

# JEOTERMAL KUYU TESTLERİNİN TASARIMI

**Serhat AKIN**

## ÖZET

Jeotermal rezervuarları en uygun şekilde işletebilmek için rezervuarın mümkün olan en iyi biçimde tanımlanması gerekir. Bu amaca ulaşabilmek için genellikle basınç azalım, yükselim ve girişim testlerinin analizleri sonucunda elde edilen bilgiler ve parametreler kullanılır. Kuyu testlerinden elde edilebilecek en iyi sonucu almak için amaca uygun bir şekilde tasarlanmaları gerekir. Bu çalışmada rezervuarı tanımlamak, rezervuar sınırlarını bulmak, kuyunun üretim veya enjeksiyon durumu hakkında bilgi almak için yapılabilecek olan kuyu testlerinin tasarım yöntemleri aktarılacaktır. Öncelikle en uygun test tipi tartışılacak, sonrasında ise test öncesi formasyon özelliklerinin seçimine değinilecektir. Akış debileri ve sürelerinin tartışılmasından sonra mekanik ve dijital basınç ölçerlerin kullanıldığı değişik örneklerle parametrik hassasiyet çalışmaları yapılacaktır. Son olarak stabil akış koşullarına ulaşabilmek için veya istenilen rezervuar hacmini test edebilmek için gereken test süresi aktarılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Jeotermal kuyu testleri tasarımı, basınç yükselim, girişim testi

## ABSTRACT

Optimal reservoir management of geothermal reservoirs requires characterization of the reservoir as good as possible. In order to reach this goal, information and parameters should be obtained from the analysis of pressure drawdown, buildup and interference tests. In order to obtain best possible results the tests must be designed to match the test purpose. In this study, well test design methods to characterize the reservoir, locate reservoir boundaries, obtain production and injection performances will be discussed. First, the most appropriate test type will be discussed. Following that, formation parameter estimation will be considered. After discussing flow rates and their durations, several example designs will be introduced to study parametric sensitivity. Finally, test durations required to test a reservoir volume or reach stable conditions will be discussed.

**Key Words:** Designing of geothermal well test, pressure build up test, interference test.

## 1. GİRİŞ

Jeotermal rezervuarlarda yapılan kuyu testlerinin temel amaçları test edilen kuyuların üretim ve/veya enjeksiyon ve rezervuar karakteristiklerini tespit etmek olarak özetlenebilir. Test edilen kuyuların üretilebilirlik veya enjektivite endekslerinin yanı sıra, kuyuda sondaj sıvısı veya sondaj operasyonları nedeniyle oluşan hasarın tespiti, asitleme veya çatlatma operasyonları sonucu gelişme miktarı gibi kuyuyla ilgili parametrelerin yanısıra test edilen rezervuar hacminin geçirgenliği gibi rezervuar parametrelerini de elde etmek mümkündür. Rezervuarın tek veya çift gözenekli olması, rezervuarda soğuk su enjeksiyonu sonucunda radyal bir sınırın bulunması, geçirgen olmayan faylar gibi rezervuarı sınırlandıran bir takım jeolojik yapıların varlıklarını ispatlamak yine kuyu testlerinin amaçları arasındadır.

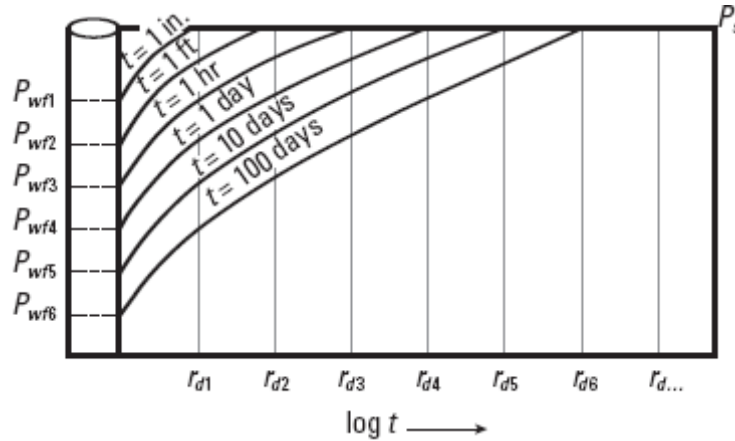
Bir kuyu testi analizi yapılabilmesi için kuyu ve kuyu civarı modeli, rezervuar modeli ve bir sınır modelinin kullanılması gerekir. Bu bilgiler ışığında test tasarımı yapılması testin başarılı olması için elzemdir. Öncelikle testin amacı tespit edilmelidir. Kuchuk vd [1] 20'den fazla test amacı önermiştir. Amaçları doğrultusunda kuyu testlerini ikiye ayırmak mümkündür. Birinci grupta geçirgenlik – kalınlık çarpanı, gözeneklilik – sıkıştırılabilirlik çarpanı, ortalama rezervuar basıncı gibi rezervuar özelliklerinin tespit edileceği basınç geçiş testleri bulunur. Kuyu üretilebilirlik testleri gibi testler ise kuyu performansını elde etmeye yönelik diğer grubu oluşturur. Örneğin kuyuda sondaj operasyonları sonucu oluşan hasar elde edilmek isteniyorsa bir basınç yükselme testi yapılmalıdır. Öte yandan bir kaç kuyunun rezervuarda etkileşimini söz konusu ise bir girişim testi daha uygun olacaktır.

