

KUYU TESTLERİ ANALİZİNDE DEKONVOLÜSYON VE UYGULAMALARI

Mustafa ONUR

ÖZET

Dekonvolüsyon, kuyuda uygulanan değişken debiden etkilenen rezervuar sisteminin sabit debideki eşdeğer basınç azalım ("drawdown") tepkisini oluşturmak için kullanılan bir ters çözümüleme işlemine verilen isimdir. Son yıllarda, endüstride kullanılan basınç-ölçerlerin çözünürlük ve hassasiyetlerinin iyileşmesi, kuyu dibi kalıcı basınç ve debi ölçerlerin yaygınlaşması ve yeni geliştirilen özellikle debi verileri üzerindeki hatalara toleranslı dekonvolüsyon algoritmalarının geliştirilmesi ile birlikte dekonvolüsyonun önemi artmıştır. Dekonvolüsyon sayesinde, alışlagelmiş basınç yükselme testi dönemi verilerinin analizinden elde edilecek kuyu/rezervuar sistemine ait bilgiden daha fazla bilgi; özellikle de rezervuarı tanımlayan akışa kapalı ve beslenmeli sınırlar ve dolayısıyla rezervuar veya rezerv hacmi, elde edilebilmektedir. Bu tür bilgiler rezervuar tanımlaması ve dolayısıyla daha güvenilir performans tahminlerinin yapılması için gerekli olduğu gibi, sahaların değerlerinin biçilmesinde ve geliştirilmesi aşamalarında alınacak kararlara yardımcı olmakta; yatırım maliyetlerini ve risklerini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır.

Bildiride, dekonvolüsyonun kuyu testi analizi için önemi bir araç olduğu yapay olarak üretilmiş bir kuyu testi örneği ve Afyon Ömer-Gecek sahasında yapılmış iki gerçek kuyu testi örneği üzerinde, gösterilmektedir. Ayrıca, dekonvolüsyon analizi ile rezervuar sisteminden en üst düzeyde ve güvenilir şekilde bilgi üretmek için kuyu basınç testlerinin nasıl tasarlanması gerektiği hakkında öneriler sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

Basınç-debi dekonvolüsyonu değişken debili basınç testi verilerini kullanarak, sabit debili üretim durumunda elde edilecek basınç azalım testi verisine çevirme işlemidir. Elde edilen basınç azalım ve türevi standart kuyu basınç testi analiz yöntemleriyle kuyu ve rezervuar özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir [1]. Unutulmamalıdır ki standart analiz yöntemleri sadece sabit debili testlerin analizinde kullanılabilir. Ancak gerçek uygulamalarda üretim süresinde debi çeşitli nedenlerle (örneğin akış-sonrası-akış ve çok debili testlerde olduğu gibi) artma ve azalma eğilimi gösterebilir. Standart kuyu testi analiz yöntemleri ile debinin sadece sabit olduğu akış dönemlerine [genellikle kapama ("buildup") dönemine] ait veriler analiz edilebilir [1]. Bu yüzden kaydedilen basınç ve debi verisinin çok azı kullanılmış olur. Basınç-debi dekonvolüsyonu ise bu durumu ortadan kaldırarak (test sırasındaki debi değişikliklerini dikkate alarak), standart analiz yöntemlerine göre daha fazla veri analizde kullanılarak, kuyu/rezervuar sistemi hakkında daha fazla bilgiye ulaşılmasını olası kılar [2-4].

Literatürde birçok dekonvolüsyon algoritması olmakla birlikte bunların çok azı yeterli ölçüde hatalı (özellikle debideki) veriler ile çalışabilmektedir. Bu algoritmaların biri von Schroeter vd. [2] diğeri de Levitan [3] tarafından geliştirilen algoritmalarıdır. Her iki algoritmanın avantaj ve dezavantajları Çınar vd. [4] tarafından ayrıntılı olarak araştırılmıştır.

Bu çalışmada, her iki algoritmanın üstün yönlerini bütünleyen yeni bir dekonvolüsyon algoritması geliştirilmiş olup jeotermal kuyu testi verilerine uygulamaları gösterilmektedir. Bildiride, jeotermal rezervuarda basınç testleri iyi tasarlandığı takdirde, dekonvolüsyon sayesinde, rezervuar hakkında daha fazla bilgi elde edilebileceği gösterilmektedir.

Bildiride ilk olarak, debi-basınç dekonvolüsyonuna ait temel bilgiler sunulmaktadır. Daha sonra yapay bir kuyu testi verisine ve Afyon Ömer-Gecek sahasında yapılmış iki gerçek kuyu testi verilerine dekonvolüsyon analizi uygulamaları sunulmaktadır.

2. BASINÇ-DEBİ DEKONVOLÜSYONU

Kuyuda uygulanan değişken debi sinyalinin ve sabit debide (örneğin $q = 1$ lt/s) elde edilmiş basınç azalım türevi sinyali ile konvolüsyonu; bir başka ifadeyle, değişken debi sinyalinin sabit debili basınç azalım türevi sinyali ile "karıştırılmasından" elde edilen yeni sinyal, değişken debi durumunda kuyuda gözlenecek basınca eşittir. Bu cümlelerin matematiksel ifadesi Denklem 1 ile verilmektedir:

$$p_m(t) = p_i - \int_0^t q_m(t') \frac{dp_u(t-t')}{dt} dt' \quad (1)$$

Denklem 1'de yer alan parametreler aşağıda tanımlanmaktadır:

- p_i : Rezervuar ilk basıncı, bar
- $p_m(t)$: Herhangi bir zaman t 'deki kuyu dibi akış basıncı, bar
- $p_u(t)$: Herhangi bir zaman t 'deki birim debi üretimde kuyu dibinde elde edilecek basınç düşümü, bar.
- $q_m(t)$: Kuyuda uygulanan Herhangi bir t 'deki yüzey debisi, lt/s.

Denklem 1'de kuyu ve rezervuar sisteminin üretim başlamadan önce denge durumunda olduğu ve ilk basınç p_i 'nin rezervuar içerisinde her yerde aynı olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca, Denklem 1'in gözenekli ortamda az sıkıştırılabilirlikli tek-faz akışkan akışı için geçerli olduğunu belirtmek gerekir. Denklem 1, petrol mühendisliği literatüründe ilk olarak 1949 yılında van Everdingen ve Hurst [5] tarafından süperpozisyon ilkesi kullanılarak türetilmiştir. Basınç-debi konvolüsyon denklemi olarak da isimlendirilmektedir.

