

JEOTERMAL REZERVUARLARIN MODELLENMESİ

Hülya SARAK
Abdurrahman SATMAN

ÖZET

Literatürde jeotermal rezervuar davranışlarını modelleyen çeşitli modeller mevcuttur. Bunlar *üretim debisi azalma yöntemi*, *boyutsuz rezervuar modellemesi yöntemi* ve *3 boyutlu sayısal modelleme yöntemi* olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Yeni bulunan sahalarda elde yeterli miktarda veri bulunmamaktadır. Bu nedenle, sahanın işletilmeye başlandığı erken dönemlerde rezervuarın basınç davranışının modellenmesi ve jeotermal potansiyelin tahmin edilebilmesi için kullanılacak en uygun yöntem boyutsuz rezervuar yöntemidir.

Bu çalışmada, jeotermal rezervuarın üretim davranışının boyutsuz rezervuar modellemesi yöntemi ile modellenmesi konusu tartışılmaktadır. İncelenen modellerde üretim, enjeksiyon ve doğal beslenmenin, düşük sıcaklıklı ve sıvının etken olduğu bir jeotermal rezervuarın mevsimsel basınç veya su seviyesi üzerindeki etkileri göz önüne alınmaktadır. Modellemede rezervuar ve akifer ayrı ayrı tanklar olarak temsil edilmekte ve beslenme kaynağının etkisi incelenmektedir.

Model sonuçları sabit debide üretim/enjeksiyon durumunda analitik ifadeler şeklinde verilmekte, debi değişimleri Duhamel İlkesi yaklaşımıyla modellenmektedir. Optimizasyon yöntemi kullanılarak, ölçülen saha verileri model sonuçlarıyla karşılaştırılarak rezervuar ve akifere ait parametreler belirlenebilmektedir. Modellerin sonuçları grafiksel olarak verilmekte ve önemli gözlemler vurgulanmaktadır.

İzlanda'daki üç jeotermal sahanın verileri ve ayrıca Balçova-Narlıdere jeotermal sahası verileri değerlendirilerek, model sonuçlarıyla saha sonuçları karşılaştırılmakta ve sonuçlar sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

Sıcaklığına bağlı olarak, başta konut ısıtması olmak üzere elektrik üretimi, sera ısıtması, termal turizm-tedavi ve endüstri gibi birçok alanda kullanılan jeotermal enerji açısından ülkemiz, dünyanın zengin ülkelerinden birisidir. Türkiye'de ısıtma amaçlı olarak jeotermal enerjinin kullanıldığı bölgeler arasında Balçova, Afyon, Kırşehir, Simav, Gönen ve Kızılcahamam sayılabilir. Sıcak jeotermal akışkan soğuk kış dönemlerinde rezervuardan üretilerek konutların ısıtılması sağlanmaktadır.

Soğuk kış döneminde rezervuardan yapılan akışkan üretime bağlı olarak rezervuar basıncı ve su seviyesi düşmekte, sıcak dönemde üretimin azaltılması veya durdurulması durumunda ise, doğal beslenmenin etkisiyle, rezervuar basıncı ve su seviyesi tekrar yükselmektedir. Rezervuardan üretilen miktarın beslenmeyle karşılanması durumunda jeotermal sistem yenilenebilir bir sistem olarak çalışmaktadır. Karşılanmaması durumunda ise tükenbilir jeotermal sistem gündeme gelir.

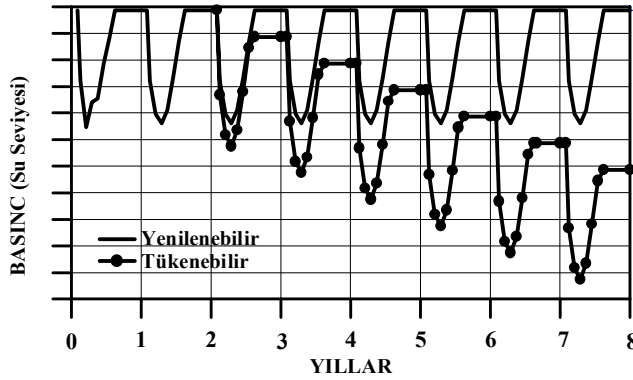
Jeotermal rezervuar modellemesinin başlıca amacı, uzun dönem jeotermal rezervuar potansiyelinin doğru ve gerçekçi olarak tahmin edilmesidir. Bu amaçla geliştirilmiş olan modeller [1-8] literatürde tartışılmaktadır. Uygun modelin seçiminde, eldeki verilerin güvenilirliği, miktarı ve ayrıca modellemenin amacı göz önünde bulundurulur.

2. JEOTERMAL SİSTEMLERİN BASINÇ DAVRANIŞLARI

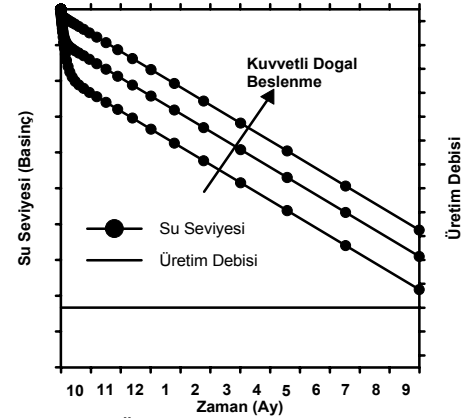
Şekil 1'de, iki farklı jeotermal sistemin yıllar içinde basınç (veya su seviyesi) değişimi gösterilmektedir. Rezervuarın bir işletme dönemi içinde (örneğin, üretim ve kapama dönemini içeren bir yıllık dönemde), üretime son verildiğinde rezervuar basıncı ilk basınca (üretim öncesi basınca) ulaşıyorsa yani üretilen akışkan hacmi doğal beslenme ile karşılanabiliyorsa, bu jeotermal sistem 'Yenilenebilir Jeotermal Sistem'; rezervuar basıncı ilk basınca ulaşamıyorsa (yani doğal beslenme yetersiz) ve yıllar içinde düşüm gösteriyorsa 'Tükenebilir Jeotermal Sistem' olarak adlandırılmaktadır.

Kullanım alanlarına göre jeotermal sistemlerin basınç davranışları doğal beslenmenin ve rezervuardan yapılan üretim/enjeksiyonun etkisiyle farklılıklar göstermektedir. Güç üretimi amaçlı olarak kullanılan jeotermal sistemden yıl boyunca sabit debi ile üretim yapılırken, ısıtma amaçlı olarak kullanılan sistemden yılın soğuk dönemlerinde üretim yapılırken sıcak dönemlerinde üretim durdurulmaktadır.

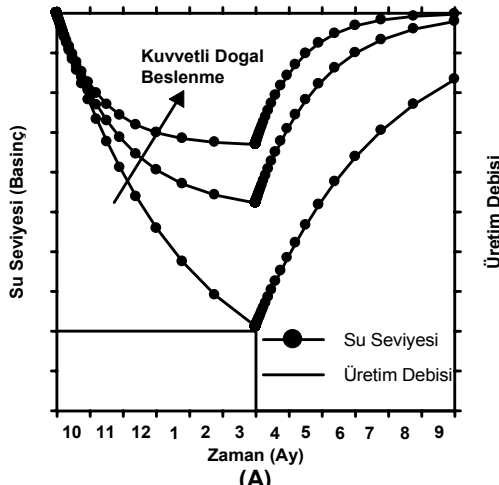
Şekil 2 ve Şekil 3, güç üretimi ve merkezi ısıtma amaçlı olarak kullanılan jeotermal sistemlerin basınç davranışlarını göstermektedir. Güç üretiminde kullanılan sistemlerin basıncı yıl boyunca azalmakta olup, doğal beslenmenin miktarına bağlı olarak basınç düşümü az veya çok olmaktadır (Şekil 2). Jeotermal sistemin ısıtma amaçlı kullanılması durumunda ise ısıtma döneminde sabit debi ile üretim yapıldığı gibi (Şekil 3-a) değişken debi ile de üretim yapılmaktadır (Şekil 3-b). Şekil 3-a ve Şekil 3-b'de gösterilen sistemlerde, üretim döneminde sistemden yapılan üretimin etkisiyle sistemin basıncı düşmekte ve kapama döneminde doğal beslenmenin etkisiyle sistemin basıncı üretimden önceki ilk basınca yükselmekte veya yükselmemektedir. Kapama dönemi sonunda sistemin basıncı üretim döneminin başlangıcındaki basınca ulaşıyorsa bu sistem yenilenebilir bir sistem, ulaşamıyorsa tüketilebilir bir sistem olarak düşünülebilir.



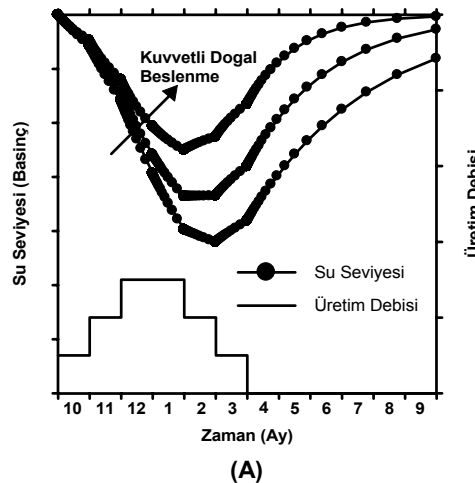
Şekil 1. Yenilenebilir ve Tükenebilir Jeotermal Sistemler.



Şekil 2. Güç Üretimi Amaçlı Kullanılan Jeotermal Sistemin Basınç Davranışı.



Şekil 3. Merkezi Isıtma Amaçlı Kullanılan Jeotermal Sistemin Basınç Davranışı



3. JEOTERMAL REZERVUARLARIN MODELLENMESİ

Jeotermal rezervuar modellemesinin başlıca amacı, uzun dönem jeotermal rezervuar potansiyelinin doğru ve gerçekçi olarak tahmin edilmesidir. Bu amaçla, özellikle son kırk yıl içinde jeotermal rezervuarların davranışlarını modelleyen birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, karmaşıklıkları ve maliyetleri açısından farklılık göstermektedirler. Uygun yöntemin (modelin) seçiminde, eldeki verilerin güvenilirliği, miktarı ve ayrıca modellemenin amacı göz önünde bulundurulmalıdır.

Jeotermal sistemler faylar, çatlaklar, faz değişimleri, kimyasal tepkimeler ve ısıl etkilerden dolayı genellikle çok karmaşıktır. Jeotermal sistem modeli geliştirilirken varolan saha verileri dikkatle değerlendirilmeli ve sistemin fiziksel yapısı belirlenmelidir. Bu şekilde kavramsal model oluşturulduktan sonra jeotermal rezervuarın davranışını en uygun temsil edecek model kullanılarak, jeotermal rezervuarın gelecekteki performansı tahmin edilir.

Literatürde jeotermal rezervuar davranışlarını modelleyen çeşitli modeller mevcuttur. Bunlar *üretim debisi azalma yöntemi*, *boyutsuz rezervuar modellemesi yöntemi* ve *3 boyutlu sayısal modelleme yöntemi* olarak üç ana başlık altında toplanabilir.

Üretim debisi azalma analizi yönteminde, kuyuların ve rezervuarın üretim verileri uygun cebirsel denklemlerde kullanılarak, gelecekteki üretim debileri tahmin edilmektedir. Geleceğe yönelik üretim debisinin değişimi ve toplam üretilebilir akışkan miktarı tahminleri bu yaklaşımın amacıdır. Üretim debilerinin tahmininin yapılmasıyla gelecekte sisteme eklenmesi gerekli yeni kuyu sayıları da belirlenebilmektedir. Ancak, yaklaşımın kullanılabilmesi için yeterli üretim verisinin varolması gereklidir. Bu yöntemdeki en önemli sorun saha işletimindeki değişiklikleri (geliştirme sondajları, ek kuyular, enjeksiyon v.b.) göz önünde bulundurmamasıdır.

Boyutsuz rezervuar modellemesinde, rezervuar bir bütün olarak alınır. Rezervuara giren ve rezervuardan çıkanlar gözetilerek ve akışkan/kayaç özellikleri kullanılarak, zamana veya rezervuardan yapılan üretime göre rezervuar basıncı ve sıcaklığının davranışını belirlemeyi amaçlayan bir modelleme şeklidir. Bu yöntemin başlıca avantajları arasında kullanımının basitliği ve büyük bilgisayar kapasitelerine gereksinim duyulmaması sayılabilir. Dezavantajları ise; (1) rezervuardaki akışkan akışını göz önüne almaması ve termodinamik koşulların ve rezervuar özelliklerinin yerel dağılımlarını ihmal etmesi, (2) faz ve ısıl cepheleri modelleyememesi, (3) kuyu aralıkları ve enjeksiyon kuyularının yerleşimleri hakkındaki sorulara yanıt verememesidir.

