

Araştırma Makalesi / Research Article

Hidrolik Çatlatma Uygulamaları için Gerçek Üç Eksenli Yeraltı Basınç ve Sıcaklık Simülasyon Hücresi Tasarım ve Üretimi

Feyzullah Ekrem ÇONKAR^{1*}, Ahmet YILDIZ¹¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Jeotermal ve Maden Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezicorresponding author *e-posta: feconkar@aku.edu.tr,
ayildiz@aku.edu.tr,ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1435-7089>
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9077-0628>

Geliş Tarihi: 02.08.2021

Kabul Tarihi: 26.12.2021

Öz**Anahtar kelimeler**Hidrolik çatlatma;
Kızgın kuru kaya;
Jeotermal Enerji;
Gerçek Üç Eksenli
Sıkıştırma

Kızgın kuru kaya jeotermal sistemlerde rezervuar oluşturma uygulamalarının başarısı birçok faktöre bağlıdır. Saha çalışmaları öncesi yapılacak olan simülasyon ve laboratuvar testleri risk faktörlerinin en aza indirilmesi maliyetlerin düşürülmesi ve uygulamanın istenen zamanda başarı ile tamamlanması açısından önemlidir. Kızgın kuru jeotermal sistemlerde rezervuar oluşturma çalışmalarının laboratuvar ortamında test edilebilmesi için sıcaklık ve basıncı üç farklı eksenle simüle edebilen bir hücreye ihtiyaç vardır. Söz konusu simülasyon hücresi yardımıyla basınç ve sıcaklık koşulları altında hidrolik kırma işlemini de gerçekleştirebilecek şekilde tasarlamak ve imal etmek gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı; gerçek bir üç eksenli basınç ve sıcaklık hücresini tasarlayıp, üretmektir. Aynı zamanda bu cihazla beraber çalışacak olan ve hepsi birlikte hidrolik kaya çatlatma laboratuvarını oluşturacak olan diğer cihazlara da entegrasyonunu gerek mekanik gerekse elektronik olarak sağlamak çalışmanın bir diğer amacıdır. Çalışmada cihazın tasarımı için, önce CAD modeli tasarlanması ve ardından bu modelin CAE analizlerinin yapılması öngörülmüştür. Bu aşamadan sonra ise CAE analizlerine geçilerek mevcut modelin çeşitli koşullar altında maruz kaldığı deformasyonlar ve gerilmeler, basınç koşulları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar "Toplam Deformasyon" ve "Von-mises" Gerilme Kriterleri olarak ortaya koyulmuştur.

Design and Production of True Triaxial Underground Compression and Heat Cell for Hydraulic Fracturing Applications

Abstract**Keywords**Hydraulic
Fracturing; Hot
Dry Rock;
Geothermal
Energy;
True Triaxial
Compressions

The success of reservoir creating applications in hot dry rock geothermal systems have been related to many factors. Simulation and laboratory tests are important both for minimizing risk factors and for time. Also it is important for minimizing investment and operating expenses. For such a laboratory work, there is a need for a simulation cell that can simulate the temperature and pressure in three different axes, while also allowing for hydraulic fracturing activities in it. The aim of this study is; To make a CAD design of a true triaxial stress and heat simulation cell which will allow the application of the hydraulic fracturing method under the true underground conditions and also to make CAE analysis of this CAD design in computer environment. This cell is designed to be compatible with many additional devices because it forms the heart of a hydraulic fracturing simulation laboratory. Hydraulic fracturing pump, acoustic gap analysis system, fracturing fluid mixing tank and permeability testing device will be developed with this device. In CAE analyzes, the deformations and stresses that the current model was subjected to under various pressure conditions were examined by finite element method. The results obtained from these analyzes are presented as "Total Deformation" and "Von-mises" Stress Criteria.

1. Giriş

Hem Kızgın Kuru Kaya (KKK) hem de geliştirilebilir Jeotermal Sistemler (GJS) Dünya üzerinde büyük bir enerji potansiyeline sahiptir. Jeolojik ve jeofizik araştırmalar da göstermiştir ki Ülkemizdeki enerji potansiyeli Dünya ortalamasının da üzerindedir. Türkiye kıtasal riftler hariç kızgın kuru kaya (KKK) ve geliştirilebilir jeotermal sistemlerin (GJS) oluşmasında etkin jeolojik koşulların hepsine sahiptir. Bu etmenler ise levha sınırları, kabuk incelleme yerleri, stratovulkanlar, derin köklü granitler ve radyoaktif bozulmalar olarak belirtilebilir (Burçak 2011). Bazı detaylı araştırmalar göstermiştir ki Türkiye'nin 3-5 km arası KKK ve GJS potansiyel ciddi derecede yüksektir. Türkiye'nin 3-5 km arası teknik ve ekonomik toplam GJS üretim potansiyeli 250000 MWe'dir (20\$cent/kWh) (Mertoğlu 2015). Türkiye böyle yüksek bir KKK ve GJS potansiyeline sahip olmasına rağmen, sahada endüstriyel ölçekte yapılmış herhangi bir KKK ve GJS rezervuar geliştirme çalışması bulunmamaktadır. Buna ek olarak laboratuvar ölçeğinde çatlatma testi, makine geliştirme, kimyasal geliştirme veya deneysel ekipman geliştirme çalışmaları da bulunmadığı için makale konusuyla ilgili Ülkemizdeki çalışmalar ağırlıklı olarak kaynak tespitine yöneliktir.

