

# JEOTERMAL REZERVUARLARIN MODELLENMESİ VE PERFORMANS TAHMİNLERİNDEKİ BELİRSİZLİĞİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mustafa ONUR  
Hülya SARAĞ  
Abdurrahman SATMAN

## ÖZET

Jeotermal rezervuarların üretim potansiyeli ve sürdürülebilirliğinin tahmin edilmesi ancak jeotermal rezervuar içerisinde akışkan ve ısı akışını gerçekçi bir şekilde yansıtabilecek modeller yardımıyla yapılabilmektedir. Bu modeller, karmaşık yeraltı sisteminden statik (jeoloji, jeofizik, karot, kuyu logları, akışkan örnekleri) ve dinamik (üretim debileri, rezervuar basınç ve sıcaklık, kararsız kuyu basınç testi ve izleyici testi) ölçümlerden elde edilen bilgilerin birleştirilmesinden oluşturulur. Bu modeller, basit tank modelleri olabileceği gibi üç boyutlu modeller olabilmektedir. İster tank modeli ister üç boyutlu modeller olsun, bütün modellerde kullanılan ortak öğeler, temel kütle ve enerji korunumu yasalarından türetilmiş denklemlerdir. Bu modeller yardımıyla, gelecekte 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 edilmesi ve bu “karar” değişkenlerinin zamansal değişimine bakarak sistemin gelecekte ne ölçüde sürdürülebileceği hakkında bilgilere ulaşılması mümkün olmaktadır. Jeotermal sistemlerin performanslarının tahmini temel olarak üç aşamalı bir işlemi gerektirir: (i) Modellerin oluşturulmasında kullanılacak saha içerisinde yeterli sayıda, güvenilir statik ve dinamik verileri sürekli toplamak, (ii) Bu verilerle olası modeli (veya modelleri) kalibre (“history matching”) ederek güncellemek, (iii) Kalibre edilmiş ve güncellenmiş model(veya modellerle) ile çeşitli üretim/enjeksiyon senaryoları altında sistemin performansını sürdürülebilirlik açısından değerlendirmek ve geleceğe yönelik en uygun işletme stratejilerini saha için belirlemek. Bu aşamaların hepsi kendi içinde çok önemli ve birbirine bağlı olmakla birlikte, nihai amaç, sistemin geleceğe yönelik performansını ölçüm ve modellerdeki belirsizliği de göz önünde bulundurarak tahmin etmektir. Ölçümlerde ve modellerde kaçınılmaz olarak belirli ölçüde belirsizlikler söz konusu olacağından, üçüncü aşamada bu ölçüm verilerine kalibre edilmiş modellerle yapılacak performans tahminleri üzerinde bu belirsizliklerin yansıtacağı kesindir.

Bu çalışmada, performans tahminlerine bu belirsizliklerin nasıl yansıtacağı ve performanstaki belirsizliklerin nasıl değerlendirileceği üzerinde durulacaktır. Basitliği nedeniyle, farklı tank modelleri kullanılarak, sanal bir örnek üzerinde kalibre edilmiş modellerle performans tahminleri üzerindeki belirsizliklerin istatistiksel yöntemlerle nasıl belirlenmesi gerektiği konularına yer verilmiştir.

## 1. GİRİŞ

Daha öncede değinildiği gibi, jeotermal enerjiyi içeren sıcak su-kayaç sisteminin üretim potansiyeli ve sürdürülebilirliğinin tahmin edilmesi ancak jeotermal rezervuar içerisinde akışkan ve ısı akışını gerçekçi bir şekilde yansıtabilecek modeller yardımıyla yapılabilmektedir.

Performans tahminlerinde kullanılacak modeller, basit tank (“lumped parameter”) modelleri olabileceği gibi bir, iki ve üç boyutlu sayısal modeller olabilmektedir [1-4]. Bu modellere ait detaylı bilgiler Kaynaklar [1 ve 4]’de verilmektedir. 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 içersindeki ortalama ve/veya yerel basınç/sıcaklık dağılımları ile sistemin ortalama basınç/sıcaklıklarının tahmin edilmesinde kullanılır. Genelde “karar” değişkenleri olarak isimlendirilen model basınç ve sıcaklık dağılımlarının zamansal değişimine bakılarak sistemin gelecekte ne ölçüde sürdürülebileceği hakkında bilgilere ulaşılabileceği hakkında bilgilere ulaşılabilmektedir.

Modellerin oluşturulması ve işletilmesi için gerekli olacak verilerdir. Genelde bu modellerin oluşturulmasında başvurulan 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 içersindeki 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 içersindeki yapısal jeolojik özelliklerin, fayların belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Genelde, jeolojik ve jeofizik veriler sistemin statik (durağan) durumunu tanımlayan parametrelerin belirlenmesinde kullanılır. Buna karşın kuyu testleri (üretim debisi, 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. Jeotermal sistemlerin kuyu basınç testleri verilerinden tanımlanması Kaynak [5]’de ayrıntılı olarak bulunabilir.

Sahanın potansiyel ve performans tahmini için seçilecek model, Kaynaklar [1-5]’de belirtildiği gibi elde ki verilerin niteliğine ve niceliğine bağlıdır. Eğer yeterli miktarda jeoloji, jeofizik ve üretim performansına yönelik veri (kuyuların üretim, basınç ve sıcaklık verileri) varsa, bu durumda başvurulacak en uygun model üç boyutlu sayısal modeller olacaktır. Ancak, elde yeterli veri bulunmayan, yeni bulunan jeotermal sahalar ile yeterli ve güvenilir miktarda üretim geçmişi verisi toplanmamış jeotermal sahalarda, basitliği ve bir, iki veya üç boyutlu modellere göre daha az sayıda veri gerektirdiği için tank (“lumped parameter”) modelleri performans tahminleri yapmak için tercih edilmektedir [2-4].

Göz önünde bulundurulmuş model ne olursa olsun, performans tahmininde ilk aşama, modelin ilgili çıktılarının, sahadaki üretim/reenjeksiyon faaliyetine bağlı olarak kuyularda ölçülmüş veya gözlemlenmiş basınç (veya seviye değişimi), sıcaklık, izleyici madde, entalpi–zaman gibi dinamik verilere çakışacak şekilde bilinmeyen model parametre değerlerinin belirlenmesi (veya kalibre edilmesi) işlemidir. Bu işlem, geçmiş verilere çakıştırma (“history matching”) olarak da bilinir. Kalibrasyon işlemi, sahadan ek dinamik veri elde edildikçe sürdürülür. Farklı üretim ve reenjeksiyon senaryoları altında, eldeki dinamik verilere kalibre edilmiş (koşullandırılmış) model kullanılarak sistem içersindeki yerel basınç/sıcaklık dağılımları ile sistemin ortalama basınç/sıcaklıklarının tahmin edilmesi ve bu “karar” değişkenlerinin zamansal değişimine bakarak sistemin gelecekte ne ölçüde ve nasıl sürdürülebileceği hakkında bilgilere ulaşılabileceği hakkında bilgilere ulaşılabilmektedir. Kısaca, bu bilgilere bağlı olarak, saha için uygun işletme stratejilerinin belirlenebilmesi mümkün olur. Bu işlem, tahmin (“prediction”) problemi olarak isimlendirilir.

Yukarıda belirtilen geçmiş dinamik verilere çakıştırma işlemi pek çok disiplinde ters problem (“Inverse Problem”) uygulaması olarak bilinir. Ters problem uygulamalarından elde edilen sonuçlar genelde tekil değildir (yani birden fazla olası çözüm vardır). Bunun da dört temel nedeni vardır: (i) Bilinmeyen gerçek jeotermal sistemi temsil etmek için kullanılan idealleştirilmiş matematiksel modeldeki belirsizlik (gerçek sistemden ölçülmüş dinamik verileri aynı oranda sağlayacak birden fazla model olabilir) (ii) Model kalibrasyonu için kullanılan dinamik ölçüm verilerinde ölçüm, okuma hataları veya daha genel bir ifade ile gürültüden (“noise”) kaynaklanan belirsizlik, (iii) Dinamik veriler ile model parametreleri arasındaki ilişkinin doğrusal olmayışı ve dolayısıyla model doğru olsa bile birden fazla bilinmeyen model parametre setinin ölçüm verilerini sağlayabiliyor olması, (iv) Bazı model parametrelerin, belirli

zaman dönemlerinde sistem çıktısı üzerinde etkisinin veya duyarlılığının olmayışı. Örneğin, beslenme sistemlerinde, erken dönemdeki rezervuarın basınç davranışı rezervuarı besleyen sistemin (akiferin) parametrelerinden bağımsızdır. Dolayısıyla, bu dönemdeki rezervuar basıncı davranışından beslenme parametrelerine ait değerleri belirlemek olası değildir.