Bu çalışmada jeotermal rezervuarlarda yapılması planlanan kuyu testleri tasarım özellikleri aktarılacaktır. Öncelikle test süresi ve örnekleme periyodları tartışılacaktır. Üretim veya geribasım kuyularındaki tasarım aktarıldıktan sonra tasarımda kullanılacak rezervuar parametrelerinin tahmini sunulacaktır. Son olarak çok kuyulu testler tartışıldıktan sonra örnekler verilecektir.

## 2. TEST SÜRESİ

Tipik bir jeotermal test tasarımında test süresince test edilecek alanın yarıçapı (Şekil 1) aşağıdaki denklem (E.1) kullanılarak bulunur [2]. Bu denklemin kullanılabilmesi için yalancı kararlı akış durumunun geçerli olması gerekir. Denklem iki şekilde değerlendirilebilir: (1) varsayılan test süresi sonunda ulaşılabilecek uzaklık, (2) belirli bir uzaklığa ulaşabilmek için geçecek süre. Her iki durumda da bu denklemi kullanabilmek için rezervuarda test edilecek bölgedeki ortalama geçirgenlik ( $k$ ), gözeneklilik ( $\phi$ ), sıkıştırılabilirlik ( $c_i$ ) ve akmaçlık ( $\mu$ ) değerlerinin bilinmeleri veya tahmin edilmeleri gerekir.

$$r_i = \left( \frac{kt}{948\phi\mu c_i} \right)^{1/2} \quad (E.1)$$



Şekil 1. Test süresince ulaşılan tahmini radyal uzaklık[2].

Bu tasarım denkleminin bir başka önemli parametresi zamandır. Kuyu testi kısa dönemli yapılırsa genellikle süre 1 aydan az tutulur. Bu tarz testlerde zaman seçilirken  $r_i$  değeri 50 ile 200 ft arasında olacak şekilde seçilir. Uzun dönemli testlerde amaç sürdürülebilir üretimin tespiti olduğu için süre çoğunlukla bir aydan fazla tutulur. Bu tarz testlerde genellikle test edilen hacim 4 kübik km'den fazla, rezervuar sıcaklığı ise 275°F'dan büyüktür [3,4]. Arama kuyularında hedef genellikle jeotermal rezervuar tahmini, ortalama rezervuar özelliklerinin tespiti olduğu için test süreleri tipik üretim veya geri basım kuyularında yapılan testlerden daha uzun olmalıdır.

Test sırasında örnekleme zamanları seçilirken kuyu içi depolama etkileri nedeniyle test başlangıcında sürenin saniye mertebesinde tutulması gerekir. Zar faktörünün -3.5'tan düşük olduğu durumlarda kuyuiçi depolama etkilerinin etken olduğu sürenin tespiti için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$t_D = (60 + 3.5s)C_D \quad (E.2)$$

$$t_D = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_t r_w^2} \quad (E.3)$$

$$C_D = \frac{0.8936C}{\phi c_t h r_w^2} \quad (E.4)$$

$$C = 25.65 \frac{A_{wb}}{\rho_{wb}} \quad (E.5)$$

Bu denklemlerde C, kuyu içi depolama katsayısı,  $A_{wb}$ , kuyu alanı,  $\rho_{wb}$  kuyudaki jeotermal akışkanın yoğunluğu, h rezervuar kalınlığıdır. Bu denklemleri kullanabilmek için kuyu içinde iki faz olduğu varsayılmıştır. Testin ilerleyen aşamalarında zaman aralığı bir miktar arttırılabilir. Ancak bu artış saatte bir olacak hala de getirilmemelidir.

