DÜŞÜK SICAKLIKLI JEOTERMAL REZERVUARLARIN BASINÇ VE SICAKLIK DAVRANIŞININ TAHMİNİ İÇİN YENİ BİR İZOTERMAL OLMAYAN "LUMPED"-PARAMETRE MODELİ VE UYGULAMALARI

Mustafa ONUR
Hülya SARAK
Murat ÇINAR
Ö. İnanç TÜREYEN
Abdurrahman SATMAN

ÖZET

Bu çalışmada, ülkemizde de yaygın olarak bulunan düşük sıcaklıklı tek-faz sıvı içeren jeotermal rezervuarların akışkan ve ısı üretimi davranışının değerlendirilmesi ve tahmin edilmesinde kullanılabilecek izotermal olmayan akışı göz önünde bulunduran yeni bir lumped-parametre modeli ve uygulamaları sunulmaktadır. İzotermal akış (rezervuar içerisinde ortalama sıcaklığın değişmediği) varsayımı üzerine kurulu literatürde mevcut diğer lumped-parametre modellerine göre, bu çalışmada sunulan yeni modelinin en önemli üstünlüğü, üretim, reenjeksiyon ve doğal beslenme etkilerinden dolayı rezervuar içerisinde meydana gelen ısıl değişimleri dikkate alarak rezervuar ortalama basınç ve sıcaklık davranışlarının zamanın fonksiyonu olarak hesaplanabilmesine olanak sağlamasıdır.

Bildiride gösterildiği gibi, bu modelle, sahada ölçülmüş kuyu dibi basınç (veya dinamik kuyu su seviyesi) ve/veya kuyu dibi sıcaklık verilerinin tarihsel çakıştırması ile model parametreleri tahmin edilebilmekte ve geleceğe yönelik jeotermal rezervuarın hem basınç hem de sıcaklık performans tahminleri yapılabilmektedir. Geliştirilen model ve yazılım programının İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal sahası için bazı yapay uygulamaları sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

Lumped-parametre modelleri düşük sıcaklıklı jeotermal sistemlerin geleceğe yönelik performans tahminlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1-4]. Uygulanan üretim/reenjeksiyon senaryolarına bağlı olarak jeotermal sahaların basınç (veya dinamik kuyu su seviyesi) ve sıcaklık davranışlarını modellemek amacıyla kullanılan lumped-parametre modelleri (veya tank modelleri), az sayıda parametre içermelerinden dolayı, çok parametreli boyutlu (1B, 2B veya 3B) sayısal modellerin yerine iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

Lumped-parametre modelleri, boyutlu sayısal modellerde olduğu gibi aynı yöntembilim kapsamında kullanılmaktadır: Önce doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemiyle basınç/sıcaklık verilerine tarihsel çakıştırma yapılarak model parametreleri tahmin edilir. Tahmin edilen model parametreleri kullanılarak, çeşitli üretim/reenjeksiyon senaryoları için basınç (veya su seviyesi) değişimlerinin geleceğe yönelik performans tahminleri yapılarak, sahanın verimli işletilmesi için belirlenecek kararların alınmasında önemli bir araç olarak kullanılır [4].

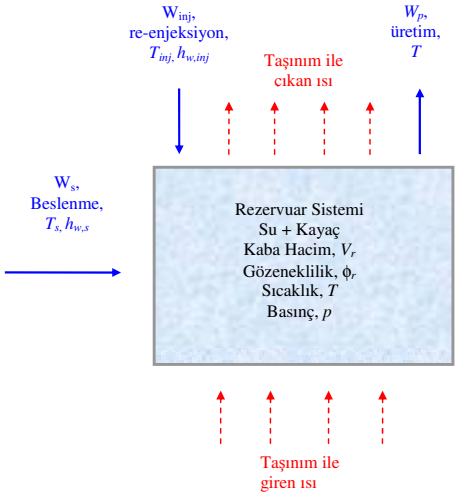
Bir önceki paragrafta atıfta bulunulan çalışmaların [1-4] tümünde kullanılan ortak varsayım, jeotermal rezervuar içerisinde izotermal akış olduğudur; yani rezervuar sıcaklığının zamanla değişmediği varsayılmaktadır. Bu varsayım, jeotermal rezervuarların iki önemli durum değişkeninden biri olan rezervuar ortalama basıncında (veya su seviyesinde), üretim, doğal beslenme ve reenjeksiyona bağlı olarak meydan gelen değişimlerin hesaplanmasına olanak tanırken, bir diğer önemli durum değişkeni olan rezervuar ortalama sıcaklığında meydana gelecek değişimlerin hesaplanmasına veya tahmin edilmesine olanak sağlamamaktadır.