Performans tahminleri, kalibre edilmiş modeller kullanılarak yapıldığından ve bu işlemde de yukarıda belirtildiği gibi belirsizlik olacağından, kalibre edilmiş modellerle yapılacak performans tahminleri üzerine bu belirsizliklerin bir şekilde yansıtacağı kesindir. Dolayısıyla, performans tahminlerine bu belirsizliklerin nasıl yansıtacağı ve performanstaki belirsizliklerin nasıl değerlendirileceği, jeotermal sistemlerin işletilmesine yönelik kararlarının alınmasında ayrı bir önem taşımaktadır. Bildirinin temel amacı bu konularda bilgi sunmaktır.

Bildiri 5 bölüm halinde düzenlenmiş olup 2. Bölüm'de geçmiş verilere çakıştırma ("history matching") problemi, Bölüm 3'de tahmin ("prediction") problemi ve geçmiş verilere çakıştırma problemi ile ilişkisi hakkında bilgiler verilecektir. Bölüm 5'de çalışmada önerilen metodolojinin sanal bir örnek üzerinde tank modelleri kullanılarak uygulaması sunulmaktadır. Bölüm 5'de çalışmadan çıkarılan sonuçlar özetlenmektedir.

## 2. GEÇMİŞ VERİLERE ÇAKIŞTIRMA ("HISTORY MATCHING") PROBLEMİ

Son yıllarda, bilgisayar teknolojindeki gelişmelere paralel olarak, geçmiş verilere çakıştırma problemi, bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma yöntemleri ile çok kısa süreler içerisinde ve etkin bir şekilde yapılabilmektedir. Bunun da temel nedeni, bu yöntemlerle model ve ölçüm verilerindeki hataların (belirsizliklerin) hesaba katılması, elde edilen model çıktısı ile sistem çıktısı arasındaki çakışmanın ve elde edilen model parametrelerin istatistiksel yöntemlerle niceliksel değerlendirmesi mümkün olmaktadır. Bu avantajları nedeniyle, bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma yöntemleri, dinamik verilere çakıştırma işlemi ile model parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan, temel bir araç haline gelmiştir.

Doğrusal olmayan parametre tahmin yöntemlerinde, geçmiş dinamik verilere çakıştırma işlemi doğrusal olmayan optimizasyon problemi olarak formüle edilir ve genelde çakıştırma ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ile yapılır. Ağırlıklı en küçük kareler yönteminde bilinmeyen model parametre vektörü  $\vec{\chi}$ 'e göre minimize edilecek hedef fonksiyonu aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir:

$$J(\vec{\chi}) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} w_{j,i} [f_j(t_i, \vec{\chi}) - y_j(t_i)]^2 \quad (\text{birimsiz}) \quad (1)$$

Denklem 1'de  $M$ , toplam model fonksiyonu ( $f$ ) sayısını,  $(t_i, y_j(t_i)) \neq 1, \dots, n_j$ , model fonksiyonu  $f_j$  ( $j=1, \dots, M$ ) için yapılmış  $n_j$  gözlemden oluşan veri setini temsil etmektedir.  $\vec{\chi}$ , göz önünde bulundurulmuş modeldeki bilinmeyen model parametrelerini içeren  $l$ -boyutlu bilinmeyen model parametre vektörüdür. Denklem 1'de  $w_{j,i}$ , her ölçüm verisi için pozitif ağırlıkları temsil eder. Bu ağırlıklar, herhangi bir zaman değeri  $t_i$ 'de ölçülen  $y_j$  için ölçüm hatalarının varsyanının (saçılım değerinin) tersini temsil eder. Eğer verilen bir ölçüm için ağırlık sıfıra yakın (veya başka deyişle ölçüm noktası için varyans, belirsizlik, büyük) ise, o ölçüm verisi güvenilir değildir ve çakıştırmada o veri noktasına daha az ağırlık atanması mümkün olur. Bildiride verilecek uygulamalarda,  $y_j$ 'ler rezervuar basıncı ölçümlerini temsil eder. Ancak, Denklem 1 ile tanımlanan hedef fonksiyon, birden fazla ve farklı veri setini (örneğin izotermal olmayan ve boyulu modellerde, farklı kuyularda ölçülmüş sıcaklık, basınç, izleyici madde konsantrasyonlarını) aynı anda çakıştırmak için kullanılacak kadar da geneldir

Denklem 1'in minimizasyonu, farklı yöntemlerle yapılabilmektedir [6,7]. Yaygın olarak kullanılanı gradyent temelli Levenberg-Marquardt yöntemidir. Bu yöntemde yineleme işlemi ve yakınsama kriterleri kullanılarak, ölçüm verilerine en iyi çakışma sağlanarak, "en iyi" ("optimum") model parametre vektörü  $\vec{\chi}^*$  tahmin edilmektedir [6,7].

Parametre tahmininde Denklem 1'i sağladığı en önemli avantajlardan biri, parametre tahmin problemini istatistiksel bir çerçeve içinde göz önünde bulundurmamıza olanak sağlamasıdır. Örneğin, ölçüm verileri üzerindeki ölçüm hatalarından dolayı olan belirsizlik, ölçüm hataları rasgele değişkenler, genelde ortalaması sıfır ve belirli bir saçılıma sahip normal (Gauss), olarak modellenir. Bu sayede, elde edilen çakışmanın istatistiksel değerlendirilmesi ve elde edilen parametrelerin güvenilirliği ve ölçülmüş verilere duyarlılığı belirlenebilmektedir.

## 2.1. İstatistiksel RMS Değeri

Optimizasyon sonucunda, model fonksiyon verisi  $f_j$  ile gözlem (ölçüm) verisi  $y_j$  arasında elde edilen çakışmanın derecesi niceliksel değerlendirilmesi RMS ("root-mean-square error") değeri hesaplanarak yapılır. RMS değeri, gözlemlenen ile modelden elde edilen verilerin farklarının karelerinin toplamının veri noktasına bölümünün kareköküdür:

$$RMS_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} [f_j(t_i, \vec{\chi}^*) - y_j(t_i)]^2}{n_j}} \quad (2)$$

Denklem 2'den de anlaşılacağı gibi,  $RMS$ 'in birimi ölçüm verisi  $y_j$ 'nin birimine sahiptir. Örneğin çakıştırmada,  $y_j$  rezervuar basıncı ölçümlerini temsil ediyorsa,  $RMS$ 'in birimi basınç birimi (psi, bar, vs.) dir. Eğer çakıştırmada  $y_j$  rezervuar kuyu sıcaklık ölçümlerini temsil ediyorsa,  $RMS$ 'in birimi sıcaklık birimi ( $^{\circ}C$ ,  $^{\circ}F$ , vs) dir.  $RMS$  değeri, optimizasyon sonucunda elde edilen "en iyi" model parametre vektörü  $\vec{\chi}^*$  'de hesaplanır.

Eğer çakıştırmada kullanılan model, gerçek bilinmeyen sistem için doğru model ise,  $RMS$  değeri, ölçüm veri seti  $y_j$ 'nin ( $j=1, \dots, M$ ) ölçüm hatasının standart sapmasına iyi bir yaklaşımı temsil eder. Genelde,  $RMS$  değeri küçüldükçe model ile saha verisi daha iyi çakışma gösterirken,  $RMS$  değeri büyüdükçe daha kötü bir çakışma göstermektedir. Bu nedenle, RMS değeri, saha verilerini temsil edecek uygun modellerin belirlenmesinde de bir kriter olarak da kullanılabilir. Örneğin, Denklem 1'i aynı saha ölçüm verilerini farklı modelleri kullanarak çakıştırıp, her model çakışması için hesaplanan RMS değerlerini kıyaslayıp, en küçük RMS değerini veren modeli, göz önünde bulundurulan bilinmeyen sistem için en uygun model olarak seçmek mümkündür. Kaynak [3]'de vurgulandığı ve bu bildiride sanal örnek uygulamasıyla gösterildiği gibi, sadece RMS değerine bakarak sistem için en uygun modeli belirlemek yeterli değildir. RMS değerinin yanında, çakıştırma sonucunda model parametreleri için elde edilen %95 güvenilirlik aralıklarını ("95% confidence intervals") da incelemek gerekmektedir.