### 3. KUYU TİPİ

Geribasım veya üretim kuyularında yapılacak olan testlerin en önemli farkı kullanılacak olan ekipmanların farklı olmasıdır. Geribasım kuyularında enjeksiyon yapabilmek için gerekli ekipman kullanılırken üretim kuyularında savak düzeneklerinin bulunması gerekir. Geribasım amaçlı kuyularda tek ve/veya çok debili enjeksiyon testleri yapıldıktan sonra "fall off" olarak adlandırılan test yapılır. Enjeksiyon debileri seçilirken basınç farklılığı yaratacak debilerin seçilmesi önemlidir. Bu testlerde bir başka hedef kuyunun alabileceği maksimum debiyi bulmaktır. Düşük debilerin kullanılması durumunda maksimum debiyi ekstrapolasyonla elde etmek mümkündür. Bu tarz testlerin tasarımında her enjeksiyon debisinde gerekli süreyi seçerken sabit bir değerden ziyade yalancı kararlı akışa ulaşılacak değerin seçilmesi gerekir. Benzer şekilde takip eden basınç düşüş (fall off) döneminde de süre seçimi daha önce aktarılan şekilde yapılmalıdır[5].

Üretim kuyularında ise sabit debide üretim dönemini takip eden basınç yükselimi (pressure buildup) testi yapılır. Üretim esnasında savakta temiz ve stabil bir akış elde edilmesi uzun sürebileceğinden bu akış süresi mümkün olduğunca uzun tutulmalıdır. Basınç yükselimi için beklenilecek süre ise bir önceki bölümde aktarıldığı şekilde seçilir. Kuyuların derin veya sığ olmalarının ekipman anlamında bir değişiklik içermesi dışında tasarım olarak başka bir farklılık içermez.

### 4. TEST ÖNCESİ REZERVUAR PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ

Yukarıda aktarılan test tasarımı yapılırken bazı parametrelerin tahmin edilmeleri gerekir. Bu parametrelerden en önemlileri kuyu hasar parametresi olan zar faktörü (s) ve geçirgenliktir (k). Bu iki parametreyi tahmin etmek diğer parametrelere oranla daha zordur çünkü bu parametrelerin tespiti zaten test amaçları arasındadır. Zar faktörü seçilirken fay kesildiyse zar faktörü oldukça düşük (-8) alınır. Öte yandan fay sistemine bağlı çatlaklar kesilip tam kaçak oluşmayan bir kuyu test ediliyorsa zar faktörü duruma göre -1 ile -6 arasında alınır. Geçirgenlik tespiti için aynı sahada daha önce açılmış kuyuların test sonuçları kullanılarak elde edilmiş değerler kullanılabilir. Daha önce aynı kuyu test edildiye yalancı kararlı akış denklemi (E.6) aracılığıyla geçirgenlik tahmini yapılır [1].

$$k = \frac{141.2q B\mu}{h(\bar{p} - p_{wf})} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s \right] \quad (E.6)$$

Test öncesinde yukarıda aktarıldığı gibi bazı parametrelerin tahmin edilmeleri gerekmektedir. Bu parametrelerin hatalı olmaları durumunda test analizi sonucu elde edilecek parametrelerin hatalı olmasına neden olur. Örneğin kuyu yarıçapının olduğu değerden %10 fazla girilmesi halinde zar faktörü olması gerektiğinden 0.1 puan yukarıda olur. Benzer şekilde gözeneklilik değerinin %10 hatalı girilmesi durumunda alan %10 eksik kalacaktır (Tablo 1).

**Tablo 1.** Test tasarımı parametre etkileri (Kappa, 2012)

Parametre/Etki	C	Zar faktörü	k.h	k	Alan	Mesafe
$r_w \uparrow\%10$	-	$\uparrow 0.1$	-	-	-	-
$\phi \uparrow\%10$	-	$\varepsilon$	-	-	$\downarrow\%10$	$\downarrow\%5$
$c_t \uparrow\%10$	-	$\varepsilon$	-	-	$\downarrow\%10$	$\downarrow\%5$
$\mu \uparrow\%10$	-	-	$\uparrow\%10$	$\uparrow\%10$	-	-
$h \uparrow\%10$	-	$\varepsilon$	-	$\downarrow\%10$	$\downarrow\%10$	$\downarrow\%5$
$q.B \uparrow\%10$	$\uparrow\%10$	$\varepsilon$	$\uparrow\%10$	$\uparrow\%10$	$\uparrow\%10$	$\uparrow\%5$

