

JEOTERMAL REZERVUARLARINDA KUYU BASINÇ TESTLERİ VE ANALİZİ

Mustafa ONUR

ÖZET

Jeotermal enerjiyi içeren yeraltı rezervuar sistemlerinin yerinde ve akış koşulları altında özelliklerinin (geçirgenlik, gözeneklilik, akışa kapalı ve beslenmeli sınırların belirlenmesi, fayların sızdırmalı olup olmadıkları vb.) belirlenmesi, bu sistemlerin uygun şekilde geliştirmesi ve işletilmesine yönelik kararlarının alınmasında ve geleceğe yönelik performans tahminlerinin yapılmasında kullanılan modellerin oluşturulmasında son derece önemlidir. Kuyu basınç testleri bu amaçları gerçekleştirmek için endüstride kullanılan en önemli araçlardan biridir. Kuyu basınç testlerinden elde edilen bilgiler, durağan (statik) kabul edilen jeolojik ve jeofizik bilgiler ile birleştirildiğinde, rezervuarın gerçekçi bir şekilde tanımlanmasını ve üretim/rezervuar performansının değerlendirilmesini sağlar. Dolayısıyla, en doğru yaklaşım, bu üç veri türünden elde edilen bilgilerin birleştirilerek jeotermal sistemlerin tanımlanması ve uygun şekilde işletimlerinin tasarlanmasıdır. Kuyu testleri bu araçların olmazsa olmazlarından biridir.

Bu çalışmada, jeotermal sistemlerde kuyu basınç testlerinde kullanılacak uygun basınçölçerlerin özellikleri hakkında bilgilerden başlanarak, kullanılan kuyu basınç testi tipleri, bu testlerinin tasarlanması, değerlendirilmesi, analizinde kullanılacak temel prensipler ve yöntemler sunulacaktır. Son yirmi yılda teknolojiye gelişmelere paralel olarak, kuyu basınç testleri alanında da önemli ölçüde ilerlemeler kaydedilmiştir. Pek çok yeni model ve modern analiz yöntemi geliştirilmiştir. Modern modelleme ve analiz yöntemleri hakkında da bilgi verilecektir. Türkiye'deki Balçova-Narlıdere ve Afyon Ömer-Gecek jeotermal sahalarında yapılan çeşitli kuyu basınç testlerine ait uygulamalara çalışmada yer verilerek, bu testlerin değerlendirilmesi ve analizinden elde edilen bilgiler sunulacaktır.

1. GİRİŞ

Kuyu basınç testleri, jeotermal sistemlerin üretim ve rezervuar mühendisliği çalışmalarında gerekli olan temel araçlardan biridir. Bu testler ile hem kuyuların (üretim veya reenjeksiyon) verimlilik ve performansları hem de rezervuar sisteminin sınırları ve akış özellikleri hakkında bilgiler edinilir [1-3]. Kuyu basınç testlerinden elde edilen bilgiler ve bu bilgilerin kütle/ısı akış modellerinde kullanılmasıyla aşağıda sıralanan sorulara yanıtlar verilebilir:

- Rezervuarda yerinde akışkan ve ısı miktarı nedir?
- Hangi yüzey debisi ile bu mevcut akışkan üretilebilir?
- Kuyuların verimlilikleri nedir ve nasıl sürdürülebilir ve artırılabilir?
- Kuyular arası hidrolik iletişim var mıdır?
- Rezervuar performans tahmini (sürdürülebilirlik, yenilenebilirlik bakımından)

Ancak, unutulmamalıdır ki, bu sorulara yanıtlar, genelde zamanın fonksiyonudur, kuyuların ve sahanın yaşamı boyunca değişebilir. Sahanın ve kuyuların üretim davranışı uygulanacak üretim senaryosuna (veya stratejisine) göre değişir ve sürekli değerlendirmeyi gerektirir. Geliştirme stratejilerini belirlemek için, sahanın dinamik/yerinde davranışını gerçekçi ve sürekli bir şekilde tahmin (üretim debileri, statik basınç değerleri, sıcaklık, entalpi, farklı üretim senaryoları altında olası akışkan kurtarımı, vb.) edebilecek bir kuyu/rezervuar modelinin oluşturulması ve bu modelin verilerle güncellenmesi gereklidir.

Performans tahminlerinde kullanılacak modeller, basit tank modelleri olabileceği gibi 3D sayısal modeller olabilmektedir [4,5]. Bütün modellerde kullanılan ortak öğeler, temel kütle ve enerji korunumu yasalarından türetilmiş denklemlerdir. Bu modeller eldeki statik ve dinamik veriler kullanılarak kalibre edildikten sonra, gelecekte (örneğin önümüzdeki 10, 20 veya 25 yıl süresince) saha işletilirken göz önünde bulundurulması tasarlanan çeşitli üretim/reenjeksiyon debi senaryolarına bağlı olarak, sistem içerisindeki yerel basınç/sıcaklık dağılımları ile sistemin ortalama basınç/ sıcaklıklarının tahmin edilmesinde kullanılır. Genelde “karar” değişkenleri olarak isimlendirilen model basınç ve sıcaklık dağılımlarına bakılarak sistemin gelecekte ne ölçüde sürdürülebileceği hakkında bilgilere ulaşılması mümkün olmaktadır.

Burada vurgulanması gereken önemli bir nokta da, tüm bu söz konusu modellerin oluşturulması ve işletilmesi için gerekli olacak verilerdir. Genelde bu modellerin oluşturulmasında başvuru üç farklı veri kaynağı vardır. Bunlar jeolojik, jeofizik ve kuyu testi verileridir. Jeolojik veriler, sistem için kavramsal bir jeoloji modelinin oluşturulması, jeokimya analizleri, fasiyes ve tabaka yapılarının belirlenmesi, sistem içerisindeki fayların yer, doğrultu ve eğimlerinin belirlenmesi ve beslenme bölgelerinin ve sınır koşullarının tespit edilmesi için gereklidir. Jeofizik veriler ise, sistemin ısı akısının, rezistif sınırlarının ve sıcaklık anomalilerinin alan ve derinlik boyutunda belirlenmesi için gereklidir. Sismik kullanıldığında, sistem içerisindeki yapısal jeolojik özelliklerin, fayların belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Genelde, jeolojik ve jeofizik veriler sistemin statik (durağan) durumunu tanımlayan parametrelerin belirlenmesinde kullanılır. Buna karşın kuyu testleri (basınç ve izleyici testleri), sistemin dinamik ve yerinde koşullarında kuyu ve rezervuar performansının etkileyen mühendislik parametrelerinin (geçirgenlik, zar faktörü, gözeneklilik, akış karakteristikleri vb) değerlerinin belirlenmesine olanak tanır.

Kuyu basınç testlerinden elde edilen bilgiler, durağan (statik) kabul edilen jeolojik ve jeofizik bilgiler ile birleştirildiğinde, rezervuarın gerçekçi bir şekilde tanımlanmasını ve üretim/rezervuar performansının değerlendirilmesini sağlar. Öte yandan, tek başına ne jeolojik ve jeofizik bilgiler ne de kuyu basınç testi verileri sistemin statik ve dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yeterli değildir. Jeolojik ve jeofizik bilgilerden tahmin edilmiş statik özelliklerin hem teyit edilmesi (doğrulanması veya güncellenmesi) çünkü bu bilgilerde belirsizlikler olabilmektedir hem de akışı kontrol eden özelliklerinin kuyu testlerinden belirlenmesi gereklidir. Örneğin, jeolojik ve jeofizik veriler jeotermal sistem içerisinde fayların olduğuna işaret edebilir. Ancak bu fayların sistem içerisinde akışa kapalı mı yoksa beslenme (sızdırmalı) sınırları mı oluşturduğuna, sistem içerisindeki akışkan ve ısı akışını ve kuyu performansını önemli ölçüde kontrol eden geçirgenlik/gözeneklilik değerleri ve dağılımlarının ve kuyu civarı zar faktörü değerinin ne olduğuna yanıt veremez. Bu bilgilere yanıtlar ancak kuyu testleri ile verilebilir.

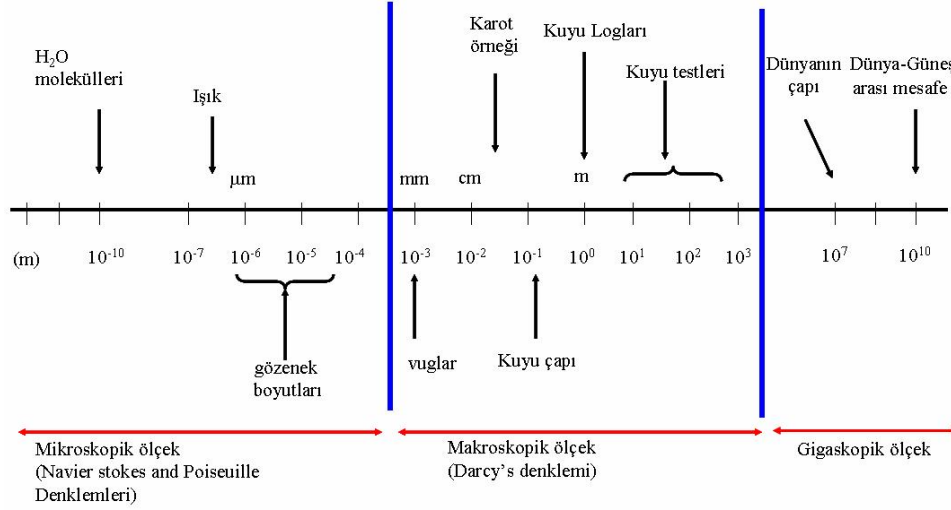
Bildiri 6 bölüm halinde düzenlenmiş olup 2. Bölüm’de kuyu basınç testlerinin diğer veri kaynakları ile kıyaslandığında önemi ve ölçeği, kuyu basınç testlerinden elde edilen bilgiler, 3. Bölüm’de kuyu testlerinin metodolojisi, temel prensipleri, test tipleri ve testlerin analizinde kullanılan modeller ve basınç ölçerler hakkında bilgiler, Bölüm 4.’de kuyu testleri analizinde izlenen adımlar ve analiz yöntemleri, Bölüm 5’de kuyu ve rezervuar performans ve akış özelliklerini belirlemeye yönelik olarak Afyon Ömer-Gecek ve Balçova-Narlıdere jeotermal sahalarında yapılan dört kuyu basınç testi uygulamaları sunulmaktadır. Bölüm 6’da ise sonuçlar sunulmaktadır.

2. NEDEN KUYU TESTLERİ ?

2.1. Kuyu Basınç Testlerini Diğer Ölçüm Kaynaklarından Ayıran Özellikleri ve Ölçeği

Daha önce değinildiği gibi, jeotermal sistemlerin potansiyel ve performanslarının belirlenmesi ve işletmesine yönelik kararların alınması, kütle ve enerji korunumu yasalarından türetilmiş modellerle yapılabilmektedir. Bu modellerdeki gerekli parametreler direkt ve indirekt olarak tanımlayabileceğimiz iki farklı tip ölçümlerden elde edilir. Direkt ölçümler arasında karotlar, kesintiler, akışkan örnekleri, statik basınç ve sıcaklıklar yer alırken, indirekt ölçümler, sismik, rezistivite, kuyu-logları, kuyu testleri,

PVT analizi, vb ölçümlerini kapsar. Şekil 1'de rezervuar özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan farklı ölçüm yöntemlerinin ölçeğe bağlı kıyaslaması sunulmaktadır. Sismik, karot ve kuyu logları verileri rezervuarın statik (durağan) tanımlamasına yönelik verileri sağlar. Ayrıca, karot ve kuyu logları verileri genelde "küçük ölçekte" ve kuyu civarını yansıtan veri türleridir. Örneğin, karotlarda yapılan deneylerden belirlenen geçirgenlik ve gözeneklilik değerleri yaklaşık olarak birkaç cm^3 hacim üzerinde geçerlidir. Buna karşın, kuyu testlerinden elde edilen geçirgenlik ve gözeneklilik değerleri ise yerinde ve dinamik koşullar altında ve yukarıdaki veri türlerine göre daha büyük ölçekte kuyu ve rezervuar davranışını yansıtan değerleri sağlar. Bu nedenle, gerçekçi bir rezervuar modelinin oluşturulmasında temel bir araçtır.



Şekil 1. Farklı ölçüm kaynakları ve ölçek ilişkisi.

2.2. Kuyu Basınç Testlerinden Elde Edilen Bilgiler

Kuyu testlerinden hem kuyu hem de rezervuar davranışını kontrol eden parametreler elde edilebilir. Kuyu davranışını belirleyen parametreler:

- Üretim/enjeksiyon potansiyeli (üretilbilirlik/enjektivite indeksi, zar faktörü)
- Kuyu geometrisi, kuyu hacmi, kuyu içi akışkan yoğunluğu, kuyu içi faz değişim olayları

Rezervuar davranışını belirleyen parametreler:

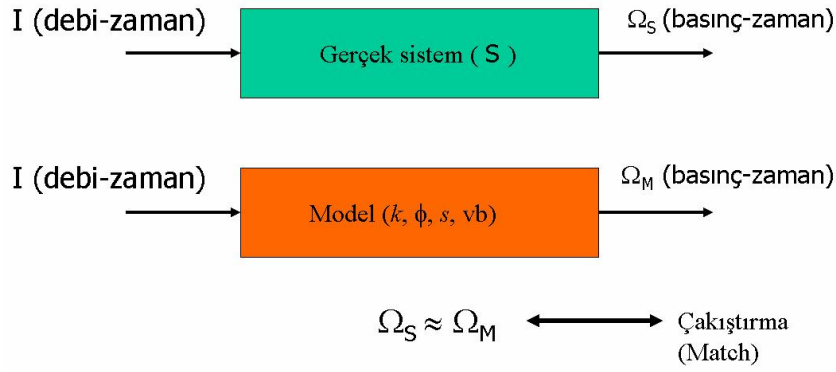
- Geçirgenlik (yatay, k_H ve düşey, k_V)
- Gözeneklilik, toplam sistem sıkıştırılabilirlik veya gözeneklilik-sıkıştırılabilirlik çarpımı (ϕC_f)
- Sınırlar (uzaklık, geometrisi, akışa kapalı, sızdırmalı, sabit basınçlı)
- Basınç ve sıcaklık (kuyu dibi, ilk ve ortalama basınç ve sıcaklıklar)
- Rezervuar heterojenliği (doğal çatlaklı, tabakalanma, özelliklerde konumla değişkenlik, vb.)

3. KUYU BASINÇ TESTLERİ METODOLOJİSİ

Kuyu testleri, kuyu ve rezervuar davranışını kontrol eden parametrelere (geçirgenlik, zar faktörü, ortalama rezervuar basıncı gibi) ait değerlerin doğrudan tahmin edilmesine olanak sağlamaz. Bu parametrelerin tahmin edilmesi için kuyu dibi basınç (ve/veya debi)-zaman sinyalinin analiz ve yorumlanması gerekir. Bu nedenle de daha öncede değinildiği gibi, kuyu testleri kuyu ve rezervuar parametrelerinin değerlerinin belirlenmesinde kullanılan endirekt bir ölçüm yöntemidir.

Kuyu basınç testleri, kontrollü olarak belirli bir süre için yüzey debisinde yaratılan ani bir değişikliğe karşı, kuyuda veya kuyularda kaydedilen kuyu dibi basınç/sıcaklık-zaman verilerinden (“sinyalinden”) oluşur. Bazı durumlarda, basınca ilave kuyu dibi akış-zaman verileri veya kontrollü olarak yüzeyde basınç sabit tutularak, yüzey debisi-zaman sinyali ölçülebilmektedir.

Kontrollü debi değişikliğine karşı test edilen sistemin tepkisi olarak kaydedilen kuyu dibi basınç/sıcaklık-zaman sinyalinin analizi için bir matematiksel model (yorumlama modeli olarak da isimlendirilmektedir) gerekir. Kaydedilen tepki, kuyu/rezervuar sisteminin bir karakteristiği olduğundan, pek çok durumda, bu tepkiden kuyu/rezervuar parametrelerine ait değerleri belirlemek mümkündür. Şekil 2’de gösterildiği gibi, göz önünde bulundurulmuş sistem için geçerli olacak bir modelden aynı debi-zaman giriş verisine (Şekil 2’de I ile gösterilmektedir) karşı elde edilen basınç-zaman çıktısı (Ω_M) ile gerçek sistem çıktısının (Ω_S) “en iyi çakışmasını” sağlayacak şekilde model parametre değerleri tahmin edilir.



Şekil 2. Kuyu basınç testleri metodolojisi.

Kısaca Şekil 2’de özetlenen, sistemden gözlemlenmiş endirekt ölçümlerden, sistemin tanımlaması ve sisteme ait parametrelerin belirlenmesi işlemi kuyu testleri analizinin temelini oluşturur. Bu işlem aslında, pek çok disiplinde ters problem (“Inverse Problem”) uygulaması olarak bilinir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Ters problem uygulamaları, aşağıda verilen nedenlerden dolayı bir takım zorlukları beraberinde getirir (örneğin, tekil olmayan çözümlerin elde edilmesine yol açabilmektedir):

- Gözlemlenmiş kuyu dibi basınç ölçümleri üzerindeki gürültü (“noise”) (ölçme aletlerinden kaynaklanan ölçüm hataları + ölçüm yapılan ortamdaki bazı dış etkilerin basınç sinyale karışması: üretimden dolayı titreşim, sıcaklık etkileri, faz değişimleri vs. den dolayı ölçümlere eklenen gürültü)
- Fiziksel modeldeki belirsizlik (örneğin, göz önünde bulundurulmuş sistem için fiziksel varsayımlar tamamıyla geçersiz olsa bile, model çıktısı gerçek sistem çıktısı ile aynı olabilir)
- Basınç ölçümleri ile model parametreleri arasındaki ilişkinin doğrusal olmayışı (örneğin, kararsız akış koşullarında geçirgenlik ve gözeneklilik ile kuyu dibi akış basıncı arasında doğrusal bir ilişki yoktur.)
- Bazı parametrelerin, belirli zaman dönemlerindeki sistem çıktısı üzerinde etkisinin olmayışı

Bu zorluklar nedeniyle, gerçek sistem davranışını yansıtan birden fazla model, kullanılan yorumlama modeli doğru olsa bile farklı parametre setleri, aynı sistem çıktısını verebilir. Ancak, tekil olmama problemi aşağıda belirtilen hususları göz önünde bulundurularak azaltılabilmektedir:

- Testler dikkatli şekilde önceden tasarlanmalı (uygulanacak debi senaryosu, testin süresi, kullanılacak basınç ölçerlerin çözünürlüğü, hassasiyeti, vb.)
- Kuyu ve rezervuar hakkında tüm mevcut önsel bilgiler (jeolojik, jeofizik, karot, kuyu log, üretim logu, PVT bilgileri) dikkate alınmalı.
- Tüm bu bilgilerle, sahada teste geçilmeden önce olası model (veya modeller) kullanılarak, uygulanacak debi senaryosu ve parametrelerin, basınç/sıcaklık üzerindeki duyarlılığı çalışılmalıdır. Bu “ileri problem” uygulaması ile yapılabilmektedir.

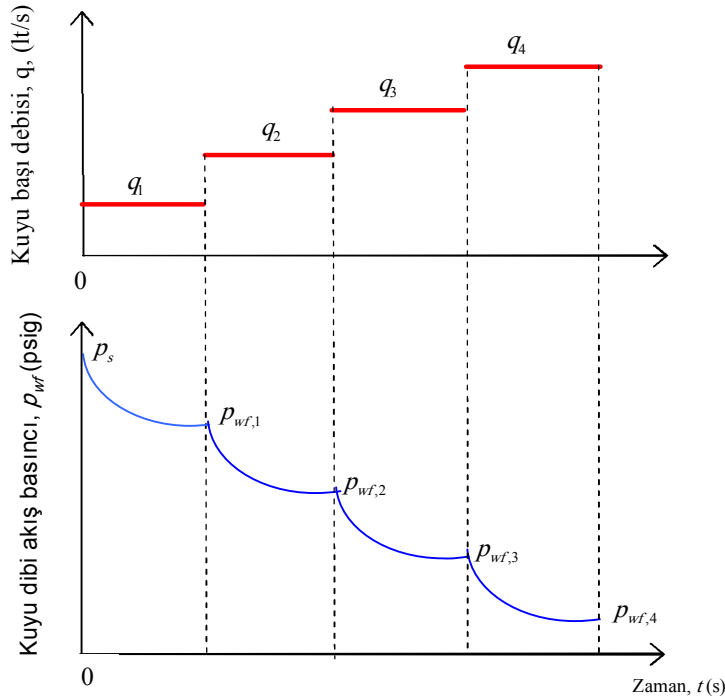
3.1. Kuyu Basınç Test Tipleri

Amaçlara bağlı olarak uygulanacak pek çok kuyu basınç test tipi mevcuttur [1-3]. Bu alt bölümde yaygın olarak kullanılan basınç testi tipleri hakkında bilgiler verilmektedir.

3.1.1. Verimlilik (Çok-Debili Basınç) Testleri

Kuyu basınç testlerinin temel amaçlarından biri kuyunun üretilebilirlik indeksini, kuyu dibi akış performans eğrisini ve statik (veya ortalama) rezervuar basıncını belirlemektir. Bu bilgiler, kuyudan elde edilecek maksimum debinin, kuyu dibinden (rezervuardan), kuyu başına ve kuyu başından separatöre kadar akış koşullarını göz önünde buldurularak belirlenmesi; kısaca “nodal analiz” ve yapay kaldırma (pompa, gaz basımlı, kompresörlü, vb) sistemlerinin tasarımı, için gereklidir.