## 2.2. Tahmin Edilen Model Parametrelerine ait %95 Güvenilirlik Aralıkları

Çakıştırma sonucunda bilinmeyen model parametrelerine ait %95 güvenilirlik aralıkları aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır [8]:

$$\chi_i^* - 2s\sqrt{[(G_{\vec{\chi}^*}^T W G_{\vec{\chi}^*})^{-1}]_{ii}} \leq \hat{\chi}_i \leq \chi_i^* + 2s\sqrt{[(G_{\vec{\chi}^*}^T W G_{\vec{\chi}^*})^{-1}]_{ii}} \quad (3)$$

Burada  $s$

$$s = \sqrt{\frac{J(\vec{\chi}^*)}{N-1}} \quad (4)$$

denklemden hesaplanır. Denklem 3'de  $G$ , en iyi model parametre vektöründe hesaplanmış duyarlılık katsayısı matrisini ("sensitivity matrix") temsil eder ve bu matrisin boyutu  $N \times N$ 'dir ve elemanları model fonksiyonu  $f$ 'nin her bir model parametresine göre türevini içerir. Gradyent bazlı optimizasyon yöntemlerinin (Levenberg-Marquardt gibi) yineleme algoritmalarında  $G$  matrisi doğal olarak gereklidir ve algoritmanın bir parçası olarak oluşturulur. Dolayısıyla, Denklem 1'in minimizasyonunda gradyent bazlı optimizasyon algoritmaları kullanıldığında, en sonuncu yineleme adımında tahmin edilen "en iyi" model parametre değerinde hesaplanmış  $G$  matrisi Denklem 3'de kullanılarak güvenilirlik aralığı doğrudan hesaplanır.  $W_j$  her elemanı Denklem 1'de verilen ağırlıkları ( $w_j$ 'leri) içeren  $N \times N$  boyutlu ağırlık matrisini (veya ölçüm hatalarının varyansını ihtiva eden hata "kovaryans" matrisinin tersini) temsil eder.  $N$ , çakıştırmada kullanılan toplam ölçüm verisi sayısını

$$N = \sum_{j=1}^M n_j \quad (5)$$

temsil eder. Denklem 3'de  $\hat{\chi}_i$ ,  $i$ 'nci model parametresinin bilinmeyen doğru değerini,  $\vec{\chi}^*$  ölçüm verilerine çakıştırma sonucunda optimizasyondan  $i$ 'nci model parametresi için elde edilen en iyi değeri temsil etmektedir.

Denklem 3'den hesaplanan %95 güvenilirlik aralıkları, doğru değeri bilinmeyen model parametresi  $\chi_i$  nin %95 olasılıkla hangi aralık arasında olacağını göstermektedir. Güvenilirlik aralıkları, çakıştırmada kullanılan ölçülmüş veriler üzerindeki ölçüm hatalarının, ölçüm verilerinin model parametresi  $\chi_i$  'e gösterdiği duyarlılığın ve model parametreleri arasındaki korelasyonun karmaşık bir fonksiyonudur. Örneğin ölçülmüş verileri üzerinde ölçüm hataları büyükse (yani ölçüm hatalarının varyansı büyük ise) ki bu bir anlamda *RMS* değeri (Denklem 2 ve Denklem 4) ile de doğrudan ilişkilidir, model parametresi  $\chi_i$  için geniş güvenilirlik aralıkları elde edilmesine neden olur. Geniş güvenilirlik aralıkları, ölçüm verilerinin model parametresi  $\chi_i$  'e duyarlılığının az veya olmadığı durumda da elde edilir. Geniş güvenilirlik aralıkları, söz konusu model parametresinin değerinde belirsizliğin "fazla" olduğu veya bir başka deyişle bu model parametresinin güvenilir olarak tahmin edilmediği anlamına gelir. Bu noktada akla gelecek soru, çakıştırma işlemi sonucunda tahmin edilen parametrenin güvenilir olarak tahmin edilip edilmediğine sayısal olarak nasıl karar verileceğidir? Literatürde bu soruya standart hale gelmiş kesin cevap bulunmamaktadır. Kaynak [3]'de verilen çalışmamızda, tank modelleriyle yapılan uygulamalar sonucunda ulaşılan sonuç şudur: Eğer Denklem 3'den hesaplanan  $\pm$  güvenilirlik aralığı değeri, söz konusu model parametresi  $\chi_i$  için en iyi değer olarak tahmin edilen  $\vec{\chi}^*$  değerinin %95'inden küçük ise, model parametresi güvenilir olarak tahmin edilmiştir denilebilir.

Çakıştırmada birden fazla model denendiğinde ve ölçüm verilerine çakıştırma ile gerçek bilinmeyen sistem için en uygun model seçiminde, hem *RMS* değerine hem de parametreler için hesaplanmış %95 güvenilirlik aralıkları değerlerine bakılmalıdır [3]. Yukarıda değinildiği gibi, sadece *RMS* ya da güvenilirlik aralığı değerlerini inceleyerek uygun modelin seçilmesi yanıltıcı olabilmektedir. Model ile ölçüm verisi arasındaki sapmayı ölçtüğü için, belki doğal olarak, *RMS* değeri en küçük olan modelin sistemi en iyi temsil model olduğunu iddia edebiliriz. Ancak, gerçek sistemi doğru temsil etmediği halde parametre sayısını artırarak (yani fazla parametresi olan modeller kullanarak) *RMS* değerini küçülebileceğimizden, uygun modelin seçiminde *RMS* değerinin yanında, modeldeki parametreler için hesaplanmış %95 güvenilirlik aralıklarını da incelemek gerekir. Dolayısıyla, tüm model parametreleri için hesaplanmış kabul edilebilir en küçük güvenilirlik aralıklarına ve *RMS* değerine sahip model, sistem için en uygun model olarak seçilmelidir.

### 3. GELECEĞE YÖNELİK PERFORMANS TAHMİN (“PREDICTION”) PROBLEMİ

Geleceğe yönelik performans tahmin problemi, geçmiş verilere karşılaştırma problemine doğrudan bağlıdır ve ölçüm verilerinde ve tahmin için kullanılacak modelde belirsizliğin söz konusu olduğu durumlarda çözümü zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak, stokastik veya olasılık metotları kullanılarak, tahmin problemine gerçekçi çözümler elde edilebilmektedir. Stokastik yöntemler performans tahmin problemine entegre edildiğinde, verilen bir üretim/reenjeksiyon senaryosu altında, jeotermal sistemin gelecek performansındaki belirsizliği tanımlamak ve değerlendirmek mümkün olabilmektedir. Tahmin problemini stokastik metotlarla çözümlerken, rezervuar modeli, rezervuar model parametreleri, ölçüm veri ve hataları olasılık yoğunluk fonksiyonları cinsinden ifade edilir. Bu sayede, tüm dinamik ölçüm verilerine karşılaştırılmış, ölçüm verilerindeki ve modeldeki belirsizliği de hesaba katan ortak olasılık yoğunluk (“joint probability density function”) fonksiyonun örneklenmesiyle performanstaki belirsizlik tespit edilebilir [8].

Doğrusal en küçük kareler teorisinden bilindiği gibi [8], Denklem 1 kullanılarak  $t_{nj}$  zamanına kadar ölçülmüş verilere karşılaştırılmış bir model değişkeni  $y_j$ 'nin (bizim durumumuzda, basınç, sıcaklık, izleyici konsantrasyonu, vb), gelecekte verilen bir zaman değeri  $t_k$ 'da (burada  $t_k > t_{nj}$  olacak şekilde bir zaman değeridir) tahmin edilecek değerinin standart sapması (veya belirsizliği) aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$\sigma_{y_j,k} = \left[ \tilde{g}_{j,k}^T (G^T W G)^{-1} \tilde{g}_{j,k} + 1 \right]^{1/2} \sigma_j \quad (6)$$

Burada  $\tilde{g}_{j,i}$  is tahmin edilen değişken  $y_j$ 'nin  $t_i$  zamanında, geçmiş verilere karşılaştırma işlemi sonucunda belirlenmiş en iyi model parametre vektörü  $\tilde{\chi}^*$  değerinde hesaplanmış duyarlılık vektörüdür.  $G$  ise  $t_i$  zamanı için  $\tilde{\chi}^*$  değerinde hesaplanmış duyarlılık katsayısı matrisidir.  $T$ , matris transpoze,  $-1$  ise matris tersi işlemlerini temsil etmektedir. Denklem 6'da,  $\sigma_j$  ise, geçmiş verilere karşılaştırma işlemi sonunda ölçüm verileri ile model verisi arasındaki standart sapmayı temsil eder ve aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} \left[ f_j(t_i, \tilde{\chi}^*) - y_j(t_i) \right]^2}{n_j - 1}} \quad (7)$$

Denklem 2 ve 7'den dikkat edilecek olursa, RMS ile çakışmanın standart sapması  $\sigma_j$  arasında doğrudan bir ilişki vardır ve  $n_j \gg 1$  ise,  $\sigma_j$  değeri RMS değerine eşit olur.

