

# LUMP-PARAMETRE MODELLERİYLE YAPILAN PERFORMANS TAHMİNLERİNDEKİ BELİRSİZLİĞİN DEĞERLENDİRİLMESİ: İZMİR BALÇOVA-NARLIDERE VE AFYON ÖMER-GECEK SAHALARINA UYGULAMALAR

Ömer İnanç TÜREYEN  
Hülya SARAK  
Mustafa ONUR

## ÖZET

Uygulanan üretim/re-enjeksiyon stratejilerine bağlı olarak jeotermal sahaların basınç (veya su seviyesi) ve sıcaklık davranışını modellemek amacıyla kullanılan lump-parametre modelleri (tank modelleri), az sayıda parametre içermelerinden dolayı, sayısal modellerin yerine iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Sahayı en iyi şekilde temsil eden model parametreleri tarihsel çakıştırma işlemiyle tahmin edilerek, belirli üretim/re-enjeksiyon senaryoları için geleceğe yönelik performans tahminleri yapılmaktadır. Ancak, model parametreleri için yapılan tahminler (i) ölçüm hataları ya da yapılan ölçümler üstündeki gürültü, (ii) modelleme hataları, (iii) model parametreleri ve akış performansı arasındaki doğrusal olmayan ilişki ve (iv) problem çözümünün tekil olmayışı nedeni ile belirsizlik içermektedirler. Geleceğe yönelik performans tahminleri yapılırken model parametrelerinin içerdiği belirsizliğin bu tahminlere yansıtılması gerekmektedir. Bu nedenle tek bir tahmin kullanmak yerine birden fazla gerçeklemeler kullanılarak geleceğe yönelik performans tahminlerinin yapılması daha gerçekçidir.

Bu çalışmada geleceğe yönelik performans tahminlerinin belirsizliği Rastgele Maximum Olasılık (Randomized Maximum Likelihood – RML) yöntemiyle analiz edilmektedir. Öncelikle, bu yöntemin geçerliliğinin gösterilmesi amacı ile yapay bir uygulama sunulmakta ve daha sonra, İzmir Balçova-Narlidere ve Afyon Ömer-Gecek jeotermal sahaları için uygulamalar verilmektedir.

## 1. GİRİŞ

Lump-parametre (veya tank) modelleri düşük sıcaklıklı jeotermal sistemlerin geleceğe yönelik performans tahminlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1-2]. Tank modellerinde kullanılan model parametreleri, saha verilerine, doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemiyle tarihsel çakıştırma yapılarak elde edilmektedir [2-4]. Elde edilen model parametreleri kullanılarak, çeşitli üretim/re-enjeksiyon senaryoları için basınç (veya su seviyesi) değişimlerinin geleceğe yönelik performans tahminleri yapılabilen ve sahanın verimli olarak işletilmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Model parametrelerinin içerdiği belirsizliğin performans tahminlerine nasıl yansıtacağı sahanın performansı hakkında daha güvenilir bilgi edinmek açısından çok önemlidir. Ayrıca, bu belirsizliğin geleceğe yönelik ekonomik kararların verilmesi açısından sayısallaştırılması gerekmektedir [4]. Buna yönelik olarak, bu çalışmada Rastgele Maximum Olasılık (RML) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem doğrusal olmayan problemlerde belirsizlik tahminleri yapabilmek için oldukça etkili bir yöntemdir [4-8].

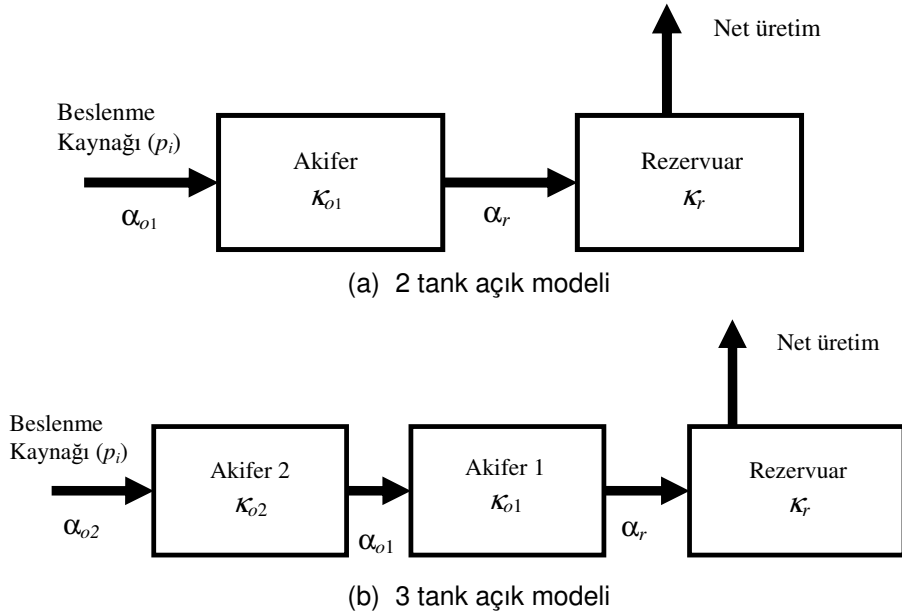
Bu çalışmada ilk olarak lump-parametre (tank) modelleri hakkında genel bilgi verilmekte ve daha sonra tarihsel karşılaştırma problemi tanıtılmakta, özellikle RML konusunda bilgi verilmektedir. Bu yöntemin etkinliği bir yapay örnek üstünde gösterildikten sonra iki gerçek saha (İzmir Balçova-Narlidere ve Afyon Ömer-Gecek sahaları) uygulaması verilmektedir.

## 2. LUMP-PARAMETRE (TANK) MODELLERİ

Bu çalışmada ele alınan tank modelleri [2, 10, 11] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda verildiği gibi tank modelleri, sadece kütle korunum ilkesinden yola çıkılarak geliştirilmiştir ve dolayısı ile sıcaklık değişimlerinin ihmal edildiği (izotermal sistemler) sadece düşük sıcaklıklı sıvı rezervuarlar için geçerlidir.

Tank modellerinin sayısal modellere göre en büyük avantajı, parametre sayısının çok daha az olmasıdır. Genel olarak sayısal modeller kullanıldığında bir jeotermal sistemin modellenmesi için kullanılan hücre sayısı 100 ile  $10^6$  arasında değişmektedir. Tank modellerinde ise bir jeotermal sistemin modellenmesi için birkaç tank yeterli olmaktadır.

Tank modelleri üç ana bölümden oluşmaktadır: (1) Rezervuar, (2) Akifer ve (3) Besleme kaynağı. Bunlardan ilk ikisi (rezervuar ve akifer) ortalama özelliklere sahip homojen tanklar tarafından temsil edilmektedir. Besleme kaynağı ise bu tanklardan herhangi birine (akifer ya da rezervuarın kendisine) ya da tüm tanklara bağlanabilmekte ve sistemin sabit basınçlı dış sınırını temsil etmektedir. Eğer tank modeli beslenme kaynağına bağlı ise bu sistem açık sistem, bağlı değil ise bu sistem, kapalı sistem olarak düşünülmektedir (Şekil 1).



