçiören Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi,  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği  
Bölümü, (2012-2016)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri  
Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı,  
(2016-2019)

### Staj Yaptığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Eti Bakır İşletmesi Murgul/ARTVİN (2014)  
RİZE Çayeli Bakır İşletmesi Çayeli/RİZE(2014)  
Türkiye Taşkömürü Kurumu Kozlu/Zonguldak (2015)