Denklem 6'dan, tahmin problemine ait bazı önemli özellikleri belirleyebiliriz: (i) Gerçekçi bir duruma karşılık gelmese de burada belirtmekte fayda vardır. Eğer ölçüm ile model verileri arasında mükemmel bir çakışma söz konusu ise (yani  $\sigma = 0$ ), bu durumda tahmin edilecek değişkenin standart sapması sıfır olacaktır. Bu durumda, tahminde belirsizlik olmayacaktır. Bu doğal bir sonuçtur. Çünkü  $\sigma = 0$  durumu, sistemden ölçümlerin mutlak doğrulukla yapıldığını kabul eder, (ii) Daha gerçekçi bir durum olan  $\sigma \neq 0$  ise, tahmin edilecek değişkenin  $t_k$  zaman değerindeki standart sapmasının  $\left[ \tilde{g}_{j,k}^T (G^T W G)^{-1} \tilde{g}_{j,k} + 1 \right]^{1/2}$  terimi ile çakışmanın standart sapması  $\sigma$ 'nın bir fonksiyonu olacaktır. Denklem 6'da  $\sigma$ , geçmiş verilere karşılaştırma döneminden hesaplanacağı için (Denklem 7) tahmin

döneminde değeri değişmeyecektir.  $\left[ \bar{g}_{j,k}^T (G^T W G)^{-1} \bar{g}_{j,k} + 1 \right]^{1/2}$  teriminin değeri ise daha çok model parametrelerinin güvenilirlik aralıkları (veya belirsizliği) ve duyarlılığı ile değişecektir. Genelde, model parametre sayısı arttıkça,  $\left[ \bar{g}_{j,k}^T (G^T W G)^{-1} \bar{g}_{j,k} + 1 \right]^{1/2}$  terimi değerinin artmasını, buna karşın  $\sigma$  değerinin azalmasını bekleriz. Ancak, tahmin standart sapmasının davranışı tahmin edilecek zaman değerine, model parametre sayısına, parametreler arası ilişkiye, ölçüm hatalarının standart sapmasına bağlı olarak değişir ve tahmini

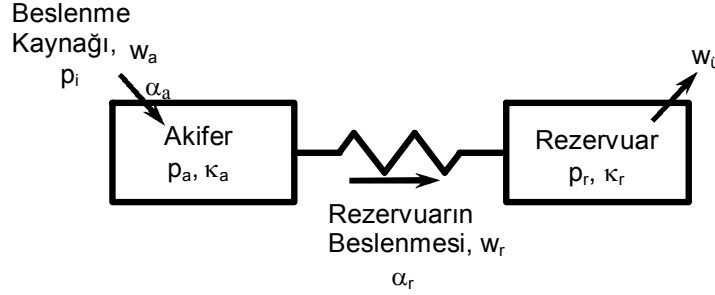
Yukarıda verilen bilgilerden, şu sonuçları çıkarabiliriz: (i) Tahminlerdeki belirsizliğin doğru olarak tahmin edilmesi için jeotermal sistemi temsil edecek en uygun modelin seçilmesi önemli olmaktadır, (ii) Ayrıca, tahmin için seçilen model doğru olsa bile, yapacağımız tahminlerde daima belirli oranda belirsizlik olacağı aşikârdır. Model doğru olsa bile, göz önünde bulundurulmuş bir üretim senaryosu için tahminlerdeki belirsizliğin belirlenebilmesi ancak birden fazla gerçekleştirme yaparak ve yapılan gerçeklemlerin verilen  $t_k$  değerinde istatistiksel analizi (tahmin edilen değişkeninin histogram analizi, standart sapma, ortalama değerlerinin hesaplanması) ile mümkün olabilmektedir.

Geçmiş verilere karşılaştırma ve tahmin probleminin doğrusal olduğu durumda, işimiz kolay olmaktadır. Bu durumda Denklem 7'den tahmin edilen değişkenin standart sapmasından tahminin güvenilirlik aralığını kolayca oluşturabiliriz. Ancak, jeotermal sistemi için kullanılan tank veya boyutlu modellerinde olduğu gibi, model parametreleri ile model çıktısı (örneğin rezervuar basıncı) arasındaki ilişkilerin doğrusal olmadığı durumlarda, tahminlerdeki belirsizliği değerlendirmek için daha farklı yöntemlere başvurmak gereklidir. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılanından biri rasgele maksimum olasılık ("randomized maximum likelihood") yöntemidir [9]. Bu yöntemde, önce ölçülmüş (farz edelim basınç olsun) verilerinin standart sapması bilinen ve ortalaması sıfır olan bir normal dağılımdan geldiği kabul edilerek, ölçülmüş verilerin belirli sayıda (genelde en az 50 adet) gerçekleştirilmesi türetilir. Türetilen her bir ölçüm verisi gerçekleştirilmesi için Denklem 1 ile karşılaştırma yapılarak, söz konusu ölçüm verisi gerçekleştirilmesini sağlayan en iyi model parametre vektörü  $\bar{\chi}^*$  hesaplanır. Sonuçta, bu işlem toplam ölçüm verisi gerçekleştirme sayısı kadar tekrarlanır ve toplam ölçüm verisi gerçekleştirme sayısı kadar "en iyi" model parametre vektörü belirlenir. Daha sonra, karşılaştırma ile belirlenmiş her bir en iyi model parametre vektörü modelde kullanılarak, göz önünde bulundurulmuş gelecek üretim/reenjeksiyon debi senaryosu için model çıktısı (rezervuar basıncı) belirli bir zaman dönemi için tahmin edilir. Bu tahmin bir gerçekleştirme olarak da isimlendirilir. Bu tahmin işlemi karşılaştırmadan belirlenmiş tüm en iyi model parametre vektörleri için tekrarlanarak, belirli sayıda tahmin gerçekleştirilmesi yapılır. Elde edilen tahmin gerçeklemleri istatistiksel analiz ile değerlendirilerek, tahminlerdeki belirsizlik tespit edilir. İzleyen bölümde, sanal bir örnek uygulama ile burada verilen metodolojinin uygulaması sunulmaktadır.

#### 4. ÖRNEK UYGULAMA

Bu bölümde, Kaynaklar [2-4] detaylı olarak açıklanan tank modelleri kullanılarak, sanal bir örnek üzerinde hem ölçülmüş saha verisini en iyi temsil edecek modelin hem de kalibre edilmiş modellerle performans tahminleri üzerindeki belirsizliklerin, Bölüm 2 ve 3'de detayları verilen istatistiksel yöntemlerle, nasıl belirleneceği gösterilmektedir.

Bu örnek uygulamada jeotermal sistem için seçilen doğru model 2-tank açık modeldir. Bu modele ait şematik gösterim Şekil 1'de sunulmuştur.



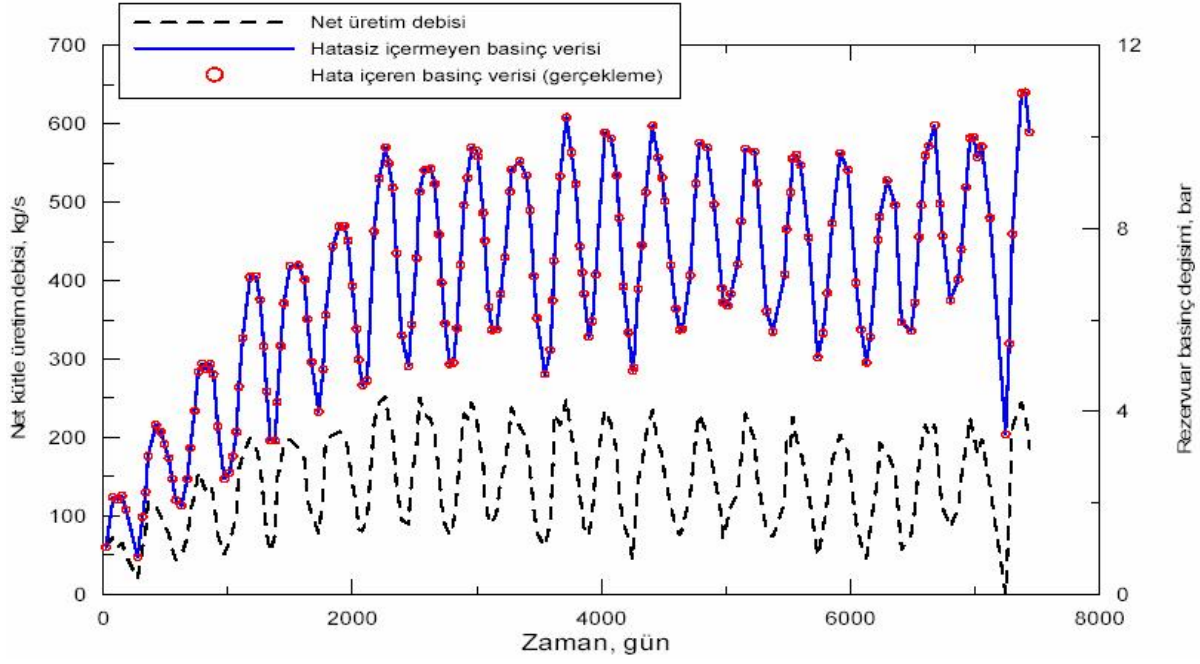
Şekil 1. 2-tank açık jeotermal rezervuar modeli [3,4].

Şekil 2'de gösterilen 20 yıllık net üretim debisi için yine Şekil 2'de gösterilen 20 yıllık rezervuar basınç verisi 2-tank açık modeli kullanılarak türetilmiştir. Gerçek saha verisine benzeştirmek için, bu modelden türetilen doğru rezervuar basıncına 0 ortalamalı ve 0.7 bar standart sapmalı normal dağılımdan çekilen rasgele hatalar eklenmiştir. Basınç verilerindeki  $\pm 0.7$  bar standart sapma (veya ölçüm hatası), yaklaşık olarak  $\pm 0.7$  m kuyu içi sıvı seviye ölçümlerindeki hataya karşılık gelmektedir.