**Şekil 1.** Lump-parametre (tank) modelleri.

Şekil 1(a) iki tank açık modeli temsil etmektedir. Birinci tank üretimin ya da enjeksiyonun gerçekleştiği rezervuarı temsil etmektedir. Birinci tankta basınç davranışı gözlemlenir ve üretim/re-enjeksiyon senaryosu kaydedilir. İkinci tank ise akiferi temsil etmektedir ve beslenme kaynağına bağlıdır. Bu tanktan herhangi bir üretim ya da enjeksiyon yapılmamaktadır. İkinci tank birinci tankın beslemesini yapmaktadır. Şekil 1(a)'da gösterilen sistem beslenme kaynağına bağlı (veya açık) olduğu için, herhangi bir üretim senaryosu sonunda teorik olarak "sonsuz" sürede kapama yapıldığında sistem ilk basıncına tekrardan ulaşacaktır.

Ancak, pratik anlamda ilk basınca belirli bir yüzde içerisinde ulaşmak için gerekli olacak kapama süresi rezervuar ve akifer parametrelerine bağlı olarak değişecektir. Beslenme indeksleri  $\alpha$ 'ların değeri büyüdükçe (yani kuvvetli beslenme olduğunda) pratik olarak ilk basınca ulaşmak için gerekli olan kapama süresi kısalmaktadır.

Şekil 1(b) de ise, üç tanklı açık bir sistem gösterilmektedir. Şekil 1(a)'dan farklı olarak sistemin kararsız akışını modelleyebilmek amacıyla Şekil 1(b)'de akifer iki ayrı tank tarafından temsil edilmektedir.

Şekil 1'den görüleceği gibi, tank modellerinde tank sayısı arttırıldıkça kullanılan parametre sayısı da artmaktadır. Bu çalışmada  $\alpha$  ile temsil edilen parametre tanklar arasındaki birim basınç düşümünde bir tanktan diğerine geçen akışkanın debisini belirleyen beslenme katsayısıdır, birimi  $\text{kg}/(\text{bar}\cdot\text{s})$  'dir.  $\kappa$  parametresi ise birim basınç düşümünde genleşmeden dolayı meydana gelen üretimi ifade eden tankların depolama katsayısıdır, birimi  $\text{kg}/\text{bar}$  'dır. Son olarak  $p_i$  ile temsil edilen parametre ise sistemin ilk basıncını temsil etmektedir, birimi  $\text{bar}$  'dır.

### 3. TARİHSEL ÇAKIŞTIRMA PROBLEMİ

Belirli bir üretim/re-enjeksiyon döneminden sonra tank modellerinden elde edilecek basınç (veya dinamik kuyu su seviyesi) verileri sahadan gelen basınç (veya dinamik kuyu su seviyesi) verileri ile tarihsel çakıştırma yapılarak model parametreleri tahmin edilmektedir. Bir başka deyişle, model parametreleri modelden elde edilen basınç verileri ve sahadan gelen basınç verileri çakıştıncaya kadar değiştirilmekte ve çakışmayı sağlayan model parametreleri jeotermal sistemi temsil eden parametreler olarak kabul edilmektedir. Bu parametreler kullanılarak tank modelleri ile geleceğe yönelik basınç tahminleri yapmak mümkün olmaktadır. Çakıştırmalar en küçük kareler tabanlı olasılık yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada tarihsel çakıştırma için Rastgele Maximum Olasılık yöntemi kullanılmaktadır.

#### 3.1. Rastgele Maximum Olasılık Yöntemi

Bu çalışmada  $d_{göz}$  ölçülen (gerçek sahadan elde edilen) zamana karşı kaydedilmiş basınç ya da dinamik su seviyesi verilerini temsil etmekte ve toplam veri sayısı ise  $N_d$  ile gösterilmektedir.  $C_D$  boyutu  $N_d \times N_d$  olan ölçülmüş verilerin hatalarına ait kovaryans matrisidir. Basınç (ya da su seviyesi) verilerine ait hataların ortalaması sıfır olan normal dağılım gösterdiği varsayılmakta ve kovaryans matrisi  $C_D$  ile temsil edilmektedir.  $N(\mathbf{0}, C_D)$  ortalaması sıfır ve kovaryans matrisi  $C_D$  olan bir normal dağılımı temsil etmektedir. Bu çalışmada koyu büyük harflerle temsil edilen değerler matrisleri, koyu ve küçük harflerle temsil edilen değerler ise vektörleri temsil etmektedir. Ölçümler üstündeki hataların  $\mathbf{e}$  ile gösterildiği ve  $\mathbf{m}=(m_1, m_2, \dots, m_M)^T$  de tank modeline ait bilinmeyen parametre vektörü olduğu varsayımı yapılırsa, gözlemlenmiş veriler aşağıdaki gibi temsil edilebilmektedir:

$$d_{göz} = f(\mathbf{m}) + \mathbf{e} \quad (1)$$

Burada  $f(\mathbf{m})$   $\mathbf{m}$  model parametreleri (örneğin, iki tank açık model için  $\alpha_{o1}, \kappa_{o1}, \alpha_r, \kappa_r$ ) kullanılarak tank modelleri ile hesaplanan basınç (ya da su seviyesi) verileridir.  $M$  bilinmeyen model parametre sayısını (örneğin iki tank açık model için bilinmeyen model parametre sayısı dördür) temsil etmektedir. Daha öncede belirttiği gibi  $\mathbf{e}$ ,  $N(\mathbf{0}, C_D)$  dağılımının gerçeklemeleridir. Buna göre ölçülmüş basınç verilerine koşullu olasılık fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmektedir [12]:

$$L(\mathbf{m} | d_{göz}) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ d_{göz} - f(\mathbf{m}) \right]^T C_D^{-1} \left[ d_{göz} - f(\mathbf{m}) \right] \right\} \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemi maximize edecek  $\mathbf{m}$  aynı zamanda en olası modeldir. Yukarıdaki denklemin maximize edilmesi aynı zamanda aşağıda tanımlanan hedef fonksiyonunun,  $O(\mathbf{m})$ , minimize edilmesine eşdeğerdir.

$$O(\mathbf{m}) = \|\mathbf{d}_{göz} - \mathbf{f}(\mathbf{m})\|_D^T \mathbf{C}_D^{-1} \|\mathbf{d}_{göz} - \mathbf{f}(\mathbf{m})\|_D \quad (3)$$

Tank modellerinde model parametreleri ile basınç verileri arasında doğrusal olmayan ilişki mevcuttur. Dolayısı ile Denklem 3'ün minimize edilmesi doğrusal olmayan minimizasyon yöntemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada Denklem 3'ün minimizasyonu için Levenberg-Marquardt yöntemi kullanılmaktadır [13].

Rastgele Maximum Olasılık yöntemini üç adımda özetlemek mümkündür [4]: (i) Model parametre vektörü ( $\mathbf{m}$ ) için tahminde bulunulur, (ii) Sahadan gelen ölçülmüş verilere  $\mathbf{d}_{uc} = \mathbf{d}_{göz} + \mathbf{C}_D^{1/2} \mathbf{z}_u$  ilişkisi kullanılarak gürültü eklenir. Burada  $\mathbf{z}_u$ ,  $N_d$  boyutlu birbirinden bağımsız standart normal dağılımından elde edilen verilerdir. Bu çalışmadaki örneklerde basınç verileri üstündeki hataların birbirinden bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle  $\mathbf{C}_D^{1/2}$  köşegen bir matristir. Bu matrisin elemanları  $\mathbf{C}_D$ ; matrisinin elemanlarının kareköküne eşittir. (iii)  $\mathbf{d}_{göz}$  yerine  $\mathbf{d}_{uc}$  kullanılarak Denklem 3 minimize edilir. Böylece model parametrelerinin koşullu gerçekleştirilmesi elde edilmektedir,  $\mathbf{m}_r^*$ , (iv) son olarak elde edilen model parametreleri ile hesaplanan basınç verilerinin gerçek sahadan gelen veriler ile çakışıp çakışmadığı kontrol edilir. (v)  $N$  adet gerçekleştirme elde etmek için (i-iv)  $N$  kez tekrarlanmaktadır.  $N$  adet kabul edilir çakıştırma sağlandıktan sonra geleceğe yönelik  $N$  tahmin yapılabilmektedir. Dolayısı ile geleceğe yönelik basınç ya da su seviyesi tahminleri üstündeki belirsizlik tanımlanabilmektedir.