Aslında, tek-faz sıvı içeren jeotermal sistemler söz konusu olduğunda, pratik uygulama açısından değilse bile, doğal akışkan ve ısı beslenmesinin olmadığı (kapalı) jeotermal sistemlerde ve reenjeksiyonun yapılmadığı durumlarda bile teorik anlamda izotermal akış varsayımı geçerliliğini yitirmektedir. Örneğin ısı ve akışkan akışına kapalı bir tanktan belirli bir ilk basınç ve sıcaklıktaki akışkanın belirli bir miktarın üretilmesinden sonra, tank içindeki kütle miktarı, basıncı ve dolayısıyla akışkanın iç enerjisi azalacağından, akışkanın üretim öncesinde sahip olduğu ilk sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa (az da olsa) düşmesi beklenmektedir. Bir başka deyişle, sadece kütle üretimi yapıldığında rezervuarda oluşan akış teorik anlamda tümüyle izotermal değildir. Ayrıca, jeotermal rezervuarın ortalama basıncını korumak, atık sudan kurtulmak amacıyla üretim sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta jeotermal suyu sisteme tekrar sisteme basmanın (reenjeksiyon) gerekli olduğu uygulamalarda ve jeotermal sisteme doğal beslenme yoluyla giren daha "serin" suların olduğu durumlarda izotermal akış varsayımı geçerliliğini yitirmektedir. Doğal olarak, böyle durumlarda, rezervuarın ortalama sıcaklık davranışı, rezervuar hacminin büyüklüğüne, yapılan akışkan üretim debisine ve re-enjekte edilen suyun debisi ve sıcaklığına, doğal beslenme "debisi" ve sıcaklığına bağlı olmaktadır.

Bildiride ilk olarak, geliştirilen izotermal olmayan lumped-parametre modelinin matematiksel ifadesi sunulmakta, daha sonra geliştirilen modelin sonuçlarının ticari bir simülatör sonuçları ile kıyaslaması ve doğrulaması verilmektedir. Son olarak, yeni modelin İzmir Balçova-Narlıdere sahasına yapay uygulamaları gösterilmektedir.

2. İZOTERMAL OLMAYAN TEK-TANK LUMPED-PARAMETRE MODELİ

Bu çalışmada geliştirilen yeni tek-tank modeli kütle ve enerji (ısı) korunumu prensipleri üzerine kurulu olup Şekil 1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. İdealleştirilmiş tek-tank lumped jeotermal modeli.

Şekil 1'de sunulan idealleştirilmiş tek tank modelinde, jeotermal rezervuar bir tank olarak düşünülerek, sisteme ait ortalama özellikler kullanılmaktadır. Modelde, W_p (kg/s) üretim kuyuları aracılığıyla tanktan yapılan toplam kütlesel üretim debisini ve W_{inj} (kg/s) reenjeksiyon kuyuları aracılığıyla tanka geri dönen toplam kütlesel enjeksiyon debisini temsil etmektedir. Tanktan yapılan kütlesel net üretim debisi, W (kg/s) ise W_p-W_{inj} şeklinde ifade edilmektedir. Tanktan yapılan üretim nedeniyle tankta oluşan basınç düşümü beslenme kaynağından tanka doğru akışkan akışına (beslenmeye) neden olmaktadır. Modellemede W_s (kg/s) ile temsil edilen kütlesel beslenme debisi, basitliği ve yaygın kullanım alanının olması nedeniyle, diğer tank modellemesi çalışmalarında olduğu gibi [1-4], Schilthuis'un [5] kararlı akış modeli ile $W_s = \alpha_s\,[p_i\text{-}p(t)]$ şeklinde modellenmektedir. Ayrıca, daha önce değinildiği gibi bu çalışmada, tek fazlı sıvı akışının göz önünde bulundurulduğu unutulmamalıdır.