## 5. ÇOK KUYULU TESTLER

Bu tarz testlerde test edilen rezervuar hacmi diğer testlere oranla oldukça fazladır. Bir üretim – bir gözlem veya bir enjeksiyon – bir gözlem kuyusu kullanılarak yapılabilen girişim testlerini daha çok kuyulu olarak tasarlamak mümkündür. Gözlem kuyusunda bir basınç düşüşü oluşturacak kadar büyük bir akış debisi seçilir. Test süresi her iki kuyu arasındaki uzaklık ( $r_i$ ) kullanılarak seçilmelidir[2].

$$t_{\min} = \frac{948\phi\mu c_i r_i^2}{k} \quad (7)$$

## 6. EKİPMAN SEÇİMİ

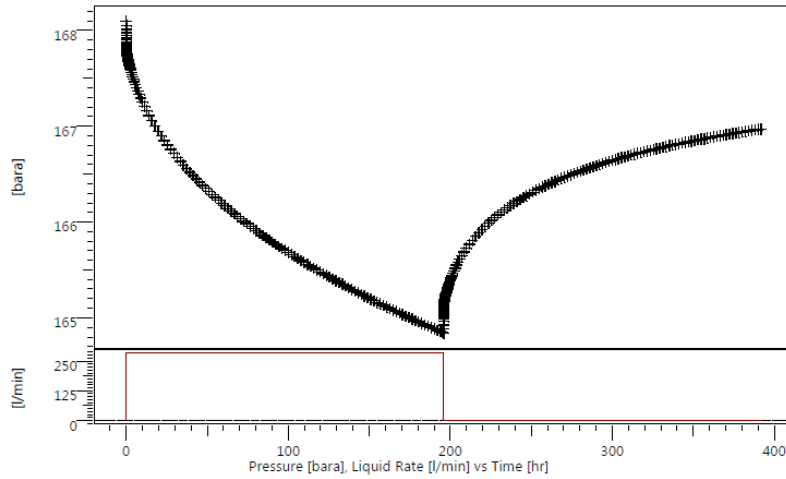
Basınç ölçerler teknolojilerine bağlı olarak mekanik, gerilme (strain gauge), kapasitans ve kuartz olmak üzere dörde ayrılırlar. Kapasitans tipi basınç ölçerler en verimli olarak 150 °C'nin altında çalıştıkları için yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlere uygun değildirler. Basınç ölçüm çözünürlükleri göz önüne alındığında 10'000 psi'da 0.001 çözünürlükle kuartz basınç ölçerleri, 15'000 psi'da 0.2 psi ile gerilme tipi ve çözünürlükleri tam ölçeğin 0.05%'i (örneğin 10'000 psi'da 5 psi) olan mekanik basınç ölçerler izler. Bu basınç ölçerlerin ölçüm hassasiyetleri ise sırasıyla tam ölçeğin 0.02%, 0.1% ve 0.4%'dir. Bu değerler göz önüne alındığında kuartz basınç ölçerlerin özellikle yüksek geçirgenlikli sistemlerde tercih edilmeleri gerekmektedir. Kuyu dibi sıcaklığına bağlı olarak dijital basınç ölçerler 300°C'de 9 saate kadar ölçüm yapabilmektedirler[7]. Debi ölçümlerinde genellikle en yüksek debinin tahmin edilip ona uygun savak – silencer düzeneğinin tercih edilmesi uygundur. Ancak PTS olarak adlandırılan dijital firdöndü içeren kuyu dibi ölçüm aletleri avantajlı kullanımlar sağlamaktadır. Kuyuda test süresince silika ve/veya kalsit kabuklaşması bekleniyorsa testin inhibitör sistemleri kurularak yapılması gerekir.