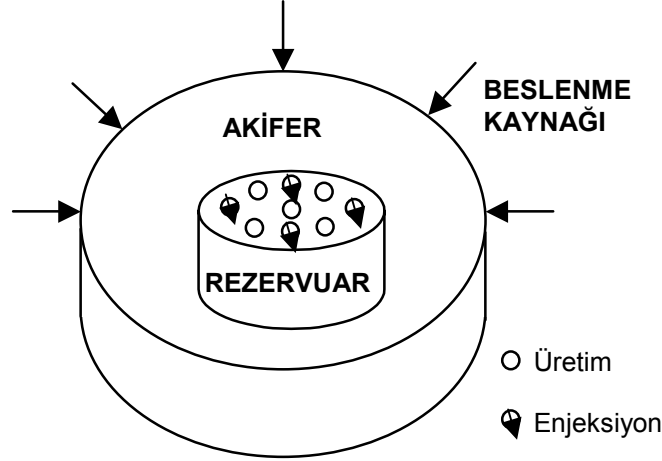
Rezervuarın 3 boyutlu olarak alındığı **sayısal modellerde** rezervuara ait her türlü akışkan ve kuyu özellikleri modele girilmekte, yerel, bölgesel ve rezervuar genelinde geçerli tüm parametrelerin dağılımı göz önüne alınarak rezervuar performansı incelenmektedir. Ancak bu tür modellerin doğruluğu, girilen verilerin doğruluğuyla olduğu kadar çokluğuyla da ilişkilidir. Genellikle bu tür sayısal modelleme çalışmaları, rezervuar ile ilgili verilerin yeterli duruma ulaştığı ve belirli bir üretim ve rezervuar performansı geçmişinin olduğu aşamalarda tercih edilmektedir. Bu yöntemin başlıca avantajı ise tüm matematiksel denklemleri bir bilgisayar kodunda saklaması ve kullanıcıya ne kadar ayrıntılı bir modelleme yapacağına ve hangi fiziksel işlemlerin gerekli olduğuna karar vererek modelleme yapmasına izin vermesidir. En önemli dezavantajları ise akışkan ve rezervuarla ilgili çok sayıda bilginin modelde veri olarak kullanılıyor olması, büyük bilgisayar kapasitelerine ve deneyimli kullanıcılara gereksinim duyulmasıdır.

3 boyutlu rezervuar modellerinde önemli ölçüde jeolojik, jeofizik, jeokimyasal ve hidrolojik verilere gereksinim duyulması ve gerekli verileri elde etmenin hem fazla zaman alması, hem de maliyetinin yüksek olması sayısal modellemenin olumsuz yönleridir. Yeni bulunan jeotermal sahalar için elde yeterli miktarda veri de bulunmamaktadır. Saha hakkında üretim verisi elde edildiğinde 3 boyutlu rezervuar modellemesi en uygun ve gerçekçi yaklaşım olacaktır.

Bu çalışmada, boyutsuz rezervuar modellemesi temel olarak incelenecek, modellemede kullanılan yaklaşımlar açıklanacak ve saha uygulamaları tartışılacaktır.

4. BOYUTSUZ REZERVUAR MODELLEMESİ

Bu bölümde sunulan ve kullanılan modellerde, jeotermal sistem üç ayrı bileşen ile temsil edilmektedir. Bunlar; üretim ve enjeksiyonun gerçekleştiği rezervuar, rezervuarı besleyen akifer ve akiferin beslendiği beslenme kaynağıdır (Şekil 4).



Şekil 4. Jeotermal Sistemin Bileşenleri.

Modellerde, rezervuar ve akifer birer tank olarak düşünülmekte ve her bir tank için ortalama özellikler kullanılmaktadır. Akiferin dış sınırının akışa kapalı olması veya sabit basınçlı bir dış sınırdan beslenmesi (bir başka ifade ile jeotermal sistemin beslenmesi) durumu da incelenmektedir.

Daha önce de değinildiği gibi, boyutsuz modelleme çalışmaları rezervuardan yapılan üretim debisinin üretim dönemi boyunca sabit kalması durumunda veya sıcak dönemlerde debinin minimumda ve soğuk dönemlerde maksimumda gerçekleştirilmesi durumunda yapılabilir.

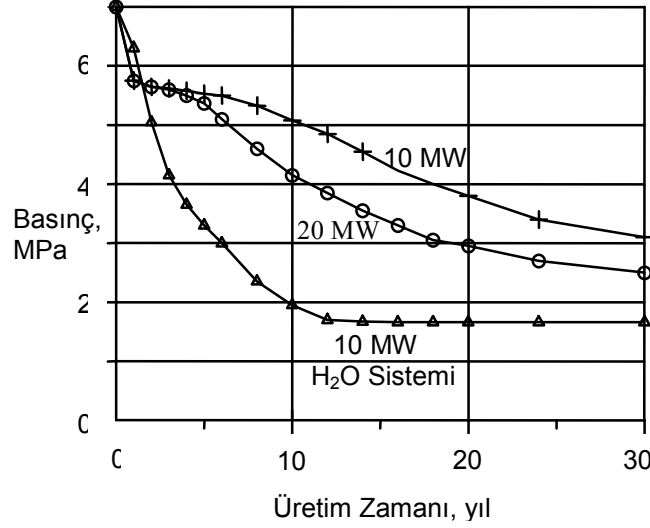
Debinin üretim dönemi boyunca sabit tutulduğu (yıl içinde döngüsel olarak değişmediği) modelleme çalışmasına örnek olarak Kaynak [8]'de verilen boyutsuz modelleme çalışması alınabilir. Şekil 5, elektrik üretimi amacı ile kullanılan Kızıldere jeotermal sahası için modelleme sonuçlarını göstermektedir. Jeotermal sahadan 10 ve 20 MW elektrik üretimi için modelleme çalışması yapılmış, basıncın üretim zamanına göre düşümü tahmin edilmiştir. Başlangıçta tek fazlı olan sistemde basınç hızla düşmekte, kısa bir üretim dönemi sonrasında sistem iki faza dönüştükten sonra basınç düşümü azalmaktadır. Rezervuar koşullarında sıvı su içinde ağırlıkça %1.5 CO₂ içeren rezervuarın üretim-basınç davranışı, CO₂ içermeyen su sisteminin üretim-basınç davranışından (Şekil 5'te 10 MW H₂O Sistemi) oldukça farklıdır.

Şekil 3'de gösterildiği gibi debinin yıl içinde döngüsel olarak değişmesi durumunda aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenen modeller kullanılabilir. Modellerde rezervuar ve akiferden oluşan jeotermal sistem, rezervuar bir tank ve akiferler ise ayrı tanklar olarak, modellenerek incelenmektedir.

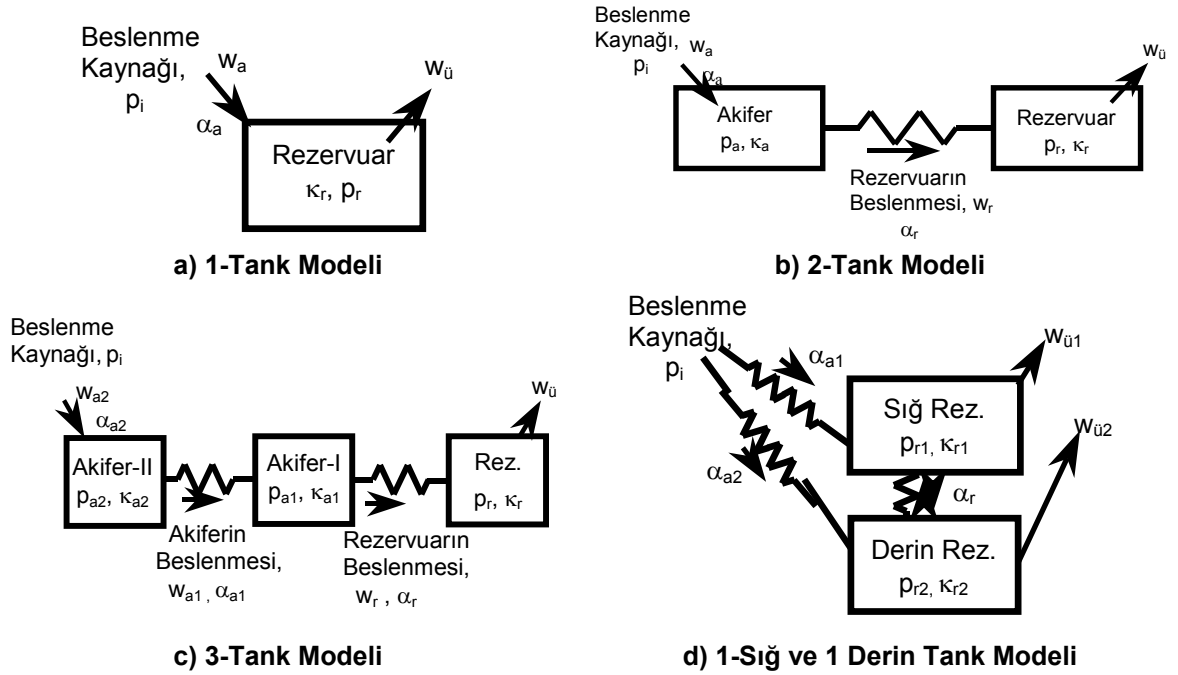
Şekil 6'da gösterilen 4 farklı jeotermal sistem, sadece bilinen basit kütle denge denklemleri kullanılarak modellenebilir. Kullanılan jeotermal sistemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. 1 rezervuar tankı ve beslenme kaynağı (1-Tank Modeli)
2. 1 rezervuar – 1 akifer tankı ve beslenme kaynağı (2-Tank Modeli)
3. 1 rezervuar – 2 akifer tankı ve beslenme kaynağı (3-Tank Modeli)
4. 2 rezervuar tankı ve beslenme kaynağı (1-Sığ ve 1-DerinTank Modeli)

Sıvının etken olduğu jeotermal rezervuarların incelendiği modellerde, üretim süresince izotermal koşullar (sıcaklığın sistem içinde sabit kaldığı ve konuma göre sıcaklık farkının olmadığı) varsayılarak ısı dengesi ihmal edilmektedir.



Şekil 5. Kızıldere Jeotermal Sahasının Rezervuar Performans Tahmini [8]



Şekil 6. Modellemede Kullanılan Tank Sistemleri

Modellerde, tanklar arasındaki (akifer-rezervuar veya akifer-akifer) su girişi Schilthuis kararlı akış denklemi ile ifade edilmektedir. Beslenmenin, tanklar ile beslenme kaynağı arasındaki basınç farkı ile orantılı olduğu varsayılmaktadır.

Kaynak [9, 10, 11]'de ayrıntıları verilen analitik çözümler sabit debi ile üretim yapılması durumu için geçerli olup, değişken debi ile üretim yapılması durumunda ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenecek olan Duhamel Kuralı uygulanmaktadır.

Rezervuar basıncının korunması için enjeksiyonun da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Enjekte edilen akışkanın sıkıştırılabilirliğinin değişmediği varsayımı yapılırsa, enjeksiyon (W_e) ve üretim ($W_{\ddot{u}}$) terimleri *Net Üretim* terimi ($W_{\ddot{u},net}$) olarak Denklem 1'de verildiği gibi birleştirilebilmektedir.

$$W_{\ddot{u},net} = W_{\ddot{u}} - W_e \text{ veya kütle debisi olarak } w_{\ddot{u},net} = w_{\ddot{u}} - w_e \quad (1)$$

İleriki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenecek olan optimizasyon tekniği kullanılarak, model sonuçları sahaya ait ölçülmüş basınç verilerine karşılaştırılabilmektedir. Optimizasyon ile en iyi çakışma sağlanarak, rezervuar ve akifer parametreleri tahmin edilebilmektedir [9,12].

a) 1-Tank Modeli : Bu modellemede kullanılan tank sistemi Şekil 6-a ile gösterilmektedir. Burada rezervuar bir tank olarak düşünölmekte, rezervuarı sabit basınçlı bir kaynak (akifer) beslemektedir. Rezervuar tankı ile beslenme kaynağının basınçları başlangıçta ($t = 0$) birbirine eşittir. Rezervuar tankından yapılan net üretim ($w_{\ddot{u}}$, kg/sn) miktarına bağlı olarak, basıncı sabit olan akiferden rezervuara su girişı (w_a , kg/sn) gerçekleşmektedir. Sistemden kütle kaybının olmadığı düşünölmürse, kütle denge denklemi;

$$W_c = W_i - W_{\ddot{u}} + W_a \quad (2)$$

şeklinde yazılır. Burada; incelenen zaman değerinde rezervuardaki kütle, W_c , rezervuardaki ilk kütle, W_i , üretilen kütle, $W_{\ddot{u}}$, beslenme ile akiferden rezervuara giren kütle, W_a ile gösterilmektedir.

Basınçlı-sıkıştırılmış sistemlerde (confined system) üretim, sıkışmış akışkanın genişmesi ile gerçekleşmektedir. Sistemin basınçlı-sıkıştırılmış sistem olmasına bağlı olarak, sıvının etken olduğu rezervuarlarda başlangıçta akışkan sıkışmış sudur. Bu durumda rezervuardan üretime başlanması ile birlikte, sıkıştırılabilirliği nedeniyle su genişecektir. Rezervuar hacmi, V_r , için yerindeki akışkan kütlesi,

$$W_c = V_r \phi_r \rho_r \quad (3)$$

şeklinde verilir. Burada; ϕ_r , rezervuar gözenekliliği ve ρ_r , rezervuar akışkanının yoğunluğudur.