Kuyu dibi akış performans eğrisini oluşturmak için kısaca verimlilik testleri (“productivity testing”) olarak isimlendirilen testler kullanılmaktadır (Şekil 3). Şekil 3, kuyu dibi akış performans eğrisini oluşturmak için kullanılan çok-debili akış sonrası akış (“Flow After Flow”) kuyu testine ait şematik gösterimi temsil etmektedir. Akış dönemleri arasında kapama dönemlerinin göz önünde bulundurulduğu verimlilik testleri (“Modified Isochronal”) kuyu dibi akış performans ve kuyu verimliliğinin belirlenmesinde kullanılabilir (Şekil 4). Şekil 3 ve 4’de gösterilen verimlilik testlerinde, kuyu her akış döneminde farklı sabit yüzey debisinde üretilir ve her akış debisinde “stabilize” (veya dengelenmiş) olan kuyu dibinde ölçülmüş basınç değerleri debiye karşı çizilir (Şekil 5).



Şekil 3. Çok-debili akış sonrası akış kuyu basınç testine ait şematik gösterim.

Basıncın kuyu dibinde ölçülemediği durumlarda, kuyu başında basınç ölçümleri yapılabilir. Ancak, kuyu dibi akış performans veya rezervuar verimlilik eğrisinin oluşturulması için ölçülen kuyu başı basınçlarından kuyu dibi akış basınçlarının; kuyu başından kuyu dibine kadar olan kuyu içi akışı modelleyen bir kuyu içi akış modeli kullanılarak, hesaplanması gereklidir. Genelde tercih edilen basınç ve sıcaklığın üretim zonu ortasında veya hemen üstünde kuyu dibinde ölçülmesidir. Pompa kuyularda, yüzeydeki bir basınç algılayıcısına kılcal boru bağlanarak ve kılcal boruya gaz enjekte edilerek pompa derinliğinin altında basınç-zaman verileri kaydedilebilmektedir [6].

Şekil 5'de farklı üç kuyu (A, B ve C) örneği için çizilmiş kuyu dibi akış-yüzey debisi (IPR) eğrilerini göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi, A ve B kuyuları için IPR eğrisi doğrusal bir davranış (kuyu dibi akış basıncına karşı yüzey debisi bir doğru denklemi ile tanımlanır) gözlemlenirken, C kuyusu için dış bükey eğrisel bir davranış gözlenmektedir. Rezervuarda tek faz sıvı akışının ve Darcy akışının geçerli olduğu durumlarda, kuyu IPR eğrisinin Şekil 5'de A ve B kuyuları için gösterilen doğrusal davranışı yansıtması gerekir. Öte yandan, rezervuar içerisinde veya kuyu civarında iki fazlı (jeotermal sistemler için gaz, buhar ve sıvı akışı) ve/veya türbülanslı ("Non-Darcy") akış söz konusu olduğunda ise Şekil 5'de gösterilen C kuyusu örneğinde olduğu gibi IPR dış bükey eğrisel bir davranış gösterir.

Verilen bir yüzey debisi değerinde, IPR eğrisinin eğiminin (türevinin) tersinin mutlak değeri verimlilik veya üretilebilirlik indeksi olarak tanımlanır ve genellikle PI veya J sembolü ile gösterilir:

$$PI = \left| \frac{dq}{dp_{wf}} \right| \quad (\text{lt/s/psi}) \quad (1)$$

Verimlilik indeksi PI , rezervuara uygulanan bir basınç düşümünde, kuyunun akışkan üretme kapasitesinin bir ölçüsüdür ve birim debi/basınç'tır. Enjeksiyon kuyuları için de benzeri bir tanım geçerlidir.

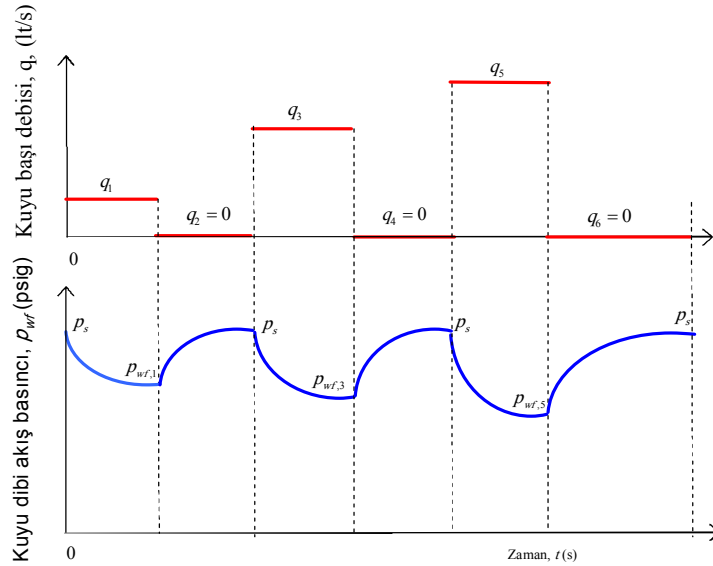
IPR eğrisi doğrusal olan kuyularda, PI değeri sabittir, bir başka deyişle debi ile değişim göstermez. Böyle kuyular için, Denklem 1'i aşağıdaki denklem olarak yazmak mümkündür:

$$PI = \frac{q}{\bar{p} - p_{wf}} \quad (\text{lt/s/psi}) \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2'de, q (lt/s) yüzey debisini, p_{wf} ise q yüzey debisinde dengelenmiş kuyu dibi akış basıncını, \bar{p} ise ortalama rezervuar basıncını temsil eder. Beslenmeli sistemlerde ki jeotermal sistemlerin çoğu beslenmelidir, bu durumda ortalama rezervuar basıncı kuyu dibi basıncının ölçüldüğü derinlikteki statik basınç p_s 'yi (bkz Şekil 3 ve 4) temsil eder. Denklem 2'yi düzenleyerek doğrusal IPR ilişkisini tanımlayan denklemi

$$\bar{p} - p_{wf} = \frac{q}{PI} \quad (\text{psi}) \quad (3)$$

şeklinde yazabiliriz.

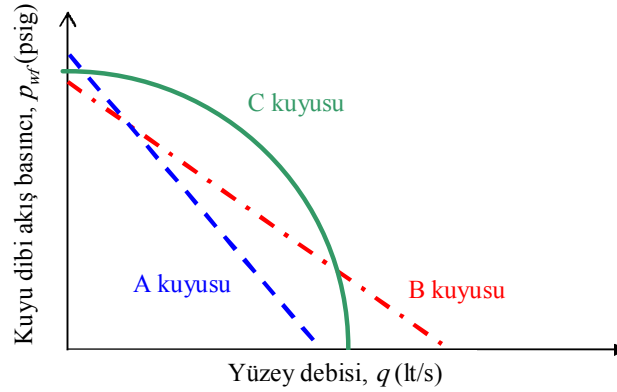


Şekil 4. Çok-debili değiştirilmiş izokronal ("Modified Isochronal") kuyu basıncı testine ait şematik gösterim.

Tek faz sıvı ve türbülanslı (Non-Darcy) akış koşullarında ki şuna kadar Türkiye’de çalıştığımız Balçova-Narlıdere ve Afyon Ömer-Gecek jeotermal sahalarında yaptığımız verimlilik ve çok-debili testler bu akış koşullarını teyit etmektedir, verimlilik indeksi PI sabit değildir ve uygulanan debi ile değişim gösterir. Bu durumda, IPR eğrisi aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$\bar{p} - p_{wf} = Aq + Bq^2 \quad (\text{psi}) \quad (4)$$

Denklem 4’de A (psi/(lt/s)) ve B (psi/(lt/s)²) sabitlerdir ve ileride görüleceği gibi rezervuar kayaç ve akışkan özelliklerine bağlıdır. Denklem 4’de B sabitinin sıfır olması durumunda, Denklem 4 tek fazlı sıvı ve Darcy akış koşulları için geçerli olan Denklem 3’e indirgenir ve bu durumda, $A = 1/PI$ dir. Dolayısıyla, Denklem 4, hem tek fazlı sıvı Darcy hem de tek faz sıvı türbülanslı (Non-Darcy) akış koşulları için geçerli olan genel IPR denklemdir. Türbülanslı olmayan (Darcy) akışa göre, türbülanslı akışın verimliliğe etkisi, verilen bir basınç düşümünde ($\bar{p} - p_{wf}$) kuyu dibi basıncında daha düşük üretim debisi elde edilmesidir.



Şekil 5. 3 farklı kuyu için kuyu dibi akış basıncı-yüzey debisi (IPR) eğrileri.

Çok debili testlerde (Şekil 3 ve 4) amaç, Denklem 4 ile tanımlanan IPR denklemindeki A ve B sabitlerinin değerlerini belirleyerek kuyu için kuyu dibi akış basıncı-yüzey debisi ilişkisini belirlemektir. Bu ilişki belirlendikten sonra, verilen bir kuyu dibi basıncında, kuyudan üretilebilecek yüzey debisi tahmin edilebilir.

Kuyu IPR eğrisinden hesaplanabilecek bir diğer parametre de kuyunun mutlak açık akış potansiyelidir ve AOFP ile gösterilir. Bu teorik debi değeri, kuyuları üretilebilirliklerine göre nicel olarak kıyaslamak için kullanılmaktadır. Mutlak açık akış potansiyeli, kuyu dibinde (üretim açığı aralığında) akış basıncının atmosfer basıncına eşit olması durumunda, kuyunun teorik akış debisi olarak tanımlanır. AOFP değeri aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$AOFP = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(\bar{p} - 14.7)}}{2B} \quad (\text{lt/s}) \quad (5)$$

Türbülanslı akışın olmadığı durumda ($B = 0$ ise), AOFP değeri

$$AOFP = \frac{(\bar{p} - 14.7)}{A} \quad (\text{lt/s}) \quad (6)$$

eşitliğinden hesaplanır.

Burada önemle vurgulanması gereken, Denklem 5 veya 6'dan hesaplanacak kuyu AOFP değerinin, kuyudan elde edilecek maksimum üretim debisi anlamına gelmediğidir. Daha öncede değinildiği gibi kuyudan elde edilecek maksimum debi, kuyu dibinden, kuyu başına ve hatta kuyu başından separatöre kadar koşulları göz önünde buldurularak belirlenmektedir. Kuyu dibi akış basıncının atmosfer basıncına düşmesinin mümkün olmaması ve kuyu içinde iki faz durumlarının oluşması teorik AOFP değerine ulaşamamasının temel nedenleri arasındadır. Ayrıca, vurgulanması gereken diğer önemli bir nokta da, burada rezervuar ortalama basıncının zamanla ve/veya zar faktörü değişimi söz konusu olduğunda ki, bu genelde sahada üretim aktivitesi durumunda her zaman geçerlidir. AOFP değerleri zamanla değişkenlik (azalış) gösterebilir.

Hem türbülanslı hem de türbülansız tek fazlı sıvı akış durumlarında yüzey debisi ile kuyu dibi akış basıncı ilişkisi verimlilik indeksi PI cinsinden de ifade edilebilir ve bu durumda Denklem 3 geçerlidir. Ancak türbülanslı akış koşullarında, yukarıda değinildiği gibi PI, yüzey debisine bağlıdır; debi arttıkça PI azalır. Türbülanslı akış koşullarında, rezervuar kalınlığı boyunca üretime açık bir düşey kuyu için PI, kayaç ve akışkan özellikleri bakımından, aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$PI = \frac{kh}{\mu \left[\ln \left(\frac{4A}{1.78C_A r_w^2} \right)^{1/2} + s + Dq_{sc} \right]} \quad (\text{lt/s/psi}) \quad (7)$$

Denklem 7'de k formasyonun geçirgenliğini, h formasyonun kalınlığını, A kuyu drenaj alanını, C_A kuyu/rezervuar geometrisine bağlı şekil faktörünü [2], s mekanik zar faktörünü, D türbülans (Non-Darcy) akış katsayısını, μ akışkanın akma viskozitesini ve r_w is üretim zonundaki kuyu yarı çapını temsil etmektedir. Türbülanslı akışın olmadığı durumlarda, Denklem 7'de $D = 0$ 'dır ve bu durumda verimlilik indeksi PI debiden bağımsız olur:

$$PI = \frac{kh}{\mu \left[\ln \left(\frac{4A}{1.78C_A r_w^2} \right)^{1/2} + s \right]} \quad (\text{lt/s/psi}) \quad (8)$$

Denklem 7, Denklem 3'de yerine konularsa ve sonuçta elde edilen denklem Denklem 4 ile kıyaslanırsa, Denklem 4'deki A ve B sabitleri, homojen bir rezervuar kalınlığı boyunca üretime açık bir düşey kuyu için kayaç ve akışkan özellikleri cinsinden aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir:

$$A = \frac{\mu}{kh} \left[\ln \left(\frac{4A}{1.78C_A r_w^2} \right)^{1/2} + s \right] \quad (\text{lt/s/psi}) \quad (9)$$

ve

$$B = \frac{\mu}{kh} D. \quad (\text{lt/s/psi}) \quad (10)$$

Denklem 9 ve 10'dan açıkça görüleceği gibi, kuyunun IPR performans eğrisi kayaç/akışkan özellikleri, kuyu tamamlama ve geometrisi ile ilgili parametrelere, türbülans akış katsayısı D 'ye ve belki de bunlardan da en önemlisi mekanik zar faktörü s 'ye oldukça bağımlıdır. Homojen olmayan rezervuarlar (doğal çatlaklı, tabakalı, vb) ve kısmi tamamlanmış kuyular için A ve B parametreleri için akışkan/kayaç/kuyu geometrisi özellikleri cinsinden verilen denklemler Denklem 9 ve 10 ile verilenlerden farklıdır [1-3] ve bu denklemler burada sunulmamaktadır.

Mekanik zar faktörü s , ilk olarak kuyu civarına yakın formasyon içinde çeşitli nedenlerle oluşabilen ve kuyu verimliliğini olumsuz yönde etkileyen formasyon hasarını niceliksel olarak tanımlamak için ortaya atılmış bir kavramdır. Sondaj çamur sıvısı ve katı maddelerinin formasyonu kirletmesi, kuyu civarında çeşitli katı madde çökmesi (CaCO_3 gibi), üretimle birlikte küçük taneli ("fines") malzemenin kuyu civarı formasyonda birikmesi (migration), kuyu civarı hasarın oluşmasına ve kuyu verimliliğinin düşmesine neden olur. Bu kavram daha sonra, kuyu civarında geçirgenliği formasyonun geçirgenliğinden daha yüksek olan zonların (asitleme, hidrolik çatlatma veya kuyunun çatlak veya çatlaklarla kesildiği durumlar gibi) kuyu performansı üzerindeki etkisini modellemek için genişletilmiştir. Mekanik zar faktörü s 'nin sıfır'a eşit olması durumu ($s = 0$), ideal durumu, kuyu civarında hasarın olmadığı duruma karşılık gelir. $s > 0$ (yani zar faktörü pozitif) ise, hasarlı duruma; $s < 0$ (yani zar faktörü negatif) ise, kuyu civarında canlandırma veya geçirgenliği yüksek zonların olduğuna işaret eder. Mekanik zar faktörü değerinin bilinmesi, kuyu civarı durum hakkında bilgi edinilmesine ve hasar olması durumunda kuyunun üretimini artırmak için yapılacak canlandırma işleminin belirlenmesine yardımcı olur. Bazı durumlarda, kuyu civarında hasar beklenmediği halde, mekanik zar faktörü kuyu basınç testlerinden pozitif büyük bir sayı olarak hesaplanabilir. Bu büyük olasılıkla, (düşey bir kuyu için) kuyunun rezervuar kalınlığı boyunca kısmi tamamlanmasından dolayı kısmi üretim yaptığına işaret ediyor olabilir. Rezervuar kalınlığı boyunca kısmen üretime açık kuyularda, kısmi tamamlamadan dolayı ek geometrik zar faktörü oluşmaktadır ve geometrik zar faktörü rezervuar geçirgenliğindeki anizotropi oranı ve kısmi üretime açık aralığın rezervuar kalınlığına oranına bağlı olarak değişmektedir [1-3].

Şekil 3 ve 4'de gösterilen verimlik testleri, kuyunun performansı hakkında genel bir fikir vermekle beraber ve IPR eğrisinin oluşturulmasında faydalı olmakla birlikte, verimlik parametreleri A ve B (bkz Denklem 4, 9 ve 10) üzerinde etkili olan akışkan/kayaç parametrelerin, örneğin geçirgenlik ve zar faktörü s 'nin bireysel değerini belirlenmesine pek olanak tanımaz. Bunun da nedeni, IPR eğrisi, sadece Şekil 3 ve 4'de gösterilen "dengelenmiş" kuyu dibi basınç değerlerinin kullanılmasıyla oluşturulur ve bu oluşturulan IPR eğrisinden sadece A ve B parametrelerinin değerlerinin belirlenmesi verimlilik testlerinde esas amaçtır. Bu nedenle, verimliliği etkileyen parametrelerin bireysel değerlerini belirleyeceğimiz kararsız akış testlerine ihtiyacımız vardır. Aslında, Şekil 3 ve 4'de gösterildiği şekliyle, basınçların her akış ve kapama dönemlerinde zamanla sürekli kaydedildiği durumlarda, Şekil 3 ve 4'de gösterilen testler kararsız çok-debili testlere örnek teşkil eder. Her akış ve kapama dönemine ait basınç-zaman verilerinin uygun şekilde analizi ile A ve B parametrelerine ek olarak bu parametreleri kontrol eden akışkan/kayaç/zar faktörü parametrelerine ait bireysel parametre değerleri belirlenebilir. Daha öncede değinildiği gibi, bu kayaç/akışkan/zar faktörü parametrelerinin bireysel değerleri, rezervuar modelleme ve performans tahmini çalışmalarında kullanılacak modellerde giriş verileri olarak gerekli olmaktadır.

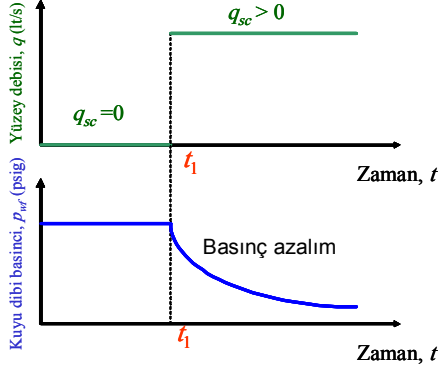
3.1.2. Kararsız Kuyu Basınç Test Tipleri

En temel kararsız kuyu basınç testi, basınç azalım testi ("drawdown") dir. Şekil 6'da gösterildiği gibi, bu testlerde kuyuda üretime geçmeden önce, belirli bir süre beklenerek basınç algılayıcısının indirildiği kuyu dibi derinliğinde kuyu dibi statik basıncının dengeye ulaşması beklenir. Denge durumuna ulaşıldıktan sonra, kuyuda kontrollü olarak belirli bir süre kuyu ideal olarak sabit bir yüzey debisinde üretilir ve bu üretim sırasında kuyu dibinde basınç sürekli olarak kaydedilerek analiz için basınç-zaman sinyali elde edilir.

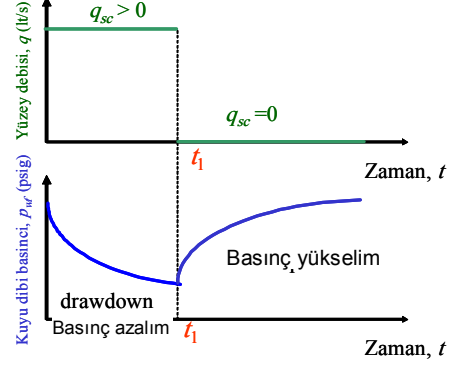
Şekil 7'de ise, basınç yükselim ("buildup") testine ait tipik debi/basınç-zaman eğrilerinin şematik gösterimi sunulmaktadır. Kuyu testleri analizinde akış rejimleri ve parametre belirlemeleri, üretim dönemi (azalım) aktivitelerinden daha az etkilendiği için genellikle basınç yükselim dönemine ait basınç ve basınç-türev sinyalleri üzerinde yapılır. Bu nedenle, jeotermal sahalarda tasarlanacak kuyu basınç testlerinde, sadece basınç azalım testleri ile yetinmeyip üretim dönemini müteakip en az üretim dönemi süresi kadar uzun süreli bir basınç yükselim testinin de uygulanması düşünülmelidir.

Şekil 8'de, enjeksiyon/basınç düşüm ("injection/falloff") testine ait tipik debi/basınç-zaman eğrilerinin şematik gösterimi sunulmaktadır. Bu testler genellikle enjeksiyon kuyularının verimliliğini ve enjekte

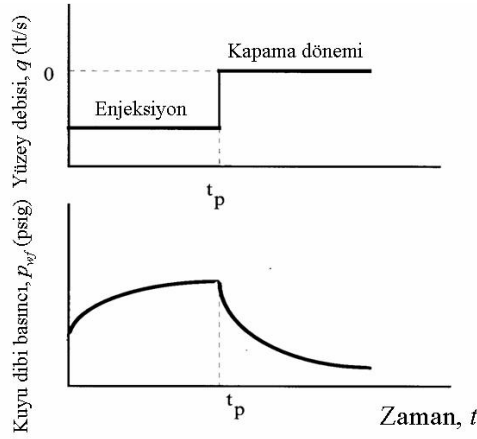
edilen daha ılık suyun rezervuar içersindeki yayılımını (cephesini) belirlemek için yapılmaktadır. Bu testlerin analizi, Şekil 6 ve 7'de gösterilen basınç azalım/yükselim testlerine göre biraz daha karmaşıktır. Çünkü enjekte edilen "ılık" re-enjeksiyon suyunun iletkenliği (k/μ) ile rezervuardaki sıcak suyun iletkenliği farklıdır ve analizde bu iletkenlik farkının kuyu dibi akış basıncı üzerinde meydana getirdiği etkilerin analizde dikkate alınması gerekir.



