

**KIZGIN KURU KAYA JEOTERMAL  
SISTEMLERİNDE REZERVUAR KAYAÇLARIN  
HİDROLİK ÇATLATMA PERFORMANSLARININ  
LABORATUVAR ŞARTLARINDA BELİRLENMESİ:  
AKSARAY İLİ ÖRNEK ÇALIŞMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Feyzullah Ekrem ÇONKAR**

**Danışman**

**Prof. Dr. Ahmet YILDIZ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Temmuz 2023**

Bu tez çalışması 16.ARŞ.MER.02, 18.FSMH01 ve 17.FEN.BİL.62 numaralı proje ile A.K.Ü B.A.P ve 557 nolu proje ile KOSGEB tarafından desteklenmiştir.

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

**DOKTORA TEZİ**

**KIZGIN KURU KAYA JEOTERMAL  
SİSTEMLERİNDE REZERVUAR KAYAÇLARIN  
HİDROLİK ÇATLATMA PERFORMANSLARININ  
LABORATUVAR ŞARTLARINDA BELİRLENMESİ:  
AKSARAY İLİ ÖRNEK ÇALIŞMASI**

**Feyzullah Ekrem ÇONKAR**

**Danışman**

**Prof. Dr. Ahmet YILDIZ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2023**

## TEZ ONAY SAYFASI

Feyzullah Ekrem ÇONKAR tarafından hazırlanan “Kızgın Kuru Kaya Jeotermal Sistemlerinde Rezervuar Kayaçların Hidrolik Çatlatma Performanslarının Laboratuvar Şartlarında Belirlenmesi: Aksaray İli Örnek Çalışması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 07 / 07 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof.Dr. Ahmet YILDIZ

**Başkan** : Prof.Dr. Kubilay ASLANTAŞ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Teknoloji Fakültesi

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

**Üye** : Prof.Dr. Ömer ELİTOK  
Süleyman Demirel Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

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

**Üye** : Dr.Öğr.Üyesi Sevgi ÇETİNTAŞ  
Akdeniz Üniversitesi  
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

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

Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

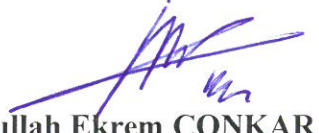
**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**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.**

07 / 07 / 2023

  
**Feyzullah Ekrem ÇONKAR**

## ÖZET

Doktora Tezi

### KIZGIN KURU KAYA JEOTERMAL SİSTEMLERİNDE REZERVUAR KAYAÇLARIN HİDROLİK ÇATLATMA PERFORMANSLARININ LABORATUVAR ŞARTLARINDA BELİRLENMESİ: AKSARAY İLİ ÖRNEK ÇALIŞMASI

Feyzullah Ekrem ÇONKAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

Hidrolik çatlatma özellikle petrol ve doğal gaz endüstrisinde rezervuarları genişletmek ve üretimi artırmak için uzun zamandır kullanılmaktadır. Bununla beraber zaman içerisinde hidrolik çatlatmanın çeşitli kullanım alanları gelişmiştir. Bunlardan biri de geliştirilebilir jeotermal sistemler ve kızgın kuru kaya jeotermal sistemlerde geçirimsiz ve gözenekliliği az kayaçları çatlatarak bunlarda yapay rezervuarlar oluşturmaktadır. Saha çalışmalarında karşılaşılan, hidrolik çatlatmayı etkileyen faktörleri laboratuvar koşullarında sağlayarak bunlardan çeşitli çıkarımlar ve geri dönüşlerin sağlanabileceği bir laboratuvar düzeneği bu çalışmada tasarlanmış, imal edilmiş ve test edilmiştir. Yer altı modellemesinde kullanılacak gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi ile kayaçların içlerine sıvı enjekte edilerek çatlatılmasını sağlayacak bir hidrolik şırınga pompa ile çeşitli yardımcı ekipmanlar bu çalışmada kullanılmak ya imal edilmiş yada hazır alınıp sisteme adapte edilmiştir.

**2023, xiii +123 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Hidrolik çatlatma, Kızgın kuru Kaya, Gerçek üç eksenli basınç, granit.

## **ABSTRACT**

Ph.D Thesis

### **DETERMINING THE HYDRAULIC FRACTURING PERFORMANCE OF RESERVOIR ROCKS IN HOT DRY ROCK GEOTHERMAL SYSTEMS: A CASE STUDY IN AKSARAY PROVINCE**

Feyzullah Ekrem ÇONKAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

**Supervisor:** Prof. Ahmet YILDIZ

Hydraulic fracturing has been widely used, especially in the petroleum and natural gas industry, to expand reservoirs and increase production. Over time, various applications of hydraulic fracturing have developed. One of these applications is the creation of impermeable and low-permeability rocks by fracturing them in developable geothermal systems and hot-dry-rock geothermal systems to form reservoirs. In this study, a series of machines and equipment were designed and manufactured to carry out hydraulic fracturing operations on a laboratory scale. By simulating factors that affect hydraulic fracturing under laboratory conditions, various deductions and feedback can be obtained in this laboratory setup. A real three-axis temperature and pressure cell to be used in underground modeling, along with a hydraulic syringe pump to inject fluid into the rocks and induce fracturing, as well as various auxiliary equipment, methods, formulations, and chemicals, were either manufactured or procured and tested to be integrated into the system.

**2023, xiii +123 pages**

**Keywords:** Hydraulic fracturing, hot dry rock, true three axial stress cell, granite.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 16.ARŞ.MER.02, 18.FSMH01 ve 18.FEN.BİL.10 numaralı projeler ve 557 numaralı proje ile KOSGEB tarafından desteklenmiştir. Tez çalışmamdaki maddi desteklerinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi ile KOSGEB'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması kapsamında, tez konumun seçilmesi, planlanması, yürütülmesinde beni yönlendiren, yazım sürecinde yardımlarını esirgemeyen bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Eleştiri, öneri ve katkıları nedeniyle tez izleme komitesi üyeleri Prof.Dr. Kubilay ASLANTAŞ ve Prof.Dr. İrfan Celal ENGİN'e ve tez jüri üyeleri Prof.Dr. Ömer ELİTOK ve Dr.Öğr.Üyesi Sevgi ÇETİNTAŞ'a; tasarım ve modelleme çalışmalarındaki katkıları nedeniyle Dr.Öğr.Üyesi Ahmet ÇETKİN'e; tezin faklı aşamalarındaki desteklerinden dolayı Dr.Öğr.Üyesi Can BAŞARAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmasında karşılaşılan finans ve proje sorunlarının çözümünde oynadıkları önemli ve değerli rol için başta Sayın hocam Prof. Dr. Tuğrul KANDEMİR'e ve AFYON UŞAK ZAFER TEKNOPARK çalışanlarına çok teşekkür ediyorum.

Çalışmanın imalat kısmının gerçekleşmesindeki büyük zorlukların aşılmasında hem maddi hem de teknik açıdan üstün desteklerinden dolayı ÇELSAN ZİNCİR A.Ş'nin sahibi çok değerli iş insanı Fikri ÖZKILINÇ'a teşekkür ediyorum.

Makinaların imalatı konusunda yüksek özveresi ve her türlü teknik problemimizin çözülmesinde bir karşılık beklemeden desteklemelerinden dolayı MOLDSAN MAKİNE A.Ş'nin sahibi Değerli Ömer OYMAN'a ayrıca teşekkür ediyorum. ÖZUTKU PETROL A.Ş. Sahibi sayın Halit ÖZUTKU bey'e çok önemli yardımları ve desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

Sayın Çetin ve Yakup PANCAR'a ile Cemal YÜREKLİ'ye çalışmanın ar-ge kısmında verdikleri çok değerli katkılar için teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışmasında gerek maddi gerek manevi desteğini her zaman esirgemediği vermiş olan, bunun yanında akademik bir çalışmanın kalitesinin gerek memleket gerekse de insanlık hiç ne ifade ettiğini öğreten kıymetli babam Prof. Dr. Mehmet Kemalettin ÇONKAR'a teşekkürü bir borç biliyorum. Bunun yanında uzun ve meşakkatli geçen bu çalışmalar sırasında sabırları ve anlayışları dolayısıyla eşim Dilek ÇONKAR ve annem Semahat ÇONKAR'a teşekkür ediyorum.

Feyzullah Ekrem ÇONKAR  
Afyonkarahisar 2023



## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	3
2.1 Jeotermal Sistemlerin Yapısı ve Sınıflandırılması .....	3
2.1.1 Jeotermal Sistemlerin Yapısı .....	3
2.1.1.1 Isı Kaynağı .....	4
2.1.1.2 Rezervuar Kaya .....	6
2.1.1.3 Isıyı Taşıyan Akışkan .....	7
2.1.1.4 Örtü Kayaç .....	7
2.1.1.5 Geçirimsiz Temel .....	8
2.1.1.6 Beslenme Alanı .....	8
2.2 Jeotermal Sistemlerin Sınıflandırılması .....	8
2.2.1 Rezervuar Kayaçtaki Akışkanın Kökenine Göre Sınıflama .....	9
2.2.2 Sıcaklıklarına Göre Sınıflandırma .....	9
2.2.3 Örtü Kayaçlara Göre Sınıflama .....	15
2.2.4 Jeolojik Yapıya Göre Sınıflama .....	15
2.2.5 Isı İletim ve Magmatik Özelliğe Göre Sınıflama .....	16
2.3 Kızgın Kuru Kaya (KKK) ve Geliştirilmiş Jeotermal Sistemler (GJS) .....	16
2.4 KKK ve GJS Sistemlerin Jeolojik Özellikleri .....	17
2.5 KKK ve GJS Sistemlerin Araştırılması .....	19
2.5.1 KKK ve GJS Öncesi Çalışmaları .....	19
2.5.1.1 Jeolojik Araştırmalar .....	19
2.5.1.2 Jeokimyasal Araştırmalar .....	19
2.5.1.3 Jeofizik Araştırmalar .....	20

2.5.1.4 Hedef Bölge Seçimi .....	21
2.5.2 KKK ve GJS Çalışmaları .....	21
2.5.2.1 Sığ Derinlik Gradyan Sondajları .....	22
2.5.2.2 Derin HDR ve EGS Sondajları .....	22
2.5.3 KKK ve GJS Sonrası Çalışmalar .....	25
2.5.3.1 Jeokimyasal ve Jeofizik Araştırmalar .....	25
2.5.3.2 Üretilen Akışkan Analizleri .....	26
2.6 Çatlatma ile Rezervuar Oluşturma Yöntemleri .....	27
2.6.1 Hidrolik Çatlatma .....	27
2.6.2 Pnömatik Çatlatma .....	29
2.6.3 Dinamik Yüklemeyle Çatlatma .....	30
2.6.3.1 Patlayıcı Kullanılarak Çatlatma .....	30
2.6.3.2 Elektrik Kullanılarak Çatlatma .....	31
2.6.4 Diğer Çatlatma Yöntemleri .....	31
2.6.4.1 Termal (Dondurucu) Çatlatma .....	31
2.6.4.2 Şeylin Mekanik Olarak Kesilmesi .....	31
2.6.4.3 Gelişmiş Bakteriyel Metan Oluşumu .....	32
2.7 Hidrolik Çatlatma Operasyonu Aşamaları .....	32
2.8 Hidrolik Çatlatma Yöntemi Mekaniği .....	34
2.8.1 Çatlak İlerleme Geometrisinin Gelişmesi ve Kestirilmesi .....	39
2.9 KKK ve GJS Sistemlerin Dünya ve Türkiye'deki Durumu .....	41
3. MATERYAL VE METOT .....	44
3.1 Aksaray İli Jeolojisi ve Örnekleme .....	44
3.2 Hidrolik Çatlatma Deney Düzenineğinin Tasarımı ve İmalatı .....	46
3.2.1 Hidrolik Çatlatma ve Rezervuar Geliştirme Laboratuvarının Faaliyet Alanı .....	47
3.2.2 Hidrolik Çatlatma Pompası ve Doldurma Pompası Tasarım ve Üretimi .....	48
3.2.3 Gerçek Üç Eksenli Yeraltı Basınç ve Sıcaklık Simülasyon Hücresi Tasarımı ve Üretimi .....	54
3.2.4 Yardımcı Ekipman ve Teçhizatlar .....	59
3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu .....	62
3.3.1 Traverten Numunelerinin Hazırlanması .....	62

3.3.2 Granit Numunelerinin Hazırlanması .....	63
3.4 Hidrolik Çatlatma Deneyleri .....	67
3.4.1 Ön Çatlatma ve Kalibrasyon Deneyleri .....	67
3.4.1.1 Epoksi, Kayaç ve Çatlatma Enjektörü Arasındaki Deneyler .....	68
3.4.1.2 Çatlatma Yüzey Alanı ve Basınç Odası Büyüklüğünün Tespiti Deneyleri .....	70
3.4.2 Hidrolik Çatlatma Deneyleri .....	71
3.5 Granit Örneklerine Uygulanan Fiziko-Mekanik Testler .....	74
3.5.1 Görünür ve Gerçek Yoğunluk Testi ve Toplam ve Açık Gözeneklilik Testi .....	75
3.5.2 Atmosfer Basıncında Su Emme Testi .....	78
3.5.3 Schmidt Sertlik Testi .....	79
3.5.4 Eğilme Dayanımı Testi .....	80
3.5.5 Brazilian Çekme Dayanımı Testi .....	81
3.5.6 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testi .....	82
3.6 Çatlakların İzlenmesi ve Çatlak Geometrisinin Ortaya Konması .....	82
3.7 XRD Analizleri .....	84
3.8 Polarizan Mikroskop İncelemeleri .....	84
4. BULGULAR .....	86
4.1 Granit Örneklerinin Karakterizasyonu .....	86
4.1.1 Fizikomekanik Testler .....	86
4.1.2 XRD Sonuçları .....	87
4.1.3 Polarizan Mikroskop İncelemeleri .....	88
4.2 Hidrolik Çatlatma Deney Düzenineğinin Tasarımı ve İmalatı .....	89
4.2.1 Gerçek Üç eksenli Sıcaklık ve Basınç Hücresi .....	89
4.2.2 Hidrolik Şırınga Pompa .....	92
4.2.3 Yardımcı Ekipmanlar .....	99
4.3 Hidrolik Çatlatma Deney Sonuçları .....	100
4.3.1 Ön Hidrolik Çatlatma Deneyleri .....	100
4.3.2 Gerçek Üç Eksenli Basınç Koşulları Altında Hidrolik Çatlatma Deneyleri .....	103
4.4 Çatlak Geometrisi Sonuçları .....	106

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	110
5.1 Tartışma.....	110
5.2 Sonuçlar.....	114
6. KAYNAKLAR.....	116
ÖZGEÇMİŞ.....	123

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

dH <sub>2</sub> O	Distile su
Cr(VI)	Hekzavalent krom
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Hidrojen peroksit
HCl	Hidroklorik asit
OH <sup>•</sup>	Hidroksil radikali
Ma	Miliamper
μM	Mikromolar
mM	Milimolar
μg	Mikrogram
μL	Mikrolitre
O <sub>2</sub> <sup>•-</sup>	Süperoksit radikali

### Kısaltmalar

---

ALAD	δ-Aminolevülinik asit dehidrataz
GSH	Glutasyon
GSSG	Okside glutasyon
GR	Glutasyon redüktaz
MDA	Malondialdehit
NADPH	Nikotinamid adenin dinükleotit fosfat
NBT	Nitro blue tetrazolium
PAJE	Poliakrilamid jel elektroforez
POD	Guaiakol peroksidaz
ROT	Reaktif oksijen türleri
SOD	Süperoksit dismutaz
TBA	Tiyobarbütirik asit
TCA	Trikloroasetik asit
m	Metre

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 İdeal jeotermal sistem modeli (Kumar vd. 2022).....	3
Şekil 2.2 Sıcak su egemen sistemlerin kavramsal modeli (Gupta ve Roy 2007).....	10
Şekil 2.3 Buhar egemen sistemlerin kavramsal modeli (Gupta ve Roy 2007).....	13
Şekil 2.4 Kızgın kuru kaya sistemi. ....	14
Şekil 2.5 Geçirimsiz temel türüne göre GJS sistemlerinin dağılımı (A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future 2013).....	18
Şekil 2.6 Hidrolik çatlatma (Suthersan 1999).....	28
Şekil 2.7 Punomatik çatlatma. ....	30
Şekil 2.8 Hidrolik olarak çatlatılmış dikey rezervuar. ....	33
Şekil 2.9 Yatay olarak dizayn edilmiş GJS çok aşamalı (multistage) rezervuarı (Han vd. 2020).....	33
Şekil 2.10 Asal gerilmelere bağlı çatlak oluşumu. ....	37
Şekil 2.11 PKN(A) ve KGN(B) modelleri (İnt. Kyn. 1).....	40
Şekil 2.12 Çatlak Kestirme Yöntemlerinin karşılaştırılması (Brady vd. 1993).....	41
Şekil 2.13 Dünya'daki GJS Projelerinin dağılımı (Lu 2018).....	42
Şekil 3.1 Aksaray ili ve çevresinin jeoloji haritası (Burçak vd. 2006).....	45
Şekil 3.2 Pozitif deplasmanlı piston pompa. ....	48
Şekil 3.3 Hidrolik çatlatma pompası. ....	49
Şekil 3.4 Çatlatma pompası kullanıcı ara yüzü. ....	50
Şekil 3.5 Node-Red yazılım geliştirme ekranı. ....	50
Şekil 3.6 a) Basınç sensörü b) Elektronik cetvel.....	51
Şekil 3.7 Hidrolik şırınga pompa elektronikleri. ....	51
Şekil 3.8 Sensör veri okuma testleri a) deney seti 1 b) deney seti 2. ....	52
Şekil 3.9 Piston (şırınga) pompa iç parçaları. ....	52
Şekil 3.10 Alçı ve beton kalıpların çatlatılması. ....	53
Şekil 3.11 Maksimum basınç tespiti deneyi. ....	53
Şekil 3.12 Sıkıştırma hücresi iç görünümü. ....	55
Şekil 3.13 Silindir içi basınç modeli. ....	56
Şekil 3.14 Toplam deformasyon analizi sonuçları. ....	57

Şekil 3.15	Von Mises gerilme analizi sonuçları. ....	57
Şekil 3.16	Gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık hücresi üretimi. ....	58
Şekil 3.17	Hücrenin kamera konumları. ....	59
Şekil 3.18	Gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık hücresi. ....	59
Şekil 3.19	Vinç deformasyon analizi. ....	60
Şekil 3.20	Vincin imalatı ve kullanılması. ....	61
Şekil 3.21	Ön yükleme pompası. ....	61
Şekil 3.22	Ön çatlatma deneylerinde kullanılan traverten örnekleri. ....	63
Şekil 3.23	Deney örnekleri için temin edilen kapak altı granit parçaları. ....	64
Şekil 3.24	Parçanın tezgâha yerleştirilmesi. ....	65
Şekil 3.25	Granit parçasının boylamasına ikiye bölünmesi. ....	65
Şekil 3.26	Boydan ebatlama işlemi ve parçaların taşınması. ....	66
Şekil 3.27	Deney numunelerinin ebatlanması. ....	67
Şekil 3.28	Ön çatlatma deneylerinde kullanılan alçı örnekleri. ....	68
Şekil 3.29	Granit ve enjektöre açılan kanallar. ....	69
Şekil 3.30	Delik açma ve enjektör yerleştirme aşamaları a) Enjektör deliğinin delinmesi b) Enjektörün yerleştirilmesi ve kimyasal dübelin uygulanması ve c) Kürleşme sonrası deliğe çatlatma odası için ikinci deliğin açılması. ....	70
Şekil 3.31	Kayaçların basınç hücresine yerleştirilmesi. ....	71
Şekil 3.32	Hortum bağlantıları ve üst kapak destekleri. ....	72
Şekil 3.33	Eksenel basınçların ayarlanması. ....	73
Şekil 3.34	Fiziko mekanik testlerde kullanılan numunelerin hazırlanması. ....	74
Şekil 3.35	Mavi renkli sıvı enjektörde edilmiş kayaç numunesi. ....	83
Şekil 3.36	Nunumenin hazırlanması. ....	84
Şekil 3.37	Shimadzu XRD-6000 model X-ışını difraktometre cihazı. ....	85
Şekil 4.1	Brazilian çekme deneyi. ....	86
Şekil 4.2	Aksaray ortaköy mevkii graniti XRD ışın kırınımı grafiği. ....	87
Şekil 4.3	Polarizan mikroskopta çapraz nikolde 25 kat büyütülen çatlak hattı. ....	88
Şekil 4.4	Hidrolik çatlatma deney düzeneği. ....	90
Şekil 4.5	Hücre içindeki kayaca tatbik edilen eksenel basınçlar. ....	90
Şekil 4.6	Kayaç sıkıştırma basınç oluşturma işlemleri. ....	91
Şekil 4.7	Basınçlara bağlı olarak çatlak yönelimi. ....	91

Şekil 4.8	Üst delik ve çatlatma odasının traverten üzerinde gösterimi. ....	93
Şekil 4.9	Şırınga pompa basınç deneyi, 600 bar basınç / zaman grafiği. ....	94
Şekil 4.10	Piston ilerleme hızı deneyi. ....	95
Şekil 4.11	Piston ilerlemesinin kamera ile kayıt edilmesi a) Deney başlangıcı ve b) Deney bitişi. ....	95
Şekil 4.12	Konum değişikliğinin elle ölçülmesi. ....	96
Şekil 4.13	Deney 1'e ait konum/süre grafiği. ....	96
Şekil 4.14	Deney 2'ye ait konum/süre grafiği. ....	97
Şekil 4.15	Deney 3'e ait konum/süre grafiği. ....	97
Şekil 4.16	Çatlatma sıvısı hacim ve ağırlık ölçümleri. ....	98
Şekil 4.17	Ön yükleme pompası. ....	99
Şekil 4.18	Ön çatlatma deneyleri numuneleri a) traverten b) granit. ....	100
Şekil 4.20	25 mm delik, 14 mm iç çapa sahip çatlatılmış traverten numunesi; a) Yanal eksene paralel oluşan çatlakın üstten görüntüsü, b) Yanal eksene paralel oluşan çatlakın yandan görüntüsü c) Dikey eksene paralel çatlaklı traverten numunesinin ortadan ikiye ayrılmış görüntüsü. ....	101
Şekil 4.21	42 mm delikli ve basınç boşluklu traverten numunelerinden birine ait grafik ve görüntü kesiti. ....	102
Şekil 4.24	Deney 1'e ait basınç/zaman grafiği. ....	105
Şekil 4.25	Deney 2'ye ait basınç/zaman grafiği. ....	105
Şekil 4.26	Deney 3'e ait basınç/zaman grafiği. ....	106
Şekil 4.27	Deney 1'de kullanılan granit numunesinin çatlak konumlaması. ....	107
Şekil 4.28	Deney 2'de kullanılan granit numunesinin çatlak konumlaması. ....	108
Şekil 4.29	Deney 3'de kullanılan granit numunesinin çatlak konumlaması. ....	109
Şekil 5.1	Cheng ve Zhang (2020) tarafından yapılan çalışmada farklı enjeksiyon hızlarında elde edilen kırılma ve kırılma başlangıcı verileri. ....	110
Şekil 5.2	Yatay eksen stresleri arasındaki farka dayalı kırılma zaman değerleri (Ning vd. 2022). ....	111
Şekil 5.3	İdeal hidrolik çatlatma basınç grafiği (Prabhakaran vd. 2017). ....	112
Şekil 5.4	Kuvvet dağılımları. ....	113
Şekil 5.5	Çatlatma odası ve enjektör deliklerinin basınçlara göre konumu. ....	113



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 2.1</b> Yerkürede bazı kayalardaki radyoaktif elementler ve bozunum miktarları	6
<b>Çizelge 2.2</b> Hidrolik çatlatma yönteminde kullanılan farklı sıvılar .....	29
<b>Çizelge 3.1</b> Fiziko-mekanik testler, örnek boyutları ve standartlar. ....	74
<b>Çizelge 4.1</b> Fizikomekanik deney sonuçları. ....	87

## 1. GİRİŞ

Enerji ve yenilebilir enerji kavramları günümüz dünyasının en önemli konu başlıklarından birini oluşturmaktadır. Daha temiz, daha verimli, daha sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç sebebi ile teknolojik ve bilimsel gelişmelerin en çok yaşandığı alanlardan biri de enerji alanıdır. Günümüz enerji kaynakları temiz ve daha az karbon salınımına sebep olan kaynaklar arasından seçilmektedir.

Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal günümüzün en yeşil enerji kaynakları olarak bilinmektedir. Hidroelektrik bu kaynaklar arasında en yaygın kullanılanı olmakla beraber son yıllarda güneş ve rüzgâr enerjisi kullanımı ve bu alanda yapılan yatırımlar hızla artmaktadır. Ancak ne güneş ne de rüzgâr enerjisinin kısa vadede primer enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir. Nükleer füzyon konusundaki çalışmaların ise hala emekleme seviyesinde olması yakın zamanda tamamen yeşil kaynaklarla enerji üretebilmeyi çok zor ve maliyetli bir hale getirmektedir.

Jeotermal enerji ise belki de yeşil enerji kaynakları arasında primer olmaya belki de en yakın olanı olmakla öne çıkmaktadır. Yakın zamana kadar jeotermal enerji denince akla sıcak bir akiferde birikmiş sıcak su akla gelmekteydi. Fakat yerin enerji kaynağı olan çekirdek mantonun altına ve kabuğun bazı kesimlerine çok yaklaşılarak aslında çok büyük bir ısı kaynağı olarak hali hazırda kabuk altında beklemektedir. Bu kaynağın uygun koşullarda bir su rezervuarını ısıtmasını beklemektense neredeyse dünyanın her yerinde uygulanabilecek (sadece farklı derinlikler isteyen) bir yöntemle kendi rezervuarlarımızı oluşturarak bu ıyıyı kullanmak ve bundan enerji ihtiyacı karşılamak günümüzde imkân dahilinde gözükmemektedir.

Kayaçların hidrolik olarak çatlatılması ve içerilerinde jeotermal rezervuarlar oluşturacak çatlak ağları oluşturma fikri 1970'lerde hayat bulmuş bir fikirdir. O zamandan beri çeşitli saha denemeleri de yapılmış ancak petrol kaynaklarının varlığı sürdürmesi ve nispeten ucuz olması son 10 yıla kadar ciddi bir atılım olmasını engellemiştir. Son on yılda ise karbon ayak izinin küçültülmesi çalışmaları, elektrikli araç üretimine

başlanması ve karbon kaynaklı yakıtlardan enerji üretiminin azaltılmaya çalışılması ile bu yöntemler tekrar popülerlik kazanmıştır.

Ancak diğer yeşil enerji türlerine bakıldığında hem maliyet hem de teknik açıdan çeşitli zorluklar barındıran kızgın kuru kaya jeotermal sistemlerden enerji üretilmesi konusu diğer yeşil yöntemler kadar yatırımcı çekmemiştir. Yine de özellikle son yıllarda Çin'in başını çektiği birçok bilimsel makale ve mühendislik çalışması yapılması bu alanın ihtiyacı olan bilimsel ve teknik boşlukların giderilmesi açısından önemlidir. Özellikle uygulama aşamasındaki bilinmezlikleri aşılması, maliyetlerin düşürülmesi ve daha kabiliyetli makine teçhizatların geliştirilmesi bu alanın önemli eksiklerin giderilmesi bu alanın hızla öne çıkmasına sebep olacaktır.

Tez çalışmasında bu yukarıda belirtilen konular masa üstüne yatırılmış ve kızgın kuru kaya jeotermal sistemler konusunda hayli büyük potansiyele sahip ülkemizde bu konu ile ilgili bir araştırma laboratuvarının başlangıcına sebep olabilecek bir çalışma yapmaya karar verilmiştir. Bu kapsamda temel makine, teçhizat, elektronik sistemler, yöntemler ve kimyasallar gibi bazı konularda planlamalar yapılarak giriş seviyede magmatik kayaları çatlatabilecek ve veri toplayabilecek bir sistem oluşturulmuştur.

Bu tez çalışmasında tasarlanan ve imalatı yapılan çeşitli makinalardan bazıları ilk kez yerli ve milli olarak tasarlanıp üretilmiştir. Gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi ile hidrolik çatlatma (şırınga) pompa Türkiye'de imalatı olmayan makinalardır. Bu makinalara özgün özellikler eklenerek tasarımları ve imatları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi için tez çalışması sırasında patent başvurusu yapıp, belge alınmıştır.

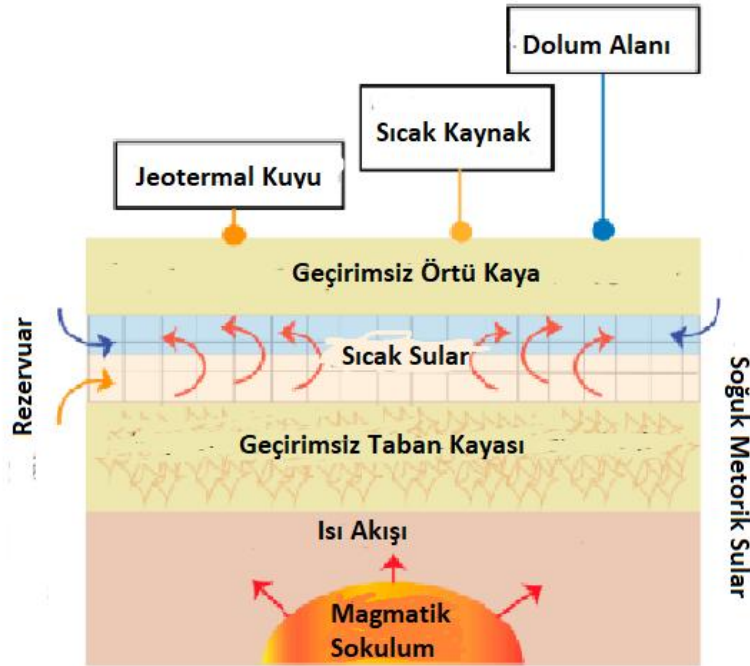
## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Jeotermal Sistemlerin Yapısı ve Sınıflandırılması

#### 2.1.1 Jeotermal Sistemlerin Yapısı

Çoğu jeotermal rezervuar ve kızgın kuru kaya (KKK) sistemleri, düşük kırıklı ve gözenekli jeolojik oluşumlarda bulunur. Bu tür ortamlarda, çatlaklar, bu tür kayalardan sıvı akışı için kanallar sağlar. Bu nedenle, doğal veya yapay olarak oluşturulmuş kırıklar, jeotermal rezervuarların ve KKK sistemlerinin başarılı bir şekilde işletilmesi için önemlidir. KKK Jeotermal rezervuarlar, genç dağ oluşumu, tektonik plaka sınırları ve yeraltı sıcaklıklarının daha yüksek olduğu volkanik aktivite alanlarında bulunur. Elektrik enerjisi üretimi için potansiyel rezervuarlar oluştururlar (Singhal ve Gupta 2010).

Bir jeotermal sistemin etkili çalışabilmesi için gereken unsurlar; Isı kaynağı, Rezervuar kaya, Isı taşıyan akışkan, örtü kaya ve geçirimsiz temel şeklindedir. Jeotermal sistemi oluşturan unsurlar aşağıda verilmiştir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1 İdeal jeotermal sistem modeli (Kumar vd. 2022).

### 2.1.1.1 Isı Kaynağı

Jeotermal sistemdeki rezervuarı ve içinde dolaşan akışkanı ısıtan ve dolayısıyla rezervuar içinde ekonomik olarak işletilebilir enerji depolanmasını sağlayan kaynaktır. Isı kaynağı konum olarak rezervuarın altında bulunmaktadır. Rezervuarı ısıtmak için gerekli olan enerjiyi üreten üç çeşit ısı kaynağı mevcuttur. Bunlar tektonik hareketlerden kaynaklı ısı, magmadan gelen ısı ve radyoaktif bozunmalardan açığa çıkan ısıdır.

Tektonik zonlarındaki fay hareketleri, iki veya daha fazla kaya kütlelerinin birbirine yavaşça sürtünmeleri gibi bir hareketi temsil eder. Bu hareket sırasında birbirine sürtünen kütleler arasında birbirlerinin sürtünme katsayılarına bağlı olarak bir ısı açığa çıkar. Burada mekanik kuvvet sürtünme vasıtasıyla ısı enerjisine dönüşür. Kırık boyu, senelik kayma hızı, temas alanı gibi faktörlerde sürtünme katsayısı ile birlikte değerlendirilerek bir fayın ne kadar ısı üretebileceği hesaplanabilmektedir. Burada fayın yapısı atım şekli ile derinliği de önemli rol oynar. Öyle ki bazı aşırı durumlarda (10cm/yıl kayma hızı ve sert litosferde) kesme ısınması, Mohoroviç sınırında 590°C ve 20 km derin de de 475°C'yi bulabilmektedir. Daha yaygın durumlarda bu ısılar daha düşük olsa da, yine de doğrultu atımlı fay bölgelerinde karşılaşılan yüksek dereceli metamorfik koşullar bu şekilde açıklanabilir (Leloup 1999).

Litosferin altından başlayarak çekirdeğe kadar olan alanda bulunan yüksek sıcaklıklı, eriyik haldeki malzemedan oluşan, yüksek viskoziteli bir sıvı olan magma yer kabuğundaki pek çok jeolojik olaya ve yapıya aktif olarak katkıda bulunur. Tektonik aktiviteler, kayaç oluşumları, metamorfizmanın yanı sıra jeotermal rezervuarların ısınmasına da etki eder. Magmanın oluşumu çoğunlukla yerküresinin üst mantosundaki kayaçların kısmi ergimesiyle oluşur. Magmanın büyük bir kısmı manto kökenlidir. Magmanın büyük çoğunluğu deniz tabanı ayrılmasına bağlı olarak diverjan levha sınırlarında üretilir (Lutgens Tarbcuk 2008).

Ortamsal kayaç yoğunluğu ve kayaçlardaki gaz basıncına bağlı olarak, tektonik hatları da kullanarak magma yer kabuğu içinde yukarılara doğru ilerleyebilir. Magma bu aşamada yer kabuğunun değişik derinliklerine sokularak dayk, sil, batolit, stok ve

lakolit adı verilen çeşitli şekil ve boyutlarda soğur. Bazen de soğumadan yeryüzünde sıcak lav şeklinde püskürerek volkanik aktivite gerçekleşir.

Yerkabuğunun derinlerinde soğuyarak dış kısmı katılaşıp iç kısımları hala aktif magma ile temas eden bazı magmatik sokulumlar jeotermal rezervuarlara hem konveksiyon ile hem de kondüksiyon ile ısı kaynağı olabilmektedir. Yer kabuğu altına sızan sular bu magma çemberlerine yaklaşarak buradaki sıcaklık ile buharlaşıp jeotermal rezervuarlara ulaşana kadar yükselerek buralardaki suları ısıtarak bunları jeotermal kaynak haline getirmektedirler. Bazı durumlarda ısı kaynağı olan magmatik kütle ile geçirimsiz temel arasında bulunan mesafe az olabilir. Arada bulunan kayaçların veya birimlerin sıcaklıkları belli bir dereceye kadar ulaşarak jeotermal sistemin geçirimsiz temelini ısıtabilir. Bu durumda rezervuar kaya kondüktif olarak ısınmış olur.

Magmanın kondüktif olarak ısıttığı en önemli jeotermal rezervuar türüne KKK ve Geliştirilebilir Jeotermal Sistemler (GJS) jeotermal sistemler örnek verilebilir. KKK ve GJS sistemler bazen sokulum yapan magmanın içine göre daha soğuk olan dış granit ve riyolit tabakası olabilirken bazen de bu birimlerle temas halinde bulunan sedimanlar da olabilmektedir. Bu tür ortamlarda rezervuar kaya jeolojik özelliklerinden çok ekonomik fizibilitesine göre belirlenir. Graniti delmek ve çatlatmak daha uzun ve güç isteyen bir çalışmayken, yeterince ısınmış bir üst sediman tabakasını çatlatıp orada rezervuar oluşturmak daha ekonomik olabilmektedir.

Yer küre ısı kaynakları arasında en önemlisi radyoaktif maddelerin bozunumudur. Radyoaktivite kayaçların bozularak dışarıya ısı yaydığı bir kimyasal tepkimedir. Yer kürede ısı üreten başlıca radyoaktif elementler  $U^{238}$ ,  $U^{235}$ ,  $Th^{232}$  ve  $K^{40}$ 'dır. Asidik kayaçlardan radyoaktif ısı üretimi, ultrabazik kayaçlara oranla çok daha yüksektir (Çizelge 2.1). Granitlerde ortalama 4.75 ppm uranyum bulunur ve 20 km kalınlığında bir granit kütle bir yılda  $2,38 \times 10^{20}$  kalori üretebilir (Özdemir 2012).

**Çizelge 2.1** Yerkürede bazı kayaçlardaki radyoaktif elementler ve bozunum miktarları (Şahinci 1991).

	Yoğunluk Ortalama Derişim (ppm)				Ortalama Toplam Isı Miktarı	
	g/cm <sup>3</sup>	U	K	Th	1x10 <sup>-8</sup> cal/cal/yıl	110 <sup>-14</sup> cal/g/san
<b>Tortullar</b>	2,3	3,00	2x10 <sup>4</sup>	5,0	373,0	11,8
<b>Granit</b>	2,7	4,75	3.7x10 <sup>4</sup>	18,5	818,0	25,8
<b>Nötr Kayaçlar</b>	2,75	2,00	1.8x10 <sup>4</sup>		340,0	10,8
<b>Bazalt</b>	3,0	0,60	8.4x10 <sup>3</sup>	2,7	120,5	3,8
<b>Eklojit</b>						
<b>Düşük U</b>	3,2	0,048	3.6x10 <sup>2</sup>	0,18	8,1	0,26
<b>Yüksek U</b>	3,2	0,25	2.6x10 <sup>3</sup>	0,45	34,3	1,09
<b>Peridotid</b>	3,2	0,015	6.3x10 <sup>1</sup>	0,05	2,26	0,072
<b>Dunit</b>	3,3	0,08	8	0,023	1,07	0,034
<b>Kondiyorit</b>	3,6		8.45x10 <sup>2</sup>		3,95	0,125

### 2.1.1.2 Rezervuar Kaya

Jeotermal sistemlerde rezervuar, ısının ekonomik olarak üretilebileceği yerkabuğunun sığ derinliklerinde bulunan kayaçların hacmi olarak tanımlanmaktadır. Bu kayaçlar tektonizma ve metamorfizma etkisiyle kırık-çatlaklı, geçirimli ve dolaşıma imkan veren özellikler kazanmışlardır. Bir rezervuarı bir ısı eşanjörü olarak düşünmek mümkündür. İyi bir rezervuar kayaç şu özelliklere sahip olmalıdır:

- ❖ **İyi bir kanal sistemi:** Yeraltı sularının, ısı kaynağına ulaşarak ısınabilmesi, ısınan akışkanın termal konveksiyon akımlarla taşınması,
- ❖ **Termal konveksiyon akımları:** Isınan akışkanın taşınması için gereklidir. Bunun için rezervuar kayaç içinde taban ve tavan arasında sıcaklık farkı çok az olmalıdır.
- ❖ **Açık gözeneklilik:** Sıcak akışkanın yeteri kadar depolanması, akışkanın kayaç içinde akabilmesi ve hidrolik iletkenlik katsayısının yüksek olması için birbiriyle bağlantısı olan gözenekler yüksek oranda olmalıdır.
- ❖ **Sığ rezervuar derinliği:** Yapılan sondajların ekonomik olabilmesi için gereklidir.
- ❖ **Akışkan miktarı:** Jeotermal sistemin uzun süre kullanımını sağlayacak miktarda akışkanın rezervuarda bulunması ve akışkanın kendini sürekli olarak yenilemesi.

Ülkemiz jeotermal sistemlerindeki jeotermal rezervuarları kökenine göre şu şekilde gruplamak mümkündür:

- a) Sedimanter Kökenli Rezervuarlar:** Traverten, kireçtaşı ve kumtaşından oluşurlar ve düşük üretilebilirliğe sahiptirler. Denizli-Kızıldere traverten, Aydın-Germencik konglemera olarak sedimanter kökenli rezervuarlara örnektirler.
- b) Magmatik Kökenli Rezervuarlar:** Granit (Rize-Ayder, Çanakkale-Kestanbol), ultrabazik (Balıkesir- Gönen), diyabaz, spilit (İzmir-Seferihisar), ignimbirit (Çanakkale-Tuzla), bazalt (Erzurum- Ilıca), andezit (Ankara – Kızılcahamam).
- c) Metamorfik Kökenli Rezervuarlar:** Bu gruptaki rezervuar kayaçlardan en önemlisi mermerdir. Türkiye’de en yaygın ve en çok bilinen rezervuar kayaç türüdür. Ayrıca gnayslar da Menderes masifindeki jeotermal bölgelerde rezervuar kayaç olarak gözlenmiştir (Şimşek ve Demir 1991)

### 2.1.1.3 Isıyı Taşıyan Akışkan

Yağan yağmur suları yeryüzündeki çatlak ve kırıklar ile süzülerek yerin derinliklerine kadar inmektedir. Burada bulunan fayların yardımıyla daha derinlerde bulunan magmanın içerisinde bulunan ısı süzülen suların aktığı veya depolandığı yerlere ulaşarak bu suları ıstırmaktadır. Bu yöntemle ısı taşıma işlemine konvektif (konveksiyon yoluyla) taşınma denmektedir (Şekil 2.2). Bazı nadir durumlarda okyanus suları veya magma oluşumu sırasında çekirdek yakınlarında bulunan sular da ısıyı taşıyan akışkan da olabilmektedir.