Denklem 2'nin zamana göre türevi alınır ve izotermal sıkıştırılabilirliğin tanımı kullanılırsa;

$$w_a - w_{\ddot{u}} = V_r \phi_r \rho_r c_{tr} \frac{dp_r}{dt} = \kappa_r \frac{dp_r}{dt} \quad (4)$$

elde edilir. Burada; w_a ve $w_{\ddot{u}}$ sırasıyla beslenme ve üretim debileri, c_{tr} toplam (akışkan + kayaç) sıkıştırılabilirliği ve κ_r ise rezervuarın depolama kapasitesi olup $\kappa_r = V_r \phi_r c_{tr} \rho_r$ şeklinde ifade edilmektedir.

Sistemin dış sınırındaki beslenme kaynağının basıncının sabit olması durumunda su girişı (beslenme) debisi Schilthuis modeli kullanılarak [13];

$$w_a = \alpha_a (p_i - p) \quad (5)$$

şeklinde elde edilir. Burada; p_i , beslenme kaynağının basıncı; p , rezervuar tankının basıncı ve α_a , rezervuarın beslenme sabitidir.

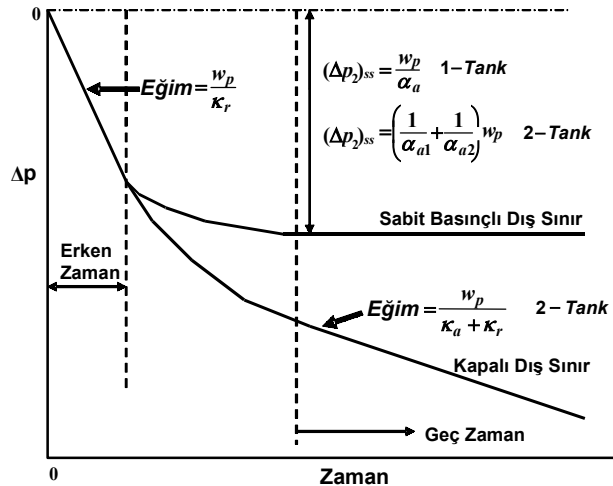
Denklem 4 ve 5 birleştirilir ve elde edilen birinci derece differansiyel denklem uygun başlangıç koşulu kullanılarak çözümlerse, rezervuar basıncının (veya $p = \rho gh$ ilişkisinden dolayı kuyucu su seviyesinin) zamana göre ifadesi Denklem 6'daki gibi elde edilir [9,10,11].

$$p_r(t) = p_i - \frac{w_{ii}}{\alpha_a} \left[1 - \exp\left(-\alpha_a t / \kappa_r\right) \right] \quad (6)$$

b) 2-Tank Modeli : Şekil 6-b'de gösterilen 2-Tank Modelinde, jeotermal sistemin 3 ana parçadan oluştuğu düşünülmektedir. Üretim ve enjeksiyonun yapıldığı 1 rezervuar tankı, rezervuarı besleyen 1 akifer tankı ve akiferi besleyen sabit basınçlı bir beslenme kaynağı bulunmaktadır. Rezervuar tankından yapılan net üretim (w_{ii} , kg/sn) miktarına bağlı olarak akifer tankından rezervuar tankına su girişi (w_a , kg/sn) gerçekleşmekte ve akifer tankının basıncı düşmektedir. Böylece tüm sistem, rezervuar tankından yapılan üretimden etkilenmektedir.

Akifer tankının dış sınırında, basıncı p_i değerinde sabit kalan bir beslenme kaynağı nedeniyle, sabit basınçlı bir dış sınır olabileceği gibi akışa kapalı bir dış sınır olması da olasıdır. Akifer tankının uygun dış sınır koşulu kullanılarak modelleme yapılabilmektedir [9,10,11].

2-Tank Modelinin sabit basınçlı dış sınır ve kapalı dış sınır için erken ve geç zaman çözümleri grafiksel olarak Şekil 7'de verilmektedir. Üretim döneminin erken zamanlarında sabit basınçlı dış sınır ve kapalı dış sınır çözümleri birbirleriyle aynı olup; rezervuar basıncı üretim debisi, w_{ii} , ve rezervuarın depolama kapasitesine, κ_r , bağlı olarak zamanla doğrusal olarak azalmaktadır. Belirli bir geçiş zamanından sonra, sabit basınçlı dış sınır çözümü geç zamanlarda sabit bir basınç değerine ulaşmakta, bir başka deyişle, rezervuar basıncı zamandan bağımsız olarak sabitlenmektedir. Kapalı dış sınır olması durumunda ise rezervuar basıncı üretim debisi, w_{ii} , ve sistemin toplam depolama kapasitelerine, $\kappa_a + \kappa_r$, bağlı olarak zamanla doğrusal olarak azalmaya devam etmektedir.



Şekil 7. 2-Tank Sabit Basınçlı Dış Sınır ve Kapalı Dış Sınır Çözümleri.

c) 3-Tank Modeli : 3-Tank modelinde (Şekil 6-c), jeotermal sistemin beslenmesi 2 akifer tankından oluşmakta ve ayrıca en dıştaki akifer tankı ise sabit basınçlı bir kaynaktan beslenmektedir. Rezervuar

tankından yapılan net üretim (w_{ii} , kg/sn) miktarına bağlı olarak, I. akifer tankından rezervuar tankına su girişi gerçekleşmekte ve I. akifer tankının basıncının düşmesi nedeniyle II. akifer tankından I. akifer tankına su girişi olmaktadır. II. akifer tankında basınç düştüğünde ise beslenme kaynağından II. akifer tankına su girişi olmaktadır. Bu nedenle, bu sistemi kararsız akışın hidrolojik benzetmesi olarak düşünmek olasıdır.

Bu modellemede, en dıştaki akifer tankının dış sınırından sabit basınçlı bir kaynaktan beslenmesi veya beslenmemesi durumları için analitik çözümler geliştirilmiştir [9,10,11].

d) 1-Sığ ve 1-Derin Tank Modeli : Jeotermal sistemin, 1 sığ ve 1 derin olmak üzere iki ayrı rezervuar tankından oluştuğu ve rezervuar tanklarının sabit basınçlı bir beslenme kaynağından beslendiği düşünülen 1-Sığ ve 1 Derin Tank Modeli Şekil 6-d'de gösterilmektedir. Sığ ve derin rezervuardan yapılan net üretim (sırasıyla, w_{i1} ve w_{i2} , kg/sn) miktarına bağlı olarak rezervuar tankları arasında da akışkan akışı gerçekleşmektedir. Burada incelenen model, Balçova jeotermal sistemini temsil eden bir model olarak düşünülebilir. Model için analitik çözümler Kaynak [9,10,11]'de verilmektedir.

Kaynak [9, 10, 11]'de ayrıntıları verilen analitik çözümler sabit debi ile üretim yapılması durumu için geçerli olup, değişken debi ile üretim yapılması durumunda Duhamel Kuralı uygulanmaktadır.

Optimizasyon tekniği kullanılarak, model sonuçları sahaya ait ölçülmüş basınç verilerine karşılaştırılabilmektedir. Bu çalışmada, optimizasyon yöntemi olarak Levenberg-Marquardt yöntemi kullanılmaktadır. Optimizasyon ile en iyi çakışma sağlanarak, rezervuar ve akifer parametreleri tahmin edilmektedir [9,12].

5. DUHAMEL İLKESİ VE OPTİMİZASYON YÖNTEMİ

Model sonuçları sabit debide üretim/enjeksiyon durumunda analitik ifadeler şeklinde verilmektedir. Değişken debi ile üretim/enjeksiyon yapılması durumunda Duhamel İlkesi uygulanmaktadır. Rezervuardaki basınç düşümüne Duhamel İlkesi aşağıdaki gibi uygulanmaktadır.

$$\Delta p(t) = \int_0^t w_{ii}(\tau) \Delta p'_u(t - \tau) d\tau \quad \text{veya basınç cinsinden,} \quad p(t) = p_i - \int_0^t w_{ii}(\tau) \Delta p'_u(t - \tau) d\tau \quad (7)$$

Model parametrelerini tahmin edebilmek için Levenberg-Marquardt optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Ölçülen saha verileri model sonuçları ile karşılaştırılarak, rezervuar ve akifer parametreleri belirlenebilmektedir. Bu optimizasyon tekniğinde *Ağırlıklı En Küçük Kareler Yöntemi* kullanılmaktadır. Böylece ölçüm hatalarının etkisi ihmal edilmemektedir.

Bunlara ek olarak optimizasyon sonunda elde edilen model parametrelerinin güvenilirliğini belirlemek amacıyla güvenilirlik aralığı yüzdesi ve modellemede çakışmanın niteliğini belirlemek için RMS (Root Mean Square) tanımları verilmektedir. Düşük yüzdeli güvenilirlik aralığı değeri, elde edilen söz konusu parametre değerinin güvenilir olarak tahmin edildiğini gösterirken, yüksek güvenilirlik aralığı yüzdesi parametre değerinin güvenilirliğini azaltmaktadır. RMS değeri, gözlemlenen ile modelden elde edilen verilerin farklarının karelerinin toplamının veri noktasına bölümünün kareköküdür

$$\left(RMS = \sqrt{\frac{(y_{gözlem} - y_{model})^2}{N}} \right). \quad \text{RMS değeri küçüldükçe model ile saha verisi daha iyi çakışma}$$

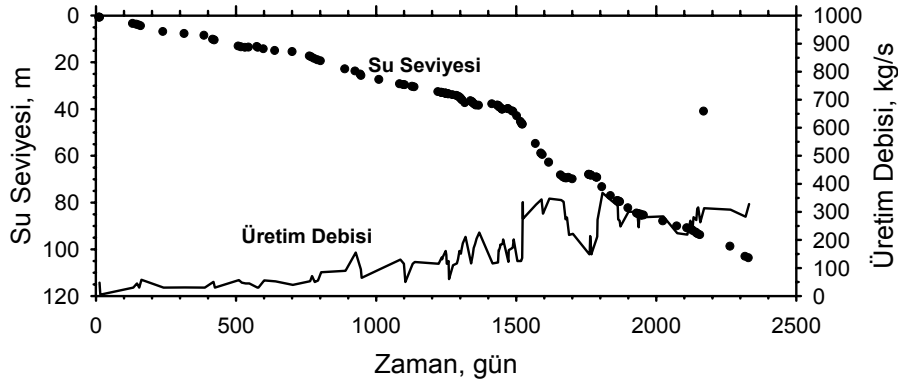
gösterirken, RMS değeri büyüdükçe daha kötü bir çakışma göstermektedir.

6. SAHA UYGULAMALARI

Bu bölümde, Balçova-Narlidere jeotermal sahası ile literatürden elde edilen İzlanda'daki üç sahanın verileri kullanılarak, yukarıda ayrıntıları verilen modellerden 1-, 2- ve 3- tank modellerinin saha verileri ile gösterdiği uyum tartışılmaktadır. Ayrıca literatürde bu saha verilerini kullanarak sayısal modelleme çalışması yapmış olan Axelsson'un [1] sonuçları ile model sonuçları karşılaştırılmaktadır.

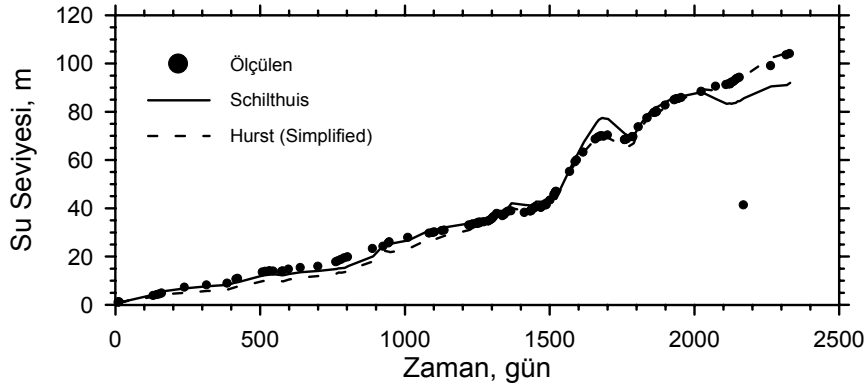
6.1 Svartsengi Jeotermal Sahası

İzlanda'da bulunan Svartsengi jeotermal sahası akışkan sıcaklığı yaklaşık 235°C olan sıvının etken olduğu bir jeotermal sahadır. Yaklaşık 7 yıllık üretim ve su seviyesi verileri literatürde bulunmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Svartsengi Jeotermal Sahasının Su Seviyesi Değişimi ve Üretim Verileri [6]

Literatürde Olsen [6] Svartsengi sahasının verilerini ve su girişi modellerini kullanarak, jeotermal rezervuarın değerlendirilmesi konusunda modelleme çalışmaları yapmışlardır. Olsen'in kullandığı modeller içinde, Schilthuis kararlı akış modeli saha verileri ile kabul edilebilir bir çakışma ve Hurst Simplified karasız akış modeli ise en iyi çakışmayı göstermiştir (Şekil 9). Schilthuis kararlı akış modeli kullanılarak yapılan modellemede saha verileri ile model sonuçları erken dönemlerde geç dönemlere göre daha uyumlu sonuçlar vermektedir. Olsen Schilthuis kararlı akış modelini kullanarak rezervuara ait depolama kapasitesi ve beslenme sabitini $\kappa_r = 6.408 \times 10^8$ kg/bar ve $\alpha_a = 36.53$ kg/bar-sn olarak elde etmiştir. Sonsuz çevrel akifer varsayımı ile Hurst (simplified) modeli saha verileri ile çok iyi bir uyum göstermektedir.