Yeraltındaki streslerin ve ısının simülasyonu bu tür bir laboratuvarın temelini teşkil etmektedir. Bu tür bir simülasyon hücresini Frash and Gutierrez (2014) çalışmalarında geliştirmiş ve bu cihaz her üç ekseninde birbirinden bağımsız olarak 13 MPa'a kadar basınç uygulayabilmekte ve gene numuneyi 180 ° C'ye kadar ısıtabilmektedir (Frash and Gutierrez 2014). Bu tür bir çalışma için diğer bir önemli ekipman ise hidrolik çatlatma işlemini gerçekleştirebilecek bir pompadır. Frash and Gutierrez (2014) çalışmalarında Teledyne ISCO firmasına ait 65DM model hidrolik şırınga pompayı kullanmışlardır.

Bu makinelerin tasarım sürecinin önemli bir bölümü bilgisayarda CAD ve CAE analizleri ile yapılmıştır. Zhang and Fan (2013) çalışmalarında stres

hücrelerini tasarlamak için Solidworks programını kullanmışlardır (Zhang and Fan 2013).

Benzer hücreler Çin gibi büyük sanayi ülkelerinde de son yıllarda tasarlanarak, kızgın kuru kaya sistemlerin devreye alınması için hız verilmiştir. Kızgın kuru kaya rezervuar sistemlerde en çok rastlanan rezervuar kayaç olan granit üzerinde sıcaklık, akışkan pompalama hızı ve üç eksenli gerilmelerin çatlatma geometrisine etkisini incelemek üzere Frash ve Gitez (2014) hücresine benzer bir hücre Çin'de Jilin üniversitesinde geliştirilmiştir. Bu çalışmada sıcaklık ve pompalama hızının artması ile çatlatma basıncının düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada artan pompalama hızının çatlak ağını daha kompleks hale getirdiği gözlemlenmiştir (Cheng *et al.* 2020).

Bu çalışma Ülkemizdeki kızgın kuru kaya jeotermal sistem araştırmalarında ihtiyaç duyulan hidrolik kaya çatlatma işlemleri için gerekli olan laboratuvar ölçekli gerçek üç eksenli yeraltı basınç ve sıcaklık simülasyon hücresi tasarım ve üretimini kapsamaktadır. Aynı zamanda geliştirilen bu makine ve teçhizatın bazı ön deney testleri de bu çalışma kapsamında yapılmıştır.

1.2 Hidrolik Çatlatma Performansı ve Üç Eksenli Gerilmeler Arasındaki İlişki

Hidrolik çatlatma geometrileri mekanik, hidrolik, jeolojik ve kimyasal etkilere bağlı olan karmaşık bir yapıdır (Warpinski, *et al.* 1985). 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 *et al.* 1982, Anderson 1991, Romero *et al.* 1995, Ishida *et al.* 2004, Safari *et al.* 2013, Taleghani and 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 and Willis (1957)'e ait "Mechanics of Hydraulic Fracturing" adlı çalışmasında çatlatma basıncının en düşük eksenel 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:

$$P_c = (S_v - 2P_o)/3 \quad (1)$$

Burada çatlatma basıncının (P_c), 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:

$$P_c = (T + 3S_h - S_H - 2nP_o) / (2(1 - n)) \quad (2)$$

$$P_c = T + 3S_h - S_H - P_o \quad (3)$$

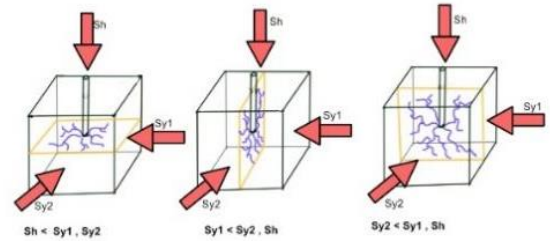
Buradaki T kayacın çekme mukavemeti, S_h ve S_H minimum ve maksimum yatay gerilmelerdir. Denklem (2) de ki n ise kayalar için proelastiklik katsayısı olarak ifade edilir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$n = (a(1 - 2\nu)) / (2(1 - \nu)) \quad (4)$$

a = biot katsayısı olup 0 (sert, az geçirgen kayalar için) ile 1 (yumuşak ve geçirimli kayalar için) arasında değişmektedir. ν ise Poisson oranıdır ve 0 ile 0.5 arasında değişiklik (Kumtaşı:0.12, Granit:0.27) gösterir (Amadei and Stephanson 1997).

Çatlatma basıncının yanı sıra, çatlatma geometrisi üzerine yapılan çalışmalarda, çatlağın minimum asal gerilmeye dik düzlemde oluştuğu belirtilmiştir (Hubbert and Willis 1957). 300 metreden 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. Yer kabuğundaki yatay stresler ise çeşitli kuvvetler ve ortamsal faktörlere bağlı

olarak oluşurlar. Bu faktörlerden en önemlileri tektonik plaka hareketleri, yoğunluk farkı ve term-elastik kuvvetlerden kaynaklanan litosfer genişmesidir (Zoback *et al.* 1989). Bunun yanı sıra yatay kuvvetlerin oluşmasında litostatik basıncın da etkisi vardır (Şekil 1). Bu basınç matematiksel olarak yoğunluk, yerçekimi ivmesi ve derinliğin çarpımı ile elde edilebilmektedir (Zoback and 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 400° C sıcaklığının üstünde daha sünek bir yapıda oldukları ve bu durumun da kayaçların hidrolik çatlatma davranışlarını olumsuz etkilediği Blackham (2015) tarafından belirtilmiştir.



Şekil 1. Asal gerilmelere bağlı çatlak konumlanması.

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 and Kern 1961; Geertsma and DeKlark 1969; Nordgren 1972). Çatlak uzunluğu ve genişliği uyarılmış rezervuar hacmini kontrol etmektedir. Çatlak açıklığı çatlakın hidrolik iletkenliğini etkilemektedir (Warpinski *et al.* 1982). Arazide kuyu boyunca çatlak geometrisinin ölçümü zor ve maliyetlidir. Halbuki laboratuvar uygulamaları küçük ebatlı numuneler kullanılarak hidrolik çatlak geometrisinin doğru bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Frash 2014).