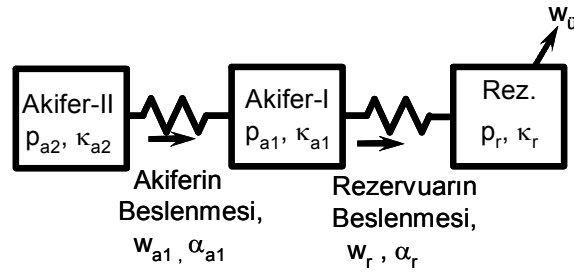
Gerçek saha uygulamalarında, aynı derinlikte birden fazla basınç ölçerlerle basınç verileri ölçülüyorsa, saha basınç verisinin ancak bir gerçekleşmesi elde edilebilir. Ölçülmüş basınç verisi üzerindeki ölçüm hataları biliniyorsa veya bazı yöntemlerle (örneğin, düzgünleştirilmiş spline gibi yöntemlerle veya model ile karşılaştırılmadan) kestirilebiliyorsa, Bölüm 3'de bahsedilen rasgele maksimum olasılık yönteminde kullanılmak üzere basınç verisinin aynı oranda ölçüm hatası içeren farklı tohum sayısı kullanılarak istenen sayıda gerçekleşmesi rasgele sayı üreten algoritmalarla oluşturulabilir. Burada göz önünde bulundurulmuş sanal örnek için 0 ortalamalı ve 0.7 bar standart sapmalı 50 farklı tohum ("seed") için çekilen rasgele hatalar, 2-tank açık modelinden türetilen hatasız ("doğru") basınç verilerine eklenerek, 0 ortalamalı ve 0.7 bar standart sapmalı hata içeren 50 adet 20 yıllık basınç gerçekleşmesi oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulmuş gerçeklemelerden biri Şekil 2'de gösterilmektedir.

Gerçek saha uygulamalarında, dinamik basınç davranışını temsil eden doğru (bu örnek uygulamada 2-tank açık) rezervuar modelini önceden bilemeyeceğimiz için, bu örnek uygulamada da aynen saha uygulamalarında yapacağımız gibi, yani uygun modeli de belirlemek için, rezervuar basınç verilerinin Denklem 1 kullanılarak karşılaştırılmasında üç farklı tank modeli göz önünde bulundurulmuştur. Geçmiş verilere karşılaştırmada göz önünden bulundurulmuş, tank modelleri; 2-tank kapalı, 2-tank açık ve 3-tank kapalı modellerdir [2-4]. Bu modellerden 2-tank kapalı modeli, 3 parametrelidir bir modeldir. Bu modelin Şekil 2'de gösterilen 2-tank açık modelinden tek farkı, Şekil 2'de gösterilen akifer tankına beslenmenin olmayışıdır. Şekil 2'deki 2-tank açık modelinde, akifer ayrıca beslenme kaynağına bağlıdır. Bu nedenle, 2-tank açık modeli 4 parametrelidir bir modeldir ve 2-tank kapalı modelindeki aynı 3 ( $\kappa_r, \alpha_r, \kappa_a$ ) parametreye ek olarak dördüncü parametre olan akifer beslenme indeksi  $\alpha_a$ 'yı içerir. Göz önünde bulundurulmuş 3-tank kapalı model ise, Şekil 3'de gösterildiği gibi, iki akifer tankı ve bir rezervuar tankı olmak üzere toplam 3 tanktan oluşmaktadır ve toplam 5 parametrelidir ( $\kappa_r, \alpha_r, \kappa_{a1}, \alpha_{a1}, \kappa_{a2}$ ) bir modeldir.





Şekil 2. Sanal uygulama için 20 yıllık üretim ve hata içermeyen ve hata içeren basınç verileri.



Şekil 3. 3-tank kapalı jeotermal rezervuar modeli [3,4].

Oluşturulan 50 adet 0 ortalamalı ve 0.7 bar standart sapmalı hatalar içeren rezervuar basınç verisi gerçeklemeleri için her bir model göz önünde bulundurularak Denklem 1 yardımıyla geçmiş verilere çakıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çakıştırma işlemi sonucunda her üç model için, 50 gerçeklemenin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmış model parametre değerleri, parametreler ait güvenilirlik aralıkları ve RMS değerleri Tablo 1'de özetlenmiştir. 2-tank açık modelinden Şekil 2'deki hatasız basınç verilerini türetmek için kullanılan doğru model parametre değerleri;  $\kappa_r = 8.5 \times 10^7$  kg/bar,  $\alpha_r = 30.0$  kg/bar-s,  $\kappa_{a1} = 1.0 \times 10^{10}$  kg/bar,  $\alpha_{a1} = 35$  kg/bar-s.

Tablo 1'den görüldüğü gibi, 50 adet hatalı basınç-zaman verisi gerçekleştirmelerinin Denklem 1 ile çakıştırmalarından elde edilen ortalama en iyi model parametre değerlerinin, her üç modelde ortak olanları için ( $\kappa_r$ ,  $\alpha_r$ ,  $\kappa_{a1}$ ,  $\alpha_{a1}$ ), birbirine oldukça yakın olarak tahmin edildiği gözükmektedir. Ayrıca, tahmin edilen model parametre değerlerinin 2-tank açık modeli doğru parametrelerine oldukça yakın olduğu da gözlemlenmektedir.

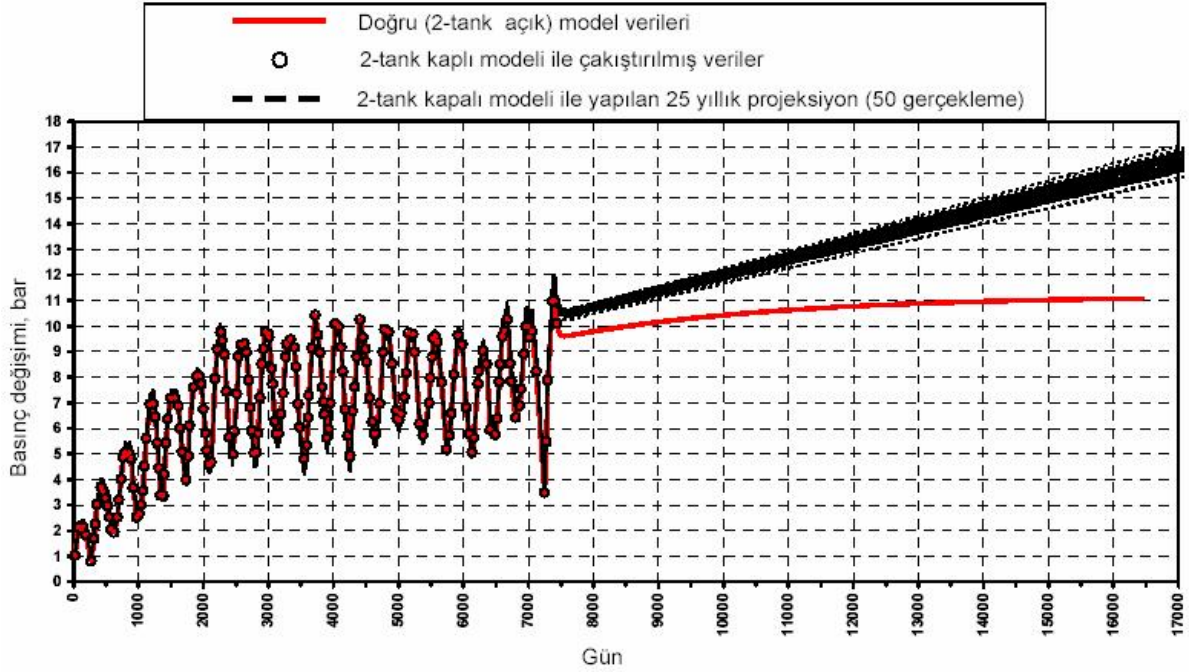
Tablo 1. 50 adet basınç gerçeğemesinden tahmin edilen ortalama parametre değeri.