Şekil 9. Schilthuis Kararlı Akış ve Hurst (Simplified) Karasız Akış Modeli Sonuçları [6]

κ_r ve α_a 'nın Değerlendirilmesi : Rezervuarın depolama kapasitesi, κ_r , basınçlı-sıkıştırılmış (*confined*) ve üst düzeyi serbest (*unconfined*) rezervuarlar için aşağıda verilen Denklem 8 ve Denklem 9 ile ifade edilebilmektedir.

$$\kappa_r = V_r \phi_r \rho_r c_{tr}, \quad V_r = A_r L_r \quad (\text{basınçlı-sıkıştırılmış rezervuar}) \quad (8)$$

$$\kappa_r = \frac{A_r \phi_r}{g} \quad (\text{üst düzeyi serbest rezervuar}) \quad (9)$$

Burada;

- V_r : rezervuarın kaba hacmi (m^3), A_r : rezervuarı alanı (m^2),
 g : yerçekimi ivmesi (m/sn^2), ϕ_r : rezervuar gözenekliliği,
 L_r : rezervuarın kalınlığı (m),
 c_{tr} : toplam (akışkan + kayaç) sıkıştırılabilirlik (1/bar),
 ρ_r : rezervuar akışkanının yoğunluğu (kg/m^3) dir.

Svartsengi sahasının gözenekliliği 0.1, akışkan yoğunluğu 850 kg/m^3 , toplam sıkıştırılabilirlik $2.35 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$ ve rezistivite ölçümlerinin sonuçlarına göre deniz seviyesi altında 200 m derinlikteki rezervuar alanının 5 km^2 ve 600m derinlikteki rezervuar alanının 7 km^2 olduğu belirlenmiştir [6]. Olsen'in Schilthuis kararlı akış modelini kullanarak elde ettiği $\kappa_r = 6.408 \times 10^8 \text{ kg/bar}$ değerini ve sahaya ait diğer verileri Denklem 8'de yerleştirildiğinde, rezervuarın hacmi ve kalınlığı sırasıyla, $3.2 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ ve 4.6 km; Denklem 9'da yerleştirildiğinde ise rezervuarın alanı $0.628 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ olarak bulunmaktadır. Basınçlı-sıkıştırılmış rezervuar varsayımı kullanılarak elde edilen rezervuar kalınlığı kabul edilebilir sınırlar içinde olup, üst düzeyi serbest rezervuar varsayımı ile elde edilen rezervuar alanı rezistivite ölçümleri ile elde edilen değerden oldukça küçük bulunmuştur. Bu nedenle, rezervuarın basınçlı-sıkıştırılmış bir rezervuar olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Rezervuarın beslenme sabiti, α_a , kullanılarak akışın doğrusal veya çevrel olması durumları incelenebilmektedir. Denklem 10 ve Denklem 11 sırasıyla, akışın doğrusal ve çevrel olması durumları için geçerlidir.

$$\alpha_a = \frac{k A_c \rho_r}{\mu \Delta L}, \quad (\text{doğrusal akış}) \quad (10)$$

$$\alpha_a = \frac{2\pi k h g}{\mu \ln(r_e / r_w)} \frac{\theta}{360} \quad (\text{çevrel akış}) \quad (11)$$

Burada;

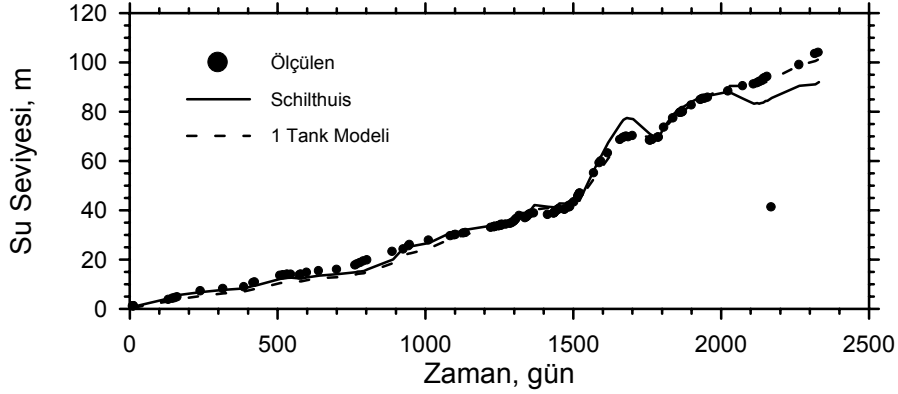
- α_a : rezervuarın beslenme sabiti ($gr/atm\text{-sn}$), ΔL : akiferin uzunluğu (cm),
 k : akiferin geçirgenliği (D), h : rezervuarın kalınlığı (cm),
 A_c : beslenmenin gerçekleştiği kesit alanı (cm^2), g : yerçekimi ivmesi (m/sn^2),
 ρ_r : rezervuar akışkanının yoğunluğu (gr/cm^3), μ : akışkanın akmazlığı (cp),
 r_e : akiferin yarıçapı (cm), r_w : rezervuarın yarıçapı (cm),
 θ : beslenme açısı'dır.

Svartsengi sahasındaki akiferin geçirgenliği 1 D, akışın gerçekleştiği kesit alanı $2500 \times 1500 \text{ m}^2$, akışkan yoğunluğu 0.85 gr/cm^3 , akışkanın akmazlığı 0.11 cp, rezervuarın kalınlığı 1500 m ve akifer yarıçapının rezervuar yarıçapına oranı 10 olarak alınmaktadır [6]. Akışın doğrusal olduğu varsayımı yapılırsa, Denklem 10 kullanılarak, akiferin uzunluğu 84 km ve akışın çevrel olduğu varsayımı yapılırsa Denklem 11 kullanılarak, beslenme açısı 4.2° olarak bulunmaktadır. Rezervuarın okyanusa 20 km uzaklıkta olduğu ve rezervuar suyunun tuzluluğunun üçte ikisinin deniz suyu olduğu bilinmektedir.

Denklem 10 ile elde edilen akifer uzunluğu rezervuarın okyanusa olan uzaklığının yaklaşık 4 katı olması nedeniyle akışın gerçekleştiği kesit alanı ($2500 \times 1500 \text{ m}^2$) daha küçük veya akiferin geçirgenliği 1 Darcy'den daha küçük olmalıdır. Diğer taraftan akışın çevrel olması durumunda Denklem 11 ile elde edilen beslenme açısının çok küçük olması nedeniyle, akışın çevrel akıştan çok doğrusal akış olması daha gerçekçi gözükmektedir.

1-Tank Modelinin sonucu, Schilthuis modeli ve saha verileri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da sunulmaktadır. 1-Tank modeli saha verileri ile Schilthuis modeline göre daha iyi bir çakışma göstermektedir.

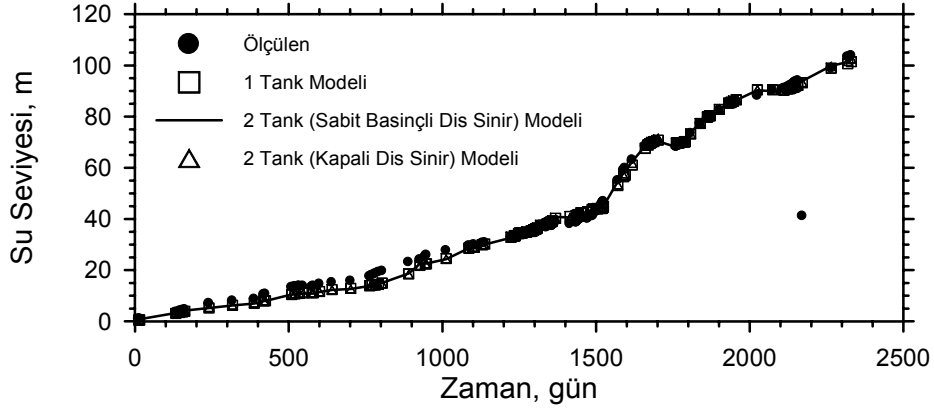
Svartsengi jeotermal sahası üretim ve su seviyesi verileri 1-tank ve 2-tank (sabit basınçlı ve kapalı dış sınır) modeli kullanılarak modellenerek elde edilen en iyi çakışmanın sonuçları Çizelge 1 ve Şekil 11'de verilmektedir. Çizelge 1'de parantez içinde verilen yüzdeler, güvenilirlik aralığını göstermektedir. 2-Tank (sabit basınçlı dış sınır) modeli kullanılarak elde edilen rezervuar ve akifer parametrelerine ait güvenilirlik aralıkları (özellikle κ_r ve α_r için elde edilen güvenilirlik aralıkları), Çizelge 1'den de görüldüğü gibi 1-tank ve 2-tank (kapalı dış sınır) modelleri kullanılarak elde edilen değerlerden oldukça büyüktür. Bu sonuç, 2-tank (kapalı dış sınır) modelinin bu saha verilerini modellemek için daha uygun olduğunu belirtmektedir.



Şekil 10. 1-Tank Modeli ile Schilthuis Kararlı Akış Modelinin Karşılaştırması [12]

Çizelge 1. Svartsengi Sahası Optimizasyon Sonuçları

	Olsen Schilthuis	1-Tank	2-Tank (Sabit Basınçlı Dış Sınır)	2-Tank (Kapalı Dış Sınır)
κ_a (kg/bar)	--	--	6.9×10^8 (38%)	1.0×10^{10} (69%)
κ_r (kg/bar)	6.408×10^8	1.02×10^9 (6%)	6.1×10^8 (63%)	9.1×10^8 (10%)
α_a (kg/bar-sn)	--	--	28.3 (27%)	--
α_r (kg/bar-sn)	36.53	24.6 (3%)	144 (150%)	30.2 (16%)
RMS, bar		0.504	0.507	0.504



Şekil 11. 1-Tank ve 2-Tank Modelinin Karşılaştırması [12]

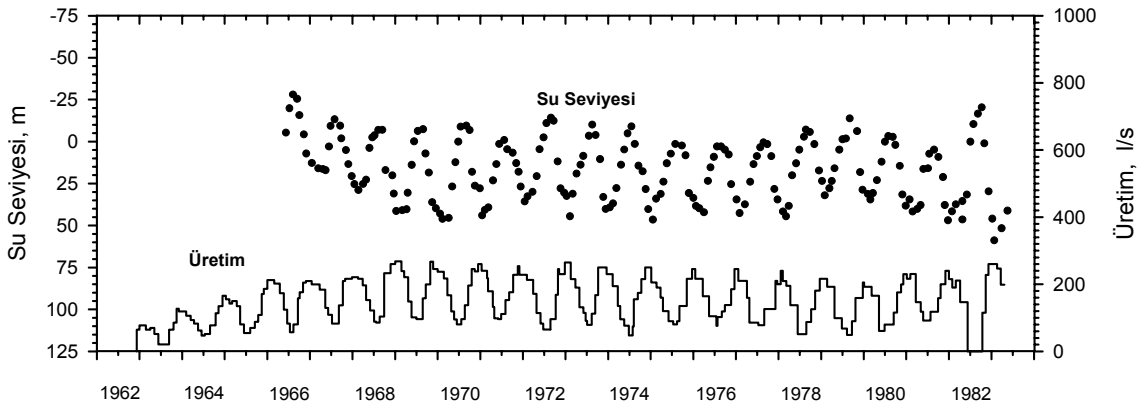
1-Tank ve 2-tank (kapalı dış sınır) modelleri ölçülen saha verileri ile tatmin edici bir uyum göstermektedir (Şekil 11 ve Çizelge 1'deki RMS değerleri). 1-Tank ve 2-tank (kapalı dış sınır) modellerinden elde edilen optimizasyon sonuçları birbirlerine çok yakın sonuçlar vermişlerdir. Bu nedenle, hangi modelin bu saha verileri ile daha iyi bir uyum gösterdiğini belirleyebilmek için daha fazla bilgi ve ayrıntılı analizler gerekmektedir.