Basitçe ifade etmek istersek; kuyu testlerinde konvolüsyon, kuyu/rezervuar sistemini temsil eden model bilindiğinde (p_u) ve kuyuda uygulanan debi tarihçesi (q_m) verileri verildiğinde, Denklem 1'den değişken debili durumdaki kuyu dibi akış basıncının hesaplanması işlemidir. Dekonvolüsyon ise, ölçülmüş değişken debi tarihçesi (q_m) ve değişken debide kaydedilmiş kuyu dibi basınç (p_m) verilerini Denklem 1'de kullanarak, birim sabit debideki basınç azalım sinyali p_u ve logaritmik (veya Bourdet) türevi p_u' 'nin hesaplanması işlemidir. Bu anlamda, konvolüsyon bir ileri problem uygulaması iken, dekonvolüsyon bir ters problem uygulamasıdır.

Dekonvolüsyonun, basınç/debi verileri üzerinde hatalar olduğunda, kötü koşullu ters bir çözümleme yöntemi olduğu bilinmekle beraber, literatürde son yıllarda yapılan çalışmalar ile basınç/debi üzerindeki hatalara daha az duyarlı dekonvolüsyon algoritmaları geliştirilmiştir [2-4]. Bu algoritmalarından biri von Schroeter vd. [2] diğeri de Levitan [3] tarafında geliştirilen algoritmalar. Burada matematiksel detayları sunulmamakla beraber, bu çalışmada her iki algoritmanın üstün yönlerini bütünleyen yeni bir dekonvolüsyon algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmanın detayları Onur vd. [6] tarafından yazılan bildiride bulunabilir. Bu algoritma ile yapılan uygulamalar bir sonraki bölümde sunulmaktadır.

3. UYGULAMALAR

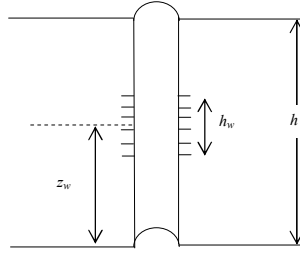
Bu bölümde bir yapay kuyu testi örneği ve Afyon Ömer-Gecek sahasında yapılmış iki gerçek kuyu testi verisi üzerinde dekonvolüsyonun kuyu testi analizinde uygulamaları sunulmaktadır. Bu uygulamalarla dekonvolüsyonun standart kuyu testi analiz yöntemlerine göre sağladığı avantajlar gösterilmekte, dekonvolüsyondan en iyi şekilde istifade etmek için kuyu testlerinin nasıl tasarlanması gerektiği hakkında bilgi ve öneriler sunulmaktadır. Bu uygulamalardan da görüleceği gibi, dekonvolüsyonda daha fazla veri analizde kullanılarak, kuyu/rezervuar sistemi hakkında daha fazla bilgiye ulaşılmak mümkün olmaktadır.

3.1. Yapay Örnek Kuyu Testi Uygulaması

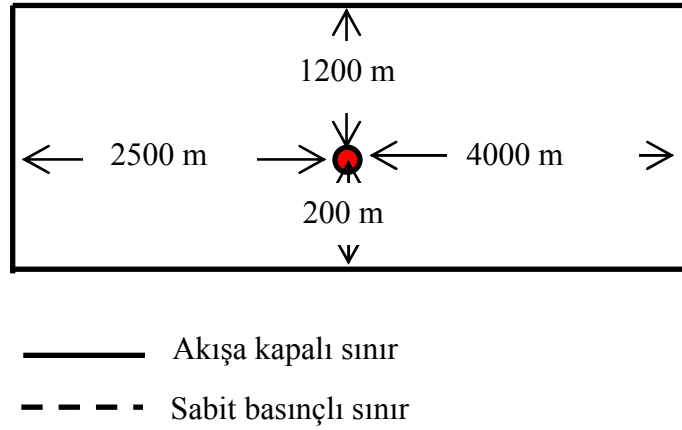
Bu yapay örnek uygulamada homojen, izotropik bir rezervuardan, toplam rezervuar kalınlığının belirli bir kısmından (kısmi üretime açık) üretim yapan bir dik kuyu (Şekil 1) göz önünde bulundurulmuştur. Bugüne kadar ülkemizdeki jeotermal kuyularda yaptığımız testler ve değerlendirmeleri sonucunda, üretim aralığı boyunca kuyuyu kesen çatlakların neden olduğu yüksek geçirgenlik gözlemlenmektedir. Bu nedenle sıkça testlerde Darcy olmayan (veya "türbülanslı") akış gözlemlenmektedir [1]. Bu nedenle, bu tür etkileri içeren gerçek testlere benzeştirmek amacıyla, bu yapay test örneğinde Darcy olmayan akış etkileri de (Darcy olmayan akış katsayısı, D ile) göz önünde bulundurulmuştur. Rezervuar geometrisi ve sınırları Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'den görüleceği gibi, rezervuar dikdörtgen şekilli olup, üç tarafı akışa kapalı, bir sınırı da sabit basınçlı (beslenmeli) dir. Kullanılan model parametrelerine ait değerler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Model parametre değerleri; yapay örnek uygulama 1.

Gözeneklilik, ϕ	0.10
Rezervuar kalınlığı, h , m	200
Açık aralığını uzunluğu, h_w , m	70
Rezervuarın alt sınırından açık aralığın merkezine uzaklık, z_w , m	100
Kuyu yarıçapı, r_w , m	0.1088
Mekanik zar faktörü S	-2
Kuyu içi depolama katsayısı, C , m^3/bar	0.012
Non-Darcy Coefficient, D , $(\text{lt/s})^{-1}$	6.5×10^{-2}
Geçirgenlik, k , Darcy	2
İlk basınç, p_i , bar	21
Rezervuar ilk sıcaklığı, T_i , °C	100
Suyun vizkozitesi, μ_w , cp	0.295
Suyun yoğunluğu, ρ_w , kg/m^3	963
Suyun entalpisi (21 bar@100 °C), kJ/kg	421
Suyun özgül ısı kapasitesi, kJ/(kg °C)	4.2
Kayaç katı kısmı özgül ısı kapasitesi, kJ/(kg °C)	1
Kayaç katı kısmı yoğunluğu, kg/m^3	2650
Etken kayaç sıkıştırılabilirliği, c_r , bar^{-1}	4.4×10^{-5}
Suyun 21 bar @ 100 °C'de sıkıştırılabilirliği, c_w , bar^{-1}	4.7×10^{-5}
Toplam ($c_t = c_r + c_w$) sıkıştırılabilirlik, bar^{-1}	9.1×10^{-5}
Rezervuar kaba hacmi, V_b , m^3	1.82×10^9
Yerinde su miktarı, $V_b\phi$, m^3	1.82×10^8
Yerinde toplam (kayaç + su) ısı miktarı, $V_b\phi$, kJ	5.08×10^{14}



Şekil 1. Kuyu geometrisi; yapay kuyu testi uygulaması.