### 2.1.1.4 Örtü Kayaç

Rezervuar zonda depolanan akışkan ve ısının, enerjisini kaybetmemesi için bu zon ve/veya birimler üzerinde ısı ve akışkan kaybını önleyecek, örtü kayaç adı verilen geçirimsiz birimler olmalıdır. Örtü kayaç jeotermal rezervuarın üzerinde yer alarak burada oluşacak konveksiyonel ısı kayıplarını büyük ölçüde önler. Örtü kayaç ve rezervuar arasında kondüktif olarak ısı transferi yaşansa da bu durum rezervuarın sıcaklığını korumasına engel değildir. Örtü kayaç olmasaydı, konveksiyon akımı doğmayacak ve akışkanın ısı ve sıcaklığı yitirilecekti. Türkiye’de Neojen yaşlı sedimanter kayaçlar jeotermal kayaçların örtü kayacıdır. Kil, silt, tuf ve kumtaşları jeotermal sistemin örtü kayacı özelliğindedirler (Şimşek ve Demir 1991).



### **2.1.1.5 Geçirimsiz Temel**

Jeotermal sistemin önemli parçalarından biridir. Isı transferinin gerçekleştiği bölge olan bu kayaç tabakası aynı zamanda akışkanın tabandan kaçmasını veya sızmasını önemli ölçüde engeller bu sayede bir jeotermal sistemin örtü kayaç ile taban kayaç arasında hapsedilmiş kapalı bir sistem olmasını sağlar. Temel kayaç, genel olarak yerkabuğunun 2-5 km derinliklerindeki geçirimsiz metamorfik kayaçlarla volkanik kayaçlardan oluşmaktadır. Büyük litostatik basınç altında bulunan temel kayaç, sıkışma nedeniyle, oldukça geçirimsizdir. Ancak, kısmi çatlaklar doğabilir ve daha sonra kapanabilir. Temel kayaç içinde, kondüksiyon ısı iletimi egemendir.

### **2.1.1.6 Beslenme Alanı**

Jeotermal rezervuarlarda beslenme alanı olarak tabir edilen terim rezervuara dolan suyun nereden geldiğini tarif eden terimdir. Sağlıklı bir rezervuarın sürekli olarak beslenmesi gerekir ki bu rezervuardan sürekli olarak enerji üretimi yapılabilsin. Aksi takdirde ıstıyı taşıyıcı eleman olan suların eksilip tekrar yenilenmemesi gibi bir durum söz konusu olur. Bu durum zaman içerisinde kaynağın kurumusana ve aşağıdan çekilecek su kalmamasına sebebiyet verir. Jeotermal suların yaşları  $C_{13}$  ve trityum yöntemi ile tespit edilebilmektedir.

## **2.2 Jeotermal Sistemlerin Sınıflandırılması**

Jeotermal sistemler değişik şekillerde sınıflanabilir (Şahinci 1991):

- ❖ Rezervuar kayaçtaki akışkanın kökenine,
- ❖ Sistemlerin buldukları alanlara,
- ❖ Tektonik yapıya,
- ❖ Örtü kayaya,
- ❖ Sıcaklığa,
- ❖ Buhar veya sıcak su egemen oluşuna göre sınıflandırılabilir.

## 2.2.1 Rezervuar Kayaçtaki Akışkanın Kökenine Göre Sınıflama

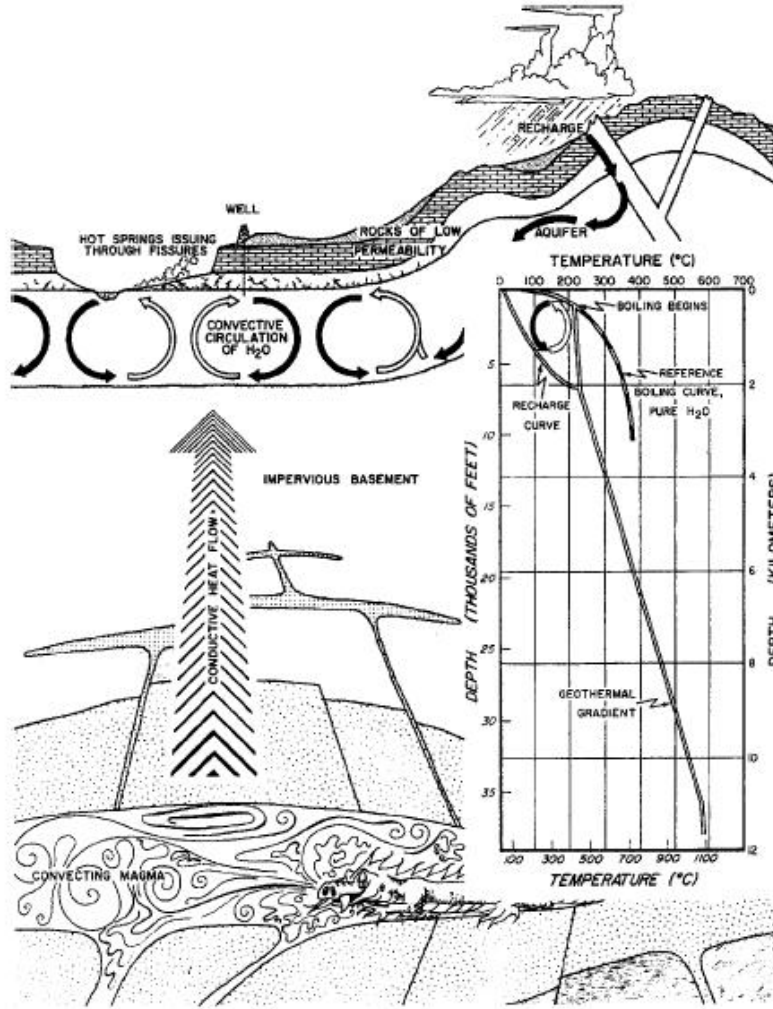
Jeotermal sistemlerin ortak özelliklerinin başında, içerdikleri akışkanın kökeni gelir. Buna göre, jeotermal sistemler magmatik, fosil (depo sistemi) ve meteorik (devirli sistem) kökenli akışkana sahip sistemler şeklinde sınıflanır.

## 2.2.2 Sıcaklıklarına Göre Sınıflandırma

Jeotermal sistemler, sıcaklıklarına göre değişik şekilde sınıflandırılabilir. Bu sınıflamalarda, yararlanma koşullarına, sıcaklıklarına ve ısı iletim şekillerine bağlı olarak tanımlanabilirler. Jeotermal sistemler, yararlanma yönünden verimli ve kısır bölgeler diye ayrılabilir. Verimli sistemlerin başlıca özelliği, gözenekli ve geçirgen bir rezervuar kayacın bulunmasıdır. Başka bir ifadeyle, günümüz teknolojisi ile ısı enerjisinden yararlanılan bölgelerdir. Kısır sistemlerde ise, jeotermal gradyan yüksek olmasına karşın, gözenekli ve geçirgen bir rezervuar kayacın bulunmaması sonucu, enerji yönünden, şimdilik yararlanılmayan alanlardır. Örneğin, Meksika'daki Pathe bölgesinde, 3500 Kw bir enerji düşünülürken, rezervuar kayacın çok az geçirgen oluşu nedeniyle 150 Kw'lık tesisler kurulabilmiştir. Bu örnekteki alana az verimli termal yöreler demek daha uygundur. Verimli ve kısır sistemler, sıcaklıklarına göre şöyle sınıflanabilir:

- ❖ **Termal olmayan sistemler:** Bu gibi bölgelerde her kilometrede jeotermal gradyan  $10^{\circ}\text{C}$ - $40^{\circ}\text{C}$  arasındadır.
- ❖ **Semitermal sistemler:** Jeotermal gradyan, her kilometrede, yaklaşık  $70^{\circ}\text{C}$  civarında olan yörelerdir.
- ❖ **Hipertermal sistemler:** Jeotermal gradyan, termal olmayan alanlardan birkaç kez daha fazladır. Bu alanlarda, jeotermal gradyan değerleri çok farklı olabilir. Bazı bölgelerde, kilometrelere göre sıcaklık artışı izlenirken, diğer özel koşullara sahip yörelerde ise, sıcaklık yükselişleri birkaç santimetrede gözlenebilir. Örneğin, Kanarya adalarında bulunan Lanzarto yöresinde, 8-10 cm derinlikte parmağın yanması mümkündür. Hipertermal alanlar, sıcak su egemen ve buhar egemen sistemler diye ikiye ayrılır.

a) **Sıcak Su Egemen Sistemler:** Sıcak su egemen jeotermal alanlarda, konveksiyon akımları suyun yardımıyla derin ısı kaynağından sığ rezervuara ısı taşırlar. Konvektif hücrenin tabanı sıcak kayalardan kondüksiyonla ısınmaktadır. Sıcak su jeotermal alanların jeolojisi olağan yer altı suyu sistemine oldukça benzemektedir. Sıcak su jeotermal alanları basınç kontrollü sıvı faz içermesi nedeniyle buhar egemen alanlardan farklı bir özelliğe sahiptirler. Rezervuar sıcaklığı 60°C ile 100°C arasında değişmekte ve 1500m ile 3000m derinliklerinde oluşmaktadır. Jeotermal gradyan ve rezervuar derinliği konvektif akımların korunması için yeterliyse, sıcak su egemen alanlar örtü kayaç olmaksızın gelişebilmektedir (Şekil 2.2). Bu tür alanlarda, rezervuarın üst bölümü atmosferik basınçta kaynama noktasını aşamaz, konvektif yükselimle birlikte su basınç kaybeder ve soğuk suyla karışır.



Şekil 2.2 Sıcak su egemen sistemlerin kavramsal modeli (Gupta ve Roy 2007).

Rezervuarın sıcaklığı, kimyası ve yapısına bağlı olarak sıcak su egemen sistemler alt gruplara ayrılmaktadır.

- a) **Düşük-orta sıcaklıklı sistemler (50 °C-150 °C):** Kimyasal bileşimleri bölgesel yüzey ve sığ yer altı sularına benzerlik göstermektedir.
- b) **Kısmen meteorik olmayan suyla karakterize edilen sistemler:** Bu sistemler sedimanter havzalarda oluşurlar.
- c) **Yüksek tuzluluğa sahip deniz suyuyla karakterize edilen sistemler:** Kimyasal bileşim bölgeden bölgeye değişir. Salton Denizi (Kaliforniya) ve Kızıl Deniz alanları bu sistemde oluşmuştur. Oldukça farklı sediman ve kayaç kimyasına sahiptir ve buna deniz suyu bileşimindeki farklılık neden olmaktadır.
- d) **Doğal örtü kayaçla karakterize edilen sistemler:** Cerro Prieto (Meksika) ve Salton Denizi (Kaliforniya)'daki jeotermal alanlar ince taneli ve düşük permeabiliteli örtü kayaçları içerirler.
- e) **Kendilerine ait örtü kayaçların oluşumuyla karakterize edilen sistemler:** Bu gruptaki örtü kayaçları kimyasal alterasyon ve sıcaklığın aniden düştüğü yüzeye yakın sedimanların çökmesiyle oluşmaktadır. Wairekei (Yeni Zelanda) ve Yellowstone Park (Wyoming) bu gruba tipik örneklerdir.

Sıcak su egemen sistemlerde, akışkanı basınç denetler. Basıncın azaldığı yüzeye yakın derinliklerde bir miktar buhar oluşabilir. Sıcak su egemen sistemler üçe ayrılır:

- ❖ Yüksek sıcaklıklı sistemler: Rezervuar kayaç sıcaklığı 150 °C'den fazla,
- ❖ Orta sıcaklıklı sistemler: Rezervuar kayaç sıcaklığı 150 °C-90° C arası,
- ❖ Düşük sıcaklıklı sistemler: Rezervuar kayaç sıcaklığı 90 °C'den az olanlardır.

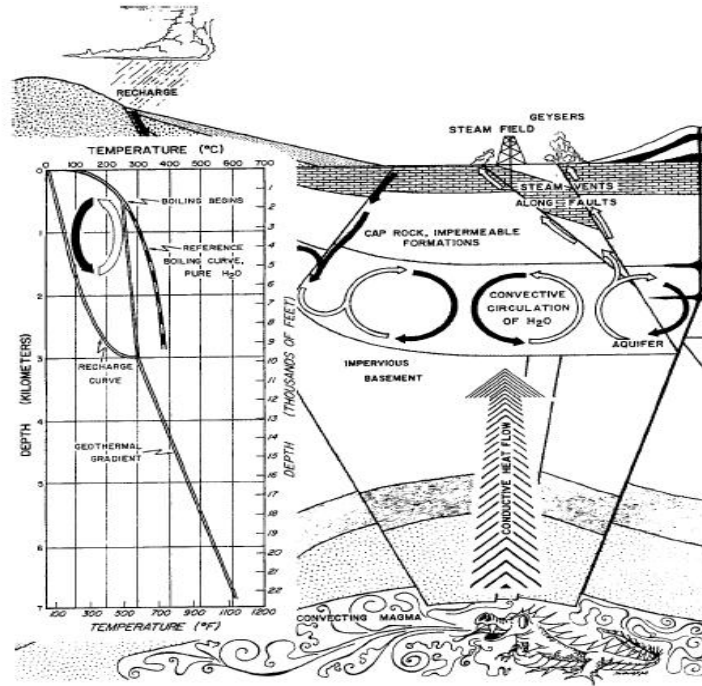
**b) Buhar Egemen Sistemler:** Günümüzde işletilen jeotermal sistemlerin büyük bir bölümü yüksek basınç ve 100°C'nin üzerinde sıcaklığa sahip su içermektedir. Bu su yüzeye ulaştığında, basınç gözle görülür derecede azalarak, buhar ve su+buhar bakımından doymuş akışkan üretilir. Buharın suya oranı bölgeden bölgeye değişim göstermektedir. En iyi bilinen jeotermal alanlar Cerro Prieto (Meksika), Wairakei (Yeni Zelanda), Reykjavik (İzlanda), Salton Denizi (ABD) ve Otaka (Japonya)'dır. Sulu buhar üretildiği için, bu bölgeler ıslak buhar alanları olarak bilinmektedir. Ayrıca

Larderello (İtalya) ve Gayzer (ABD) gibi bazı önemli bölgelerde ise sıvı faz içermeyen süper ısı buhar üretilmekte olup, bu bölgeler kuru buhar alanları olarak bilinmektedir. Daha önceden belirtilen ön koşullara ilaveten kuru veya ıslak buhar alanlar için temel gereksinimler yeterli su girişidir (Şekil 2.3).

Buhar egemen jeotermal alanlar genç volkanizma (Miyosen-Kuvaterner) bölgelerinde bulunmakta olup, bu alanların bazıları ısı kaynağı magma olan volkanlara yakın veya volkanların üzerinde yer almaktadırlar. Kuvaterner yükseltisi, Geç Tersiyer ve Kuvaterner çöküntü alanları sığ magmatik sokulumların işaretidir. Sıcak rezervuarın oluşabilmesi için, magmanın gözenekli ve geçirgen, suyca doymuş kayaçların içine sokulması gerekmektedir. Rezervuar içinde ısı değişimi için, sıcak su ve/veya buhar konveksiyonel akımları gerçekleşmekte ve rezervuarın alt ve üstündeki sıcaklık farkı çok belirgin değildir. Değişik kayaç türleri iyi bir rezervuar olabilmektedir. Larderello (İtalya)'da kırılmalı kireçtaşı ve dolomit, Gayzer (ABD)'de çatlaklı grovak, Wairekei (Yeni Zelanda)'da pumisli breş ve tuf gibi. İyi rezervuarlar jeolojik uyumsuzluk ve formasyon sınırlarında oluşurlar, geçirgen özelliktedir, iyi bir hidrolik akıcılığa ve su girişine sahiptir. Rezervuarı üzerleyen geçirimsiz örtü kayaç veya düşük geçirimli örtü kayaç, sıcak akışkanın konveksiyonla kaçışını önlemektedir. Örtü kayaç kondüksiyonla ısı kaybını engelleyemez. Fakat konveksiyonel ısı kaybına göre kondüksiyonel ısı kaybı oranı daha düşüktür. Volkanizma çatlak oluşumuna neden olan tektonik hareketlerle ilişkili olduğu için, ideal kırılmı ve geçirimsiz örtü kayaç hiçbir jeotermal alanda bulunmamaktadır.

### **c) Kızgın Kuru Kaya (KKK) Jeotermal Sistemler**

Jeolojik özellikleri nedeniyle akışkan içermeyen, zayıf geçirgenliğe sahip yüksek sıcaklıklı kayaçlar kızgın kuru kaya jeotermal sistemler (HDR) olarak adlandırılmaktadır. Doğal çatlak ve permeabilitesi içeren ancak ekonomik miktarda akışkan içermeyen sistemler ise “Geliştirilebilir Jeotermal Sistemler” (Enhanced Geothermal Systems) olarak adlandırılır. Bunlara da kısaca GJS sistemleri denilmektedir. Bu iki tanımlama birbirine yakın sistem tanımlamaları olup, tek fark tanımlanan kayaç tipidir.



Şekil 2.3 Buhar egemen sistemlerin kavramsal modeli (Gupta ve Roy 2007).

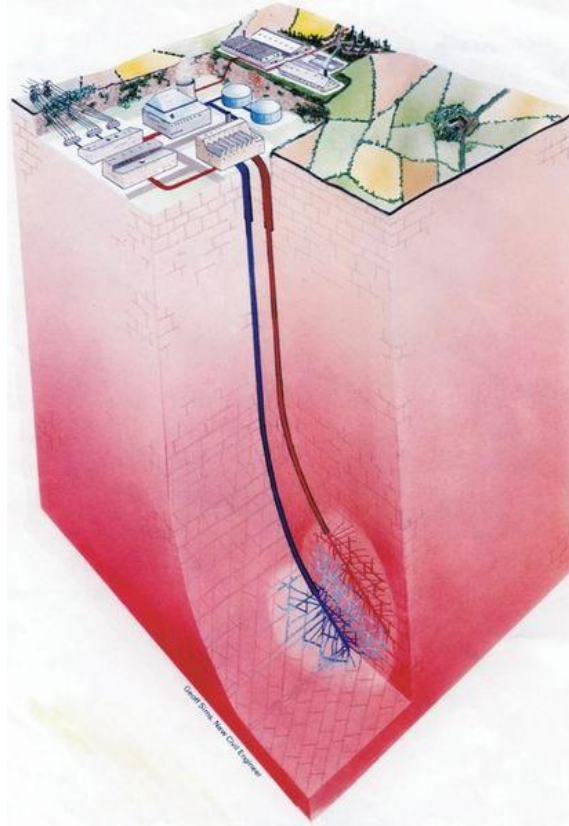
HDR sistemlerinde kayaç tipi magmatik genellikle granitik kayalar iken, GJS sistemlerinde kayaç tipi sedimanter basen tipi kayalardır. Son zamanlarda GJS sistemleri her ikisini de kapsayacak bir terim olarak da kullanılmaktadır (Burçak 2012).

Yüksek sıcaklıklı kayaların büyük hacimleri önemli jeotermal alanların altında bulunmaktadır. Yerkabuğunun sığ seviyelerindeki jeolojik olarak genç magmatik sokulumlar bu enerji türü için potansiyel hedef bölgeleridir. Bu jeotermal sistemler için üç sorunun cevaplanması gerekmektedir: Bunlar; ne kadar derin? ne kadar sıcak? ve ne kadar kuru? ABD Enerji Araştırma ve Geliştirme Bakanlığı Raporu'na göre bu soru şu şekilde cevaplandırılmıştır: “Yerkabuğunun 10 km derinliğindeki kayalarda depolanan sıcaklığı 650 °C’den düşük olan ısıdır ve ekonomik olarak bu kayaktan doğal sıcak su veya buhar üretmek mümkün değildir.”

Kızgın kuru kaya jeotermal kaynakların ısı kaynakları ortamlara ve derinliklerine göre alt gruplara ayrılmaktadır. Bunlar; (1) Magmayla ilişkili ısı: Magmadan veya magma intrüzyonunun çevresindeki kuru kayalardan yayılan ısı, (2): Üst Mantoyla ilişkili ısı: Kondüksiyonla kabuğun sığ seviyelerine ve üst mantonun üzerine yayılan ısı, (3):

Lokal ısı: Yersel olarak ya radyoaktif minerallerin yüksek konsantrasyonu veya büyük ölçekli faylanma ve/veya kırılgenlikle oluşan ısı. Bu sınıflamayla ilişkili olarak ısı kaynakları oluşturacak ortamlar şu şekildedir; (1): Güncel volkanizma, (2): Yüksek ısı akısı ve (3): Lokal radyometrik ısı kaynakları.

Kızgın kuru kaya teknolojisi yüksek sıcaklıkta ve geçirimsiz kayalardaki yer ısısının yerin derin bölümlerinde yapay yolla kırık sisteminin oluşturulması ve sondaj kuyuları boyunca enjekte edilen suyun başka bir kuyuyla üretilmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 2.4). Yeni çatlaklar ve geçirimli ortam oluşturabilmek için yüksek basınçlı suyun rezervuara basılması şeklinde tanımlanan hidrolik kırılgenlik derinlerdeki kayalarda geçirgenliği sağlamak için başarıyla uygulanan bir yöntemdir. 1km<sup>3</sup> hacmindeki kızgın kayacın sıcaklığı 100°C'ye düşürülerek, 30 yıl boyunca 30 MWe jeotermal enerjiyi üretilabileceği tahmin edilmektedir (Rummel 2005). Fakat derinlikteki büyük ısı eşanjörlerinin kurulması ve sirkülasyon sıvısı kaybının kontrol edilmesi kızgın kuru kaya enerjisinin üretilmesinde en büyük keşifler olarak düşünülmektedir.



Şekil 2.4 Kızgın kuru kaya sistemi.

### 2.2.3 Örtü Kayaçlara Göre Sınıflama

Jeotermal sistemler, doğal örtü kayalarının bulunup bulunmayışına göre sınıflanabilir. Örtü kayaç, sıcak akışkanların yüzeye boşalmalarını ve ısı kayıplarını önler. Salton Sea (Kaliforniya) ve Cerro Prieto (Meksika) örtü kayaları ince taneli geçirimsiz tortul kayaçlardan, Kızıldere'de ise, örtü kayaç marn kumtaşından meydana gelmiştir. Bazı sistemlerde örtü kayaç bulunmaz, sıcak sular örtü kayacı kendileri oluşturur. Örtü kayacın bulunmayışı, yüzeye yakın kısımlarda sıcaklık ve basıncın düşmesi sonucu, sudaki bazı tuzların yarık, çatlak ve kırıklara çökelerek tıkanmasına neden olurlar. Böylece, geçirimsiz örtü kayacı zaman içinde sıcak sular oluşturur. Bu tip sistemlere örnek olarak Wairakei (Yeni Zelanda) ve Yellowstone (ABD) gayzerleridir.

### 2.2.4 Jeolojik Yapıya Göre Sınıflama

Jeotermal sistemler jeolojik açıdan şöyle sınıflanabilir:

1. Kuvaterner volkanizması ile ilgili sistemler
  - a) Yapısal durum, volkanlar tarafından oluşturulmuştur: Kalderalar, yay şekilli kırıklar, dom
  - b) Tektonik etkenlerle oluşan yapılar: Blok faylar, bölgesel kırıklar.
2. Senozoyik tektoniğine bağlı sistemler
  - a) İç bölgelerde blok faylanmalarına bağlı sistemler
  - b) Rift zonlarına rastlayan sistemler
  - c) Kıta içi havza sistemleri
3. Kıyı ve platform bölgelerinde izlenen sistemler

Genç volkanizmaya bağlı sistemler, bazaltik akıntılardan çok, andezit, dasit, riyolit, ignimbrit gibi akıntıların bulunduğu bölgelerde izlenir. Japonya, Nikaragua, Endonezya gibi birçok ülkelerde, jeotermal sistemler volkanlara bağlıdır. Tektonik hareketlerle oluşan sistemler blok faylanmalar, graben sistemleri veya rift ovalarında izlenir. Fakat, özel bir volkanik merkezlerle ilişkileri gözlenmez. Özellikle, blok faylanmaların keşiştiği yöreler, bu sistemlerin gelişmesine uygundur. Yeni Zelanda, Batı Anadolu



jeotermal alanlarının büyük bir kısmı graben sistemleri üzerinde bulunur. Kıta içi havza jeotermal sistemlerinin oluşumunu radyoaktif maddelerin bozunumu, kimyasal tepkimelere ve Moho'nun yeryüzüne yakın olması gibi nedenler etkileyebilir. Bu sisteme örnek Rus stepleri, Macaristan ve Paris tortul havzalarıdır.

### **2.2.5 Isı İletim ve Magmatik Özelliğe Göre Sınıflama**

Jeotermal sistemleri geniş ölçekte hidrotermal konveksiyon, sıcak magmatik ve kondüksiyon ısı iletimi egemen sistemler diye üç grupta toplamak mümkündür. Hidrotermal konveksiyon sisteme, yukarıda açıklanan sıcak su ve buhar egemen sistemler girer. Sıcak magmatik sistem, iki alt sisteme ayrılır. Birincisi, genellikle 10 km'den fazla derinlerde, 650°C'den fazla sıcaklıktaki ergimiş magma sistemidir. Günümüz teknolojik koşulları ile, bu enerjiden yararlanmak, şimdilik mümkün değildir. İkincisi, katı, sıcak magma veya sıcak kuru kaya sistemi, 650°C'den az sıcaklıktadır. Bu sistem, hipertermal kısır bölgelere karşılık gelmektedir. Genel olarak, sıcak kuru kaya sistemlerinde rezervuar kayaç geliştirilerek enerji üretmek mümkündür (klasik veya nükleer patlayıcılarla yapay rezervuar kayaç oluşturulması gibi). Kondüksiyon ısı iletimi egemen sistemler, 15°C-300°C arasında, yer kabuğunun geniş bir alanını kapsayan, geçirimsiz tortul havzalarda ve volkanik arazilerde gözlenir.

### **2.3 Kızgın Kuru Kaya (KKK) ve Geliştirilmiş Jeotermal Sistemler (GJS)**

Jeolojik özellikleri nedeniyle akışkan içermeyen, zayıf geçirgenliğe sahip, yüksek sıcaklıklı kayaçlar Kızgın Kuru Kaya Jeotermal Sistemler (KKK) olarak adlandırılmaktadır. Doğal çatlak ve permeabilitesi içeren ancak ekonomik miktarda akışkan içermeyen sistemler ise Geliştirilebilir Jeotermal Sistemler (GJS) olarak adlandırılır. Bu iki tanımlama birbirine yakın sistem tanımlamaları olup, tek fark tanımlanan kayaç tipidir. KKK sistemlerinde kayaç tipi magmatik genellikle granitik kayaçlar iken, EGS sistemlerinde kayaç tipi sedimanter basen tipi kayaçlardır. Son zamanlarda EGS sistemleri her ikisini de kapsayacak bir terim olarak da kullanılmaktadır (Burçak 2012).

Jeotermal sistemlerde üretim ve reenjeksiyon için açılan kuyular sistemin çalışması ve enerji üretimi için yeterli olurken, KKK ve GJS sistemlerde bu kuyulara ek olarak çatlatma operasyonlarının da yapılması gerekmektedir. Çatlatma operasyonları yapay rezervuar geliştirilmesi için en yaygın yöntemdir. Çatlatma operasyonuna bağlı olarak bazı ek çalışmalarda sistemin düzgün çalışması açısından, çatlatma operasyonun öncesinden ve ardından yürütülür. Çatlak izlenmesi, kaçağın tespiti ve doldurulması, çatlak uyarma (stimulation), çatlak açık tutma gibi çalışmalar bunlara örnek verilebilir. Teknolojinin gelişmesi bu yöntemlerin çeşitlenmesine ve ilerlemesinde yardım etmektedir.

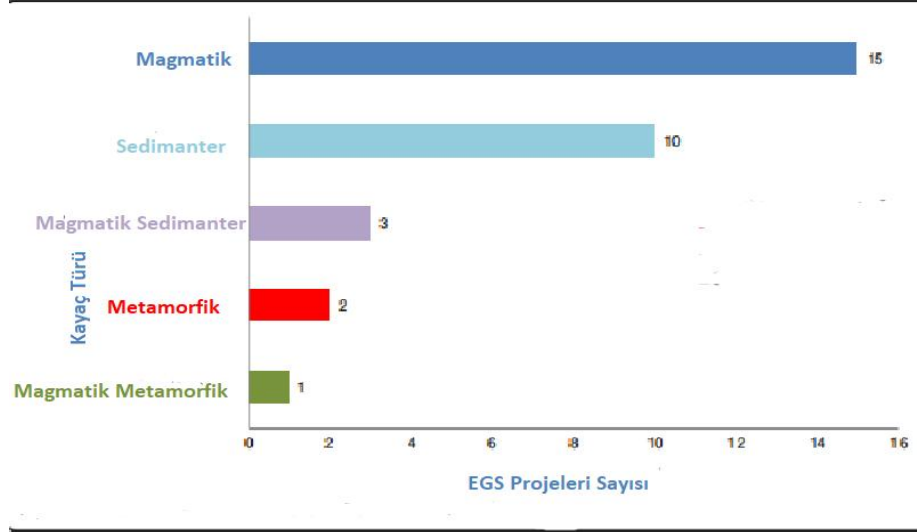
Yapay jeotermal sistemlerin oluşturulmasında yöntemler kadar önemli olan bir diğer unsurda bölgenin jeolojisi ve çatlatma yapılacak kayacın petrografik yapısıdır. Hem çatlatma yöntemlerinin seçiminde, yöntemin uygulanmasında ve kaynağın sürdürülmesinde jeolojik yapının bilinmesinin önemi çok fazladır. Bu yüzden kaynağa ulaşmadan ve ulaştıktan sonra yapılacak jeofiziksel uygulamalarla mevcut ve sonradan oluşan jeolojik yapı dikkatli bir şekilde izlenmelidir.

#### **2.4 KKK ve GJS Sistemlerin Jeolojik Özellikleri**

GJS çok çeşitli jeolojik ortamlarda tasarlanabilir ve geliştirilmektedir. İzlanda gibi volkanik ortamlar (Axelsson, Th'orhallson ve Björnsson 2006), örneğin Larderello (İtalya) gibi metamorfik ortamlar (Bertini vd. 2005) Soultz, Fransa'daki derin granitler gibi magmatik sistemler, (Hettkamp vd. 2004); veya Groß Schüonebeck, Almanya gibi tortul ortamlar (Zimmermann vd. 2009); veya Horstberg, Almanya, (Orzol vd. 2005).

Çeşitli kayalardan ve değişik jeolojik içeriklerden oluşabilen KKK ve GJS sistemlerin her biri, sıcaklık rejimi, rezervuar karmaşıklığının derecesi, stres alanının etkisi ve önemi, yapısal özellikler, litolojik değişkenlik, gözenekliliğin ve geçirgenliğin tip değeri ve dağılımı, doğal kırılmanın kapsamı ve biçimi açısından kendi özelliklerine sahiptir (Huenges 2010).

Her ne kadar GJS ve KKK sistemlerin ağırlıklı olarak magmatik kayalardan oluştuğu bilinse de diğer kayaç türleri ve özellikle sedimanlar içerisinde de ısının hapsediği birçok kaya kütleli bulunmaktadır. 2013 yılında yapılan GJS ve KKK kaynakların genel kriterlere göre sınıflandırılmasının yapıldığı bir çalışmada GJS ve KKK çalışmalarının taban kayasına göre sınıflandırılması Şekil 'de verilmiştir.



Şekil 2.5 Geçirimsiz temel türüne göre GJS sistemlerinin dağılımı (A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future 2013).

KKK jeotermal sistemlerinde kayaç tipi magmatik genellikle granit tipi kayalar iken, GJS'nde kayaç tipi sedimanter basen tipi kayalardır. Taban kayası veya rezervuar kayaç yapısının dışında KKK ve GJS sistemlerin buldukları alanın jeolojisi de bu oluşum için kritik derecede önemlidir. KKK ve GJS alanları için uygun ortamlar magmatik ve tektonik hareketliliğin olduğu ortamlar şeklinde tanımlanabilir. KKK ve GJS için ideal jeolojik ortamlar aşağıda verilmiştir.

- ❖ Plaka sınırları
- ❖ Kıtasal rift
- ❖ Kabuk incelmesinin olduğu yerler
- ❖ Stratovolkanların çevresi
- ❖ Granitler ve Derin kökleri
- ❖ Radyoaktif Bozuşmalar

## **2.5 KKK ve GJS Sistemlerin Araştırılması**

KKK ve GJS sistemlerinin araştırılmasına yönelik çalışmalar dört aşamada yürütülmektedir. Birinci aşama çalışmaları KKK ve GJS öncesi etüt ve araştırma çalışmalarını, ikinci aşama sondajlar test ve geliştirme çalışmalarını, hidrolik kırık oluşturulmasını. Üçüncü aşama hidrolik kırıkların oluşma durumu ve yerinin belirlenmesi için ikinci sondajdan itibaren her sondajda yapılan detay etüt ve araştırmaların tekrar edilmesi ve yorumlanması. Son aşama ise ısı transferi sağlayacak akışkanın enjeksiyonu ve üretim test çalışmalarını kapsamaktadır (Burçak 2012).

### **2.5.1 KKK ve GJS Öncesi Çalışmaları**

Projenin bu aşaması, KKK ve GJS çalışmalarının yürütüleceği hedef bölgenin belirlenmesi için gerekli jeolojik, jeokimyasal ve jeofizik çalışmaları kapsamaktadır.

#### **2.5.1.1 Jeolojik Araştırmalar**

Jeolojik araştırmalar kapsamına bölgenin fay yapısı, bölgede bulunan kayaç tabakalanması, stratigrafi ve mineraolojik, petrograif incelemeler girer. Bu araştırmalar sayesinde bölgenin jeolojik geçmişi ve muhtemel potansiyelini benzer kaynak alanlarla kıyaslamak mümkün olabilmektedir. Daha detaylı jeolojik çalışmalar sayesinde bölgenin tektonik yapısına ulaşıp muhtemel beslenme ve ısınma alanları ile rezervuar bölgelerini de tahmin edebilmek mümkündür.

#### **2.5.1.2 Jeokimyasal Araştırmalar**

Bu bölümdeki çalışmalar kayaç ve su örneklerinde gerçekleştirilen analizlerle, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve <sup>222</sup>Rn gibi toprak gazı ölçümlerini kapsamaktadır. Yüze ve yeraltından (karot) örnekleri üzerinde yapılacak hidrotermal alterasyon amaçlı X-ışınları kırınımı (XRD) ve X-ışınları flüoresans (XRF) analizleri ile kayaçların KKK ve GJS öncesi kimyasal bileşimleri belirlenerek, KKK ve GJS sonrası kayaçta oluşturulan kırıklaşma

sonrasında ısı transferini sağlayan akışkanların yer altında meydana getirdiği değişimler izlenmektedir.

Hidrojeokimya çalışmaları yüzey ve yer altı sularının kimyasal analizleri ve izotop analizlerini kapsamaktadır. KKK ve GJS sisteminde ısı transferi yapmak üzere reenjekte edilecek suların reenjeksiyon öncesi ve sonrası kimyasal ve izotopik analizleri yapılarak, KKK ve GJS sistemlerine basıldıktan sonra yer altında kazandığı kimyasal değişimler gözlemlenmektedir.

Çalışma alanında Radon, Uranyum, Toryum, Karbondioksit, Metan gaz gibi toprak gazları da sistematik olarak ölçülerek sonuçlar kaydedilmektedir.

### **2.5.1.3 Jeofizik Araştırmalar**

Bu çalışmalar ile bölgesel jeolojik çalışmalar birlikte yürütülür. Jeofizik araştırmalar, rezervuar kayacın yerini, derinliğini ve uzanımını, örtü kayacın kalınlığını ve rezervuar kayaç içindeki sıcak odak noktalarını, üretim alanının sınırlarını ve jeotermal sistemin genel özelliklerini saptayarak, bunların düşey ve yatay uzanımlarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır (Şener vd. 1986, Georgsson 2009).

Bölgesel jeofizik Bouguer gravite haritaları ve havadan manyetik anomali haritaları, jeolojik veriler ile karşılaştırılarak bölgesel yapıların derinlerdeki fiziksel yansımaları anlamlandırılır. Gravite ve manyetik verilerden bölgesel ölçekli kaldera, fay, muhtemel derin alterasyon alanları belirlenerek saha hakkında bölgesel veriler toplanır. Doğrudan ve dolaylı yöntemlerle hesaplanan ısı akısı sonuçları çeşitli bölgelerin jeotermal potansiyellerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

İnceleme alanında Gamma-ray spektrometre cihazı ile uranyum, toryum, potasyum ve toplam radyoaktivite ölçüleri alınarak sonuçlar kaydedilerek değerlendirilir. Ayrıca kırıklar oluşturulmadan önceki gravite ve manyetizma değerlerinin bilinmesi önemlidir. Bunun için mikrogravite ve manyetometre cihazları kullanılarak ölçümler yapılır.

Sonuçlar kaydedilerek değerlendirilir. Alanda kırıklar oluşturulmadan önceki SP değerleri detay nokta uzaklığında SP alınarak kaydedilir.

Jeotermal sahalarda ısı kaynağı araştırmalarında kullanılan diğer bir jeofizik yöntem de Manyetotellürik (MT) yöntemidir. Bu yöntem hidrotermal jeotermal saha araştırmalarında yaygın bir biçimde kullanıldığı gibi, HDR ve EGS sistemlerinin araştırılmasında da tercih edilen bir yöntemdir.

#### **2.5.1.4 Hedef Bölge Seçimi**

KKK ve GJS sistemleri için hedef bölge seçiminde aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmaktadır (Brown vd. 2012).

- a) Lojistik olarak uygun lokasyonda olmalı: Ulaşım, su ve elektrik temini bakımından...
- b) Bölgenin tektonik açıdan sakin olması
- c) Rezervuar derinliğinde uygun kayaç tipi: Genellikle kristalin temel kayaç uygundur. Rezervuar için uygun çatlak yapısına sahip olmalıdır.
- d) Uygun jeotermal gradyan: En az 150m derinliğindeki araştırma sondajlarında belirlenen jeotermal gradyan minimum 40°C/km olmalıdır.
- e) Rezervuar kayacın mekanik ve akustik özellikleri ve termal iletkenliğinin bilinmesi gerekir.

Projenin uygulanacağı derinlikte açık çatlak sistemi içeren kristalin kayaçlar veya metamorfik kayaçlar bulunmalıdır. Kayaç oldukça düşük başlangıç porozite ve permeabilitesi sunmalıdır. Kuyular 3400-4900m derinliğinde olmalıdır. Kuyu derinlikleri; (1): Ticari açıdan uygun sıcaklık sunmalı, (2): Rezervuar özelliğindeki kayaç düşük gözeneklilik ve permeabilite özelliklerinde olmalıdır.

#### **2.5.2 KKK ve GJS Çalışmaları**

Bir önceki çalışma sonuçları değerlendirilerek belirlenen hedef bölgede aşağıdaki çalışmalar yapılmaktadır.

### 2.5.2.1 Sığ Derinlik Gradyan Sondajları

Tüm veriler dikkate alınarak yer altı gradyan artışının belirlenmesi ve yüksek ısı alanların saptanması amacıyla 100-200 m derinlikte gradyan sondajları açılmaktadır. Gradyan sondajları jeotermal araştırma yapılan sahalarda derin arama sondajları yapılmadan önce uygulanan araştırma yöntemidir. Jeoloji, jeokimya ve jeofizik çalışmalar sonucu tespit edilecek lokasyonlarda gradyan sondajlarının yapılış amaçları aşağıda sıralanmıştır (Gevrek 1991, Ngugi 2008):

- a) Sığ derinlikteki sıcaklık koşullarını onaylamak,
- b) Termal anomalinin yanal ve düşey dağılımını belirlemek,
- c) Sığ rezervuardaki kırık modelini göstermek,
- d) Üretim testlerini yürütmek,
- e) Litostratigrafiyi belirlemek.
- f) Sondajla elde edilen sıcak suların jeokimyasal analizlerini yapmak,
- g) Karot ve kırıntılardan, hidrotermal alterasyon ve sıvı kapanımı çalışmaları yaparak jeotermal sistemin evrimini (ısınmakta veya soğutmakta olduğunu) ortaya çıkarmak,
- h) Eş sıcaklık haritalarının oluşturulması: 150, 200 ve 250 °C sıcaklıkları için, derinlik sabit sıcaklıklar değişken veya sıcaklıklar sabit derinlik değişken olabilir.

### 2.5.2.2 Derin KKK ve GJS Sondajları

Araştırmalar sonucu belirlenen bölgelerde 2500 metreden başlayıp 6000 metreye kadar ulaşabilen sondajlar açılarak kızgın kuru kaya jeotermal sistemine ulaşılır. Bundan sonraki aşama olarak bölgenin hidrolik olarak çatlatılmasına geçilir. Hidrolik çatlak oluşturma çalışmaları sona erdikten sonra bölgedeki çatlak ağının yapısına bağlı olarak çeşitli bölgelere benzer derinlerde üretim kuyuları açılır. Yapay olarak oluşturulan kuyularda test üretimleri yapılarak çatlak ve kaçaklar tespit edilir ve saha sonra gerekli kapatma ve sıva işlemleri de kuyulara yakın bölgelerde yapılır. Bu bölümde yürütülen çalışmaların detayları aşağıda verilmiştir.

**a) Karotlar Üzerinde Yapılan Analiz ve Testler:** Sondaj esnasında karot örnekleri alınarak kimyasal analiz, yoğunluk, manyetik süseptibilite, üç eksenli basınç, kırılabilirlik ve termal iletkenlik gibi tam teknolojik testlerin yapılması gerekmektedir.

**b) Kuyu Log Ölçüleri:** Hidrolik çatlatma öncesi sığ rezervuarlarda, casing arkası için sonik ve yoğunluk loğları, deriz zon için tüm log ölçülerinin alınması gerekmektedir.