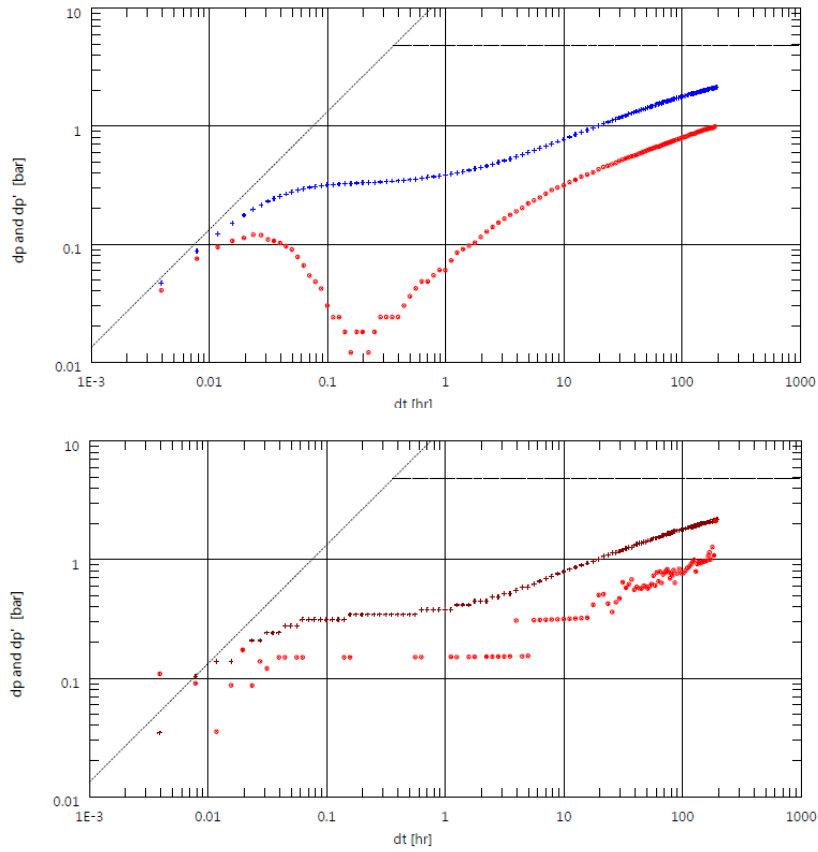
## 7. ÖRNEK TASARIM

Yukarıda detaylı şekilde aktarılan test tasarımı yöntemi iki örnekle açıklanacaktır. İlk örnekte 119°C sıcaklıkta 168 bar basınçlı bir rezervuarda açılan bir arama kuyusunda basınç yükselme testi Tablo 2'de verilen tasarım parametreleri kullanılarak tasarlanacaktır. Test tasarımı için gereken su formasyon hacim katsayısı, akma, su sıkıştırılabilirliği ve yoğunluk gibi parametreler Gould, Van Wingen+Frick, Dodson ve Standing korelasyonları[6] kullanılarak elde edilmiştir. Kuyunun basınç yükselme testi yapılmadan önce akışa verildiği ve 196 saat boyunca sabit debiyle akıtıldığı varsayılmıştır (Şekil 2). Daha sonrasında ise kuyu 196 saat kapatılarak basınç yükselimi kaydedilmiştir. Denklem 1 kullanılarak elde edilen yarı çap değeri 207 metre, test edilen hacim ise 6.24406 MMm<sup>3</sup>tür. Kuyu içi depolama ve hasarlı kuyu modeli, çift gözenekli rezervuar modeli ve sonsuz rezervuar sınır modeli kullanılarak test önce kuartz sonrada mekanik bir basınç ölçer kullanılarak benzetilmiştir. Basınç ve basınç türevi verilerine bakıldığında kuartz basınç ölçer farkı bariz şekilde görülmektedir. Basınç testlerinin analizlerinde kuyu, rezervuar ve sınır modellerini tanımlamakta benzersiz olan basınç türevi mekanik basınç ölçer hassasiyeti ve çözünürlüğünün kısıtlı olması nedeniyle çok net bir sonuç verememektedir. Ancak kuartz basınç ölçer kullanıldığı durumda kuyu içi depolamanın göstergesi olan erken zaman basınç ve basınç türevi noktaları birim eğim (noktalı çizgi) davranışını göstermektedir. Kuartz basınç ölçer kullanılması çift gözenekli rezervuarlarda görülen basınç türevinin minimum yaptığı davranışı da mükemmel tanımlamaktadır. Buna karşın mekanik basınç ölçer nispeten düşük bir geçirgenlik değeri kullanılarak benzetilen bu testte yalancı radyal karar davranış etkisini düşündürmektedir. Bu basınç ölçer sonuçları baz alınarak yapılacak olan bir testin hatalı sonuçlara neden olması beklenmelidir.