2. Materyal ve Metot

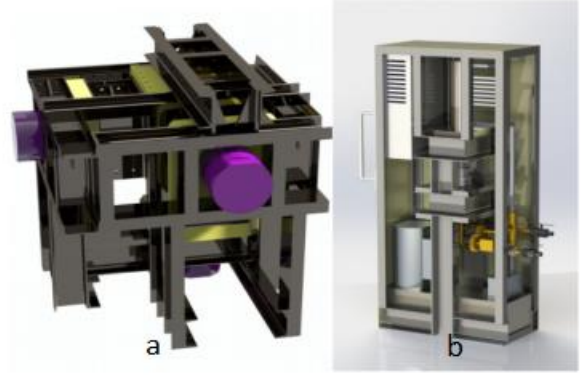
Çalışmamızda temel seviyede yeraltı basınç ve sıcaklık şartları altında hidrolik çatlatma gerçekleştirebilecek bir laboratuvar düzeneğinin kurulması planlanmıştır. Bu plan çerçevesinde iki ana makine ve bunlara bağlı yardımcı ekipman ve makineler tasarlanmış, ekipmana ait bazı parçalar satın alınmış veya imal edilmiştir. Bu makineler ve deney düzeneği sayesinde araştırmacılar Türkiye'deki kayaçların hidrolik çatlatma performanslarını inceleyebilecektir. Bunun yanında rezervuar oluşturma testleri, sıvı karışımları, yeni ekipmanlar ve sahada karşılaşılabilecek çeşitli senaryolar bu ekipmanlar ile test edilebilecektir.

2.1 Laboratuvar Yapısı ve Ekipmanlar

Temel test düzeneği bilgisayar kontrollü bir hidrolik şırınga (çatlatma) pompa, gerçek üç eksenli sıkıştırma ve ısı hücresi, sıvı karıştırma ve ön pompalama ünitesi ile porozite tayin etmek için tasarlanmış bir test cihazından oluşmaktadır.

Deneyle, kayaç içerisinde çatlatma prosesinde (çatlatma, çatlağı sürdürme, çatlağı açık tutma, yağlama, vb...) görev alması planlanan akışkanların istenen oranda karıştırılıp ön pompalama cihazından şırınga (çatlatma) pompa hücresine pompalanması ile başlayacaktır. Hidrolik şırınga (çatlatma) pompasına gelen sıvı pompada belirlenen hız ile söz konusu hücre içerisinde üç eksenli basınç ve sıcaklık koşulları altındaki kayaca enjekte edilecek ve kayaç çatlayıp kırılana dek pompalanmaya devam edecektir. Bu esnada basınç ve akışkan hızları kaydedilecektir.

Gerçek üç eksenli basınç hücresi değiştirilebilir plakalar ile tasarlanmıştır böylelikle 10x10x10 cm ile 40x40x40cm boyut aralığında numunelerin test edilebilecek ve her biri 200 ton kuvvet uygulayabilen silindirleri ile 150 MPa'a kadar basınç uygulayabilecektir. Ayrıca 2 adet sıkıştırma plakası arkasına yerleştirilen rezistanslar yardımı ile kayaç numunesini 200°C'ye kadar ısıtılabilir (Şekil 2).



Şekil 2. a) Gerçek üç eksenli sıkıştırma hücresi b) Hidrolik şırınga pompa modelleri.

Kırma akışkanları hem kırma başlatmak hem de kırığı açık tutmak için önemlidir. Bu gibi işlemler için farklı karışımlar gerekir aynı zamanda Farklı kaya numunelerini kırmak için gene onların mineralojik özelliklerine göre farklı sıvılar kullanmak gereklidir. Bu sebeple bir akışkan karıştırma ve ön pompalama tankı tasarlanıp üretilerek sisteme eklenmiştir (Şekil 3).

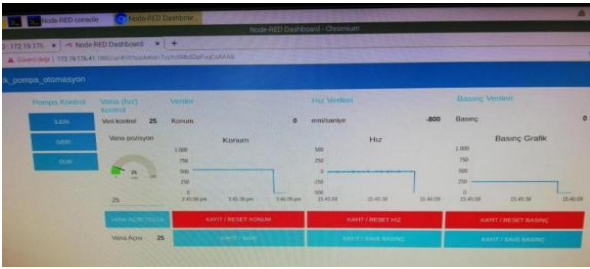


Şekil 1. Karıştırma ve ön pompalama tankı.

Çatlatma akışkanı üç eksenli basınç ve sıcaklık değerleri altındaki hücrede bulunan kayaca uygulamak için 30 tonluk hidrolik silindire bağlı bir şırınga pompa ekipmanı ile buna güç veren hidrolik güç ünitesi tasarlanmış ve imal edilmiştir (Şekil 4). Hidrolik 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 gerekmektedir (Şekil 5).

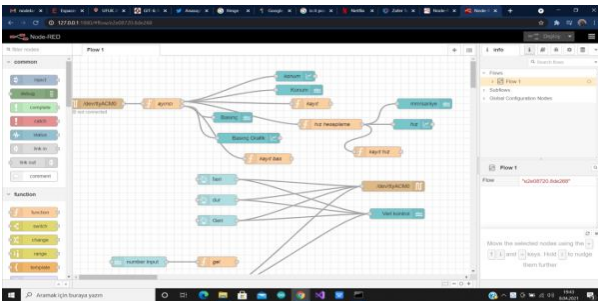


Şekil 2. Hidrolik şırınga pompa ünitesi.