#### 4. YAPAY UYGULAMA

Bu bölümde Rastgele Maximum Olasılık yönteminin etkinliğini göstermek amacıyla yapay örnek üstünde uygulama verilmektedir. Yapay uygulamada gerçek sistemin Şekil 1(a)' da verilen iki tank açık model olduğu varsayılmaktadır. Tablo 1'in ikinci kolonunda verilen gerçek model parametreleri iki tank açık modelde kullanılarak, Şekil 2'de verilen yirmi yıllık basınç verileri elde edilmektedir.

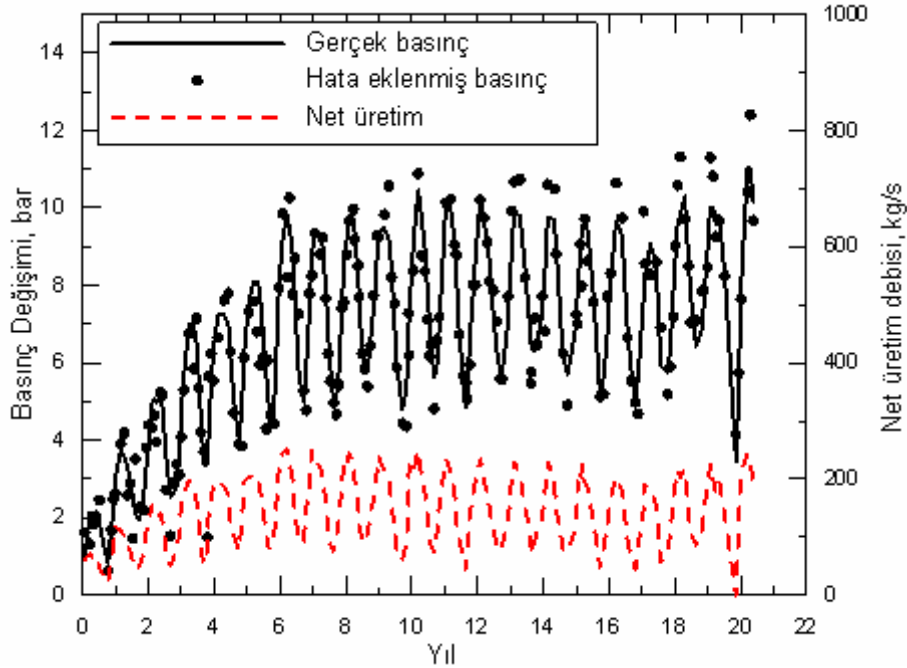
**Tablo 1.** Üç farklı lump-parametre modeli ile gözlemlenmiş verilere çakıştırma yapılarak tahmin edilen model parametreleri.

Model Parametreleri	Model parametrelerinin gerçek değerleri (2 tank-açık)	Tahmin edilen model parametreleri		
		2 tank kapalı	2 tank açık	3 tank kapalı
$\kappa_r$ (kg/bar)	$8.9 \times 10^7$	$9.5 \times 10^7$ ( $\pm 1.2 \times 10^7$ )	$8.9 \times 10^7$ ( $\pm 1.3 \times 10^7$ )	$8.9 \times 10^7$ ( $\pm 1.3 \times 10^7$ )
$\alpha_r$ (kg/bar-s)	30	27.9 ( $\pm 1.0$ )	30.6 ( $\pm 1.7$ )	30.6 ( $\pm 2.1$ )
$\kappa_{o1}$ (kg/bar)	$1.1 \times 10^{10}$	$2.4 \times 10^{10}$ ( $\pm 2.1 \times 10^9$ )	$1.2 \times 10^{10}$ ( $\pm 3.1 \times 10^9$ )	$1.2 \times 10^{10}$ ( $\pm 6.5 \times 10^9$ )
$\alpha_{o1}$ (kg/bar-s)	37	-	31.0 ( $\pm 6.1$ )	31.0 ( $\pm 43$ )
$\kappa_{o2}$ (kg/bar)	-	-	-	$2.9 \times 10^{13}$ ( $\pm 1.3 \times 10^{17}$ )
RMS (bar)	0.7	0.73	0.69	0.69

Bilindiği gibi sahada yapılan basınç ölçümleri üzerinde çeşitli nedenlerden dolayı belirli oranlarda hata mevcuttur. Bu nedenle, yapay uygulamada kullanılan basınç verilerini gerçek saha verilerine benzetebilmek amacıyla, iki tank açık modelden elde edilen basınç sinyaline (Şekil 2'deki siyah düz çizgi ile ifade edilen gerçek basınç verileri) ortalaması sıfır ve varyansı  $0.49 \text{ bar}^2$  ( $0.7 \text{ bar}$ ) olan hatalar eklenmiştir. Yirmi yıllık basınç verileri toplam 193 veriden oluşmaktadır. Şekil 2'de modelin sağlamış olduğu basınç verileri siyah düz çizgi ve hata eklenmiş basınç verileri ise, siyah noktalar tarafından temsil edilmektedir. Tarihsel karşılaştırma hata eklenmiş verilere (Şekil 2'deki siyah noktalara) yapılmaktadır. Net üretim debileri ise Şekil 2'de kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmektedir. Debi verilerinde hata olmadığı kabul edilmektedir.

Gerçek hayatta olacağı gibi, yapay uygulamada da verilerin nasıl bir modelden geldiğinin bilinmediği varsayılmaktadır. Dolayısı ile iki tank açık model olası modellerden kabul edilebileceği gibi üç tank kapalı model de olası model olarak kabul edilebilir. Burada önemli olan tarihsel karşılaştırmanın yanı sıra, gerçek modelin de ne olduğunun bulunmasıdır. Bu uygulamada sahayı temsil edecek modeller olarak iki tank kapalı model, iki tank açık model ve üç tank kapalı model göz önünde bulundurulmaktadır. İki tank kapalı model sadece üç bilinmeyen parametre ile ( $\kappa_{o1}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\kappa_r$ ), iki tank açık model dört parametre ile ( $\alpha_{o1}$ ,  $\kappa_{o1}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\kappa_r$ ) ve son olarak üç tank kapalı model ise beş parametre ile ( $\kappa_{o2}$ ,  $\alpha_{o1}$ ,  $\kappa_{o1}$ ,  $\alpha_r$ ,  $\kappa_r$ ) temsil edilmektedir. Görüldüğü gibi tank sayısı arttıkça parametre sayısı da artmaktadır.

Yukarıda belirtilen üç farklı model kullanılarak tarihsel karşılaştırma gerçekleştirilmekte ve bu üç farklı model için elde edilen model parametreleri Tablo 1'de özetlenmektedir. Tablo 1'de parantez içindeki  $\pm$ 'li değerler parametrelere ait %95 güvenilirlik aralıklarını ve son satırdaki RMS ise modele ait en küçük kareler hatasını ifade etmektedir. %95 güvenilirlik aralıkları söz konusu parametreyenin ne kadar güvenilir olarak tahmin edildiğini ve saha verisinin söz konusu parametreye ne kadar duyarlı olduğunu göstermektedir. RMS ise ölçülen saha verileri ile ne kadar iyi çakışma elde edildiğini göstermektedir.