Model Parametreleri	Tank Modeli		
	2-tank kapalı	2-tank açık	3-tank kapalı
$\kappa_r$ (kg/bar)	$9.46 \times 10^7$ ( $\pm 1.21 \times 10^7$ )	$8.85 \times 10^7$ ( $\pm 1.28 \times 10^7$ )	$8.76 \times 10^7$ ( $\pm 1.31 \times 10^7$ )
$\alpha_r$ (kg/bar-s)	27.21 ( $\pm 1.00$ )	30.85 ( $\pm 1.77$ )	30.53 ( $\pm 2.15$ )
$\kappa_{a1}$ (kg/bar)	$2.5 \times 10^{10}$ ( $\pm 2.5 \times 10^9$ )	$1.05 \times 10^{10}$ ( $\pm 2.63 \times 10^9$ )	$1.08 \times 10^{10}$ ( $\pm 5.83 \times 10^9$ )
$\alpha_{a1}$ (kg/bar-s)	-	34.63 ( $\pm 4.83$ )	35.51 ( $\pm 35.67$ )
$\kappa_{a2}$ (kg/bar)	-	-	$4.23 \times 10^{13}$ ( $\pm 1.80 \times 10^{17}$ )
<i>RMS</i> (bar)	0.78	0.71	0.71

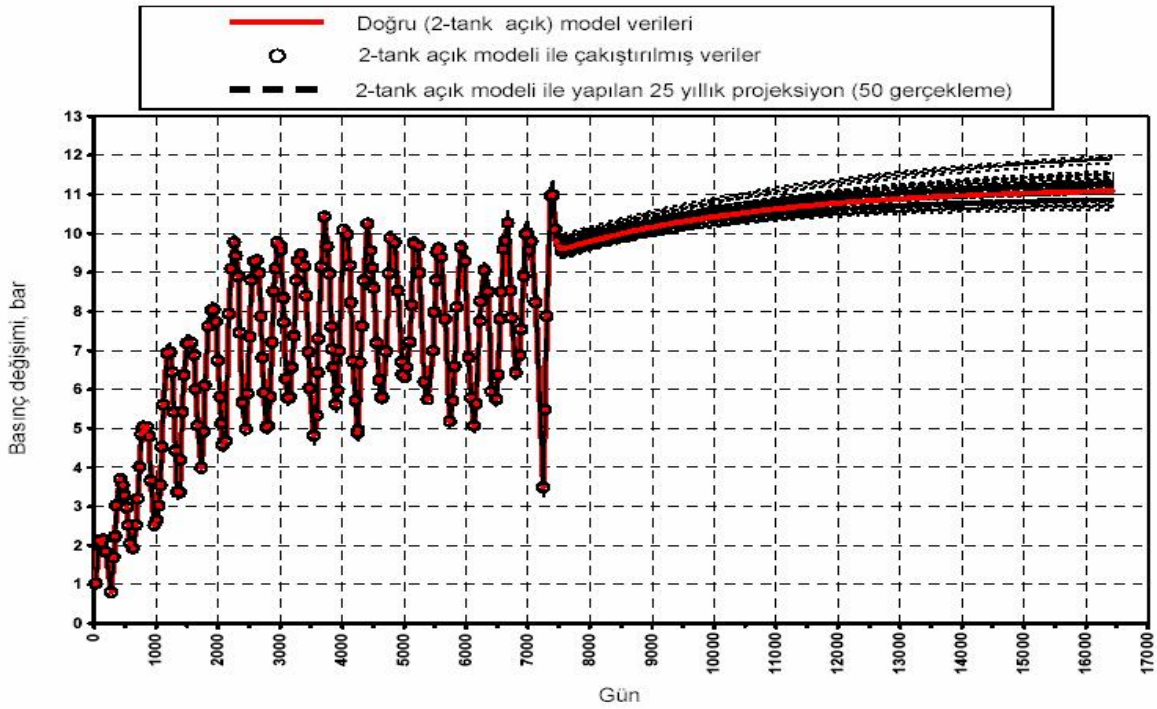
Saha verilerine en iyi temsil eden modelin seçiminde, Bölüm 2'de önerilen metodolojiyi kullanabiliriz. Hatırlanacağı gibi, bu metodolojiye göre, hem model parametreleri için hesaplanmış kabul edilebilir en küçük güvenilirlik aralıklarını hem de RMS değerini veren model, sistem için en uygun model olarak seçilir. Hatırlanacağı gibi kabul edilir güvenilirlik aralığı verilen bir model parametresi için çakıştırmadan tahmin edilen en iyi değerin %95'inden daha küçük olan bir değer güvenilirlik aralığı olarak hesaplanmışsa, o parametre kabul edilebilir güvenilirlik aralığına sahiptir denilir. Tablo 1'de her üç model için tahmin edilen RMS ve model parametrelerine ait %95 güvenilirlik aralıkları, bu metodoloji kapsamında değerlendirildiğine, üç model arasında en az parametrelili olan 2-tank kapalı modeli, bu modeldeki her model parametresi için kabul edilebilir en küçük %95 güvenilirlik aralıkları vermiştir. Ancak, bu model, model basınç verisi ile ölçüm basınç verisi arasındaki uyumu ölçen RMS için en yüksek değeri vermiştir. Bu nedenle, 2-tank kapalı modeli bu istatistiksel ölçülere göre değerlendirme dışı kalır.

Tablo 1'de 2-tank açık ve 3-tank kapalı modeller için verilen RMS değerleri incelendiğinde her iki model için de aynı 0.71 bar'lık RMS değerinin elde edildiği görülmektedir. İlginç, ancak beklenildiği gibi, bu iki model için elde edilen RMS değeri, basınç ölçümlerine eklenen 0.7 barlık ölçüm hataları standart sapmasına çok yakındır. 2-tank açık ve 3-tank kapalı modellerindeki parametre değerlerine ait güvenilirlik aralıkları incelendiğinde, sadece 2-tank açık modeli için tüm parametreler için kabul edilebilir güvenilirlik aralıkları elde edildiği görülür. 3-tank kapalı modele ait  $\alpha_{a1}$  ve  $\kappa_{a2}$  parametrelerine ait güvenilirlik aralıkları bu kıstası yerine getirmedikleri için, bu modelde değerlendirme dışı bırakılır. Dolayısıyla, bu sanal örnekte, 2-tank açık modeli sistemi temsil eden en uygun (doğru) model olarak seçilmelidir. Dolayısıyla, bu çalışmada önerilen metodoloji, bu sanal örnekte basınç verilerinin üretildiği 2-tank açık modelinin doğru olarak model olarak seçilmesine olanak sağlamıştır. Bu gerçekte, modelde belirsizlik olduğunda, ölçülmüş basınç verilerinin farklı model çakıştırmalarından elde edilen istatistiksel (güvenilirlik aralıkları ve RMS ölçütleri) sonuçların incelenerek doğru modelin seçilmesinde katkı yapıcı, önemli bir sonuçtur.

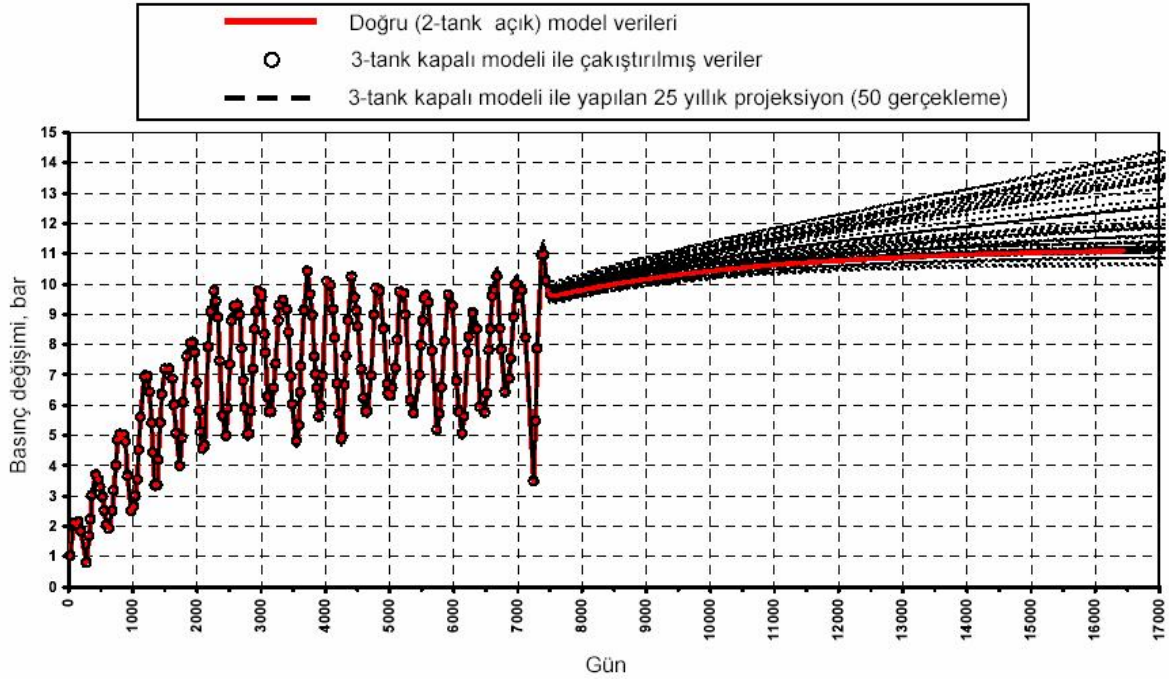
Bundan sonra göstermek ve incelemek istediğimiz, farklı modeller kullanıldığında, yapılacak tahminlerdeki belirsizlik nasıl değerlendirilebilir ve istatistiksel ölçüler kullanılmayarak uygun olmayan modellerle yapılan tahminler ne kadar sağlıklı olacaktır. Şekil 4-6'da, sırasıyla, 2-tank kapalı, 2-tank açık ve 3-tank kapalı modelleri için Bölüm 3'de tanımlanan rasgele maksimum olasılık yöntemi kullanılarak, 50 adet basınç gerçekleştirilmesinden tahmin edilen her parametre seti kullanılarak, 25 yıllık 50 adet basınç değişimi-zaman projeksiyonları gösterilmektedir. Projeksiyonlarda, 25 yıl boyunca net üretim debisi sabit 190 kg/s olarak kullanılmıştır.