Şekil 3. Hidrolik şırınga pompa arayüzü.

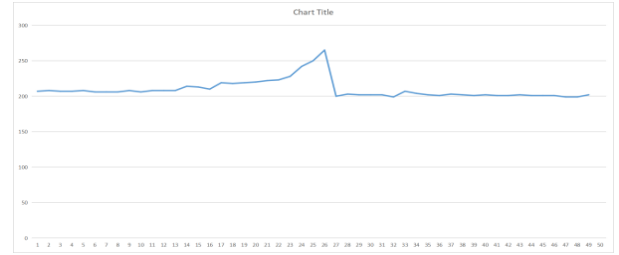
Gelecekte genişlemeye imkan verecek şekilde tasarlanan kontrol yazılımı iot altyapısı hazır bir şekilde tasarlanarak sisteme eklenecek otomatik dozajlama sistemi ve akustik emisyon gibi sistemlerle beraber çalışabilecek bir şekilde Node-Red kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 4. Node-Red program yapısı.

Başlangıç aşamasında alçı ve çeşitli beton numuneleri hazırlanarak ön çatlatma deneyleri yapılmıştır. Ön çatlatma deneylerinde numunelerin ve makinenin doğrulanmasını yanında çatlatma enjektörleri de test edilmiştir. 6 mm, 8 mm, 15 mm ve 18 mm çıkış çaplarında otomatik rekorlara sahip enjektörler ile çatlatma deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 7; 8). Böylelikle ana deney

düzeneği için veriler toplanarak uygun enjektör çapları da belirlenmektedir.



Şekil 5. Çatlatma sırasında kaydedilen basınç zaman grafiği.

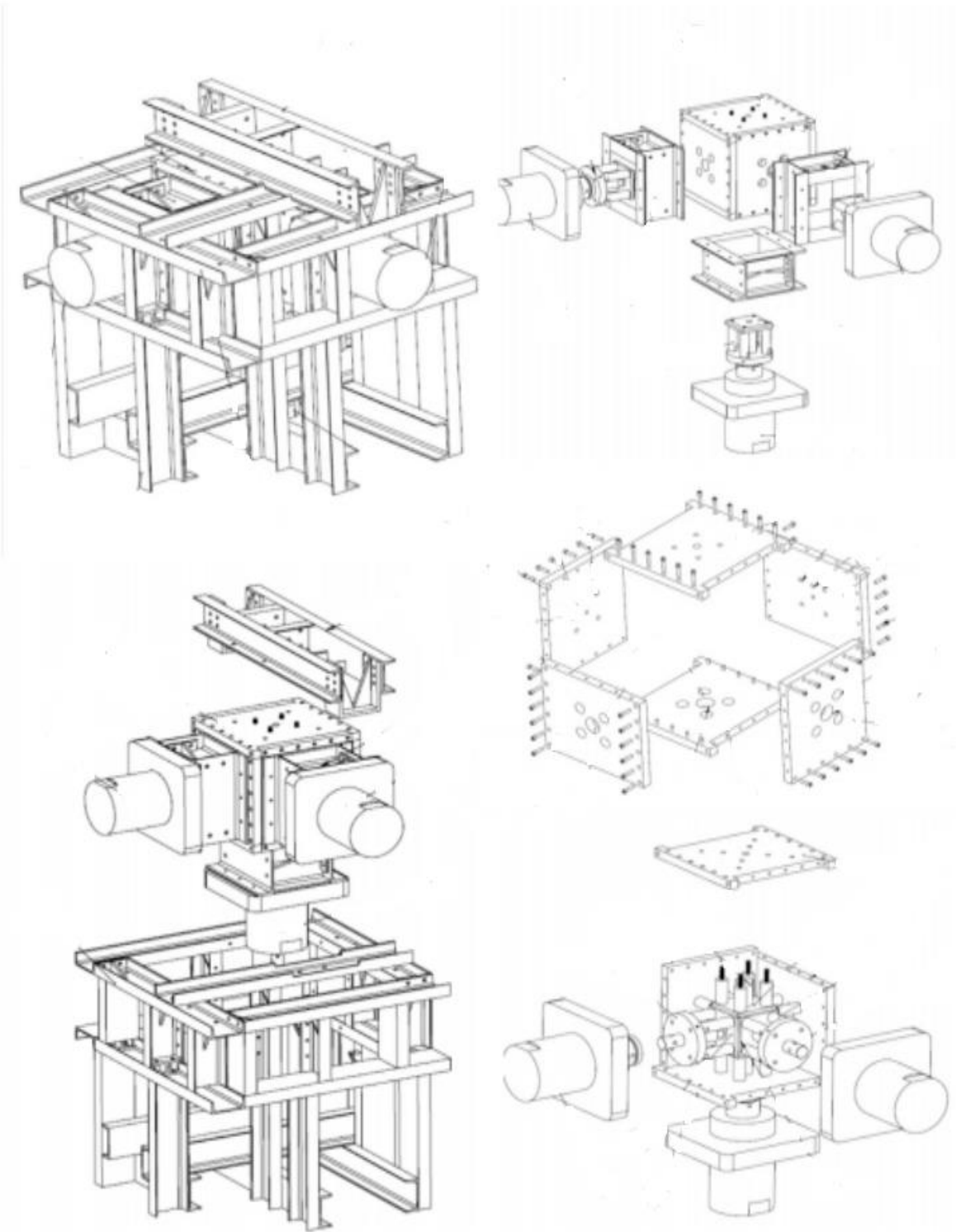


Şekil 6. Bazı çatlatılmış numuneler.

Çalışmanın ilerleyen aşamalarında elde edilen veriler kullanarak kararlar verilmesi, yönlendirmeler yapabilmesi ve optimum çatlatma performanslarını her koşul altında belirleyebilmesi ve sisteme bağlı cihazları da kontrol edebilmesi hedeflenmektedir.