**Şekil 2.** Yapay uygulamada kullanılan gerçek ve hata eklenmiş basınç değişimi verilerinin net üretim debisi ile değişimi.

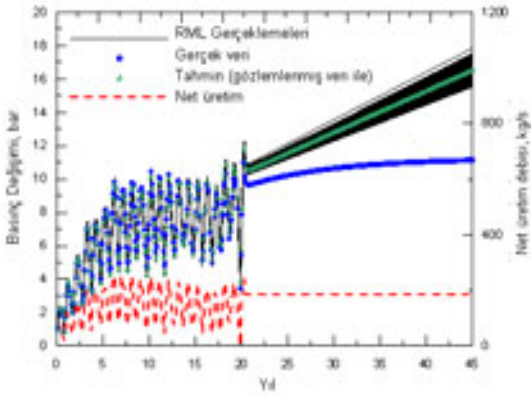
Tablo 1 incelendiğinde, iki tank açık ve üç tank kapalı modellerinin aynı “en küçük kareler hatası-RMS” (0.69 bar) verdiği görülmektedir. Bu değer gerçek model basınç sinyaline eklenen hataya (0.7 bar) çok yakındır. Dolayısı ile iki tank açık ve üç tank kapalı modeller kabul edilebilir modellerdir. Diğer taraftan iki tank kapalı modelin en küçük kareler hatası 0.73 bar olarak hesaplanmaktadır. En küçük kareler hatasının basınç verilerine eklenen hatadan daha yüksek olması, tarihsel çakıştırmanın eldeki model ile iyi yapılamadığını ve söz konusu modelin sistemi temsil etmediğini göstermektedir. Her üç modelin ortak parametreleri  $\kappa_r$ ,  $\alpha_r$ , ve  $\kappa_{o1}$  dir. Tablo 1’den açıkça görüleceği gibi, tarihsel çakıştırmanın sonunda iki tank açık ve üç tank kapalı modeller bu ortak parametreler için gerçeğe oldukça yakın tahminler yapmaktadır. İki tank kapalı model ise daha kötü yaklaşımlar yapmaktadır. Özellikle  $\kappa_r$  ve  $\kappa_{o1}$  parametreleri gerçek değerlerden oldukça farklıdır.

Tarihsel çakıştırma sonucunda parametreler için elde edilen %95 güvenilirlik aralıklarına bakıldığında ise az parametrelili model olan iki tank kapalı model parametreler için daha düşük güvenilirlik aralıkları vermektedir. Diğer yandan üç tank kapalı model ise parametre sayısının fazlalığından dolayı tüm model parametreleri için en geniş güvenilirlik aralıklarını vermektedir. Özellikle  $\kappa_{o2}$  ve  $\alpha_{o1}$  parametreleri için kabul edilemez güvenilirlik aralıkları söz konusudur. Bunun nedeni basınç verilerinin  $\kappa_{o2}$  parametresine duyarlılık göstermemesindedir. Dolayısı ile bu parametre için belirsizlik oldukça fazladır. Burada verilmemekle birlikte,  $\kappa_{o2}$  ve  $\alpha_{o1}$  parametreleri arasında korelasyon katsayısı oldukça yüksektir. Dolayısı ile  $\kappa_{o2}$  parametresindeki belirsizlik  $\alpha_{o1}$  parametresine de yansımaktadır. Böylece  $\alpha_{o1}$  parametresinde geniş güvenilirlik aralığı gözlemlenmektedir.

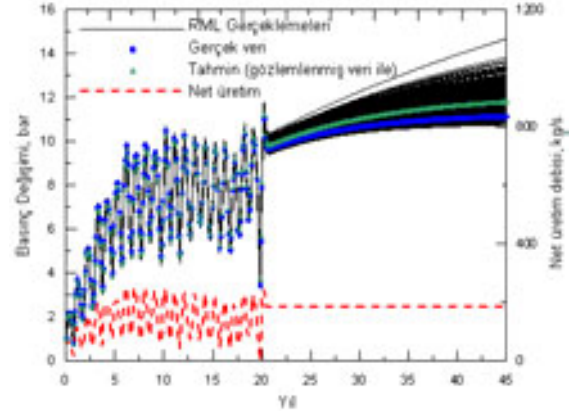
Jeotermal sistemin basınç davranışını en iyi şekilde temsil edecek doğru modelin seçimi, geleceğe yönelik performans tahminlerinin gerçekçi olarak yapılabilmesini sağladığı gibi performans tahminlerine ait belirsizliğin doğru olarak sayısallaştırılabilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle en küçük kareler hatası-RMS ve %95 güvenilirlik aralıkları birlikte göz önünde bulundurularak sahayı temsil eden en doğru modelin seçilmesi gerekmektedir. Bu yapay uygulama için, eğer model seçiminde sadece RMS hatası göz önünde bulundurulursa, iki tank açık ve üç tank kapalı modellerinin, diğer taraftan sadece %95 güvenilirlik aralığı göz önünde bulundurulursa iki tank kapalı modelin doğru model olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Ancak, bu uygulamada kullanılan doğru modelin iki tank açık model olduğu unutulmamalıdır. RMS hatası ve %95 güvenilirlik aralıkları birlikte incelenecek olursa doğru modelin iki tank açık model olduğu kolaylıkla anlaşılabilir (Tablo 1).

Geleceğe yönelik performans üstündeki belirsizliğin sayısallaştırılması için Rastgele Maximum Olasılık yöntemi kullanılmaktadır. Her bir model için (iki tank kapalı, iki tank açık ve üç tank kapalı modeller) tarihsel çakıştırma yapılacak saha verilerinin birbirinden bağımsız 1000 gerçekleştirilmesiyle, her model için bu gerçeklemelere tarihsel çakıştırma yapılmaktadır. Sonuç olarak her model için kabul edilebilir düzeyde 1000 tarihsel çakıştırma eğrisi ve bu eğrileri sağlayan 1000 model parametre vektörü  $m_r^*$  elde edilmektedir. Bu model parametre vektörleri kullanılarak, her bir model için geleceğe yönelik 1000 ayrı tahmin yapılmaktadır. Tarihsel çakıştırmalar üretim verilerinin kapsadığı yirmi yıllık bir zaman dilimi için ve geleceğe yönelik tahminler ise 25 yıl için yapılmaktadır. Dolayısı ile toplam 45 yıllık akış performansı değerlendirilmektedir. Geleceğe yönelik performans tahminleri için kullanılan üretim debisi 187 kg/s alınmaktadır.