**Tablo 2.** Test tasarım parametreleri

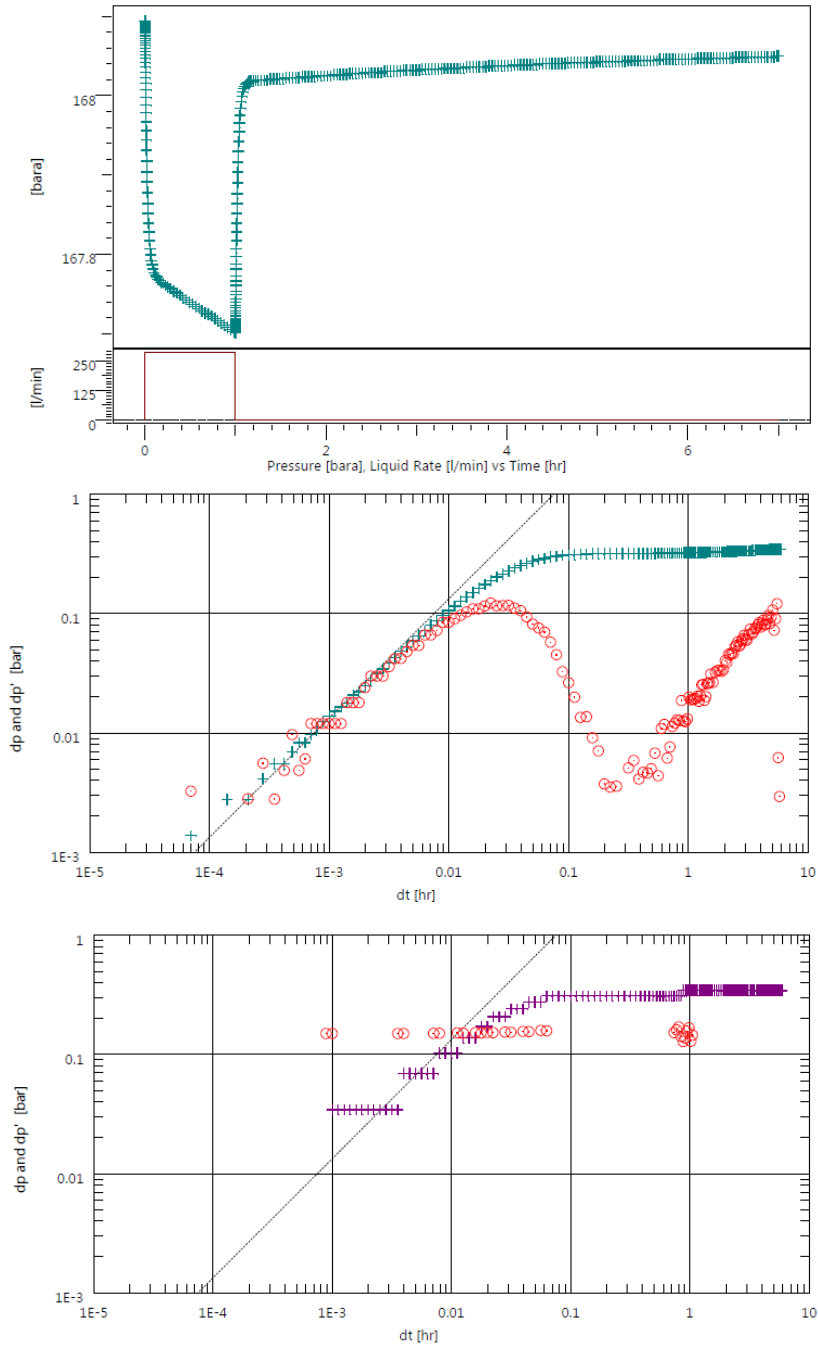
pi, bara	168.095	k ortalama, m2	$1.97 \times 10^{-12}$
p@dt=0, bara	164.841	Omega	$1.0 \times 10^{-3}$
C, m3/Pa	$1.33 \times 10^{-5}$	Lambda	$6.12 \times 10^{-5}$
kh total, m3	$1.97 \times 10^{-13}$		





**Şekil 2.** Örnek uzun basınç yükselim testi tasarım sonuçları. Debiler ve ölçülen basınçlar (üst), kuartz basınç ölçer ölçümleri (orta), mekanik basınç ölçer ölçümleri (alt).