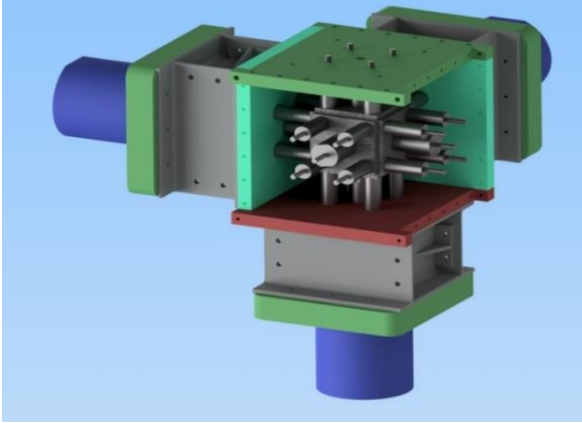
2.2 Gerçek Üç Eksenli Basınç Hücresinin CAD Tasarım Süreci

Bu makinenin yapılış amacı her üç eksenle birbirinden bağımsız olarak hareket edebilen silindirler vasıtasıyla numunelere yük ve sıcaklık uygulamaktır. Bunun yanında, belirlenmiş sıcaklık ve basınç koşullarında tutulan numunelere hidrolik çatlatma pompaları aracılığı ile çatlatma işlemi de bu esnada uygulanabilmektedir.



Şekil 9. Hücresinin teknik çizimleri.

Gerçek üç eksenli sıkıştırma hücresi üç ana yapıdan oluşacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 9). Bu bölümler çelik U profillerden oluşan şase, 50 mm kalınlığındaki plakalardan oluşan iç hücre ve hidrolik ekipmanlardır (Şekil 10). 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 10. Sıkıştırma hücresi iç görünümü.

Bu aşamadan sonra Makinenin CAD çizimlerine geçilmiş ve Autodesk inventor programı ile çizimler tamamlanmıştır.

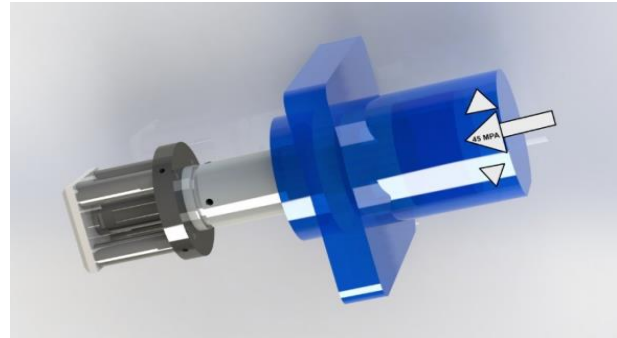
Şase üzerindeki bütün birleştirmeler kaynak olacak şekilde tasarlanmıştır. Bazı bölgelerde çekme ve kaynak hatalarına karşı önce vidalama ile birleştirme uygulanmıştır. Bunun yanında iç hücre de hem kaynak hem vidalama gerekli yerlerde kullanılmıştır. İç hücredeki 50 mm plakalar ST-52-3 çelikten üretilmiştir. Bu plakaların akma mukavemeti 355 MPa'dır. Hücre içindeki değiştirilebilir plaklar ile bunlara bağlı destek malzemeleri C45E çelikten imal olacak şekilde tasarlanmıştır. C45E çeliğin akma mukavemeti 430 MPa'dır.

2.3 Hücrenin Sonlu Elemanlar (FEM) Analizi

Hücrenin mekanik dizayn sürecinin tamamlanmasının ardından, CAD modeli oluşturulmuştur. CAD modelinden sonra ise bu modelin deneyler sırasında maruz kalacağı kuvvetler sırasında uğrayacağı deformasyonları tespit etmek amacı ile sonlu elemanlar yöntemi ile makinenin

nihai CAD modeli test edilmiştir. Testler bilgisayar üzerinde ANSYS programı kullanılarak yapılmıştır.

Gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek ve sonuçlarımızın daha doğru olması amacıyla bir kaç tane yükleme modeli geliştirerek ANSYS test ayarlarını bu modeller üzerinden uygulamaları yapılmıştır. Yükleme modellerinden bir tanesi, yükleri direk olarak şaseye ve plakalara uyguladığımız direk yüklemeli modelidir. Bu model ayarlamaları ve işlenmesi daha kolay ve hızlı sonuç alınabilen bir model olmasına rağmen, gerçek senaryoya en yakın model değildir. Bu sebeple üç eksenli yükleme için daha gerçekçi olabilecek başka bir senaryo geliştirilmiştir. Bu senaryoya göre yükler direk olarak şase ve plakalara uygulanmak yerine hidrolik silindir içerisine pompanın uyguladığı yan basınç olarak uygulanmıştır. Hücrenin pistonu ve buna bağlı elemanlar hareketli olarak tasarlanarak silindir içerisindeki basınç ile bu ekipmanların basıncı hücre içerisindeki kayaca iletmeleri sağlanmıştır. Silindirlerin her birinin içerisindeki basınç 45 MPa olacak şekilde ve sıvı basıncı olarak silindirin her yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanmıştır. Bu şekilde daha gerçekçi bir model elde edilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Silindir içi basınç model.