6.2 Laugarnes Jeotermal Sahası

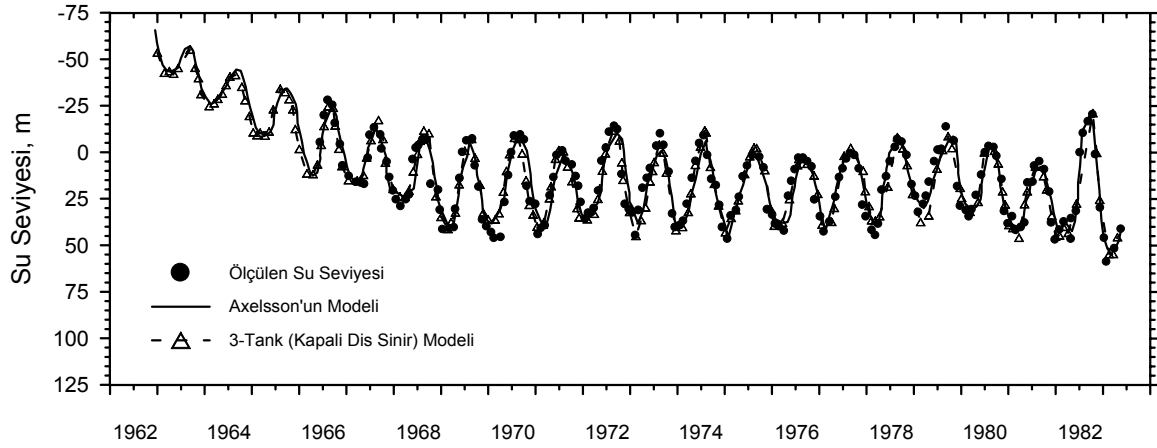
Güney-Batı İzlanda'da bulunan Laugarnes sahası, sızının etken olduğu bir jeotermal saha olup sıcaklığı 115-135°C arasındadır. Sahadan yapılan toplam üretim ile sahayı temsil etmek üzere seçilen bir kuyuda yapılan su seviyesi ölçümleri Şekil 12'de gösterilmektedir.

Şekil 13'de Axelsson tarafından yapılan modellemenin sonuçları ile bu çalışmada geliştirilen 3-tank (kapalı dış sınır) modelinin sonuçları karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü gibi, 3-tank modeli ile Axelsson'un modeli hem birbirleri ile hem de saha verileri ile oldukça iyi bir uyum göstermektedirler.

1-tank, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3- tank (kapalı dış sınır) modellerinin sonuçları ise Çizelge 2 ve Şekil 14'de gösterilmektedir. Şekil 14'den de anlaşılacağı gibi 1-tank modeli saha verileri ile kabul edilebilir bir çakışma göstermemiştir. 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modelleri saha verileri ile uyum içindedir. Bu nedenle, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modelleri ile Laugarnes sahasının temsil edilebileceği söylenebilmektedir.



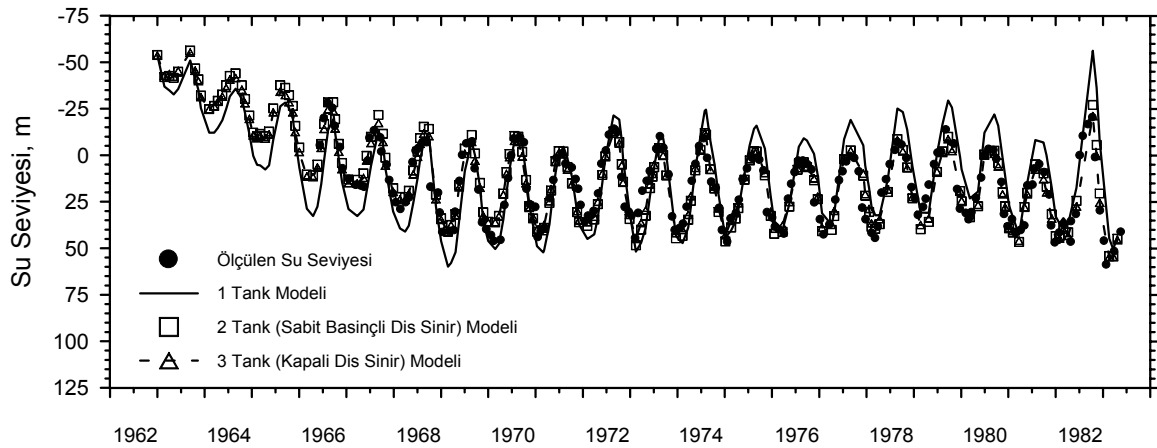
Şekil 12. Laugarnes Sahasının Su Seviyesi Değişimi ve Üretim Verileri [12].



Şekil 13. Axelsson'un Modeli ile 3-Tank (Kapalı Dış Sınır) Modelin Karşılaştırması [12].

Çizelge 2. Laugarnes Sahası Optimizasyon Sonuçları.

	1-Tank	2-Tank (Sabit Basıncılı Dış Sınır)	3-Tank (Kapalı Dış Sınır)	Axelsson
α_a , kg/bar-sn (= α_{a1} , 3-Tank)	-	36.06 (%12)	74.7 (%21)	61.8
α_r , kg/bar-sn	20.05 (%3)	29.84 (%6)	33.5 (%9)	36.8
κ_{a1} , kg/bar	-	-	$2.47 \cdot 10^9$ (%107)	$2.09 \cdot 10^9$
κ_{a2} , kg/bar (= κ_a , 2-Tank)	-	$1.03 \cdot 10^{10}$ (%25)	$3.03 \cdot 10^{10}$ (%14)	$3.64 \cdot 10^{10}$
κ_r , kg/bar	$9.8 \cdot 10^7$ (%15)	$8.8 \cdot 10^7$ (%13)	$7.94 \cdot 10^7$ (%20)	$7.73 \cdot 10^7$
RMS	1.24	0.615	0.581	

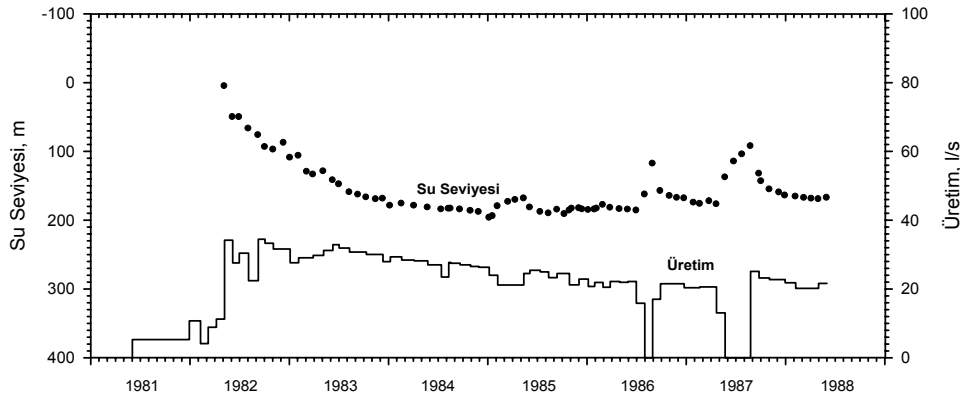


Şekil 14. 1-, 2- ve 3- Tank Modellerinin Karşılaştırması [12].

6.3 Glerardalur Jeotermal Sahası

Sıvının etken olduğu bir jeotermal saha olup sıcaklığı yaklaşık 61°C 'dir. Sahadan yapılan toplam üretim ile sahayı temsil etmek üzere seçilen bir kuyuda yapılan su seviyesi ölçümleri Şekil 15'de verilmektedir. Şekil 15'de gösterilen su seviyesi ölçümleri, görelî olarak sabit sayılabilecek bir debide üretim yapan sahanın dış sınırından sabit basınçlı bir kaynaktan beslendiğini işaret etmektedir (Bkz. Şekil 7). Rezervuar basıncının zamanın erken dönemlerinde azaldıktan sonra zamanın geç dönemlerinde sabitlenmesi rezervuarın sabit basınçlı bir kaynaktan beslendiğini gösteren en önemli kanıttır.

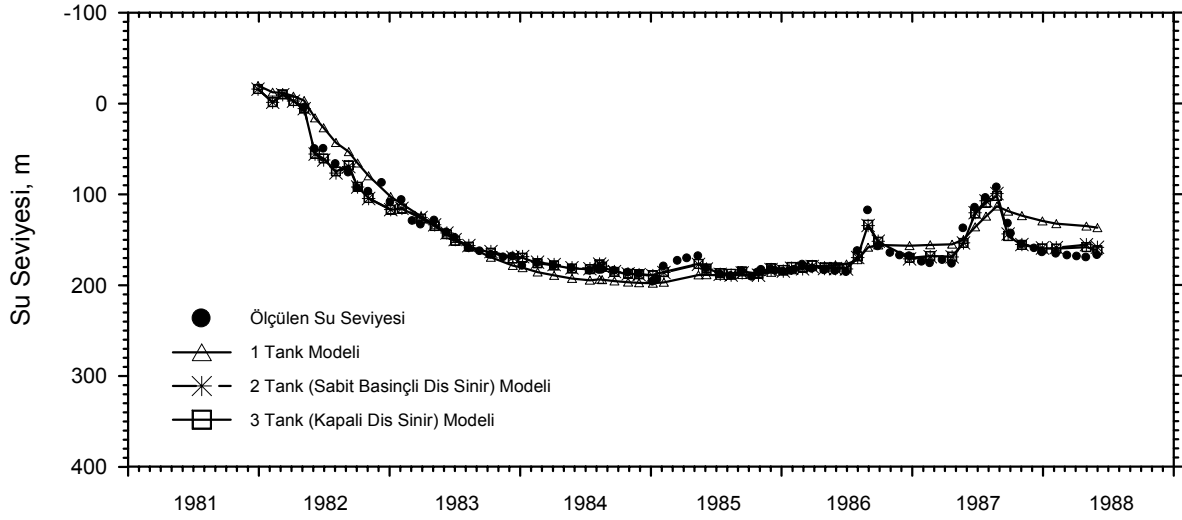
Çizelge 3 ve Şekil 16'da 1-tank, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modelin sonuçları karşılaştırma yapmak üzere verilmektedir. Bu saha için, beklenildiği gibi, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modelin sonuçları saha verileri ile uyum göstermektedir.



Şekil 15. Glerardalur Sahası Su Seviyesi ve Üretim Verileri [12].

Çizelge 3. Glerardalur Sahası Optimizasyon Sonuçları.

	1-Tank	2-Tank (Sabit Basınçlı Dış Sınır)	3-Tank (Kapalı Dış Sınır)	Axelsson
α_a , kg/bar-sn (= α_{a1} , 3-Tank)	-	1.42 (%5)	1.5 (%11)	1.89
α_r , kg/bar-sn	1.09 (%3)	3.41 (%15)	3.75 (%21)	3.37
κ_{a1} , kg/bar	-	-	$1.4 \cdot 10^9$ (%109)	$6.08 \cdot 10^8$
κ_{a2} , kg/bar (= κ_a , 2-Tank)	-	$8.07 \cdot 10^7$ (%12)	$6.9 \cdot 10^7$ (%23)	$6.66 \cdot 10^7$
κ_r , kg/bar	$4.05 \cdot 10^7$ (%9)	$8.17 \cdot 10^6$ (%29)	$7.6 \cdot 10^6$ (%36)	$5.9 \cdot 10^6$
RMS	1.612	0.61	0.6	



Şekil 16. 1-, 2- ve 3- Tank Modellerinin Karşılaştırması [12].

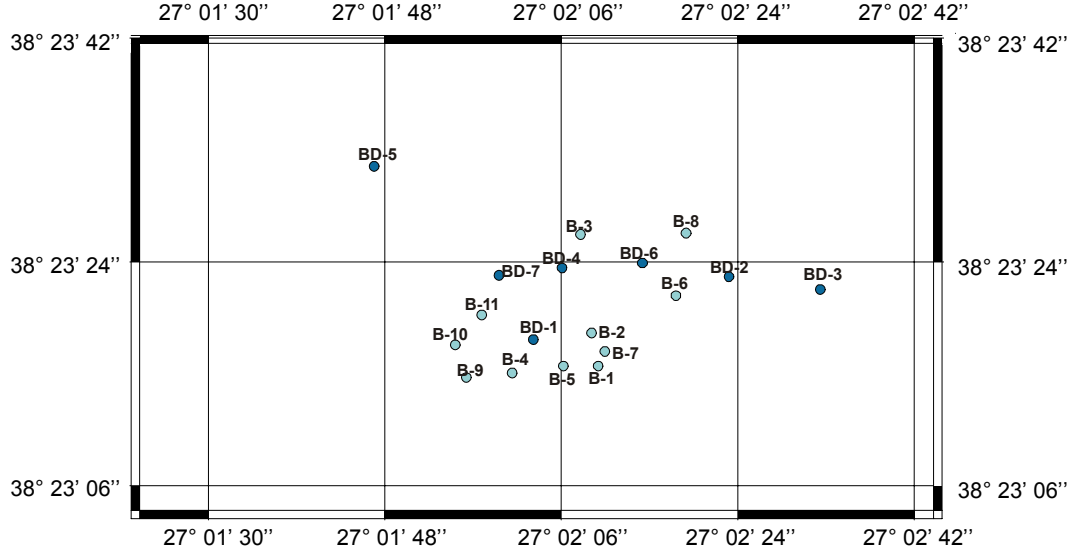
6.4 Balçova-Narlidere Jeotermal Sahası

Balçova-Narlidere jeotermal sahası, İzmir ilinin 10 km batısında ve İzmir-Çeşme karayolunun 1 km kadar güneyindedir. Sahada derinlikleri 48.5 m ile 1100 m arasında değişen kuyulardan üretilen akışkanın sıcaklığı 80°C ile 140°C arasında değişmektedir.