Aynı test 1 saat akış sonrasında ise 6 saat basınç yükselim süreleri seçerek aynı parametreler kullanılarak benzetilmiştir. Denklem 1 kullanılarak elde edilen yarı çap değeri 35.9 metredir. Şekil 3'de görüldüğü gibi kısa tutulan test sonuçları her iki basınç ölçer için de yanıltıcıdır. Mekanik basınç ölçer ile elde edilen basınç ve basınç türevi değerleri mekanik basınç ölçerin hassasiyeti ve çözünürlüğünün kısıtlı olması ve akış ile basınç yükselim dönemlerinin kısa tutulması nedeniyle çok yönlendirici değildir. Benzer şekilde kuartz basınç ölçer sonuçları daha iyi olmakla birlikte test süresinin kısa tutulması nedeniyle sağlıklı bir toplam sistem geçirgenlik – kalınlık çarpanı elde etmek mümkün değildir. Bu testin analizinde semilog analiz yöntemi kullanılamayacağından sadece eğri çakıştırma yöntemi uygulanabilir. Görüldüğü gibi kısa tutulan test nedeniyle arama kuyusunun ve rezervuarın özelliklerini sağlıklı bir şekilde tespit etmek mümkün değildir.



**Şekil 3.** Örnek kısa basınç yükselim testi tasarım sonuçları. Debiler ve ölçülen basınçlar (üst), kuartz basınç ölçer ölçümleri (orta), mekanik basınç ölçer ölçümleri (alt).

## SONUÇ

Jeotermal rezervuarlarda yapılacak olan kuyu testlerinin tasarımları örneklerle tartışılmıştır. Testlerin rezervuarın fiziksel özellikleri göz önüne alınarak yapılmadığı durumlarda elde edilen sonuçların analizlerinin zor olduğu ve belirsizliklerinin yükseldiği görülmüştür. Testlerde kullanılacak olan basınç ölçer teknolojileri test sonuçlarını oldukça fazla etkilediğinden basınç ölçerlerin seçiminin önemi çok önemli olduğunu göstermiştir. Arama kuyularında akış ve test süreleri uzun tutularak mümkün olan en fazla rezervuar hacmi test edilmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] KAMAL, M., ABBASZADEH, M., CİNCO-LEY, H., HEGEMAN, P., HORNE, R., HOUZE, O., et al. In M. Kamal (Ed.), Monograph series: Vol. 23."Transient well testing" (1st ed.). Dallas: Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [2] LEE, J., : "Well Testing", SPE textbook series, Society of Petroleum Engineers, Dallas, 1982.
- [3] GARG, S., : " Geopressured Geothermal Well Tests: A Review", GRC Meeting, San Diego, 2007.
- [4] VETTER, O.J., NICHOLSON, R.W., "An Integrated Approach to Geothermal Well Testing", Transactions, Vol 3, Geothermal Resources Council, 1979, 753-756.
- [5] VETTER, O.J., CRICHLLOW, H.B. "Injection, Injectivity and Injectibility in Geothermal Operations: Problems and Possible Solutions, Phase I – Definition of Problems", DOE/DGE report, DE-AC03-78ET27146, 1979.
- [6] <http://www.kappaeng.com>
- [7] <http://www.kusterco.com>, 2013
- [8] HORNE, R. Modern well test analysis (2nd ed.). Palo Alto: Petroway Inc. 1995

## ÖZGEÇMİŞ

### Serhat AKIN

Prof. Dr. Akın, 1997'de ODTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği bölümünden doktora derecesi aldı. Daha sonra Stanford Üniversitesi'nde 1997-1998'de Doktora Sonrası Araştırmacı olarak çalışan Dr. Akın 2002'de Doçent ünvanı ve kadrosunu aldı. 2006 yılında Blaustein ziyaretçi profesörü olarak Stanford Üniversitesi Enerji Kaynakları Mühendisliği Bölümünde bulunduktan sonra 2008'de ODTÜ'de profesörlük kadrosuna atanmıştır. SPE Reservoir Evaluation & Engineering yardımcı editör, The Scientific Journal, International Journal of Petroleum Science and Technology, the Open Petroleum Engineering Journal ve Turkish Journal of Oil and Gas dergilerinde editörler kurulunda görev alan Dr. Akın rezervuar mühendisliği, rezervuar simülasyonu, izleyici (tracer) ve kuyu testleri konularında sektörün önde gelen dergilerinde ve toplantılarında yayınları bulunmaktadır.