Şekil 6. Basınç azalım ("drawdown") testi

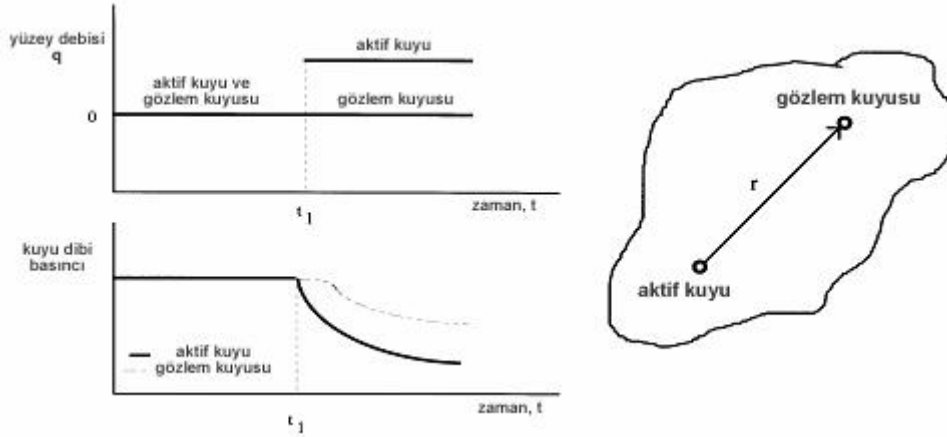


Şekil 7. Basınç yükselim ("buildup") testi.



Şekil 8. Enjeksiyon/basınç düşüm ("injection/falloff") testi.

Şekil 8'de gösterilen testler, tek kuyu kullanımı ile yapılan testlerdir. Test sırasında birden fazla kuyunun kullanıldığı girişim testlerinde amaç ise, kuyular arası hidrolik iletişimin olup olmadığı ve kuyular arası geçirgenlik/gözeneklilik sıkıştırılabilirlik değerlerinin belirlenmesidir. Tek kuyulu testlerde, gözeneklilik-sıkıştırılabilirlik (ϕc_f) değeri zar faktöründen bağımsız olarak belirlenemediği için, girişim testleri bu önemli parametrenin bireysel değerinin belirlenmesine olanak sağladığı için jeotermal sahalarda düşünülmesi gereken bir test tipidir. Şekil 9'da iki kuyulu girişim testine ait tipik debi/kuyu dibi basınç-zaman sinyali gösterilmektedir. Girişim testlerinde, üretim aktivitesinin olduğu kuyu aktif kuyu ("active well"), test sırasında üretim aktivitesinin olmadığı ve kuyu dibinde basıncın zamanın fonksiyonu olarak kaydedildiği kuyu ise gözlem kuyusu ("observation well") olarak isimlendirilir.



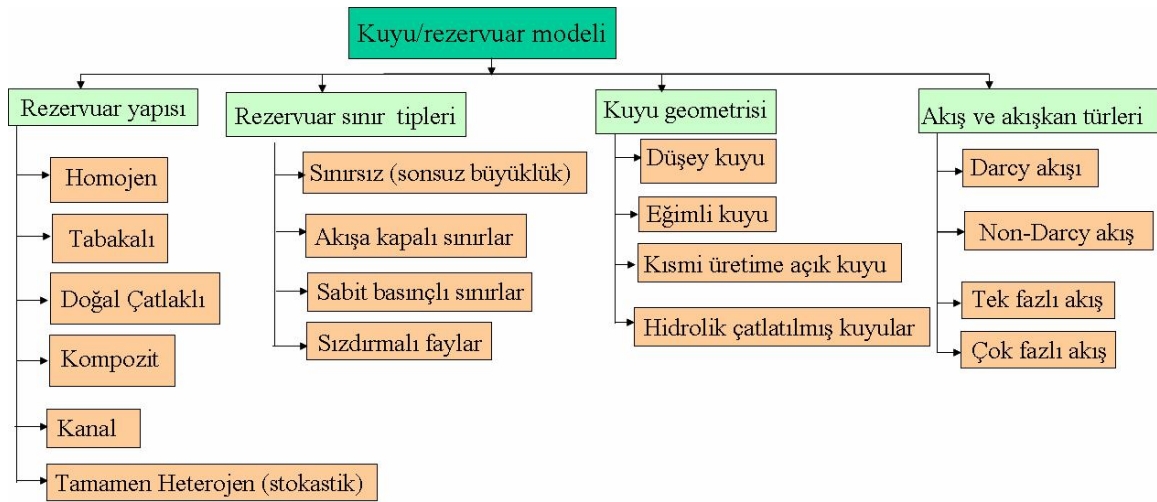
Şekil 9. İki kuyulu girişim testi.

Şekil 9'da gösterilen kararsız basınç testleri en temel basınç testleridir. Bu testlerin dışında, bazı özel amaçlara yönelik, Şekil 3 ve 4'de gösterilen çok-debili akış sonrası akış ve izokronal testler de kararsız basınç testleri olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2. Analizde Kullanılan Modeller

Daha önce belirtildiği gibi, kontrollü debi değişikliğine karşı test edilen sistemin tepkisi olarak kaydedilen kuyu dibi basınç-zaman sinyalinin (Şekil 9) analizi için bir matematiksel model (yorumlama modeli olarak da isimlendirilmektedir) gerekir. Kuyu basınç testleri analizinde, kuyu geometrisine, rezervuar yapısına ve sınır koşullarına, akış ve akışkan türüne bağlı olarak kullanılacak pek çok model mevcuttur (Tablo 1). Tüm modeller için çözümler, kütle korunumu prensibinden türetilen 2. dereceden diffüzyon kısmi diferansiyel denkleminin uygun başlangıç ve sınır koşulları altında analitik ya da sayısal yöntemler ile çözümlenmesiyle elde edilir.

Tablo 1. Kuyu basınç testi analizinde kullanılan modeller.



3.3. Basınç Ölçerler

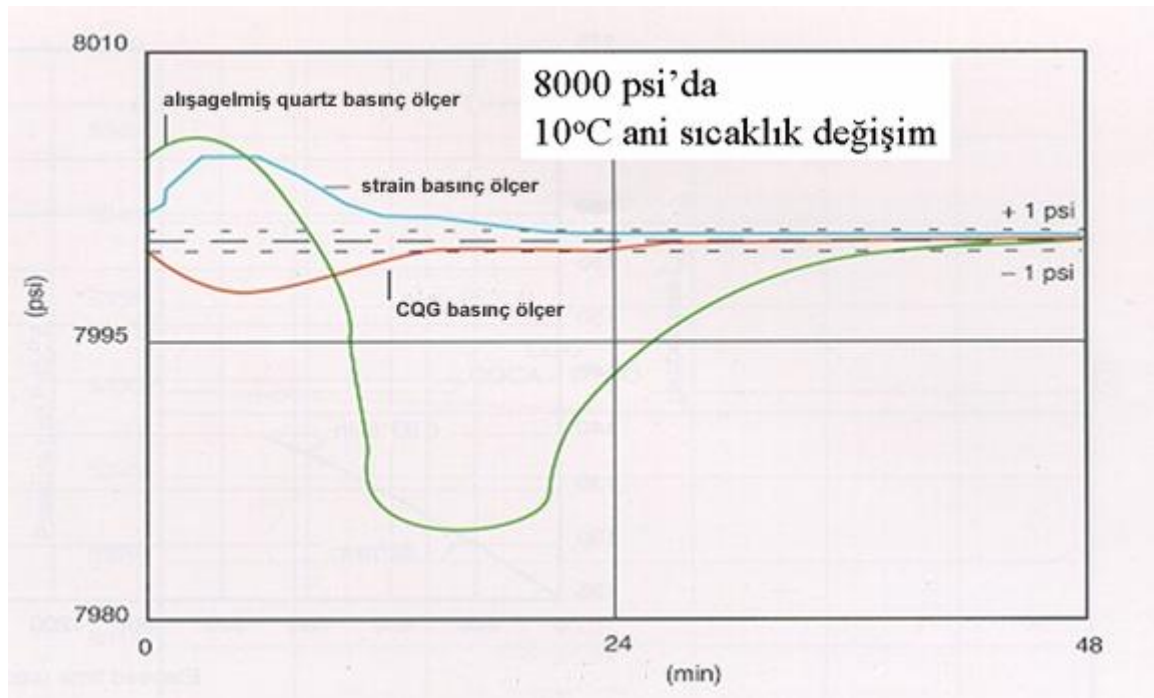
Basınç ölçerlerde ("gauge") son yıllarda çok önemli gelişmeler olmuştur. Basınç ölçümleri için kullanılacak basınç ölçerler arasında mekanik, elektronik strain, quartz gauge'ler mevcuttur. Elektronik ölçerler yardımıyla basınçlar artık çok uzun süreler (aylarca) ölçülmekte ve hafızada depolanabilmektedir. Hatta kuyu dibinde yapılan basınç ölçümleri, anında yüzeye iletilebilmekte ve mühendis, basınç değişimlerini anında izleyerek test süresini uzatıp kısaltabilmektedir.

Bir basınç ölçerin performansı üç önemli parametre ile değerlendirilmektedir:

- Çözünürlük ("Resolution")
- Hassasiyet veya Doğruluğu ("Accuracy")
- Ani basınç ve sıcaklık değişimlerine dinamik yanıt veya kararlılık ("Stability")

Çözünürlük, yaklaşık olarak basınç-ölçerin algılayabileceği en küçük basınç değişimi olarak tanımlanabilir. Bir basınç-ölçerin çözünürlüğü ne kadar küçük ise, basınç-ölçer o kadar küçük basınç değişimlerini algılayabilir. Jeotermal rezervuarlar, genelde kuvvetli beslenmeli ve yüksek geçirgenlikli çatlaklı/faylı yapılardan üretim yaptığından, çözünürlüğü düşük olan basınç-ölçerler testlerde tercih edilmelidir. Bu tür basınç-ölçerler kuyular arası mesafeden dolayı basınç değişiminin genelde tek kuyulu aktif kuyu testlerine göre az olduğu girişim testlerinde gözlem kuyularında kesinlikle kullanılmalıdır.

Hassasiyet ise, basınç-ölçerin verilen bir basınç değerini hangi doğrulukla okuduğu ile ilişkilidir. Hassasiyet ve çözünürlük birbiriyle ayrıca ilişkilidir ve basınç verilerini örnekleme aralığı çözünürlüğü ve hassasiyeti etkilemektedir. Günümüzdeki teknoloji ile basınçlar 1/3 saniye aralıklarla örneklenebilmektedir. Genelde basınçlar ölçülebilecek en küçük zaman aralıklarıyla kaydedilmeli ve daha sonra kullanılan basınç-ölçerin çözünürlüğüne bağlı olarak seçilecek örnekleme aralığına göre filtre edilmelidir. Çeşitli filtreleme teknikleri mevcuttur, ancak burada bu detaylara girilmeyecektir. Genelde önerilen 10 saniye örnekleme aralığıdır.



Şekil 10. Üç farklı basınç-ölçerin 8000 psi'da ani 10 °C'lık sıcaklık değişimindeki kararlılıkları [7].

Basınç-ölçerlerin bir diğer özelliği de, ani basınç ve sıcaklık değişimlerine karşı gösterdiği kararlılık ("stability") dir. Ani bir sıcaklık/basınç değişiminde, basınç-ölçerin ani değişim olmadan önce okuduğu basınç değerine dönmede gösterdiği kararlılık ne kadar kısa sürede gerçekleşiyorsa, basınç ölçer o kadar iyidir. Şekil 10'da üç farklı basınç-ölçerin; alışlagelmiş quartz, strain ve kristalli quartz basınç-ölçerlerin, mutlak 8000 psi'lik okuma yaparken sıcaklıkta meydana gelen ani 10 °C'lik ani değişime karşı gösterdikleri kararlılık gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, alışlagelmiş quartz ("conventional quartz") basınç-ölçer, yaklaşık 30 dakika'da kararlı hale gelirken, strain ve kristalli quartz ("CQG quartz") basınç ölçerler daha kısa sürede (yaklaşık 10 dakikada) kararlı hale gelmektedirler.

Eski teknoloji basınç ölçerler mekanik basınç ölçerlerdir (Amerada gauge'leri olarak da bilinir). Bourdon tüpü veya kalibre edilmiş yay ve piston kullanarak, basınç değişimlerini mekanik harekete çevirirler. Bu mekanik hareketler, bir metal levha üzerinde kaydedilir ve bu metal levhadan okumalar yapılır. Bu ölçerlerde hatalar genelde, kaydedici ile küçük ölçekli metal levha arasındaki sürtünmeden ve okumadan kaynaklanır. 14.7-10,000 psi'lik aralıklı basınç elementi ile bu tür ölçerlerle basınçlar ± 25 psi doğruluk ve ± 1 ile ± 5 psi arasında değişen çözünürlükle okunabilmektedir. Çözünürlükleri oldukça düşük olduğundan genelde beslenmeli ve yüksek geçirgenlikli sistemlerdeki testlerde kullanımı tercih edilmeyecek basınç ölçerlerdir.

Son yıllarda yaygın olarak kullanılan elektronik basınç ölçerlerde, kaydediciye bağlantı mekanik olmak yerine elektrondur. Basıncı algılayan element, bourdon tüpü (eski tiplerde, Sperry Sun) veya strain (yeni tiplerinde, strain gauge, tek kristalli) olabilmektedir. Bu ölçerlerle 14.7-10,000 psi'lik aralıklı basınç elementi ile, basınçlar ± 5 psi doğruluk ve $\pm 0,1$ ile ± 0.01 psi arasında değişen çözünürlükle okunabilmektedir. Görüldüğü gibi bu ölçerlerin çözünürlüğü mekanik ölçerlere göre çok daha iyidir. En son teknoloji quartz basınç ölçerlerde, basıncı algılayıcı elementler olarak hareketli iki adet kristal quartz kullanılmaktadır. Bu kristallerden biri sadece kuyu içindeki sıcaklığı ölçer. Ancak, bu ölçerler ani sıcaklık ve basınç değişimlerine, strain ölçerler kadar hızlı dinamik yanıt verememektedirler. Ancak bu yönleri geliştirilmiş sürümleri de mevcuttur. Bu ölçerlerle 14.7-10,000 psi'lik aralıklı basınç elementi ile, basınçlar ± 1.0 psi doğruluk ve ± 0.01 ile 0.001 psi arasında değişen çözünürlükle okunabilmektedir. Çeşitli kuyu dibi basınç ölçerler ve onlara ait özellikler (hassasiyet, çözünürlük, çalışma sıcaklıkları vb.) Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Kuyu basınç testi analizinde kullanılan çeşitli kuyu dibi basınç-ölçerler ve özellikleri [8].

Firma ve Model	Algılayıcı Tipi	Kayıt Modu	Hassasiyet	Çözünürlük	Çalışma Sıcaklığı (°F)	Çalışma Basıncı (psi)
Geophysical Research Corporation (Amerada) RPG – 3, 4 and 5	Bourdon Tüpü	Mekanik, Kuyu Dibi	0.25	0.05 %	300, std 600, high	500 – 25,000
Kuster KPG K – 2, 3 and 4	Bourdon Tüpü	Mekanik, Kuyu Dibi	0.25	0.05 %	300, std 600, high 400	800 – 22,000
Johnston J – 200	Körüklü	Mekanik, Kuyu Dibi	0.25	0.005 %	300 – 350	1600 – 20,000
Sperry Sun MRPG	Strain Ölçer	Manyetik, Kuyu Dibi	0.05	0.005 %	300	1000 – 10,000
Johnston J – 300	Strain Ölçer	Dijital, Kuyu Dibi	0.10	0.02 psi	300 – 350	10,000
Geoph. Res. Corp. EPG – 512 / 520	Değişken Kapasitör	Elektronik, Yüzey ya da Kuyu Dibi	0.10	0.002 % / 0.02 psi	300	2500 – 15,000
Hewlett Packard HP – 2811B	Salınlı Quartz Kristal	Elektronik, Yüzey ya da Kuyu Dibi	0.025	0.01 psi	300	10,000
Flopetrol SSDR	Strain Ölçer	Dijital, Kuyu Dibi	0.05	0.02 psi	300	10,000
Flopetrol SSDR	Salınlı Quartz Kristal	Dijital, Kuyu Dibi	0.035	0.01 psi	300	10,000
Flopetrol CRG	Salınlı Quartz Kristal	Elektronik, Yüzey	0.035	0.01 psi	300	10,000
Panex Corporation 1420	Değişken Kapasitör	Elektronik, Yüzey	0.07	0.0001 %	350	500 – 15,000
Squire – Whitehouse 6800	Değişken Kapasitör	Elektronik, Yüzey ya da Kuyu Dibi	0.025	0.01 psi	350	15,000

4. KUYU TESTLERİ ANALİZİ

Kuyu testi analizleri üç adımlı bir işlemdir:

1. Adım 1: Yorumlama modelinin belirlenmesi (veya model tanıma)
2. Adım 2: Model parametrelerinin belirlenmesi
3. Adım 3: Elde edilen sonuçların uygunluğunun ve doğruluğunun irdelenmesi

4.1. Model Tanıma

1980'li yıllardaki çalışmalar basınç-türev eğrilerinin model ve akış rejimlerini tanımayı ve analizi önemli ölçüde kolaylaştırdığını ve analizlerde güvenilirliği artırdığını göstermiştir [9,10]. Basınç-türev fonksiyonunun kullanımının getirdiği en önemli avantaj, basınç türev fonksiyonunun rezervuar/kuyu sisteminin basınç üzerinde meydana getirdiği değişimlerin türev eğrisinde çok daha belirgin olarak gözlemlenmesindedir. Bu nedenle, kuyu basınç testleri analizinde, basınç'a ilave olarak basınç-türev eğrilerinin kullanımı standart bir araç olmuştur.

Basınç-türev fonksiyonu, kaydedilmiş kuyu dibi basıncının (veya sabit bir basınç değeri; basınç azalım testlerinde ilk basınç, basınç yükselim testlerinde ise kapama anındaki kuyu dibi akış basıncı, referans alınarak oluşturulan basınç değişiminin) zamanın doğal logaritmasına göre türevi olarak tanımlanır:

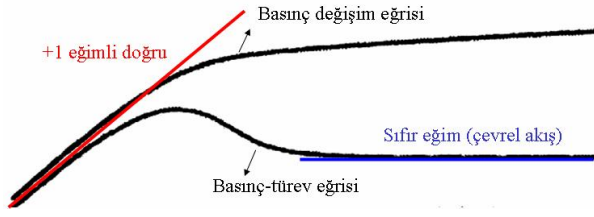
$$\Delta p' = \frac{d\Delta p}{d\ln(t)} = \frac{d(p_i - p_{wf}(t))}{d\ln(t)} = t \frac{d(p_i - p_{wf}(t))}{dt} = -t \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (\text{psi}) \quad (11)$$

Doğal logaritma t 'ye göre türev alınmasının iki temel nedeni vardır: Birincisi doğal logaritmaya göre türev alındığında, basınç-türev fonksiyonunun fiziksel birimi basıncın birimiyle (örneğin psi, bar, vs) ile aynı olur. İkincisi ise, kuyuya çevrel akışın ("radial flow") olduğu durumlarda, basınç (veya basınç değişimi) zamanın doğal logaritması ile değiştiğinden, bu akış rejimi döneminde basınç-türev eğrisi sabit bir değer alır:

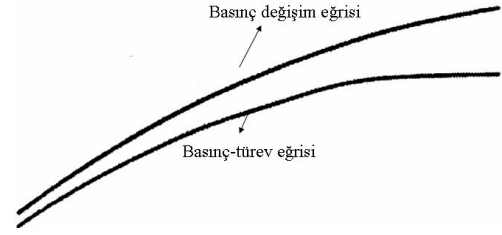
$$\Delta p' = \frac{q\mu}{kh} = \text{sabit} \quad (\text{psi}) \quad (12)$$

Burada q , kuyu yüzey debisini (lt/s) temsil etmektedir. Basınç-türev fonksiyonunun test zamanı t 'ye karşı log-log grafiğinde çevrel akış dönemi sıfır eğimli bir doğru ile tanınır (Şekil 11). Test sırasında çevrel akış dışında gözlemlenecek diğer olası akış rejimlerinin basınç-türev eğrisinin test zamanı t 'ye karşı log-log grafiğinde nasıl tanınacağına dair gösterimler Şekil 12-16'da sunulmaktadır. Erken zamanlarda gözlemlenen kuyu içi depolaması etkiler basınç/zaman ve basınç-türev/zaman log-log grafiklerinde +1 eğimli doğru ile tanınır (Şekil 11). Geç zamanlarda kuyuya yakın beslenmeli bir sınır ya da fay kendini basınç-türev/zaman log-log grafiğinde -1 eğimli doğru ile gösterir (Şekil 16). Diğer akış rejim ve modellerine ait basınç değişim ve basınç-türev eğrisi log-log grafiği davranışları Şekil 12-15'de gösterilmiştir.