**c) Yeni Kırık Oluşturma (KKK) ve Rezervuar Geliştirme (GJS) Çalışmaları:** KKK ve GJS sistemlerini birbirinden ayıran en önemli fark kayaç türü olup, KKK sistemleri kırık ve çatlak içermeyen granitik türde kayaçlarda, GJS sistemleri ise sedimanter basen dolgusu tipinde gözenekli ancak yeterli porozite ve permeabilite gelişmemiş kayaçlarda geliştirilen sistemlerdir. KKK sisteminde tamamen yeni kırık oluşturulması, GJS sisteminde ise var ancak yetersiz olan gözeneklilik ve kırıkların geliştirilmesi ve/veya yeni kırık oluşturulması söz konusudur.

**I-Enjeksiyon Kuyusu Açılması:** Enjeksiyon kuyusu elektrik enerjisi için yeterli sıcaklığa sahip derinliğe ve düşey olarak açılmalıdır. Çünkü stimülasyon öncesi basınç stimülasyon yönü, çatlakların açılmasını ve genişlemesini sağlayacak basınç ve çatlakların akış yolları gibi rezervuar özellikleriyle ilgili çok az bilgi mevcuttur. Enjeksiyon kuyusunun yüzeyden itibaren ilk 300m'lik bölümü kuyunun sığ basıncını izole etmek için çimentolanmalıdır. Daha sonra scab liner'ın üzerinden yüzeye doğru yüksek basınç boruları yerleştirilir. Enjeksiyon kuyusundan yüksek basınçla soğuk su veya gaz (azot) basılarak kuyunun soğuması ve büzüşerek çatlaması sağlanır. Burada çatlamayı uygulanan hidrolik basıncın yanı sıra soğuma etkisiyle kayacın büzüşmeye çalışması sağlamaktadır. Bu operasyonlar için yüksek basınçlı (10.000-15.000 psi) çatlatma pompası (fracture pumps) gerekmektedir.

**II-Başlangıç Basınç Testleri:** Enjeksiyon kuyusunun tamamlanmasını takiben derin kayaç kütesine yüksek basınç testi uygulanır. Bu test HDR rezervuar oluşturma planlaması için esas teşkil oluşturacak verilerin toplanmasını sağlar. Kasılmış mini çatlak motoru (max. akış oranı 5BPM) ve süper araçlar aşağıda listelenen verileri üretirler (Brown vd. 2012):



- ❖ Oldukça düşük enjeksiyon oranı ve kontrollü basınçta kayaç kütlelerinin permeabilitesi
- ❖ Yönlü çatlakların sıvıları aldığı basınç seviyesinde başlangıç formasyon kırılma basıncı
- ❖ Kavuşmaz çatlak-genişleme basıncı
- ❖ Açık fayların varlığı
- ❖ Schlumberger FMI logları öncesi ve sonrası sıvı kabul eden çatlakların yönü

KKK ve GJS sistemleri konusundaki ilksel çalışmalarda kayaç mekaniğinin termal ve hidrolik etkisi üzerinde durulmuş, stres değişimi ile çatlakların açılarak genişlemesi esas alınmıştır. Son zamanlarda kayaç ve akışkan arasında kimyasal reaksiyonların EGS rezervuar geliştirilmesinde önemli rol oynadığı ortaya konmuştur (Durst 2002, Bächler 2003, Xu ve Pruess 2004, Rabemanana vd. 2005, André vd. 2006). Su yüksek sıcaklıklarda kayaç mineralleri için iyi bir çözücüdür. Yapay olarak oluşturulan su sirkülasyonu güçlü çözülme ve kabuklaşmalara neden olabilmektedir. Bu durum formasyonun tıkanmasına ve suyun daha sığ seviyelerden döngü yapmasına neden olmaktadır. Bu durum operasyon sırasında kaçınılmaz akışkan kayıplarına neden olmaktadır. Bunun benzeri bir problem GB Amerika’da karşılaşılmıştır.

**III-Üretim Kuyularının Açılması:** KKK dolaşım sistemi rezervuarı yakındaki rezervuara bağlayacak iki üretim kuyusunun açılmasıyla tamamlanır. Isı transfer akışkanı olarak su ( $H_2O$ ) veya gazlar kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda ısı transfer akışkanı olarak suyun veya gazın ( $CO_2$ ) kullanılması durumları karşılaştırılmış, akışkan hareketliliğinin  $CO_2$  kullanılması durumunda da fazla olduğu belirlenmiştir. Isı transfer akışkanı olarak  $CO_2$ 'in kullanılması durumunda sıcaklık ve basınç değerlerinde önemli avantajlar olduğu belirlenmiştir (Pruess 2006, 2008).

Isı transfer akışkanı olarak su ve  $CO_2$  kullanıldığında, kuyu başı sıcaklık ve basınç (T, P) şartları 20 °C ve 57.4 bar olarak alınmıştır. Basınç bu kadar alınmıştır çünkü  $CO_2$  doygunluk basıncı olup  $CO_2$ 'in tek fazlı kritik likit basınç değeridir.  $CO_2$  için kuyu tabanında 5000 m'deki toplam basınç 528.7 bar, su için ise 553.4 bar olarak ölçülmüştür. Kuyu tabanındaki basınç başlangıç noktası olmak üzere 200 °C sıcaklık için yukarıya

doğru statik basınç değerleri hesaplanmıştır. Buna göre üretim kuyusunda kuyu başı basıncı CO<sub>2</sub> için 288.1 bar, su için ise 118.6 bar olarak bulunmuştur.

**IV-Akış Testi:** Tamamlanmış KKK jeotermal sisteminde optimum üretim akış oranını belirlemek için akış testi yapılabilir. Test parametreleri enjeksiyon ve üretim basınçlarının mevcut oranını içerir. Gerçekte kümülatif akış oranı oldukça düşüktür. Basınç/sıcaklık döngü operasyonları yakın-kuyu dışı empedansını azaltmak için kullanılır. Ayrıca üretimi artırmak için kuyunun tabanında sondaj yana doğru ilerler (Brown vd. 2012).

Uzun süreli GJS su sirkülasyon testleri birkaç aylık ve bir yıla ulaşan testlerin ardından toplam akışkan kaybı (formasyonlar içine) yaklaşık %5 civarında gerçekleşmiştir (Duchane 1993). Termodinamik ve kabul edilebilir düzeltme kullanım verimliliği faktörleri dikkate alındığında, 1 MW elektrik enerjisi üretmek için 22 kg/s CO<sub>2</sub> miktarının yeterli olacağı hesaplanmıştır. %5 akışkan kaybı olacağı, kayıp olan CO<sub>2</sub> miktarının ise her 1 MWe için 1 kg/s veya başka bir hesapla 1000 MWe için 1 ton/s kadar olduğu bulunmuştur. Bir karşılaştırma yapmak için 1000 MWe kapasiteli petrol yakıtlı enerji santrali 1/3 ton /s CO<sub>2</sub> üretmektedir (Bachu and Hitchon 1996). Genel bir yaklaşımla 1000 MWe kapasiteli bir EGS sistemi, 3,000 MWe kapasiteli fosil yakıtlar ile yayılan CO<sub>2</sub> miktarı kadar CO<sub>2</sub>'i jeolojik formasyonlar içinde biriktireceği söylenebilir.

### **2.5.3 KKK ve GJS Sonrası Çalışmalar**

#### **2.5.3.1 Jeokimyasal ve Jeofizik Araştırmalar**

HDR sondajları öncesinde yapılan toprak gazı, radyoaktivite, mikrogravite, detay manyetik, doğal potansiyel (SP), mikrosismik, hidrojeokimya ve izotop çalışmaları HDR sondajları sonrasında aynı noktalarda tekrar edilerek gelişmeler belirlenmektedir. Ayrıca kuyularda hidrolik çatlatma sonrası kuyu logları alınarak, önceki ölçülerle karşılaştırılmalı, böylece hidrolik çatlatma operasyon sonuçları değerlendirilmelidir.

**a) Kuyu ve Rezervuar Geliştirme Çalışmaları:** Su kaybı, statik basınç, statik sıcaklık, enjeksiyon, dinamik sıcaklık ve basınç düşümü, basınç yükselimi, üretim testleri gibi kuyu geliştirme çalışmalarının yapılması gerekir. Rezervuar geliştirme çalışmaları kapsamında; asitleme, sığ rezervuar için perforasyon ve asitleme, derin rezervuar için asitleme (HF ve HCl asit) çalışmaları yapılmalıdır.

HDR rezervuarı sıcak, kristalin temel kayaların geçirimsiz kütlesi içinde yüksek basınç, hidrolik-stimülasyon (hydro-frac) teknikleri kullanılarak oluşturulur. Enjeksiyon kuyusunun tabanındaki açık delik boyunca kristalin kayaç basınca tabi tutulur, bir veya daha fazla aşamada yürütülen hidrolik stimülasyon çalışmaları sonucu basınçla çatlakları açılmış oldukça büyük (1km<sup>3</sup>) bölge oluşturulur (Brown vd. 2012).

Enjeksiyon kuyusu içinde, sıvı basıncı kaya kütlesi içinde daha önceden var olan fakat kapanmış olan çatlakların çoklu akış yollarını açmak için kullanılır. Bu akış yolları daha sonra üretim kuyularınca kesilir. Bu yolların her birinin akış empedansı nispeten yüksektir, fakat onların agrega empedansı HDR rezervuarına sıvı taşırken, düşecektir. HDR rezervuar bölgesinin gelişim sürecinde sismik aktivite izlenmelidir. Los Alamos'taki ilk çalışmaların sonucunda, basınçla uyarılmış mikrosismik çalışmaları rezervuar bölgesinin şekli ve yöneliminin belirlenmesi için başlıca yöntem haline gelmiştir. Bu bilgiler üretim kuyularının optimum yeri ve sondaj stratejisinin belirlenmesinde oldukça önemlidir.

Rezervuarın verimliliği akış empedansı veya rezervuar içinde akmaya karşı dirençle doğru orantılı değişim sunar. Akış empedansının birimi psi/gpm veya her L/s için MPa'dır. Rezervuarın akış empedansı üç bileşenden oluşur (Brown vd. 2012): (1): Kütle empedansı, (2): Kuyu yakınındaki dış ortam empedansı ve (3): Kuyu yakınındaki iç ortam empedansı

### **2.5.3.2 Üretilen Akışkan Analizleri**

Üretilen su ve buharın kimyasal analizi, kabuklaşma türü ve derinliğinin belirlenmesi ve uygun inhibitör seçimi çalışmaları bu bölümde yürütülmektedir.

## 2.6 Çatlatma ile Rezervuar Oluşturma Yöntemleri

Çatlatma doğal olarak yeterli geçirgenliğe sahip olmayan kayaçların içinden sıvıların hareketine olanak sağlayacak çatlakları oluşturmaktır. Bu yöntem ilk kez petrol endüstrisinde silttaşı, kiltası, killi kum, kumtaşı, kireçtaşı ve şeyl gibi çeşitli sedimanter kayaçlara uygulanmıştır. Günümüzde üç tür çatlatma yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; (1): Hidrolik çatlatma, (2): Pinomatik çatlatma ve (3): Dinamik yüklemeye çatlatma yöntemleridir. Bu yöntemlerden hangisinin seçileceği aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- ❖ Kayaç yapısı ve gerilim alanı
- ❖ Hedeflenen derinlik
- ❖ İstenen alansal etki
- ❖ Sıvı enjeksiyonunun kabul edilebilirliği

### 2.6.1 Hidrolik Çatlatma

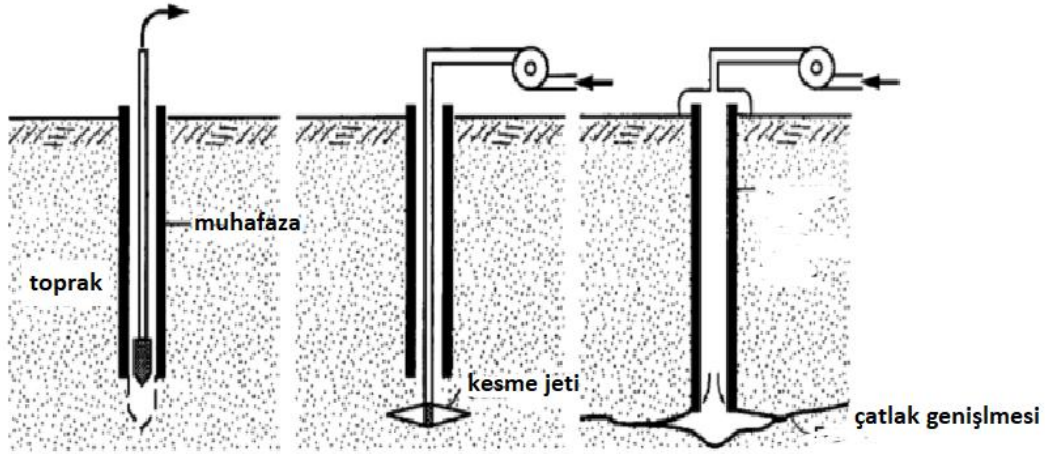
Hidrolik çatlatma yüksek kapasiteli pompalar kullanılarak su bazlı sıvının sondaj borusuna enjeksiyonuyla yapılır. Sıvı basıncı kritik değere ulaştığında (doğal gerilimi aşacak değer) kuyu içinde çatlak oluşup, çatlaklar düşey yönde kayaç içinde yayılmaktadır. Sonuçlar uyarılmış çatlakların yatay yönde birkaç yüz metre uzunluğa ulaştığını göstermiştir. Hidrolik çatlak oluşumunun etkinliği hem çatlak sisteminin yönelimi ve alansal genişliği ve hem de çatlak oluşumu sonrası elde edilen buhar ve sıvı miktarıyla ölçülebilmektedir (Suthersan 1999, Tenzer 2001, Gandossi 2013).

Hidrolik çatlatma yönteminde, enjeksiyon kuyusu vasıtası ile basınçlı soğuk su yer altındaki olası rezervuara gönderilir ve böylece önceden var olan kırıkların açılmasına ve/veya yeni kırıkların oluşmasına yardımcı olur. Bu aşamada kuyu içine gönderilen su basıncı kayaç içinde çatlak oluşumunu sağlayacak kritik değere ulaşana kadar sabit bir şekilde artırılır. Kuyudan aşağı verilen basınçlı su sıcak kayaçlar içinde ısınır ve üretim kuyusu tarafından emilerek tekrar yüzeye çıkar. Formasyon ne zamanki yeterli hacim ve geçirgenliğe ulaştıncaya, başka kuyu/lar yeni oluşmuş olan rezervuarı kesmek üzere açılır. Böylece kapalı bir sistem oluşturulur, enjeksiyon kuyusundan basılan soğuk su

yeraltında sonradan çatlatılmış kızgın kuru kayalar içerisinde geçerek üretim kuyusuna ve böylece yüze ulaşır.

Petrol ve doğalgaz içeren sedimanter kayalarla karşılaştırıldığında, KKK sistemindeki kristalin kayalar sıvı sirkülasyonunda önemli rol oynayan doğal çatlak ve kırıklarla karakterize edilmektedir. Hidrolik çatlatma uygulama sonuçları kristalin kayaların geçirimsizliğini artırmak için uyarıcı olarak suyun kullanılabilirliğini, diğer taraftan propant (dolgu malzemesi) kullanımının gereksiz olduğunu göstermiştir (Tenzer 2001).

Hidrolik çatlaklar casing'in altında, çekiçle çatlatma yapılabilecek uygun derinlikte oluşturulmaktadır. Sıvının enjeksiyonu sırasında kayaların yanıl basıncı casing kullanılarak kapatılır. Casing daha derinlerde çatlak oluşumuna imkân verir (Şekil 2.6). 15-30cm düşey yüze sahip derin hidrolik çatlak kümesi "driven casin method" kullanılarak oluşturulur. Disk şekilli boşluk oluşturmak ve casing borusunun tabanında yatay yönde ilerleyebilmek için yüksek basınçlı su başlığı kullanılmaktadır. Burada disk şekilli boşluk çatlakların başlangıç noktasıdır.



Şekil 2.6 Hidrolik çatlatma (Suthersan 1999).

Hem teknolojik ve hem de çevresel açıdan hidrolik çatlatma yönteminde en önemli husus kullanılan sıvının türüdür. Sürtünme-azaltma katkıları içeren su bazlı çatlatma sıvıları hidrolik çatlatma uygulamalarında kullanılan en önemli sıvılar olup, bunlar Çizelge 2.2 'de verilmiştir (Gandossi 2013).

**Çizelge 2.2** Hidrolik çatlatma yönteminde kullanılan farklı sıvılar (EPA 2004; Gandossi 2013).

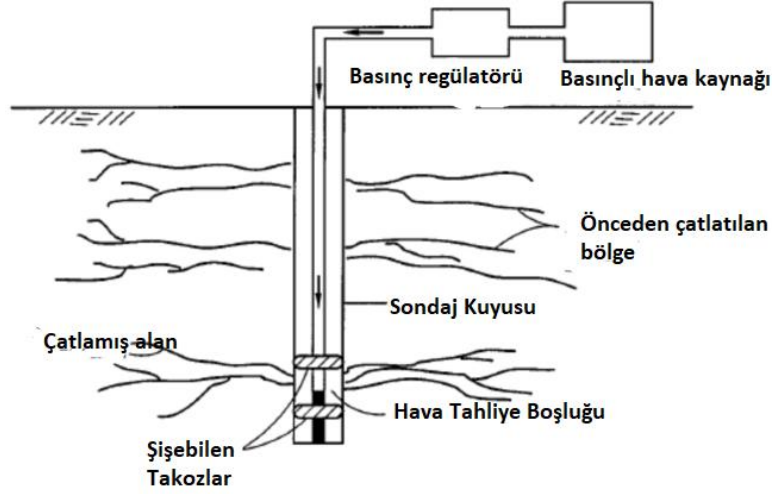
Akışkan Tabanı	Akışkan tipi	Ana bileşim
Su Tabanlı	Katkısız su	Su + kum (+ kimyasal eklemeler)
	Düz akışkanlar	jelli su, GUAR<HPG, HEC, CMHPG
	Çapraz karıştırılmış akışkanlar	Çapraz bağlayıcı + GUAR, HPG, CMHPG, CMHEC
Köpük Tabanlı	Viskoelastil jel akışkanlar	Elektrolit+yüze aktif madde
	Su tabanlı köpük	Su ve köpürtücü + N2 or CO2
	Asit tabanlı köpük	Asit ve köpürtücü + N2
Yağ Tabanlı	Alkol tabanlı köpük	Metanol ve köpürtücü+N2
	Düz akışkanlar	Yağ, Jelli yağ
	Çapraz karıştırılmış akışkanlar	Fosfat ester jel
Asit tabanlı	Sulu çözeltiler	Su+ yağ + Kimyasal çözücüler
	Düz	-
	Çaprazlanmış	-
Alkol Tabanlı	Yağ karışımı	-
	metanol/su Karılımı veya %100	metanol + su
	Karışım tabanlı	su + yağ
Diğer akışkanlar	CO2- metanol	CO2 + su + methanol
	Diğerleri	-
	sıvı CO2	CO2
Diğer akışkanlar	sıvı nitrogen	N2
	sıvı helium	He
	Sıvı doğal gaz	LPG

Hidrolik çatlatma geçirimsiz veya az geçirimli rezervuar kayaçların permeabilitesini artırmak için kayaç içerisinde yüksek basınçlı sıvı enjekte edilmesi yöntemidir. Bazı durumlarda kayaç içerisinde doğal çatlak sistemleri bulunabilir bu durumda hidrolik çatlatma bu sistemleri genişletmeye yönelik yapılabilir.

### 2.6.2 Pnömatik Çatlatma

Pnömatik çatlaklar kayaç içinde hava veya herhangi bir gaz enjekte edilerek oluşturulur. Uygulama basıncı doğal gerilimi aşacak şekilde belirlenmektedir. Pnömatik çatlak uyarma yöntemi özellikle aşırı konsolide olmuş formasyonlarda yatay çatlak oluşturmak için tercih edilmektedir. Pnömatik çatlatma yönteminin en önemli bileşenleri basınçlı hava, akış-basınç sistemi, akış-basınç düzenleme sistemi ve enjektördür (Şekil 2.7). Bu yöntemin en önemli avantajları; su kullanımının oldukça azaltılması, hiçbir kimyasal katkının kullanılmaması ve kayaçtaki doğal çatlaklar boyunca meydana gelen muhtemel sıvı kayıplarının yaşanmamasıdır. Diğer taraftan, derinlerde bu yöntemin kullanımının

sınırlı olması ve katkı maddelerinin taşınmasındaki sıkıntılar en önemli dezavantajlardır (Gandossi 2013).



Şekil 2.7 Punomatik çatlatma.

### 2.6.3 Dinamik Yüklemeyle Çatlatma

Bu bölümde sıvıların veya gazların kullanımı olmaksızın dinamik yükleme, patlatma ve elektriksel itme gücünü kullanarak yapılan çatlatma yöntemleri açıklanmaktadır.

#### 2.6.3.1 Patlayıcı Kullanılarak Çatlatma

Patlayıcı kullanılarak çatlak oluşturma yöntemi oldukça eski bir yöntem olup, 1860-1940 yılları arasında sondaj kuyularında üretimi artırmak için yaygın olarak kullanılmıştır. Teneke kutu içindeki sıvı nitrogliserin kuyu tabanına indirilerek patlatılarak uygulanan bu yöntem etkili ve tehlikelidir. Kuyu içinde meydana gelen hasarlar, güvenlik problemleri ve önceden tahmin edilemeyen sonuçlar çok sayıda değişik patlayıcı türünün denendiği bu yöntemin kullanımının zamanla azalmasına neden olmuştur. Son yıllarda yapılan çalışmalar roket yakıtının patlayıcılara göre daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Roket yakıtları uygulama sırasında patlatıcı değil, tutuşturucu etki göstermektedirler. Şeyl gazı üretiminde potansiyel kullanıma sahip olan roket yakıtları “Dynamic Gas Pulse Loading (Servo-Dynamics)”, “High Energy Gas

Frac (Sandia National Laboratory)” gibi farklı isimlerle adlandırılmaktadır (Gandossi 2013).

### **2.6.3.2 Elektrik Kullanılarak Çatlatma**

Bu yöntemde kayaç üzerinde mekanik yük oluşturmak için elektrik kullanılmaktadır. Şeyl gazı üretiminde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, University of Pau and Pays de l'Adour'de geliştirilmiş ve test edilmiştir. Bu yöntem darbeli ark elektrohidrolik akım boşalımı (pulsed arc electrohydraulic discharges) ve plazma stimülasyon & çatlatma (Plasma Stimulation & Fracturing) yöntemleri olarak iki grupta toplanmaktadır.

### **2.6.4 Diğer Çatlatma Yöntemleri**

#### **2.6.4.1 Termal (Dondurucu) Çatlatma**

Bu yöntemde, rezervuardaki sıvıdan daha soğuk bir sıvının kullanılmasıyla çatlatma yapılmaktadır. Böylece kayaçta çatlak oluşumunu sağlayacak gerilim oluşacaktır. Değişik araştırmacılar farklı ortamlar için soğuk suyu derin rezervuara sabit akış oranında enjekte ederek, belli bir süre sonra enjekte edilebilirliğin arttığı ve çatlakların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Son yıllarda yeterli miktarda çatlak oluşumunu sağlayacak termal gerilim yaratmak için, soğuk CO<sub>2</sub> gazının kullanımı önerilmektedir.

#### **2.6.4.2 Şeylin Mekanik Olarak Kesilmesi**

Bu yöntemde esnek kesici kablolar kullanılarak iki derin kuyu arasındaki kaya kütlelerinin uzaklaştırılması amaçlanmaktadır. Bu yöntemde göre öncelikle iki derin sondaj kuyusu açılmakta ve bunlar arasında bağlantı kurulur, daha sonra kesici kablo ilk sondajdan kuyuya daldırılır ve ikinci kuyudan çıkartılır. Sonuçta kablo belli bir hızda hareket ettirilerek kayaç kesilmiş olur.



### **2.6.4.3 Gelişmiş Bakteriyel Metan Oluşumu**

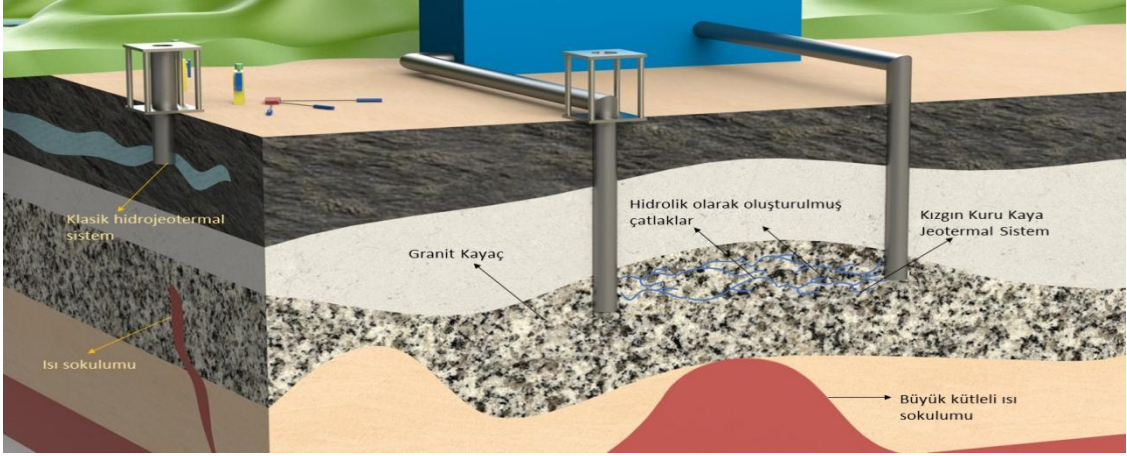
Organik madde bakımından zengin şeylerin en önemli özelliği organik maddenin petrol ve kömüre dönüşümünü sağlayacak kadar yeterli sıcaklık ve basınç koşullarına maruz kalmamasıdır. Bu kayaçlar büyük fosil karbon kaynağıdır. Organik maddenin mikrobiyolojik olarak desteklenmiş metan oluşumu çatlatma uygulamaları için önerilen yöntemlerdendir.

### **2.7 Hidrolik Çatlatma Operasyonu Aşamaları**

Hidrolik çatlatma metodunun ilk uygulandığı alan petrol endüstrisindeki hidrokarbon ve gaz yataklarındaki verimi artırmak amaçlı olmuştur. Daha sonra KKK ve GJS sistemlerden enerji üretmek amaçlı kullanılan hidrolik çatlatma yöntemi zaman içinde gelişerek birçok aşamada uygulanan kompleks bir yöntem haline gelmiştir.

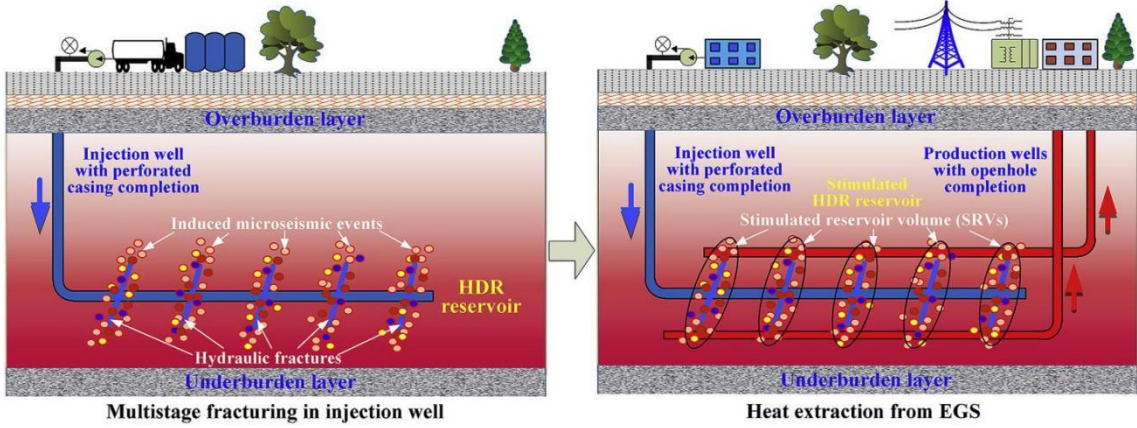
KKK veya GJS sisteminin bulunduğu derinliğe kadar bir sondaj işleminin yapılarak kuyu açılır. Açılan kuyu istenilen basınç ve sıcak değerlerindeyse kuyu sondaj işlemi sonlandırılarak kuyu tamamlama işlemlerine geçilir. Kuyu tamamlama işlemlerinden sonra rezervuarın yatay veya dikey olup olmayacağına karar verilerek gerekiyorsa yatay sondaj işlemine devam edilir.

Sondaj işlemleri tamamlandıktan sonra kuyu içi basınç ve log değerlerinden hareket ile kuyu içerisinde hidrolik çatlatma işlemine geçilir. Hidrolik çatlatma işlemi belli ölçüde içerisinde çatlak barındıran bir sedimanda yapılıyor ise direk olarak çatlatma sıvısı enjeksiyonu ile çatlatma yapılabilir. Eğer çatlatma işlemi çatlak ve permeabilitesi az bir magmatik kayaçta yapılıyor ise bu işlemde önce sondaj takımına ataçman eklemek yolu ile kayaç içerisinde ön çatlatma operasyonu gerçekleştirmek gerekebilir. Böylelikle stres yoğunluğu azaltılarak yeraltı stres farkı ciddi derece dengelenmiş olur, bunun neticesinde de hidrolik çatlatmanın başlaması için gereken basınç düşürülmüş olur bu da daha efektif bir çatlatma ve daha karmaşık bir çatlak ağı oluşumuna izin verir. (Wu 2019).



Şekil 2.8 Hidrolik olarak çatlatılmış dikey rezervuar.

Mevcut çatlaklar büyütülerek veya yeni çatlaklar yaratılarak başlangıçtaki kaya hacmi çatlatıldıktan sonra, sıvı dolaşımını başlatmak için bir üretim kuyusu açılabilir. Bu, üretim kuyusunun enjeksiyon kuyusundan doğru mesafede delinebilmesi için kırık alanın kapsamlı bir bilgisini gerektirir. Ayrıca sıcak kayada açılan yolların, sıvının içinden akarken kaybolmasını önleyecek kadar geçirimsiz olması sağlanmalıdır. Açılan enjeksiyon ve üretim kuyularının sayısı, rezervuarın büyüklüğüne, kuyuların verimliliğine ve hazırlanan geliştirme planına bağlı olacaktır. (Olasolo vd. 2016).



Şekil 2.9 Yatay olarak dizayn edilmiş GJS çok aşamalı (multistage) rezervuarı (Han vd. 2020).

Çatlatma işleminin ardından mevcut çatlakları açık tutmak için açılmış çatlaklara propant enjekte edilir. Propantlar aynı zamanda çatlak iletkenliği sürdürmek içinde

kullanılır ve çatlak iletkenliği çatlama operasyonun verimliliğini artıran ve bütün çatlama işleminin etkinliğine etki eden çok önemli bir faktördür (Santos vd. 2018).

Rezervuar oluşturma ve tamamlama aşamalarında mevcut çatlak yapısını ve oluşan çatlak yapısını izlemekte kullanılan en yaygın yöntem sismik görüntüleme yöntemidir. Bu sayede üretim ve enjeksiyon kuyularının yerinin ve sayısının hesaplanması daha doğru ve kolay olacaktır.

## **2.8 Hidrolik Çatlama Yöntemi Mekanikliği**

Çatlama doğal olarak yeterli geçirgenliğe sahip olmayan kayaçların içinden sıvıların hareketine olanak sağlayacak çatlakları oluşturmaktır. Çatlak oluşturmak için muhtelif yöntemler kullanılmaktadır. Hidrolik çatlama daha önce de bahsedilen kayaç çatlama yöntemleri arasında en sık kullanılanıdır. Gerek petrol endüstrisinde gerekse de KKK ve GJS sistemlerde kullanılan bu yöntem ileri düzeyde multidisipliner mühendislik çalışmaları isteyen karmaşık ve maliyetli bir yöntemdir. Bu yüzden hata payını azaltmak için gerek çatlama öncesinde gerekse çatlama sırasında iyi bir şekilde planlanmalıdır. Formasyon yapısı, aksenal basınçlar, petrografi gibi unsurlar çatlama öncesinden belirlenmeli çatlama sırasında da çeşitli izleme yöntemleri ile adım adım takip edilmelidir.

Hidrolik çatlama yönteminde yüksek kapasiteli pompalar kullanılarak su bazlı sıvının sondaj borusuna enjeksiyonuyla yapılması işlemi petrol, doğalgaz, jeotermal, madencilik ve atık depolama uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemde sıvı basıncı kritik değere ulaştığında (doğal gerilimi aşacak değer) kuyu içinde çatlak oluşup, çatlaklar düşey yönde kayaç içinde yayılmaktadır. Konuyla ilgili daha önceden yapılmış çalışma sonuçları uyarılmış çatlakların yatay yönde birkaç yüz metre uzunluğa ulaştığını göstermiştir. Hidrolik çatlak oluşumunun etkinliği hem çatlak sisteminin yönelimi ve alansal genişliği ve hem de çatlak oluşumu sonrası elde edilen buhar ve sıvı miktarıyla ölçülebilmektedir (Tenzer 2001, Gandossi 2013). Çoğunlukla petrol ve doğal gaz endüstrisinde silt taşı, kil taşı, killi kum, kum taşı, kireç taşı ve şeyl gibi çeşitli sedimanter kayaçlara uygulanan hidrolik çatlama yönteminin metamorfik ve

magmatik kayaç türleri üzerindeki uygulamaları ise sedimanter kayaçlara göre daha azdır (Clark 1949, Weeren vd. 1966, Haimson 1978, Legarth vd. 2005).

Saha çalışmalarından üretilen veriler yanında son zamanlarda geliştirilen deney sistemleri yardımıyla hidrolik çatlatma laboratuvar şartlarında farklı kayaçlar ve basınç, sıcaklık koşullarında incelenmektedir. Daha önceden petrol endüstrisinde kumtaşları için kullanılan bu deney düzenekleri son zamanlarda KKK ve GJS sistemlerde rezervuar oluşturabilecek granit türü derin magmatik kayaçlar içinde kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek gözenek basıncı, yüksek sıcaklıklar, üç yönlü gerilmelerin farklı değerleri ile değişik kimyasal parametreleri gerçek rezervuar koşullarını oluşturmaktadır. Laboratuvarda rezervuar koşullarını oluşturmak oldukça güçtür. Laboratuvar örneklerine üç yönlü basınç uygulamak için konuyla ilgili çalışmalarda üç yönlü hücreler tasarlanmıştır. Bu çalışmalardan birinde 40°C derece ve 1500 m derinlikteki bir kayacın yüksek boşluk basıncı altındaki şartlarını laboratuvar koşullarında sağlayabilecek bir deney düzeneği tasarlanmıştır (Zang ve Fan 2014). Benzer bir çalışmada ise 30x30x30 cm boyutlarındaki kayaç numunelerini 13 MPa basınç ve 180 derece sıcaklık koşullarında tutabilecek bir deney düzeneği tasarlanmış ve hidrolik çatlatma ile rezervuar oluşturabilme, oluşturulan rezervuara üretim kuyusu açma ve bu kuyudan üretim yapma imkanları ve üretimin verimi konularında çalışmalar çıkarılmıştır (Frash 2014).

Hidrolik çatlatma geometrileri mekanik, hidrolik, jeolojik ve kimyasal etkilere bağlı olan karmaşık bir yapıdır (Warpinski vd. 1982a; Jeffery vd. 1995). Çatlak uzunluğu, yüksekliği, genişliği ve 3 boyutlu geometrisi hidrolik çatlatma uygulamalarında en önemli verilerdir. Laboratuvar ölçekli hidrolik çatlatma uygulamalarının büyük bir bölümü çok yönlü gerilmelere maruz bırakılan kayaç örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve çatlak geometrisiyle ilgili veriler üretilmiştir. Bu çalışmalarda hidrolik çatlatma geometrisinin kayaç gerilim durumu, kuyu içi ve delik açma geometrisi, sıvı viskozitesi, enjeksiyon oranı, kayaç yapısı ve ölçek gibi faktörlere bağlı olduğu ortaya konmuştur (Warpinski vd. 1982b, Anderson 1991, Romero vd. 1995, Ishida vd. 2004, Safari vd. 2013, Taleghani ve Olson 2014).

Hidrolik çatlatma sırasında çatlatma performansı ve verimi iki faktör tarafından denetlenmektedir. Bunlar çatlatma basıncı ve çatlatma geometrisidir. Çatlatma basıncının hesaplanabilmesi için bugüne kadar birçok çalışma yapılmıştır. İlk önemli çalışmalardan biri olan Hubbert ve Willis (1957)'e ait “Mechanics of Hydraulic Fracturing” adlı çalışmasında çatlatma basıncının en düşük aksenal gerilmeye eşit olacağı ifade edilmiştir. Ayrıca araştırmacılar, çatlatma basıncının hesaplanmasında boşluk basıncı ve litostatik basıncın önemi vurgulamışlardır. Bu çalışmada çatlatma basıncı aşağıdaki formülle tahmin edilmektedir:

$$P_{\text{ç}} = (S_v - 2P_o) \quad (2.1)$$

Burada çatlatma basıncının ( $P_{\text{ç}}$ ), litostatik basınç ( $S_v$ ) ve boşluk basıncı ( $P_o$ ) ile olan ilişkisi gösterilmektedir.

Daha sonra petrol endüstrisinde hidrolik çatlama mekaniğini anlamaya yönelik çalışmalar yoğunlaşmıştır (Haimson ve Fairhurst, 1967). Hidrolik çatlatmanın klasik teorisi ise 1967 yılındaki Haimson ve Fairhurst'un çalışmalarıyla şekillenmiş ve aşağıdaki formüller ortaya çıkmıştır:

$$P_{\text{ç}} = (T + 3S_h - S_H - 2\eta P_o) / (2(1 - \eta)) \quad (2.2)$$

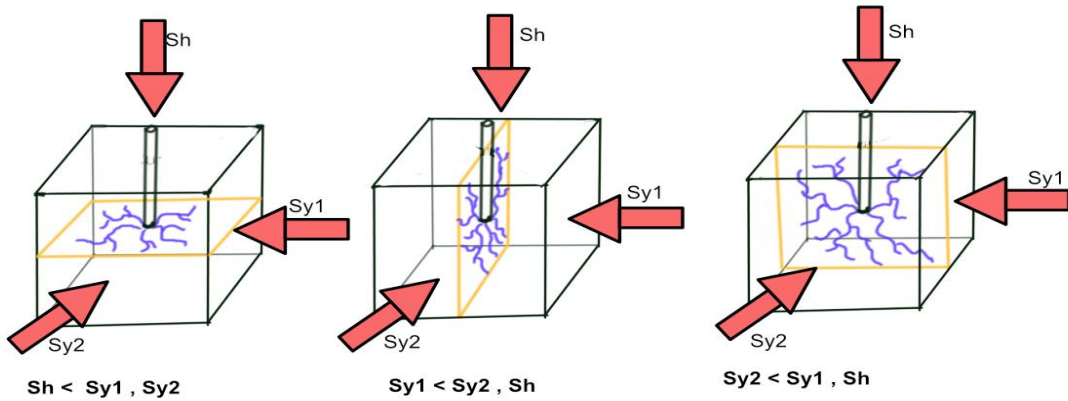
$$P_{\text{ç}} = T + 3S_h - S_H - P_o \quad (2.3)$$

Buradaki ( $T$ ) kayacın çekme mukavemeti, ( $S_h$ ) ve ( $S_H$ ) minimum ve maksimum yatay gerilmelerdir. Denklem (2) deki ( $\eta$ ) kayaçlar için proelastiklik katsayısı olarak ifade edilir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\eta = \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (2.4)$$

$\alpha$  biot katsayısı olup 0 (sert, az geçirgen kayaçlar için) ile 1 (yumuşak ve geçirimli kayaçlar için) arasında değişmektedir.  $\nu$  ise Poisson oranıdır ve 0 ile 0.5 arasında değişiklik (Kumtaşı: 0.12, Granit: 0.27) gösterir (Amadei ve Stephanson 1997).

Çatlatma basıncının yanı sıra, çatlatma geometrisi üzerine yapılan çalışmalarda, çatlağın minimum asal gerilmeye dik düzlemde oluştuğu belirtilmiştir (Hubbert ve Willis 1957). 300 m'den daha derin seviyelerde formasyonlarda litostatik basınç en yüksek basınç olarak düşünüldüğünden, en düşük basınç yatay gerilmelerden biri tarafından üretilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Arop 2013). Bu durumda çatlak yatay düzlemlerden birine dik olarak gelişecektir. Yerkabuğundaki yatay stresler ise çeşitli kuvvetler ve ortamsal faktörlere bağlı olarak oluşurlar. Bu faktörlerden en önemlileri tektonik plaka hareketleri, yoğunluk farkı ve termo-elastik kuvvetlerden kaynaklanan litosfer genleşmesidir (Zoback vd. 1989). Bunun yanı sıra yatay kuvvetlerin oluşmasında litostatik basıncın da etkisi vardır. Bu basınç matematiksel olarak yoğunluk, yerçekimi ivmesi ve derinliğin çarpımı ile elde edilebilmektedir (Zoback ve Zoback 2002). Litosferdeki kayaç dayanımı derinlere inildikçe artmakta ve 10 km derinlikte en yüksek seviyesine ulaşmaktadır (Blackham, 2015). Bununla birlikte derinliklere inildikçe meydana gelen sıcaklık artışı kayacın dayanımını düşürmektedir. Kayaçların 400oC sıcaklığının üstünde daha sünek bir yapıda oldukları ve bu durumun da kayaçların hidrolik çatlatma davranışlarını olumsuz etkilediği Blackham (2015) tarafından belirtilmiştir.