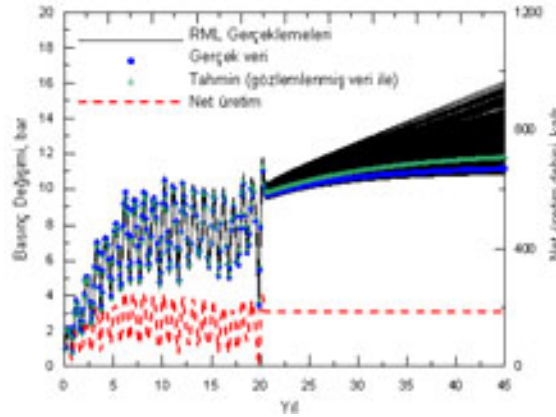
Şekil 3, 4 ve 5 sırasıyla iki tank kapalı, iki tank açık ve üç tank kapalı modeller için söz konusu performansları vermektedir. Şekillerdeki mavi noktalar gerçek saha verisini temsil etmektedir. Unutulmamalıdır ki gerçek hayatta bu bilgi asla elimizde olmayacaktır. Bu bir sentetik örnek olduğu için gerçek değerler hesaplanabilmektedir. Burada sadece mavi noktalar kıyaslama yapabilmek amacı ile verilmektedir. Şekillerdeki yeşil noktalar sahadan gelen hata eklenmiş verilere yapılan çakıştırma sonuçlarını ve performans tahminlerini, siyah düz çizgiler ise Rastgele Maximum Olasılık Yönteminden elde edilen gerçeklemeleri göstermektedir. Son olarak kesikli kırmızı çizgi üretim debisini göstermektedir.



**Şekil 3.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemleri, 2 tank-kapalı model.



**Şekil 4.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemleri, 2 tank-açık model.



**Şekil 5.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemleri, 3 tank-kapalı model.

Şekil 3'den anlaşılacağı gibi, iki tank kapalı model ile yapılan tahminler gerçek davranıştan oldukça uzak kalmaktadır. Aynı zamanda geleceğe yönelik saçılımın oldukça dar olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, iki tank kapalı modelde güvenilirlik aralıklarının daha dar olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, iki tank kapalı model kullanıldığında geleceğe yönelik performans tahminlerindeki belirsizlik doğru bir şekilde sayısallaştırılmadığı gibi, geleceğe yönelik yanlış tahminler yapılmaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi gerçek model iki tank açık modeldir. Şekil 4'de iki tank açık modelin geleceğe yönelik performans tahminleri yer almaktadır. Görüldüğü gibi, gerçek veriler geleceğe yönelik yapılan tahminlerin gerçeklemlerinin içinde bulunmaktadır. Ortaya çıkan saçılım ise belirsizliği doğru bir şekilde tanımlamaktadır, çünkü seçilen model doğru modeldir.

Şekil 5'de ise üç tank kapalı modelin geleceğe yönelik performansı verilmektedir. Geleceğe yönelik saçılım gerçek davranışı içermesine rağmen, saçılımın Şekil 4 ile kıyaslandığında daha geniş olduğu görülmektedir. Her ne kadar gerçek tahminleri içinde barındırsa da, geleceğe yönelik belirsizlik tahminlerinin de doğru yapılması gerekmektedir. Bu da sadece Şekil 4'de verilen iki tank açık model ile gerçekleştirilebilmektedir.

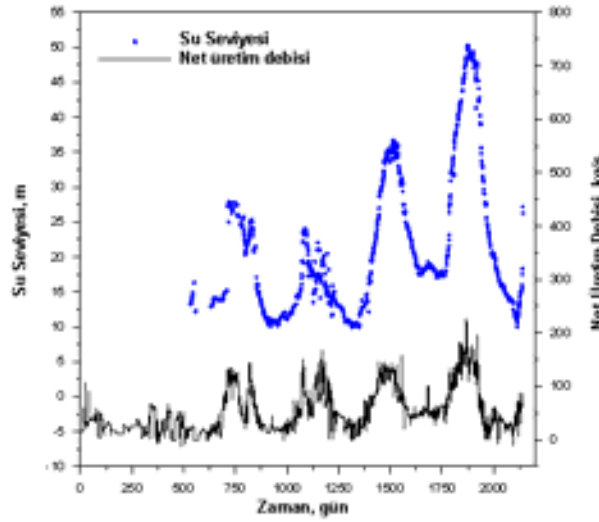
## 5. GERÇEK SAHA UYGULAMALARI

Bu bölümde Rastgele Maksimum Olasılık Yöntemi iki gerçek saha için (İzmir Balçova-Narlidere ve Afyon Ömer-Gecek sahaları) uygulanmaktadır.

### 5.1. İzmir Balçova-Narlidere Jeotermal Sahası

İzmir Balçova-Narlidere Jeotermal Sahası Türkiye'nin bilinen en eski jeotermal sahasıdır ve İzmir'in 10 km batısında yer almaktadır. Sahadaki kuyuların derinlikleri 48.5 ile 1100m arasında değişmekte ve bu kuyulardan sıcaklıkları 80 ile 140°C arasında değişen su üretilmektedir.

Rastgele Maximum Olasılık Yöntemi sahadaki tek bir kuyudan elde edilen veriler üstünde uygulanacaktır. Net üretim debisi ise tüm sahadan yapılan üretim ve enjeksiyon debilerinin farkı olarak alınmaktadır. Uygulamada kullanılan debi verileri 01 Ocak 2000 – 10 Kasım 2005 ve su seviyesi verileri ise 17 Haziran 2001 – 10 Kasım 2005 tarihleri arasında ölçülen değerler olup, Şekil 6 sahadan elde edilen net üretim debisini ve ND-1 kuyusunda kaydedilmiş dinamik su seviyesini göstermektedir.



**Şekil 6.** İzmir Balçova-Narlidere sahasında ND-1 kuyusunda gözlemlenmiş dinamik su seviyesi verilerinin saha toplam net üretim debisi ile değişimi [14].

Şekil 6'daki veriler kullanılarak Rastgele Maximum Olasılık Yöntemi 5 farklı model için uygulanmaktadır. Bu beş model sırasıyla tek tank açık, iki tank kapalı, iki tank açık, üç tank kapalı ve üç tank açık modellerdir. Her model için 100 gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

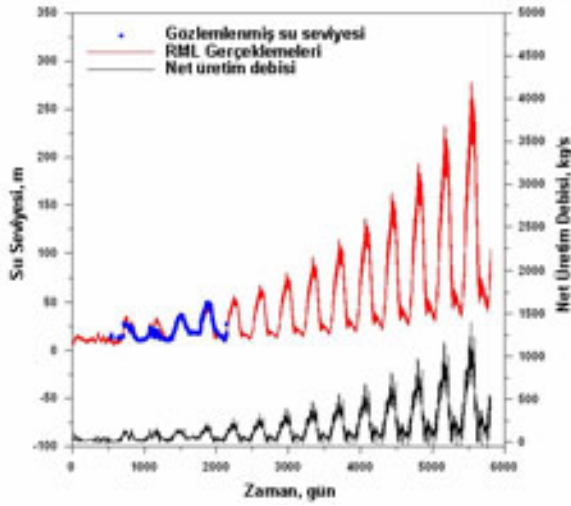
Bu uygulamada ölçülen su seviyeleri basınç verilerine dönüştürülerek modelleme yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar tekrar su seviyelerine dönüştürülmektedir ve grafikler su seviyesi cinsinden verilmektedir. Gözlemlenen verilerin gerçeklemeleri  $N(0,0.8125)$  dağılımından elde edilen birbirinden bağımsız hatalar eklenerek yaratılmaktadır. Geleceğe yönelik 10 yıllık tahmin için net üretim debisi ise her sene %20 artırılarak elde edilmektedir. Kullanılan tüm modeller için geleceğe yönelik performans tahminlerindeki saçılımlar Şekil 7-11'de ve modelleme sonunda elde edilen model parametreleri istatistiksel özellikleri ile birlikte Tablo 2'de verilmektedir.