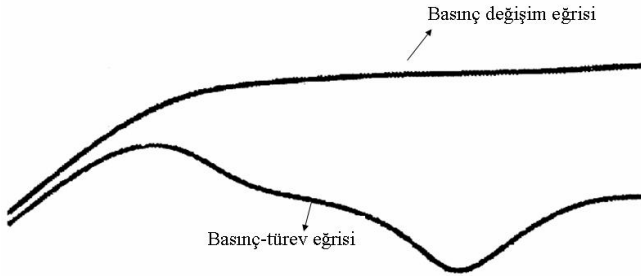
Basınç-türev verisi, ölçülmüş basınç verilerine sayısal türevleme işlemi uygulanması ile edilir. Bu nedenle, ölçülmüş basınç verilerinin kaliteli olmadığı durumlarda, basınç üzerindeki gürültülerden dolayı basınç-türev verileri büyük saçılımlar gösterebilir ve bu da model ve akış rejimlerini tanımayı ve analizi güçleştirebilir. Böyle durumlarda, düzgünleştirme ("smoothing") tekniklerine başvurulmalıdır [11].



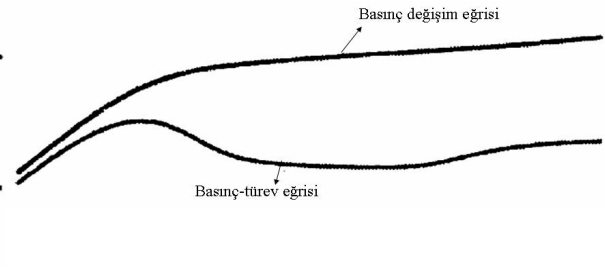
Şekil 11. Kuyu içi depolama/zar faktörü etkileri altında üretim yapan düşey kuyu/sonsuz büyüklükte rezervuar modeli basınç değişim ve basınç-türev/zaman log-log grafiği davranışları.



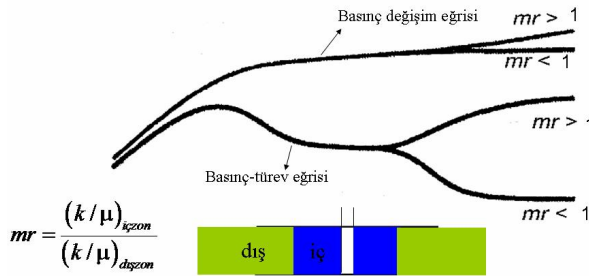
Şekil 12. Çatlakla kesilmiş düşey bir kuyunun basınç değişim ve basınç-türev eğrisi log-log grafiği davranışları.



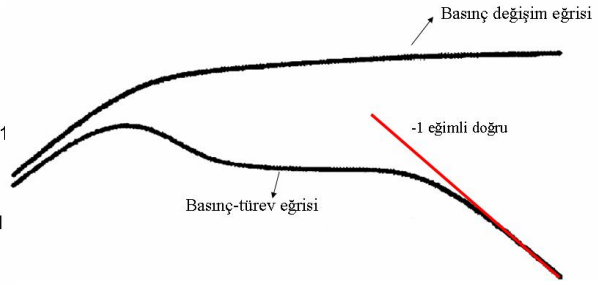
Şekil 13. Çift gözenekli/geçirgenlikli rezervuar modeline ait basınç değişim ve basınç-türev eğrisi log-log grafiği davranışları.



Şekil 14. Akışa kapalı bir fay yakınında bir kuyu modeline ait basınç değişim ve basınç-türev eğrisi log-log grafiği davranışları.



Şekil 15. Lineer kompozit rezervuar modeline ait basınç değişim ve basınç-türev eğrisi log-log grafiği davranışları (mr iletkenlik oranıdır).



Şekil 16. Beslenmeli bir sınır ya da yüksek iletkenlikli bir fay yakınında kuyu modeli basınç-türev/zaman log-log grafiği davranışları.

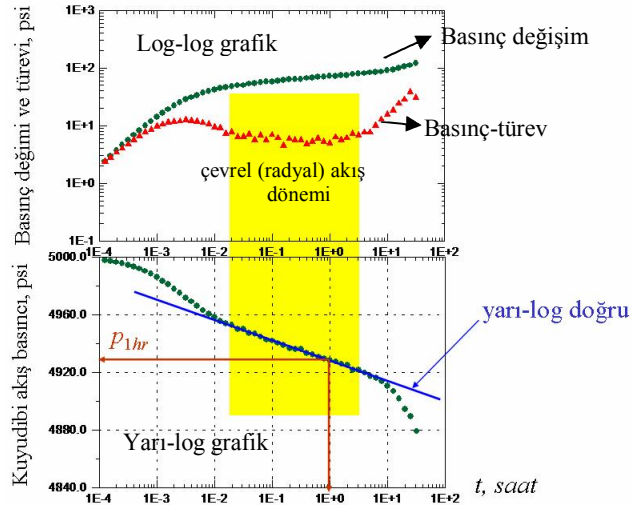
4.2. Model Parametrelerinin Değerlerinin Belirlenmesi

Eldeki jeolojik ve jeofizik veriler ile uyumlu ve basınç-türev eğrisince tanınmış olası yorumlama modeli (veya modelleri) belirlendiğinde, kuyu testleri analizinde ikinci adım modeldeki parametre (geçirgenlik, gözeneklilik-sıkıştırılabilirlik çarpımı, zar faktörü, vb) değerlerinin belirlenmesidir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, göz önünde bulundurulmuş sistem için geçerli olacak bir modelden aynı debi-zaman giriş verisine karşı elde edilen basınç-zaman çıktısı (Ω_M) ile gerçek sistem çıktısının (Ω_S) "en iyi çakışmasını" sağlayacak şekilde model parametre değerleri tahmin edilir. Parametre tahmininde üç farklı yöntem mevcuttur. Ancak bu yöntemler genelde birbirlerini bütünleyici olarak da kullanılmaktadır. Bu yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Grafiksnel doğru analiz yöntemleri
2. Manüel (elle) eğri çakıştırma yöntemleri
3. Bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma yöntemleri

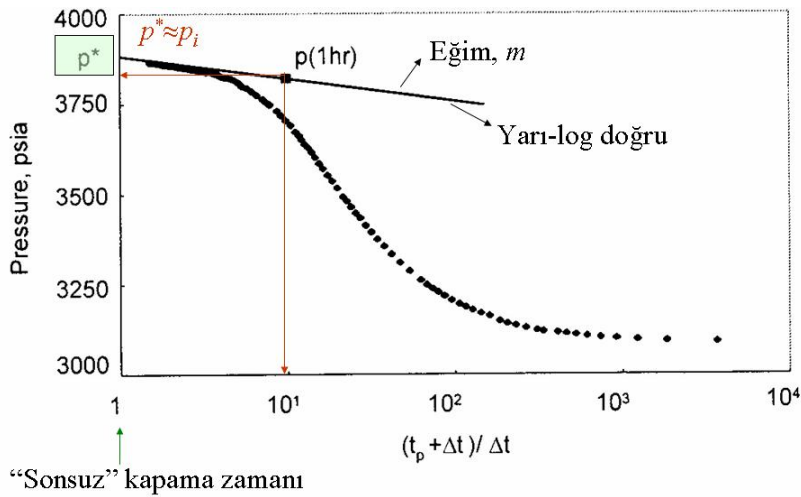
4.2.1. Grafiksel Doğru Analiz Yöntemleri

Bu yöntem, basınç değişim ve basınç-türev log-log grafiğinde model ve akış rejimleri belirlendikten sonra uygulanır. Daha sonra da, basınç/zaman veya basınç-türev/zaman verilerinin log-log grafiğinde tanınan akış rejimleri (kuyu içi depolama, radyal akış, lineer akış, küresel akış, vs.) kısımlarına, uygun grafik kağıtlarında (log-log, yarı-log, Kartezyen, vs.) çizilen doğruların eğimlerinden ve eksenini kestiği noktalardan, bu akış rejimlerini tanımlayan parametrelere ait değerleri hesaplanır. Bu analiz yöntemlerinden en çok bilineni basınç-zaman yarı-log (örneğin basınç yükselme testleri için Horner grafiği) doğru analiz yöntemidir (Şekil 17).



Şekil 17. Yarı-log doğru analizi.

Şekil 18'de basınç yükselme testlerinde kullanılan Horner yarı-log doğru analizine ait şematik gösterim ile sunulmaktadır. Şekil 18'de t_p kapama öncesi üretim zamanını, Δt ise kapama anından itibaren ölçülen zamanı temsil eder.



Şekil 18. Horner yarı-log doğru grafiği.

Şekil 17 veya 18'de gösterilen yarı-log doğruların eğimi m den geçirgenlik-kalınlık çarpımı, eksen $t = 1$ saat değerinden ise zar faktörü, s değerleri hesaplanır:

$$kh = \frac{q\mu}{|m|} \quad (\text{Darcy-m}) \quad (13)$$

ve zar faktörü s

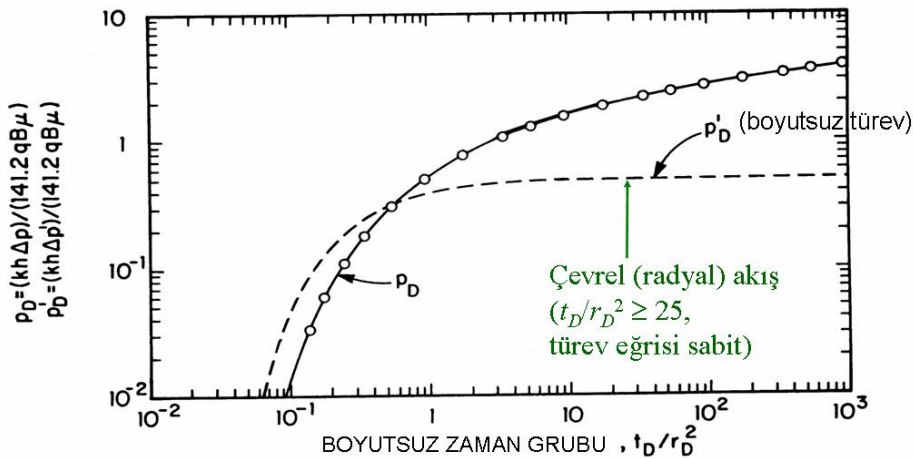
$$s = 1.151 \left[\frac{p_{1h} - p_{wf,s}}{|m|} - \log \left(\frac{kh}{\phi c_t h r_w^2} \right) + 3.23 \right] \quad (\text{birimsiz}) \quad (14)$$

Kuyu içi depolaması, faya olan uzaklıkların hesaplanabileceği grafiksel doğru analiz yöntemleri de mevcuttur, ancak burada bu detaylara girilmeyecektir. Kaynaklar [1-3]'de bu analiz yöntemlerine ait detaylar bulunabilir.

4.2.2. Manüel (Elle) Eğri Çakıştırma Yöntemleri

Önce çeşitli modeller için boyutsuz kavramlar (boyutsuz basınç, zaman, uzunluk, vs.) kullanılarak oluşturulan eğri abaklarında (genellikle log-log grafikler üzerinde) temsil edilen model boyutsuz basınç değişimi/boyutsuz zaman ve basınç türev/boyutsuz zaman eğrilerine saha basınç değişimi/zaman ve basınç-türev/zaman verilerini elle çakıştırma işlemiyle bağdaştırıp, model parametrelerini tahmin etme esasına dayanır.

Şekil 19'da homojen "sonsuz" büyüklükte rezervuar modeli için geliştirilmiş olan ve girişim testi basınç ve basınç-türev verilerinden geçirgenlik-kalınlık (kh) ve gözeneklilik-sıkıştırılabilirlik-kalınlık ($\phi c_t h$) değerlerinin hesaplanmasında kullanılan eğri abağı (Theis çizgi kaynak eğri abağı olarak da bilinir) sunulmaktadır.



Şekil 19. Girişim testi analizleri için Theis eğri abağı.

Şekil 19'da kullanılan boyutsuz basınç, türev, zaman ve uzaklık grupları sırasıyla aşağıdaki denklemler ile tanımlanmaktadır:

$$p_D = \frac{kh[p_i - p(r, t)]}{q\mu} = \frac{kh\Delta p}{q\mu} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (15)$$

$$p'_D = \frac{kh[p_i - p(r, t)]'}{q\mu} = \frac{kh\Delta p'}{q\mu} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (16)$$

$$t_D = \frac{(kh)t}{(\phi c_t h)\mu r_w^2} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (17)$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (18)$$

Burada $p(r, t)$, aktif kuyudan r kadar uzaklıkta olan gözlem kuyusunda ölçülen kuyu dibi akış basıncını, r iki kuyu arasındaki mesafeyi (bkz Şekil 9) temsil etmektedir. q ise aktif kuyuda test süresince uygulanan sabit yüzey üretim debisidir. p_i , test öncesindeki gözlem kuyusundaki statik basıncı, r_w ise aktif kuyu yarıçapını temsil etmektedir.

Aydinger kâğıdı üzerine Şekil 19'da verilen eğri abağının düşey ve yatay eksenleri temel alınarak çizilen saha basınç değişim ve türev/zaman verilerinin eğri abağının düşey ve yatay eksenlerine paralel olarak kaydırma işlemiyle yapılan çakıştırma sonrasında, belirlenen basınç (veya türev) ve zaman çakışma noktaları Denklem 15 (veya 16) ve Denklem 17'de kullanılarak, kh ve $\phi c_t h$ değerleri aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır:

$$kh = q\mu \frac{(p_D)_C}{(\Delta p)_C} \quad (\text{Darcy-m}) \quad (19)$$

$$\phi c_t h = \frac{(kh)}{\mu} \frac{(t)_C}{(t_D / r_D^2)_C} \quad (\text{m/psi}) \quad (20)$$

Denklem 19 ve 20'de alt indis C , çakışma noktası için kullanılmıştır.

Diğer kuyu/rezervuar modelleri için de literatürde geliştirilmiş eğri abakları mevcuttur [1-3]. Grafikselsel doğru ve manüel eğri çakıştırma yöntemlerinin en önemli dezavantajı, sabit yüzey debili testler için geliştirilmiş olmalarıdır. Test sırasında debinin değiştiği durumlarda (örneğin Şekil 3 ve 4'de verilen değişken çok-debili testlerde olduğu gibi), kullanımlarının zor ve sınırlı olmasındandır. Bu yöntemlerden daha genel; test sırasındaki debi değişikliklerinin süperpozisyon yöntemiyle hesaba katılmasına olanak sağlayan, elle yapılan çakıştırmada meydana gelen sübjektiviteyi elemine eden, elde edilen parametrelerin istatistiksel değerlendirilmesine ve güvenilirliğinin incelenmesine olanak tanıyan, bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma yöntemleri son yıllarda modern kuyu testleri analizinde temel araç haline gelmiştir. İzleyen alt bölümde bu yöntem anlatılmaktadır.

4.2.3. Bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma yöntemleri

Bu yöntem, parametre tahmininde en küçük kareler yöntemini esas alır. Model basınç-zaman (ve/veya türev-zaman) verilerinin ölçülmüş saha basınç-zaman (ve/veya türev-zaman) verilerinin bilgisayar

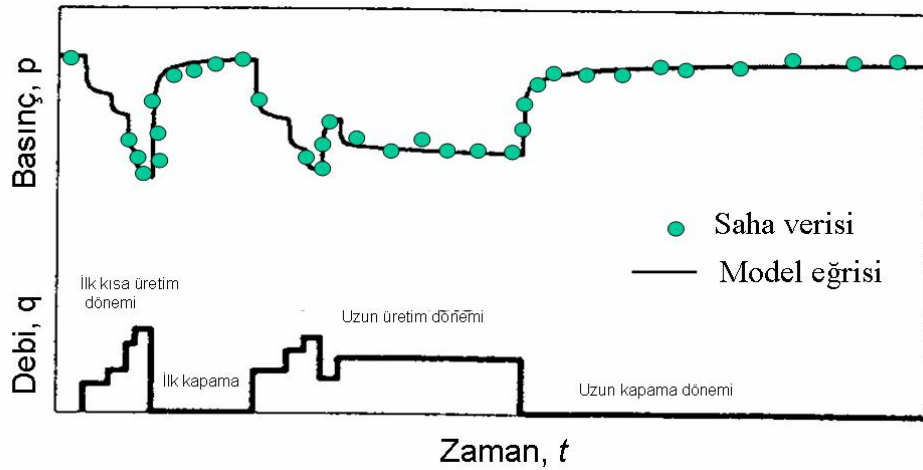
destekli çakıştırılması (şekil 20) aşağıda tanımlanan hedef fonksiyon J 'nin bilinmeyen model parametre vektörü $\vec{\chi}$ 'e göre minimize edilmesiyle gerçekleştirilir:

$$J(\vec{\chi}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{p_{\text{ölüm},i} - p_{\text{model}}(t_i, \vec{\chi})}{\sigma_i} \right]^2 \quad (\text{birimsiz}) \quad (21)$$

Burada $p_{\text{ölüm}}$, lmm basıncı verilerini, N akıştırmada kullanılacak toplam basıncı verisi sayısını, σ ise basıncı ölümü i 'deki hatanın standart sapmasını (psi cinsinden), t_i ise $p_{\text{ölüm},i}$ 'nn yapıldığı test zamanını, p_{model} ise modelden t_i zamanında hesaplanmış model basıncı değerini temsil eder. Debi değişimlerini de hesaba katacak şekilde genel olarak, verilen herhangi bir kuyu testi kuyu/rezervuar modeli için, model basıncı Duhamel ilkesinden elde edilen konvolüsyon entegral denkleminde hesaplanır:

$$p_{\text{model}}(t_i, \vec{\chi}) = p_i - \int_0^{t_i} q(\tau) \Delta p_{cu}(t_i - \tau) d\tau \quad (\text{psi}) \quad (22)$$

Burada q , test sırasında t_i zamanına kadar uygulanan yüzey debisini (lt/s) temsil eder. Δp_{cu} sembolü ise eğer kuyu t_i zamanına kadar 1 lt/s sabit yüzey debisi ile üretilirse, t_i zamanında elde edilecek model basıncı düşüm (psi) zmn temsil eder. Denklem 22, bilgisayarda sayısal entegral yöntemlerinin kullanılmasıyla hesaplanır.



şekil 20. Bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma rneği.

Kuyu testi modellerinde, basıncı ile model parametreleri arasındaki ilişki (Denklem 22) doğrusal değildir. Bu nedenle, Denklem 21'in uygulaması yineleme işlemine gerektirir ve bu yineleme işleminde model parametreleri için başlangıç değerleri grafiksel doğru analiz ve manüel eğri çakıştırma yöntemlerinden veya log, karot ve jeolojik verilerinden belirlenebilmektedir.

Daha öncede değinildiği gibi, Denklem 21'i temel alan doğrusal olmayan parametre tahmin yöntemi, elde edilen çakışmanın ve parametrelerin güvenilirliğini nicel olarak belirlemek için istatistiksel yöntemlerin (RMS, %95 güvenilirlik aralıkları, parametreler arası ilgileşim, vb.) parametre tahminine entegre edilmesine olanak tanımaktadır.

4.3. Elde Edilen Sonuçlarının Uygunluğunun ve Doğruluğunun İrdelenmesi

Kuyu testleri analizinin son aşamasıdır. Bölüm 3'de belirtildiği gibi, kuyu testleri analizi ters problem uygulamasına bir örnek teşkil eder. Bu nedenle, gerçek sistem davranışını yansıtan birden fazla

model, kullanılan yorumlama modeli doğru olsa bile farklı parametre setleri, aynı sistem çıktısını verebilir. Dolayısıyla, analizden elde edilen sonuçların farklı veri kaynaklarından (jeoloji, jeofizik, hidrojeoloji, jeokimya, kuyu log, karot) elde edilen bilgilerle tutarlılığının kontrol edilmesi gerekir. Kısmen bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma yöntemleri kullanıldığında bazı istatistiksel değerlendirmelerle uygun modeller ve hangi parametrelerinin test verilerinden daha güvenilir olduğu belirlenebilmektedir.

Örneğin, Bölüm 5’de sunulan Balçova-Narlıdere ve Afyon Ömer-Gecek jeotermal sahalarında yapılan bazı kuyu test verileri için birden fazla, farklı rezervuar modelleri uygun gözükmemektedir. Saha verilerini temsil edecek en uygun modelin belirlenmesinde ve dolayısıyla tutarlı sonuçların elde edilmesinde en uygun yaklaşım jeoloji, jeofizik, petrol ve doğal gaz mühendisliği arasında çok disiplinli sıkı bir işbirliği yapılmasıdır.

5. SAHA UYGULAMALARI

Bu bölümde, Türkiye’deki Afyon Ömer-Gecek ve Balçova-Narlıdere ve jeotermal sahalarında yapılan çeşitli kuyu basınç testlerine ait uygulamalar sunulmaktadır. Toplam dört uygulamanın sunulduğu bu bölümde, ilk uygulama Afyon Ömer-Gecek sahasında AF-16 kuyusunda yapılan çok-debili testi değerlendirmesine aittir. İkinci uygulama ise Afyon Ömer-Gecek sahası R-260 kuyusunda yapılan basınç azalım/yükselim testine ve üçüncü uygulama ise, yine bu sahada yapılan AF-21/R-260 kuyuları girişim testine aittir. Son uygulama ise, Balçova-Narlıdere sahasında yapılan bir enjeksiyon/falloff testi değerlendirmesine aittir.