Bu varsayımlar altında, Şekil 1'de verilen tek-tank modeli için kütle korunumu ilkesini uygulayarak akışkan akışını tanımlayan diferansiyel denklem aşağıda gibi türetilebilmektedir:

$$V_r \frac{d(\rho_w \phi_r)}{dt} - \alpha_s \left[p_i - p(t) \right] + \left[W_p(t) - W_{inj}(t) \right] = 0 \tag{1}$$

Jeotermal rezervuarlardaki ısı akışında genelde egemen olan konveksiyon (taşınım) dur; yani üretim, reenjeksiyon ve beslenme aktivitesi nedeniyle ısının akışkan hareketi ile taşınmasıdır. İletimden ("conduction") dolayı olan ısı kayıpları ile pınar veya kaynaklardan dışarı akan akışkandan olan ısı kayıpları ihmal edilirse, Şekil 1'de belirtilen tek-tank modeli için enerji korunumu ilkesi uygulanarak ısı akışını tanımlayan diferansiyel denklem aşağıdaki gibi türetilebilmektedir:

$$\frac{d}{dt}\left[(1-\phi_r) V_r \rho_m C_m T + V_r \phi_r \rho_w u_w \right] - W_{inj}(t) h_{w,inj}(t) - \alpha_s \left[p_i - p(t) \right] h_{w,s}(t) + W_p(t) h_{w,p}(t) = 0 \tag{2}$$

İzotermal olmayan tek tank modelinde, Denklem 3 kullanılarak Denklem 1 ve 2'de yer alan rezervuar gözenekliliği ϕ_r'nin basınç ve sıcaklıkla değişimi göz önünde bulundurulabilmektedir:

$$\phi_r(p,T) = \phi_i \left[1 + c_r (p - p_i) - \beta_r (T - T_i) \right] \tag{3}$$

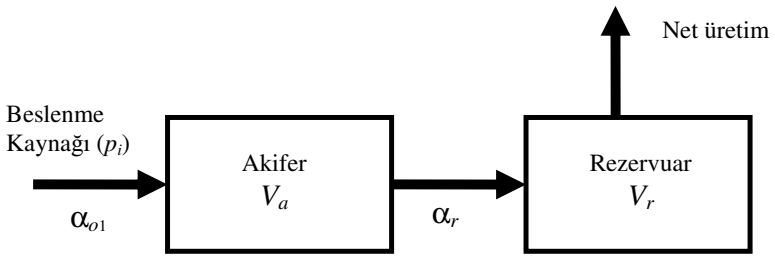
Şekil 1, Denklem 1, 2 ve 3'de yer alan parametreler aşağıda tanımlanmaktadır:

c_r : Sabit sıcaklık altında, gözeneklilik (veya etken kayaç) sıkıştırılabilirliği, 1/bar.
C_m: Kayaç katı kısmı özgül ısı kapasitesi, J/(kg ^oC).
$h_{w,inj}$: Enjekte edilen suyun özgül entalpisi, J/kg.
$h_{w,s}$: Doğal beslenme ile giren suyun özgül entalpisi, J/kg.
$h_{w,p}$: Üretilen suyun özgül entalpisi, J/kg.
p_i: Rezervuar ilk basıncı, bar
$p(t)$: Herhangi bir zaman t'deki rezervuar ortalama basıncı, bar.
t: Zaman, s.
$T(t)$: Herhangi bir zaman t'deki rezervuar ortalama sıcaklığı, ^oC.
T_i: Rezervuar ilk sıcaklığı, ^oC.
T_{inj}: Enjekte edilen suyun sıcaklığı, ^oC.
T_s: Beslenme akışkanının sıcaklığı, ^oC.
u_w: Herhangi bir zaman değeri *t'de* suyun özgül içsel enerjisi, J/kg.
V_r: Rezervuar kaba hacmi, m^3.
α_s: Beslenme indeksi, kg/(s-bar).
β_r: Sabit basınç altında, gözeneklilik termal genleşme/büzüşme katsayısı, 1/^oC.
ρ_m : Kayaç katı kısmı yoğunluğu, kg/m^3.
ρ_w : Jeotermal suyun yoğunluğu, kg/m^3.
ϕ_i : İlk basınç ve sıcaklık değerindeki gözeneklilik değeri.
ϕ_r : Herhangi bir zaman değeri t'deki rezervuar gözeneklilik değeri.

Üretilen ve reenjekte edilen suyun debi ve entalpilerinin zamanla değişimi de göz önünde bulundurulacak şekilde model genel olarak tasarlanmıştır. Suyun özgül içsel enerjisi, entalpisi ve yoğunlukları Uluslararası Formül Komisyonunun [6] buhar tablosu alt bölge 1 (basınç için 0.0061-1000 bar aralığı, sıcaklık için 0.01-350 ^{o}C aralığı) için verdiği denklemlerden sıcaklığa ve basınca bağlı olarak hesaplanmıştır.