**Şekil 2.10** Asal gerilmelere bağlı çatlak oluşumu.

Hidrolik çatlak geometrisi çatlak iletkenliği ve uyarılmış rezervuar hacmini etkilerken; bu durum kuyu üretimi ve enjektivitesinin değişimine neden olmaktadır. Doğru hidrolik çatlatma geometrisi verisi sıvı akış dinamiği ve uyarım etkinliğinin tahmin edilmesi açısından oldukça önemlidir (Perkins ve Kern 1961, Geertsma ve De Klark 1969,

Nordgren 1972). Çatlak uzunluğu ve genişliği uyarılmış rezervuar hacmini kontrol etmektedir. Çatlak açıklığı çatlağın hidrolik iletkenliğini etkilemektedir (Warpinski vd. 1982a). Arazide kuyu boyunca çatlak geometrisinin ölçümünün zor ve maliyetlidir. Halbuki laboratuvar uygulamaları küçük ebatlı numuneler kullanılarak hidrolik çatlak geometrisinin doğru bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Frash 2014). Kırılma tokluğu kayaçlardaki çatlak oluşumu ve gelişimini etkileyen önemli parametrelerden birisidir.

Kayaçlardaki çatlak oluşumu ve gelişimini etkileyen önemli faktörlerden olan kırılma tokluğu kayaçların çatlak gelişimine karşı direncini veya yeni yüzey alanları oluşturmak için gerekli kırılma enerjisi tüketim hızını ifade etmektedir (Altındağ 2000). Bir diğer ifade ile kırılma olayı esnasında kayacın gösterdiği direnç olarak tanımlanan kırılma tokluğu, kayaçların kırılıp parçalanma işlerinde, jeotermal enerji, petrol ve gaz rezervuarlarında, hidrolik çatlatmada ve diğer birçok alanda kullanılan bir malzeme özelliğidir. Bu özelliği sayesinde, duraylılık analizinde olduğu gibi hidrolik çatlatma, gaz kuyularının patlama simülasyonu, patlama sonrası radyal çatlakları, krater patlatması ve kaya parçalanma modellerinde malzeme özelliği olarak; Kırılma tokluğu hidrolik çatlatma simülasyonunda çatlak ilerlemesinde kriter olarak kabul edilmiştir (Chen ve Chen 1995). Bu yüzden kırılma mekaniğindeki temel konular arasında yer alan çatlağın büyüüp büyümeyeceği, bir çatlağı ilerletmek için gereken minimum enerji miktarı, kritik çatlak uzunluğu, çatlak ilerleme hızının miktarı oldukça önemlidir. Bu yüzden; kırılma tokluğu, kaya mühendisliğinde özellikle kayaçların parçalanma ve çatlatma uygulamalarında önemli ve yararlı bir parametre olarak gösterilmektedir (Whittaker vd. 1992, Şengün ve Altındağ 2010).

Kayaçların petrografik özellikleri kayaçlardaki çatlak oluşum mekanizmalarını etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Petrografik özelliklerdeki farklılıklara bağlı olarak mikro ölçekli ve makro ölçekli çatlak yayılım mekanizmaları gelişebilmektedir. Boşluklar boyunca çatlama, taneler arası çatlama ve tane içi çatlama en önemli mikro ölçekli çatlak yayılma mekanizmalarıdır. Taneler arası ve tane içi çatlama türleri heterojen kayaçlarda oluşmaktadır. Söz konusu çatlama türleri taneler arasındaki bağlanma güçlerine bağlıdır. Çatlak tanenin yapısını takip ediyorsa, taneler arası

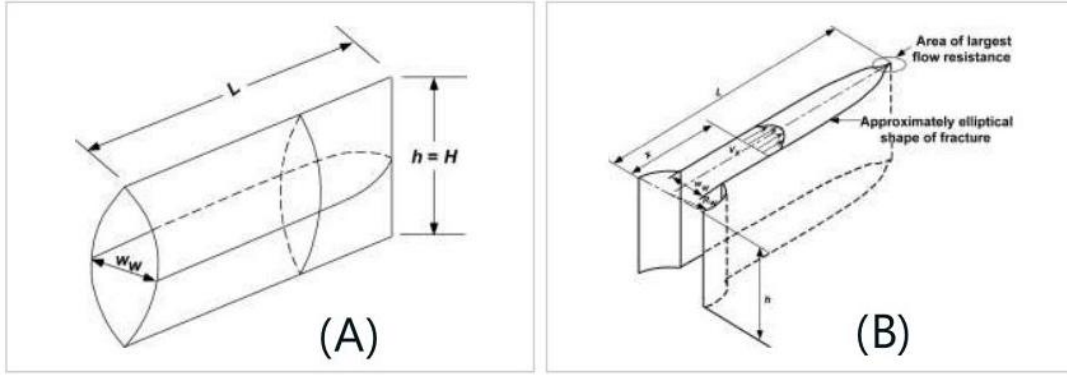
çatlama tek bir mineral türünden oluşan kayalarda taneler boyunca oluşmaktadır. Laminasyon, yabancı mineral içerikleri, inklüzyonları veya kristal-dilim düzlemleri minerallerin en önemli yapısal özelliklerdir. Bu yapılar büyük boyutlu veya atomik boyutta olabilmektedir (Anderson 1991). Tane ölçekli çatlama, çatlak tokluğunun sonucu olarak gelişir. Taneler arası çatlak oluşumu taneler arası çatlak oluşumuna göre yüksek yüzey tokluğuna bağlı olarak meydana gelir. Çünkü taneler arası çatlak oluşumu tane sınırları boyunca makaslama çatlaklarının sonucu olarak gerçekleşmektedir. Laminer akış beklendiğinde, permeabilite azalması artan çatlak açıklığıyla birlikte yüzey tokluğunun düşüşü nedeniyle gerçekleşmektedir (Warpinski vd. 1982a, Valko ve Ekonomides 1995). Diğer taraftan Kranz (1983), granitik kayalardaki çatlakların 70-75°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kuvars ve feldispat kristalleri arasındaki farklı termal genleşmelerin sonucu olarak meydana geldiğini belirtmiştir. Araştırmacıya göre, termal olarak uyarılmış çatlaklar farklı termoelastik modüle sahip kristaller arasındaki değişik termal genleşme ve büzülme olayları boyunca oluşmaktadır.

### **2.8.1 Çatlak İlerleme Geometrisinin Gelişmesi ve Kestirilmesi**

Çatlak geometrisi çatlağın en düşük asal gerilmenin yenilmesi ile bu gerilmeye paralel yüzeyde başlayarak, mineral yapısı, kafes sistemi, akışkan viskozitesi, enjeksiyon oranı, sistemsel kaçaklar gibi faktörlere bağlı olarak her kayaç ve formasyonda değişik bir geometri izleyerek oluşur ve biter. Çatlak geometrisin önceden hesaplamak birçok değişkenin birden çok modelde yorumlanmasını gerektiren zor ve zaman alıcı bir mühendislik faaliyetidir. Bir rezervuar oluşturma çalışmasında çatlağın hangi yönde, yükseklik ve genişlikte oluştuğunu kestirebilmek çok kritik öneme sahiptir.

Çatlak geometrisin uzanımını hesaplamak için kullanılan 2D ve 3D yöntemler vardır. 2D yöntemlerde yükseklik ve çatlak uzunluğu arasındaki ilişki önemlidir. 2D yöntemlerden biri olan Perkins-Kern-Nordgren (PKN) genellikle çatlak uzunluğu çatlak yüksekliğinden uzun olduğu durumlarda kullanılır. Bir diğer 2D çatlak dağılımı tahmin yöntemi olan Khristianovic-Greetsma-deKlerk (KGD) ise Çatlak yüksekliğinin Çatlak uzunluğundan fazla olduğu durumlarda kullanılır.

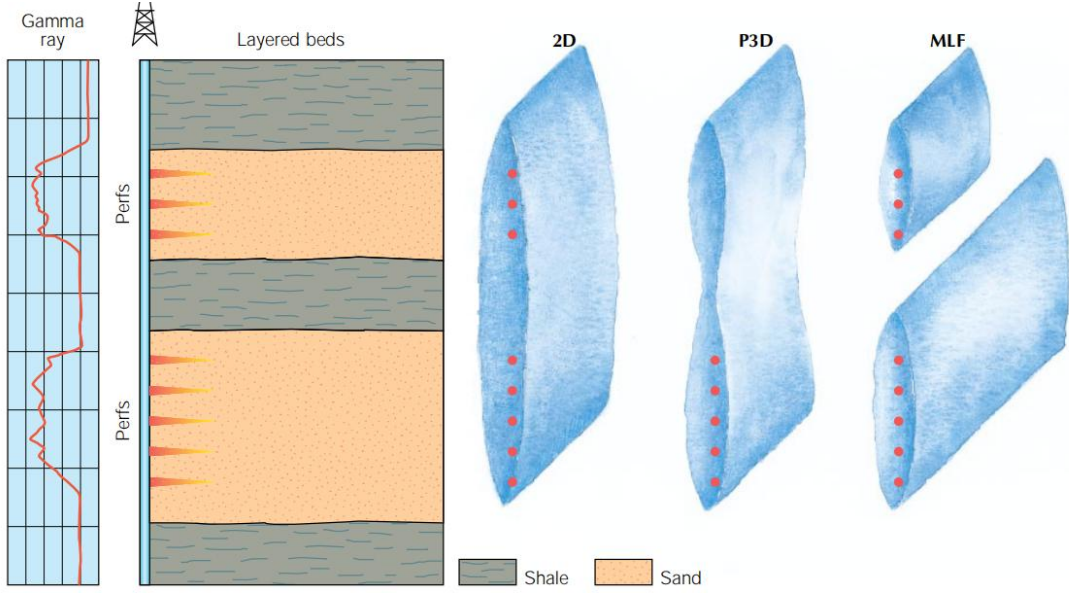




Şekil 2.11 PKN(A) ve KGN(B) modelleri (İnt. Kyn. 1).

3D yöntemlerde yükseklik de model içerisinde hesaplanır bu yüzden daha gerçekçi hesaplama olanaklarına sahiptirler. 3D modeller her ne kadar gerçeklik oranları artmış olsa da çok çatlaklı ortamlar da daha isabetli kestirmeler için MLF (multi layered fracture) yöntemi geliştirilmiştir (Brady vd. 1993).

P3D modelleri, hidrolik kırılmanın şeklini ve boyutlarını hesaplamak için kullanılır. 3D veya P3D modeller de dahil olmak üzere herhangi bir modelin anahtar noktası, kırılmaya tabi tutulacak formasyon katmanlarını ve ayrıca ilgilenilen bölgenin üstündeki ve altındaki kaya katmanlarını tanımlayan eksiksiz ve doğru bir veri setine sahip olmaktır. Çoğu durumda, veri seti, kırılma büyümesini etkileyecek veya etkileyebilecek 5 ila 25 kaya katmanı hakkında bilgi içermelidir. Mümkün olduğu kadar çok katmana veri girmek ve modelde kırılmanın başladığı yerin bir fonksiyonu olarak kırılma yüksekliği büyümesini modelin belirlemesine izin vermek en iyisidir. Kullanıcı yalnızca üç ila beş katmana veri girerse, kullanıcının model yerine kırılma şekline karar vermesi muhtemeldir (İnt. Kyn. 1).



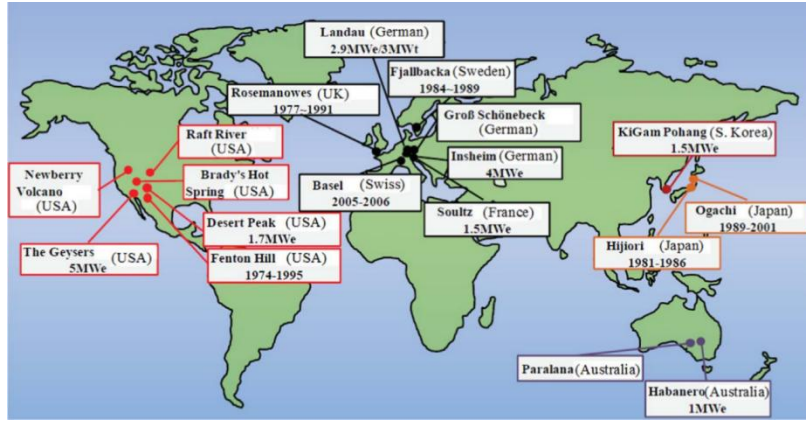
Şekil 2.12 Çatlak Kestirme Yöntemlerinin karşılaştırılması (Brady vd. 1993).

## 2.9 KKK ve GJS Sistemlerin Dünya ve Türkiye’deki Durumu

KKK ve GJS sistemlerinde, doğal yoldan jeotermal akışkan içermeyen ve yerkabuğu içinde doğal akışkan dolaşımına uygun kırık sistemine sahip olmayan, ancak yüksek ve olağan dışı ısı birikimine sahip olan sahalarda sonradan oluşturulacak yapay kırıklar içinde dolaştırılacak akışkanlarla enerji elde edilmesine uygun olan jeotermal sistem türüdür (Gupta ve Roy 2007). Kızgın Kuru Kaya türündeki jeotermal sistemler değişik jeolojik ortamlarla ilişkili olarak oluşabilmekte ve bu jeotermal sistem de gerekli olan ısı, yerkabuğunun 0-10 km derinliklerinde bulunan kayalarda depolanmış olarak bulunmaktadır.

Kızgın Kuru Kaya (KKK)’lardan jeotermal enerji elde edilmesi projesi ilk kez 1970 yılında Fenton Hill sahasında (ABD) uygulanmıştır (Brown ve Duchane 1999). Bu çalışmayı 1975 yılında Urach (Almanya) araştırma sondaj kuyusu için hazırlık çalışmaları takip etmiştir (Tenzer vd. 2010). Bölgede açılan Urach 3 kuyusunda 4394m derinliğinde kuyu içi sıcaklığı 170°C olarak ölçülmüştür. Dünya’nın önemli KKK projelerinden bir diğeri de Cornwall (İngiltere) ’da yürütülmüştür. 1977 yılında 300m derinliğindeki ilk sıg kuyunun açılmasıyla başlayan çalışmalar, 1980 yılında 2000m derinliğinde eğimli sondajın açılmasıyla devam etmiştir. Avrupa’da yürütülen en büyük

uygulama olan çalışmada, bölgedeki magmatik kayalar hidrolik uyarma testi kullanılarak daha önce açılan sondajlarla hidrolik bağ kurulmuştur (DECC 2013). 1984 ile 1986 yılları arasında Soultz (Fransa)'da HDR konusundaki temel araştırmalar başlamıştır (Genter vd. 2010). Projedeki en önemli teknik keşif basınçlı kuyu içi kesitinde yapılan hidrolik çatlatma işlemleri sırasındaki çatlakların oluşumunu gözlemleyen kuyu içi görüntüleme cihazının geliştirilmesidir (Tenzer 2001). Japonya'daki HDR projeleri 1970 yılından itibaren hız kazanmıştır. 1970 yılından günümüze kadar Japonya'da Hijiori, Yunomori ve Ogachi bölgelerindeki 3 projenin arazi çalışmaları tamamlanmıştır (Tenma vd. 2008). Hükümet veya endüstri desteğiyle finanse edilen Japonya'daki HDR çalışmalardan Hijiori'de yürütülen proje, HDR sistemlerin teknik ve ekonomik açıdan verimli olabileceğini göstermiştir. Avustralya'daki HDR çalışmaları 1999 yılında başlamış, bu çalışmaları yürütmesi için "Geodynamics Limited" adlı özel şirket kurulmuştur. Çalışmalarda Avustralya'nın değişik bölgeleri araştırılmış, çalışmalarda 25 enjeksiyon ve 36 üretim kuyularıyla 360MW kapasitede güç santrali çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Tenzer 2001, Lianos vd. 2015).



Şekil 2.13 Dünya'daki GJS Projelerinin dağılımı (Lu 2018).

Hidrotermal kaynakların yanı sıra, Türkiye'nin "Kızgın Kuru Kaya" açısından elverişli bir ülke olduğu bilinmektedir. Jeotermal sektör riskin düşük olduğu hidrotermal kaynak arama çalışmalarını sığ derinlikle sınırlı şekilde sürdürürken artan enerji taleplerini karşılamak üzere daha derin sondajlar ile araştırmaların yapılması ve sıcak kaya gibi geliştirilmiş jeotermal sistemlerin (EGS) de araştırılması enerji açısından Türkiye'nin

yakın gelecekteki gündemine oturmuş önemli bir konudur. Ocak 2015 itibariyle Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası Türkiye'nin jeotermal kapasitesinin gelişmesi amacıyla 125M\$ bir fon ayrıldığını duyurmuştur. Jeotermal kaynaklar kullanılarak elektrik enerjisi üretiminde Türkiye'nin sayılı ülkeler arasında yer alabilmesi için Kızgın Kuru Kaya (KKK) teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Uygun jeolojik ortamların araştırılması çalışmaları ve Hou vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen Dikili (İzmir) jeotermal sahasına yönelik simülasyon çalışması dışında ülkemizde KKK jeotermal sistemlerle ilgili herhangi bir detaylı bir araştırma yapılmamıştır. Ülkemizde jeotermal alanları jeolojik özelliklerine göre 7 grupta toplamak mümkündür (Burçak 2015). Bunlar; (1): Kısmi ergime ve Migmatitleşme/anateksi ile ilgili Batı Anadolu Jeotermal kaynakları, (2): Tersiyer Granitleri ile ilgili KB Anadolu jeotermal kaynakları, (3): İç Batı Anadolu-Güney Marmara bölgesinde Dağardı ofiyolitik kayaç napının yayılım sınırları içinde olan jeotermal kaynaklar, (4): Genç volkanizmanın etkin olduğu Orta ve Doğu Anadolu jeotermal kaynakları, (5): Doğu Karadeniz Bölgesi Kretase-Paleosen granitleri ile ilgili jeotermal kaynaklar, (6): Trakya ve Güney doğu Anadolu petrol bölgelerine ait jeotermal sistemler ve (7): Karstik alanlara bağlı olarak gelişen jeotermal kaynaklardır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda ülkemizde KKK projelerine çok uygun alanların olduğu tespit edilmiştir (Burçak 2015). Bunun en önemli göstergesi bahsi yapılan alanlarda derin ve orta derinliklerde sondajlarda kayda değer gradyan artışları ile karşılaşılmıştır. Bu sıcaklık değerleri ve yapılan gradyan hesaplamaları 5000 m derinlikte sondaj yapılması durumunda Batı Anadolu'da 450-500°C, KB Anadolu'da ise 350°C, İç Batı Anadolu-Güney Marmara bölgesinde 325°C, İç ve Doğu Anadolu'da 350-400°C değerlerine ulaşılabilirliğini göstermektedir. Aksaray ilindeki jeotermal sistemler 4. grupta yer almaktadır. Yukarıda belirtilen alanlardaki jeotermal sondajlarda yapılan gradyan hesaplamasına göre; ilk 4 grupta yer alan bölgelerde Kızgın Kuru Kaya (KKK) veya Geliştirilebilir Jeotermal Sistemler (GJS) için uygun alanların bulunduğu ve bu bölgelerde HDR/EGS projeleri için uygun alanların seçilmesi durumunda 5000m derinlik için 300°C'nin üzerinde kuyu taban sıcaklıklarına ulaşılabilirliği ifade edilmiştir (Burçak 2015).

### 3. MATERYAL VE METOT

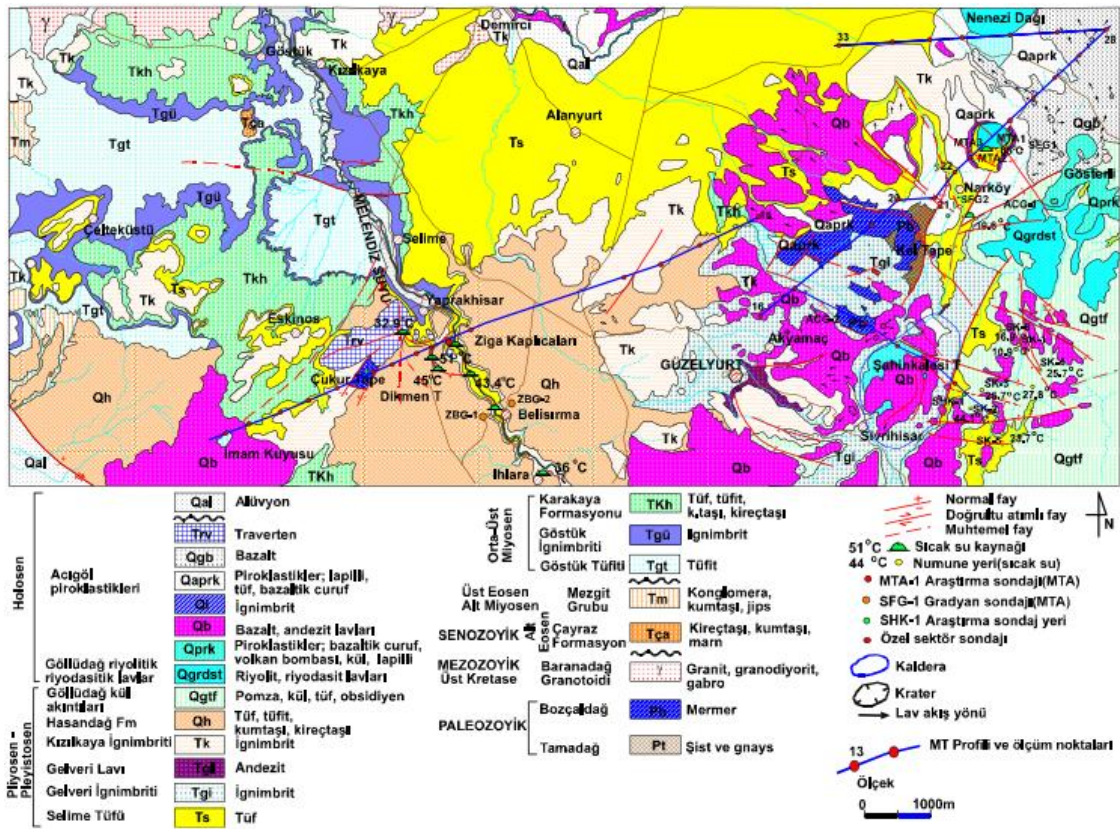
#### 3.1 Aksaray İli Jeolojisi ve Örnekleme

Hidrolik çatlatma deneylerinde kullanılacak magmatik kayaç numuneleri Aksaray ili, Ortaköy mevkiinden alınmıştır. Numuneler bölgedeki granit örneklerini işleyen ve İscehisar ilçesinden faaliyet gösteren bir firmadan temin edilmemiştir. Proje çalışmalarında deneysel çalışmalarda hidrolik çatlatma, fiziksel ve mekanik testler için örnekler alınmıştır.

Çalışmalarda Aksaray ilinin seçilmesinin nedeni bu bölgede yapılan manyetotellürik (MT), mikrogravite ve manyetik gibi jeofizik çalışmalarda yüzeyden itibaren 8000m derinlikten henüz soğumamış magma sokulumuna benzer jeolojik yapıların gözlenmesidir (Burçak 2006). Ayrıca Aksaray ili, Şahinkalesi bölgesinde Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından yapılan jeotermal sondajda 1700m derinlikte yaklaşık 150°C'lik kuyu dibi sıcaklığı tespit edilmiştir. Yine bu sondajda, bölgedeki HDR jeotermal sistemin muhtemel rezervuar kayacı olan granitik kayaçlar 900-1500m derinliklerinde kesilmiş olup, bu seviyelerdeki kuyu içi sıcaklığı 100-150°C olarak ölçülmüştür (Kara 2007).

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 kayaçlardan oluşan Mezgit grubu kayaları ve Orta Miyosen Kuvaterner yaşlı volkanik kayaçlar ve bunlarla ara tabakalı sedimanter birimler tarafından uyumsuz olarak örtülür (Şekil 3.1). 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-Şahinkalelesi kalderalarını birleştiren çizgiselliğin kesişme iz düşümünde yer almıştır. Hasan Dağı, Melendiz ve Acıgöl-Şahinkalelesi kaldera ve kraterleri ile bunlar çevresinde yer alan piroklastik koniler KD-GB doğrultulu bir hat üzerinde yer almaktadır (Burçak 2006).



Şekil 3.1 Aksaray ili ve çevresinin jeolojisi haritası (Burçak vd. 2006).

Bölgedeki jeotermal sistemin geçirimsiz kayaçlarını Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı ignimbrit, tüf ve bunlarla yaşıt karasal gölsel tortullar oluşturmaktadır. Bu birimler bölgede yapılan manyetotellürik (MT) çalışmalarında 1000 m derinliğe kadar uzandığı belirlenmiştir. Sığ rezervuarı Üst Eosen-Alt Miyosen yaşlı, çakıltaşı-kumtaşı ve jipsten oluşan Mezgit Grubu kayaçları; derin rezervuarı (500-1750 m) 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 mağmatik sokulum olarak yorumlanmıştır. Burçak (2006)'ya göre bu mağmatik sokulum bölgedeki jeotermal sistemin ısıtıcı kayacıdır.

Bölgedeki en önemli mağmatik kayaçlar Baranadağ granitoid-gabroid intrüzyonu olup, birim içindeki gabro türündeki kayaçlar “Karakaya ultramağiti” pltonik kayaçlar ise “Baranadağ granit ve granodiyorit pltonu” olarak isimlendirilmiştir (Burçak 2006.) alışmada kullanılacak olan mağmatik kayaçlar “Baranadağ granit ve granodiyorit pltonu” olarak adlandırılan pltonik kayaçlardan alınacaktır. Baranadağ intrüzyonu başta granit ve granodiyorit olmak üzere, mikrodiorit, metakuvarslı diyorit ve mikro monzogranit bileşimindeki mağmatik kayaçlar oluşturmaktadır (Seymen 1981). Söz konusu kayaçlar Aksaray ilinin kuzeyindeki Demirci ve Ortaköy bölgelerinde yayılım sunmaktadırlar.

### **3.2 Hidrolik atlatma Deney Düzeneginin Tasarımı ve İmalatı**

Kızgın kuru kaya (KKK) ve geliştirilebilir jeotermal sistem (GJS)'lerin Türkiye'de saha uygulamaları n deneysel çalışma seviyesinden öteye gidememiştir. Sahada bu tür bir eğilim olmaması bu alanda laboratuvar çalışmalarının da çok kısıtlı seviyede kalmasına neden olmuştur. Son zamanlarda enerji ihtiyaının gerek savaşlar gerekse çevresel faktörler gibi yeni kısıtlarla yeniden düzenlenmesi sebebi ile Kızgın kuru kaya ve geliştirilebilir jeotermal sistemler gibi arz güvenliği yüksek yenilebilir kaynakların çalışılmasının ve geliştirilmesinin nn açmıştır.

Ülkemiz açısından büyük bir potansiyel arz eden bu enerji kaynağı konusunda, ülkemiz sınırları içerisinde yeterli deneysel ve akademik çalışma maalesef ki yoktur. Bunun en önemli sebeplerinden biri ise ülkemizde hidrolik çatlatma ve yeraltı simülasyon cihazları ile bunlara bağlı destek ekipmanını barındıran bir laboratuvarın olmamasıdır.

KKK ve GJS'lerde yapılacak akademik ve deneysel Ar-Ge alışmaları bu alanda sahada yapılacak çalışmalar için kritik seviyede önemli n bilgilerin oluşmasına yardımcı olurlar. Saha basınç ve sıcaklık koşulları ile çatlatmada kullanılacak sıvı ve pompalama

hızları gibi değişkenlerin bölgedeki kayalar üzerindeki etkilerinin önceden bilinmesi ekonomik ve teknik açıdan çok önemlidir.

Hidrolik çatlatma işlemini üç eksenli bir sıkıştırma ünitesinde yapmak çatlak eğilimine etki eden kuvvetleri görmek açısından önemlidir. Aksi halde çatlak oluşumuna etki eden faktörler doğru olarak tanımlanmamış olur. Bu sebeple tez çalışması, temini ve ithalatı gerek finansal sebeplerden gerekse de teknik sebeplerden mümkün olmayan bu iki makinanın tasarlanması ve imalatını kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Bu tez kapsamında ve bu amaca özel olarak tasarlanan ve üretilen Gerçek Üç Eksenli Yeraltı Basınç ve Sıcaklık Simülasyon Hücresi ile hidrolik çatlatma pompası da çalışmanın özgün değerini artacağı söylenebilir. Türkiye’de imalatı bulunmayan bu iki makine ve bunlara bağlı yardımcı ekipmanlar için tez kapsamında 3 adet BAP projesi, bir adet teknopark ve bir adet KOSGEB projesi hazırlanmış ve yürütülmüştür.

Bu iki makine ile yapılması planlanan gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık koşulları altında hidrolik kayaç çatlatma deneyleri için yardımcı ekipmanlarda yine çalışmaya özel olarak tasarlanarak üretilmiş ve çalışmada kullanılmıştır.

### **3.2.1 Hidrolik Çatlatma ve Rezervuar Geliştirme Laboratuvarının Faaliyet Alanı**

Laboratuvarda bulunan gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık simülasyon hücresi ile hidrolik çatlatma pompası kızgın kuru kaya ve geliştirilebilir jeotermal sistemlerde bulunan ve rezervuar olma özelliği taşıyan kayalarda boşluk, çatlak ve süreksizlerin oluşumunu gerçek yer altı koşullarına benzer şekilde simule ederek bu boşluk ve çatlakların oluşturulma sürecini incelemeyi amaçlamaktadır. Bunun yanında sistem ileriki zamanlarda eklenebilecek çeşitli ekipman, izleme ve ölçme sistemlerine uyum sağlayabilecek şekilde tasarlanıp üretilmiştir.

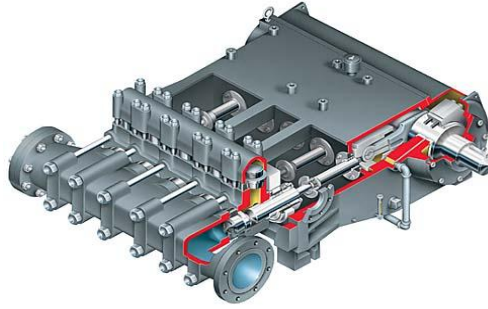
Faaliyet alanı olarak jeotermal enerji ve bunlara bağlı rezervuar kayalar düşünülmüş olsa da ekipman petrol ve doğalgaz çalışmalarında sıkça kullanılan hidrolik çatlatma yöntemi ile üretim yapan araştırma ve çalışmalarda da kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. Bu alanda kullanılan kayaç ve bunları çatlatmak da kullanılan kimyasal



ve bunlara bağılı ekipmanlarda üretilmiş olan pompa ve simülasyon hücresine kolayca adapte edilebilir.

### 3.2.2 Hidrolik Çatlatma Pompası ve Doldurma Pompası Tasarım ve Üretimi

Hidrolik çatlatma işlemlerinde sahada kullanılan çeşitli pompa tipleri mevcuttur. Özellikle pozitif deplasmanlı piston pompalar en çok kullanılan pompa türlerinden biridir. Bu tür pompaların yapısı içten yanmalı motorlara benzemektedir. Birbiriyle koordineli çalışan üç veya daha fazla piston silindirlerin içine çekilen viskozitesi yüksek sıvıları yüksek basınçlarda istenilen bölgeye doğru iterler. Bu pompalarda sürekli bir pompalama işlemi birbiriyle tandem çalışan pistonlarla gerçekleştirilir ve bu sayede çatlatılması istenilen bölgeye sıvı akışı sağlanır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Pozitif deplasmanlı piston pompa.

Sahada çalışan pompalara yapısal olarak çok benzeyen laboratuvar pompaları da pistonlu olarak tasarlanmıştır, ancak devamlı bir sıvı akışı sağlanması gerekmediği için laboratuvar pompaları genellikle tek pistonlu olarak tasarlanmaktadır. Bu alanda üretim yapan çeşitli firmalar bulunmaktadır.

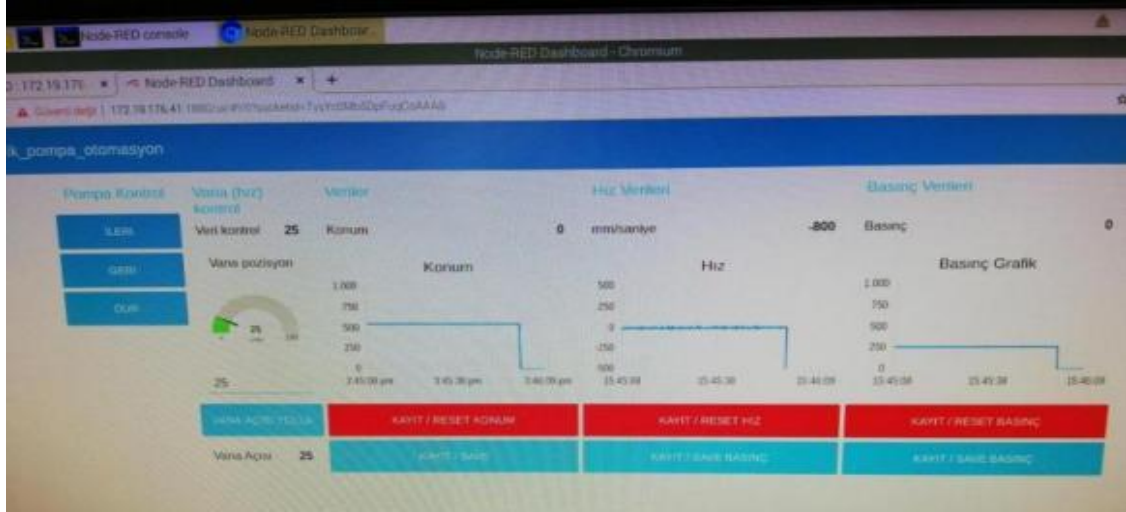
Bu alanda önde gelen firmaların ürün tasarımları ve spesifikasyonları dikkatli şekilde incelemiştir. Aynı zamanda laboratuvar şartlarında KKK ve GJS'lerde rezervuar kayaç olabilecek kayaçların çatlatılmasında ihtiyaç duyulan sıvı pompalama hızları, maksimum basınçlar, sensör ve yazılım özellikleri incelenerek tez kapsamında kullanacağımız hidrolik çatlatma pompasının CAD, elektronik ve yazılım tasarımları yapılmıştır.

Hidrolik ünite olarak 3 kW güce sahip bir asenkron motor kullanılmıştır. Bu motor maksimum 250 bara kadar basınç üretebilen bir hidrolik dişli pompaya güç vermektedir. Hidrolik pompanın akışkanı bastığı 70 cm storka sahip 30 tonluk bir hidrolik silindir sistemin diğer bir parçasıdır. Bu sistemin ileri geri kontrolü için 24 voltluk selonid valfler kullanılmıştır (Şekil 3.3).

Hidrolik çatlatma (şırınga) pompa elektronik olarak yükleme hızı, piston konumu ve basınç değerlerini ölçerek bunlarla ilgili verileri kaydedilebilmektedir. Bu sistemin kontrolü ve kayıt yapabilmesi içinde ek bir yazılım geliştirilmesi gerekmiştir. Gelecekte genişlemeye imkân verecek şekilde tasarlanan kontrol yazılımı iot altyapısı hazır bir şekilde tasarlanarak sisteme eklenecek otomatik dozajlama sistemi ve akustik emisyon gibi sistemlerle beraber çalışabilecek bir şekilde Node-Red kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.4).

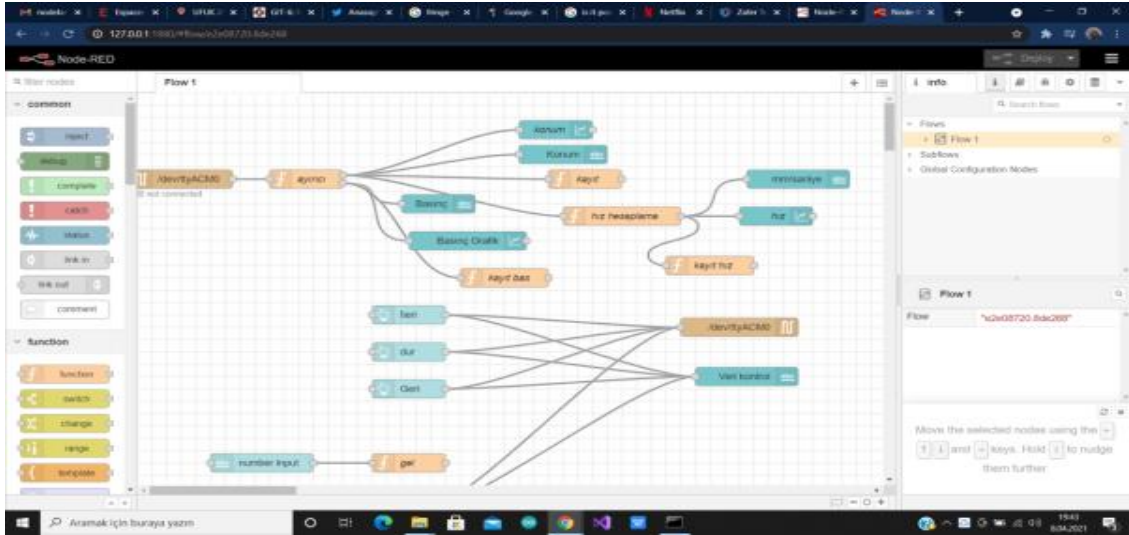


Şekil 3.3 Hidrolik çatlatma pompası.



Şekil 3.4 Çatlatma pompası kullanıcı ara yüzü.

İlerisi içinde genişlemeye imkân verecek şekilde tasarlanan kontrol yazılımını iot altyapısı hazır bir şekilde tasarlanarak sisteme eklenecek otomatik dozajlama sistemi ve akustik emisyon gibi sistemlerle beraber çalışabilecek bir şekilde Node-Red yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Node-Red yazılım geliştirme ekranı.

Pompa yazılımı ve işletim sisteminin bulunduğu ana kontrol ünitesi raspberry pi 4 olarak seçilmiştir. Sistemin 1 gb ramı bulunmaktadır. Sensör verilerini okumak ve piston komütasyonunu sağlamak için bir adet arduino uno kullanılmıştır. Sistem

içerisinde bir adet basınç sensörü ile bir adet de 500 mm'lik elektronik çetvel bulunmaktadır. Elektronik çetvelden alınan veriler hep piston konumu belirlemek hem de ilerleme hızını ölçmek ve kaydetmek için kullanılmaktadır (Şekil 3.6).



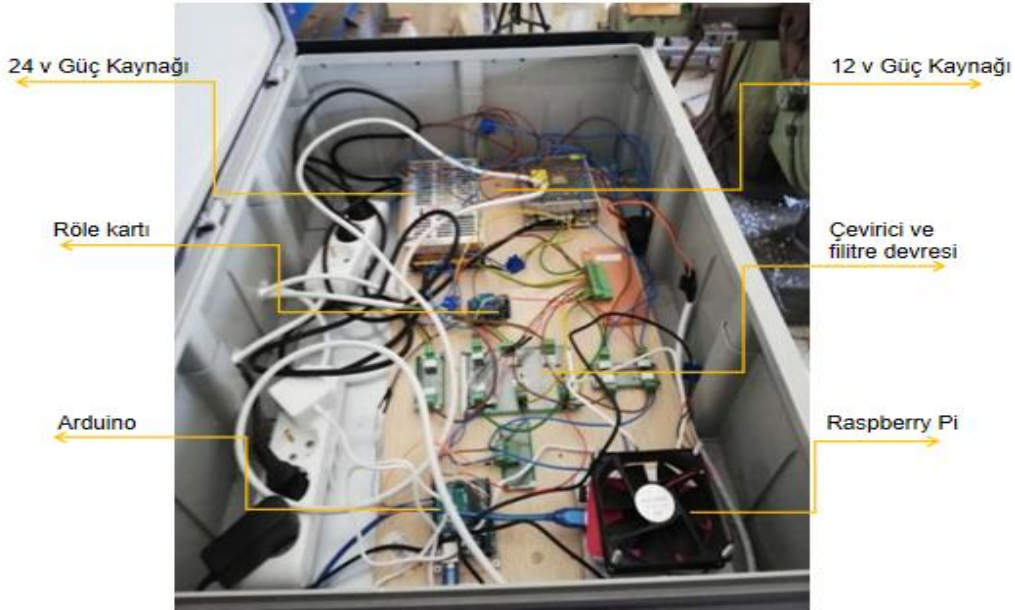
BCT TEKNİK ÖZELLİKLERİ		Teknik Özellikler	
Ölçüm Aralığı	100 miliBar ile 600 Bar	Boy Seçenekleri / Ölçme mesafesi	50 - 75 - 100 - 125 - 150 - 200 - 175 - 200 - 225 - 250 - 275 - 300 - 325 - 350 - 360 - 375 - 400 - 450 - 500 - 550 - 600 - 650 - 700 - 750 - 800 - 900 - 1000
Çıkış Sinyali	4...20mA (2 Telli) , 0...10VDC (3 Telli) , Diğer Seçenekleri Sorunuz	Çıkış Sinyalleri	Standart 4-20 mA Analog Çıkış ( opsiyonel 0-20 mA )
Mekaniksel Bağlantı	G1, G1/2, G1/4	Bağımsız Doğrusallık	± %0,3
Besleme Voltajı	4-20 mA: 12 ... 30 V <sub>DC</sub> 0-10 V: 14 ... 30 V <sub>DC</sub>	Soket Bağlantısı	4 pin dişi soket ( DIN 43650 )
Hassasiyet	%0,5	Besleme	24 VDC
Koruma Sınıfı	IP65	Çalışma Sıcaklığı	-30°C +100°C
Çalışma Sıcaklığı	-20°C +85°C arası	Ömür	100 milyon hareket
Gövde	Paslanmaz Çelik Gövde, Pirinç	Mekanik Bağlantı	Ayarlanabilir bağlantı ayakları ile
Ağırlık	70 gram	Mil Materyali	Paslanmaz Çelik
		Gövde Materyali	Eloksal kaplanmış alüminyum

a

b

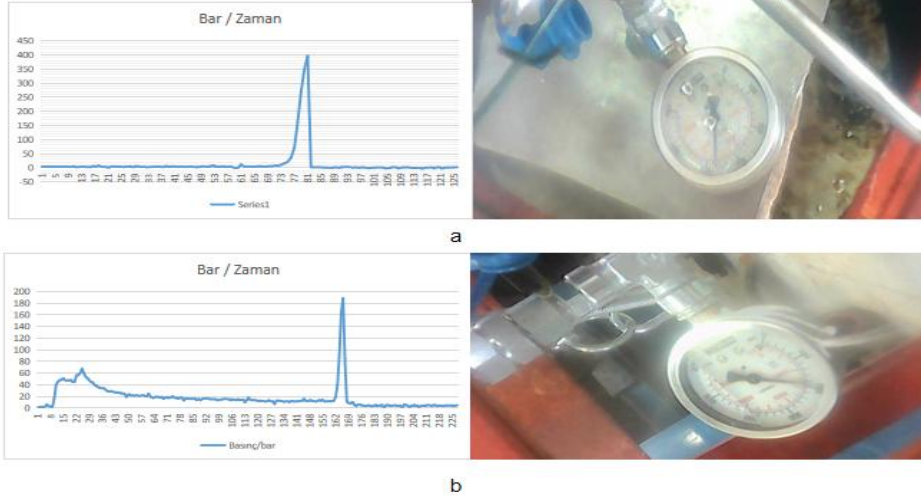
Şekil 3.6 a) Basınç sensörü b) Elektronik çetvel

4-20 miliamperlik sensörlerden alınan veriler hazırlanan devre kartları ile 1-5 volta dönüştürülerek Arduino'ya gönderilmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Hidrolik şırınga pompa elektronikleri.