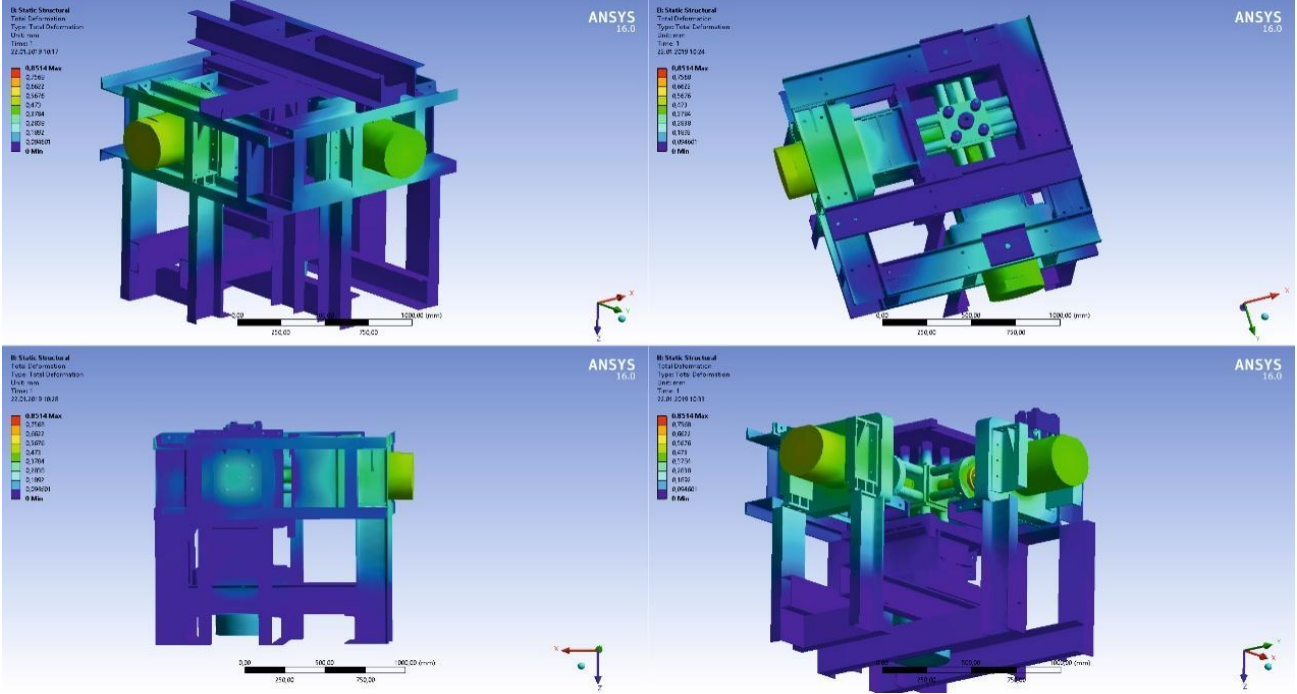
Bu şekilde belirlenen simülasyon ayarlarını; ANSYS programında da doğru bir şekilde yapabilmek ve bu ayarlarda hücrenin dayanım testlerini yapabilmek için ANSYS test ayarları da uygun şekilde düzenlenmiştir. Bunun için; şase ve hücre üzerindeki bütün bağlantılar kaynaklı olarak ayarlanmıştır. Sadece 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.

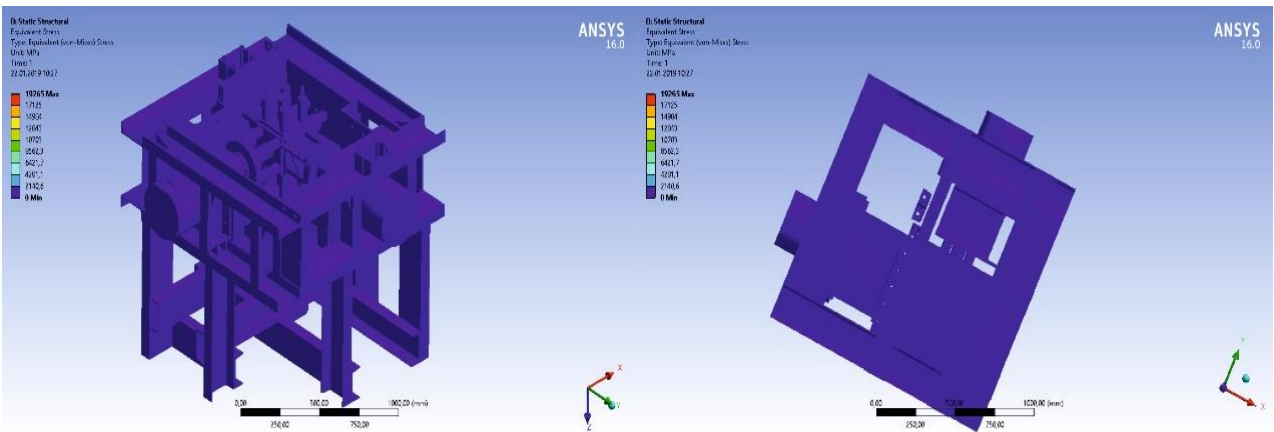
Toplam deformasyon analizleri genel olarak göstermektedir ki, tam yükleme, 45 MPa'lık basınç sırasında hücre içerisinde bazı deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonlardan en yükseği 0,86 mm ile yatay hidrolik piston kollarında meydana gelmektedir. Şase üzerindeki en yoğun

stres bölgeleri ise pistonlarla sıkıştırma plakaları arasındaki bağlantılar üzerinde görülmektedir (Şekil 12). Toplam deformasyon analizinde iki adet hidrolik silindirin bulunduğu yatay eksenin daha fazla yüke uğradığı net bir şekilde görülmektedir.

Von Mises stres analizine göre ise, makine üzerinde herhangi bir plastik deformasyon gözükmemektedir. Makine güvenli alan içinde bu yükler altında çalışabilmektedir (Şekil 13).



Şekil 12. Toplam deformasyon analizi.



Şekil 13. Von Mises analizi.