Şekil 2. Rezervuar geometrisi ve sınır koşulları; yapay kuyu testi uygulaması

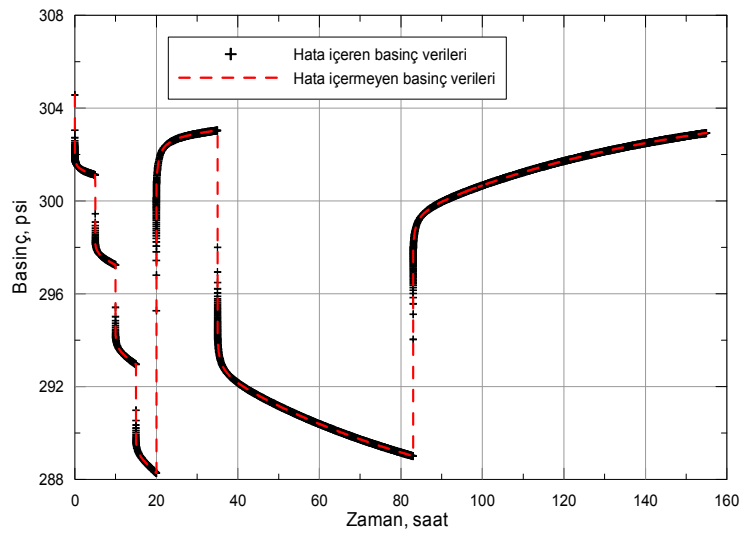
Tablo 1'deki parametre değerleri kullanılarak, yapay olarak türetilmiş basınç ve değişken debi verileri Şekil 3a ve 3b'de gösterilmektedir. Gerçek saha basınç verilerine benzeştirmek için, basınç verilerine 0.01 psi çözünürlüğe sahip bir ölçerle kaydedildiği kabul edilerek basınç verilerine gürültü eklenmiştir (Şekil 3a). Debi verileri üzerinde ± 1 lt/s ortalamalı normal dağılımlı hata olduğu kabul edilmiştir (Şekil 3b). Göz önünde bulundurulan debilerini büyüklüğü söz konusu olduğunda bu hata, debide ortalama %3'lük hatalı bir ölçüme karşılık gelmektedir. Dekonvolüsyon uygulamalarında kullanılacak hatalı basınç ve debi davranışları hatasız verilerle kıyaslamalı olarak Şekil 3'de gösterilmektedir.

Şekil 3'den görüleceği gibi, göz önünde bulundurulan yapay test örneğinde, testin ilk 20 saatlik döneminde her biri 5 saat uzunlukta sabit yüzey debisinde akış-sonrası-akış testi düşünülmüştür. Akış sonrası akış test döneminin temel amaçlarından biri, bilindiği gibi kuyunun üretim-basınç ilişkisi ("IPR") eğrisini oluşturmak içindir [1]. Akış-sonrası-akış testinden hemen sonra 20-35 saat arası 15 saatlik bir kapama ("build-up") dönemi düşünülmüştür. Bu kapama döneminin yapay test tasarımında göz önünden bulundurulmasının nedeni, rezervuar/kuyu modelini tanıma ve model parametrelerinin bireysel değerlerini (geçirgenlik, zar faktörü, Darcy olmayan akış katsayısı, vs.) tahmin etmek içindir [1]. Hemen bu kapama döneminin arkasından düşünülen 48 saatlik sabit debide uzun üretim dönemi ve arkasından 72 saatlik kapama dönemi kuyudan daha uzak olası rezervuar sınırlarını belirlemek ve dekonvolüsyonun veri analizine kattığı faydaları belirtmek içindir.

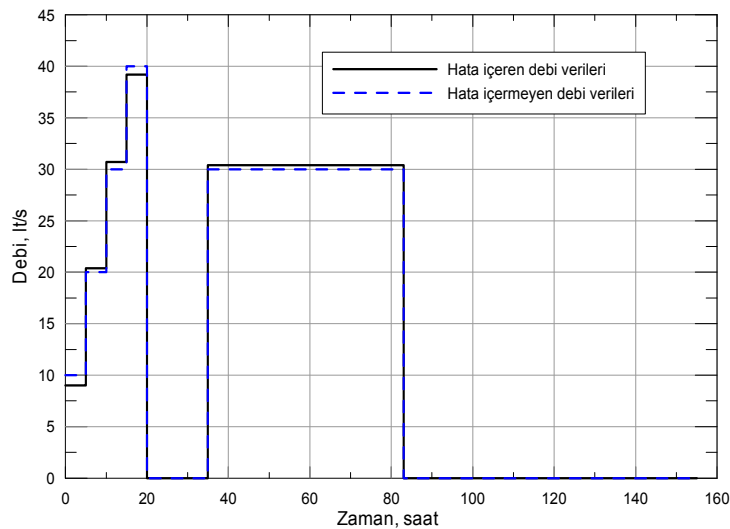
Sonuç itibarıyla, akış-sonrası-akış dönemleri, bir uzun üretim ve iki kapama dönemlerini içerecek şekilde tasarlanan bu yapay kuyu testi toplam 155 saatlik (veya 6.5 günlük) bir teste örnektir. Amaç, Şekil 3'de verilen basınç/debi verilerine dekonvolüsyon uygulamasıyla, Şekil 1 ve 2'de verilen (parametreleri Tablo 1'de verilen) kuyu/rezervuar sistemine ait alışılmış kuyu testi analiz yöntemlerine göre daha fazla bilginin elde edilebileceğini göstermektir. Bir başka deyişle, sahada böyle bir test tasarımı uygulandığında dekonvolüsyon uygulamasıyla kuyu/rezervuar geometrisi, sınırları, yerinde akışkan ve ısı rezervi hakkında bilgilere nasıl ulaşabileceğimizi göstermektedir.

Bilindiği gibi, rezerv hesaplamalarında gerekli olan jeotermal sahanın kaba ve gözenek hacimleridir ki bu hacimlerin hesaplanması rezervuar sınırlarının belirlenmesini gerektirmektedir. Bu örnek uygulama da gösterileceği gibi, kuyu testi ve dekonvolüsyon ile rezervuar sınırı ve hacimleri hakkında bilgilere ulaşabilmektedir.