Denklem 1 ve 2 doğrusal olmayan diferansiyel denklemler olduğundan, tümüyle kapalı Newton-Raphson yineleme yöntemiyle [7] birlikte çözümlemek gerekmektedir. Çözümlemede birincil ("primary") değişkenler olarak basınç *p* ve sıcaklık *T* göz önünde bulundurulmaktadır. Denklem 1 ve 2 bu değişkenler için zamanın fonksiyonu olarak Newton-Raphson algoritması ile çözümlenir. Çözümlemeye ait detaylar uzun olduğundan, burada verilememektedir. Çözümleme detayları Onur vd. tarafından yazılan TÜBİTAK raporunda bulunabilir [8].

Burada gösterilmemekle beraber, Şekil 1'i temel alan izotermal olmayan tek-tank lumped-parametre modelini, Sarak vd. [2] tarafından önerilen iki ya da daha fazla tanklı lumped-parametre modellerine genişletmek mümkündür. Örneğin, Şekil 2'de gösterilen iki tanklı lumped-parametre modeli için toplam 4 adet (akifer ve rezervuar sistemleri için yazılmış iki adet kütle ve iki adet enerji) korunum (diferansiyel) denkleminin Newton-Raphson yöntemiyle birlikte çözümlenmesi yeterli olmaktadır.



Şekil 2. İdealleştirilmiş iki-tanklı lumped-parametre modeli.

2.1. Tarihsel Çakıştırma ile Parametre Tahmini

Sunulan tek-tank lumped-parametre modeli ile doğrusal olmayan parametre tahmininde (veya bir başka deyişle tarihsel çakıştırma probleminin çözümü için) ağrılıklı en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Sadece basınç, sadece sıcaklık veya basınç ve sıcaklık gözlem (ölçüm) verilerine birlikte çakıştırma yapabilmek amacıyla parametre tahmininde kullanılan en küçük kareler hedef fonksiyonu en genel şekliyle Denklem 4'de verilmektedir:

$$O(\boldsymbol{m}) = \frac{1}{2} I_p \sum_{i=1}^{N_p} \left[w_{p,i} \left[\frac{p_{m,i} - p_{model}(\boldsymbol{m}, t_i^p)}{\sigma_p} \right] \right]^2 + \frac{1}{2} I_T \sum_{j=1}^{N_T} \left[w_{T,j} \left[\frac{T_{m,j} - T_{model}\left(\boldsymbol{m}, t_j^T\right)}{\sigma_T} \right] \right]^2 \tag{4}$$

Denklem 4'de, ***m*** bilinmeyen model parametre vektörünü temsil etmektedir. Çalışmada geliştirilen tek-tank izotermal olmayan akış modeli için model parametre vektörü toplam 10 parametreyi içermektedir:

$$\boldsymbol{m} = \left[V_r, \quad \phi_i, \quad \alpha_s, \quad p_i, \quad T_i, \quad T_s, \quad \beta_r, \quad c_r, \quad C_m, \quad \rho_m \right] \tag{5}$$

Denklem 4'deki I_p ve I_T terimleri basınç ya da sıcaklık ölçüm seti verilerinden hangilerinin çakıştırmada kullanılacağını belirlemek için tanımlanan "1" ya da "0" değeri alabilen göstergelerdir. Bu göstergelere atanacak değerlere bağlı olarak tarihsel çakıştırmada sadece basınç, sadece sıcaklık veya basınç ve sıcaklık verileri birlikte kullanılabilmektedir.

Denkem 4'de p_m ve T_m; t^p ve t^T zamanlarında ölçülmüş, basınç ve sıcaklık verilerini, p_{model} ve T_{model} ise bu zaman değerlerinde geliştirilen izotermal olmayan lumped-parametre modelinden hesaplanmış basınç ve sıcaklıkları temsil etmektedir. N_p, tarihsel çakıştırmada kullanılacak toplam basınç verisi sayısını ve benzer şekilde, N_T; ise tarihsel çakıştırmada kullanılacak toplam sıcaklık verisi sayısını belirtmektedir. σ_p ve σ_T, sırasıyla, basınç ve sıcaklık ölçüm verileri üzerindeki hataların standart sapmasını, $w_{p,i}$ ve $w_{T,j}$ ise, basınç ölçüm noktası $p_{m,i}$ ve sıcaklık ölçüm noktası $T_{m,j}$ için kullanıcı tarafından atanmış ağırlıkları temsil etmektedir. Basınç ve sıcaklık ölçümlerine atanacak ağırlıklar sıfır ya da pozitif bir sayı olarak seçilebilmektedir.