Şekil 4. 2-tank kapalı modeli ile yapılan 50 adet 25 yıllık basınç değişimi projeksiyonu.



Şekil 5. 2-tank açık modeli ile yapılan 50 adet 25 yıllık basınç değişimi projeksiyonu.



Şekil 6. 3-tank kapalı modeli ile yapılan 50 adet 25 yıllık basınç değişimi projeksiyonu.

Şekil 4-6'da katı çizgiyle gösterilen eğri, 2-tank açık modelinden doğru parametre değerleri ( $\kappa_r = 8.5 \times 10^7$  kg/bar,  $\alpha_r = 30.0$  kg/bar-s,  $\kappa_{a1} = 1.0 \times 10^{10}$  kg/bar,  $\alpha_{a1} = 35$  kg/bar-s) kullanılarak hesaplanmış doğru model basınç değişimi-zaman verilerini temsil etmektedir. Burada vurgulanması gereken önemli bir nokta, gerçek saha uygulamalarında, doğru model basınç-zaman eğrisini hiçbir zaman bilemeyeceğizdir. Bu bir sanal örnek uygulama olduğundan ve doğru modeli ve doğru parametre değerlerini bildiğimiz için kıyaslama amacıyla ve bazı genel sonuçlar çıkarmak amacıyla Şekil 4-6'da bu eğri gösterilmektedir.

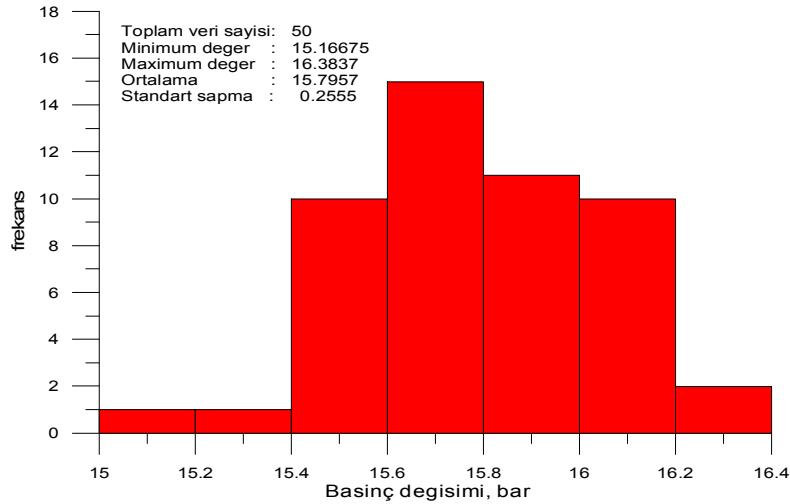
Şekil 4-6'da 7300-17000 gün arası kesikli çizgilerle gösterilen basınç değişimi-zaman verileri göz önünde bulundurulmuş modeller için, Bölüm 3'de tanımlanan, rasgele maksimum olasılık yöntemi kullanılarak yapılan 25 yıllık dönem için projeksiyonları temsil etmektedir. Şekil 4-6'dan görüleceği gibi, her model için yapılan 50 gerçekleştirme projeksiyonu sonrasında, tahmin edilen basınç değişimi-zaman verileri için tahmin zamanı arttıkça genişleyen bir belirsizlik bandı oluşmaktadır. Bu anlamlı bir sonuçtur. Çünkü tahmin edilecek zaman değerleri, ölçüm verilerinin bittiği zaman değerlerine göre, büyüdükçe basınç tahminlerindeki belirsizliğin artması beklenen bir davranıştır. Dikkat edilecek olursa, doğru model tahmin eğrisi, sadece 2-tank açık ve 3-tank kapalı modelleri için yapılan tahminlere ait belirsizlik bandı içerisinde yer alırken, doğru modele ait model eğrisi en az parametrelili olan 2-tank kapalı modeli için yapılan tahminlere ait belirsizlik bandı dışına düşmektedir. Ayrıca, 2-tank kapalı model ile yapılan 25 yıllık projeksiyonlar, aynı üretim senaryosu için diğer iki modele göre, sistem içinde önümüzdeki 25 yıl boyunca daha fazla basınç düşümleri olacağına işaret ettiğinden, projeksiyonlar için "kötümser" (pesimistlik) bir performans tahmini elde edilmektedir.

Yapılacak projeksiyonlarda aranan özelliklerden birisi, doğru model eğrisinin yapılan projeksiyonlara ait belirsizlik bandı içine düşmesi ve doğru modeli istatistiksel olarak "ortalamasıdır". Görsel olarak, bu aranan özelliği sağlayan doğru model olan 2-tank açık modelidir (Şekil 5). Dolayısıyla, Şekil 4-6'da çıkarılacak önemli sonuç da şudur; geçmiş verilere çakıştırma aşamasında güvenilirlik aralıkları ve RMS değerlerinin kıyaslamasından belirlenen en uygun model olarak saptanan 2-tank açık modeli performans tahminleri için kullanılmalıdır ve ancak bu model kullanıldığında performans tahminlerindeki belirsizlik sağlıklı bir şekilde belirlenebilir. Doğru modelden daha çok parametre içeren 3-tank açık modeli ile yapılan performans tahminlerine ait belirsizlik bandı, Şekil 6'dan görülebileceği

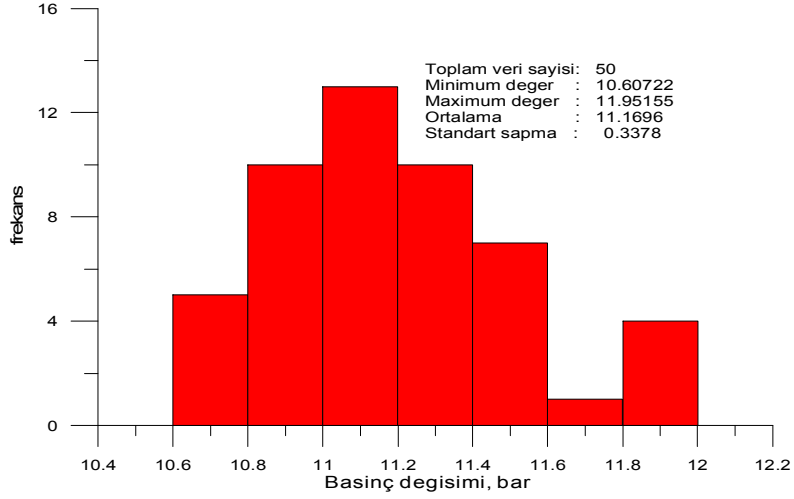
gibi, 2-tank açık modeline göre daha geniştir. Bunun temel nedeni; 2-tank açık modelinden türetilmiş ve karşılaştırmada aşamasına kullanılan basınç verilerinin duyarlılık göstermediği  $\alpha_{a1}$  ve  $\kappa_{a2}$  parametrelerdeki büyük orandaki belirsizliğin bu model ile yapılan 25 yıllık performans tahminlerine yansımastandır.

Şimdi de, verilen bir üretim senaryosu için, model ile karşılaştırma sonrası yapılacak geleceğe yönelik performans tahminlerindeki belirsizliği nicel olarak nasıl değerlendirileceği üzerinde durmak istiyoruz. Göz önünde bulundurulmuş bir model için, tahmin yapılacak bir zaman değerindeki tüm basınç değişimi (sıcaklık, vs.) verilerine ait histogram oluşturulur ve bu histograma ait ortalama ve standart sapma hesaplanır. Hesaplanan standart sapma, ortalama değerden ne ölçüde sapmanın (veya belirsizliğin) olacağı bilgisini verir. Farz edelim ki, göz önünde bulundurduğumuz sanal örnek için, 16000 günde (sahada üretimin başladığı zaman referans alındığında 44. yılda veya 20 yıllık üretim geçmişinden sonraki 22. yıldaki) performanstaki belirsizliği saptamak istiyoruz. Her üç model için 16000 gün değeri için oluşturulmuş histogramlar Şekil 7-9'da gösterilmektedir.