Şekil 4’de 0-5 saatleri arasındaki 1. akış dönemi, 20-35 saatleri arasındaki 15 saatlik 1. kapama dönemi ve 83-155 saatleri arasındaki 72 saatlik 2. kapama dönemi basınç değişim ve türevi verilerine ait alışılagelmiş log-log grafikleri gösterilmektedir. Şekil 4’de 1. ve 2. kapama dönemine ait basınç değişimi ve türev verileri, kapama öncesi debilerin (örneğin 1. kapama için kapama öncesi debi 40 lt/s dir; bkz. Şekil 3) 1. akış dönemi debisi (10 lt/s) değerine bölünmesiyle elde edilen sayı (örneğin 1. kapama için bu sayı $40/10 = 4.0$ tür) ile bölünerek çizilmiştir. Bu sayede, debi değişikliğinin basınç ve türev verileri üzerindeki etkileri elemine edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, debi değişikliğinin veriler üzerindeki etkisini azaltmak için kullanılan alışılagelmiş çok debili-süperpozisyon zaman fonksiyonları (örneğin kapama dönemleri için uygun süperpozisyon zaman fonksiyonu olan çok-debili Agarwal eşdeğer zamanı) kullanılarak çizilmiştir.



(a) Basınç

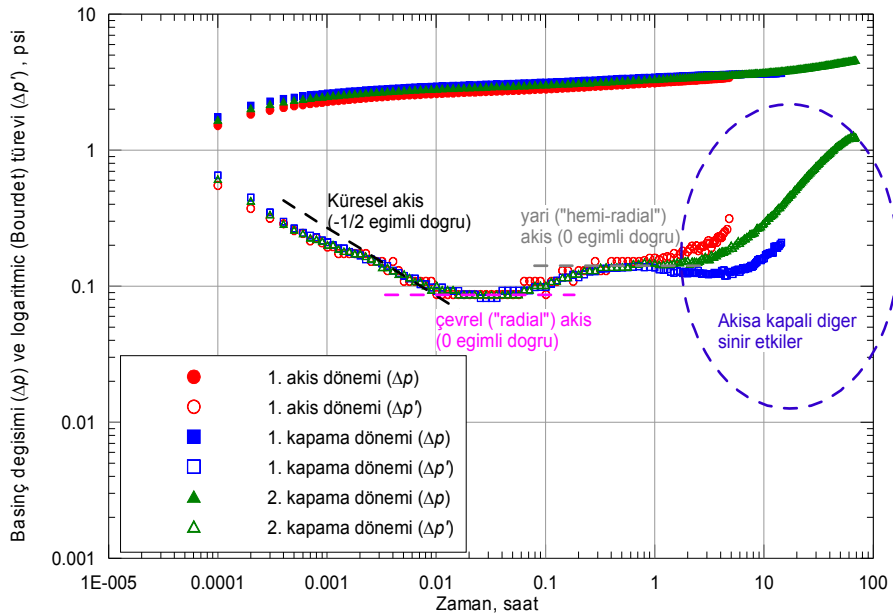


(b) Debi

Şekil 3. (a) Basınç ve (b) debi verileri; yapay kuyu testi uygulaması.

Şekil 4'den çıkarılabilecek önemli sonuçlar şöyle özetlenebilir:

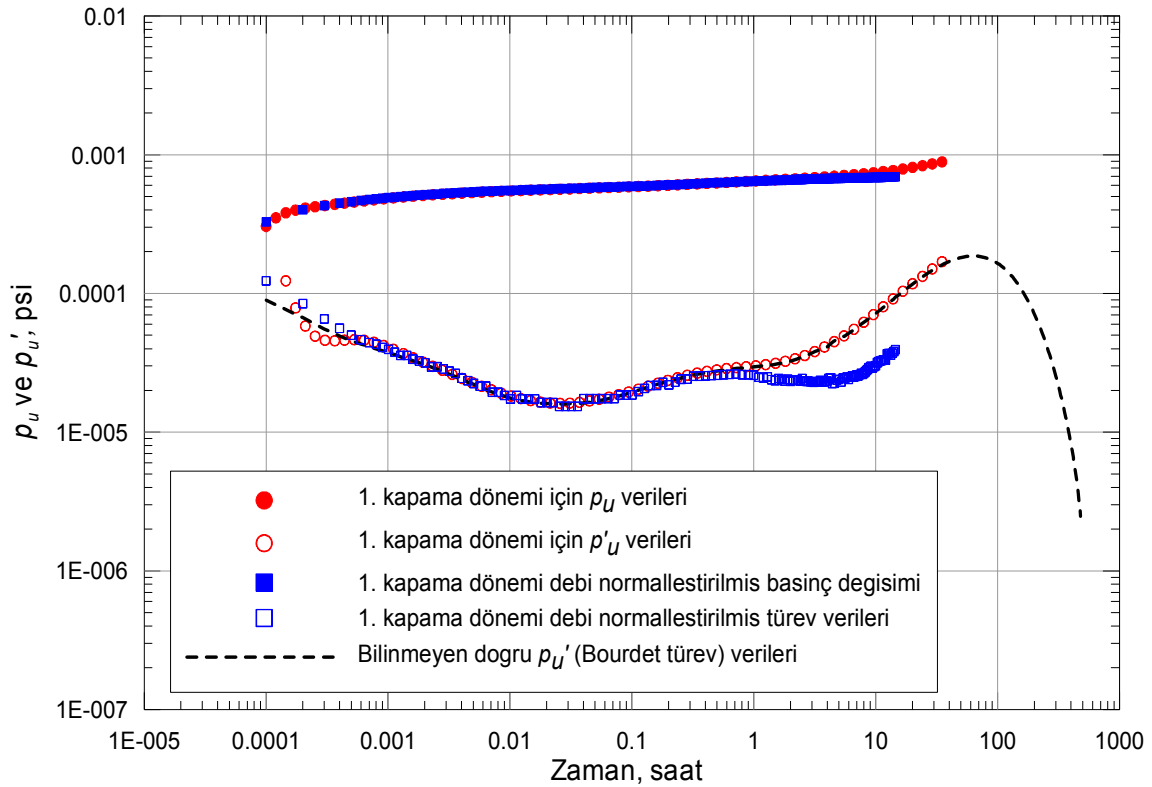
1. Akış ve kapama dönemi basınç verilerinin süperpozisyon zamanına dayanan alışlagelmiş log-log grafiği analizlerinden ancak bu dönemlerin toplam süresi içerisinde kuyu/rezervuar sistemini yansıtan bilgiler elde edilebilmektedir. (Burada alışlagelmiş log-log analizinde, incelenen dönem öncesindeki debi değişikliği etkilerinin süperpozisyon zamanı ile ortadan kaldırılabileceği ve her dönemin sabit debili basınç azalım testi gibi değerlendirilebileceği varsayımının yapıldığını belirtmek yerinde olacaktır.) Örneğin, 15 saatlik birinci kapama dönemi söz konusu olduğunda, kuyu/rezervuar sisteminin sadece 15 saatlik davranışı türev verileri tarafından yansıtılabilmektedir. Bu süre içerisinde gözlemlenen akış rejimleri şunlardır: 0.002-0.01 saat arası kuyunun kısmi aralıklı üretim yapan bir kuyu olduğunu belirten küresel akış (-1/2 eğimli türev doğrusu davranışı), 0.015-0.07 saat arası kuyuya tüm rezervuar kalınlığı boyunca gerçekleşen radyal ("çevrel") akışı yansıtan 0 eğimli türev doğrusu davranışı, 0.2-1 saat arasında görülen kuyuya yakın akışa kapalı bir sınırı (Şekil 2'de kuyuya 200 m uzaklıkta görülen sınırı) belirten yarı-radyal akış ve 7-15 saat arasında kuyunun iki akışa kapalı sınır arasında olduğunu belirten 1/2 eğimli lineer akış.
2. Her iki kapama dönemine ait türev verilerinin yaklaşık 1 saatten sonra kapama öncesindeki değişken debi etkilerinden dolayıdır ve bu etkilerin süperpozisyon fonksiyonu ile düzeltilmesi mümkün olmamaktadır. Yaklaşık 1 saatten sonra her üç döneme ait türev eğrilerinin önemli ölçüde birbirlerinden ayrışması rezervuar sınırlarının ve koşullarının ne olduğunu anlaşılmasını zorlaştırmaktadır.
3. Her üç döneme ait basınç değişim verilerinin birbirlerinden yaklaşık bir sabit kadar düşey eksende ayrışması, test sırasında toplam zar faktörünün (mekanik zar faktörü, S + Darcy olmayan akıştan dolayı olan debi bağımlı zar faktörü, Dq) Darcy olmayan akıştan kaynaklanan zar faktörü (Dq) birleşenin debiye bağımlı değişiminden kaynaklanmaktadır. Türev verileri, çok erken dönemlerdeki kuyu içi depolaması etkilerinin olduğu dönem hariç (0.0003 saatten önce), zar faktöründen bağımsız olduğundan, ayrışım göstermemektedir. Türev verilerinde 1 saatten sonra gözlemlenen ayrışım, bir önceki şıkta değinildiği gibi, kapama öncesindeki debi değişikliklerinden kaynaklanmaktadır.