Sahada, Balçova Jeotermal Ltd.'nin verilerine göre, 1996'dan günümüze 8 adedi derin ve 12 adedi sığ olmak üzere toplam 20 kuyu bulunmaktadır. Açılmış en derin kuyu (BD-5) 1100m ve en sığ kuyu (B-9) ise 48.5 m'dir. Sahada, tekrar-basma (reenjeksiyon) işlemi yapılmakta olup, son iki yıl itibariyle, derin kuyulardan BD-2, BD-5 ve BD-8, sığ kuyulardan B-2, B-9 ve B-12'den enjeksiyon yapılmaktadır. BD-3, BD-4, BD-6, BD-7 derin kuyuları ile B-4, B-10 ve B-11 sığ kuyularından sürekli veya aralıklı olarak üretim yapılmaktadır. Sahadaki sığ ve derin kuyuların sıcaklık ve derinlikleri Çizelge 4'de ve konumları Şekil 17'de gösterilmektedir.

Çizelge 4. Balçova-Narlidere Jeotermal Sahasındaki Kuyuların Derinlik ve Sıcaklıkları [14]

KUYU ADI	Derinlik (m)	Sıcaklık (°C)	KUYU ADI	Derinlik (m)	Sıcaklık (°C)
B-1	104	115	BD-1	564	140
B-2	150	113	BD-2	677	133
B-3	161	112	BD-3	750	140
B-4	125	112	BD-4	624	140
B-5	108.5	114	BD-5	1100	130
B-6	150	93	BD-6	605	140
B-7	120	115	BD-7	702	140
B-8	155	93			
B-9	48.5	122			
B-10	125	114			
B-11	125	109			



Şekil 17. Balçova-Narlidere Jeotermal Sahasındaki Kuyuların Konumları [14]

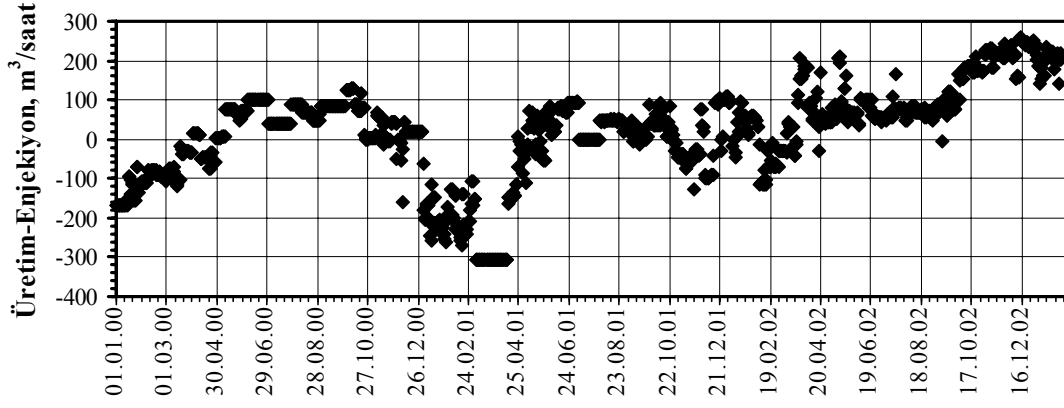
Bölümümüzde tamamlanmış olan “İzmir Balçova-Narlidere Jeotermal Sahasının Rezervuar ve Üretim Performansı Projesi” kapsamında incelenen Balçova-Narlidere jeotermal sahasının basınç davranışının modellenmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir. Jeolojik veriler, kuyu logları, sıcaklık profilleri, kuyu testleri ve üretilen akışkanın jeokimyası proje kapsamında incelenmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda, özellikle 2000-2001 döneminde sahanın üretim-enjeksiyon davranışı gözlemlerine dayanarak, Balçova-Narlidere sahasının 1 sığ ve 1 derin rezervuar olmak üzere birbiriyle akış bağlantılı iki ayrı rezervuar olarak modellenmesinin uygun olacağı belirlenmiştir. Bu nedenle sahayı en iyi şekilde temsil eden model olarak 1-sığ ve 1-derin rezervuar modelinin modelleme çalışmasında kullanılması planlanmaktadır.

Saha genelinde 8 adet sığ ve 8 adet derin olmak üzere toplam 16 adet kuyuda üretim/enjeksiyon ve kuyucu su seviyesi değişimi (veya basınç değişimi) değerleri gözlemlenmiştir. Sığ ve derin kuyulardan yapılan toplam üretim-enjeksiyon farkları Şekil 18 ve 19’da ve sahadan yapılan toplam (sığ+derin kuyulardan) üretim-enjeksiyon farkları Şekil 20’de gösterilmektedir. Sığ kuyular enjeksiyon amaçlı kullanılırken, derin kuyular üretim amaçlı kullanılıyordu. Nisan 2002 itibarıyla sığ kuyulardan yapılan enjeksiyon durduruldu (Şekil 18). Ekim 2002 tarihine kadar sahadaki tüm derin kuyular üretim amaçlı kullanılırken, Ekim 2002 itibarıyla BD-8 enjeksiyon amaçlı kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 19).

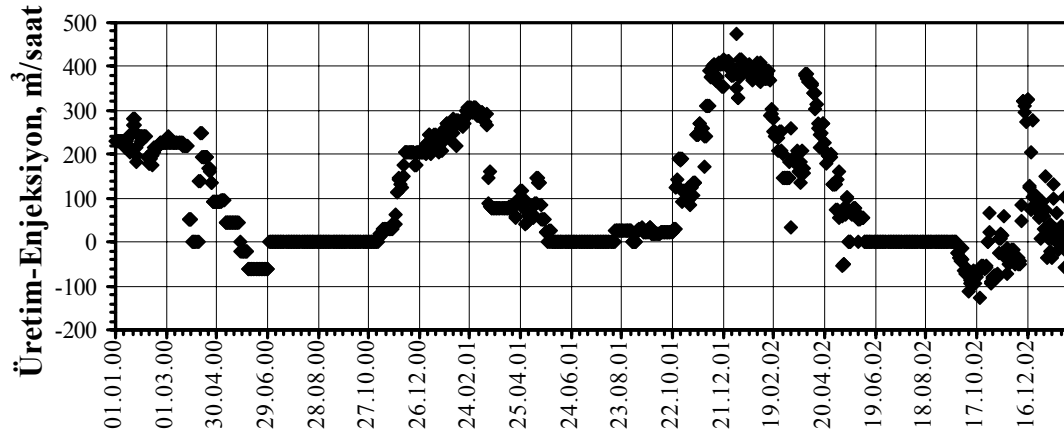
Derin kuyulardan BD-1 ve BD-5 ile sığ kuyulardan B-12 kuyusuna ait basınç değişimleri (su seviyesi değişimleri) ise Şekil 21, 22 ve 23’de gösterilmektedir. Derin kuyulardaki basınç düşümü (Şekil 21 ve Şekil 22) sığ kuyulardan (Şekil 23) daha yüksektir. Kaynak 14’te açıklandığı gibi, tekrar-basmanın etkisi sığ sistemde derin sisteme göre daha fazla hissedilmektedir. Sığ sisteme yapılan tekrar-basma uygulaması, sığ sistemdeki kuyulara bir beslenme etkisi yarattığından, sığ sistemdeki kuyuların basınç veya seviyelerdeki değişimler derin sistemdekilere göre olarak daha az olmaktadır.

Konum ve derinlik itibarıyla sığ ve derin rezervuarlar arasında bir yerleşimi olan BD-1 kuyusunun basınç (veya su seviyesi) değişiminin hem sığ ve hem de derin kuyulardaki üretim-enjeksiyondan etkilendiği Kaynak 14’te belirtilmektedir.

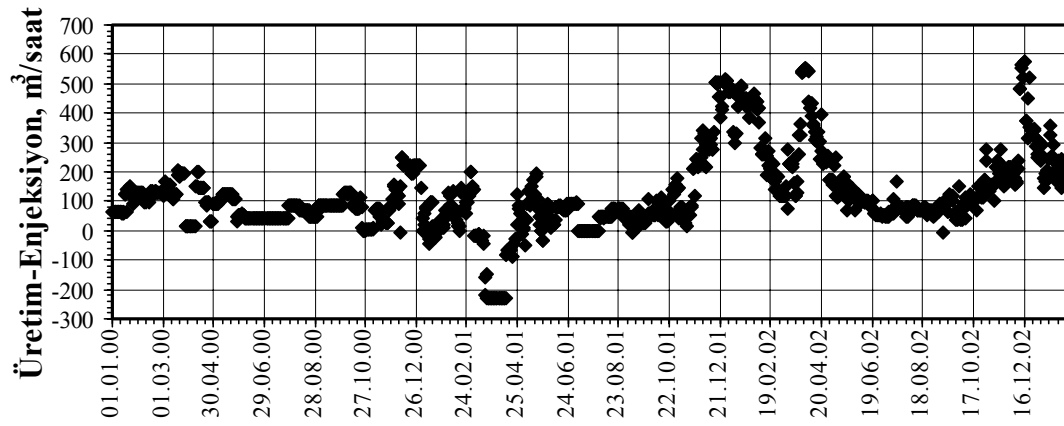
Genel basınç davranışı itibarıyla, BD-5 kuyusu yukarıda tartışılan BD-1 kuyusu ile aynı davranış özelliği göstermektedir. Sahanın kuzeybatı ucunda yer alan BD-5 kuyusundaki basınç düşümü BD-1 kuyusuna göre daha fazla olmaktadır (Şekil 22). Bu farklılık, derinden olan doğal beslenmenin doğu yönünden etkili olması ve BD-5 kuyusunun tekrar-basma bölgesine BD-1 kuyusundan daha uzakta olması ile açıklanabilir.



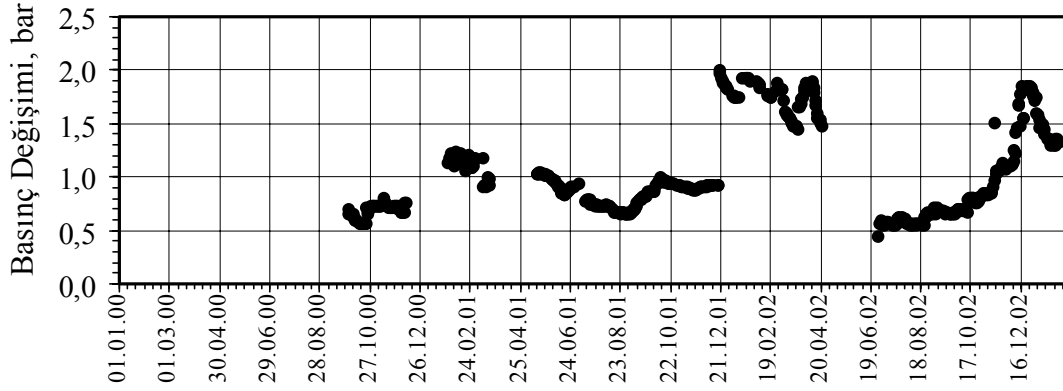
Şekil 18. Sığ Kuyulardan Yapılan Toplam Üretim-Enjeksiyon Farkı.



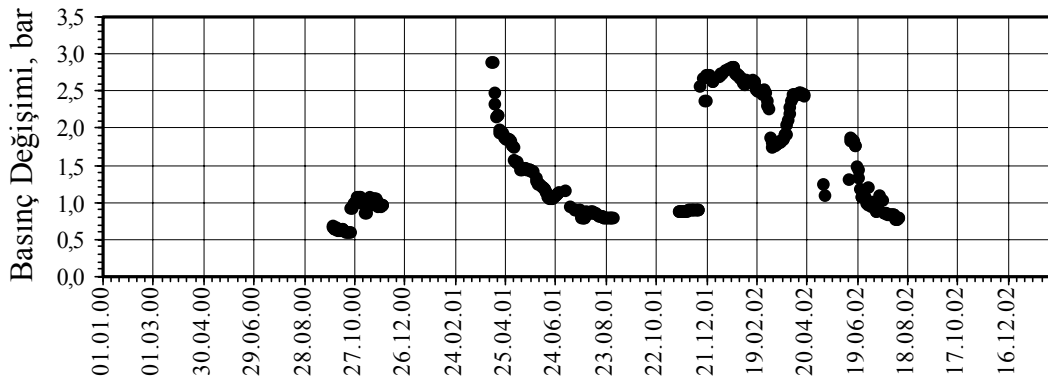
Şekil 19. Derin Kuyulardan Yapılan Toplam Üretim-Enjeksiyon Farkı.