5.1. Afyon Ömer-Gecek AF-16 Kuyusu Çok-Debili Testi

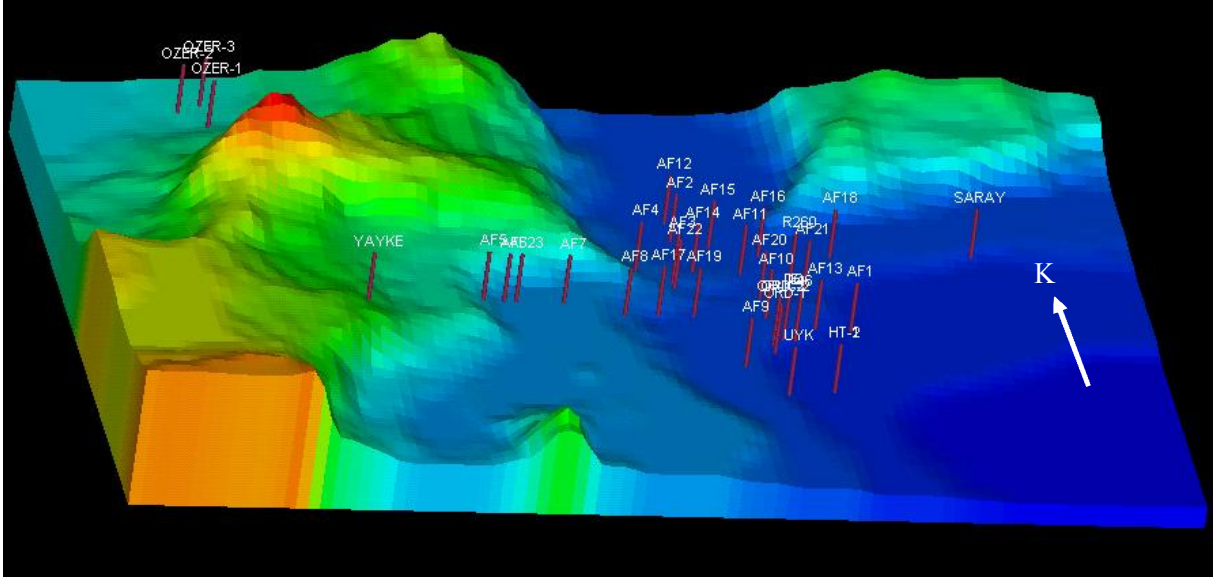
Bu alt bölümde İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği bölümünde konut ısıtma amaçlı kullanılan Ömer-Gecek jeotermal sahası AFJET projesi kapsamında [12], AF-16 kuyusunda yapılan çok-debili basınç/verimlilik testi sonuçları sunulmakta ve tartışılmaktadır. Daha öncede Bölüm 3.1.1’de belirtildiği gibi, çok-debili basınç/verimlilik testlerinin amaçlar arasında kuyuların kuyu dibi akış performansı (IPR) ilişkisini belirlemek yer alır.

AF-16 kuyusu 218 m derinliğe sahip, statik sıcaklığı 111.5 °C dir. AF-16 kuyusunun da gösterildiği Şekil 21’de Ömer-Gecek sahası kuyuları, sahadaki yerleşimleri, yüzey topografyası gösterilmektedir. İller Bankası quartz basınç algılayıcısı ile 174 m derinliğe inilerek vana kontrollü çok-debili test yapılmıştır. Teste ait basınç/debi-zaman davranışı Şekil 22’de verilmektedir. Debi değerleri savak ölçümlerinden buharlaşma düzeltmesi yapılarak hesaplanmıştır. Şekil 22’den görüldüğü gibi AF-16 kuyusunda 5 akış periyotlu (her akış dönemi yaklaşık 5 saattir) çok-debili akış sonrası akış testi yapılmıştır. En son akış periyodunun sonunda, yaklaşık 12,5 saatlik kapama (basınç yükselim) dönemi testte tasarlanmıştır. Her akış dönemi sonunda “dengelenmiş” kuyu dibi basınç verilerinin her akış dönemi yüzey debisine çizilmiş grafiği Şekil 23’de gösterilmektedir. Şekil 23’de gözlemlenen davranış, rezervuardan kuyuya olan akışın “türbülans” etkilendiğini göstermektedir. Denklem 4’ün ölçüm verilerine uydurulmasıyla elde edilen AF-16 kuyusu için IPR ilişkisini veren denklem (statik basınç veya ortalama basınç 236.73 psi, $A = 0.041 \text{ psi}/(\text{lt/s})$ ve $B = 0.00276 \text{ psi}/(\text{lt/s})^2$ olarak belirlenmiştir) aşağıda verilmektedir:

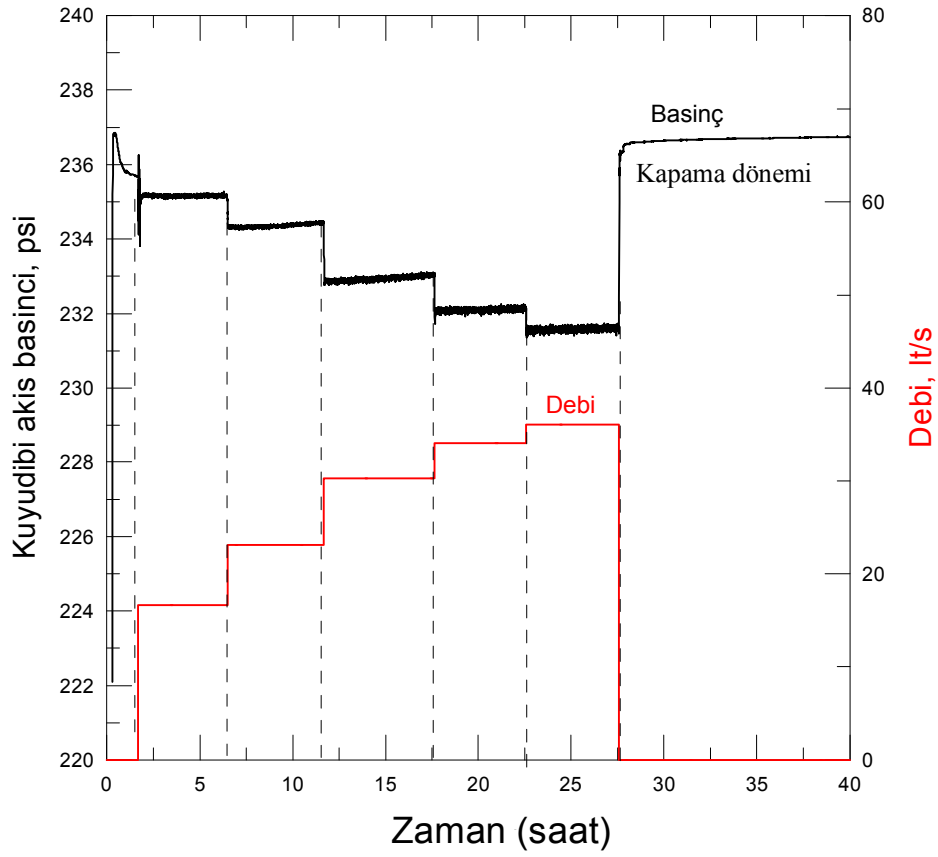
$$236.73 - p_{wf} = 0.041q + 0.00276q^2 \quad (\text{psi}) \quad (23)$$

veya

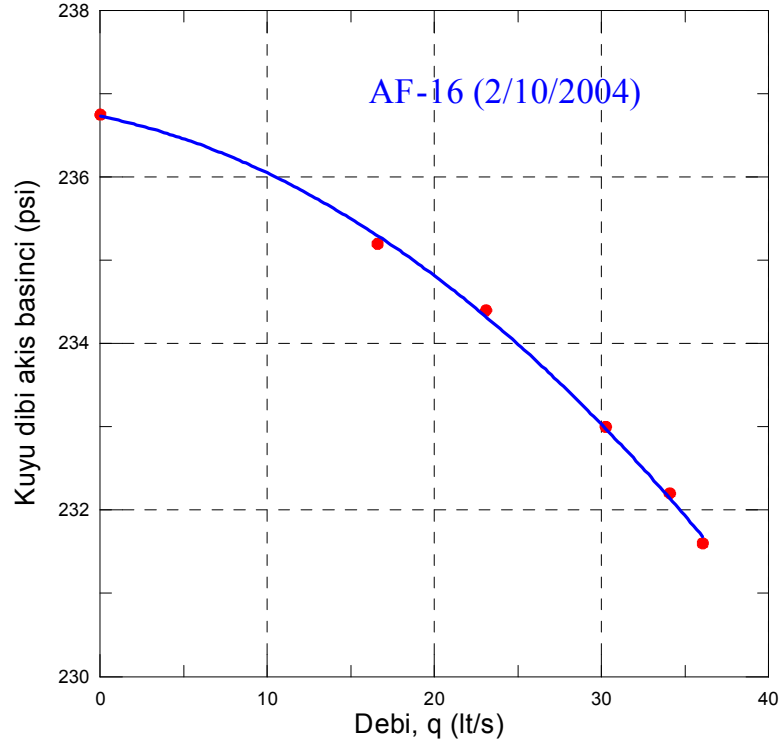
$$p_{wf} = 236.73 - 0.041q - 0.00276q^2 \quad (\text{psi}) \quad (24)$$



Şekil 21. Afyon Ömer-Gecek jeotermal sahası yüzey topografyası ve kuyuları.



Şekil 22. AF-16 çok-debili basiñç testine ait basiñç ve debi değişimi.



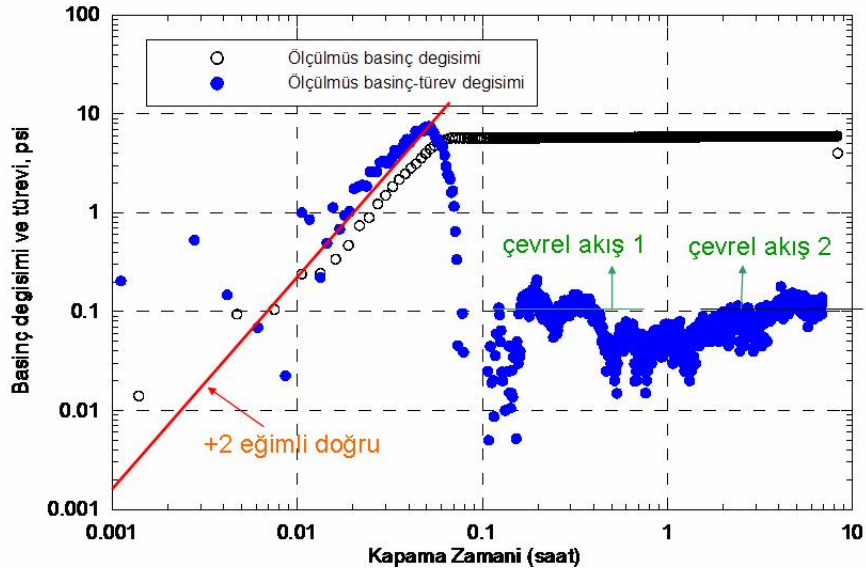
Şekil 23

Denklem 5'in uygulanmasıyla, AF-16 kuyusu için mutlak akış potansiyeli AOFP değeri 282 l/s olarak hesaplanmaktadır. Bu değer kuyunun oldukça üretken olduğuna işaret etmekle beraber, daha öncede değinildiği gibi AOFP değeri bu kuyudan uygulamada elde edilecek gerçek maksimum üretim debisi anlamına gelmemektedir. Kuyudan elde edilecek maksimum üretim debisi, kuyu dibinden (rezervuardan), kuyu başına ve kuyu başından separatöre kadar akış koşullarını göz önünde buldurularak ("nodal analiz" sonucunda) belirlenebilmektedir. Gerçekte AF-16 kuyusundan şuanda elde edilebilen maksimum debi 36 lt/s kadardır. Teorik değer olan AOFP'e ulaşamamasının 2 önemli nedeni vardır: (1) Kuyu dibi akış basıncının atmosfer basıncına düşmesi mümkün değildir, (2) jeotermal suda kütlece yaklaşık %0,3 civarında çözülmüş CO₂ bulunduğundan, kuyu içinde olası iki-faza geçiş olaylarından ve sürtünmeden dolayı ilave basınç kayıplarıdır.

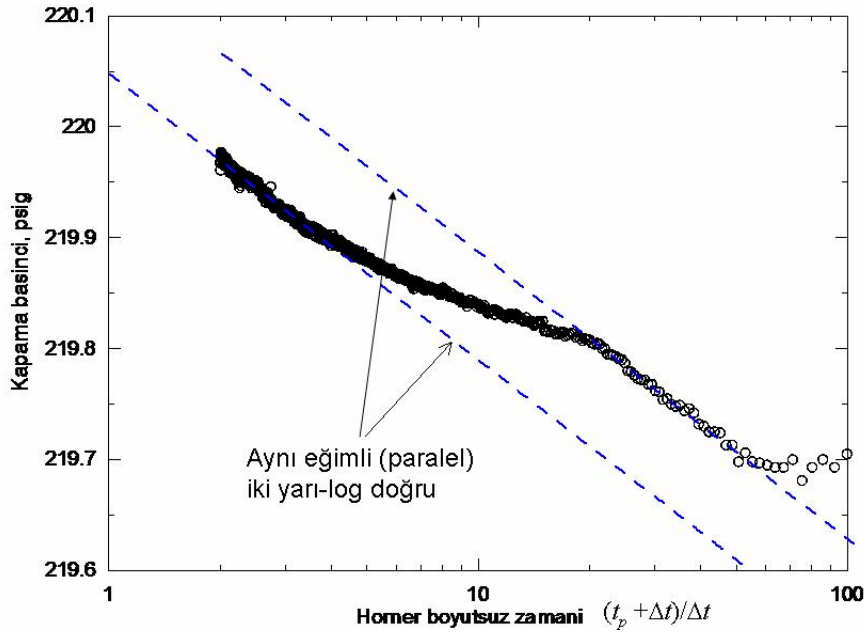
Daha öncede değinildiği gibi, kuyunun IPR eğrisi çok-debili akış sonrası akış testlerindeki her akış dönemi sonundaki sadece "dengelenmiş" kuyu dibi basınç değerleri kullanılarak oluşturulur. IPR eğrisi analizinden sadece IPR eğrisi (Denklem 4) parametrelerine (statik basınç, A , B ve AOFP) ait değerler belirlenir. Bu bilgiler kuyunun verimliliği hakkında önemli bilgi vermekle beraber, A , B ve AOFP değerlerini kontrol eden akışkan/kayaç parametrelerin, örneğin geçirgenlik ve zar faktörü s 'nin bireysel değerini belirlenmesine olanak tanımaz. Bu nedenle, AF-16 çok debili testi, bu parametrelerin de belirlenmesine olanak tanıyacak şekilde, hem tüm akış dönemlerinde (kapama dönemi de dahil) kuyu dibi akış basıncı değerleri sürekli kaydedilecek hem de test sonunda uzun bir kapama dönemi olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 23).

Kuyu testi analizinde, daha önce belirtilen nedenlerle, kuyu/rezervuar sistemine ait akış rejimlerini tanıma (veya kısaca model tanıma) genelde kapama dönemi verilerinden yapılır. Şekil 24'de, Şekil 22'de görülen 27.5-40 saat arası kapama dönemine ait basınç değişim ve basınç türev verilerinin kapama zamanı (Δt)'ye karşılık log-log grafiği gösterilmektedir. İlk 0,1 saat'lik erken zamanlarda görülen davranış değişken kuyu içi depolaması (karmaşık faz ayrışım gibi) etkisini yansıtmaktadır. Erken zamanlarda yaklaşık kuyuda sürtünme ve momentum etkilerini yansıtan +2 eğimli doğrunun gözlemlenmesi ilginçtir. Yaklaşık 0,1 saat'den sonraki davranış rezervuarı temsil etmektedir. 0.1

saat'ten kapama sonuna kadar türevde gözlemlenen geniş V şekilli davranış farklı modellerle açıklanabilir. Örneğin, lineer kompozit, iki tabakalı (çift-geçirgenlik) model, sonlu iletkenlik ancak düşük iletkenlikli fay yakınında üretim yapan bir kuyu gibi. Bu modellerin hepsi AF-16 kuyusunun bulunduğu yer ve kuyu tamamlama bilgilerine göre olasıdır [13]. Burada basitliği nedeniyle ve eldeki mevcut veriler de göz önünde bulundurularak, modelleme çalışmaları en basit tek tabakalı sonsuz homojen rezervuar ve iki tabakalı modellerle sınırlı tutulmuştur. Örneğin, kuyu bitirme raporundan [13], üretime açık aralık, iki tabakalı bir sistem izlenimi vermektedir. Mermer birimi 145–189 m (44 m) ve 189–218 m (29 m) kalkıştı (aralarda mermer bantları da gözükmemekte). Bu iki tabaka arasında geçirimsiz bir zon gözükmemekte. Dolayısıyla çapraz akışlı iki tabakalı (two-layer crossflow) bir sistem burası için olası gözükmemektedir. Şekil 25'de kapama dönemi için çizilen Horner grafiği de bu modeli desteklemektedir. Çünkü Horner grafiğinde eğimleri birbirinin aynı olan (paralel) çok iyi tanımlanmış iki yarı-log doğru gözlenmektedir.



Şekil 24. AF-16 kapama dönemi türev verilerinden akış rejimlerinin belirlenmesi.



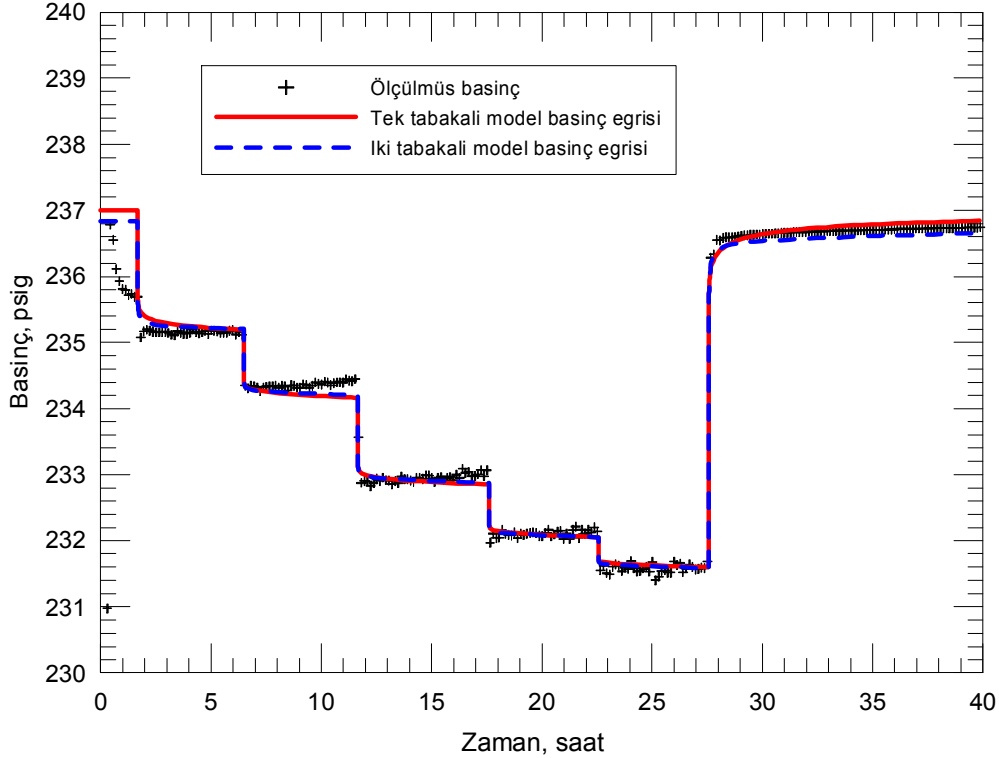
Şekil 25. AF-16 kapama dönemi Horner grafiği.

Türbülanslı akış etkisini dahil eden sonsuz tek tabakalı homojen rezervuar ve iki tabakalı rezervuar modelleri kullanılarak AF-16 çok debili basınç verilerine yapılan çakışmalar Şekil 26'da gösterilmektedir. Her iki model basınç verilerinin ölçülmüş basınç verileri ile çakışması arasında önemli fark gözükmemektedir. Ayrıca, genel olarak model ile ölçüm basınç verileri arasındaki çakışmalar oldukça iyidir. 2 ve 3. akış dönemlerinde çakışma diğer akış dönemlerine ve kapama dönemine göre biraz daha kötü gözükmeyle beraber kabul edilebilirdir. Bunun nedeni, savak okumalarındaki bir kaç cm'lik hatanın sebep olabileceği bu akış dönemleri için kullanılan debi verilerindeki bir kaç lt/s'lik hatadan kaynaklanmaktadır. Savak okumalarında ve bu ölçümlerden hesaplanan debi değerlerinde bu büyüklükte hatalar çok olasıdır.

Çakışmadan elde edilen model parametre değerleri Horner grafiğinden elde edilen değerlerle kıyaslamalı olarak Tablo 3'de özetlenmektedir. Horner analizinden 5.8 olarak tahmin edilen zar faktörü değeri mekanik zar faktörü s ile türbülanslı akıştan dolayı olan zar faktörünün (Dq) toplamına eşittir. Tek tabakalı sistem için türbülanslı akıştan dolayı toplam zar faktörü s_t ile mekanik zar faktörü s arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile verilir:

$$s_t = s + Dq \quad (\text{birimsiz}) \quad (25)$$

AF-16 kuyusu çok-debili testi analizi sonucunda, ortalama toplam $kh = 688$ Darcy-m olarak belirlenmiştir ki bu da, burada gösterilmeyen bu kuyuda daha önce yapılmış basınç azalım/yükselim testinden elde edilen 674 Darcy-m değeri ile oldukça uyumludur. Çok-debili test, zar faktörünün ve türbülans akış katsayısının bireysel değerlerinin belirlenmesine olanak tanımıştır. Zar faktörü $-1,0$ ile -4 arasında değişen bir değer belirlenmiştir ve bu sonuç da AF-16 kuyusunun bir çatlak ağından üretim yaptığına işaret etmektedir. Non-Darcy katsayısı her iki model içinde yaklaşık ortalama $D = 1.90 \times 10^{-1}$ (lt/s)⁻¹ olarak belirlenmiştir.