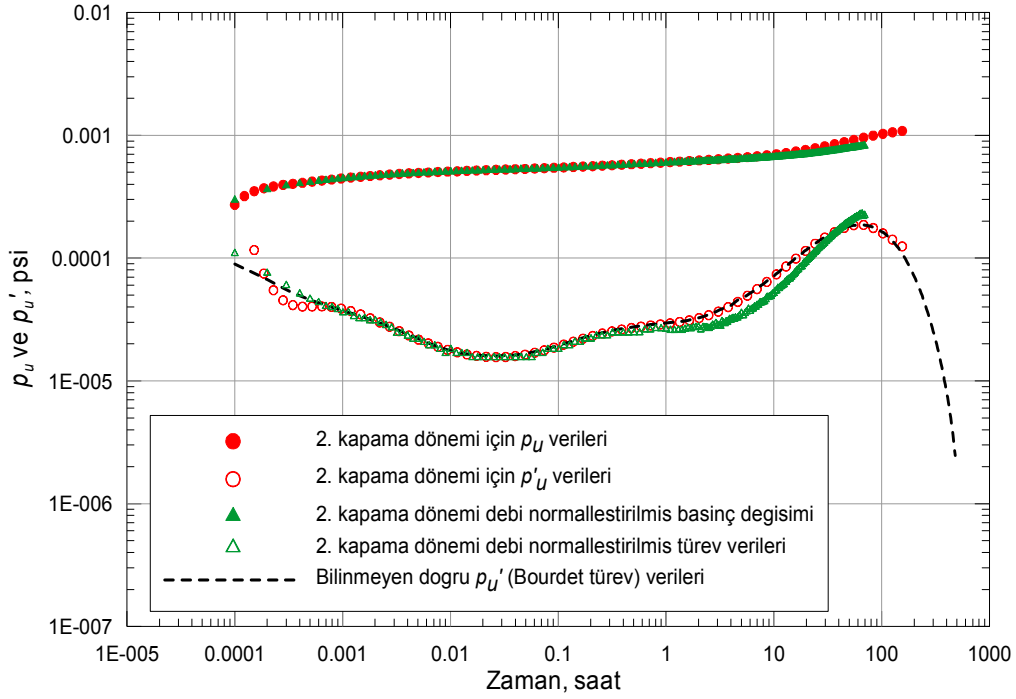
Şekil 4. 1. akış, 1. kapama ve 2. kapama dönemi basınç değişim ve türev verileri için alışlagelmiş log-log grafikleri; yapay kuyu testi uygulaması.

Şekil 5’de sadece 20-35 saat arasındaki 15 saatlik 1. kapama döneminde “kaydedilmiş” basınç verileri ve 0-35 saat arası debi verileri dekonvolüsyonda kullanılarak oluşturulmuş 35 saat süreli birim sabit debi basınç değişim ve türev verileri gösterilmektedir. Şekil 6’da ise sadece 83-155 saat arasındaki 72 saatlik 2. kapama döneminde kaydedilmiş basınç verileri ve 0-155 saat arası debi tarihçesi kullanılarak yapılan dekonvolüsyon uygulamasından elde edilen 155 saat süreli birim debili basınç değişim ve türev verileri gösterilmektedir. Kıyaslama amacıyla her iki grafikte de bu kapama (15 ve 72 saat süreli) dönemlerine ait alışlagelmiş log-log basınç değişim ve türev verileri ile bilinmeyen doğru birim debili basınç azalım testi türev verileri gösterilmiştir.