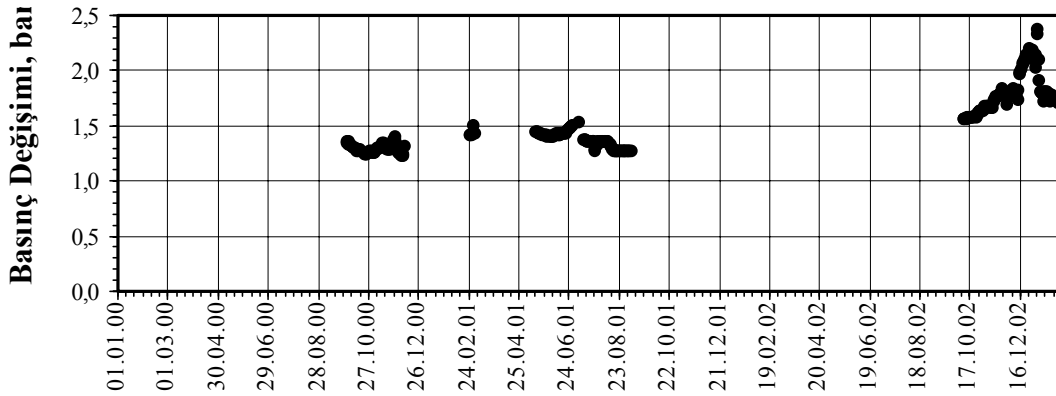
Şekil 20. Balçova-Narlidere Jeotermal Sahasından (Derin+Sığ Kuyular) Yapılan Toplam Üretim-Enjeksiyon Farkı.



Şekil 21. BD-1 Kuyusu Basınç Değişimi.



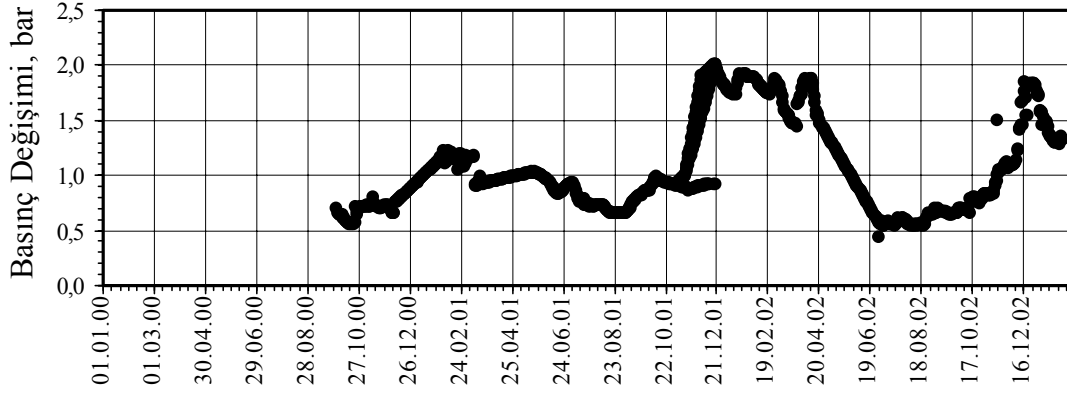
Şekil 22. BD-5 Kuyusu Basınç Değişimi.



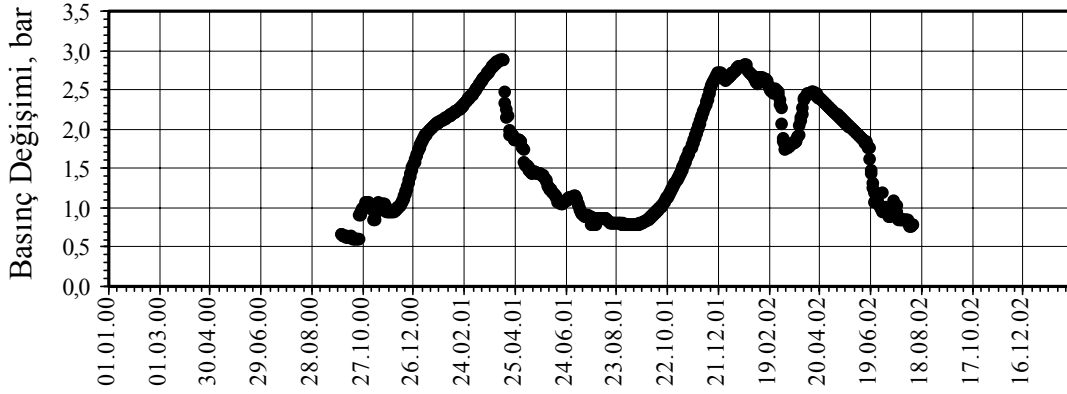
Şekil 23. B-12 Kuyusu Basınç Değişimi.

Şekil 21, 22 ve 23'den de anlaşılacağı gibi, özellikle basınç değişimi verileri yeterli sıklıkta ve uzun süreli ölçülmemiştir.

BD-1 ve BD-5 kuyularının basınç değişimi verileri kullanılarak, bu çalışmada sunulan modellerden 1-tank, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 2-tank (kapalı dış sınır) modelleri ile modelleme çalışması yapıldı. Basınç değişimlerinin alınmadığı tarihler arasındaki veriler interpolasyon ile tahmin edilerek modelleme yapıldı. Modellemede kullanılan BD-1 ve BD-5 kuyularının interpolasyon verilerini de içeren basınç değişimleri sırasıyla Şekil 24 ve Şekil 25'de gösterilmektedir.



Şekil 24. Modellemede Kullanılan BD-1 Kuyusu Basınç Değişimi.

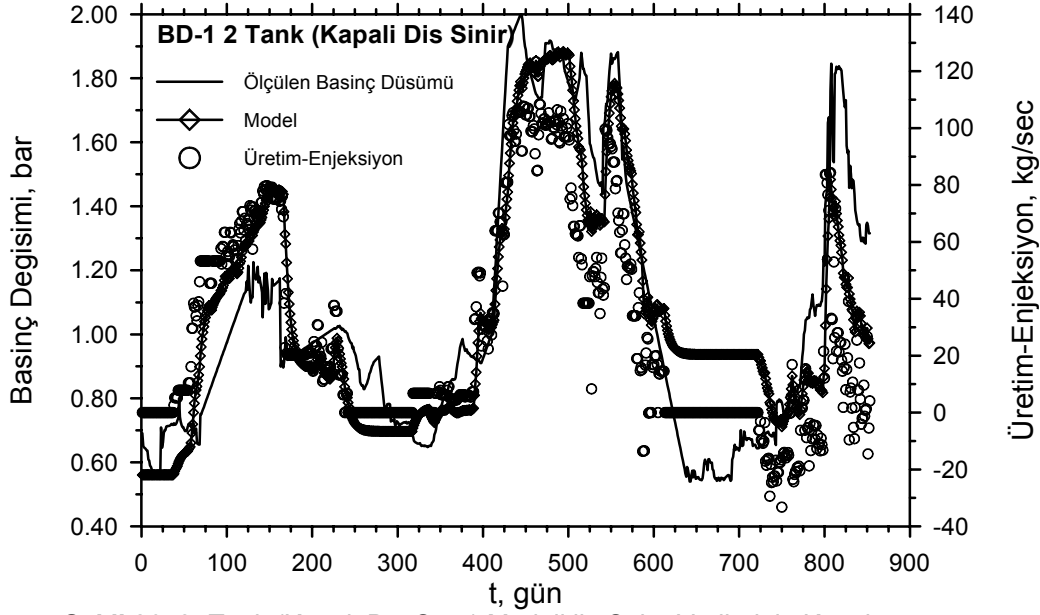


Şekil 25. Modellemede Kullanılan BD-5 Kuyusu Basınç Değişimi.

BD-1 Kuyusunun Verileri ile Yapılan Modellemeler : 27.10.2000-01.02.2003 tarihleri arasındaki BD-1 kuyusuna ait üretim-enjeksiyon farkı ve basınç değişimi verileri kullanılarak yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 5'de gösterilmektedir. Modellerin RMS değerlerini ve güvenilirlik aralıkları incelenecek olursa, model sonuçları ile saha verileri arasında en iyi çakışma 2-tank (kapalı dış sınır) modeli ile elde edilmiştir. 2-Tank (kapalı dış sınır) modelinin saha verileri ile çakışması Şekil 26'da sunulmaktadır.

Çizelge 5. BD-1 Kuyusu Optimizasyon Sonuçları (27.10.2000-01.02.2003 için)

	1-Tank	2-Tank (Sabit Basınçlı Dış Sınır)	2-Tank (Kapalı Dış Sınır)
α_a , kg/bar-s	-	0.03 (%1.4 10^5)	-
α_r , kg/bar-s	98.84 (%5.16)	95.49 (%4.25)	95.17 (%4.21)
κ_a , kg/bar	-	$5.65 \cdot 10^9$ (%22.65)	$5.22 \cdot 10^9$ (%10.96)
κ_r , kg/bar	$8.17 \cdot 10^7$ (%21.36)	$5.32 \cdot 10^7$ (%26.73)	$5.16 \cdot 10^7$ (%21.56)
RMS	0.25	0.2123	0.2121



Şekil 26. 2- Tank (Kapalı Dış Sınır) Modeli ile Saha Verilerinin Karşılaştırması

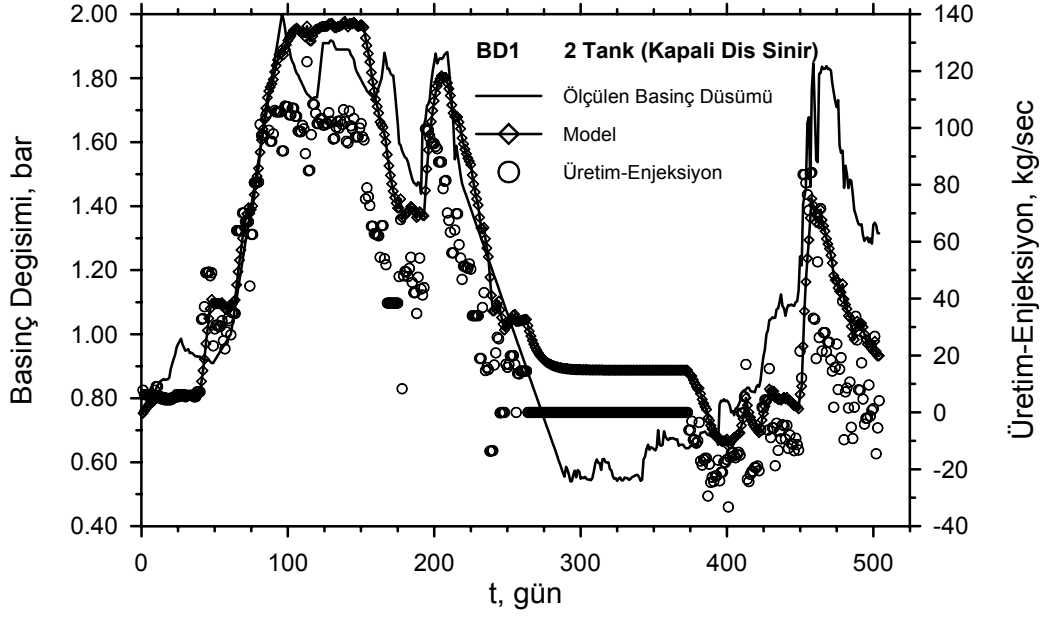
Bilindiği gibi BD-1 kuyusunun basınç davranışı sığ kuyulardan yapılan enjeksiyondan etkilenmektedir. Bu nedenle, BD-1 kuyusu için modelleme çalışmasının ikinci aşamasında sığ kuyulardan enjeksiyonun azaldığı zaman değeri olan 08.09.2001 tarihinden sonraki üretim-enjeksiyon ve basınç değişimi değerleri kullanılarak modelleme çalışmaları tekrarlanmıştır. Böylece, modellerde BD-1 kuyusunun basıncını etkileyen sığ kuyuların etkisinin azaltılabileceği öngörülmüş ve BD-1'in derin rezervuara bağlı davranışını modellemek amaçlanmıştır.

08.09.2001 tarihi itibarıyla, BD-1 kuyusu için yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 6'da sunulmaktadır. Modellerin RMS değerlerini ve güvenilirlik aralıkları incelenecek olursa, model sonuçları ile saha verileri arasında en iyi çakışma 2-tank (kapalı dış sınır) modeli ile elde edilmiştir. 2-Tank (kapalı dış sınır) modelinin sonuçları saha verileri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 27'de sunulmaktadır.

BD-1 Kuyusu verilerinin modellenmesinin sonuçları : Çizelge 5 ve 6'daki RMS ve güvenilirlik aralıkları karşılaştırması, 2-tank (kapalı dış sınır) durumunda düşük güvenilirlik aralığı yüzdelereinden dolayı, Balçova-Narlıdere jeotermal sisteminin dış sınırı akışa kapalı 2 tank (kapalı dış sınır) sistemi ile temsil edilebileceğini göstermektedir.

Çizelge 6. BD-1 Kuyusu Optimizasyon Sonuçları (08.09.2001-01.02.2003 için).