Şekil 26. AF-16 çok-debili testi basınç verilerinin türbülanslı (Non-Darcy) akışı göz önünde bulunduran tek tabakalı ve iki tabakalı sonsuz homojen rezervuar model basınç eğrileri ile çakışması.

Tablo 3. AF-16 çok-debili testi için analiz sonuçları.

Model Parametreleri	Analiz Modeli		
	Horner	Tek tabakalı	İki tabakalı
kh (Darcy-m)	856	665	543 (toplam)
S	5.8	-1	-4 (toplam)
D (lt/s) ⁻¹	-	1.92x10 ⁻¹	1.88x10 ⁻¹
ω	0.1	-	0.12
λ	-	-	7.55x10 ⁻⁹
κ	-	-	0.99
p_i , $psig$	237	237	237

Tablo 3'de iki tabakalı model için verilen bazı parametrelerin tanımları şöyledir [3]: Kappa (κ) iki tabaka kh 'leri arasındaki farklılığı yansıtır ve

$$\kappa = \frac{k_1 h_1}{(k_1 h_1 + k_2 h_2)} = \frac{k_1 h_1}{(kh)_{toplam}} \quad (\text{birimsiz}) \quad (26)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Omega (ω) iki tabakının $\phi c_t h$ 'leri arasındaki farkı yansıtır ve

$$\omega = \frac{\phi_1 c_{t1} h_1}{(\phi_1 c_{t1} h_1 + \phi_2 c_{t2} h_2)} = \frac{\phi_1 c_{t1} h_1}{(\phi c_t h)_{toplam}} \quad (\text{birimsiz}) \quad (27)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Lambda (λ) iki tabaka arasındaki çapraz akışın (crossflow) ne derece önemli olduğunu kontrol eder ve "lump" bir parametredir. Tanımı kullanılan tabaka arası model veya hipoteze göre değişir. En genel şekliye

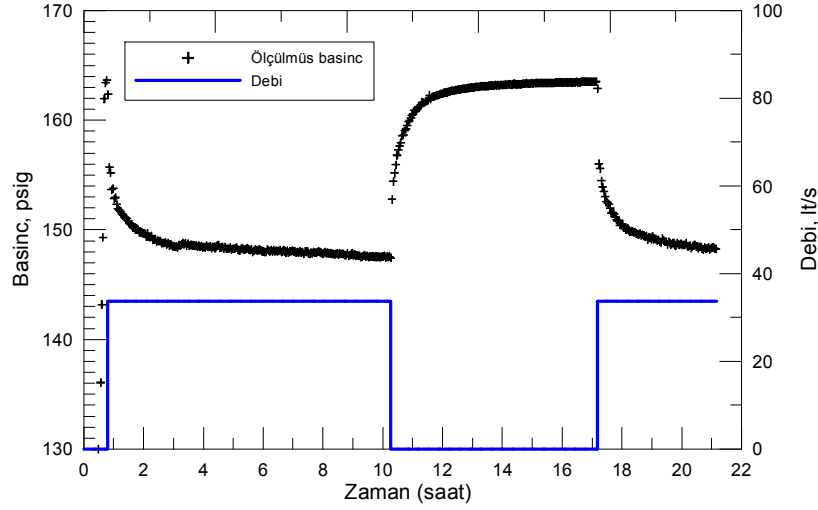
$$\lambda = \frac{r_w^2}{(k_1 h_1 + k_2 h_2)} \left(\frac{2}{2 \frac{h'}{k'_z} + \frac{h_1}{k_{z1}} + \frac{h_2}{k_{z2}}} \right) \quad (\text{birimsiz}) \quad (28)$$

olarak tanımlanmaktadır. Yukarıdaki denklemde, h' ve k'_z , sırasıyla iki tabaka arasında çapraz akışı geciktiren olası düşük geçirgenlikli "ince" rezistans tabakasının kalınlığını ve düşey geçirgenliğini yansıtır.

Yeterli bilgi olmadığı için Tablo 3'de verilen κ , λ ve ω değerlerinden, tabakaların bireysel özelliklerine (k_1 , h_1 , k_2 , h_2 , h' , k_{z1} , k_{z2} , vb.) ait değerler belirlenememiştir

5.2. Afyon Ömer-Gecek R-260 Kuyusu Basınç Azalım/Yükselim Testi

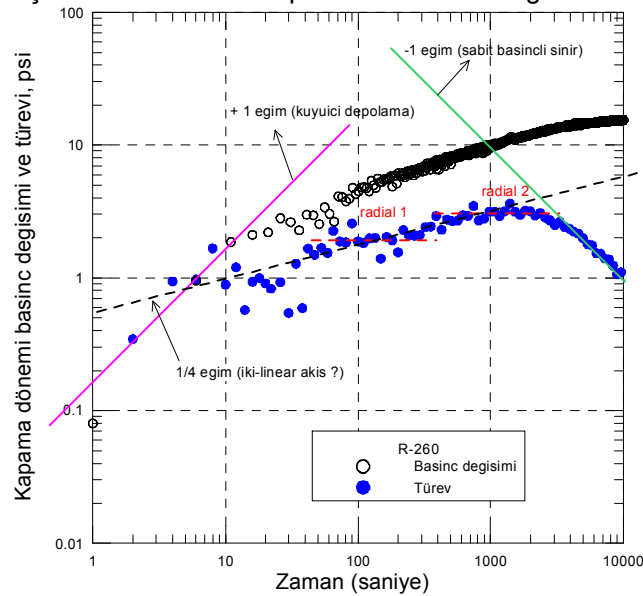
Ömer-Gecek jeotermal sahası AFJET projesi kapsamında [12], R-260 kuyusunda 115 m'de İller Bankası quartz basınç algılayıcısı inilerek yapılan basınç azalım/yükselim testine ait basınç/debi-zaman verileri Şekil 27'de gösterilmektedir. R-260 kuyusu toplam derinliği, 166 m'dir ve kuyudan 104 °C sıcaklığında jeotermal su üretilmektedir.



Şekil 27. R-260 basınç azalım ve yükselim testi basınç/debi verileri.

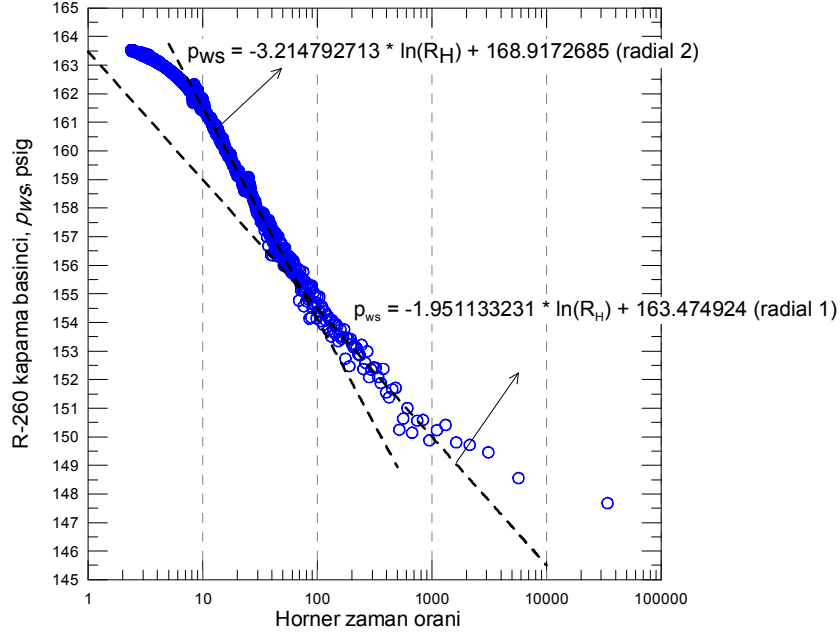
Şekil 28'de, yaklaşık 6 saatlik basınç yükselim dönemine ait basınç değişim ve basınç-türev verilerinin log-log grafiği gösterilmektedir. Basınç ve türev davranışı (Şekil 28) iletkenliği yüksek bir çatlak ağından üretim yapan bir kuyuya benzemektedir. Mekanik zar faktörü etkisi negatif gözükten basınç ve basınç-türev davranışına benzemektedir.

Şekil 28'de türev verileri üzerinde belirlenen ikinci çevrel akışı (birinci çevrel akıştan daha büyük bir türev değerinde sabitleniyor) izleyen -1 eğimli doğru, kuyunun sabit basınçlı bir sınıra (faya) ya da kesişen iki fay (biri sabit basınçlı diğer sızdırması az olan) arasında olduğuna işaret ediyor olabilir. Bu son model söz konusu ise, faylardan biri sabit basınçlı (yüksek iletkenlikli) ve diğeri düşük iletkenlikli (sızdırmaz) ve kuyunun düşük iletkenlikli sızdırmaz faya daha yakın olduğuna işaret ediyor olabilir. R-260 türev davranışı, sızdırmalı bir faya sonlu iletkenlikli düşey çatlak ağ ile bağlı düşey bir kuyu modelinin davranışına da benziyor. Nedeni de, 100-1000 s arasında sonlu iletkenlikli düşey çatlaklı bir sistemi yansıtan bilinear (iki-lineer) akışı temsil eden 1/4 eğimli doğrunun türev verilerine uyduğundadır (Şekil 28). Şekil 28 üzerinde basınç değişimi ve basınç-türev sinyalinden belirlenen bu 3 farklı olası akış rejimlerini yansıtan modelleri saha verileriyle karşılaştırarak ve çakışmadaki uyuma bakarak, jeolojik modelle de tutarlı olacak şekilde, R-260 için en olası model belirlenmeye çalışılmıştır. Bu modellerle ile yapılan çakışmalar ve elde edilen parametreler ileride gösterilmektedir.



Şekil 28. R-260 kapama dönemi türev verilerinden akış rejimlerinin belirlenmesi.

Şekil 28'de gözlemlenen radyal akış zaman aralıkları göz önünde bulundurularak, yapılan Horner analizine ait grafik Şekil 29'da sunulmaktadır. R-260 kuyusu civarında rezervuarı temsil ettiğine inandığımız birinci çevrel (radyal) akıştan $kh = 56,5$ Darcy-m olarak bulunur. İlk radyal'i temsil eden Horner doğrusunun sonsuz kapama değerine ekstrapolasyonu 163,5 psig vermektedir ki bu da test sırasında gözlemlenen ilk basınç değerine çok yakındır (Şekil 27). Ayrıca, Horner analizi ile Şekil 28'deki log-log grafiğinde belirlenen 1. radyalin doğru olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 29. R-260 kapama dönemi Horner grafiği.

Tablo 4'de yorumlama modellerinde kullanılan bazı giriş parametrelerine ait değerler verilmektedir. Kuyu loglarından yeterli bilgi olmadığı için gözeneklilik için 0,1 değeri alınmıştır, $\phi c_v h$ değeri ileride verilecek R-260-AF-21 girişim testinden elde edilen değer olarak alınmıştır. Rezervuar kalınlığı için ise, kuyunun üretime açık aralığı kullanılmıştır. Rezervuar kalınlığında belirsizlik söz konusu olduğundan, analizlerde, kh değerleri verilecektir.

Tablo 4. Analizde kullanılan bazı parametre değerleri.

Model Parametreleri	
$\phi c_v h$ (m-psi)	2.348×10^{-4}
h , m	65 m
r_w (m)	0.108
μ (cp)	0.281 @ $T=104$ °C
ϕ	0.1
c_b 1/psi	3.613×10^{-5}

Şekil 28'deki basınç-türev verilerinden, kapama döneminde yaklaşık 2000 s'den sonra çok net olarak görülen -1 eğimli doğru kuyunun sabit basınçlı bir sınıra (oldukça yüksek iletkenli su taşıyan bir faya) yakın olduğunun işaretidir. Faya olan uzaklık, Kaynak [13] tarafından önerilen türev verilerinin kapama

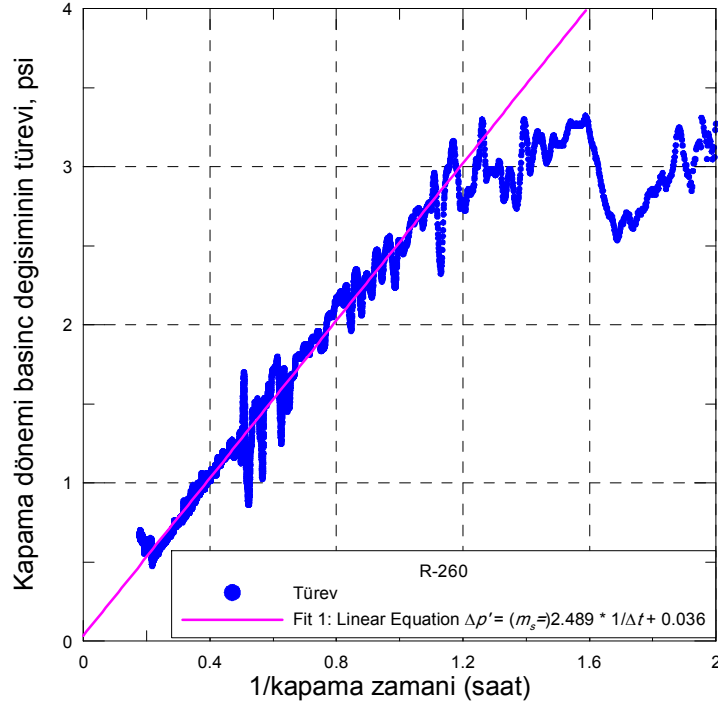
zamanın tersine oluşturulacak Kartezyen grafikte elde edilecek doğrunun eğiminden aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$d_f = 0.0086 \frac{kh}{\mu} \sqrt{\frac{m_s}{(2\pi^2) q\phi c_r h}} \quad (\text{ft}) \quad (29)$$

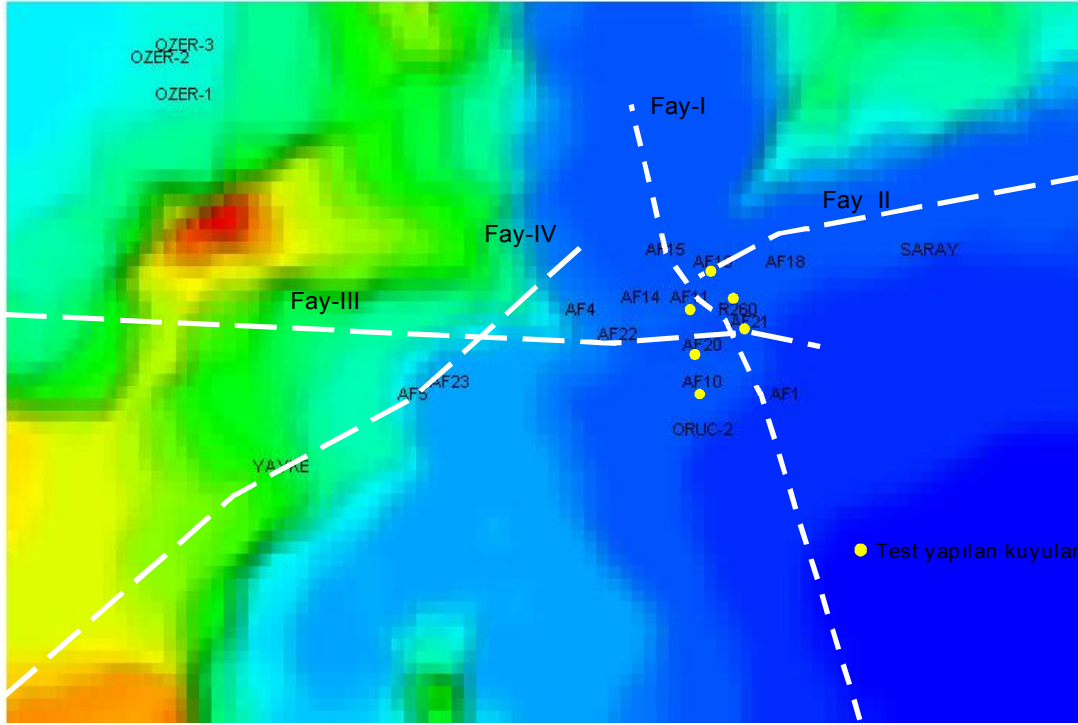
Denklem 29'da d_f (ft) kuyunun fay'a uzunluğunu, q kapama öncesi kuyu üretim debisini (bbl/d), m_s ise kapama dönemi türev verilerinin kapama zamanının tersine göre oluşturulan Kartezyen grafikte elde edilecek doğrunun eğimini temsil etmektedir. Şekil 30'da kapama dönemi türev verilerinin $1/\Delta t$ (kapama zamanı Δt 'nin tersine) karşı Kartezyen grafiği gösterilmektedir. Bu grafikte Şekil 28'de gösterilen -1 eğimli doğrunun gözlemlendiği zaman aralığına uygun olarak Şekil 30'da en küçük kareler yöntemiyle geçirilen doğru ve bu doğrunun eğimi gösterilmektedir. Şekil 30'dan elde edilen eğim değeri ve diğer veriler Denklem 29'da kullanılarak sabit basınçlı faya olan uzaklık

$$d_f = 0.0086 \frac{1.856 \times 10^5}{0.281} \sqrt{\frac{2.489}{(2\pi^2) \times 18314 \times 7.704 \times 10^{-4}}} \approx 537 \text{ ft} \approx 164 \text{ m} \quad (\text{ft}) \quad (30)$$

hesaplanır. Aslında elde edilen bu değer, Şekil 31'de gösterilen ve MTA tarafından oluşturulan jeolojik fay modelinde [13], Fay II'yi ya da Fay III'ün doğudaki segmentini işaret ediyor. Bunun nedeni de, R-260'ın Fay II'ye dik uzaklığı yaklaşık 120 m, Fay III'e dik uzaklığı ise, 150 m civarındadır. Fay I'e uzaklığı ise yaklaşık 60 m'dir. Bu değerler, Kaynak [14]'ün Ek-2'sinde verilen "Koruma Alanları" haritasından okunmuştur. Bu değerleri doğru kabul ettiğimizde, hesaplanan 164 m faya olan uzaklık değeri, büyük olasılıkla Fay III'ü ikinci olasılıkla da Fay II'yi işaret etmektedir.



Şekil 30. R-260 türev-1/Δt grafiği.



Şekil 31. Afyon Ömer-Gecek sahasında test yapılan kuyuların (nokta ile belirtilen) olası faylarla birlikte konumları.

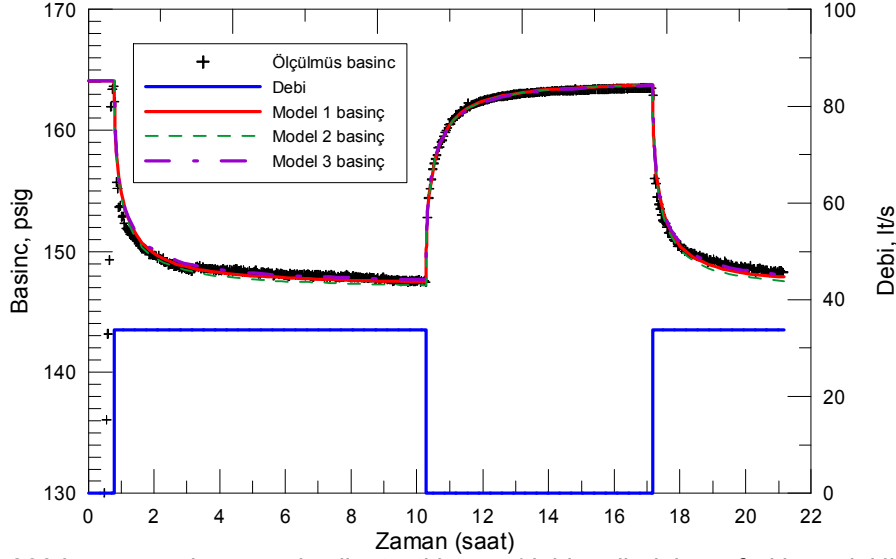
Üç farklı yorumlama modeli: (1) Sabit basınçlı sınır/sonsuz homojen rezervuar modeli; (2) Sonlu iletkenli çatlak/sabit basınçlı sınır/sonsuz homojen rezervuar modeli ve (3) Akışa kapalı (veya düşük iletkenlikli fay) ve sabit basınçlı dik kesişen iki fay/sonsuz homojen rezervuar-kullanarak R-260 basınç/zaman verilerinin test süresindeki tüm debi değişikliğini de dikkate alarak yapılan doğrusal olmayan regresyon çakıştırmaları Şekil 32'de gösterilmektedir. Bu üç model ile elde edilen model parametre değerleri Tablo 5'de verilmektedir.

Tablo 5. R-260 basınç azalım/yükselim testinin regresyon analizi sonuçları.

Model Parametreleri	Analiz Modeli		
	Model 1	Model 2	Model 3
kh (Darcy-m)	32,3	23,7	47,8
S	-5,4	-	-4,9
d_{f1} (m)	129,5	92	126
d_{f2} (m)	-	-	63
L_{xf} (çatlak yarı-boyu, m)	-	84	-
$F_c = k_f w_f$ (Darcy-m)	-	100	-
$F_{cD} = k_f w_f (kL_{xf})$	-	4	0.99
p_i , psig	164,1	164,1	164,1

Tablo 5'de, d_{f1} , sabit basınçlı sınıra uzaklığı (m), d_{f2} düşük iletkenlikli faya olan uzaklığı (m) temsil etmektedir. Model 2 için, L_{xf} kuyuyu kesen düşey çatlak ağının etken çatlak yarı-boyu uzunluğunu (m), F_c , düşey çatlak ağının iletkenliğini (Darcy-m), k_f düşey çatlak ağının etken geçirgenliğini, w_f çatlak

ağının etken genişliliğini, F_{CD} ise boyusuz düşey çatlak ağı iletkenliğini göstermektedir. F_{CD} 'nin 4 civarında oluşu düşey çatlak ağının orta büyüklükte iletkenlikli olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 32. R-260 basınç azalım ve yükselim testi basınç/debi verilerinin üç farklı model ile çakışması.