3. Bulgular

3.1 Gerçek Üç Eksenli Yeraltı Basınç ve Sıcaklık Simülasyon Hücresi Tasarımı

Hücrenin CAD tasarımı Afyon Kocatepe Üniversitesi Jeotermal ve Maden Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Modelin oluşturulmasında birçok farklı çalışmadan ve hidrolik press sektöründeki üreticiler ile makina sektöründeki üreticilerden fikir ve görüş alınmıştır. CAD tasarımı için AUTODESK Inventor Programı kullanılmıştır.

Toplam deformasyon analizleri genel olarak göstermektedir ki, tam yükleme, 45 MPa'lık basınç sırasında hücre içerisinde bazı deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonlardan en yükseği 0,86 mm ile yatay hidrolik piston kollarında meydana gelmektedir. Şase üzerindeki en yoğun stres bölgeleri ise pistonlarla sıkıştırma plakaları arasındaki bağlantılar üzerinde görünmektedir. Bu analizler ANSYS programının öğrenci sürümünde yapılmıştır.

Toplam deformasyon analizinde iki adet hidrolik silindirin bulunduğu yatay eksenin dikey eksendeki tek bir hidrolik silindire göre daha fazla yüke uğradığı net bir şekilde görülmektedir.

45 MPa'lık basınç uygulayan üç adet silindir ile yapılan Von Mises stres analizine göre ise makine üzerinde herhangi bir plastik deformasyon gözükmemektedir. Maksimum Von Mises gerilmesi değeri 19266 MPa, minimum gerilme ise 0 MPa olarak analizler sonucunda ortaya çıkmıştır. Makine güvenli alan içinde çalışabilmektedir.

Bu simülasyonlar sonucunda ulaşılan veriler neticesinde seçilen malzemeler ve bunların özelliklerinin hücrenin yapımına uygun olduğu ve malzemeler kullanılarak imalata başlanmasına

3.2 Gerçek Üç Eksenli Yeraltı Basınç ve Sıcaklık Simülasyon Hücresi Üretimi

Büyük ölçüde CAD modeline sadık kalınarak yapılan hücrenin son hali Afyonkarahisar sanayisinde yaklaşık bir senelik bir imalat süreci neticesinde tamamlanarak Afyon Kocatepe Üniversitesi Jeotermal ve Maden Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi Hidrolik Çatlatma ve Rezervuar Geliştirme Laboratuvarı'nda kurulumu yapılmıştır.

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. Bu değişiklikler arasında küp montajını kolaylaştırmak için eklenen sac kulaklar, bağlantı noktalarına kaynatılan ve kaynak işleminin doğru yapılmasını sağlayacak plakalar ile taşımaya kolaylaştırıcı olarak şaseye kaynatılan bazı halkalar sayılabilir.

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.

Gerçek üç eksenli yeraltı basınç ve sıcaklık simülasyon hücresi ile beraber üretilen ve laboratuvarında hidrolik çatlatma deneylerinin yapılmasını sağlayacak olan Hidrolik şırınga pompa, karıştırma ve ön pompalama tankı da üretilerek laboratuvar düzeneğine eklenmiştir.

Hidrolik şırınga pompa raspberry pi ve arduino tabanlı bir kontrol sistemine sahiptir. Basınç ve konum sensörlerinden gelen veriler burada gözetlenip kaydedilebilmektedir. Pompanın kontrolünün de yapıldığı bu yazılım Java tabanlı Node-Red dili kullanılarak yazılmıştır.

Bu ana ekipmanların yanında çeşitli ebatlarda (6, 8, 15 ve 18 mm) çatlatma enjektörleri, 2 ton kapasiteli bir vinç de yardımcı ekipmanlar olarak üretilip sisteme dahil edilmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. İmal edilmiş hücre ve ona bağlı vinç.

4. Tartışma ve Sonuç

Tasarımı ve üretimi yerli imkanlarla yapılan Gerçek Üç Eksenli Yeraltı Basınç ve Sıcaklık Simülasyon hücresinin benzerleri farklı ülkelerde yapılmıştır. Ülkemizde şimdiye kadar hidrolik çatlatma çalışmalarında kullanılmak üzere yerli hücre tasarımı ve üretimi yapılmamıştır.

Literatür incelendiğinde; Frash and Guiterez (2014) tarafından tasarlanıp üretilen hücre ile bizim çalışmamızdaki hücre benzer fonksiyonlara sahiptir. Ancak çalışmada; kalın çaplı bir boru içerisinde çok kısa stroklu hidrolik jackler ile sadece 30x30x30 cm³ numunelerin sıkıştırılabildiği bir hücre olarak tasarlanmıştır. Yaptığımız bu çalışmada ise tasarlanan hücre farklı ebatlarda numuneler için kullanılabilir olarak tasarlanmış ve üretilmiştir.

Bu çalışmanın patent başvurusu sırasında Çin'de Taiyuan University of Technology tasarlanan, ısıtma ve sıkıştırma fonksiyonları bakımından bu çalışmaya benzer bir makina için patenti alınmıştır (EPO CN104655495A 2013). Üretime geçip geçmediği bilinmeyen bu hücre ise birçok açıdan çalışmamızda tasarlanıp üretilen hücreden farklıdır. Patent savunması süren bu süreçte iki makina arasındaki temel farklar on başlık altında toplanmıştır. Bunlar: Şase yapısı, silindir montaj yerleri, hidrolik sıkıştırma takımı, sabit sıkıştırma plakaları, hücre yapısı, plaka

yapısı, cihaz kapasitesi, hidrolik silindir yapısı, üst sıkıştırma plakası ve çatlatma enjektörleridir.