	1-Tank	2-Tank (Sabit Basıncılı Dış Sınır)	2-Tank (Kapalı Dış Sınır)
α_a , kg/bar-s	-	0.113 (%4.5 10^5)	-
α_r , kg/bar-s	91.80 (%4.95)	89.59 (%11.58)	87.12 (%5.05)
κ_a , kg/bar	-	$1.57 \cdot 10^{10}$ (%97.18)	$8.5 \cdot 10^9$ (%41.98)
κ_r , kg/bar	$7.0 \cdot 10^7$ (%21.41)	$6.22 \cdot 10^7$ (%25.63)	$5.65 \cdot 10^7$ (%23.46)
RMS	0.226	0.222	0.221



Şekil 27. 2- Tank (Kapalı Dış Sınır) Modeli ile Saha Verilerinin Karşılaştırması

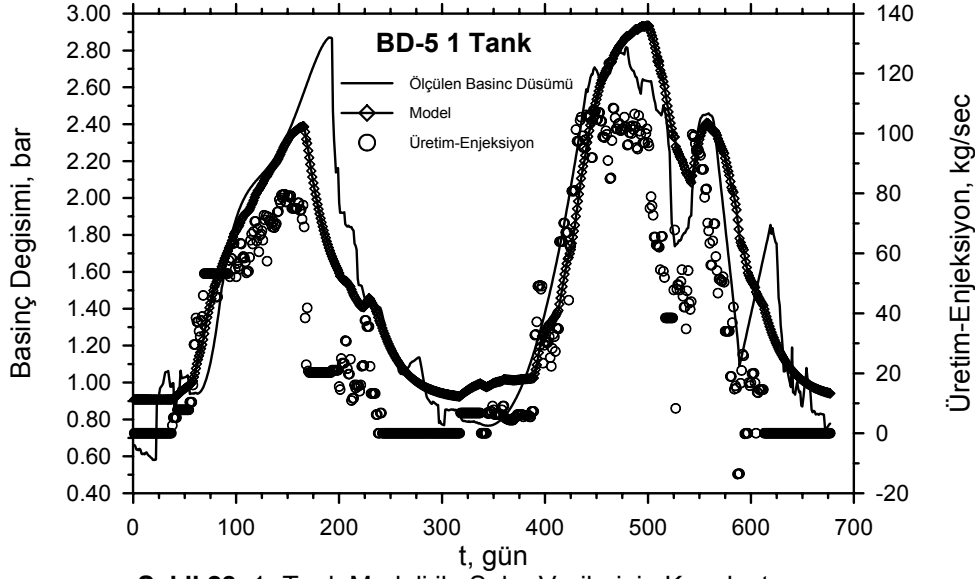
BD-5 Kuyusunun Verileri ile Yapılan Modellemeler : 27.10.2000-01.02.2003 tarihleri arasındaki BD-5 kuyusuna ait üretim-enjeksiyon farkı ve basınç değişimi verileri kullanılarak yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 7'de gösterilmektedir. 1-tank, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 2-tank (kapalı dış sınır) modelleri ile yapılan modellemelerin sonunda saha verileri ile en iyi çakışmanın sağlandığı 1-tank modelinin sonuçları, Şekil 28'de sunulmaktadır.

BD-5 kuyusunun basınç davranışı da BD-1 kuyusuna göre görece olarak daha az da olsa, sığ kuyulardan yapılan enjeksiyondan etkilenmektedir. Bu nedenle, BD-5 kuyusu için modelleme çalışmasının ikinci aşamasında sığ kuyulardan enjeksiyonun azaldığı zaman değeri olan 30.03.2001 tarihinden sonraki üretim-enjeksiyon ve basınç değişimi değerleri kullanılarak modelleme çalışmaları tekrarlanmıştır. Böylece, modellerde BD-5 kuyusunun basıncını etkileyen sığ kuyuların etkisinin azaltılabileceği öngörülmüş ve BD-5'in derin rezervuara bağlı davranışını modellemek amaçlanmıştır.

30.03.2001 tarihi itibarıyla, BD-5 kuyusu için yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 8'de ve en iyi çakışmanın sağlandığı 1-tank modelinin sonuçları Şekil 29'da sunulmaktadır.

Çizelge 7. BD-5 Kuyusu Optimizasyon Sonuçları (27.10.2000-01.02.2003 için)

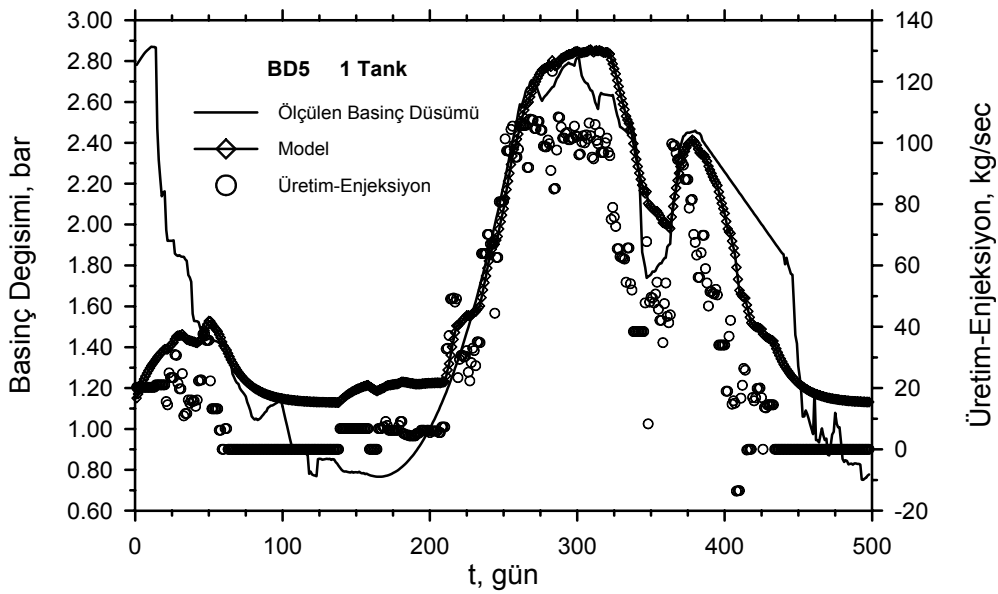
	1-Tank	2-Tank (Sabit Basınçlı Dış Sınır)	2-Tank (Kapalı Dış Sınır)
α_a , kg/bar-s	-	55.36 (%44.22)	-
α_r , kg/bar-s	48.23 (%3.65)	329.72 (%268.6)	48.23 (%3.96)
κ_a , kg/bar	-	$9.99 \cdot 10^7$ (%68.35)	$4.52 \cdot 10^{14}$ (% $1.9 \cdot 10^6$)
κ_r , kg/bar	$9.97 \cdot 10^7$ (%7.89)	$2.62 \cdot 10^7$ (%398.5)	$9.97 \cdot 10^7$ (%9.05)
RMS	0.278	0.278	0.278



Şekil 28. 1- Tank Modeli ile Saha Verilerinin Karşılaştırması

Çizelge 8. BD-5 Kuyusu Optimizasyon Sonuçları (30.03.2001-01.02.2003 için)

	1-Tank	2-Tank (Sabit Basiñçlı Dış Sınır)	2-Tank (Kapalı Dış Sınır)
α_a , kg/bar-s	-	211.67 (%81.41)	-
α_r , kg/bar-s	58.31 (%6.03)	72.08 (%30.93)	59.68 (%6.53)
κ_a , kg/bar	-	$9.18 \cdot 10^8$ (%184.86)	$1.39 \cdot 10^{10}$ (%113.23)
κ_r , kg/bar	$7.48 \cdot 10^7$ (%19.96)	$4.55 \cdot 10^7$ (%52.53)	$6.48 \cdot 10^7$ (%26.05)
RMS	0.384	0.381	0.383



Şekil 29. 1- Tank Modeli ile Saha Verilerinin Karşılaştırması

BD-5 Kuyusu verilerinin modellenmesinin sonuçları : Çizelge 7 ve 8'deki RMS ve güvenilirlik aralıkları karşılaştırması, 1-tank modelinin Balçova-Narlıdere jeotermal sistemini daha iyi temsil ettiği izlenimini vermektedir. 2-tank modellerindeki güvenilirlik aralığı yüzdelerinin büyüklüğü söz konusu modellerin geçerliliğini azaltmaktadır. Bunun da nedeni, BD-5 kuyusu için modelde veri olarak kullanılan basınç değişimi verilerinin yeterli sıklıkta olmaması olarak düşünülebilir. Yeni verilerle bu çalışmanın sürdürülmesi gerekmektedir.

Balçova-Narlıdere Jeotermal Sahasının Modelleme Sonuçları: BD-1 ve BD-5 kuyularının modelleme çalışması, kullanılan üretim-enjeksiyon verilerinin sıklığına ve dönem uzunluğuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Sağlıklı bir modelleme çalışması yapabilmek için daha uzun dönemli verilerin ve daha sık ölçülmüş kuyucu basınç veya su seviye değişimlerinin gerektiği açık olarak anlaşılmaktadır.

Bütün bu eksikliklere rağmen, yukarıda ayrıntılı verilen modelleme sonuçları sahanın 2-tank modeliyle daha iyi temsil edilebileceğini ve κ_r değerinin $5-10 \cdot 10^7$ kg/bar ve α_r değerinin ise 48-95 kg/bar-sn arasında olabileceğini göstermektedir. Söz konusu sonuçlar, sadece derin kuyuların oluşturduğu rezervuarın modellendiği, BD-6 kuyusu verilerinin kullanıldığı 1-tank modelleme çalışmasından elde edilen $\kappa_r = 2 \cdot 10^7$ kg/bar ve $\alpha_r = 31$ kg/bar-sn değerleriyle uyumludur [14].

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada; jeotermal rezervuarların basınç davranışını (veya kuyucu su seviyesi değişimlerini) modellemek üzere kütle denge denklemleri kullanılarak elde edilen modeller tartışılmaktadır. Modellerden, optimizasyon tekniği kullanılarak, rezervuar ve akifer parametreleri tahmin edilebilmektedir.

8. KAYNAKLAR

- [1] Axelsson, G.; "Simulation of Pressure Response Data From Geothermal Reservoirs by Lumped Parameter Models," 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 257-263, 1989.
- [2] Axelsson, G., Gunnlaugsson, E.; Long-term Monitoring of High-and Low-Enthalpy Fields Under Exploitation, International Geothermal Association-International Institute for Geothermal Research, Auckland, New Zealand, 2000.
- [3] Brigham, W.E., Ramey, H.J.Jr.; "Material and Energy Balance in Geothermal Reservoirs," Reservoir Engineering Assessment of Geothermal Systems, Ramey, H.J.Jr. (editor), Petroleum Engineering Department, Stanford University, 1981.
- [4] Castanier, L.M., Sanyal, S.K., Brigham, W.E.; "A Practical Analytical Model for Geothermal Reservoir Simulation," SPE Cal. Regional Meeting, Los Angeles, Ca, April 9-11, SPE 8887, 1980.
- [5] Grant, M.A.; "Approximate Calculations Based on a Simple One Phase Model of a Geothermal Reservoir," New Zealand Journal of Science, Vol. 20, 19, 1977.
- [6] Olsen, G.; Depletion Modeling of Liquid Dominated Geothermal Reservoirs, Technical Report SGP-TR-80, Stanford Geothermal Program, Stanford University, USA, 1984.
- [7] Whiting, R.L., Ramey, H.J.Jr.; "Application of Material and Energy Balances to Geothermal Steam Production," Journal of Petroleum Technology (July), 893-900, 1969.
- [8] Alkan, H., Satman, A.; "A New Lumped Parameter Model For Geothermal Reservoirs in the Presence of Carbon Dioxide," Geothermics, Vol. 19, No. 5, 469-479, 1990.

- [9] Sarak, H.; Jeotermal Rezervuarlarda Beslenmenin Önemi, Doktora Çalışması (devam etmekte), Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2003.
- [10] Karaalioglu, H., Onur, M., Satman, A.; "Jeotermal Rezervuarlarda Beslenmenin Önemi", UTES'2002 (IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu), Bildiri Kitabı, 629-637, İstanbul, 16-18 Ekim, 2002.
- [11] Sarak, H, Onur, M., Satman, A.; "New Lumped Parameter Models for Simulation of Low-Temperature Geothermal Reservoirs," 28th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 27-29 Jan, 2003.
- [12] Sarak, H, Onur, M., Satman, A.; "Applications of Lumped Parameter Models for Simulation of Low-Temperature Geothermal Reservoirs," 28th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 27-29 Jan, 2003.
- [13] Schilthuis, R.J.; "Active Oil and Reservoir Energy," Trans. AIME, 118, 33-52, 1936.
- [14] İzmir Balçova-Narlıdere Jeotermal Sahasının Rezervuar ve Üretim Performansı Projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, Ocak 2002.

ÖZGEÇMİŞLER

Hülya SARAK

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1993 yılında lisans ve 1997 yılında yüksek lisans 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 "Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Rezervuarların Modellenmesi" konulu doktora çalışmasına devam etmektedir.

Abdurrahman SATMAN

İstanbul 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.