Şekil 32'den de görülebileceği gibi her üç modelden elde edilen çakışmalar oldukça iyidir ve üç modelde R-260 için olası gözükmemektedir. Ancak, bu üç modelden en iyi çakışmayı sağlayan "dik kesişen biri sabit basınçlı diğeri akışa kapalı (veya düşük iletkenlikli) fay modelidir (Model 3). Aslında bu model'de Şekil 31'de görülen jeolojik model ile tutarlıdır. Bu modelin doğru olduğunu kabul ettiğimizde, Tablo 5'de verilen sonuçlardan, R-260'ın Fay I'e olan uzaklığının $d_{f2} = 63$ m ve bu fayın R-260 civarında düşük iletkenli veya akışa kapalı bir sınır olduğunu, R-260'ın Fay II'ye ya da Fay III'e olan uzaklığının $d_{f1} = 126$ m ve bu faylardan birinin yüksek iletkenlikli (sabit basınçlı) olduğunu söyleyebiliriz.

Şekil 29'dan R-260 kuyusunun üretim-verimlilik indeksi, $PI = 2,1$ (lt/s)/psi veya 30 (lt/s)/bar olarak belirlenmiştir. R-260'da çok debili test yapılmadığı için, bu kuyuda hangi debilerde türbülanslı akış oluşup oluşmadığı net bilinmemektedir. İncelenen R-260 testinde üretim debisi 33,7 lt/s'dir. Diğer kuyularda türbülanslı akış gözlemlendiğinden, R-260 için hesaplanan PI değerinin 33,7 lt/s debi için geçerli olan bir verimlilik indeksi değeri olduğunu belirtmekte fayda görüyoruz, zira türbülanslı akış koşullarında PI değeri debi ile değişmektedir (debi artınca PI azalmaktadır).

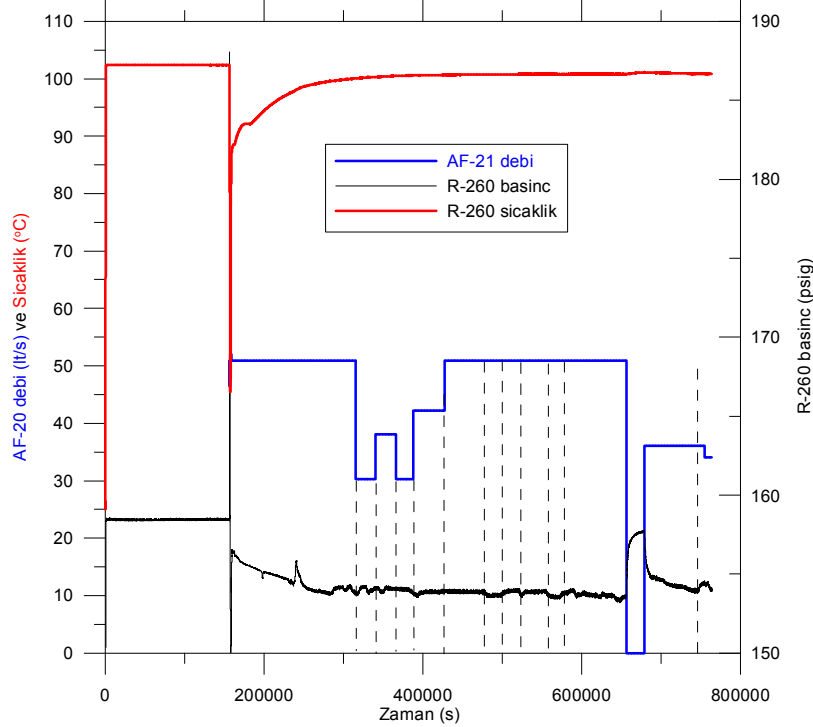
Genel sonuç olarak söyleyebileceğimiz, R-260 kuyusunun yaklaşık 128 m yüksek iletkenlikli (sabit basınçlı) bir fay yakınında olduğu ve kuyu civarı geçirgenlik-kalınlık çarpımının ortalama 38 D-m ve oldukça negatif zar faktörü nedeniyle kuyu civarında gelişmiş bir çatlak ağı olduğudur. Ayrıca, PI değeri (33,7 lt/s için) 2,1 (lt/s)/psi veya 30 (lt/s)/bar'dır.

5.3. Afyon Ömer-Gecek AF-21/R-260 Girişim Testi

Ömer-Gecek jeotermal sahası AFJET projesi kapsamında [12] yapılan AF-21/R-260 girişim testinde, R-260 gözlem kuyusu, AF-21 ise aktif kuyu olarak kullanılmıştır. AF-21 ve R-260 kuyusu arası uzaklık 78,5 m'dir. R-260'da İller Bankası quartz basınç ve sıcaklık algılayıcısı ile R-260'da 116 m'de basınç/sıcaklık ölçümleri almıştır.

Şekil 33'de AF-21 kuyusu debi, R-260 basınç ve sıcaklık-zaman değişimi grafiği gösterilmektedir. Testin uzunca bir süresinde yaklaşık savak ölçümler 16,5 ile 17,0 cm (50,89 lt/s) arasında değişmiştir. R-260'da AF-21'in üretim etkisi 50 s içinde hissedilmiştir. İlk 100 sn içerisinde R-260 AF-21'de üretimi

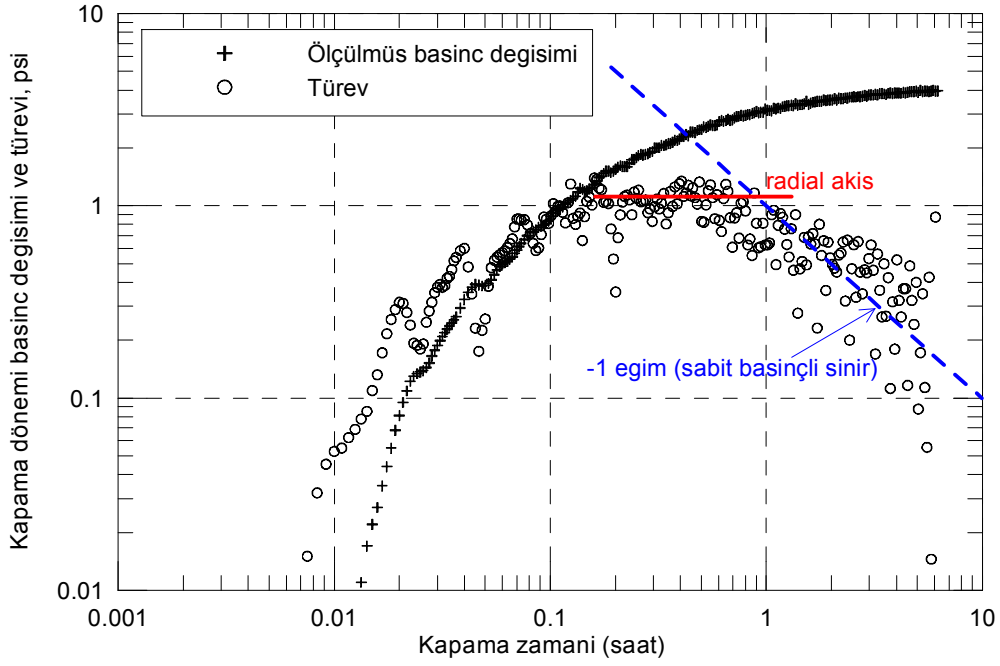
başlatmak için gaz basılma işlemini bile hissedilmiştir. Çünkü çok erken zamanlarda R-260 kuyusunda basınç AF-21'deki gaz enjeksiyon nedeniyle artıyor. Bu gözlem iki kuyu arasında oldukça iletken yapının olduğuna işaret ediyor. Bir ilginç nokta da, AF-21'de üretimin başlamasıyla birlikte R-260'da ani sıcaklık düşümü (yaklaşık 102 °C'de 45 °C ani bir düşüş) oluyor. Bu düşümün nedenin sıcaklık ölçüm aletinde oluşan bir problemden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca dikkat edilecek olursa, sıcaklıktaki bu ani düşümden sonra, sıcaklık algılayıcısının 102 °C'lik statik sıcaklık değerine yaklaşık 100000 saniye (28 saat) sonra ulaştığı görülmektedir. Şekil 33'deki ölçüm nedeniyle çok net gözükmemekle beraber, bu dönem içerisinde basınç algılayıcısı tarafından kaydedilen basınç ölçüleri de, Bölüm 3.3'de açıklanan basınç ve sıcaklık ölçerler "stabilite" probleminden etkilenmiştir.



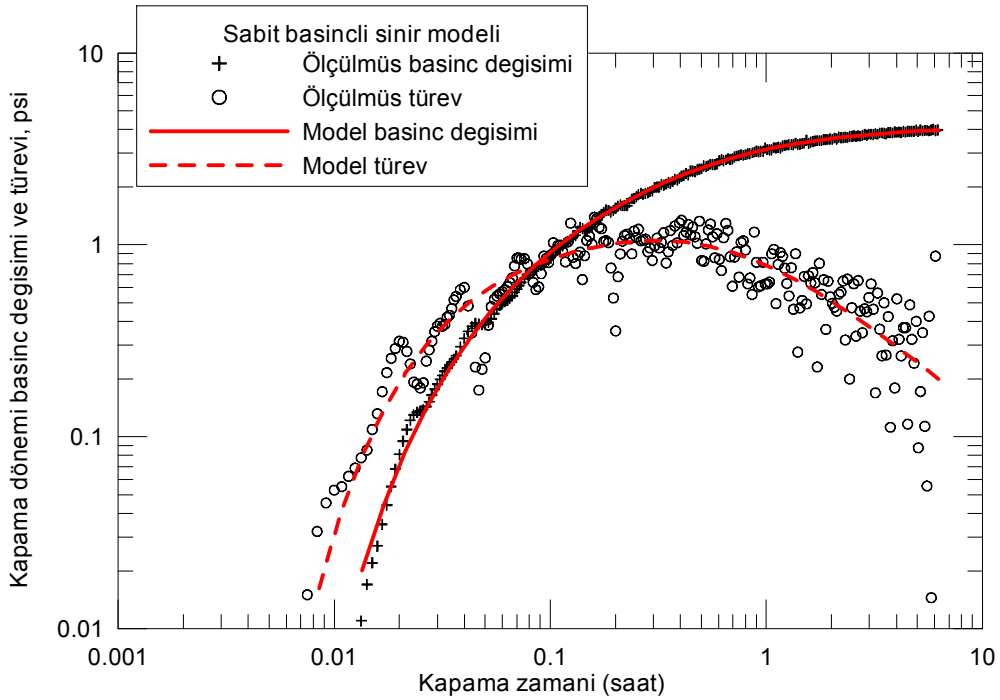
Şekil 33. AF-21/R-260 girişim testi debi, P ve T-zaman grafiği.

AF-21 kuyusunda oluşan bir problem nedeniyle yaklaşık 6 saat 15 dakika civarında kuyu üretime kapatılmıştır. Bu kapama dönemi, Şekil 33'de yaklaşık 650000 saniye civarında başlamaktadır. Problem halledilerek, AF-21'de üretim devam etmiştir. Bu kapama dönemine ait basınç değişimi ve türevi log-log grafiği Şekil 34'de gösterilmektedir ve R-260 girişim testi için uygun yorumlama modelinin belirlenmesine ışık tutmuştur. Genelde, girişim testlerinde aktif kuyuda belirli bir üretim döneminden sonra, aktif kuyunun akışa kapatılarak gözlem kuyusunda basınç yükselme dönemine ait basınç verilerinin kaydedilmesi bu örnekte olduğu gibi faydalıdır ve basınç azalım döneminde analizi zorlaştıran etkilerden arınmış bir sinyal elde edilmesi olanaklı olur.

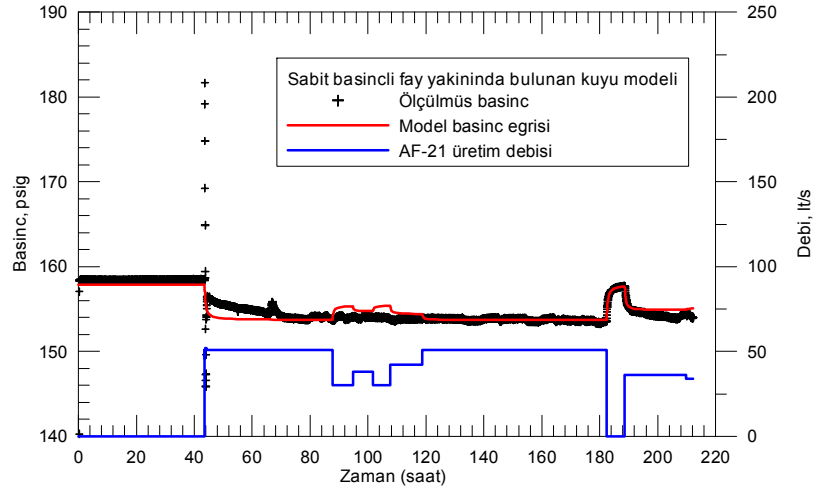
Şekil 34'de görülen basınç-türev davranışı R-260 kuyusu girişim testi verilerinin sonsuz homojen/sabit basınçlı sınır modeli ile yorumlanabileceğini göstermektedir. Yaklaşık 0,1-0,6 saat arası türevdeki düzleşme sonsuz homojen rezervuar sistemleri için radyal (çevrel) akışı, 0,6 saat'den sonra türevin -1 eğimli doğru davranışı göstermesi ise sabit basınçlı (veya yüksek iletkenlikli beslenmeli bir fayın) sınırın kuyu civarında olduğunu belirtmektedir. Bu model kullanılarak, regresyon analizi yapılmıştır. R-260 kapama dönemi basınç ve türevi verilerinin bu model basınç eğrisi ile elde edilen çakışması Şekil 35'de, tüm test dönemi boyunca basınç verileri ile çakışması ise Şekil 36'da gösterilmiştir. Regresyon analizinden elde edilen parametre değerleri Tablo 6'da sunulmaktadır.



Şekil 34. R-260 girişim testi kapama dönemi basınç/basınç-türev log-log grafiği.



Şekil 35. R-260 girişim testi kapama dönemi basınç ve türev verilerinin sabit basınçlı sınır modeli eğrileri ile çakışması.

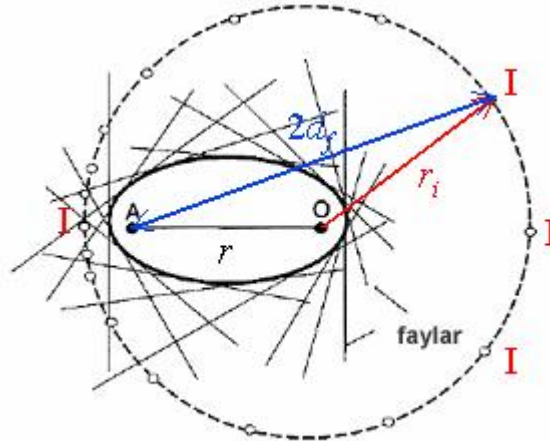


Şekil 36. R-260 girişim testi basınç verilerinin sabit basınçlı fay modeli basınç eğrisi ile çakışması.

Tablo 6. Sonsuz homojen/sabit basınçlı sınır modelinden tahmin edilen parametrelere ait değerler.

Model Parametreleri	
kh (Darcy-ft)	135
p_i , psi	157.86
$\phi c_t h$ (m/psi)	2.912×10^{-4}
r_i (m)	382

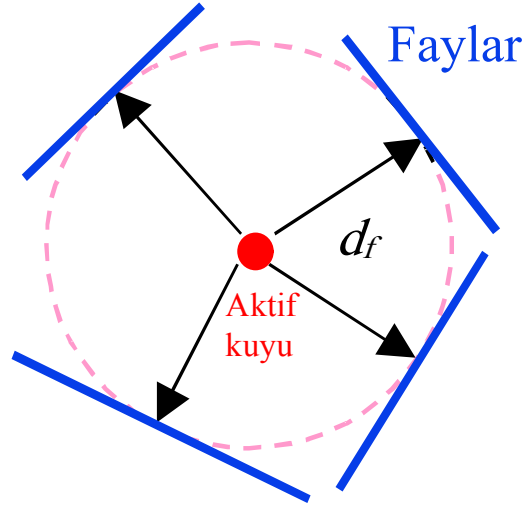
Tablo 6'da verilen r_i 382 m değeri, aktif kuyu AF-21'in ya da R-260 kuyusunun faya olan uzaklığını temsil etmemektedir. Bu değer R-260 kuyusu ile süperpozisyonda kullanılan "hayali (sanal)" ("imaginary") kuyu arasında fay'a dik olan uzaklıktır (Şekil 37). Bilindiği gibi, tek bir girişim basınç testinden fay olan uzaklık ve fayın yönü/doğrultusu belirlenmemektedir [15,16]. Şekil 37'de Kaynak [14] den değiştirilerek alınmış bir girişim kuyusu (Şekil 37'de "O" ile temsil edilmektedir) basınç verilerinden fayın yeri ve konumu için sonsuz sayıda olasılık olduğu görülmektedir. Şekil 37'de "A" aktif kuyuyu ve I ise "hayali" kuyuyu temsil etmektedir. Test örneğimizde "O" R-260 kuyusunu, "A" ise AF-21 kuyusunu temsil edecektir. Görüldüğü gibi, aktif ve girişim kuyularının etrafında bir "elips" oluşmaktadır ve bu elips üzerindeki her noktadan çizilecek teğet doğru olası fay yeri ve doğrultusunu belirleyecektir. Şekil 37'de d_f aktif kuyu A'nın faya olan uzaklığını temsil etmektedir.



Şekil 37. Girişim kuyusu basınç testinden faya olan uzaklığın belirlenmesi problemi (Kaynak [15]'den değiştirilerek alınmıştır).

Eğer birden fazla aktif kuyu ve/veya girişim testi varsa fayın yeri ve doğrultusu hakkında olasılıkları azaltmak mümkündür. Örneğin daha önce R-260 kuyusunda bir basınç azalım/yükselim testi yapılmıştı ve bu test analizinde de R-260 kuyusunun sabit basınçlı bir sınır yakınında üretim yaptığı belirlenmişti (Bölüm 5.2). R-260 basınç azalım/yükselim testinde, R-260 kuyusunda sabit basınçlı sınıra (faya) olan uzaklık yaklaşık 130 m'dir ve bu testte elde edilen kh değeri yaklaşık 48 D-m'dir. Öte yandan, yukarıda verilen R-260 kuyusu girişim testinden elde edilen değerler $r_i = 382$ m ve $kh = 135$ Darcy-m'dir. Bu iki testi birleştirerek, fayın olası yeri ve konumu hakkında bir şeyler söylemek mümkün olabilir. Örneğin sistemin homojen olduğu varsayımını yaparsak, fayın olası yeri ve konumu hakkında bir şey söylememiz mümkün olabilir. Homojenlik varsayımı Ömer-Gecek sahası için pek gerçekçi gözükmemekle beraber (R-260 kuyusu girişim ve aktif kuyu testi kh değerleri birbirinden yaklaşık 3 kat farklıdır-girişim testi kh 'i aktif kuyu kh 'inden 3 kat büyüktür), bu değerlendirme yapılabilir. Ayrıca, kuyular civarındaki geçirgenlikteki heterojenliğin ve anizotropinin faylara (aktif kuyu testleri için) ya da hayali kuyuya (girişim testleri için) olan fayın hesaplanmasında ne oranda etkili olduğu üzerine literatürde de pek çalışma bulunmamaktadır.

Bu değerlendirmeye geçmeden önce, herhangi bir aktif kuyu testinden (örneğin basınç azalım/yükselim) testinden, kuyunun faya olan uzaklığının tekil olarak belirlenebileceğini, ancak yönü ve doğrultusunun belirlenemeyeceğini söylemek gerekir. Kaynak [16]'dan alınan ve Şekil 38'deki idealleştirilmiş gösterim bunu çok iyi açıklamaktadır.