Şekil 7-11 incelenecek olursa tek tank açık model en dar saçılımı verirken, üç tank açık model ise en geniş saçılımı vermektedir. Tablo 2'de verilen bütün istatistiksel özellikler her 100 gerçekleştirimin ortalaması olarak alınmıştır. Tüm modellerin en küçük kareler hatası incelendiğinde arada çok büyük bir fark olmadığı görülmektedir ve tüm değerler verilere eklenen hataya yakındır.

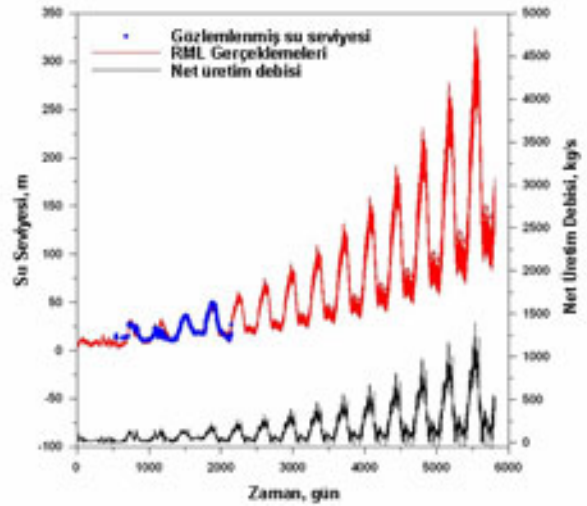


Bu nedenle model seçimi güvenilirlik aralıkları dikkate alınarak yapılmaktadır. İki tank açık model için  $\kappa_{01}$  ve  $\alpha_{01}$ , üç tank kapalı model için  $\kappa_{01}$ ,  $\alpha_{01}$  ve  $\kappa_{02}$  ve üç tank açık model için  $\alpha_{01}$ ,  $\kappa_{02}$  ve  $\alpha_{02}$  parametrelerine ait güvenilirlik aralıkları kabul edilemez oldukları için bu modeller elenmiştir. Herhangi bir güvenilirlik aralığının kabul edilemez olması güvenilirlik aralığının parametrenin büyüklüğünün %95'inden büyük olmasına bağlıdır.

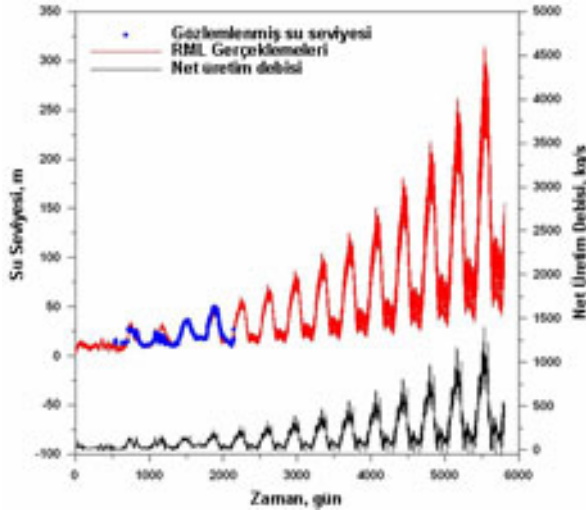
Yukarıda bahsedilen parametrelerinin güvenilirlik aralıklarının büyük olmasının nedeni basınç verilerinin bu parametrelere olan duyarlılığının çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Buna göre, iki model olası görünmektedir: Tek tank açık model ve iki tank kapalı model. Jeolojik bilgiler ışığında bu sistemin açık sistem olduğu bilinmektedir. Bu bilgiye dayanarak bu sahayı en iyi temsil edebilecek modelin tek tank açık model olduğu söylenebilmektedir.



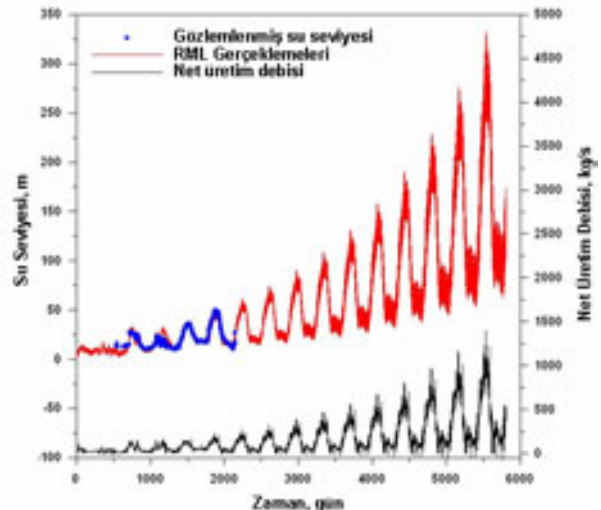
**Şekil 7.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemleri, 1 tank-açık model.



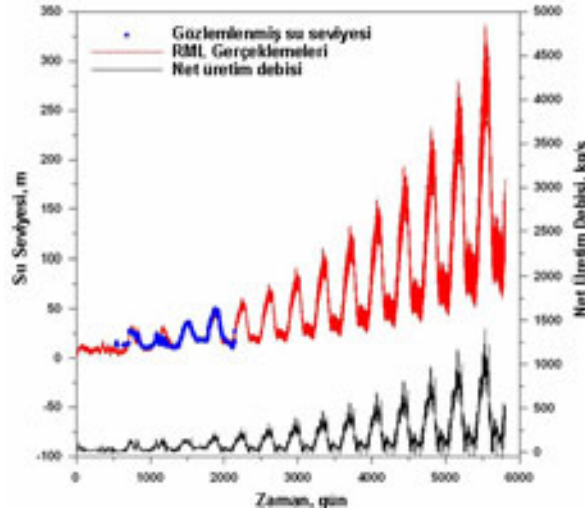
**Şekil 8.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemleri, 2 tank-kapalı model.



**Şekil 9.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemleri, 2 tank-açık model.



**Şekil 10.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemleri, 3 tank-kapalı model.



Şekil 11. RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemeleri, 3 tank-açık model.

Tablo 2. Beş farklı tank modeli ile gözlemlenmiş verilere karşılaştırma yapılarak tahmin edilen model parametreleri.

Model Parametreleri	Tahmin edilen model parametreleri				
	1 tank açık	2 tank kapalı	2 tank açık	3 tank kapalı	3 tank açık
$\kappa_r$ (kg/bar)	$8.4 \times 10^7$ ( $\pm 1.2 \times 10^7$ )	$7.4 \times 10^7$ ( $\pm 1.2 \times 10^7$ )	$8.0 \times 10^7$ ( $\pm 1.3 \times 10^7$ )	$7.7 \times 10^7$ ( $\pm 1.4 \times 10^7$ )	$7.6 \times 10^7$ ( $\pm 1.8 \times 10^7$ )
$\alpha_r$ (kg/bar-s)	44.2 ( $\pm 2.43$ )	47.2 ( $\pm 2.74$ )	46.2 ( $\pm 2.91$ )	46.2 ( $\pm 12.9$ )	46.4 ( $\pm 4.55$ )
$\kappa_{o1}$ (kg/bar)	--	$1.5 \times 10^{10}$ ( $\pm 3.7 \times 10^9$ )	$1.8 \times 10^{12}$ ( $\pm 1.8 \times 10^{14}$ )	$2.1 \times 10^{10}$ ( $\pm 6.6 \times 10^{10}$ )	$2.2 \times 10^{10}$ ( $\pm 1.2 \times 10^{10}$ )
$\alpha_{o1}$ (kg/bar-s)	--	--	10.6 ( $\pm 1.1 \times 10^6$ )	2.9 ( $\pm 2.9 \times 10^5$ )	0.823 ( $\pm 823.0$ )
$\kappa_{o2}$ (kg/bar)	--	--	--	$3.0 \times 10^{13}$ ( $\pm 9.0 \times 10^{19}$ )	$8.5 \times 10^{13}$ ( $\pm 3.4 \times 10^{17}$ )
$\alpha_{o2}$ (kg/bar-s)	--	--	--	--	622.5 ( $\pm 1.2 \times 10^7$ )
RMS (bar)	0.99	0.97	0.98	0.97	0.97

## 5.2. Afyon Ömer-Gecek Jeotermal Sahası

Afyon Ömer-Gecek Sahası Ege Bölgesinde Afyon'un 15 km kuzey doğusunda yer almaktadır. Kuyuların derinliği 56.8 ile 902 m ve üretilen suyun sıcaklığı 50 ile 111.6 °C arasında değişmektedir [15].