Şekil 5’den görüleceği gibi, dekonvolüsyon sayesinde, sadece 15 saatlik 1. kapama dönemi basınç ve 35 saat sonuna kadar olan debi verileri kullanılarak, toplam 35 saat uzunluğunda eşdeğer birim debili basınç azalım testi basınç değişimi ve türev verileri (kullanılan basınç ve debi üzerinde hatalar olmasına rağmen) başarılı bir şekilde türetilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 6’da 72 saatlik 2. kapama dönemi ve 155 saate kadar olan debi verileri kullanılarak toplam 155 saat uzunluğunda eşdeğer basınç azalım testi verileri türetilmiştir. Ayrıca, Şekil 5 ve 6’dan görüleceği gibi, alışlagelmiş analiz için basınç değişimi ve türev verileri hem dekonvolüsyondan türetilen verilerden daha kısadır hem de debi değişkenliğinden dolayı akış rejimlerini bozmaktadır. Dekonvolüsyon sayesinde, bu örnek uygulamada iki kapama dönemi verilerinden, Şekil 2’de verilen tüm sınırlar, sınırlara uzaklıklar ve akış koşulları belirlenebilmekteken aynı bilgiler alışlagelmiş debi normalleştirilmiş kapama dönemi verilerden elde edilememektedir. Dikkat edilecek olursa, yaklaşık 100 saatten dekonvolüsyon türev verisi davranışında görülen ani azalım, Şekil 2’de gösterilen kuyuya 4000 m uzaklıktaki sabit basınçlı (beslenmeli) sınırdan dolayıdır ve 155 saatlik bir test ile diğer sınırlara ek olarak bu sınırın da gözlemlenmesi mümkün olmuştur.



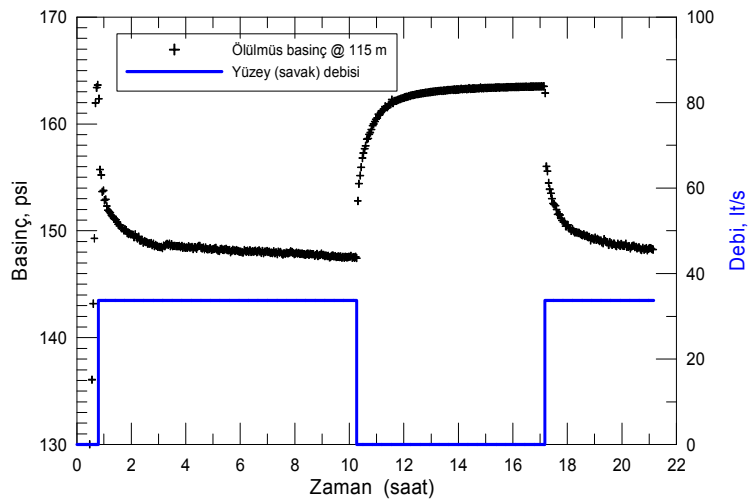
Şekil 5. 1. kapama döneminden elde edilen dekonvolüsyon verilerinin alışlagelmiş analiz için kullanılan 1. kapama dönemi verileri ve bilinmeyen doğru dekonvolüsyon verileri ile kıyaslaması.



Şekil 6. 2. kapama döneminden elde edilen dekonvolüsyon verilerinin, alışlagelmiş analiz için kullanılan 2. kapama dönemi verileri ve bilinmeyen doğru dekonvolüsyon verileri ile kıyaslaması.

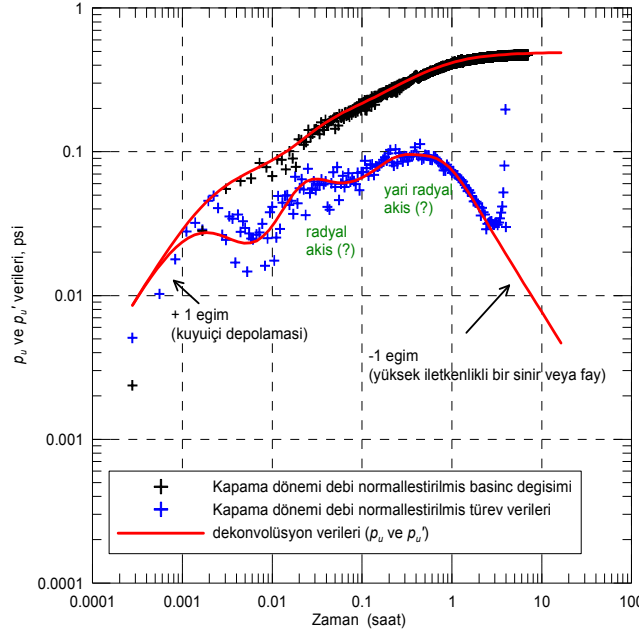
3.2. Gerçek Saha Kuyu Testi Örneği 1; Afyon Ömer-Gecek Sahası R260 Kuyusu Testi

Afyon Ömer-Gecek R-260 kuyusunda 10.09.2004 tarihinde 115 m derinliğe İller Bankası quartz basınç-ölçeri inilerek yapılan değişken debili bir testine ait veriler Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, test süreleri 10 ve 4 saat olan iki akış (üretim) ve bu iki üretim dönemi arasında 6 saatlik bir kapama dönemi olan değişken iki debili bir test uygulamasıdır. Her iki üretim döneminde de yüzey debi sabit ve yaklaşık 33.7 lt/s olarak savaktan hesaplanmıştır. Kuyunun toplam derinliği 166 m'dir ve üretime açık aralık 100-166 m (kuyu başından) arasında olup 66 m'dir. 115 m'de ölçülen ilk basınç ve sıcaklık değerleri, sırasıyla 164.0 psi ve 103.6°C dir.



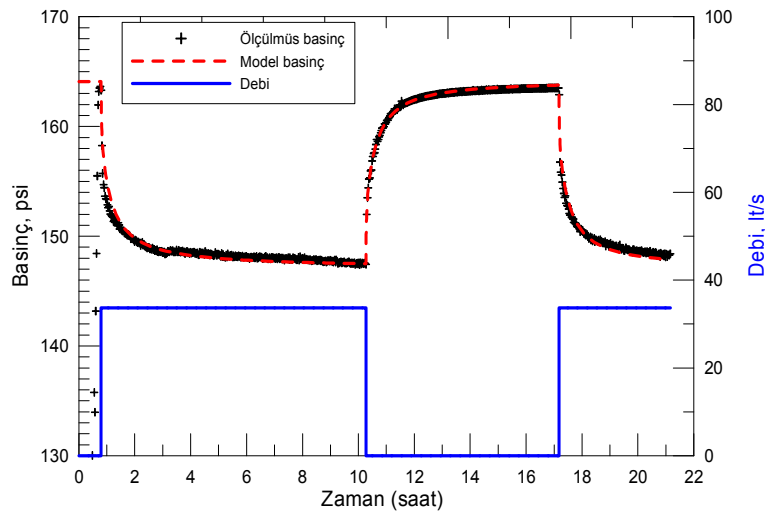
Şekil 7. Afyon Ömer-Gecek R-260 kuyusu değişken debili testine ait basınç/debi verileri.

Sadece 6 saatlik kapama dönemi basınç verileri ve kapama öncesi debi verileri kullanılarak yapılan dekonvolüsyon uygulamasından elde edilen toplam 15 saatlik eşdeğer basınç azalım testi verileri, alışılagelmiş debi normalleştirilmiş 6 saat uzunluğundaki kapama dönemi basınç değişim ve türevi verileri ile kıyaslamalı olarak Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Afyon Ömer-Gecek R-260 kuyusu değişken debili testine ait basınç/debi verileri.