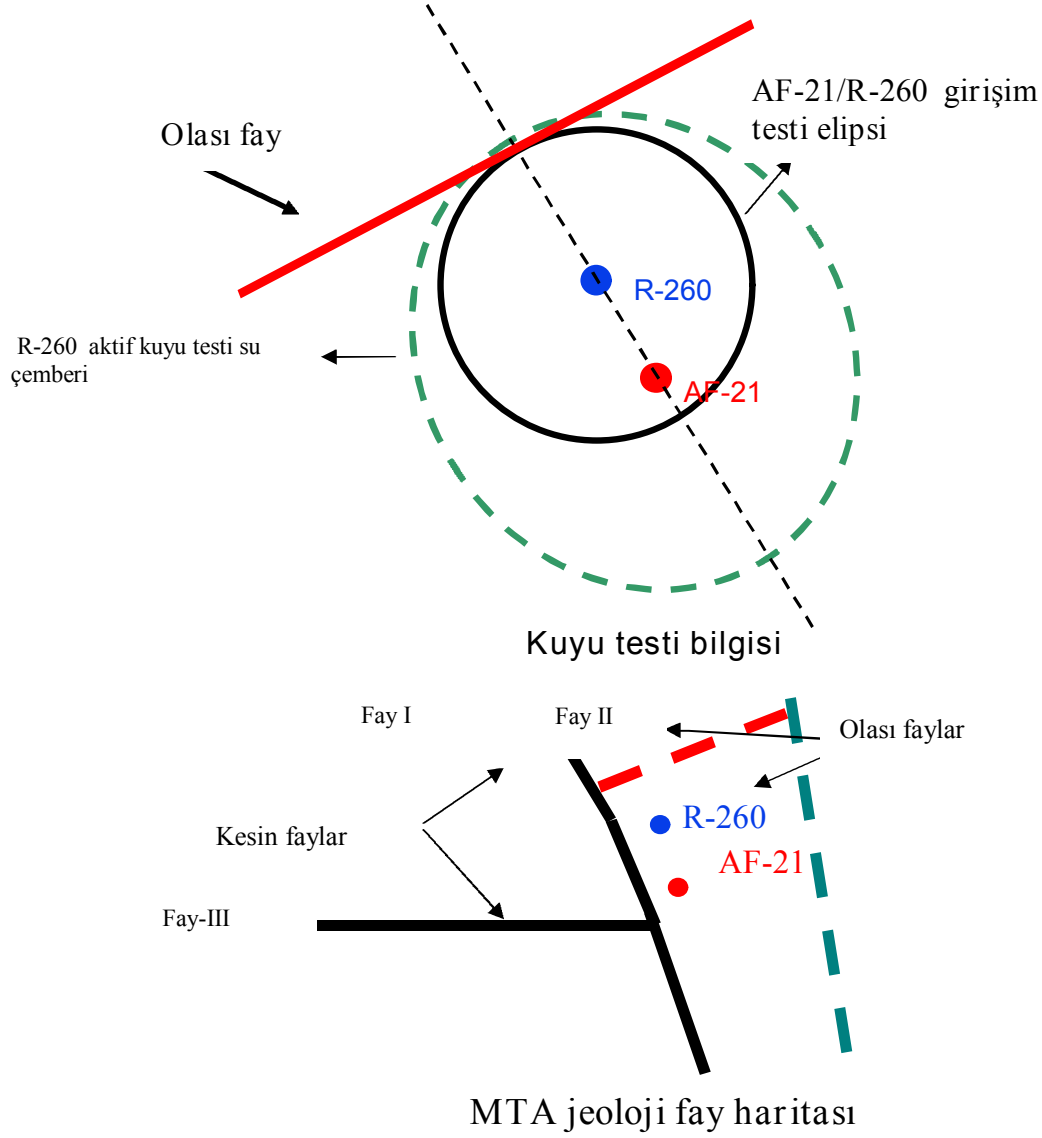
Şekil 38. Aktif kuyu basınç testinden faya olan uzaklık, yön ve doğrultusunun belirlenmesi problemi (Kaynak [16]'den değiştirilerek alınmıştır).

Şekil 38'den görüldüğü gibi, aktif kuyu etrafında d_f (aktif kuyunun faya olan uzaklığı) yarıçaplı bir çember üzerinde her noktadan çizilecek teğet fayın ve doğrultusunu belirleyecektir. Aktif kuyu testinden faya olan uzaklık d_f tekil olarak belirlenebilmekle beraber, fayın yeri, yönü ve doğrultusu hakkında sonsuz sayıda olasılık mevcuttur.

R-260 aktif kuyu testi (Bölüm 5.2) ve bu bölümde verilen R-260 girişim kuyusu testi sonuçları birleştirildiğinde (homojen ve izotropik sistem varsayımı altında), elde edilen sonuç Şekil 39'da idealleştirilmiş olası Kaynak [14] MTA jeolojik fay modeli ile kıyaslamalı olarak gösterilmektedir ve birleştirmeden fay'ın konumu ve yeri ve AF-21 kuyusundan uzaklığı 208 m olarak belirlenmiştir. Bu yorum, Şekil 31'de gösterilen olası Fay II'nin (Şekil 39'da kırmızı kesikli çizgiyle belirtilmiş) sabit basınçlı sınır olduğuna işaret etmektedir. Hesaplanan 208 m AF-21 kuyusunun bu faya olan uzaklık değeri de Kaynak [14] Ek-2'de bu fay için verilen (AF-21'den bu faya dik uzaklık) koordinat ile oldukça uyumludur. Kaynak [14]'e göre AF-21 kuyusunun olası Fay II'ye uzaklığı yaklaşık 180 m'dir.

Bu örnek açıkça göstermektedir ki, kuyu basınç testini analizlerinden elde edilen bilgiler, jeolojik veya jeofizik bilgiler ile birleştirildiğine sistemi tanımlanmasına yönelik önemli sonuçlara ulaşmak mümkün

olmaktadır. Bu nedenle, en doğru yaklaşım, bu üç veri türünden elde edilen bilgilerin birleştirilerek jeotermal sistemlerin tanımlanması ve uygun şekilde işletimlerinin tasarlanmasıdır. Kuyu testleri jeolojik ve jeofizik veriler gibi bu araçların olmazsa olmazlarından biridir.



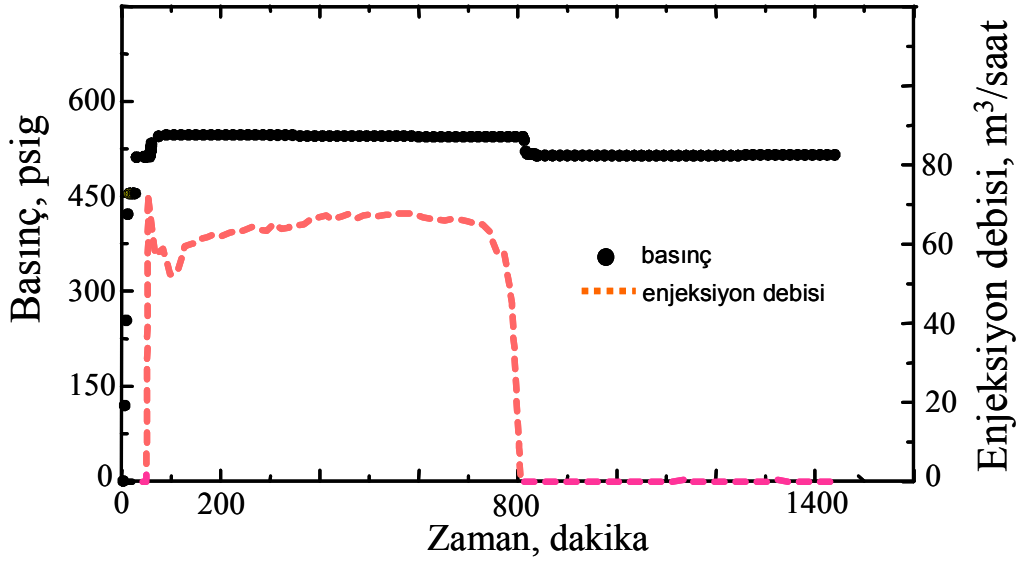
Şekil 39. R-260 basınç/azalım ve AF-21/R-260 girişim testlerinin yorumundan çıkarılan olası fay ve konumunun Kaynak [14] (MTA) jeolojik fay modeli ile kıyaslaması (ölçeğe uygun çizilmemiştir).

5.4. Balçova-Narlıdere BD-2 Enjeksiyon/Falloff Testi

Bu bölümde Balçova-Narlıdere jeotermal sahası projesi kapsamında [17] BD-2 kuyusunda 2000 yılında yapılan enjeksiyon/falloff testi ve analizine ait bilgiler sunulmaktadır. BD-2 kuyusunun derinliği, 677.2 m'dir. Kuyu yüzeyden 348 m'ye kadar koruma borusu ile teçhiz edilmiş olup 348-677.2 m arası toplam 329.2 m çıplaktır.

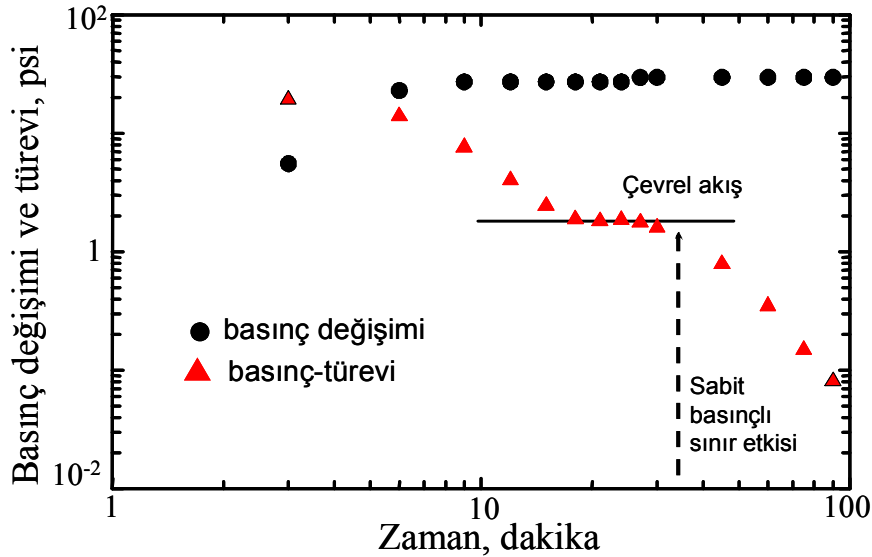
TPAO tarafından mekanik Bourdon tüpü basınç algılayıcısı ile BD-2'de 414 m'de basınç ölçümleri almıştır. Test öncesinde kuyuda statik basınç 513 psig ve sıcaklık 87 °C dir.

Şekil 40'da BD-2 enjeksiyon/falloff testi sırasındaki basınç ve debi-zaman değişim grafiği gösterilmektedir. Test 12 saat enjeksiyon, 12 saat falloff olarak tasarlanmıştır. Enjeksiyon için kullanılan suyunu sıcaklığı 65 °C dir.



Şekil 40. BD-2 kuyusu enjeksiyon/falloff testi basınç/debi-zaman verileri.

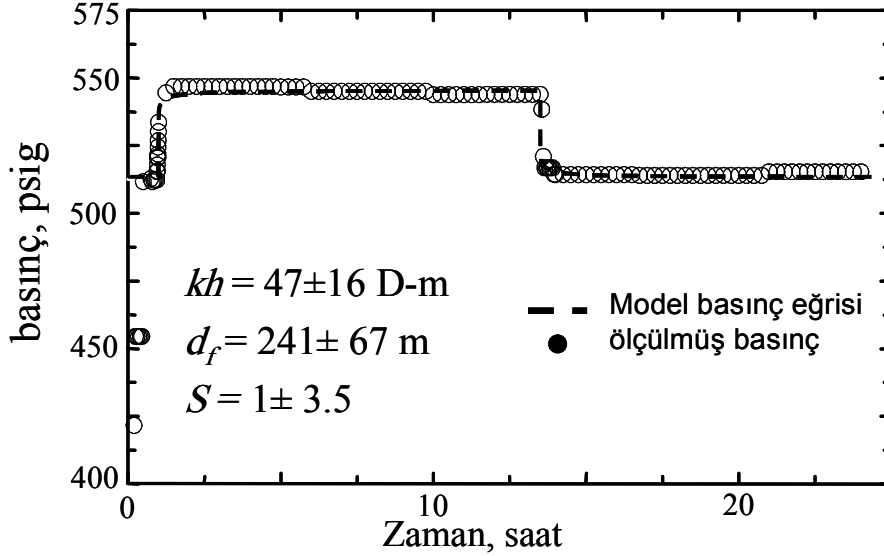
Şekil 41'de, falloff (kapama) dönemine ait basınç değişim ve basınç-türev verilerinin log-log grafiği gösterilmektedir. Basınç ve türev eğrisi yüksek iletkenlikli (beslenmeli) bir fay yakınında bulunan bir kuyunun davranışına benzemektedir.



Şekil 41. BD-2 kuyusu falloff dönemi basınç değişim ve basınç-türevi verileri log-log grafiği.

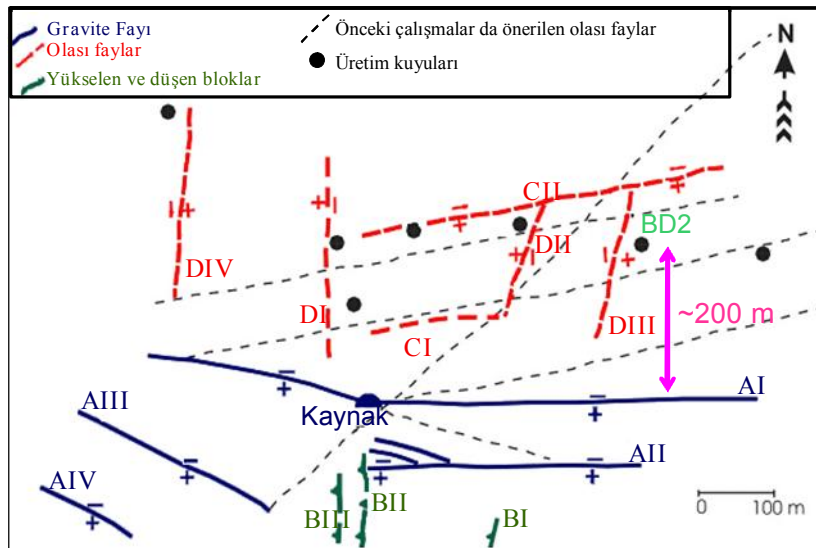
Şekil 41'de 15-30 dakika arasında belirlenen çevrel akış analizinden geçirgenlik-kalınlık çarpımı $kh = 37$ Darcy-m olarak belirlenmiştir. Yaklaşık 35 dakika civarında kuyuda sabit basınçlı bir sınırın etkisi (türev eğrisi yaklaşık -1 eğimli doğru davranışı göstermektedir) gözlemlenmektedir. Bu akış rejimi analizinden, kuyunun faya olan uzaklığı $d_f = 174-307$ m olarak hesaplanmıştır. Fay olan uzaklığın hesaplanmasında, gözeneklilik-sıkıştırılabilirlik-kalınlık ($\phi c_f h$) çarpımı gereklidir. Bu değer bu saha için bilinmediğinden ve dolayısıyla bir belirsizlik söz konusu olduğundan faya olan uzaklık $\phi c_f h$ iki ekstrem değeri için hesaplanmıştır. Grafikselleştirilmeden belirlenen bu kh ve d_f değerleri daha genel enjeksiyon debisi değişimini dikkate alan süperpozisyon üzerine kurulu sabit basınçlı sınır modeli

kullanılarak yapılan regresyon analizinde başlangıç değerleri olarak kullanılmıştır. Yineleme işlemi sonunda Şekil 42'de gösterilen BD-2 kuyusu enjeksiyon/falloff dönemi basınç verilerinin model basınç eğrisi ile karşılaştırması elde edilmiştir. Görülebileceği gibi, elde edilen karşılaştırma oldukça iyidir. Regresyon analizinden elde edilen parametre değerleri %95 güvenilirlik aralıkları (\pm ile verilen değerler) ile birlikte Şekil 42'de verilmektedir. Regresyon analizinden, gerçek kh değerinin 31 ile 63 Darcy-m arasında olduğu (en iyi değer 47 Darcy-m olarak bulunmuştur) anlaşılmaktadır. Sabit basınçlı faya olan uzaklığın ise 174 ile 308 m arasında olduğu belirlenmiştir (en iyi değer 241 m bulunmuştur). Zar faktörü değeri ise -2.5 ile 4.5 arasında bir değer bulunmuştur. Kuyunun enjeksiyon indeksi 0.6 (lt/s)/psi (veya 2.2 (m³/saat)/psi) olarak bulunmuştur.



Şekil 42. BD-2 kuyusu enjeksiyon/falloff testi basınç verilerinin sabit basınçlı sınır modeli ile karşılaştırması ve elde edilen parametre değerleri.

Elde edilen faya olan uzaklık değeri ve jeolojik bilgilerden bilinen fay eğimi (70°) göz önünde Şekil 43'de verilen jeolojik fay haritasında AI olarak gösterilen Agamemnon fayının doğudaki segmentini işaret ediyor gibidir.



Şekil 43. Balçova-Narlıdere jeolojik fay haritası [17].

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, jeotermal sistemlerde kuyu basınç testleri ve analizleri üzerinde durulmuş ve okuyuculara bu konuda kapsamlı bilgiler aktarılmıştır. Bu bilgiler arasında, jeotermal sistemlerde kuyu basınç testlerinde kullanılacak uygun basınç ölçerlerin özellikleri hakkında bilgilerden başlanarak, kullanılan kuyu basınç testi tipleri, bu testlerinin tasarımı, değerlendirilmesi, analizinde kullanılacak temel prensipler ve yöntemler sunulmuştur. Son yirmi yılda teknolojiye gelişmelere paralel olarak, kuyu basınç testleri alanında da önemli ölçüde ilerlemeler kaydedilmiştir. Pek çok yeni model ve modern analiz yöntemi geliştirilmiştir. Modern modelleme ve analiz yöntemleri hakkında da okuyuculara bilgiler aktarılmıştır. Türkiye'deki jeotermal sahalarda (Afyon Ömer-Gecek ve Balçova-Narlıdere) yapılan dört kuyu testi uygulaması gösterilmiş ve bu testlerin değerlendirilmesinden elde edilen bilgiler sunulmuştur. Bildiride sunulan bilgi ve örnek uygulamalar açıkça göstermektedir ki, kuyu basınç testi analizlerinden elde edilen bilgiler, jeolojik varsa jeofizik bilgiler ile birleştirildiğinde jeotermal sistemin daha gerçekçi bir tanımlanmasının yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, en doğru yaklaşım, bu üç veri türünden elde edilen bilgilerin birleştirilerek jeotermal sistemlerin tanımlanması ve uygun şekilde işletimlerinin tasarımıdır. Kuyu testleri, jeolojik ve jeofizik veriler gibi bu araçların olmazsa olmazlarından biridir.

KAYNAKLAR

- [1] EARLOUGHER, R.C., "Advances in Well Test Analysis", Society of Petroleum Engineers, Dallas, 1977.
- [2] ONUR, M., "Kuyu Basınç Testleri ve Analizi", İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Ders Lisans ve Lisansüstü Notları, 1995-2005.
- [3] BOURDET, D., "Well Test Analysis: The Use of Advanced Interpretation Models", Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2002.
- [4] BODVARSSON, G.S., PRUESS, K., LIPPMANN, M. J., "Modeling of Geothermal Systems", Journal of Petroleum Technology, September 1986.
- [5] SARAK, H., ONUR, M., SATMAN, A., "Lumped Parameter Models for Low-Temperature Geothermal Fields and Their Application", Geothermics, (basım aşamasında), 2006.
- [6] ONUR, M., AKSOY, N., SERPEN, U., SATMAN, A.: "Analysis of Well Tests in Balçova-Narlıdere Geothermal System, Turkey", paper 1131 presented at the 2005 World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- [7] "Modern Well Test Analysis", Schlumberger yayını, 2000.
- [8] STRELSTOVA, T., "Well Test Analysis", John Wiley Wiley & Sons., 1986.
- [9] BOURDET, D., AYOUB, J.A., PIRARD, Y.M., "Use of Pressure Derivative in Well Test Interpretation", SPE Formation Evaluation, June 1989.
- [10] ONUR, M., REYNOLDS, A.C., "New Approach to Constructiong Derivative Type Curves", SPE Formation Evaluation, March 1989.
- [11] ONUR, M., SADDIQUE, A.M., "Comparison of Derivative Algorithms Used in Pressure Transient Analysis", The Arabian Journal for Science and Engineering, 24 (1B), April 1999.
- [12] SATMAN, A., ONUR, M., SERPEN, A., "Afyon Ömer-Gecek Jeotermal Sahasının Rezervuar ve Üretim Performansı", Proje raporu (yayınlanmamış), Ağustos 2005.
- [13] ABBASZADEH, M.D., CINCO-LEY, H., "Pressure Transient Behavior in a Reservoir With a Finite-Conductivity Fault," paper SPE 24704, proceedings of 1992 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1992.
- [14] GÜNER, A., "Afyon (Ömer-Gecek) Sıcak Su Kaynakları Kuyu Bitirme Raporu", MTA Raporu (yayınlanmamış), Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi ve ekleri, 1999.
- [15] VELA, D., "Determination of Linear Boundaries from Interference Tests," Journal of Petroleum Technology, 1977.
- [16] ONUR, M., ÇINAR, M., YÜKSEL, K. D., "Analysis of Well-Test Pressure Data from Faulted Systems", paper presented 15. Uluslararası Türkiye Petrol ve Doğal Gaz Kongresi ve Sergisi (IPETGAS), Ankara, 11-13 Mayıs 2005.
- [17] SATMAN, A., SERPEN, U., ONUR, M., "İzmir Balçova-Narlıdere Jeotermal Sahasının Rezervuar ve Üretim Performansı", Proje raporu (yayınlanmamış), Ocak 2002.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ONUR

Istanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde görev yapan Mustafa Onur 1960 yılı Diyarbakır doğumludur. Uzmanlık ve araştırma alanları arasında kuyu basınç testleri tasarımı, modellemesi ve analizi; rezervuar tanımlaması ve sayısal rezervuar simülasyonu; jeotermal rezervuar mühendisliği ve doğrusal olmayan parametre tahmini yer almaktadır. Suudi Arabistan King Saud Üniversitesi ve ABD Tulsa Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümlerinde de ziyaretçi profesör olarak görev yapan Dr. Onur, Lisans derecesini 1982’de ODTÜ’den, Master derecesini 1985’de ve Doktora derecesini 1989’da ABD Tulsa Üniversitesi’nden aldı. Tüm dereceleri Petrol Mühendisliği alanındadır. 2004’de Society of Petroleum Engineers (SPE)’den “Outstanding Technical Editor” ödülü alan Dr. Onur bugüne kadar uluslararası ve ulusal toplam 35 adet makale ile 50’nin üzerinde bildiri yayınlamıştır.