Çalışmada kullanılan sensörlerinin verileri ham olarak ve basınç/zaman olarak kaydedilmektedir. Veriler Saniyede 4 veri alacak şekilde kodlanmıştır. Aynı zamanda çatlatma verileri manuel bir basınç saati üzerine yerleştirilen bir düzenek yardımı ile kamera kaydına alınmaktadır. Bu sayede alınan basınç verilerinin iki aşamalı olarak teyidi sağlanmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Sensör veri okuma testleri a) deney seti 1 b) deney seti 2.

Pompanın önemli noktalarından biri olan piston veya şırınga kısmının üretimi için çeşitli tornalama ve frezeleme işlemleri gerçekleştirilmiş. Laboratuvar içersinde bulunan torna ve freze kullanılarak çeşitli ebatlarda, çeşitli malzemeler kullanılarak ve çeşitli özelliklerde birkaç model geliştirilip test edilmiştir. Beklenen basınç iletim değerleri sağlanan bir modelde karar kılınmıştır (Şekil 3.9).



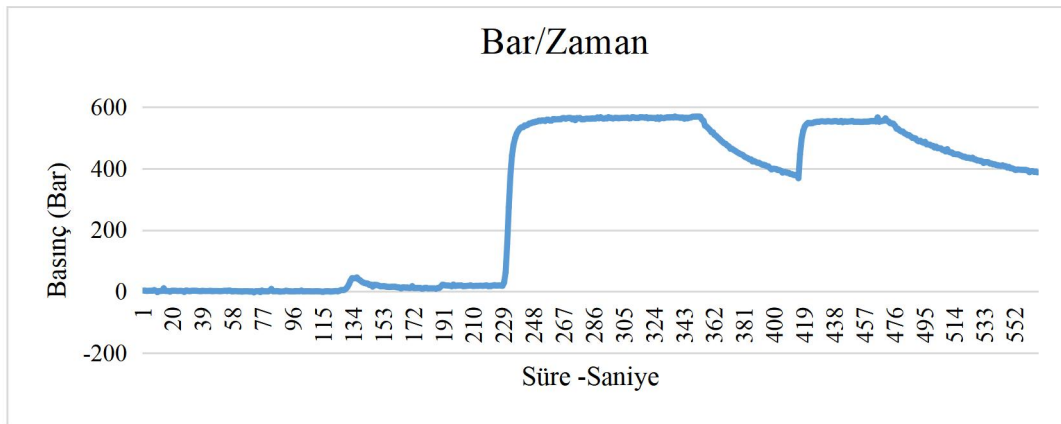
Şekil 3.9 Piston (şırınga) pompa iç parçaları.

Pompanın çalışma ve çatlatma deneyleri beton ve alçı kalıpla hazırlanarak yapılmıştır. Çatlatma enjektörü olarak kullanılması planlanan çeşitli şekil ve uzunlukta borularda bu çalışmalar sırasında denenmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Alçı ve beton kalıpların çatlatılması.

Alçı ve beton kalıplarda çatlatmanın başarılı olduğu görülmesinin ardından makinenin performans deneylerine devam edilerek traverten ve granit gibi doğal kayalarda da denemeler yapılmıştır. Tasarlanan ve üretilen makinenin çıkabileceği maksimum basınç düzeyi de bu deneyler sırasında ortaya çıkarılarak kayıt altına alınmıştır. Makinenin 600 bar basıncı belli bir süre için deney numunelerine tatbik edebildiği gözlenmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Maksimum basınç tespiti deneyi.

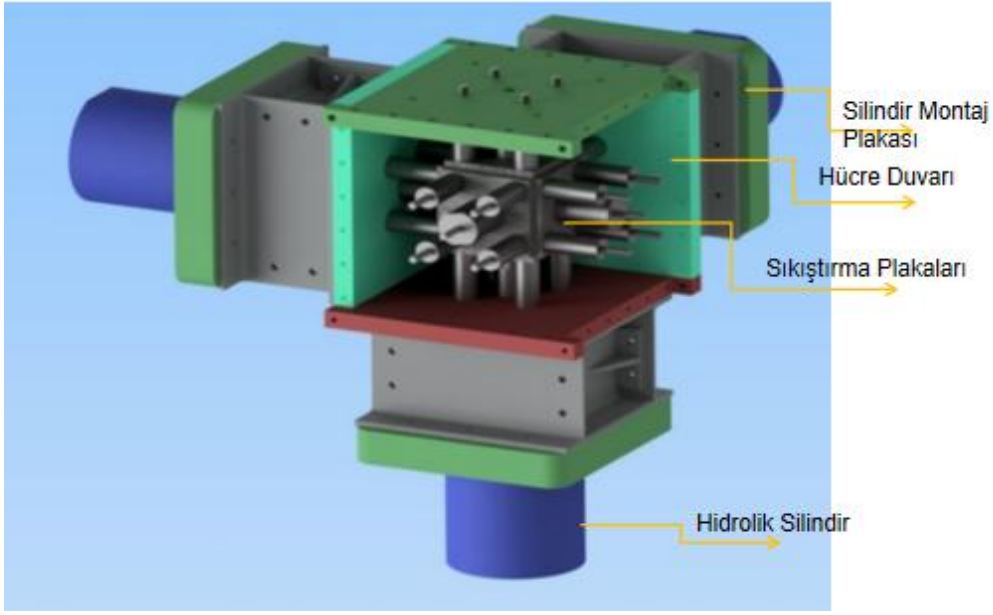
8,16, 25, 42 mm' lik delik çapları ve basınç boşluğu kombinasyonlarına bağlı olarak ve literatürde yapılan granit çatlatma deneylerinde gözlemlenen 100 ve 250 bar arası bir çatlatma basınçları göz önüne alındığında makinenin ulaştığı çatlatma basıncının yeterli olacağı anlaşılmıştır.

### **3.2.3 Gerçek Üç Eksenli Yeraltı Basınç ve Sıcaklık Simülasyon Hücresi Tasarımı ve Üretimi**

Bu makinenin yapılış amacı her üç ekseninde birbirinden bağımsız olarak hareket edebilen silindirler yardımıyla numunelere basınç ve sıcaklık uygulamaktır. Bunun yanında, belirlenmiş sıcaklık ve basınç koşullarında tutulan numunelere hidrolik çatlatma pompaları aracılığıyla çatlatma işlemi de belirlenen basınç ve sıcaklık koşullarında uygulanabilmektedir.

Makine birçok değişik boyutta kayaç numunesini test edebilmesi için değiştirilebilen plakalara sahip olacak bir şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu sayede dikdörtgen ve küp numuneler test edilebilmektedir. Numuneler minimum (10x10x10cm) en maksimum (40x40x40cm) boyut aralığında olabilmektedir. Tek ekseninde 200 tona kadar kuvvet uygulanabilmektedir. Burada basınç yüzeyde kullanılan plakaya göre değişmektedir (Şekil 3.12).

Gerçek üç eksenli sıkıştırma hücresi üç ana yapıdan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bölümler çelik U profillerden oluşan şase, 50mm kalınlığındaki plakalardan oluşan iç hücre ve hidrolik ekipmanlardır. Bunu yapmadaki amaç en verimli tasarımın bu olduğu sonucun yanında üretim ve montaj gibi kısıtlarda göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmesi en mümkün model bu şekilde tespit edilmiştir.



**Şekil 3.12** Sıkıştırma hücresi iç görünümü.

Bu aşamadan sonra makinenin CAD çizimlerine geçilmiş ve CAD çizimlerinde Inventor programı kullanılmıştır.

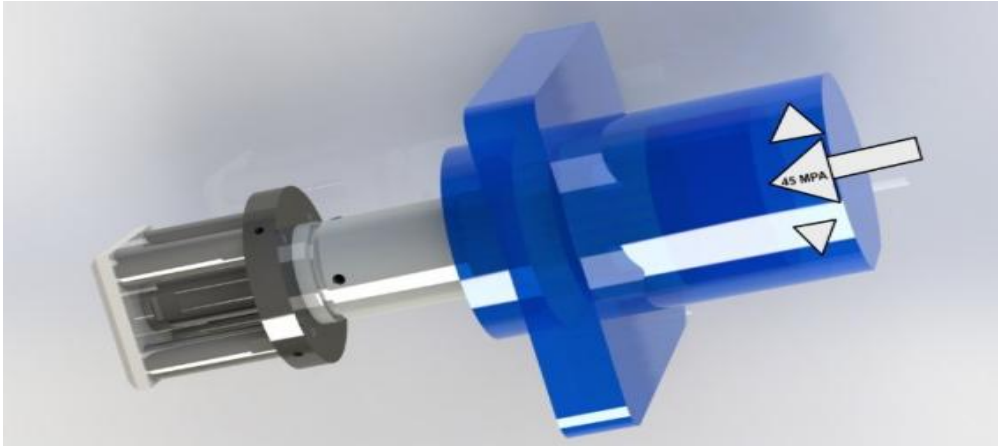
Şase üzerinde hem kaynak hem de vidalı birleştirme yöntemleri uygulanmıştır. Bazı yerlerde kaynağın uygulanması esnasında şaseyi çarpmaması için önce vidalama yapılarak köşeler sabitlenmiştir. Hücreyi oluşturan plakalar 50 mm çelikten imal edilmiştir. 50mm lik plakalar hücrenin dış çeperini oluşturmaktadır ve bu çeliğin (ST-52) akma mukavemeti 355 MPa'dır. Hücre içi sıkıştırma plakalarında ise farklı bir çelik kullanılmıştır. İç plakalarda C45e çelik kullanılmıştır. C45e çeliğin akma mukavemeti ise 430 MPa'dır.

Hücrenin mekanik dizaynı tamamlandıktan sonra, bir CAD modeli oluşturuldu. Ardından, bu CAD modeli, hücrenin deneyler sırasında maruz kalacağı kuvvetlere karşı nasıl deforme olacağını belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak test edildi. Bu testler, bilgisayar tabanlı ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirildi.

Gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek ve sonuçların daha doğru olması amacıyla farklı yükleme modeli geliştirilerek ANSYS test ayarları bu modeller üzerinden çalıştırılmıştır. Yükleme modellerinden bir tanesi, yükleri direk olarak şaseye ve plakalara uygulanan



direk yüklemeli modelidir. Bu model ayarlamaları ve işlenmesi daha kolay ve hızlı sonuç alınabilen bir model olmasına rağmen gerçek ortam koşullarına en yakın model değildir. Bu sebeple üç eksenli yükleme için daha gerçekçi olabilecek başka bir senaryo geliştirilmiştir. İkinci senaryoya göre yükler direk olarak şase ve plakalar yerine hidrolik silindir içine, pompanın yan basıncı olarak uygulanmıştır. Hücrenin pistonu ve buna bağlı elemanlar hareketli olarak tasarlanarak, silindir içerisindeki basınç ile bu ekipmanların basıncı hücre içerisindeki kayaç numunelerini gerçek dünyadaki gibi iletmesi sağlanmıştır. Silindirlerin her birinin içerisindeki basınç 45 MPa olacak şekilde ve sıvı basıncı olarak silindirin her yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanmıştır. Bu şekilde gerçek dünyaya daha yakın bir model elde edilmiştir (Şekil 3.13).



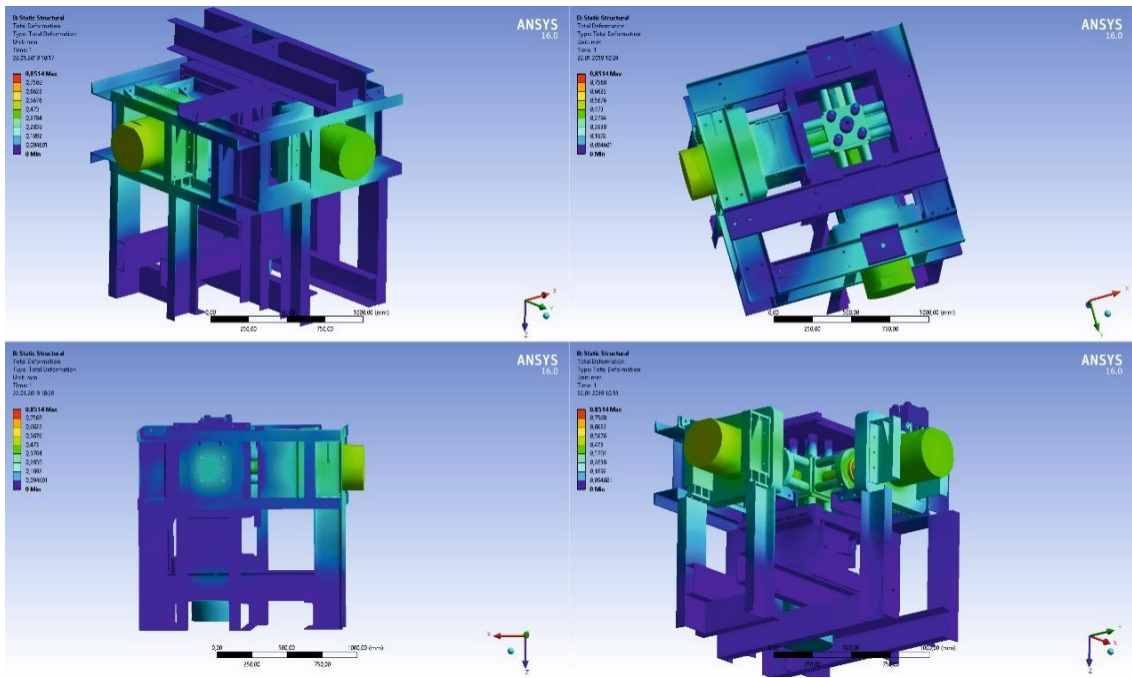
**Şekil 3.13** Silindir içi basınç modeli.

Bu şekilde belirlenen simülasyon ayarlarının ANSYS programında doğru bir şekilde yapabilmek için ve bu ayarlarda hücrenin dayanım testlerini yapabilmek için ANSYS test ayarları da uygun şekilde düzenlenmiştir. Bu düzenlemelere göre; şase ve hücre üzerindeki bütün bağlantılar kaynaklı olarak ayarlanmıştır. Sadece silindir pistonu ve silindir arasındaki bağlantılar sürtünmesiz olarak seçilmiştir. Böylece basınç makina üzerinde noktalara düzgün ve gerçekçi bir şekilde iletilebilmiştir. Bütün modelin destek noktaları ise şasenin yerle temas eden bacakları olarak seçilmiştir.

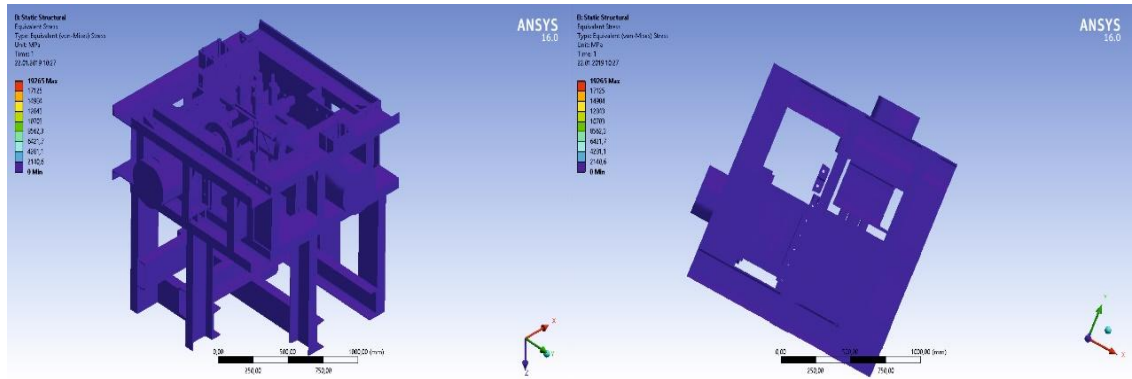
Toplam deformasyon analizleri genel olarak göstermektedir ki, tam yükleme, 45 MPa'lık basınç sırasında hücre içerisinde bazı deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonlardan en yükseği 0.86mm ile yatay hidrolik piston kollarında meydana

gelmektedir. Şase üzerindeki en yoğun stres bölgeleri ise pistonlarla sıkıştırma plakaları arasındaki bağlantılar üzerinde görünmektedir (Şekil 3.14).

Toplam deformasyon analizinde yatay eksenlerde bulunan malzemelerin bu ekseninde bulunan iki adet 200 tonluk silindir sebebi ile daha fazla deformasyona uğradığı görülmektedir. Von Mises stres analizine göre ise makine üzerinde herhangi bir plastik deformasyon gözükmemektedir. Makine güvenli alan içinde bu yükler altında çalışabilmektedir (Şekil 3.15).



Şekil 3.14 Toplam deformasyon analizi sonuçları.



Şekil 3.15 Von Mises gerilme analizi sonuçları.

İmalat süreci sırasında ise asıl CAD modeline çoğunlukla bağlı kalınmaya özen gösterilmiştir. Ancak gerek makinenin büyüklüğü gerekse imalat şartlarının güçlüğü bazı ufak değişikliklerin yapılmasını da kaçınılmaz hale getirmiştir.

Büyük ölçüde CAD modeline sadık kalınarak yapılan hücrenin son hali Afyonkarahisar sanayisinde yaklaşık bir senelik bir imalat süreci neticesinde tamamlanarak Afyon Kocatepe üniversitesindeki laboratuvarına yerleştirilmiştir. Pompanın Üretiminde NPU 200 profiller şasede, ST52 çelik levhalar hücre yapısında ve C45E iç sıkıştırma plakalarında olacak şekilde kullanılmıştır. İmalat sırasında birleştirme elamanı olarak vidalar ve kaynak beraber kullanılmıştır (Şekil 3.16).



**Şekil 3.16** Gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık hücresi üretimi.

Gerçek üç eksenli sıkıştırma ve basınç hücresinde bir adet vince ve bir adet de hücre içerisine montajlanmış kamera bulunmaktadır. Vinç üzerindeki kamera, manuel basınç saatini, hücre içerisindeki kamera ise çatlatma anında görüntü almak ve hücre içerisindeki plakaların birbiriyle olan konumunu ve hareketlerini gözlemlemek için kullanılmaktadır (Şekil 3.17). Gerçek üç eksenli yeraltı basınç ve sıcaklık simülasyon hücresi üretimi, birleştirilmesi ve kapak açılma fonksiyonunu gerçekleştirebilmesi için bir adet vinçte hücre ile beraber imal edilmiştir (Şekil 3.18).

### 3.2.4 Yardımcı Ekipman ve Teçhizatlar

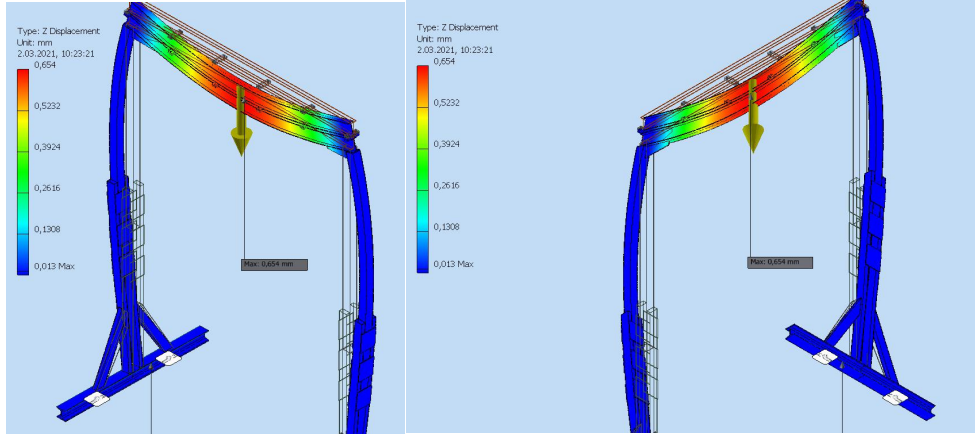
Hidrolik çatlatma ve rezervuar oluşturma laboratuvarının merkezinde iki adet makine olacak şekilde tasarlanmıştır. Buna ek olarak modüler bir tasarıma sahip olan laboratuvar gelecekte yapılacak geliştirmelere ve eklemelere uyum sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Laboratuvarın merkezindeki gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç simülasyon hücresi ile hidrolik çatlatma pompasının etrafına bu makinelerin düzgün ve efektif çalışmasını sağlamak için de birkaç önemli ekipman tasarlanarak eklenmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.17 Hücresinin kamera konumları.



Şekil 3.18 Gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık hücresi.



Şekil 3.19 Vinç deformasyon analizi.

Gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç simülasyon hücresinin taşınması, montajı ve bakımı gibi ihtiyaçlar çalışma başlamadan önce detaylı olarak düşünülerek tasarımda bu kısıtlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Bağlantı noktalarının bir kısmının vidalı bir kısmının kaynakla yapılması, maksimum genişlik, uzunluk, yükseklik ve maksimum parça başı ağırlık gibi hesaplar bu tasarımın bir parçası olmuştur. Ancak montaj, sökme, ayarlama, takma ve bakım gibi işlemlerin yapılması için her halükârda bir vincin yapılması da gene tasarımın başından beri düşünülmüş ve kısıtlarda gene bu vincin muhtemel kabiliyetlerine göre belirlenmiştir. Vinç özellikle montaj, sökme, takma ve ayarlama gibi işler için çok faydalı olsa da aslında en önemli görevi litostatik basıncın simüle edildiği eksende bulunan ve makinanın en ağır ve sağlam parçalarından biri olan kapağı deneyler öncesinde ve sonrasında açmak ve kapamak için kullanılmaktadır. Kapak ağırlığının 500 kilo civarı olduğu hesaplanmış ve buna istinaden vincin tasarımı ve simülasyonu da 1 tonluk deformasyon analizleri ile şekillendirilmiştir. Tasarlanan sistemin analizleri Autodesk Inventor programında simüle edilmiş ve en zayıf noktada 0,65 mm lik bir deformasyon olduğu görülmüştür. Bu deformasyonun güvenli olduğu kararına varılarak üretime geçilmiştir (Şekil 3.19).

İmalatı laboratuvar içindeki atölyede gerçekleştirilen vinç, boyama işlemi ardından gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık simülasyon hücresinin laboratuvara taşınmasında ve laboratuvarda tekrar monte edilmesinde önemli bir rol oynamıştır (Şekil 3.20).



**Şekil 3.20** Vincin imalatı ve kullanılması.

Bir diğer yardımcı ekipman ise ön yükleme pompasıdır. Ön yükleme pompası sistemdeki 5, 6 metreye varan hortum uzunlukları sebebi ile çatlatma pompasının küçük hacmi ile bir kaç seferde doldurabileceği bu hattı tek seferde doldurmak üzere tasarlanan hidrolik dişli bir pompa sistemidir. Sistem üzerinde 250 bar basınca çıkabilen ve 17 lt/dk lık debiye sahip bir dişli pompa mevcuttur. Sistem 0.25 kW'lık bir elektrik motoru sayesinde hareket kazanmaktadır. Sistem üzerinde çatlatma sıvısının yeniden kullanılabilmesi için süzgeçli bir depo sistemi de mevcuttur (Şekil 3.21).



**Şekil 3.21** Ön yükleme pompası.

Çatlatmada kullanılacak doğaltaş numunelerine 42mm den 16mm'ye kadar çeşitli ebatlarda delikler açılarak pek çok deneme yapılmıştır. Bu deliklerin delinmesi için B40 GSM optimum marka şanzımanlı matkap tezgâhı kullanılmıştır.

Doğaltaş numunelerine yerleştirmek ve çatlatma sıvısını çatlatma odasına enjekte etmekte kullanılan enjektörler için çeşitli özelliklerde alüminyum ve çelik borular kullanılmıştır. Bu boruları işlemede Foreman marka TH2866 marka torna tezgâhı kullanılmıştır. Aynı zamanda hidrolik çatlatma pompasının şırınga kısmının parçalarının işlenmesinde de aynı torna tezgâhı kullanılmıştır.

### **3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu**

Tezin konusu olan granit kayaçların hidrolik yöntem kullanılarak çatlatılmasının yanında, çalışmada kullanılan makine-teçhizat ve kimyasallarında test edilmesi ve birbiri ile verimli şekilde çalışması için birkaç çeşit doğal taş, beton ve alçı türündeki örnekler üzerinde deneyler yapılmıştır.

Hidrolik çatlatma pompasının kapasite ve kalibrasyon ayarlamalarında beton, alçı, traverten ve granit numuneleri kullanılarak makinanın test edilmesi ve geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çatlatma basıncı tespiti deneylerinin yanında kimyasal dübel ve çatlatma enjektörünün kayaç içerisinde tutulması içinde gerek Traverten gerekse de granit numunelerde pek çok deney yapılmıştır.

#### **3.3.1 Traverten Numunelerinin Hazırlanması**

Sedimanter kayaç grubunda yer alan travertenlerin GJS'lerde rezervuar olarak kullanıldığı çeşitli çalışmalar mevcuttur. Ancak KKK jeotermal sistemlerde çoğunlukla granit türündeki derinlik kayaçları rezervuar olmaktadır. Bu çalışmada kolay kesilebilirlik ve nispeten maliyetinin düşük olması ve çatlatma basınçlarının düşük olacağı öngörüsü nedeniyle ön çatlatma ve kalibrasyon deneylerinde travertenler seçilmiştir.

Çalışmada kullanılmak üzere 20x20x20cm boyutlarında küp şeklinde Denizli bölgesine ait 25 adet traverten numunesi Afyonkarahisar'daki Vizyon Doğaltaş firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.22)



Şekil 3.22 Ön çatlatma deneylerinde kullanılan traverten örnekleri.

### 3.3.2 Granit Numunelerinin Hazırlanması

Tez çalışmasının ana konusunu oluşturan Aksaray bölgesine ait granit numuneleri hem kalibrasyon ve ön test deneyleri hem de gerçek sıcaklık ve basınç koşulları altında rezervuar oluşturmaya yönelik hidrolik çatlatma deneylerinde kullanılmıştır.

20x20x20cm ve 5x5x5cm boyutlarındaki granit örnekleri Aksaray Şahinkalesi bölgesi granitlerini işleyen ve İscehisar'da faaliyet gösteren Yıldızlı Granit firmasından temin edilmiştir. Bunun için öncelikle 240 cm uzunluğunda 20 cm kalınlığında ve 90 cm eninde kapak altı parça ile 5cm kalınlığında ve 240cm uzunluğunda ve 90 cm eninde granit parçası karakterizasyon deneylerinde kullanılmak üzere firma tarafından teslim edilmiştir (Şekil 3.23).

Deneylerde kullanılan küp şeklindeki granit örnekleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Afyon Meslek Yüksekokulu Mermer Teknolojisi Programı Mermer Atölyesi'nde boyutlandırılmıştır (Şekil 3.24). Bunun için granit parçası ilk olarak boydan 20cmlik uzun parçalar halinde ebatlandırılmış, sonrasında 20x240 cm olan parçalar boylamasına



ikiye bölünmüştür. Boyuna kesme işlemi sırasında elmas testere ve su kullanılmış taşa herhangi bir mekanik zarar verilmemeye özen gösterilmiştir (Şekil 3.25).



**Şekil 3.23** Deney örnekleri için temin edilen kapak altı granit parçaları.

Boydan ebatlama işlemi sonrası elde edilen uzun parçaların tezgâha düzgün koyulabilmesi için enden ikiye bölünmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu iş için bir el spirali kullanılmıştır (Şekil 3.26).



Şekil 3.24 Parçanın tezgâha yerleştirilmesi.



Şekil 3.25 Granit parçasının boylamasına ikiye bölünmesi.



**Şekil 3.26** Boydan ebatlama işlemi ve parçaların taşınması.

Enine ebatlama işlemi sonrası 20x20x20cm lik küpler elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra ince kapak parçasının ebatlanmasına geçilmiştir. İnce kapak parçası fizikomekanik ve çeşitli karakterizasyon testlerine tabii tutulacak parçaları elde etmek için 5x5x5 cm'lik küpler ve 5x30 cm boyutlarındaki dikdörtgenler prizması şeklinde kesilerek ebatlanmıştır (Şekil 3.27).

Bu İşlemler neticesinde hidrolik çatlatma ve Kayaçların fizik mekanik, petrografik, kimyasal ve kafes yapılarını belirlemekte kullanılacak kayaçların ebatlama işlemleri neticelenmiştir.



Şekil 3.27 Deney numunelerinin ebatlanması.

### 3.4 Hidrolik Çatlatma Deneyleri

Hidrolik çatlatma deneyleri iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle hidrolik çatlatma deneylerinde kullanılacak makine, ekipman ve kimyasalların test edildiği ön çatlatma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada gerçekleştirilen deneylerden hareketle gerekli ekipman ve kimyasallar belirlenmiş ve daha sonra gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık hücresindeki çalışmalara geçilmiştir.

#### 3.4.1 Ön Çatlatma ve Kalibrasyon Deneyleri

Ön çatlatma deneylerinde iki ana unsurun belirlenmesi ve kalibre edilmesi hedeflenmiştir. Bunlar; (1): Çatlatma sırasında kayaç ve hidrolik çatlatma pompası arasındaki aparatlar ve kimyasalların belirleneceği deneyler, (2): Çatlatmanın en uygun şekilde oluşabilmesi ve ekipmanların sağlığı açısından çatlatma basıncının

ayarlanabilmesi için yapılan yüzey alanı ve basınç odası boşluğunun ayarlandığı deneyler şeklindedir.

### 3.4.1.1 Epoksi, Kayaç ve Çatlatma Enjektörü Arasındaki Deneyler

Doğaltaşların çatlatılması öncesinde çatlatma pompasının performansının görülmesi için alçı ve beton numunelerinde çatlatma deneyleri yapılmıştır. Pompanın doldurma, basma ve çatlatma gibi unsurlarının test edildiği bu deneylerde alçı ve beton numuneler ilk çeşit çatlatma enjektörleri ile birlikte kalıplanarak kurutulmuştur. Gerek alçı, gerekse beton numunelerde alüminyum enjektörlere herhangi bir işlem yapmaya gerek kalmadan kaynaşma sağlandığı, enjektör basıncının kayaca iletildiği ve çatlamanın gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Ön çatlatma deneylerinde kullanılan alçı örnekleri.

Alçı ve beton numunelerdeki çatlatma işlemlerinin başarı ile tamamlanmasının ardından traverten numunelerinin hidrolik olarak çatlatılması deneylerine geçilmiştir. Ön çatlatma deneylerinin traverten numunelerinde yapılmasının sebebi çatlatma basıncı için gereken boşluk miktarı, enjektörün yapıştırma miktarı, kullanılacak epoksi cinsi gibi parametrelerin belirlenmesidir.

Ön çatlatma deneylerinde kullanılan enjektörlerin ve travertenlerin gereken çatlatma basıncına kadar bağlı bir şekilde su sızdırmadan kalması gerekmektedir. Bu yüzden

doğaltaş deneylerinden kullanılacak olan traverten ve granit numunelerine çeşitli boyutlarda delikler açılarak, bu deliklere alüminyum ve çelik enjektörler yerleştirilmiştir.

Özellikle granit numunelerinde enjektörün delikte sızdırmadan, stabil şekilde durması için birçok iyileştirme yapılması gerekmiştir. En başta deliklerden basınç uygulandığı sırada fırlayarak kurtulan enjektörler için uygun bir kimyasal dübel seçilmiştir. Çeşitli markalarda 3 adet kimyasal dübel arasından METSAN firmasına ait EMS DUBELL F.1311 model kimyasal dübel kullanılmasına karar verilmiştir. Seçilen kimyasal dübelin kayaç içerisinde tutunmasının artırılması amacı ile hem enjektöre hem de kayaç yüzeyine kanallar açılmış ve epoksinin tutunma kuvveti artırılmıştır (Şekil 3.29).



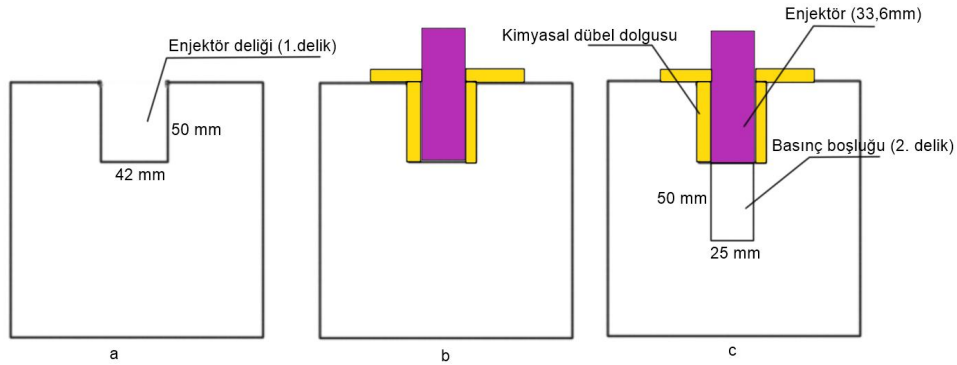
**Şekil 3.29** Granit ve enjektöre açılan kanallar.

Bu işlemlerin gerçekleşmesi için torna tezgâhı ve kalıpcı taşlamaları kullanılmıştır. Ayrıca enjektörlere de boru anahtarı kullanılarak 1/2" ince boru dişleri açılmıştır. Enjektör açılan deliğe deliklere yerleştirildikten sonra delik ve enjektör arasına kimyasal dübel uygulanmaktadır. Kimyasal dübel kuruyup, kürleşmesi için yaklaşık 4 saat boyunca 60°C sıcaklığındaki etüvde kurumaya bırakılmıştır.

### 3.4.1.2 Çatlatma Yüzey Alanı ve Basınç Odası Büyüklüğünün Tespiti Deneyleeri

Kullanılacak taşların ortasına 25 mm çapında 10 cm derinliğinde delik açılarak, bu deliklere 25 cm dış çaplı 14 mm iç çaplı alüminyum enjektörler yerleştirilmiştir. Başlangıçta yapılan bu deneylerde herhangi bir çatlatma odası bırakılmamıştır. Ön çatlatma deneyleri sırasında kayalara herhangi bir aksel basınç tatbik edilmemiştir. Bu şartlar altında traverten numunelerinde 250 ila 400 bar'a kadar çatlatma basınçlarına ulaşılmıştır. Herhangi bir aksel basıncın olmadığı bir ortamda bu kadar yüksek basınçlara ulaşılması deneyin ilerleyen aşamalarında hücre içi aksel basınçlarında eklenmesi ile kayacın içerisinde çatlak oluşturacak basınca ulaşamaması ihtimali nedeniyle, bu basıncın düşürülmesine yönelik ayarlamalar yapılmıştır (Şekil 3.30).

Çatlatma basıncını düşürmek için yapılan çalışmalar, çatlatma sıvısının taşla temas alanını artırarak çatlatmada uygulanan kuvveti artırmak yönünde iyileştirmelerin yapılması şeklinde olmuştur. Öncelikle dış çapı 33.6 mm iç çapı 25 mm olan 1/2" çelik doğalgaz borularından yapılan enjektörlere geçilmiştir. Bu suretle çap büyütülmüş ve basıncın uygulandığı z ekseninin taban çapı 14 mm den 25 mm'ye çıkarılmıştır.



**Şekil 3.30** Delik açma ve enjektör yerleştirme aşamaları a) Enjektör deliğinin delinmesi b) Enjektörün yerleştirilmesi ve kimyasal dübelin uygulanması ve c) Kürleşme sonrası deliğe çatlatma odası için ikinci deliğin açılması.

Bir diğer basınç düşürmeye yönelik iyileştirme ise yanal olarak da sıvının kayac ile temas edebileceği basınç boşlukları oluşturmak olmuştur. 42 mm çapında ve 5 cm derinliğinde açılan birincil deliğe 33.6mm çapa sahip enjektörler yerleştirilmiştir. Enjektör ve kayac arasındaki boşluğa kimyasal dübel uygulanmıştır. Daha sonra kayac

etüvde kurutulmaya bırakılmıştır. Kurutma ve kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra kayacın enjektörünün içinden 25mm çapında ikinci bir delik açılmıştır. Bu ikinci deliğin derinliği de yine 5 cm'dir.

Böylelikle basınç boşlukları oluşturulmuştur. Basınç boşlukları ile hedeflenen çatlatma basıncını düşürme işlemleri için çeşitli testler yapılmıştır. Bu testlerde traverten numuneler kullanılmıştır. Testlerde en düşüğü 53 bar, 138 bar ve 173 barlık değerler ölçülmüştür. Ortalama olarak 121.3 barlık bu değer ile bir önceki 250 bar ile 400 bar arasında değişen deneylerin altında bir değer olarak gerçekleşmiştir.

Travertenlerde yapılan bu deneyler sonrasında granit numunelerine geçilmiştir. Granit numunelerinde de basınç odası boşluğu oluşturularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Granit kayalarda yapılan deney sonuçlarında ortalama çatlatma basıncı 54.5 bar olarak tespit edilmiştir. Granit taşların daha traverten kayalara göre daha düşük basınçlarda çatlama sebebiyle basınç odası için ayrılan boşluğun bu kayaç türü içinde yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

### 3.4.2 Hidrolik Çatlatma Deneyleri

Hidrolik çatlatma deneyleri için çalışmada tez çalışması kapsamında üretimi yapılan Gerçek üç eksenli basınç hücresi, hidrolik şırınga pompa ve ön yükleme pompası birlikte kullanılmıştır. Çatlatma işlemi için daha önceden hazırlanan ve çatlatma enjektörü montajı gerçekleştirilmiş olan kayaç numunesi gerçek üç eksenli basınç hücresi içine yerleştirilmiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 Kayaçların basınç hücresine yerleştirilmesi.



Bu aşamadan sonra kayaç numunesi ve kapak arasında basınç oluşmasını sağlayacak olan üst destekler yerleştirilerek makine kapağı kapatılmıştır. Vinç kullanılarak kapatılan kapağın üzerindeki delikten ek boru aparatı yerleştirilerek çatlatma enjektörüne boru anahtarı yardımıyla sıkılmış, kapak kapatıldıktan sonra enjektöre hortum bağlanmıştır (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 Hortum bağlantıları ve üst kapak destekleri.

Kapak kapatılıp vidaları sıkıldıktan sonra 3 adet 200 tonluk silindir vasıtasıyla kayaç numunesine birbirine dik yöndeki üç eksende (X, Y, Z) farklı basınçlar uygulanmıştır. Çalışmada X ekseninden 40 bar, Y ekseninden atmosfer basıncı olan 1 bar ve Z ekseninden de 50 bar uygulanmıştır. Böylece en yüksek basıncın litostatik basınç olduğu dikey eksen basıncı ile yanal eksenlerde çatlak oluşum doğrultusunun rahatça gözlemlenebileceği bir fark oluşturulmuştur. Aynı zamanda atmosfer basıncı altında çatlatılan granit numuneleri ile yüzeylerine farklı basınçlar uygulanan granit numuneleri arasında çatlatma basıncı bakımından bir ilişki olup olmadığı incelenmiştir (Şekil 3.33).

Çatlatma işlemi ilk olarak %25'i bor yağı olan yağ-su karışımının ön yükleme pompası deposuna doldurulması ile başlanmaktadır. Ön yükleme pompası hem hidrolik şırınga pompayı hem de yaklaşık 5 metreyi bulan hortumların içerisini çatlatma sıvısı ile doldurmaktadır. Buradaki amaç yavaş çalışan, sıvı kapasitesi düşük hidrolik şırınga pompanın bu ön doldurma işlemi sırasında zaman kaybetmesini önüne geçmek ve hidrolik şırınga pompanın şırınga haznesini hızlı ve tam olarak doldurabilmektir.