Modellemede, 18 Kasım 1996 ile 28 Aralık 2004 tarihleri arasında (yaklaşık 8 yıllık veri) sahada ölçülen üretim debileri ve su seviyesi verileri kullanılmıştır (Şekil 12). Modellemede kullanılan su seviyesi verileri Afyon Ömer-Gecek sahasındaki AF-1 kuyusuna ait olup, modellemede kullanılan üretim debisi verileri ise tüm sahadan yapılan net üretim debisidir (üretim ve re-enjeksiyon farkı).

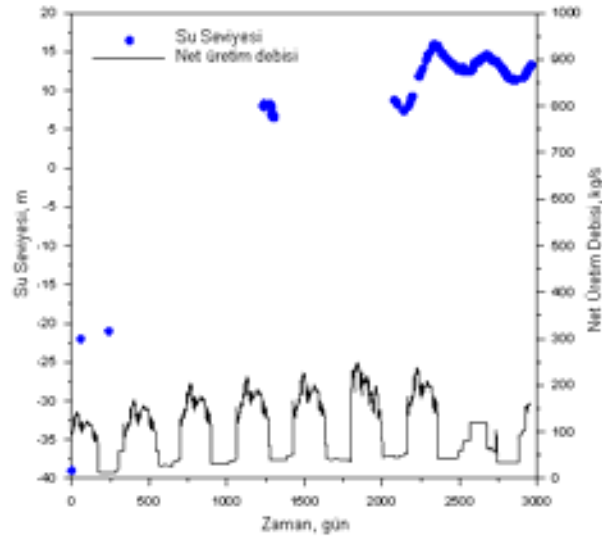
Sahanın basınç (veya dinamik kuyudibi su seviyesi) davranışı beş farklı tank modeli (tek tank açık, iki tank kapalı, iki tank açık, üç tank kapalı ve üç tank açık modeller) ile modellenerek ve her model için 100 gerçekleştirilerek geleceğe yönelik performans tahminlerindeki saçılım incelenmektedir. Basınç verilerine eklenen hatalar  $N(0,1)$  dağılımından elde edilmiştir.

Her bir model için tarihsel karşılaştırma yapıldıktan sonra ileriye yönelik 10 yıllık performans tahminleri yapılmıştır. Üretim debisi 10 yıllık tahmin için her yıl %20 oranında arttırılmaktadır. Şekil 13-17 her bir model için tarihsel karşılaştırma dönemini ve geleceğe yönelik tahminleri göstermektedir.

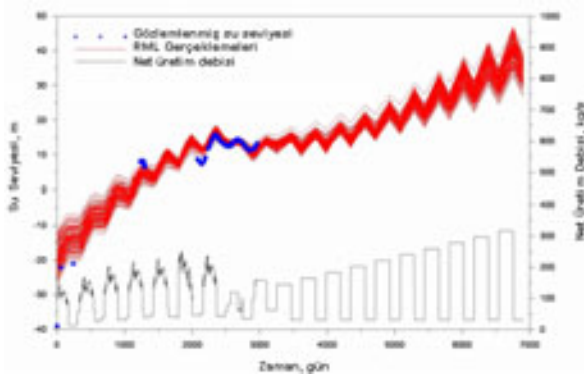
Tablo 3 elde edilen model parametrelerinin özetini vermektedir. Her ne kadar (Şekil 13-17) görsel olarak iyi çıkışma sağlanmışsa da, en küçük kareler (RMS) hataları tüm modeller için basınç verilerine eklenen hatalardan daha yüksektir. Bu nedenle model seçimindeki kriter güvenilirlik aralıkları olmaktadır. Güvenilirlik aralıklarına bakıldığında, bir önceki örnekte olduğu gibi göz önünde bulundurulmuş modeller arasından en uygun model tek tank açık modeldir.

**Tablo 3.** Beş farklı tank modeli ile gözlemlenmiş verilere karşılaştırma yapılarak tahmin edilen model parametreleri.

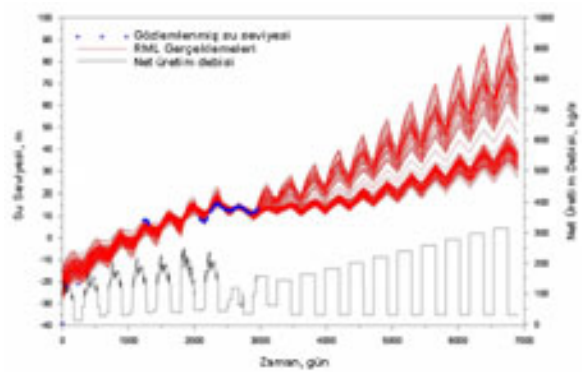
Model Parametreleri	Tahmin edilen model parametreleri				
	1 tank açık	2 tank kapalı	2 tank açık	3 tank kapalı	3 tank açık
$\kappa_r$ (kg/bar)	$2.9 \times 10^9$ ( $\pm 4.8 \times 10^8$ )	$2.4 \times 10^9$ ( $\pm 9.1 \times 10^8$ )	$2.9 \times 10^9$ ( $\pm 1.4 \times 10^9$ )	$1.7 \times 10^9$ ( $\pm 5.6 \times 10^{10}$ )	$1.7 \times 10^9$ ( $\pm 4.1 \times 10^{10}$ )
$\alpha_r$ (kg/bar-s)	30.7 ( $\pm 3.3$ )	41.2 ( $\pm 19.6$ )	31.1 ( $\pm 22.4$ )	135.9 ( $\pm 4.4 \times 10^7$ )	117.9 ( $\pm 6.5 \times 10^7$ )
$\kappa_{o1}$ (kg/bar)	--	$2.0 \times 10^{14}$ ( $\pm 6.9 \times 10^{18}$ )	$1.2 \times 10^{14}$ ( $\pm 2.8 \times 10^{18}$ )	$3.4 \times 10^{10}$ ( $\pm 1.1 \times 10^{16}$ )	$3.1 \times 10^{10}$ ( $\pm 1.7 \times 10^{15}$ )
$\alpha_{o1}$ (kg/bar-s)	--	--	80.4 ( $\pm 6.1 \times 10^7$ )	16.5 ( $\pm 2.3 \times 10^6$ )	25.4 ( $\pm 1.4 \times 10^6$ )
$\kappa_{o2}$ (kg/bar)	--	--	--	$4.1 \times 10^{14}$ ( $\pm 7.6 \times 10^{20}$ )	$5.2 \times 10^{14}$ ( $\pm 1.5 \times 10^{20}$ )
$\alpha_{o2}$ (kg/bar-s)	--	--	--	--	581.4 ( $\pm 2.3 \times 10^8$ )
RMS (bar)	9.08	9.09	9.08	8.95	8.93



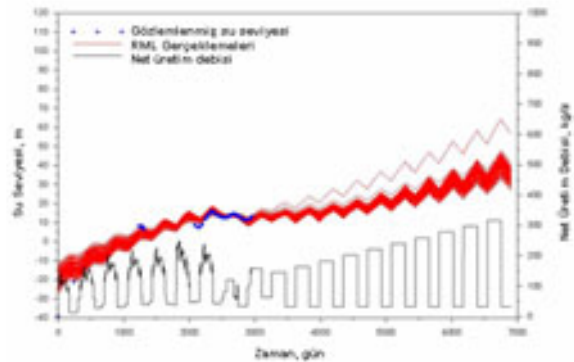
**Şekil 12.** Afyon Ömer-Gecek sahasında AF-1 kuyusunda gözlemlenmiş dinamik su seviyesi verilerinin sahanın toplam net üretim debisi ile değişimi [15].