Dekonvolüsyon türevi (p_u') verilerinin erken zamanlardaki (0.0003-0.01 saat arası) davranışı kuyu içinde iki fazlı akış ve izotermal akıştan dolayı değişken kuyu içi depolaması etkilerine işaret etmektedir. Dekonvolüsyon türev verilerinin, 0.01 saatten sonraki davranışı kuyunun birbirini dik kesen biri akışa kapalı diğeri beslenmeli faya yakın olduğunu göstermektedir. Bu model kullanılarak kaydedilmiş basınç verilerine yapılan tarihsel karşılaştırma Şekil 9'da, bu karşıtırmadan elden edilen parametre değerleri ise Tablo 2'de verilmektedir. R-260 kuyusunda akışa kapalı sınır 63 m, sabit basınçlı sınıra uzaklık ise 126 m olarak tahmin edilmektedir (Tablo 2). Zar faktörü değerinin -5 bulunması, kuyuyu kesen oldukça yüksek iletkenli bir çatlak ağının varlığına işaret etmektedir.



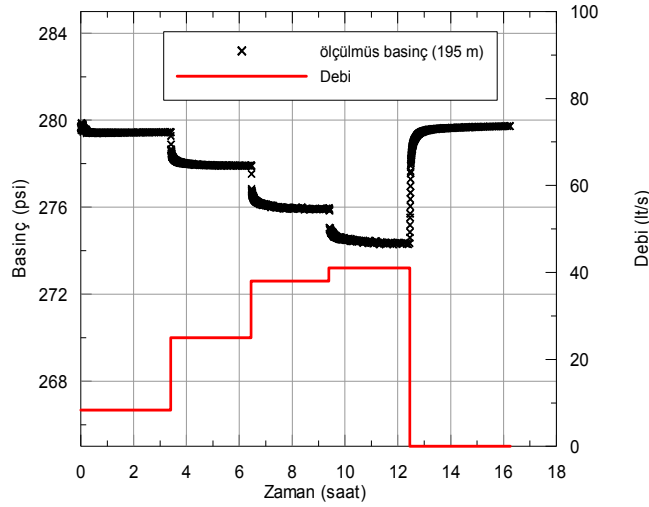
Şekil 9. Afyon Ömer-Gecek R-260 kuyusu değişken debili testinin tarihsel karşılaştırması.

Tablo 2. Model parametre değerleri; Afyon Ömer-Gecek R-260 kuyu testi.

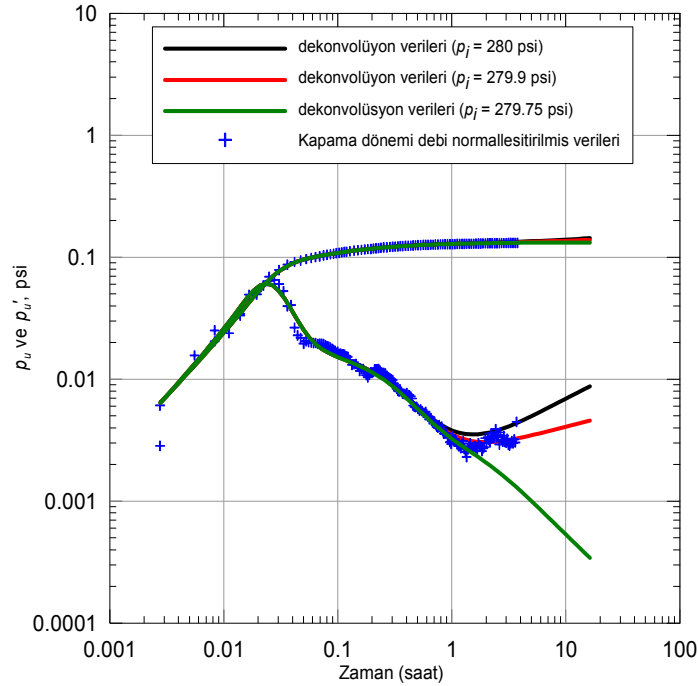
Model Parametreleri	
kh (Darcy-m)	47.8
p_i , psi	164.09
S (zar faktörü)	-4.9
d_{r1} , m (akışa kapalı sınıra kuyudan uzaklık)	63
d_{r2} , m (sabit basınçlı sınıra kuyudan uzaklık)	126
h , m (rezervuar kalınlığı)	65
μ , cp@103.6 °C	0.281
r_w , m	0.108
$\phi c_t h$ (m/psi)	2.35×10^{-4}

3.2. Gerçek Saha Kuyu Testi Örneği 2; Ömer-Gecek Sahası AF-21 Kuyusu Çok-Debili Testi

Burada sunulan ikinci saha örneği, Afyon Ömer-Gecek sahası AF-21 kuyusunda yapılan çok debili bir teste aittir (Şekil 10). Şekil 10'da gösterilen basınç ölçüleri 195 m derinlikte İller Bankası quartz basınç-ölçeri ile kaydedilmiştir. Debi verileri ise, yüzeyde savakta yapılan ölçümlerden hesaplanmıştır. Kuyunun toplam derinliği 210 m'dir. Ölçüm derinliğinde kaydedilmiş ilk basınç ve sıcaklık, sırasıyla, 279.76 psi ve 107.8 °C civarındadır. Şekil 10'dan görüldüğü gibi, AF-21 kuyunda yapılan test, her biri yaklaşık 3 saat süreli 4 farklı debili üretim (akış-sonrası-akış) dönemi ve 4 saatlik kapama dönemi olan çok debili bir testtir.

**Şekil 10.** Afyon Ömer-Gecek AF-21 kuyusu çok debili testine ait basınç/debi verileri.

Sadece 4 saatlik kapama dönemi basınç verileri ve 16 saate kadar olan debi verileri kullanılarak yapılan dekonvolüsyon uygulamasından elde edilen toplam 16 saatlik eşdeğer basınç azalım testi verileri, alışlagelmiş debi normalleştirilmiş 4 saat uzunluğundaki kapama dönemi basınç değişim ve türevi verileri ile kıyaslamalı olarak Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Afyon Ömer-Gecek AF-21 kuyusu çok debili testine ait dekonvolüsyon verileri.