Şekil 3.33 Eksenel basınçların ayarlanması.

Ön doldurma işleminin gerçekleşmesinin ardından Hidrolik şırınga pompa ile üç eksenli basınçlar altında bulunan kayaç numunesine basınç yüklemesi yapılmaktadır. Bu esnada hücre içerisinde bulunan kayaç numunesi gerek anlık veri üreten grafik ara biriminden gerekse de hücre içerisinde bulunan video kameradan izlenebilmektedir. Basınç zaman grafiğinde meydana gelen ani yükselme ve pik değerden sonra görülen ani düşüş klasik bir başarılı çatlatma operasyonunu işaret etmektedir. Basınç zaman grafiğinde oluşan yükselme fakat tekrar düşmeme, sabit kalma veya yükselmeme gibi durumlar ise bazı sorunların oluştuğuna işaret etmektedir. Bu gibi durumlar için hücre içi kamera sorunun ne olduğu konusunda fikir verebilirken bazı durumlarda kapağın açılıp numunenin çıkarılması gerekmektedir.

Çatlatma işlemi tamamlandıktan sonra eksenel basınçlar sıfır değerine indirilip hortumlar çıkarılır. Bunların ardından kapak açılarak numune hücre içerisinden alınır.

Hidrolik çatlatma deneyleri için üç adet numune hazırlanmış ve çatlatılmıştır. Bu numuneler seçilirken dış yüzeylerinde görünen bir hasar veya çatlak olmamasına dikkat edilmiştir. Numuneler üzerine yönleri ve numaraları işaretlenmiş ve bu şekilde hücre içerisine konulmuştur.

### 3.5 Granit Örneklerine Uygulanan Fiziko-Mekanik Testler

Çatlatma deneylerinde kullanılan granit numunelerinin fiziko-mekanik test sonuçları ile çatlatma deney sonuçları arasında ilişki kurulabilmesi için granit örneklerine fiziko-mekanik testler uygulanmıştır (Çizelge 3.1).

Fiziko-mekanik testler için daha önceden 5x5x5cm ve 5x5x30cm boyutlarında hazırlanan numuneler ile Nx(54x27mm) boyutunda AKÜ Jeotermal ve Maden Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi Hidrolik Çatlatma Laboratuvarı'nda hazırlanan numunelere Tablo 3.1'de verilen fiziko-mekanik testler uygulanmıştır (Şekil 3.34).

**Çizelge 3.1** Fiziko-mekanik testler, örnek boyutları ve standartlar.

Test Adı	Örnek		Standart
	Boyut (cm)	Sayı	
Görünür ve Gerçek Yoğunluk	5x5x5 cm	6	TS EN 1936
Toplam ve Açık Gözeneklilik	5x5x5 cm	6	TS EN 1936
Atmosfer Basıncında Su Emme	5x5x5 cm	6	TS EN 13755
Schmidt Sertlik	20x20x20 cm	21	TS 3260
Eğilme Dayanımı	5x5x30 cm	6	TS EN 12372
Brazilian Çekme Dayanımı	54x27 mm	6	ISRM 1981
Basınç Dayanımı	5x5x5 cm	10	TS EN 1926



**Şekil 3.34** Fiziko mekanik testlerde kullanılan numunelerin hazırlanması.

### 3.5.1 Görünür ve Gerçek Yoğunluk Testi ve Toplam ve Açık Gözeneklilik Testi

Görünür ve gerçek yoğunluk ile toplam ve açık gözeneklilik testleri TS EN 1936 (TS EN, 2010) standardına göre yapılmıştır. Bu standardın prosedürü şu şekildedir;

Açık gözeneklilik ve görünür yoğunluğun hesaplanması için her biri numune tartılır ( $m_d$ ) vakum kabına yerleştirilir ve basınç kademeli olarak  $(2 \pm 0,7)$  kPa  $= (15 \pm 5)$  mm Hg'ye indirilir.

Bu basınç, numunelerin açık gözeneklerindeki havayı uzaklaştırmak için  $(2 \pm 0,2)$  saat muhafaza edilir.

$(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 'de ki saf su yavaşça kaba konur (suyun yükselme hızı, 15 dakikadan az olmayan bir süre içerisinde numunelerin tamamıyla su içerisinde kalacağı hızda olmalıdır.)

Tüm numuneler su içerisine konulduktan sonra kap atmosfer basıncına getirilir ve numuneler su içerisinde atmosfer basıncında ilâve bir  $(24 \pm 2)$  saat süreyle daha bekletilir.

Sonra her bir numune;

- Su içerisinde tartılır ve sudaki kütle kaydedilir ( $m_h$ ).
- Hızlı bir şekilde nemli bir bezle kurulanır ve suya doymuş numunenin kütlesi ( $m_s$ ) tayin edilir.

Gözle görülebilen oyukların bulunduğu doğal taşlarda (meselâ traverten) görünür hacim numunelerin boyutlarının en yakın milimetreye yuvarlatılarak ölçülmesiyle tayin edilir.

Standart prosedürden hareketle gerçek yoğunluğun bulunması için ise şöyle bir yol izlenmektedir;

Yoğun, düşük gözenekli kayaçlar için gerçek ve görünür yoğunluk arasındaki fark, açık ve toplam gözeneklilik arasındaki fark gibi çok küçüktür. Bu kayaçlar için görünür yoğunluk ve açık gözeneklilik tayini yeterlidir. Tedarik edilen ürünlerin kontrol edilmesi durumunda, gerçek yoğunluk tayininin yapılmama karan, taraflar arasındaki anlaşmaya bağlıdır.

Bu standartta gerçek yoğunluğun tayini için iki yöntem tarif edilmektedir: Piknometre yöntemi (Yöntem A) ve Le Chatelier hacim ölçer yöntemi (Yöntem B).

Birinci yöntem daha doğrudur, fakat çok uzun zaman gerektirir. Anlaşmazlık durumunda referans bir yöntem olarak kullanılması tavsiye edilir. Le Chatelier yöntemi, doğruluğu daha az fakat uygulanması kolay ve hızlı olup, üretim kontrolü için kullanılabilir.

Yöntem A (piknometre) şu şekildedir;

Görünür yoğunluk ve açık gözenekliliğin tayin edilmesinden sonra, her bir numune ayrı ayrı 0.063 mm göz açıklıklı elekten tümüyle geçecek şekilde öğütülür.

Numune sabit kütleyle kurutulur ve  $\pm 0.01$  g yaklaşımla tartılmış yaklaşık 10 g'lık bir kütle (me) alınır Piknometre yansına gelinceye kadar saf su ile doldurulur. Sonra öğütülmüş numuneden tartılarak elde edilen kütle (me) piknometreye konur ve katı maddenin dağılması için sıvı çalkalanır.

Hava kabarcıklarının çıkışı tamamlanıncaya kadar piknometreye ( $2 \pm 0.7$ ) kPa'lık bir vakum uygulanır, sonra piknometre saf su ile yaklaşık olarak ağzına kadar doldurulur ve katı madde çöküp, su berrak hale gelinceye kadar beklenir.

Sonra dikkatlice piknometre saf su ile tamamen doldurulur, tıraşlı bir kapakla kapatılır ve taşan su varsa yavaşça kurulanır. Son olarak, piknometre  $\pm 0.01$  g doğrulukla tartılır ( $m_1$ ).

Piknometre boşaltılır ve yıkanır, yalnızca saf su ile doldurulur ve  $\pm 0.01$  g doğrulukla tartılır ( $m_2$ ).

Her bir tartımdan önce ortam sıcaklığının  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$  olması sağlanmalıdır.

Yöntem B (Le Chatelier hacim ölçer) şu şekildedir;

Görünür yoğunluk ve açık gözenekliliğin tayin edilmesinden sonra, her bir numune ayrı ayrı 0.063 mm göz açıklıklı elekten tümüyle geçecek şekilde öğütülür.

Numune sabit kütleyle kurutulur ve  $\pm 0,1$  g yaklaşımla tartılmış yaklaşık 50 g'lık bir kütle ( $m_e$ ) alınır.

Le Chatelier hacim ölçere sıfır işaretine kadar saf su doldurulur. Öğütülmüş numuneden tartılarak elde edilen kütle ( $m_e$ ), daha sonra 10'ar g'lık beş kısım halinde her biri sıvıyla temas edecek şekilde hacim ölçere ilâve edilir. Her bir bölümün hacim ölçere konulmasından sonra öğütülmüş numunenin dağılmasını sağlamak için sıvı çalkalanır. Öğütülmüş numune kütlelerinin ( $m_e$ ) yer değiştirdiği sıvının hacmi ( $V_s$ ) ölçekten okunarak 0.1 mL yaklaşımla tayin edilir.

Başlangıç 0 seviyesinin alınmasından ve son hacmin okunmasından önce ortam sıcaklığının  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$  olması sağlanmalıdır.

Bu sonuçların gösterilmesi ise şu şekildedir;

Açık gözeneklerin hacmi ( $m_L$ ) aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$V_0 = \frac{m_s - m_d}{\rho_{rt}} \times 1000 \quad (3.1)$$

Görünür hacim ( $m_L$ ) aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$V_b = \frac{m_s - m_h}{\rho_{rt}} \times 1000 \quad (3.2)$$

Görünür yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ ), kuru numune kütlelerinin görünür hacmine oranı şeklinde aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$P_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times P_{rt} \quad (3.3)$$

Açık gözeneklilik (%), numunenin açık gözeneklerinin hacminin görünür hacmine oranı şeklinde aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$P_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (3.4)$$

Gerçek yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ ), öğütülmüş kuru numune kütlelerinin ( $m_e$ ), bu kütle tarafından yeri değiştirilen sıvı hacmine oranı şeklinde aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

Yöntem A piknometre;

$$P_r = \frac{m_d}{m_s - m_h - m_1} \times P_{rt} \quad (3.5)$$

Yöntem B (Le Chatelier hacim ölçer);

$$P_r = \frac{m_e}{V_s} \times P_{rt} \quad (3.6)$$

Toplam gözeneklilik (%), numunenin toplam gözeneklerinin (açık ve kapalı) hacminin görünür hacmine oranı şeklinde aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$P = \frac{1/P_b - 1/P_r}{1/P_b} \times 100 \quad (3.7)$$

### 3.5.2 Atmosfer Basıncında Su Emme Testi

Atmosfer basıncında su emme deneyi için deneyler için hazırlanan üniversitemiz bünyesindeki mermer atölyesinde kesilen 5x5x5 cm lik granit numuneleri kullanılmıştır. Atmosfer basıncında su emme deney prosedürü TS EN 13755'a (TS EN 2009) göre yapılmıştır. TS EN 13755 standartına göre deney şu şekilde yapılmaktadır; Deney numuneleri kurutulduktan sonra 0.01 g doğrulukla tartılır ( $m_d$ ). Numuneler su haznesi içerisindeki desteklerin üzerine yerleştirilir. Her bir deney numunesi arasındaki mesafe en az 15 mm olmalıdır. Daha sonra deney numunesi yüksekliğinin yarısına

kadar  $(20 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta şebeke suyu ilave edilir ( $t_0$  zamanı). Zaman olarak  $t_0 + (60 \pm 5)$  dakikaya gelindiğinde, su seviyesi deney numunesi yüksekliğinin  $\frac{3}{4}$ 'üne ulaşınca kadar şebeke suyu ilave edilir.

Zaman olarak  $t_0 + (120 \pm 5)$  dakikaya gelindiğinde, deney numuneleri  $(25 \pm 5)$  mm su derinliğine tamamen batırılınca kadar şebeke suyu ilave edilir. Zaman olarak  $t_0 + (48 \pm 2)$  saate gelindiğinde numuneler sudan çıkarılır, hızlı bir şekilde nemli bir bez ile kurulanır ve daha sonra bir dakika içerisinde 0,01 g doğrulukla tartılır ( $m_i$ ).

Deney numuneleri suya tekrar daldırılır ve deneye devam edilir. Her  $(24 \pm 2)$  saatlik süre sonrasında deney numuneleri sudan çıkarılır, nemli bir bezle hızlı bir şekilde kurulanır ve bir dakika içerisinde 0,01 g doğrulukla tartılır. Deney numunelerinin ardışık kütleleri ( $m_i$ ) kaydedilir. Deney numuneleri, sabit bir kütleye ulaşınca kadar deneye devam edilir. İki ardışık tartım arasındaki fark, ilk kütlenin %0,1'den büyük değilse sabit kütleye ulaşılmış olduğu kabul edilir. Son tartma işleminden elde edilen değer, doymuş deney numunesinin kütlesidir ( $m_s$ ).

Her bir deney numunesinin atmosfer basıncındaki su emme değeri ( $A_b$ ), aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (3.8)$$

Sonuçlar, %0.1 yaklaşımla yüzde (%) olarak ifade edilir.

### 3.5.3 Schmidt Sertlik Testi

Schmit sertlik deneyi için 20x20x20 cm'lik kayaç numuneleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. 21 adet okuma gerçekleştirilmiştir. Bu deney TS 3260 (TS, 1978) standardına göre yapılmıştır. Standart'a göre deney prosedürü şu şekildedir;

300x300 mm ye geçmeyen bir alan üzerine 9 ila 25 tekrar ile yapılan vuruşlarda alınan okumalar schmidt çekici kullanılarak yapılır. Yüzey üzerine 20mm ila 50mm arası kareler yapılmalı ve bunların kesiştiği yerler okuma noktaları olarak alınmalıdır.



### 3.5.4 Eğilme Dayanımı Testi

Eğilme dayanımı testi için daha önceden hazırlanan 5x5x30 cm'lik numuneler kullanılmıştır. Deney numuneleri TS EN 12372 standardına göre baskıya maruz bırakılmıştır. Bu standardın prosedürü şu şekildedir;

Tablolar 1 ile 4 arasında gösterilen şekillere bakarak, rulmanların yüzeyini temizleyin ve rulmanlarla temas edecek olan numunenin yüzeylerinden gevşek olan taneleri çıkarın.

Numune, destekleyici rulmanların üzerine merkezi olarak yerleştirilir. Yükleme rulmanı numunenin ortasına yerleştirilir.

Yük, numune kırılana kadar  $(0,25 \pm 0,05)$  MPa/s hızla düzgün bir şekilde artırılır.

NOT 1: Kırılma yükü en yakın 10 N'ye yuvarlanır ve kırığın meydana geldiği nokta kaydedilir. Numunenin genişliği ve kalınlığı, kırık düzlemine bitişik olarak ölçülür ve boyutlar en yakın 0,1 mm'ye kadar milimetre cinsinden ifade edilir.

NOT 2: Yükleme hızının (V) N/s olarak belirtilmesi gerektiği durumlarda, gerekli hızı N/s cinsinden belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılabilir:

$$V = \frac{2abh^2}{3l} \quad (3.9)$$

Her numunenin eğilme dayanımı ( $R_{tf}$ ), aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3.10)$$

Sonuç, en yakın 0,1 MPa'ye kadar Megapaskal cinsinden ifade edilmelidir. Eğer kırık, destek valfleri arasındaki mesafenin ortasından %15'ten fazla bir mesafede ve/veya çatlaklar (damarlar, yarıklar, vb.) nedeniyle meydana gelmişse, bu durum test raporunda belirtilmelidir.

### 3.5.5 Brazilian Çekme Dayanımı Testi

Bu deney standardı olan ISRM 1981'in deney prosedürüne göre yanal yük uygulanan deney numunelerin düşey yüzeylerinde oluşan çatlaklar izlenmektedir. Deney için 10 adet numune kullanılmıştır. Çalışmada 12 adet kullanılmış en düşük ve en yüksek olan 1 adet numune ortalamadan çıkarılmıştır.

Numune kalınlıkları kendi yarıçaplarına eşit olmalıdır (kalınlık / çap = 1 / 2). Numune çapları en az 54.7 mm (NX) olmalıdır. Numune yüzeyleri birbirine paralel ve düşey eksene dik olmalıdır. Numune alt ve üst yüzeyleri 0.25 mm içinde düzgün olmalıdır (Kesimal ve Kaya 2015)

Standartlara uygun olarak hazırlanan 10 adet numunenin, kumpas yardımıyla çap (D) ve kalınlıkları (L) ölçülerek kaydedilir. Her numunenin tabakalaşma doğrultusu ve bu doğrultuya göre yükleme yönü kaydedilir. Numune, çelik çeneli aygıt içerisine, her ikisinin dönme eksenleri çakışacak şekilde yerleştirilir. Bu durumda yük, numunenin alt ve üst yüzeylerine dik olarak ve çapı boyunca uygulanabilecektir (Şekil 3). Numune üzerine düşey yük devamlı ve sabit bir yükleme hızıyla uygulanır. Yükleme hızınının 0.2 kN / saniye (20.4 kgf / saniye) olarak, zayıf kayaları 15 – 30 saniyede kırarak şekilde uygulanması önerilmektedir (Kesimal ve Kaya 2015).

Yük ve deformasyon kaydedicisi ile donatılmış bir test makinasında, ilk kırılmanın tam olarak belirlenmesi için deney süresince kayıt alınmalıdır. Numune kırıldığı andaki yük değeri okunarak kaydedilir (Fc). Bazı durumlarda, ilk kırılmadan sonra çatlamış numunenin hala yüke dayandığı ve yükün artmaya devam ettiği gözlenir. Bu yüzden ilk kırılma anının tespiti gerçek Fc değerinin bulunması adına önemlidir. Kaydedici dikkatle izlenmelidir. Numune kırıldıktan sonra şekli çizilir ve kırılma düzlemleri açıkça gösterilir. Kayacın tek eksenli çekme dayanımı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\sigma_t = \frac{2.F_c}{\pi.D.L} \quad (3.11)$$

$\sigma$ : Numunenin tek eksenli çekme dayanımı; kgf / cm<sup>2</sup> Fc: Yenilme anındaki yük; kgf D: Numunenin çapı; cm L: Numunenin kalınlığı; cm

### 3.5.6 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testi

Tek eksenli basınç dayanımı için 5x5x5 cmlik küp numuneler TS EN 1926 standartına göre tek eksenli basınç dayanımı deneyine maruz bırakılmıştır. TS EN 1926 standartına göre deney prosedürü şu şekildedir;

Deney cihazının taşıyıcı yüzeyleri silinip temizlenir ve numune temas yüzeylerinde bulunan gevşek taneler uzaklaştırılır. Yeknesak bir temas sağlamak amacıyla deney numunesi, cihaz levhasının merkezine dikkatlice yerleştirilir. Bu işlemde hiçbir tampon malzemesi kullanılmamalıdır (TS EN, 2007). Yük, deney numunesine (1 ± 0.5) MPa/s sabit bir yükleme hızıyla devamlı olarak uygulanmalıdır. Numunenin kırıldığı azami yük, 10 kN yaklaşımla kaydedilmelidir. Her bir numunenin tek eksenli basınç dayanımı (R), numunenin kırılma yükünün deney öncesi en kesit alanına oranı olarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$R=F/A \quad (3.12)$$

Sonuç, MPa cinsinden virgülden sonra en az iki ondalıklı olarak verilmelidir. Ortalama değer (R), 1 MPa yaklaşımla hesaplanmalıdır.

### 3.6 Çatlakların İzlenmesi ve Çatlak Geometrisinin Ortaya Konması

Çalışmanın başlıca amaçlarından birisi üç eksenli basınçlara bağlı olarak çatlak geometrisinin yönlü bir şekilde oluşmasının sağlanmasıdır. Konuyla ilgili literatür çalışmalarında en düşük basınç yüzeyine paralel çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. (Frash 2014). Tez çalışmasında literatür çalışmalarıyla uyumlu bir şekilde en düşük basınç yüzeyine paralel çatlakların oluşması, hidrolik çatlaklama deney düzeneğinin uygun olarak tasarlandığını ve üretildiğini göstermiştir.

Çalışmada gerçek üç eksenli basınç koşulları altında gerçekleştirilen deneylerin tamamında kayaç numuneleri yönleri ve bunlara bağlı uygulanan basınç yüzeyleri belli olacak şekilde işaretlenerek hücre içerisine yerleştirilmiştir. Bu şekilde istenen çatlak yöneliminin oluşup oluşmadığı kontrol edilebilmiştir.

Çatlatma işlemi sonrasında oluşan çatlak yapıları belli bir boyuta kadar gözle ayırt edilebilmektedir. Ancak bazı ince çatlakların gözle görülebilmesi oldukça zor olması nedeniyle çatlakları gözlemlemek için iki aşamalı bir yöntem izlenmiştir:

**1. Aşama:** Çatlakların belirliliğini artırmak üzere çatlak içerisine mavi renkli su ve bor yağı karışımı enjekte edilmiştir. Çatlatma işlemlerinde de kullanılan bu karışımın ön yükleme pompası yardımıyla numunenin enjektör girişine uygulanması sonucu çatlak içerisinde mavi renkli sıvı doldurulmuştur. Bu işlem sonrasında kayacın çatlaklarını dolduran mavi renkli sıvı kılcal çatlaklardan yaklaşık yarım saat boyunca sızmaya devam etmiş, bu sayede kılcal çatlakların belirginleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.35).

**2. Aşama:** Kayaç üzerindeki çatlaklar fotoğraflanmak üzere iyi ışıklandırılmış bir masanın üzerine koyularak makro lense sahip bir dijital fotoğraf makinası ile çatlaklar görüntülenmiştir. Fotoğraflama işleminde Olympus EM-10 marka bir aynasız makinaya makro lens takılmış ve çatlak yüzeyine ışık verilerek çatlaklar genel ve bitiş noktaları belirli olacak şekilde fotoğraf çekimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.36).



**Şekil 3.35** Mavi renkli sıvı enjekte edilmiş kayaç numunesi.



**Şekil 3.36** Nunumenin hazırlanması.

### **3.7 X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri**

Çatlatılan kayalardan alınan kırıntı numuneleri öğütülerek  $-250 \mu\text{m}$  tane boyutuna getirilmiştir. XRD analizleri A.K.Ü Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi (TUAM)'nde Shimadzu XRD-6000 model X-ışını difraktometre cihazı (Ni filtreli,  $\text{CuK}\alpha$  radyasyonlu) kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde 40 kV (voltaj) ve 30 mA (akım) difraksiyon değerleri seçilmiştir. Numuneler  $2^\circ/\text{dak.}$ 'da taranarak  $2^\circ-70^\circ$  ( $2\theta$ ) goniometre kırınım açısı aralığında 2000 cps (intensity) pik yoğunluğunda analiz edilmiştir (Şekil 3.37).

### **3.8 Polarizan Mikroskop İncelemeleri**

Çatlatma yapılan örneklerde çatlakların ilerleme davranışları ve çatlatmaya bağlı olarak örneklerde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi için örneklere polarizan mikroskop analizi yapılmıştır. Analiz öncesi örneklerin çatlatılmış ve çatlak olmayan bölümlerinden temsili numuneler kesilerek, ince kesitler hazırlanmıştır. Polarizan mikroskop incelemeleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Doğal Taş Analiz Laboratuvarı'ndaki Nikon Marka Eclipse 2V100POL model görüntü analiz sistemli polarizan mikroskop ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.37 Shimadzu XRD-6000 model X-ışını difraktometre cihazı.

## 4. BULGULAR

### 4.1 Granit Örneklerinin Karakterizasyonu

#### 4.1.1 Fizikomekanik Testler

Gerçek üç eksenli basınç altında çatlatılacak olan granit küplerinin fizikomekanik karakteristiklerini belirlemek üzere bir dizi test uygulanmıştır. Bu numunelerin kökeni ve petrografik özelliklerini görmek ve ileride yapılacak kayaç çeşitlendirmelerinde bu verilerden de faydalanarak kapsamlı kıyaslamalar yapılabilmesi için bu deneyler yapılmıştır.



Şekil 4.1 Brazilian çekme deneyi.

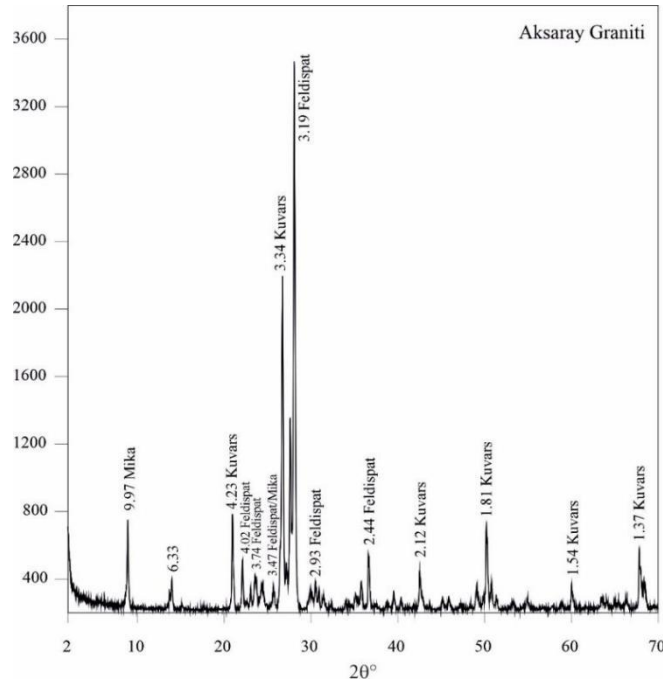
Yukarıda bahsedilen amaç çerçevesinde granit numunelerine aşağıdaki deneyler uygulanarak elimizdeki kayacın fizikomekanik özellikleri tayin edilmiştir.

**Çizelge 4.1** Fizikomekanik deney sonuçları.

Deney Adı	Standardı	Sonucu
Brazilian Çekme Deneyi (MPa)	ISRM(2007)	22,147
Gerçek Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	TS EN 1936: 2010	2730
Görünür Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	TS EN 1936: 2010	2565
Toplam Gözeneklilik (%)	TS EN 1936: 2010	6,0
Açık Gözeneklilik (%)	TS EN 1936: 2010	1,6
Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini	TS EN 13755: 2014	0,65
Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Tayini (MPa)	TS EN 12372: 2022	9,1
Basınç Dayanımı Tayini (MPa)	TS EN 1926: 2013	146
Schimidt Sertliği (MPa)	TS EN 3260:1978	56

#### 4.1.2 X-Işını Kırınımı (XRD) Sonuçları

Aksaray bölgesi ortaköy granitlerine ait x-ışını kırınımı (XRD) incelemelerinde granit örneğinin başlıca feldispat ve kuvars minerallerinden oluştuğu ve bu minerallere tali oranda mika minerallerinin eşlik ettiği belirlenmiştir. Feldispat mineralleri ağırlıklı olarak plajiyoklas grubuna ait albit türündedir.

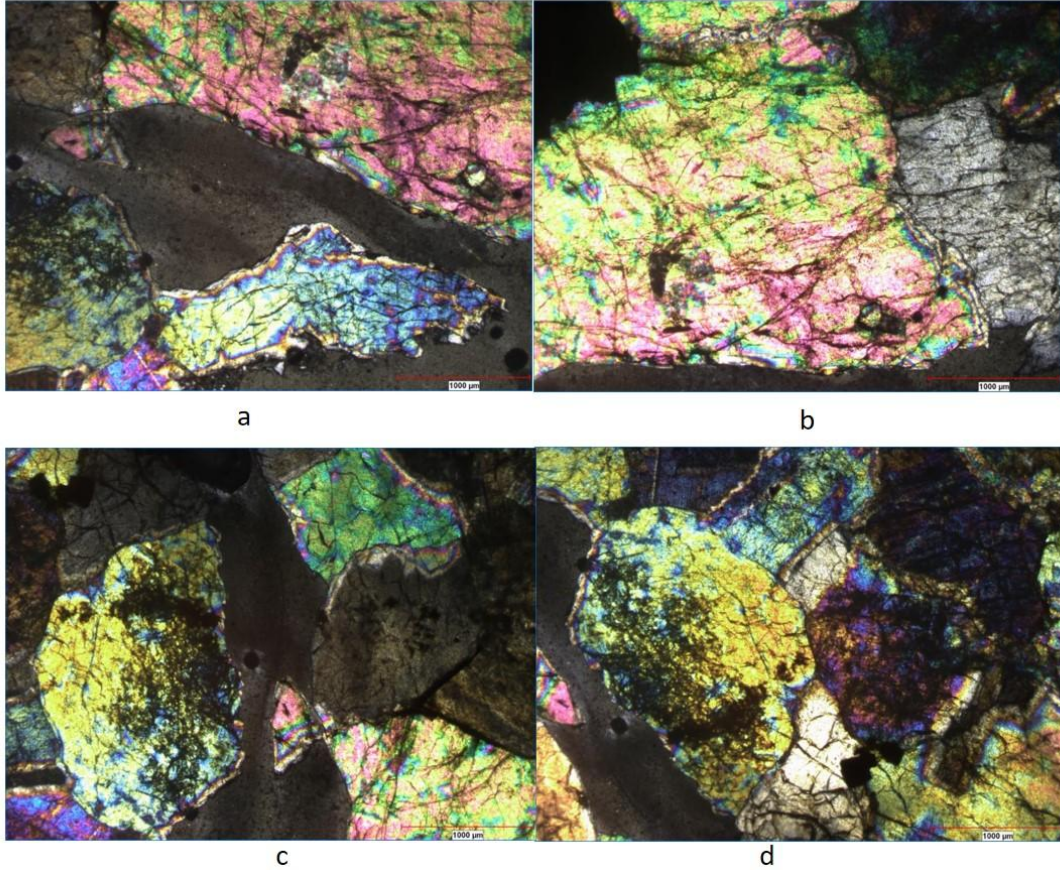


**Şekil 4.2** Aksaray ortaköy mevki graniti XRD ışın kırınımı grafiği.



### 4.1.3 Polarizan Mikroskop İncelemeleri

Polarizan mikroskop incelemeleri hidrolik basınç altında kırılmış olan granit küplerinden çıkarılarak ince kesit haline getirilmiş ve mikroskop altında 25 kat büyütülerek incelemiş, meydana gelen yapısal değişiklikler gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.3** Polarizan mikroskopta çapraz nikolde 25 kat büyütülen çatlak hattı.

Ana çatlak düzleminin her iki yanında kuvars kristallerinde ana çatlak düzlemine paralel mikrokırıklar oluşmuştur (a).

İki Kuvars kristali ve altta ana çatlak düzlemine komşu. İki Kuvars kristalinde doğrultuları aynı olan küçük çatlaklar mevcuttur (b).

İkizlenme şeklindeki kuvars kristallerinin ortasından ana çatlak düzleminin ilerlediği görülmüştür (c).

Sol çaprazda ana çatlak düzlemi bulunmaktadır. Ana çatlağın dokunağındaki kuvars kristalinde yoğun deformasyon sonucu mozaik şeklinde kırılma yapı oluşmuştur. Bu bölgelere koyu renkli ikincil mineraller yerleşmiştir. Kuvarsın üzerinde zonlu yapı sunan plajyoklaz bulunmaktadır (d).

## **4.2 Hidrolik Çatlatma Deney Düzenine Tasarımı ve İmalatı**

Hidrolik çatlatma deney düzeni temel olarak iki ana makine ve onlara bağlı yardımcı ekipmanlardan oluşacak şekilde tasarlanmış ve bu şekilde imal edilmiştir. Bunlar gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi ile hidrolik şırınga pompadır.

Bu makinaların ve ekipmanların tasarım ve imalat aşamaları materyal ve metod bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde ise makine ve ekipmanların uygulama amaçları olan gerçek üç eksenli basınç deney şartlarındaki performansları ve deney çıktılarına yer verilmiştir.

### **4.2.1 Gerçek Üç eksenli Sıcaklık ve Basınç Hücresi**

Gerçek üç eksenli basınç koşulları altında üç farklı eksenle üç farklı basıncın kayaya uygulanması sırasında kayacın hidrolik olarak içeriden çatlatılması esasına dayanan deney düzeni olup, tez çalışması sırasında ilk tasarlanan ve imal edilen makinedir (Şekil 4.4). Yer altında oluşan farklı eksenlerdeki basınçlar çatlak oluşumunda ve çatlak yöneliminde büyük etkiye sahiptir. En düşük yüzey basıncının olduğu eksene paralel oluşan çatlakların oluşum mekanizmalarını açıklamada aksiyel basınçlar önemli rol oynamaktadır. Kızgın kuru kaya çalışmalarında rezervuar kayaç olarak nitelendirilen kayaçların bulunduğu derinlikler genellikle 1500 metreden derin olmaktadır. Bu derinliklerde litostatik basınç aksiyel basınçlardan yüksek olmaktadır. Çalışmada litostatik basıncı temsil eden Z aksiyel basıncı 50 bar olarak alınmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.4 Hidrolik çatlatma deney düzeneği.



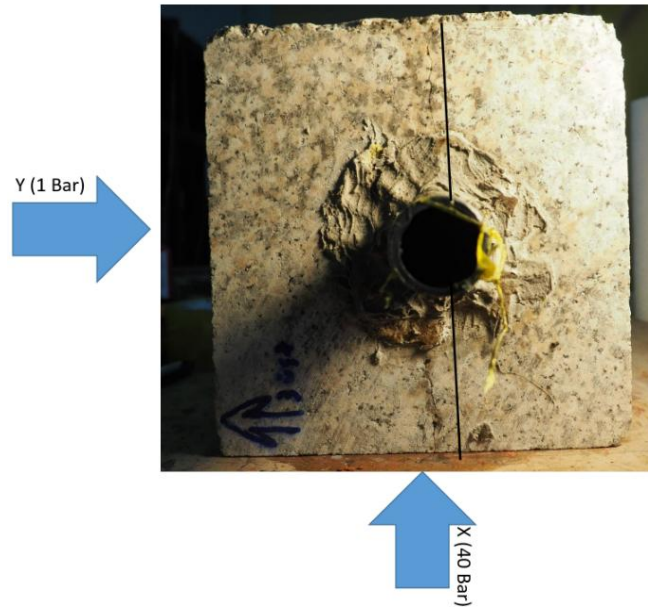
Şekil 4.5 Hücre içindeki kayaca tatbik edilen aksenal basınçlar.

Bundan sonra X ve Y eksenlerindeki basınçlar için ise, X ve Y değeri arasında belirgin bir fark olması hedeflenerek X eksenini 40 bar ve Y eksenini 1 bar (1 atmosfer basıncı)

olarak alınmıştır. Bu basınç dağılımındaki diğer amaç ise 1bar basınç altında çatlatılan performans deneylerindeki numunelerin çatlama basınçları ile bir bağ olup olmadığının gözlemlenmesidir. Bu koşullar altında çatlak oluşturma ve yöneltme çalışmasının net bir şekilde istenen ekseninde oluşması hedeflenmiştir. 1 bar basınç uygulanan ekseninde oluşması beklenen çatlak yönelimi yapılan her üç deneyde de sorunsuz şekilde oluşturulmuştur (Şekil 4.6). Çatlak yönelimlerinin beklenen şekilde oluşmuş olması makinenin her üç ekseninde de basınçları istenilen şekilde tatbik ettiğini göstermektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.6 Kayaç sıkıştırma basınç oluşturma işlemleri.



Şekil 4.7 Basınçlara bağlı olarak çatlak yönelimi.

Deneyleer sırasında uygulanan üç eksenli basınçlara makine ve teçhizatlar dayanabilmiş ve böylece deneyleerın yapılabilmesi sağlanmıştır. Sadece deney sırasında kapak deliği ve enjektör çıkışını ayarlamakta kullanılan, her biri 200x200x5mm boyutlarındaki boşluk alma plakaları doğru ayarlanmadıkları zamanlarda sıkıştırma plakaları arasında kalmış ve bu plakalarda bükülme şeklinde deformasyonlar gözlenmiştir. Olası hasar durumları ön görülerek bu plakalar kolay değiştirilecek şekilde üretilmiştir. Bu sayede yanlış konumlanmalarda büyük sıkıştırma plakaları ve bunlara bağlı desteklerden önce bu boşluk plakaları hasar görerek muhtemel büyük çaplı hasarları önlemişlerdir.

Tez çalışmasının başlangıcında hidrolik çatlatma deneyleerinin yaklaşık 200°C ortam sıcaklığında yapılması planlanmıştır. Çalışmaları destekleyen proje bütçelerinin ısıtma ünitesi alınması veya imal edilmesi için yetersiz kalması nedeniyle etüv de 85°C'ye kadar ısıtılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hidrolik çatlatma ünitesi üzerinde gerekli ayarlamalar yapılarak, sonraki çalışmalarda ısıtma sistemi ünitenin plakalarına kolaylıkla monte edilebilecektir.

Gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi için planlanan bir diğer parça ise sıkıştırma plakaları üzerine yerleştirilecek akustik emisyon sensörleridir. Bu sensörler sayesinde anlık olarak çatlak ilerlemesi kaydedilip gözlemlenebilecektir. Gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresinin ısıtma ve akustik emisyon sensörlerinin monte edildiği sonraki versiyonları düşünülerek hücre üzerinde boşluk ve kablo yerleri makine üzerinde ayarlanmıştır.

#### **4.2.2 Hidrolik Şırınga Pompa**

Hidrolik şırınga pompa doğal taşların içerisine akışkan enjekte etmek yoluyla bu kayalar içerisinde çatlak veya çatlaklar oluşturmak amacıyla tasarlanmış bir pompadır. Giriş ve çıkışında birer check valf bulunmaktadır. Giriş tarafındaki check valf sıvının basılması sırasında doldurma pompasına sıvı iletimini engellemektedir. Çıkış kısmındaki check valf ise iletim hattında herhangi bir basınçtan dolayı sıvının geri dönmesini önlemektedir. Hidrolik şırınga pompa hatta bağlı dişli bir pompa olan ön doldurma pompası ile birlikte çalışmaktadır. Bu dişli pompa sayesinde hem şırınga

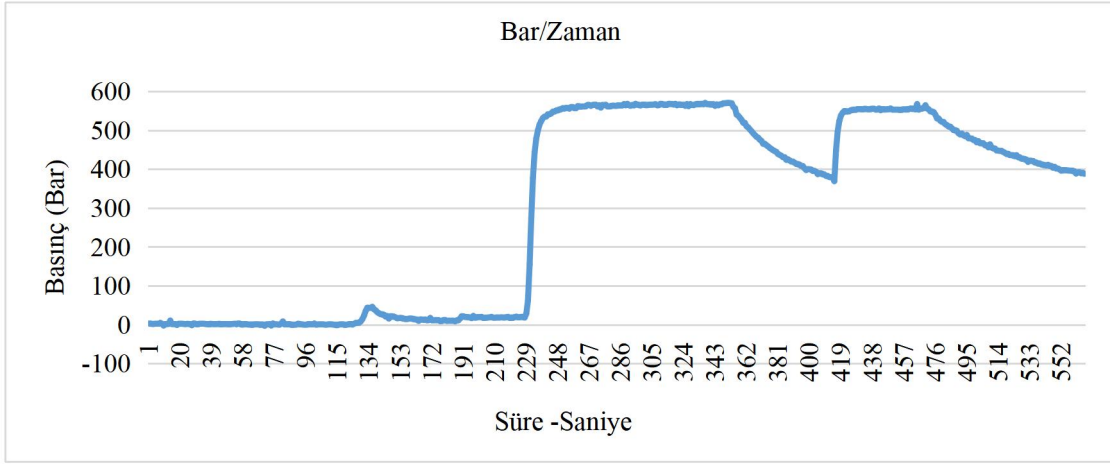
pompanın içi hem de 5 metre uzunluğa ve 2 1/2" çapa sahip çatlatma pompası hattı hızlı bir şekilde doldurulabilmektedir. Hidrolik şırınga pompa içerisinden sabit bir hız ile pompalanan çatlatma sıvısı hortum ve enjektör aracılığı ile kayaca ulaşmaktadır. Burada kayacın içerisine hidrolik basınç uygulayarak en düşük yüzeysel basınca paralel olmak üzere, kayaç içerisindeki minerallerin kristal kafes yapısı, kayacın mineral içeriği, diğer kılcal süreksizler ve kayacın fiziko-mekanik özelliklerine bağlı olarak bir çatlak sistemi oluşturmaktadır.

Hidrolik şırınga pompa ile yapılan ilk deneyler hidrolik şırınga pompanın fonksiyonlarının ve performansının test edildiği beton ve traverten numuneler üzerinde yapılan deneyler olmuştur. Bu deneylerin ardından atmosfer basıncı altında granit numuneleri çatlatılarak son performans testleri de tamamlanmış ve gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi içerisindeki deneylere geçilmiştir. Performans deneyleri sonucunda çatlatma enjektörlerinin çapı, kayaç içerisinde oluşturulacak Üst delik ve ikinci delik (çatlatma odası)'lerin boyu ve çapları ile çatlatma enjektörünü sabitlemek için gereken kimyasallar ve prosesler belirlenmiştir. Özellikle traverten deneylerinde elde edilen sonuçlarda çatlatma basıncını düşürmek için açılan 25 mm çapında ve 5 cm derinliğindeki çatlatma odası sayesinde yanal yüzeylere de basınç uygulanabilmiştir. Ayrıca epoksinin (kimyasal dübel) taban yüzeyini doldurup, hidrolik sıvının kayaç yüzeyi ile temas etmesini engellediği ve çatlatma basıncını aşırı yükselttiği durumları da ortadan kaldırılmıştır (Şekil 4.8).