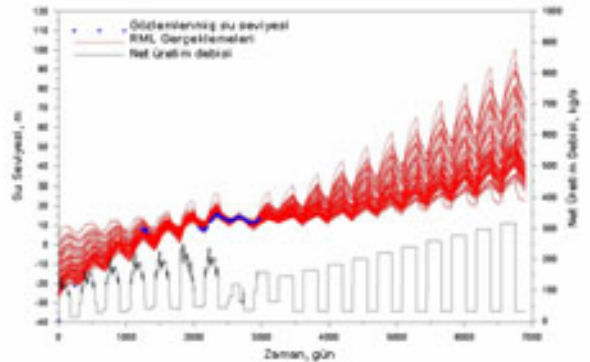
**Şekil 13.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemeleri, 1 tank-açık model.



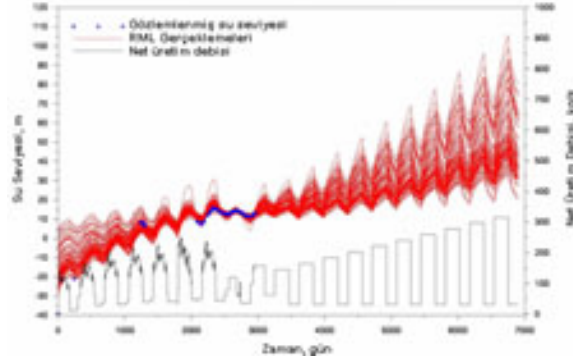
**Şekil 14.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemeleri, 2 tank-kapalı model.



**Şekil 15.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemeleri, 2 tank-açık model.



**Şekil 16.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemeleri, 3 tank-kapalı model.



**Şekil 17.** RML ile tahmin edilen basınç değişimi gerçeklemeleri, 3 tank-açık model.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- (i) Verilen bir üretim senaryosu için tek bir gerçekleştirme ile geleceğe yönelik performans tahmini yapılması işletme kararlarının yanlış alınmasına neden olabilmektedir.
- (ii) Geleceğe yönelik tahminlerin yapılabilmesi için bir çok gerçekleştirme kullanılarak saçılımın bulunması gerekir.
- (iii) Model seçiminde kriter olarak en küçük kareler hatalarına ek olarak güvenilirlik aralıkları da seçilebilir.
- (iv) Rastgele Maximum Olasılık yöntemi gerçek sahalara başarı ile uygulanmıştır.
- (v) İzmir Balçova Narlıdere ve Afyon Ömer-Gecek sahalarında gözlemlenmiş su seviyesi değişim verileri tek tank modeller ile oldukça iyi temsil edilebilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] AXELSSON, G., BJÖRNSSON, G., ve QUIJANO, J.E., "Reliability of Lumped Parameter Modeling of Pressure Changes in Geothermal Reservoirs," proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey 24-29 April 2005.
- [2] SARAĞ, H., ONUR, M., ve SATMAN, A., "Lumped- Parameter Models for Low-Temperature Geothermal Reservoirs and Their application," *Geothermics*, **34**, 728-755.
- [3] 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.
- [4] ONUR, M., SARAĞ, H. ve SATMAN, A., "Jeotermal Rezervuarların Modellenmesi ve Performans Tahminlerindeki Belirsizliğin Değerlendirilmesi", TESKON 2005, TMMOB Makine Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, 23-26 Kasım 2005.
- [5] KİTANİDİS, P.K., "Quasi-linear Geostatistical Theory for Inversing," *Water Resources Research*, 31 (10), 2411-2419, 1995.
- [6] OLİVER, D.S., HE, N., REYNOLDS, A.C., "Conditioning Permeability Fields to Pressure Data," proceedings of 5<sup>th</sup> European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Leoben, Austria, 3-6 September 1996.
- [7] LİU, N., OLİVER, D.S. (2003), "Evaluation of Monte Carlo Methods for Assessing Uncertainty," *SPE Journal* (June), 188-195, 2003.
- [8] GAO, G., ZAFARI, M., REYNOLDS, A.C., "Quantifying Uncertainty for the PUNQ-S3 Problem in a Bayesian Setting With RML and EnKF," *proceedings the 2005 SPE Reservoir Simulation and Symposium*, Houston, Texas, USA, 31 January-2 February 2005.

- [9] ONUR, M., ve TUREYEN, O.I., "Assessing Uncertainty in Future Pressure Changes Predicted by Lumped-Parameter Models for Low-Temperature Geothermal Systems" *proceedings 31<sup>st</sup> Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA, 30 Jan. – 1 February 2006.
- [10] SARAK, H, ONUR, M. ve SATMAN, A., "New Lumped Parameter Models for Simulation of Low-Temperature Geothermal Reservoirs," *proceedings 28<sup>th</sup> Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA, 27-29 January 2003.
- [11] SARAK, H., ONUR, M. ve SATMAN, A., "Applications of Lumped Parameter Models for Simulation of Low-Temperature Geothermal Systems," *proceedings 28<sup>th</sup> Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA, 27-29 January 2003.
- [12] BARD, Y., *Nonlinear Parameter Estimation*, Academic Press, San Diego, CA, USA, 340 pp, 1974.
- [13] FLETCHER, R., "Practical Methods of Optimization", 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons, Chichester, 1986.
- [14] AKSOY, N., Kişisel görüşme, 21 Aralık 2005.
- [15] SATMAN, A., ONUR, M., SERPEN, U., "Afyon Ömer-Gecek Jeotermal Sahası Üretim ve Rezervuar Performansı Projesi," Yayınlanmamış Rapor, Afyon Jeotermal AŞ.-İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 330 s, 2005.

## ÖZGEÇMİŞLER

### Ömer İnanç TÜREYEN

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1997 yılında lisans ve 2000 yılında yüksek lisans ünvanlarını aldı. 2005 yılında Stanford Üniversitesi'nde doktorasını tamamladıktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde Yardımcı Doçent Dr. olarak göreve başladı. Halen aynı bölümde öğretim üyeliği görevine devam etmektedir. İlgili alanları arasında rezervuar karakterizasyonu ve simülasyonu konuları yer almaktadır. Ömer İnanç Türeyyen'in Petrol Mühendisleri Odasına ve Society of Petroleum Engineers kuruluşuna üyelikleri bulunmaktadır.

### Hülya SARAK

İstanbul 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.

### 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 tasarımı, 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 çakıştırma 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.