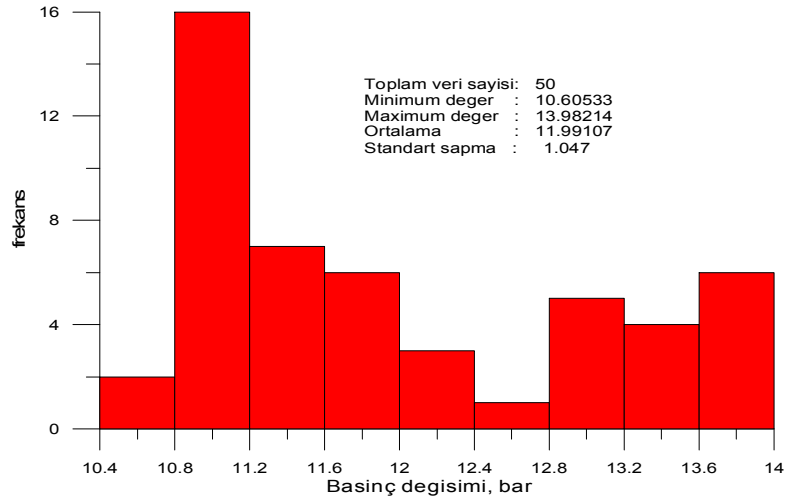
Şekil 7-9'da verilen histogram analizlerinden, 16000 günde basınç değişimi gerçeklemelerinin (projeksiyonlarının) 2-tank kapalı, 2-tank açık ve 3-tank kapalı modelleri için ortalaması ( $\pm$  standart sapması), sırasıyla  $15.80 \pm 0.26$  bar,  $11.17 \pm 0.34$  bar ve  $12.00 \pm 1.05$  bar olarak elde edilmiştir. 16000. günde doğru basınç değişimi değeri 11.07 bar'dır. Daha öncede belirtildiği gibi, doğru değere en yakın projeksiyon değerini, doğru değeri de kapsayacak şekilde, 2-tank açık modeli vermektedir. 2-tank açık modelindeki belirsizlik 0.34 bar'dır ve doğru, ancak bilinmeyen, değerin 10.83 ile 11.51 bar arasında olacağına işaret etmektedir. Daha öncede değinildiği gibi, tahminlerdeki belirsizlik aralığı ölçüm verileri üzerindeki hataya ve model parametrelerinin tahmin edilecek zamanda tahmin edilen değişken (bizim göz önünde bulundurduğumuz örnek için basınç değişimi) üzerindeki duyarlılığına bağlıdır. 2-tank kapalı modeli, projeksiyon için en düşük standart sapmayı (belirsizliği) vermekle beraber, 16000. günde basınç değişimini yaklaşık 6 bar'lık hatayla tahmin etmektedir. Öte yandan, 3-tank kapalı model, doğru değeri yaklaşık 1 bar hatayla kestirmekte ve bu kestirim için  $\pm 1$  barlık standart sapma (belirsizlik) vermektedir.



Şekil 7. 16000. gün için yapılan 50 adet basınç değişimi projeksiyonuna ait histogram; 2-tank kapalı model.



Şekil 8. 16000. gün için yapılan 50 adet basınç değışimi projeksiyonuna ait histogram; 2-tank açık model.



Şekil 9. 16000. gün için yapılan 50 adet basınç değışimi projeksiyonuna ait histogram; 3-tank kapalı model.

Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, geleceğe yönelik gerçekçi performans tahminlerinin doğru bir şekilde yapılması için göz önünde bulundurulan jeotermal sistemi temsil eden doğru modelin kullanılması şarttır. Doğru model de ancak, eldeki verilerin veya geçmiş verilerin karşılaştırmasından elde edilen güvenilirlik aralıkları ve RMS değerlerinin incelenmesi sonucunda belirlenebilmektedir (bkz Bölüm 2).

## 5. SONUÇLAR

Jeotermal rezervuar mühendisliğinde nihai amaç, göz önünde bulundurulmuş jeotermal sistemin, varsayılan farklı üretim stratejileri altında, geleceğe yönelik üretim performansını, ölçüm verilerindeki ve modellerdeki belirsizliği de göz önünde bulundurularak, tahmin etmektir. Bu tahminleri ve tahminlerdeki belirsizlikleri istatistiksel yöntemlerle değerlendirerek, sahanın sürdürülebilirliği için uygun üretim stratejileri belirlenebilmekte ve bu üretim stratejilerine bağlı olarak sahada gerekli yatırımlar yapılabilir.

Bu çalışmada, geçmiş verilere karşılaştırma ve performans tahmini problemleri hakkında temel bilgiler sunulmuştur. Ayrıca, farklı tank modelleri kullanılarak, sanal bir örnek üzerinde kalibre edilmiş modellerle performans tahminleri üzerindeki belirsizliklerin istatistiksel yöntemlerle nasıl belirlenmesi gerektiği konularına çalışmada yer verilmiştir. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

1. Çakıştırmada kullanılan dinamik ölçüm verilerinde (basınç, sıcaklık gibi) ve gerçek jeotermal sistemi temsil edecek çakıştırmada kullanılacak modellerde kaçınılmaz olarak belirli oranda belirsizlikler söz konusu olacağından, ölçüm verilerine karşılaştırılarak kalibre edilmiş modellerle yapılacak performans tahminleri üzerine bu belirsizliklerin yansır.
2. Saha dinamik ölçüm verilerini en iyi temsil eden modelin seçiminde kullanılabilir bir metodoloji sunulmuş ve bu metodolojinin geçerliliği sanal bir örnek uygulama ile gösterilmiştir. Önerilen metodolojide, farklı modeller çakıştırmada kullanılarak, her bir model parametresi için hem kabul edilebilir en küçük %95 güvenilirlik aralıklarını hem de en küçük RMS değerini veren model, sistem için en uygun model olarak seçilir. Sadece RMS değerine bakarak, en uygun modelin seçilmesi doğru değildir.
3. Farklı modellerle ölçülmüş saha ölçüm verilerine karşılaştırma sonrasında, çalışmada önerilen
4. en uygun model belirleme metodolojisinin uygulamasıyla seçilen model ile performans tahminleri yapılmalıdır. Ancak bu yolla, varsayılan bir üretim debisi senaryosu altında, jeotermal sistemin gelecekteki performansı ve performansındaki belirsizlik değerlendirilebilir.
5. Varsayılan bir üretim debisi senaryosu altında, sadece saha ölçüm verisi setine kalibre edilmiş model parametreleri ile sistemin gelecekteki performansına ait sadece bir gerçekleştirme elde edilebilir. Tek bir gerçekleştirme, performansındaki belirsizlik değerlendirilebilmesinde yeterli değildir.
6. Varsayılan bir üretim debisi senaryosu altında, jeotermal sistemin gelecekteki performansındaki belirsizlik, çalışmada önerilen rasgele maksimum olasılık yöntemiyle gerçekçi bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu yöntemde, hem ölçüm verilerindeki hata hem de bu hataların neden olduğu model parametre değerlerindeki belirsizlik, bu belirsizlikleri içeren gerçeklemler yardımıyla, performans tahminleri üzerine gerçekçi olarak yansıtılabilmekte ve istatistiksel (histogram) analizi ile değerlendirilebilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] BODVARSSON, G.S., PRUESS, K., LIPPMANN, M. J., "Modeling of Geothermal Systems", Journal of Petroleum Technology, September 1986.
- [2] AXELSSON, G.; "Simulation of Pressure Response Data From Geothermal Reservoirs by Lumped Parameter Models," 14<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 257-263, 1989.
- [3] SARAK, H., ONUR, M., SATMAN, A., "Lumped Parameter Models for Low-Temperature Geothermal Fields and Their Application", Geothermics, (basım aşamasında), 2006.
- [4] SATMAN, A., ONUR, M., SARAK, H., "Jeotermal Rezervuarların Modellenmesi", TESKON 2005, TMMO Makine Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, 23-26 Kasım 2005.
- [5] ONUR, M., "Jeotermal Rezervuarlarda Kuyu Basınç Testleri ve Analizi", TESKON 2005, TMMO Makine Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, 23-26 Kasım 2005.
- [6] FLETCHER, R., "Practical Methods of Optimization", 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons, Chichester, 1986.
- [7] GILL, P. E., MURRAY, W., WRIGHT, M.H., "Practical Optimization", Academic Press, London, 1981.
- [8] DOGRU, A.H., DIXON, T.N., EDGAR, T.F., "Confidence Limits on the Parameters and Predictions of Slightly Compressible, Single Phase Reservoirs", SPE Journal, February 1977.
- [9] OLIVER, D.S., HE, N., REYNOLDS, A.C., "Conditioning Permeability Fields to Pressure Data", 5<sup>th</sup> European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Leoben, Austria, 3-6 September 1998.

## ÖZGEÇMİŞLER

### 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.

### Hülya SARAK

Istanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1993 yılında lisans ve 1997 yılında yüksek lisans ve 2004 yılında doktora ünvanlarını aldı. 1997-1998 yılları arasında Yeni Zelanda'da Auckland Üniversitesi tarafından düzenlenen "Jeotermal Enerji Teknolojisi Diploma Kursu"na katıldı. 1995 yılında araştırma görevlisi olarak göreve başladığı İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde halen Dr. Araştırma Görevlisi olarak görev almaktadır.

### Abdurrahman SATMAN

Istanbul Teknik Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümü'nden Y. Mühendis olarak mezun olduktan sonra gittiği A.B.D.'deki Stanford Üniversitesi'nde Petrol Mühendisliği Bölümü'nden MS ve Doktora ünvanlarını aldı. Daha sonra Stanford Üniversitesi'nde Assistant Profesör olarak çalıştıktan sonra 1980 yılında İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nde çalışmaya başladı. 1985-1987 arasında Suudi Arabistan'da KFUPM-Research Institute'te çalıştı. Halen İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır. İlgili alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliği ve üretim ve rezervuarla ilgili konular yer almaktadır.