**Şekil 4.8** Üst delik ve çatlatma odasının traverten üzerinde gösterimi.

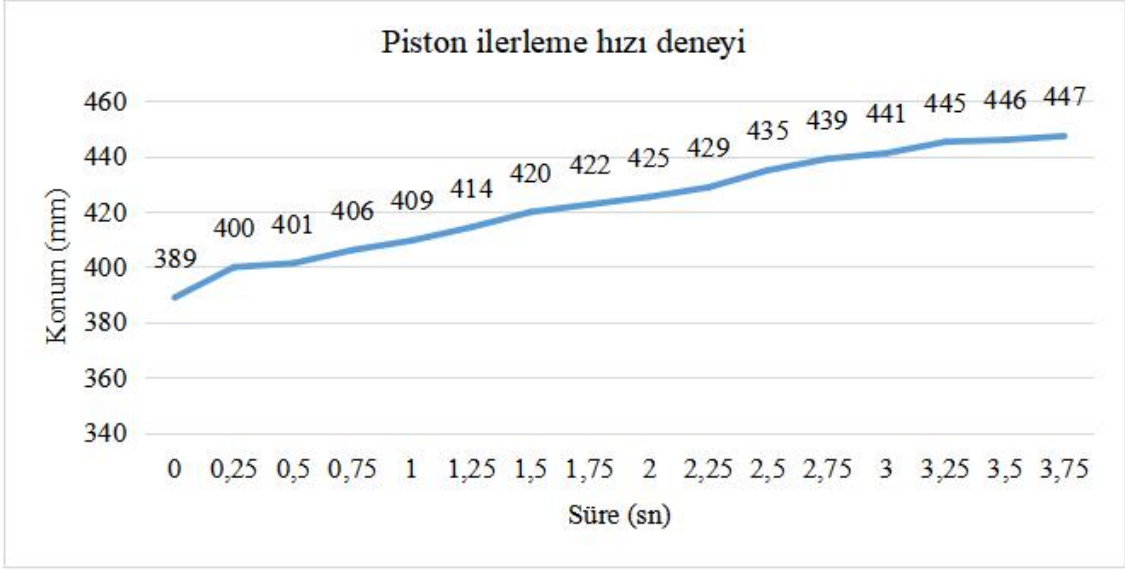
Hidrolik çatlatma pompası yurtdışında üretilen ticari pompaların ulaşabildikleri basınç seviyelerine ulaşabilmiş ve basınç seviyelerinde belirli bir süre bekleyerek arıza ve bozulmaya sebep olmadan kalabilmiştir. Tabanı epoksi ile doldurulmuş bir deney numunesi ile yapılan deneylerde hidrolik şırınga pompa 600 bar basınca ulaşabilmiş ve bu seviyede bir müddet durabilmiştir. Ardından basınç kapatılmış ve tekrar basınç yüklenmiş ve gene 600 bar seviyesine ulaşarak burada duraylı olarak kalabilmiştir (Şekil 4.9).



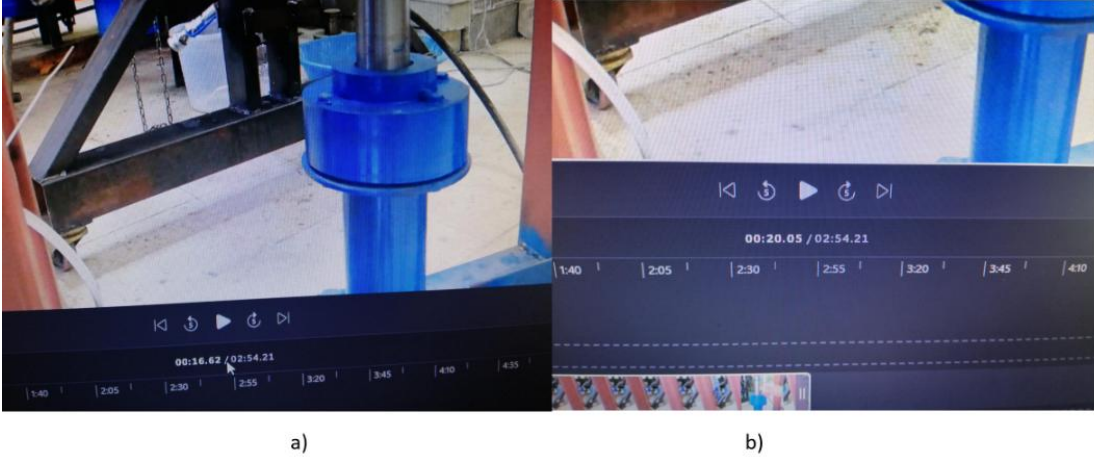
Şekil 4.9 Şırınga pompa basınç deneyi, 600 bar basınç / zaman grafiği.

Kayaçların çatlatılması ve bu çatlatma basınçlarının kaydedilmesi konusunda başarılı sonuçlar elde etmiş olan şırınga pompa, konum verisinden hareketle hız grafiklerini de başarılı bir şekilde oluşturabilmektedir.

Piston ilerleme hızı için bazı deneyler yapılarak piston ilerleme ve akışkan pompalama miktarı (enjeksiyon oranı) hesaplanmıştır. Şekil 4.8'de piston konum grafiği ve bu hareket sırasında geçen süre verilmiştir. Bu deney kamera ile de kaydedilerek süreler ve veriler birbirlerini sağlayacak şekilde çeşitli yöntemler kullanılarak kontrol edilmiştir (Şekil 4.11).



**Şekil 4.10** Piston ilerleme hızı deneyi.



**Şekil 4.11** Piston ilerlemesinin kamera ile kayıt edilmesi a) Deney başlangıcı ve b) Deney bitişi.

Hareketteki değişim konum sensörü sayesinde hesaplanabilmektedir. Konum sensöründen elde edilen veri hareketin fizksel olarak pistonun işaretlenip ölçülmesi şeklinde de teyit edilerek hata payı en aza indirilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.12).

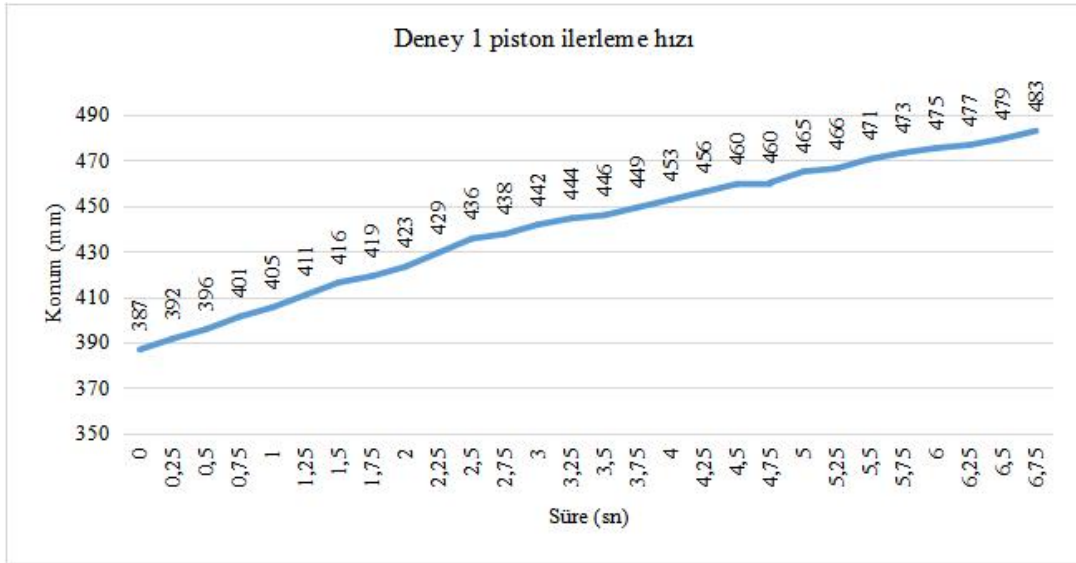
Konum grafiğinden elde edilen veriye göre piston 58mm kadar ilerlemiştir. Bu ilerleme yaklaşık 3,75 sn sürmüştür. Buna göre piston ilerleme hızı 15,5 mm/sn olarak hesaplanmıştır. 1. deney numunesi için piston ilerleme hızı 14,6mm/sn olarak çıkmaktadır. Grafikte piston yüklenip ilerlemeye başladıktan 6,75 sn sonra ilerleme



durmuştur, bu geçen süre de çatlatma operasyonu gerçekleşmiştir. Bu 6,75 sn boyunca piston 96mm kadar ilerlemiştir (Şekil 4.13).

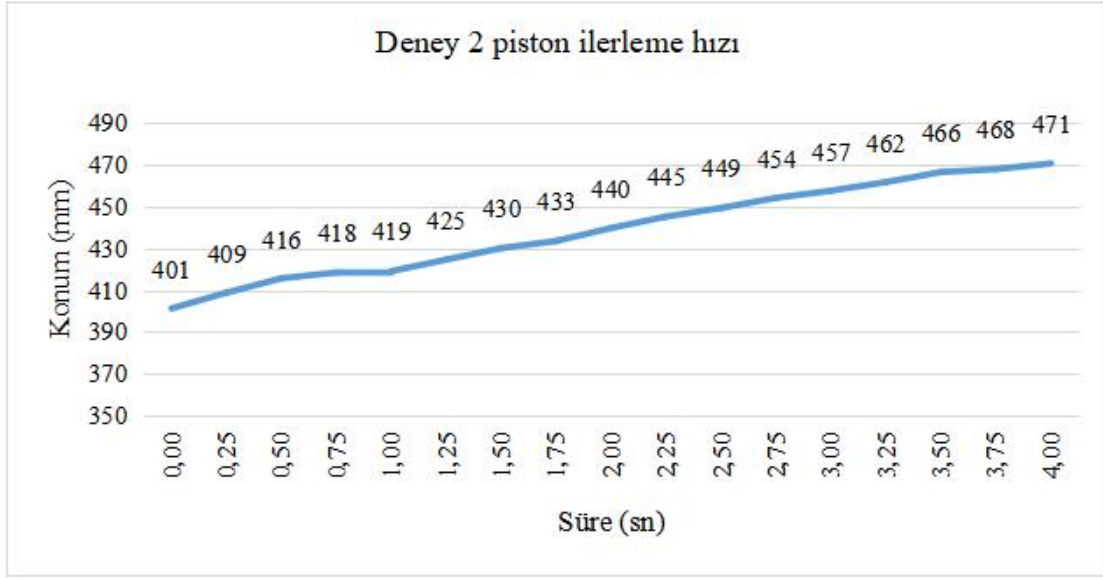


Şekil 4.12 Konum değişikliğinin elle ölçülmesi.



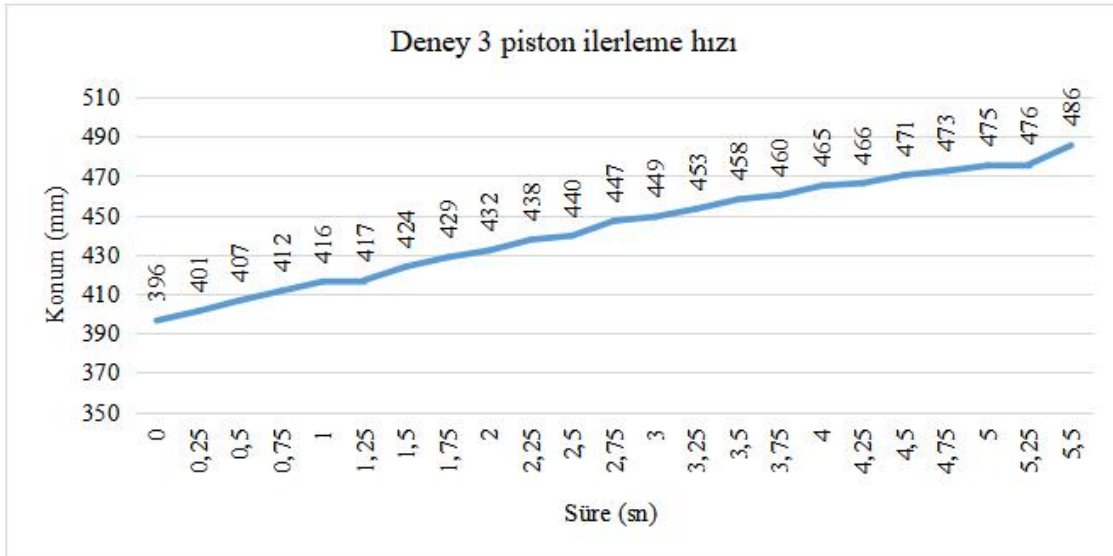
Şekil 4.13 Deney 1'e ait konum/süre grafiği.

Deney 2 konum/süre grafiğinde de piston 4 saniye içerisinde 69.3 mm kadar ilerleyerek 17.3 mm/sn lik bir ilerleme hızı kaydetmiştir (Şekil 4.14).



**Şekil 4.14** Deney 2'ye ait konum/süre grafiği.

Deney 3 konum ve süre verilerinin analizinde ise piston 5,5 sn'lik bir sürede 89,2 mm kadar ilerlemiştir. Bu süre içerisinde 16,2 mm/sn'lik bir hıza ulaşmıştır (Şekil 4.15).



**Şekil 4.15** Deney 3'e ait konum/süre grafiği.

Her üç deneyde de analiz yapılan konum zaman grafikleri ile piston ilerleme hızları yakın olarak tespit edilmiştir. Her üç deneyin ortalaması alındığında piston ilerleme hızı 16,03mm/sn çıkmaktadır. Piston hızı belirleme deneyinde, boşta yapılan deney

sonuçları ile gerçek üç eksenli çatlatma deneylerinde elde edilen ilerleme hızları yakın değerler vermiştir. Bu sayede piston ilerleme hızı ön deneylerinde hesaplanan, pompalanan sıvı (enjeksiyon oranı) miktarı olarak 18 ml/sn diğer deneyler içinde yaklaşık bu seviyede olmuş olması beklenebilir.

Ön enjeksiyon oranı belirleme deneylerinde 3.75 saniyede 58.3 mm ilerleyen piston 67,5 ml sıvıyı boş bir kap içerisine pompalamıştır. Bu pompalama deneyinde enjeksiyon oranı;

$$67.5/3.75 = 18 \text{ ml/sn} \quad (4.1)$$

18ml/sn olarak hesaplanmıştır. Bu deneyler sırasında sıvının ağırlığı da ölçülmüştür. Sıvı ağırlığı 64,3 gr olarak bulunmuştur. Böylece Çatlatma sıvısı yoğunluğu;

$$64.3/67.5 = 0,95 \text{ gr/ml} \text{ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.16).}$$



**Şekil 4.16** Çatlatma sıvısı hacim ve ağırlık ölçümleri.

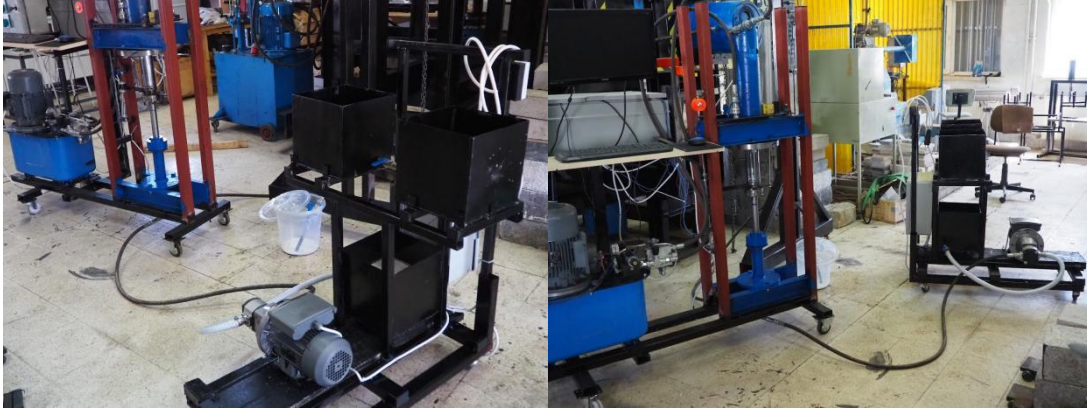
Daha hassas ölçüm ve hidrolik akış kısma elamanları kullanılarak daha düşük hızlara ve daha hassas ölçümlere ulaşmak gelecekteki çalışmalarda mümkün olacaktır.

İleride yapılacak eklemelerden biri olarak pompa çıkışına bir akış metre yerleştirilmesi planlanmaktadır. Bu sayede gerçek akış verilerine ulaşabilmek mümkün olacaktır.

#### 4.2.3 Yardımcı Ekipmanlar

Çalışmada kullanılan ana makinelerin yanında bu makinaların düzgün çalışabilmesi için kullanılan bazı yan makine ve teçhizat da bu çalışma için üretilmiş ya da satın alınmıştır.

Bu çalışmada kullanılan en önemli yardımcı ekipman olan ön doldurma pompası çatlatmada kullanılacak çatlatma akışkanları boru hattının tamamına ve hidrolik şırınga pompanın içerisine doldurmakla görevlidir. Boru hattını doldurma işinin hidrolik şırınga ile yapılması çok zaman vakit alması ve hidrolik çatlatma pompasının emme fonksiyonunun basma fonksiyonu kadar verimli olmaması nedeniyle ön doldurma pompasına ihtiyaç olmuştur. Dişli bir pompa ve buna bağlı 0,75 kW'lık bir monofaze bir elektrik motoru birbirine kaplin ile bağlanmıştır. 3 adet tanka sahip olan pompada iki tank karışımın süzülmesi işlemi için kullanılmakta bir tanktan ise sisteme sıvı pompalanmaktadır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Ön yükleme pompası.

Bir diğer yardımcı ekipman ise 2 tonluk köprü vinçtir. Bu vincin birincil görevi gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresinin kapağını kaldırmak ve indirmektir. Bunun dışında vinç gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresinin sökülüp birleştirilmesi ile granit örneklerinin boyutlandırılması gibi işlemlerde de kullanılmıştır. Ayrıca büyük

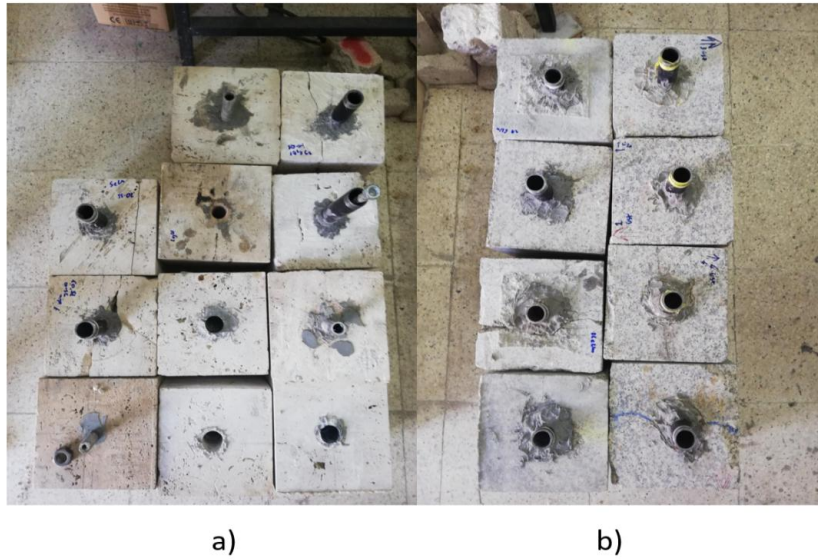
boyutlu ve ağır deney numunelerinin hücrenin içerisine yerleştirmek içinde kullanılmıştır.

Bu iki ana yardımcı ekipmanın yanı sıra sistemde iki kameralı ve bir kayıt merkezli güvenlik kamera sistemi ile hücre içi ve hücre üstü manuel basınç saati gözleme yapılmıştır. Çeşitli boyutlarda boru paftaları ile çeşitli enjektörlere büyük ölçülerde dişler açılmıştır. Bunların yanında taşların delinmesinde Optimum bsm 40 marka bir sütunlu matkap ve Bosch gbm 1650 re marka bir el matkabı ile bir kalıpcı taşlama kullanılmıştır. Enjektörlerin yapımında ve işlenmesinde atölyemizde bulunan Foreman th2866 marka bir torna kullanılmıştır.

### 4.3 Hidrolik Çatlatma Deney Sonuçları

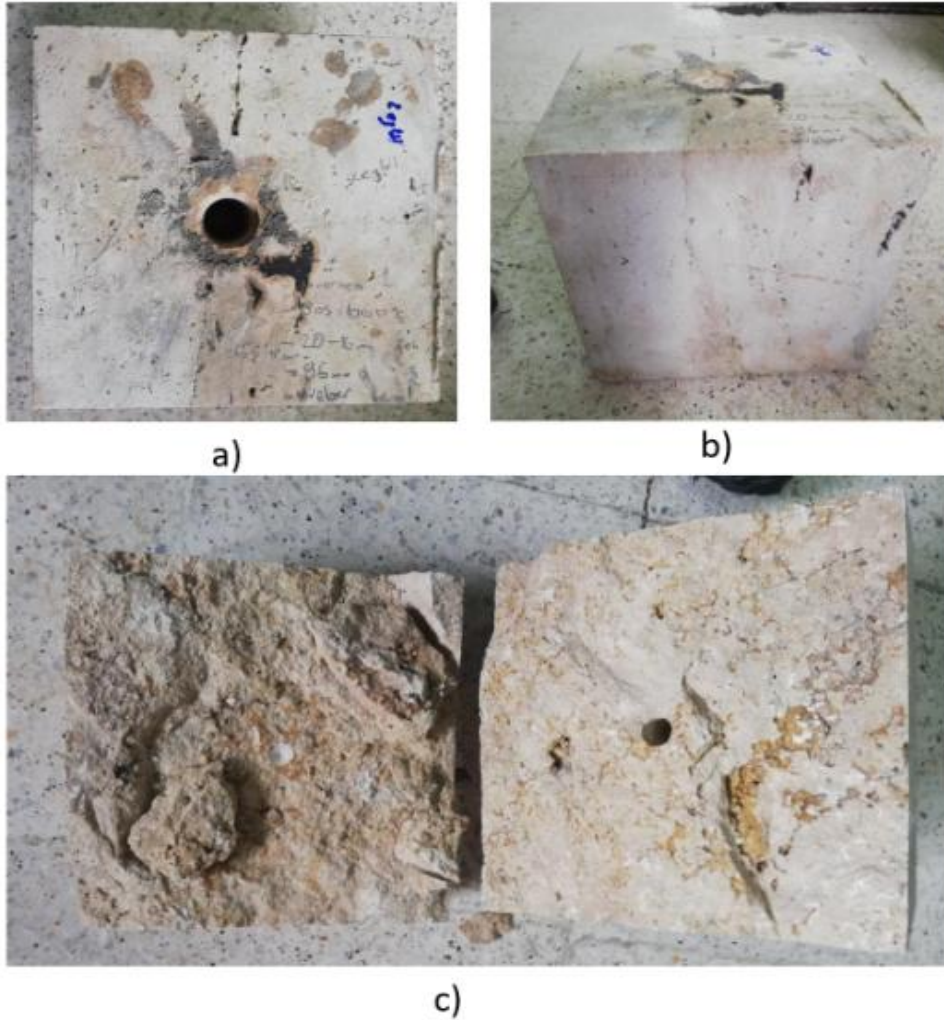
#### 4.3.1 Ön Hidrolik Çatlatma Deneyleri

Ön çatlatma deneyleri hidrolik şırınga pompanın performansının test edilmesi, uygun epoksi ve kimyasal karışımının bulunması, ideal hidrolik çatlatma çatlak ağı ve basıncının ayarlanması için delik çapı ve çatlatma odası oluşturulması için kurgulanmış deneylerdir. Bir dizi çatlatma deneyi çeşitli ebatlardaki çaplarda ve çeşitli kayalar üzerinde yürütülmüştür (Şekil 4.18).

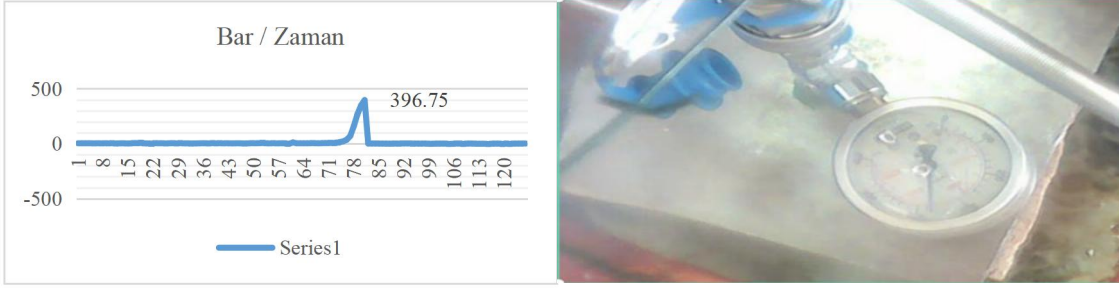


Şekil 4.18 Ön çatlatma deneyleri numuneleri a) traverten b) granit.

Öncelikle 20x20x20 cm boyutlarında traverten numuneleri üzerinde 25 mm çaplı deliklere iç çapı 14mm olan alüminyum boruların sabitlenmesi ile deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde travertenler 10 cm kadar delinip bütün delik boyunca alüminyum boru enjektör deliğe kimyasal dübel ile sabitlenmiştir (Şekil 4.19). Bu deneylerde 400bar'a ulaşan basınçlar gözlemlenmiştir (Şekil 4.20). Ortalama olarak ise 283 barlık bir çatlatma basıncı olduğu gözlemlenmiştir. Bu verilerden hareketle granit numunelerinde yüksek enjeksiyonu oranı ile nispeten daha düşük çatlatma basınçları oluşturmak amacı ile delik çapı büyütülmesine ve çatlatma odası denilen bir boşluğun enjektörden sonra bırakılmasına karar verilmiştir.



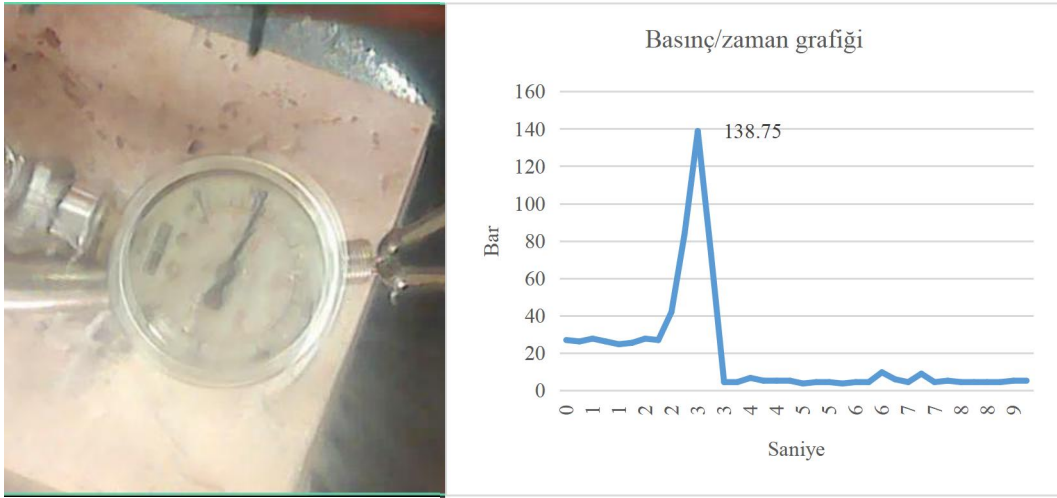
**Şekil 4.20** 25 mm delik, 14 mm iç çapa sahip çatlatılmış traverten numunesi; a) Yanal eksene paralel oluşan çatlağın üstten görüntüsü, b) Yanal eksene paralel oluşan çatlağın yandan görüntüsü c) Dikey eksene paralel çatlamış traverten numunesinin ortadan ikiye ayrılmış görüntüsü.



**Şekil 4.20** 25mm delik çaplı numunenin 396 barda çatlamasına ait basınç/zaman grafiği ve basınç saati görüntüsü.

Bu aşamadan sonra 42 mm çaplı deliklere 33.6 mm dış çaplı ve 26 mm iç çaplı etli çelik doğalgaz borularından yapılan enjektörler yerleştirilmeye başlanmıştır. Bu borular 5 cm derinliğe yerleştirilip kimyasal dübel ile sabitlendikten sonra sabitlenmiş boru enjektörün içinde 25mm lik ikinci bir delik yine 5cm boyunda açılmaktadır. Bu sayede travertenlerde 18ml/sn lik yüksek enjeksiyon oranına rağmen basınç düşürülmesine muaffak olunmuştur. Maksimum oluşan kırılma basıncı 173 bar olarak tespit edilmiş, üç deney sonunda ortalama basınç ise 121 bar olarak hesaplanmıştır.

Bu aşamadan sonra 42 mm çaplı delik ve 25 mm çaplı çatlatma odası düzeni kullanılarak granit numunelerin serbest çatlatılması deneylerine geçilmiş ve beklendiği gibi düşük kırılma basıncı ve yüksek enjeksiyon oranlı çatlatma deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.21).



**Şekil 4.21** 42 mm delikli ve basınç boşluklu traverten numunelerinden birine ait grafik ve görüntü kesiti.

### 4.3.2 Gerçek Üç Eksenli Basınç Koşulları Altında Hidrolik Çatlatma Deneyleri

Hidrolik çatlatma deneylerinde üç eksenli basınç koşulları altında granit numunelerinin çatlatma verileri basınç/zaman değerleri olarak kaydedilmiştir. Çatlatma sıvısı olarak bor yağı ve su karışımı kullanılmıştır.

Ön çatlatma deneylerinde çatlatma basınçlarını düşürmek üzere çatlatma sıvısının kayacın yüzeyine temas edebilmesini artırmak üzere geniş çaplı ve iki kademeli bir delik düzeni ile basınç boşluklu bir enjektör yerleştirme düzeni geliştirilmiştir. 42 mm çaplı ilk 5cm derinliğindeki deliği çatlatma enjektörü kimyasal dübel ile sabitlendikten sonra açılan ikinci delik 25mm çapında ve 5 cm derinliğinde olmaktadır. Bu sayede yanal temas alanı büyütülerek kayaca daha yüksek bir çatlatma kuvveti uygulanabilmektedir. Bu da çatlatma basıncını düşürücü bir etki oluşturmaktadır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Çatlatılmış granit numunesinin kesiti.

Çatlatma basıncı ve açılan çatlatma boşluğu sayesinde yanal yüzeylere daha büyük kuvvetler uygulamak mümkün olmaktadır. 25 mm çaplı ve 50 mm yükseklikteki çatlatma boşluğunu X ve Y eksenleri için ayrı ayrı ikiye bölerek alan hesaplayacak

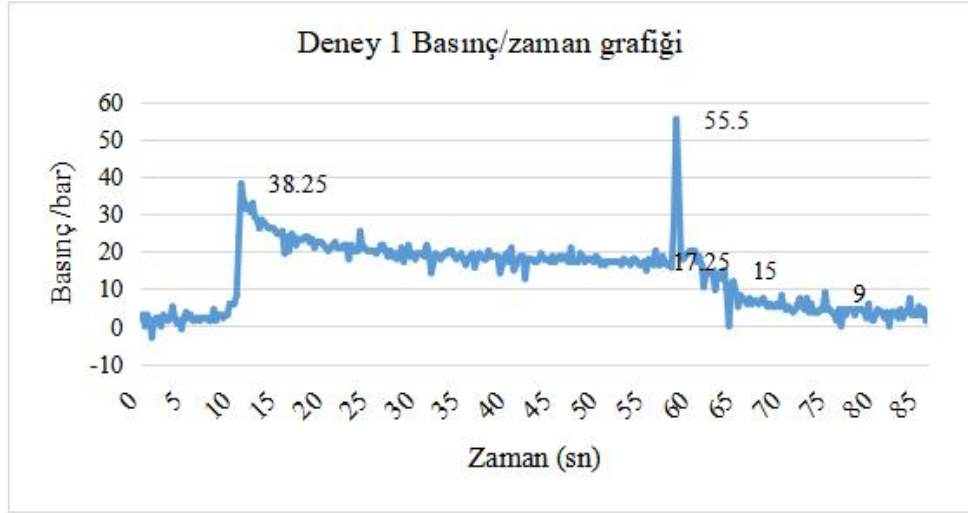


olursak buradan hareketle, çatlatma basıncını ve alan hesabını kullanarak yanal yüzeye uygulanan kuvveti bulmak mümkün olmaktadır (Şekil 4.23).



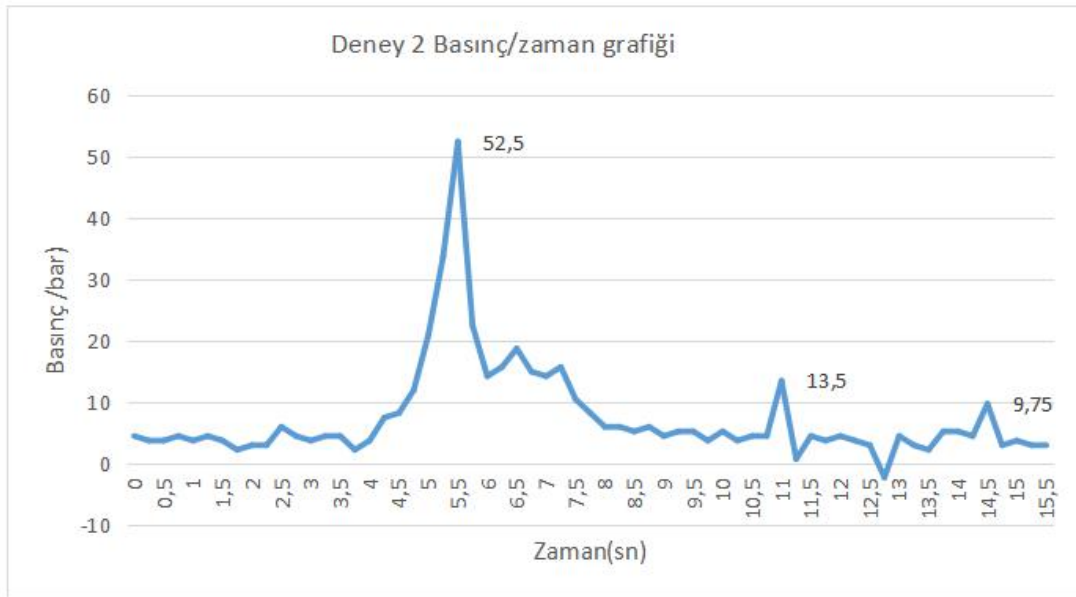
Şekil 4.23 42 mm çaplı delik ve basınç boşluklu granit çatlatma deneyi basınç / zaman grafiği.

Çatlatma deneylerinin ilkinde çatlatma için kullanılan hidrolik şırınga pompadan önce doldurma pompası açılarak sisteme yeni eklenen boruların herbirine ve çatlatma enjektörüne de ön yükleme basıncı uygulanmıştır. Bu ön yükleme basıncı 38,5 bara kadar ulaşmış ancak kayacı kırmaya yetmemiştir. Ön doldurma pompasının kapatılması ile birlikte sistemde check valflerin etkisi ve kayaca yapılan muntazam kimyasal dübel uygulamasının da etkisi ile basınç bir miktar azalmış ama tamamen sıfır seviyesine inmemiştir. 17 bar seviyesinde kalan sistem basıncı hidrolik şırınga pompanın sistemi yüklemesi ile birlikte çok hızlı bir şekilde 55,5 bar çıkmış ve literatürde yapılan diğer çalışmalardaki grafiklere benzer bir şekilde ani olarak düşmüştür. Böylece kırılma basıncı (breakdown pressure) grafiği oluşturulmuştur. Grafik üzerinde ikincil kırılma veya kapatma basıncı (shut-in) kırılma noktası net bir şekilde belli olmasa da kademeli olarak bir iniş gözlenebilmektedir 15 barlık ve 9 barlık iki kırılma noktası daha detaylı bir ölçüm ile daha net bir şekilde gözlemlenebilir (Şekil 4.24). Çatlama yüzeyi sadece 1 atmosfer (yaklaşık 1 barlık) yüzeye paralel olarak gerçekleşmiştir. Böylece çatlak üç ekseninde farklı basınç uygulama ilkesine paralel olarak beklenen yani basıncın en düşük olduğu yüzeye paralel olarak pompalama noktası üzerinde meydana gelmiştir.



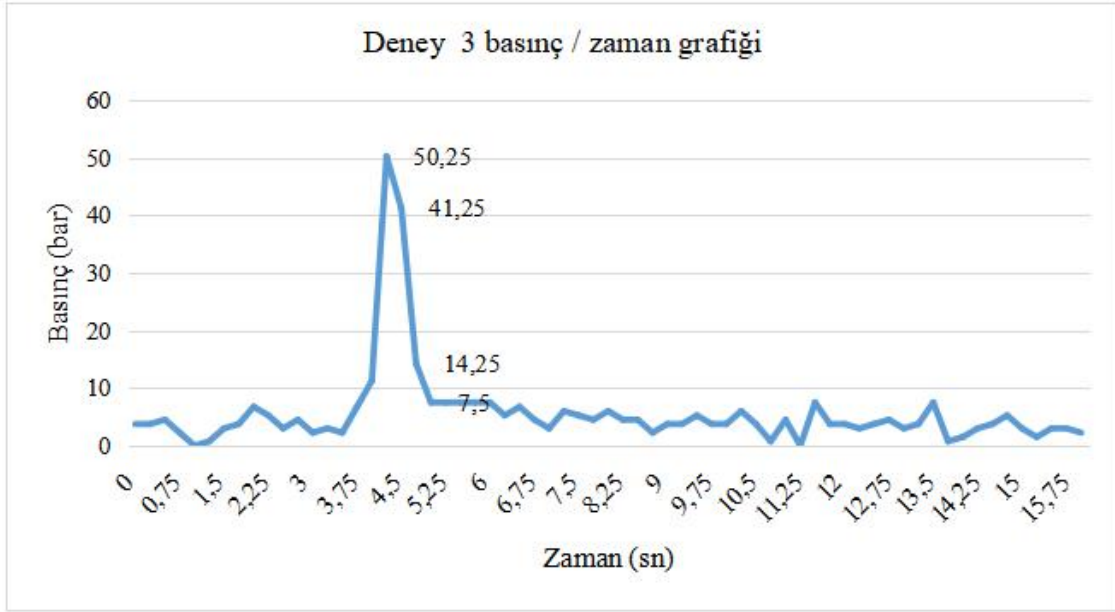
Şekil 4.24 Deney 1'e ait basınç/zaman grafiği.

İkinci çatlatma deneyi için sisteme ön yükleme pompası ile uzun süreli bir yükleme yapılmamıştır. Sadece hidrolik şırınga pompa doldurulmuştur. İkinci çatlatma grafiğinde boşa çatlatılan granit numuneleri ve birinci deneyde çatlatılan numuneye benzer bir 52,5 barlık bir basınç değeri elde edilmiştir. Çatlama yüzeyi sadece 1 atmosfer (yaklaşık 1 barlık) yüzeye paralel olarak gerçekleşmiştir. Burada ilk çatlatma deneyinden farklı olarak bir kapama basıncı benzeri ikincil bir kırılma basıncı kademesi gözükmemektedir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 Deney 2'ye ait basınç/zaman grafiği.

Gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi içerisinde gerçekleştirilen üçüncü deney sonuçları diğer hidrolik çatlatma deney sonuçları ile uyumluluk göstermektedir. 50 bar mertebesinde gerçekleşen kırılma basıncı ikincil bir kırılma noktası olan 41.25 bar seviyesine aynı eğimde devam etmiş bu noktada kaya içerisinde ikincil bir kırılma ve buna bağlı çatlak genişlemesi devam etmiştir. Çatlak oluşumu gene 1 atmosfer basınçlı yüzeye paralel ve pompalama noktası üzerinde başlamıştır (Şekil 4.26).

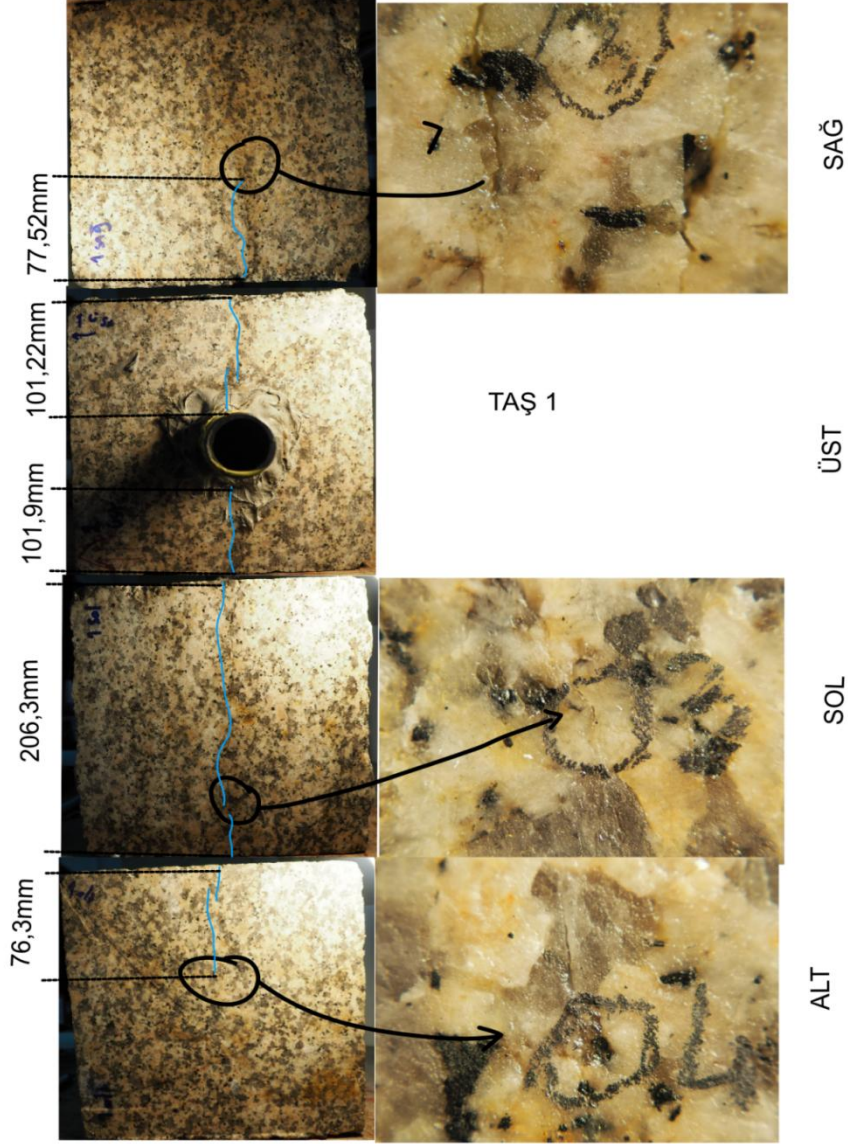


Şekil 4.26 Deney 3'e ait basınç/zaman grafiği.