Hidrolik çatlatma ve rezervuar geliştirme faaliyetlerini gerçek ortam şartlarına yakın şartlarda yapmak için geliştirilen makine, ekipman ve teçhizat ile bu konuda ülkemizde bulunmayan bir laboratuvar kurma imkanı olmuştur. Buradan yapılacak çalışmalar ve araştırmalar ile ülkemizde rezervuar geliştirme, hidrolik çatlatma, kızgın kuru kaya, geliştirilebilir jeotermal sistemler ve petrol rezervuarları alanlarında çalışmalar yapabilmek mümkün olacaktır.

Basınç ve sıcaklık hücresinin geliştirilme süreci devam edecektir. Hücre kullanıldıkça ve deneyler hücre içerisinde gerçekleştirildikçe hücrenin eksik yanları, geliştirilebilir yönleri tespit edilerek bir sonraki tasarım için bilgi toplanacaktır. Bu toplanan bilgi ve deneyim neticesinde yeni ve daha iyi hücreler yapmak mümkün olacaktır.

Hidrolik sınırga pompa ekipmanının geliştirilmesi de hücreye paralel olarak yapılan deneylerle beraber devam edecektir. Bu ekipmanın daha iyi veri toplama, işleme ve kaydetme gibi yazılımsal kabiliyetlerinin geliştirilmesinin yanında pompalama bölümü üzerinde de iyileştirmelere gidilmesi mümkün olacaktır. Çalışmalar ve deneyler yapıldıkça bu ekipman ile ilgili geliştirilebilir hususlar belirlenecek ve bunlar geliştirilecektir. Özellikle

pompalama kısmına tasarlanacak ve eklenecek yeni ekipmanlar bu makinanın performansını ve kabiliyetlerini artıracaktır.

Çatlatma ve rezervuar geliştirme deneylerinin ilerleyen aşamalarında çatlatma karışımları ve bunların verimlilikleri de incelenecektir. Değişik rezervuar kayaçları üzerinde denenecek olan çatlatma karışımlarının geliştirilmesi de bu deneyler sırasında olacaktır. Bu sıvıların değişik sıcaklık ve basınç koşulları altında oluşturdukları çatlak geometrileri ve bunların rezervuar özellikleri de kurulmuş olan ekipmanlar sayesinde gözlemlenebilecektir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün 17.FEN.BİL.62 ve 16.ARŞ.MER.02 nolu projeleriyle desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederler.

5. Kaynaklar

Amadei B., Stephansson O., 1997. Rock stress and its measurements. Springer Science+Business Media Dordrecht. 499.

Anderson, T.L., 1991. Fracture mechanics: fundamentals and applications. Boston: CRC Press.

Arop, J.B., 2013. Geomechanical Review of Hydraulic Fracturing Technology. MIT, 291.

Blackham, M., 2015. Geomechanics of hydraulic fracturing, Environmental effects of hydraulic fracturing, June.

Burçak, M., 2011. Kızgın Kuru Kaya (Hdr: Hot Dry Rock) Ve Geliştirilebilir Jeotermal Sistemler (Egs: Enhanced Geothermal Systems), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi, Ankara.

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.

Frash L.P, Gutierrez M.S., 2014. Laboratory-scale study of hydraulic fracturing in heterogeneous media for enhanced geothermal systems and general well stimulation. PhD Thesis, Colorado School of Mines, 144p.

Geertsma, J., de Klerk, F., 1969. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures. *Journal of Petroleum Technology*, **21(12)**, 1,571-1,581.

Geng Y, Hu Yaoqing, Liang W, Wu P. 2013. High temperature and high pressure coal and rock true triaxial fracturing and seepage test device and test method. EPO, CN104655495A.

Haimson, B. and Fairhurst, C., 1967. Initiation and Extension of hydraulic fracturing in rocks. SPE Third conference on rock mechanics, *Society of petroleum engineers journal*, **7(3)**, 310-318.

Hubbert, M.K. and Willis, D.G., 1957. Mechanics of hydraulic fracturing. *Transactions of Society of Petroleum Engineers of AIME*, **210**, 153-168.

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.

Mertoğlu, O., Basarır, N. and Saraçoğlu, B., 2015. Turkey's Geothermal Potential on EGS - Enhanced Geothermal System, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.

Nordgren, R.P., 1972. Propagation of a vertical hydraulic fracture. *Society of petroleum engineers journal*, **12(4)**, 306-314.

Perkins, T.W., Kern, L.R., 1961. Widths of hydraulic fractures. *Journal of Petroleum Technology*, **13(9)**, 937-949.

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, Dallas, TX, 22-25 October.

- Safari, M., Gandikota, R. and Mutlu, U., 2013. Pulsed fracturing in shale reservoirs: geomechanical aspects, ductile-brittle transition and field implications. In: Proceedings of the Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, 12-14 August.
- Taleghani, A.D., Olson, J.E., 2014. How natural fractures could affect hydraulic-fracture geometry. *Society of petroleum engineers journal*, **19(1)**, 161-171.
- Warpinski, N.R., Clark J.A., Schmidt R.A., Huddle C.W., 1982. Laboratory Investigation on the Effect of In-Situ Stresses on Hydraulic Fracture Containment. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **22(3)**, 333-340.
- Warpinski, N.R., Brangan, P. ve Wilmer, R., 1982. In-Situ Stress Measurements at U. S. DOE's Multiwell Experiment Site, Mesaverde Group, Rifle. *Journal of Petroleum Technology*, **37(3)**, 527-536.
- Zhang, Q-i, Fan T., 2013. A high-stress tri-axial cell with pore pressure for measuring rock properties and simulating hydraulic fracturing, *Measurement*, **49**, 236-245.
- Zoback, M.L., Zoback, M.D. ve diğerleri, 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 physical science and technology, third edition, **16**, 143-154.