Ölçülen ilk basınç değeri 279.75 psi kullanılarak yapılan dekonvolüsyon türev verilerinin 1 saatten sonraki davranışının alışlagelmiş kapama dönemi debi normalleştirilmiş türev verilerin gösterdiği davranış (artış eğilimi) ile tutarlı olmaması, ölçülen ilk basınç değerinde az da olsa bir hata olabileceğine işaret etmektedir. Bunu araştırmak için Şekil 11'de gösterilen iki farklı ilk basınç değeri (279.9 ve 280 psi) kullanılarak yapılan dekonvolüsyon uygulamasından elde edilen türev davranışları da gösterilmektedir. İlk basınç değeri artıktıkça, 1 saatten sonraki dekonvolüsyon türev davranışının önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Hangi ilk basınç değerinin gerçek değeri temsil ettiğini bilmemekle beraber, alışıla gelmiş kapama dönemi verilerinin gösterdiği 1 saatten sonraki artış eğiliminin dekonvolüsyon türev davranışında da gözlemlenmesi için ilk basınç değerinin 280 psi'a çok yakın olması beklenebilir. Bu örnek, geç zamanlardaki dekonvolüsyon türev davranışının ilk basınç değerine oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Dikkat edilecek olursa, bu örnekte ilk basınçta 0.25 psi'lık bir değişim dekonvolüsyon türev sinyalinin 1 saatten sonraki davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. 279.9 ve 280 psi ilk basınç değerlerini doğru kabul ettiğimizde kuyunun sonlu iletkenli beslenmeli bir fay yakınında olduğu sonucuna ulaşılırken, 279.75 psi ilk basıncı değeri doğru değer kabul ettiğimizde çok yüksek iletkenli (sabit basınçlı bir sınır gibi) fay yakınında olduğu sonucuna ulaşabiliriz.

Sonuç itibarıyla, AF-21 kuyusu dekonvolüsyon türev verilerinde gözlemlenen davranış; 0.02 saatten küçük zaman değerlerinde kuyu içi depolama etkilerine sahip, yüksek, ama sonlu iletkenlikli beslenmeli bir sınır yakınında olan, rezervuar kalınlığının belli bir kısmından üretim yapan bir kuyuyu (0.05 ile 0.2 saat arasında gözlemlenen -1/2 eğimli doğru) yansıtmaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bildiride, tanıtilan ve uygulamaları gösterilen dekonvolüsyonun, kuyu testi verilerinden alışlagelmiş analiz yöntemlerine göre daha güvenilir bir şekilde kuyu/rezervuar modelini; rezervuar sınır ve koşullarını, belirlemede önemli bir araç olduğu gösterilmiştir.

Bu nedenle, dekonvolüsyon analizinin testlerin değerlendirilmesinde kullanılması kuyu testlerinden daha çok bilginin elde edilmesi için önerilmektedir. Ancak son uygulamada gösterildiği gibi, dekonvolüsyon kullanılacak ilk basınç değerine duyarlıdır. Bu nedenle, ilk basınç değerlerinin doğru ölçülmesine olanak tanıyan yüksek hassasiyetli basınç-ölçerlerin kullanımı tercih edilmelidir. Ayrıca testler tasarılırken, en az iki kapama döneminin testlerde göz önünde bulundurulması, ilk basınç değerinin doğruluğunu kontrol etmek için hem de test süresini uzatarak daha rezervuar hakkında daha fazla bilgi edinmek için faydalıdır [3,4]. Yeni önerilen dekonvolüsyon algortimaları, debi üzerindeki normal dağılımlı hatalara toleranslı olmasına rağmen, debi ölçümlerinin mümkün olduğunca doğru ölçülmesine sahada özen gösterilmesi gereklidir. Çünkü sonuç itibarıyla, kullanılan debi değerleri basınç verilerinden tarihsel karşılaştırma ile tahmin edilen özellikle geçirgenlik ve zar faktörü değerlerini etkilemektedir [4]. Ayrıca, debi değişikliği etkilerini dikkate alarak dekonvolüsyondan türetilmiş basınç azalım verilerinin, her akış veya kapama dönemi için oluşturulan alışlagelmiş debi normalleştirilmiş veriler ile kıyaslanması sonuçların tutarlılığını anlamak için gerekli ve faydalı olduğu için önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ONUR, M., "Jeotermal Rezervuarlarda Kuyu Basınç Testleri ve Analizi", TESKON 2005, TMMOB Makine Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, 23-26 Kasım 2005.
- [2] VON SCHROETER, T., HOLLAENDER, F., GRINGARTEN, A.C., "Deconvolution of Well Test Data as a Nonlinear Total Least Squares Problem," *SPE Journal* (December) 375, 2004.
- [3] LEVITAN, M.M., "Practical Application of Pressure/Rate Deconvolution to Analysis of Real Well Tests," *SPE Reservoir Evaluation and Engineering* (April) 113, 2005.
- [4] ÇINAR, M., İLK, D., ONUR, M., VALKO, P.P., BLASINGAME, T.A., "A Comparative Study of Recent Robust Deconvolution Algorithms for Well-Test and Production-Data Analysis," *Proceedings, the 2006 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, Texas, September. 24-27, 2006.
- [5] VAN EVERDINGEN, A.F. HURST, W.: "Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs," *Trans., AIME* (1949), **186**, 1949.
- [6] ONUR, M., ÇINAR, M., AKSOY, N., SERPEN, U., SATMAN, A., "Analysis of Well Tests in Afyon Ömer-Gecek Geothermal Field, Turkey," *Trans., AIME* 118, 37, 1936. *Proceedings, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 22-24, 2007

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ONUR

1982 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra, Milli Eğitim Bakanlığı bursunu kazanarak gittiği Amerika Birleşik Devletleri Tulsa Üniversitesi Petrol Mühendisliği bölümünden Haziran 1986'da Master ve Haziran 1989'da Doktora derecelerini aldı. Kasım 1989'dan beri İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Ekim 1992'de Doçent ve Nisan 1999 yılında İTÜ'de profesör oldu. 1995-1997 yılları arasında Suudi Arabistan King Saud Üniversitesi ve 2003 yılında Tulsa Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümlerinde de ziyaretçi profesör olarak görev yaptı. İlgili alanları arasında rezervuar ve üretim mühendisliği problemleri, kararsız kuyu basınç testi tasarım, analiz ve modellemeleri, telli formasyon testleri, sayısal petrol, doğal gaz ve jeotermal rezervuar simülasyonu, jeotermal rezervuar mühendisliği, jeostatistiksel yöntemlerle rezervuar tanımlaması, otomatik olarak geçmiş, statik ve üretim verilerine karşılaştırma ve doğrusal olmayan parametre tahmini yer almaktadır. Halen İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölüm Başkanlığı görevini yürüten Mustafa Onur, Petrol Mühendisleri Odası (Türkiye) ve Society of Petroleum Engineers (A.B.D.) üyesidir.