#### 4.4 Çatlak Geometrisi Sonuçları

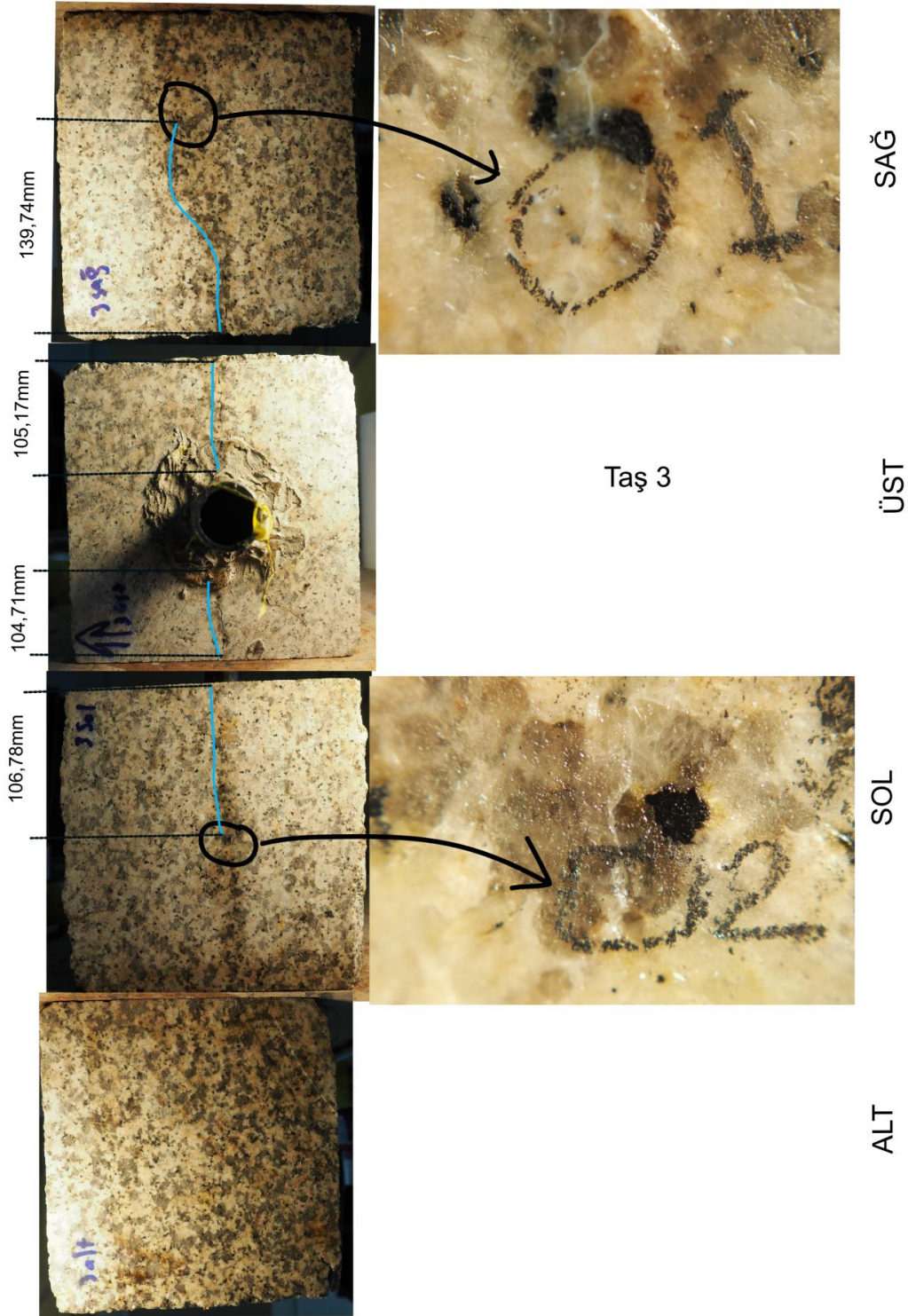
Deney 1'de kullanılan granit numunesinde 563,24 mm uzunluğunda çatlak keşfedilmiştir. Bu çatlak bütün kayaç boyunca uzanmamaktadır. Sağ yüzeyinde yukarıdan başlayarak aşağıya kadar 77,52 mm uzunluğunda bir çatlak bulunmaktadır. Sol yüzeyde ise çatlak yüzey boyunca 206,3 mm olacak şekilde alt tarafa kadar uzanmaktadır. Alt tarafa devam eden çatlak 76,3 mm sonra uzanımını bitirmiştir. Çatlaklar enjektörün girdiği yerde daha açıkken kapalı alt tarafa doğru çatlak aralığının kapandığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.27). Deney 2'de kullanılan granit numunesinin toplam çatlak uzunluğu 456,4 mm olarak ölçülmüştür. Çatlak alt kısma kadar ilerlememiştir. Üst yüzeyde enjektör etrafından başlayan çatlak sağ yüzeyde 139,74 mm kadar ilerleyip durmuştur. Sol yüzeyde ise 106,78 mm kadar ilerlemiş ve orada

durmuştur. Bu çatlak yapısında da çatlak üst yüzeyde daha açıkken alt yüzeylere doğru gidildikçe kapanma eğilimindedir (Şekil 4.28).



Şekil 4.27 Deney 1'de kullanılan granit numunesinin çatlak konumlaması.

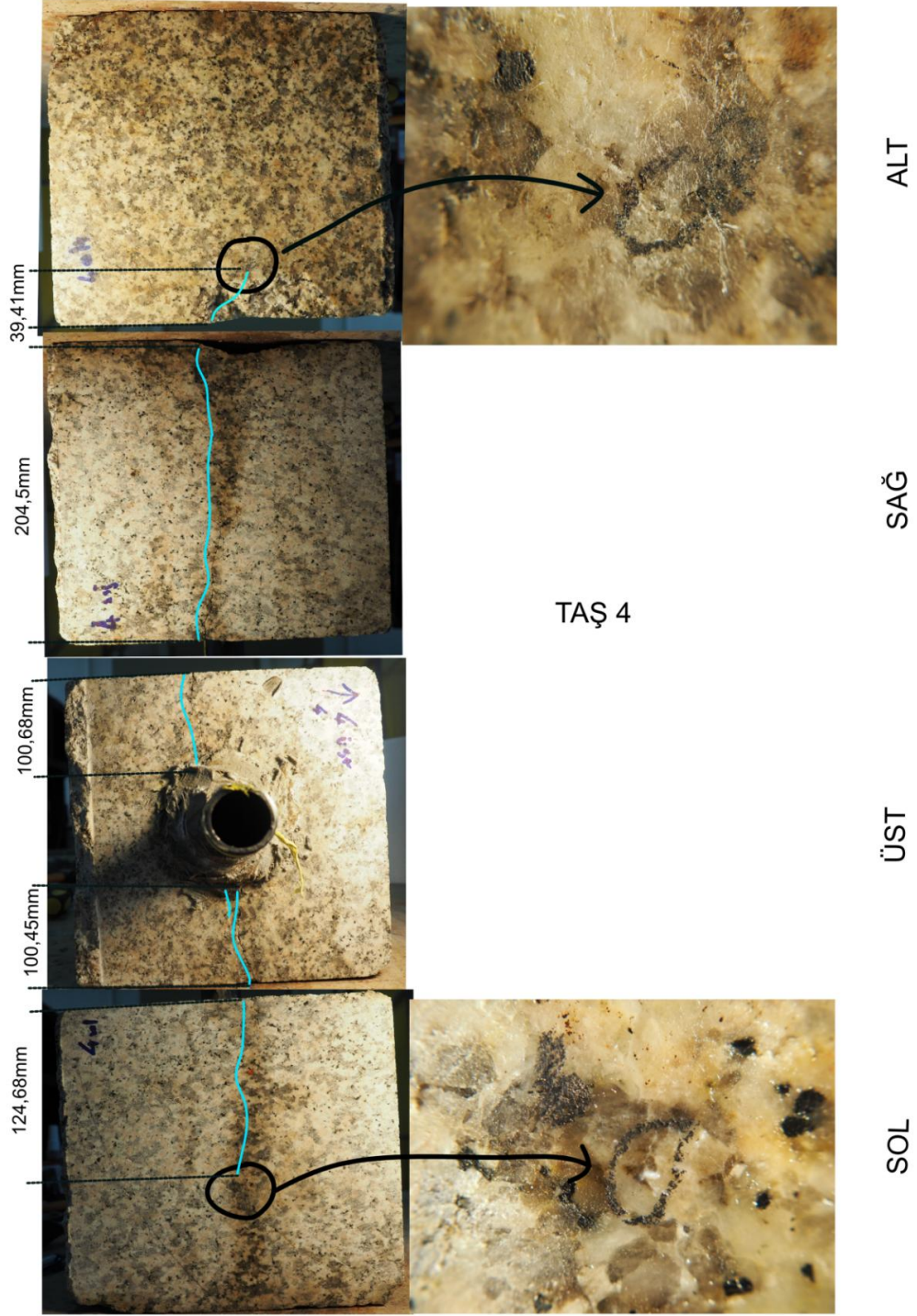
Deney 3 kullanılan granit numunesinin toplam çatlak uzunluğu 569,71 mm olarak ölçülmüştür. Çatlak alt kısma kadar ilerlemiştir. Üst yüzeyde enjektör etrafından başlayan çatlak sağ yüzeyde 204,5 mm kadar ilerleyip alt tarafa doğru dönmüştür. Alt tarafta devam eden çatlakın uzunluğu ise 39,41 mm'dir Sol yüzeyde ise 124,68 mm kadar ilerlemiş ve orada durmuştur. Bu çatlak yapısında da çatlak üst yüzeyde daha açıkken alt yüzeylere doğru gidildikçe kapanma eğilimindedir (Şekil 4.29).



Şekil 4.28 Deneý 2’de kullanılan granit numunesinin çatlak konumlaması.

Çatlak yapılarının üst yüzeylerde daha açık olmasının sebeplerinden biri çatlatma odasının dip noktasının tam kayacın orta noktası olan 100 mm’de bitmesi olabilir. Çatlatma odasında oluşan kuvvetin çok büyük bir kısmı kayacın üst kısmına kuvvet

uygulamakta ve bu da üst kısımdaki çatlakların daha geniş açıklıklar ihtiva etmesine neden olmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda çatlatma odasının kayacın her iki yarısına da eşit oranda bırakılmasına dikkat edilmesine çalışılacaktır.



Şekil 4.29 Deney 3’de kullanılan granit numunesinin çatlak konumlaması.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

### 5.1 Tartışma

Fash vd. (2012)'de yaptıkları çalışmada gerçek üç eksenli basınç altında EGS rezervuarı olabilecek 300x300x300 mm boyutunda granite numunelerini uygun akış hızları ile laboratuvar ortamında çatlatmıştır.

Hidrolik çatlatma, karmaşık bir sıvı-katı bağlantı sürecini içerir. Kompaktlığı ve granitin düşük geçirgenliği nedeniyle, bozulmamış büyük boyutlu bir granit numunesi, bir çatlağı tetiklemek için yüksek bir kırılma basıncı gerektirir. (Cheng ve Zhang 2020).

Cheng ve Zhang (2020) yaptıkları çalışmada 300x300x300 mm lik granite numunelerini tam ortasından 16 cm derinliğinde ve 14 mm çapında delerek bu derinliğe 10 mm çapında ve 16 cm uzunluğunda bir enjeksiyon tüpünü bu deliğe yerleştirmişlerdir. Tüpün 15 cm lik kısmını deliğe sokmuşlar altında kalan 1 cm'lik alana şeffaf plastikden bir ek yapmışlar ve 1cmlik kısmını dışarıda bırakmışlardır. Yaptıkları 3 eksenli basınç hücresi ile sırasıyla 12,8,4 Mpa lık basınçları kayaç yüzeyine uygulamışlardır (Şekil 5.1).

test no.	injection flow rate (mL/min)	initiation pressure (MPa)	breakdown (maximum) pressure (MPa)	postfracturing pressure (MPa)	propagation time (s)
1	5	21.06	22.12	11.20	613
2	10	22.95	24.68	12.69	498
3	15	25.61	27.65	11.27	447
4	20	27.91	30.06	9.97	343
5	25	28.71	34.10	7.68	220
6	30	32.52	36.01	3.11	88

**Şekil 5.1** Cheng ve Zhang (2020) tarafından yapılan çalışmada farklı enjeksiyon hızlarında elde edilen kırılma ve kırılma başlangıcı verileri.

Genel olarak bilinen enjeksiyon oranı arttıkça kırılma basıncının da arttığıdır. Fakat etkili bir çatlatma ağı oluşturmak için de enjeksiyon oranının yüksek olması istenir. Ning Li vd. (2022) yaptıkları çalışmada kırılma basıncını enjeksiyon oranı kadar eksenel basınçların arasındaki farklarında etkilediğini belirtmekte ve bu alanda

çalışmaların yapılması gerektiğini vurgulamaktadırlar. HSD (horizontal stress difference) yatay stress farklarını 0 Mpa, 3 Mpa ve 6 Mpa yapmışlar ve değişik enjeksiyon oranlarında kırılma basıncına etkisini incelemişlerdir. 100x100x100mm lik numunelere 10mm çapında ve 50 mm derinliğinde delikler açarak çatlatma deneyleri gerçekleştirmişlerdir (Şekil 5.2).

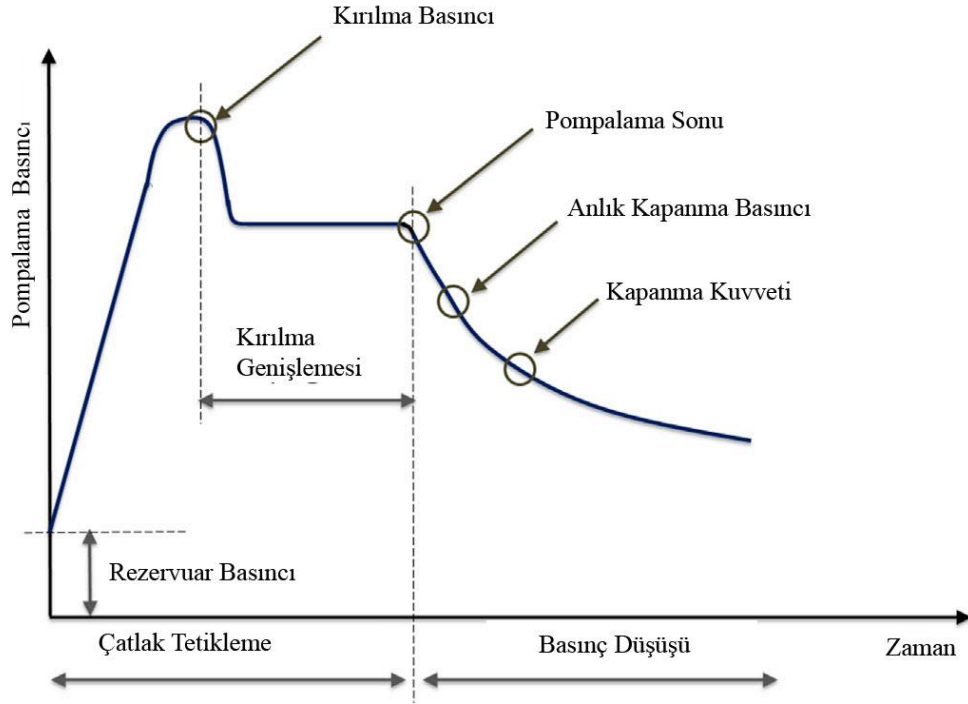
No.	Triaxial Stress (MPa)	HSD (MPa)	IR (mL/min)	BP (MPa)
HF 1	25/3/3	0	10	6.66
HF 2	25/6/3	3	10	8.85
HF 3	25/9/3	6	10	12.75
HF 4	25/3/3	0	60	12.22
HF 5	25/6/3	3	60	8.64
HF 6	25/9/3	6	60	9.54
HF 7	25/3/3	0	100	14.10
HF 8	25/6/3	3	100	11.43
HF 9	25/9/3	6	100	5.79

**Şekil 5.2** Yatay eksen stresleri arasındaki farka dayalı kırılma zaman değerleri (Ning vd. 2022).

Farklı çalışmalarda farklı kırılma basınçları görmek mümkündür. Gerek farklı granit çeşitleri ve yapıları gibi petrografik nedenler gerekse de enjeksiyon oranı, numune boyutu, çatlatma deliği boyutu ve boşluğu, eksenel basınçların dağılımı, çatlatma akışkanı vizkozitesi gibi değişkenler çatlatma basınç ve dağılımlarını etkilemektedir. Çalışmada hidrolik ekipmanın 18 ml/snlik enjeksiyon oranı birçok çalışmada kullanılan oranın çok üstünde bir orandır. Bu sebeple yüksek kırılma basınçları oluşmasını engellemek için 25 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde büyük bir çatlatma odası bırakılmış ve çeperlere uygulanan yatay kuvvetin artırılması ön görülmüştür. Yapılan deneyler neticesinde de 55 bar (5.5 MPa) olan çatlatma basınçları elde edilmiştir.

İdeal bir hidrolik çatlatma grafiğinde kırılma basıncı en tepede yer almaktadır. Kırılma noktası pikinin ardından pompalama kesilene kadar çatlak genişlemesi alanı ilerlemeye devam eder (Şekil 5.3) (Prabhakaran vd. 2017). Çalışmamızda da oluşan grafiklerde bu noktalar çok net olamamakla beraber özellikle 2. ve 3. deneylerde gözükmemektedir. Bu noktaların daha net olması için sensör veri alma aralığını düşürmek gerekmektedir. Daha hassas sensörler ve elektronik dönüştürücüler ile bu noktaları netleştirmek mümkün olacaktır.





Şekil 5.3 İdeal hidrolik çatlatma basınç grafiği (Prabhakaran vd. 2017).

Çatlatma odasının geniş olması uygulanan kayaç çeperi üzerine etkiyen yanal kuvvetlerin büyük olmasına sebebiyet vermiştir. Çatlatma odası yanal alanı hesaplamak için delik çevresi ve yüksekliğini çarpmak yeterli olacaktır.

$$2\pi r \cdot h = A \quad (5.1)$$

$$2 * 3.14 * 12.5 * 25 = A \quad (5.2)$$

$$A = 1962.5 \text{ mm}^2 \quad (5.3)$$

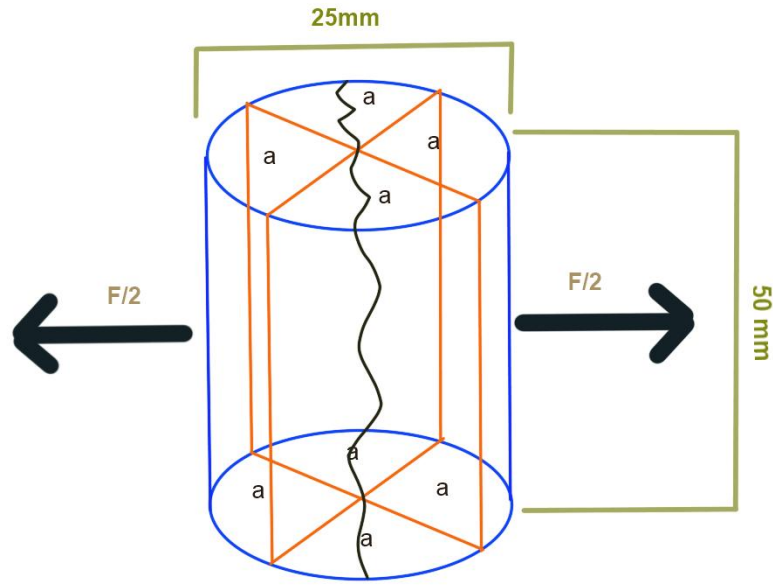
Bulunan alan verisi  $\text{cm}^2$  kareye çevrilip basınç formülünde yerine yazılırsa çepere uygulanan kgf değeri bulunur. Burada sadece çatlayan yüzeye uygulan kuvveti öğrenmek istediğimiz için ve çatlayan yüzey toplamı, toplam yüzey alanının yarısı olduğu için (sadece X eksenindeki toplam alan) toplam alanın yarısını almak gerekmektedir. Basınç için deney 1 de oluşan 55,5 barlık basınç kullanılmıştır.

$$P * A = F \quad (5.4)$$

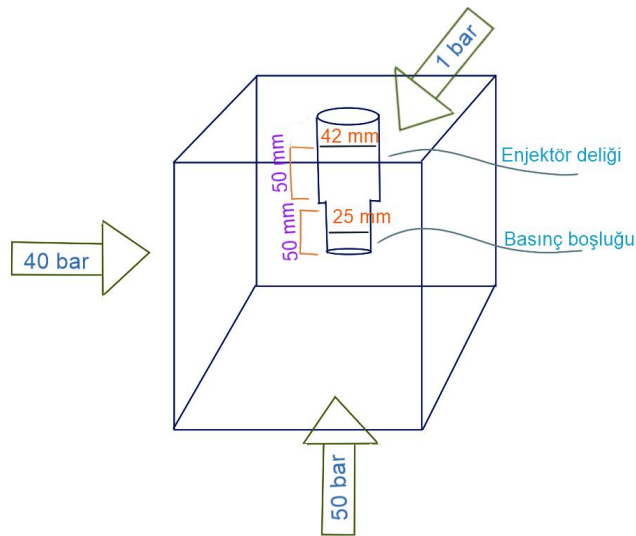
$$55,5 * 9,81 = F \quad (5.5)$$

$$F = 544.59 \text{ kgf} \quad (5.6)$$

Deney 1 verilerinden hareketle 55,5 barlık basınç, çatlatma odasının X eksenini yönünde toplam 554.9 kgf'lık bir kuvvet oluşturarak çatlağın oluşmasına sebep olmuştur. Eğer bileşke kuvvet X ekseninde paylaşılacak olursa X eksenini yönünde birbirine zıt olarak iki 272.3 kgf'lık iki kuvvet elde edilir (Şekil 5.4; 5.5).



Şekil 5.4 Kuvvet dağılımları.



Şekil 5.5 Çatlatma odası ve enjektör deliklerinin basınçlara göre konumu.

## 5.2 Sonuçlar

Yeraltında Kayaçların hidrolik olarak çatlatılması rezervuar mühendisliği açısından gelecek vaad eden, yeni doğal enerji kaynakları oluşturabilme potansiyeline sahip ancak daha çalışılması gereken birçok konuyu bünyesinde barındıran bir konudur. İkinici dünya savaşından bu yana özellikle petrol endüstrisi sayesinde hızla gelişim göstermiş olan kayaçların hidrolik olarak çatlatılması son yıllarda yeni kullanım alanlarının keşfi ile de son yıllarda bu konu ile ilgili hem akademik hem de endüstride birçok yeni çalışma yapılmaktadır. Kızgın kuru kayalardan jeotermal enerji üretmek, tetiklenmiş depresel aktiviteler oluşturmak gibi çeşitli alanlarda bu yöntemin değerlendirilmesi mümkün olmaktadır.

Aksaray bölgesi granitlerinde kullanılan 25 mm çaplı ve 50mm yükseklikli çatlatma boşluğu vasıtasıyla çatlatma basınçları 50 bar seviyesinde gerçekleşmiştir. atlatma odası yöntemi sayesinde çatlama basınçlarını düşürmek mümkün gözükmektedir. Daha sonraki çalışmalarda bu yöntem üzerinde gerekli sayıda deney yapılarak parametrelerinin ve sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir.

50 bar olarak ayarlanan litostatik basınç 20 cm'lik bir plaka ile hücre içindeki granit kayaca yaklaşık 200 kN'luk bir kuvvet uygulamaktadır. Yerkabuğunun ortalama yoğunluğu 2,8 g/cm<sup>3</sup> alındığında yaklaşık simulasyon derinliği 180 metre civarında olmaktadır. İleriki çalışmalarda bu simulasyon derinliği güvenlik önemleri gözetilerek kademeli olarak artılacak ve deneylerin bu koşullar altında yapılması sağlanacaktır.

Gerçek üç eksenli basınç ve sıcaklık hücresi tasarımı açısından özgün noktalar barındırmaktadır. Yurt dışında yapılan başka çalışmalarda kullanılan gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücrelerini kopyalamak yerine kendi hcremizi onlardan farklı tasarlayarak ve yeni özellikler ekleyerek makinamızı patent alabilecek bir seviyeye getirdik. Bu durum Türkiye Patent Ofisi tarafından da tescillenerek makinayı geliştiren hocalarımıza patent belgesi verilmiştir.

Gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi dışında veya içerisinde kayalara uygun şekilde bağlanıp onları çatlatabilecek bir pompaya çalışmada ihtiyaç vardı. Bu sebeple geliştirilen hidrolik şırınga pompanın tasarımı ve üretimi de çalışma bünyesinde yapılmıştır. Bu makinanın tasarımının gerçekleştirilmesi mekanik, hidrolik, elektronik ve yazılım olmak üzere dört ayrı bileşenin bir araya getirilip uyumlu bir şekilde çalıştırılmasıyla olmuştur. Bu ekipmanın tasarımı ve üretimi sırasında üniversitemiz bünyesindeki çeşitli birimlerden destek alınması ile üniversite içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sistemin birçok elektronik parçası da çalışma bünyesinde yapılmış yazılım da özgün olarak çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Makine IOT teknolojisine sahiptir, uzaktan izlenip kontrol edilebilmektedir.

Makinanın birçok değişik taş ile yapılan deneyleri olumlu ve güvenli sonuçlar vermiştir. Sensör verilerindeki ve yazılımdaki veri kayıt sistemleri kameralar ve kayıt cihazları ile de defaaten test edilerek teyit edilmiştir.

Deneylerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gereken ara ürünler, ekipmanlar ve yöntemleri kapsayan bu süreçte birçok malzeme ve yöntem deneyerek deneylerin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Gerçek üç eksenli sıcaklık ve basınç hücresi içerisindeki deney sonuçlarının gerek basınç değerleri gerek çatlak geometrisi konusunda beklenen seviyelere ve şekillere yakın olması deney kurgusunun da doğru bir şekilde olduğunu göstermektedir.

Makinalar, teçhizat, kimyasallar, yöntemler ve yazılımlar gibi birçok konu tez kapsamında tasarlanmış, üretilmiş ve sahada çalışmaları doğrulanmıştır. Bu aşamaya kadar yapılan çok şey olmasına rağmen bundan sonra yapılacaklar daha fazla ve çeşitlidir. Ancak alt yapının kurulmuş olması bundan sonra yapılacakların küçük dahi olsa herbirinin yeni bir çalışma ve makale konusu olabilecek şekilde değerlendirilmesine imkan tanımaktadır.

Çalışma Kapsamında yapılan deneylerde kayaların ısıtma durumları göz ardı edilmiştir. Ancak gelecek çalışmalarda ısıtma fonksiyonları da devreye alınarak, sıcaklık faktörü de dikkate alınacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Amadei B, Stephansson O, 1997, Rock Stress and Its Measurements, Springer Science Business Media Dordrecht, 499p.
- Anderson T L, 1991, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, CRC Press, 684p, Boston.
- Arop J B, 2013, Geomechanical Review of Hydraulic Fracturing Technology, MIT, Civil and Environmental Engineering, Master Thesis, 291p, Massachusetts.
- Axelsson G, Thórhallsson, S, Björnsson G, 2006, Stimulation of Geothermal Wells in Basaltic Rock in Iceland, In Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe Workshop, Vol: 3.
- Bächler D, 2003, Coupled Thermal-Hydraulic-Chemical Modeling at the Soultz-sous-Forêts HDR Reservoir (France), Swiss Federal Institute of Technology, PhD Dissertation, 151p, Zurich.
- Bachu S, Hitchon B, 1996, Regional-Scale Flow of Formation Waters in the Williston Basin, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 80, 248-264.
- Brown D W, Duchane D V, Heiken G, Hiriscu V T, 2012, Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy, Springer-Verlag, 669p, Berlin.
- Blackham M, 2015, Geomechanics of Hydraulic Fracturing, Environmental Effects of Hydraulic Fracturing, 13p, Unpublished.
- Bertini G, Casini M, Ciulli B, Ciuffi S, Fiordelesi A, 2005, Data Revision and Upgrading of the Structural Model of the Travale Geothermal Field (Italy), World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.
- Brady B, Elbel J, Mack M, Morales H, Nolte K, Poe B, 1993, Cracking Rock: Progress in Fracture Treatment Design, Oilfield Review, 4, 4-17.
- Burçak M, 2006, Aksaray Jeotermal Sahaları (Acıgöl-Zığa-Şahinkalesi) Jeotermal Isı Kaynaklarının Araştırılması ve Jeotermal Sistemlerin Kavramsal Modellenmesi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Niğde.

- Burçak M, 2012, Kızgın Kuru Kaya ve Geliştirilebilir Jeotermal Sistemler, MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 15s, 69-78.
- Burçak M, 2015, Kütahya Simav Jeotermal Sahasının Özellikleri Kavramsal Modeli ve Kızgın Kuru Kaya Olanakları, Jeotermal Kaynaklar Sempozyumu ve Sergisi-2015, 4-6 Kasım, Ankara.
- Clark J B, 1949, A Hydraulic Process for Increasing The Productivity of Wells, Journal of Petroleum Technology, 1, 1-8.
- Cheng Y, Zhang Y, Yu Z, Hu Z, Yang Y, 2020, An Investigation on Hydraulic Fracturing Characteristics in Granite Geothermal Reservoir, Engineering Fracture Mechanics, 237, 107252.
- Epa U, 2004, Evaluation of Impacts to Underground Sources of Drinking Water by Hydraulic Fracturing of Coalbed Methane Reservoirs, Office of Water, 463p, Washington, D.C.
- Frash L P, Gutierrez M S, 2014, Laboratory-Scale Study of Hydraulic Fracturing in Heterogeneous Media for Enhanced Geothermal Systems and General Well Stimulation, Colorado School of Mines, Civil and Environmental Engineering, PhD Thesis, 144p, Colorado.
- Duchane D, 1993, Hot Dry Rock Flow Testing –What has it Told us? What Questions Remain? Transactions, Geothermal Resources Council, 17, 325–330.
- Durst D, 2002, Geochemical Modeling of the Soultz-sous-Forêts Hot Dry Rock Test Site: Coupled Fluid-Rock Interaction to Heat and Fluid Transport. Université de Neuchâtel, PhD Dissertation, 127p, Switzerland.
- Gandossi L, 2013, An Overview of Hydraulic Fracturing and other Formation Stimulation Technologies for Shale Gas Production, European Commission, Joint Research Centre (JRC), Institute for Energy and Transport Technical Reports, Report EUR 26347 EN, 64p, Netherlands.
- Geertsma J, de Klerk F, 1969, A Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulically Induced Fractures, Journal of Petroleum Technology, 21, 1571-1581.

- Georgsson L S, 2009, Geophysical Methods in Geothermal Exploration, Short Course IV on Surface Exploration for Geothermal Resources, 16p, Kenya.
- Gevrek A İ, 1991, Gradyan Sondajları ve Yer Altı Sıcaklık Ölçümlerinin Jeotermal Enerji Araştırmalarında Yeri ve Önemi, Jeoloji Mühendisliği, 39, 51-54.
- Haimson B, 1978, The Hydrofracturing Stress Method and Recent Field Results, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 15, 167-178.
- Haimson B, Fairhurst C, 1967, Initiation and Extension of Hydraulic Fracturing in Rocks, SPE Third Conference on Rock Mechanics, Society of Petroleum Engineers Journal, 7, 310-318.
- Han S, Cheng Y, Gao Q, Yan C, Zhang J, 2020, Numerical Study on Heat Extraction Performance of Multistage Fracturing Enhanced Geothermal System, Renewable Energy, 149, 1214-1226.
- Hettkamp T, Baumgartner J, Baria R, Gerard A, Gandy T, Michelet S, Teza D, 2004, Electricity Production from Hot Rocks, Proceedings of 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, January 26-28, 2004, SGP-TR-175, Stanford.
- Hubbert M K, Willis D G, 1957, Mechanics of Hydraulic Fracturing. Transactions of Society of Petroleum Engineers of AIME, 210, 153-168.
- Huenges, E, Ledru P (Ed.), 2010, Geothermal Energy Systems: Exploration, Development, and Utilization, John Wiley & Sons, 486p.
- Ishida T, Chen Q, Mizuta Y, Roegiers J C, 2004, Influence of Fluid Viscosity on the Hydraulic Fracturing Mechanism, Journal of Energy Resources Technology, 126, 190-200.
- Kara İ, 2007, Aksaray-Güzelyurt-Şahinkalesi SHK-1 Sıcak Su Sondajı Kuyu Bitirme Raporu: MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No:11004, Ankara.
- Kaya S, Kesimal A, 2015, Karadeniz teknik üniversitesi maden mühendisliği bölümü kaya mekaniği laboratuvarı, Ders notları, 9s, Basılmamış.

- Kumar L, Hossain M S, Assad M E H, Manoo M U, 2022, Technological Advancements and Challenges of Geothermal Energy Systems: A Comprehensive Review, *Energies*, 15, 9058.
- Kranz, R L, 1983, Microcracks in rocks: a review, *Tectonophysics*, 100 (1-3), 449-480.
- Leloup P H, Ricard Y, Battaglia J, Lacassin R, 1999, Shear Heating in Continental Strike-Slip Shear Zones: Model and Field Examples, *Geophysical Journal International*, 136, 19-40.
- Legarth B, Huenges E, Zimmermann G, 2005, Hydraulic Fracturing in a Sedimentary Geothermal Reservoir: Results And Implications, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 1028-1041.
- Lu S M, 2018, A Global Review of Enhanced Geothermal System (EGS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2902-2921.
- Lutgens F K, Tarbuck E J, 2006, *Essentials of Geology*, 486 p, Upper Saddle River, N.J. Pearson Prentice,
- Ngugi P K, 2008, Geothermal Well Drilling, Short Course III on Exploration for Geothermal Resources, 23p, Kenya.
- Nordgren R P, 1972, Propagation of a Vertical Hydraulic Fracture. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 12, 306-314.
- Olasolo P, Juárez M C, Morales M P, Liarte I A, 2016, Enhanced Geothermal Systems (EGS): A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 133-144.
- Orzol J, Jung R, Jatho R, Tischner T, Kehrer P, 2005, The Genesys Project: Extraction of Geothermal Heat from Tight Sediments. *Proceedings World Geothermal Congress*, April 24-29, 2005, Antalya.
- Özdemir A, 2012, Türkiye’de Jeotermal Enerji, 354s, Elma Teknik Basım Dağıtım, Ankara.
- Perkins T W, Kern L R, 1961, Widths of Hydraulic Fractures, *Journal of Petroleum Technology*, 13, 937-949.
- Prabhakaran R, De Pater H, and Shaoul J, 2017, Pore Pressure Effects on Fracture Net Pressure and Hydraulic Fracture Containment: Insights from An Empirical and



- Simulation Approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, 724-736.
- Suthersan S S, 1999, Hydraulic and Pneumatic Fracturing, Suthersan S S (Ed.), Remediation Engineering: Design Concepts, Gerahty and Miller Environmental Science and Engineering Series 237-254, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA,
- Şengün N, Altındağ R, 2010, Kayaçların Kırılma Tokluğu (Mod-I) ile Fiziko-Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkilerinin Değerlendirilmesi. *Yerbilimleri*, 31, 127-139.
- Pruess K, 2006 Enhanced Geothermal Systems (EGS) Using CO<sub>2</sub> as Working Fluid – A Novel Approach for Generating Renewable Energy with Simultaneous Sequestration of Carbon, *Geothermics*, 35, 351–367.
- Pruess K, 2008, On the Production Behavior of Enhanced Geothermal Systems with CO<sub>2</sub> as Working Fluid, *Energy Conversion and Management*, 49, 1446-1454.
- Rabemanana V, Vuataz F D, Kohl T, André L, 2005, Simulation of Mineral Precipitation and Dissolution in the 5-km Deep Enhanced Geothermal Reservoir at Soultz-sous-Forêts, France, *Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey*.
- Romero J, Mack M G, Elbel J L, 1995, Theoretical Model and Numerical Investigation of Near-Wellbore Effects in Hydraulic Fracturing. In: *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference & Exhibition, 22-25 October, Dallas*.
- Rummel F, 2005, Geothermal energy—An Energy Option for the Future, *Rock Mechanics With Emphasis On Stress*, Rummel F, AA Balkema Publisher, 151-168.
- Safari M, Gandikota R, Mutlu U, 2013, Pulsed Fracturing in Shale Reservoirs: Geomechanical Aspects, Ductile-Brittle Transition and Field Implications, In: *Proceedings of the Unconventional Resources Technology Conference, 12-14 August, Denver, Colorado*.
- Santos L, Taleghani A D, Li G, 2018, Expandable Proppants to Moderate Production Drop in Hydraulically Fractured Wells, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 55, 182-190.

- Singhal B B S, Gupta R P, 2010, Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, 408p, Springer Science & Business Media.
- Şahinci A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası. Reform Matbaası, 545s, İzmir, Türkiye.
- Şener Ç, Erdoğan A R, Özgüler M E, 1986, Türkiye'deki Jeotermal Alanların Araştırılmasında Jeofizik Çalışmalar, MTA Dergisi, 107, 152-168.
- Simsek S, Demir A, 1991, Reservoir and Cap Rock Characteristics of Some Geothermal Fields in Turkey and Encountered Problems Based on Lithology, Journal of the Geothermal Research Society of Japan, 13, 191-204.
- Taleghani A D, Olson J E, 2014, How Natural Fractures Could Affect Hydraulic-Fracture Geometry, Society of Petroleum Engineers Journal, 19, 161-171.
- Tenzer H, 2001, Development of Hot Dry Rock Technology, GHC Bulletin, 22, 14-22.
- TS EN 1936, 2010, Türk Standartları, Doğal Taşlar Deney Metotları, Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik. TSE, Ankara
- TS EN 1375, 2009, Türk Standartları, Doğal Taşlar - Deney yöntemleri - Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini, TSE, Ankara
- TS EN 1926, 2007, Türk Standartları, Doğal taşlar - Deney Yöntemleri - Tek eksenli Basınç Dayanımı Tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 3260, 1978, Türk Standartları, Beton Yüzey Sertliği ile Yaklaşık Beton Dayanımının Tayini Kuralı, TSE, Ankara.
- TS EN 12372, 2022, Türk Standartları, Doğal Taşlar - Deney Yöntemleri - Yoğun Yük Altında Eğilme Dayanımı Tayini, TSE, Ankara.
- Xu T, Pruess K, 2004, Numerical Simulation of Injectivity Effects of Mineral Scaling and Clay Swelling in a Fractured Geothermal Reservoir, Transactions, Geothermal Resources Council, 28, 269–276.
- Warpinski N R, Clark J A, Schmidt R A, Huddle C W, 1982a, Laboratory Investigation on the Effect of In-Situ Stresses on Hydraulic Fracture Containment. Society of Petroleum Engineers Journal, 22, 333-340.

- Warpinski N R, Brangan P Wilmer R, 1982b, In-Situ Stress Measurements at U. S. DOE's Multiwell Experiment Site, Mesaverde Group, Rifle. *Journal of Petroleum Technology*, 37, 527-536.
- Weeren H O, 1966, Disposal of Radioactive Wastes by Hydraulic Fracturing Part III, Design of Ornl'S Shale-Fracturing Plant, *Nuclear Engineering and Design*, 4, 108-117.
- Whittaker B N, Singh R N, Sun G, 1992, *Rock Fracture Mechanics*, Elsevier Science Publishers, Sara Burghartstraat, 25p, Amsterdam, The Netherlands.
- Wu F, Xu E, Wei X, Liu H, Ding Q, 2019, Laws of Multi-Fracture Coupling Initiation During Blasting Induced Hydraulic Fracturing. *Natural Gas Industry B*, 6, 293-301.
- Zimmermann G, Tischner T, Legarth B, Huenges E, 2009, Pressure-Dependent Production Efficiency of an Enhanced Geothermal System (EGS): Stimulation Results and Implications for Hydraulic Fracture Treatments, Vinciguerra S, Bernabé Y (Ed.), *Rock Physics and Natural Hazards (1089-1106)*, Birkhäuser Basel.
- Zoback M L, Zoback M D, vd., 1989, Global Patterns of Tectonic Stress. *Nature*, 341, 291-298.
- Zoback M L, Zoback M D, 2002, Stress in the Earth's Lithosphere, *Encyclopedia of Pyhscial Science and Technology*, 16, 143-154.

### **İnternet Kaynakları**

1-[https://petrowiki.spe.org/Fracture\\_propagation\\_models](https://petrowiki.spe.org/Fracture_propagation_models), Erişim tarihi (15.10.2022)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Feyzullah Ekrem ÇONKAR  
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar / 03.01.1981  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : 0505 566 15 16 / feconkar@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Sivas Selçuk Anadolu Lisesi, (1996-1999)  
Lisans : Cumhuriyet Üniversitesi, Maden Mühendisliği  
Bölümü, (2002-2009)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri  
Enstitüsü, Makine Müh. Anabilim Dalı, (2009-  
2012)  
Doktora : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri  
Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, (2014-2023)  
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Afyon Kocatepe Üniversitesi  
2011-devam ediyor