3. İZOTERMAL OLMAYAN LUMPED-PARAMETRE MODELİ SONUÇLARININ DOĞRULANMASI

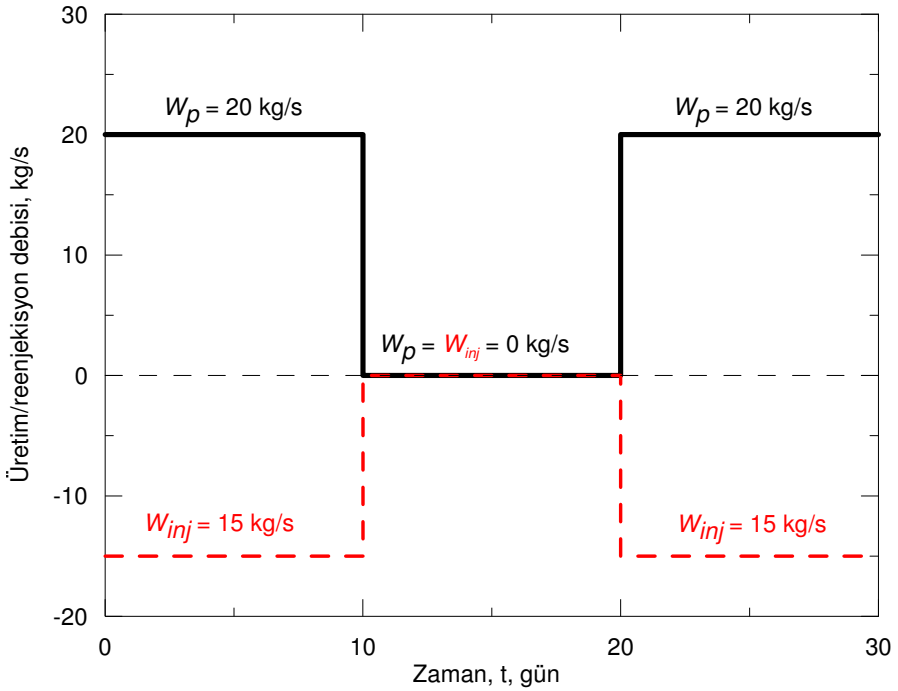
Bir önceki bölümde tanıtılan izotermal olmayan tek-tank lumped-parametre modelinin sonuçlarını doğrulamak amacıyla, jeotermal sistemlerin benzetiminde yaygın olarak kullanılan Tough-II yazılım programını [9] temel alan PetraSim yazılım programı [10] ile çeşitli teorik durumlar için kıyaslamalar yapılmıştır. Yapılan tüm kıyaslamalarda PetraSim ile izotermal olmayan tek-tank lumped-parametre modelinden elde edilen basınç ve sıcaklık çözümleri arasında mükemmel bir uyum bulunmuştur. Burada sadece iki yapay durum için; (i) beslenmesiz ve (ii) beslenmeli tek-tank durumları için yapılan kıyaslamalara ait sonuçlar sunulmaktadır. Her iki durum için Tablo 1'de verilen aynı model parametre değerleri kullanılmaktadır. Ayrıca, her iki durum için aynı üretim/reenjeksiyon debi senaryosu göz önünde bulundurulmaktadır (Şekil 3).

Şekil 4'de ise doğal beslenmesiz durum için (yani Şekil 1'de W_s = 0 veya Denklem 1 ve 2'de α_s = 0), yeni modelden elde edilen basınç ve sıcaklık çözümleri PetraSim'den elde edilenlerle kıyaslamalı olarak gösterilmektedir. PetraSim'de jeotermal rezervuar sınırları akışkan ve ısı akışına kapalı tek blok veya hücre (hacmi 10^7 m^3 olan bir küp) olarak modellenmiştir. Şekil 4'de gösterilen PetraSim basınç (Şekil 4a) ve sıcaklık (Şekil 4b) değerleri rezervuar olarak düşünülen bu bloğun basınç ve sıcaklık değerlerini temsil etmektedir.

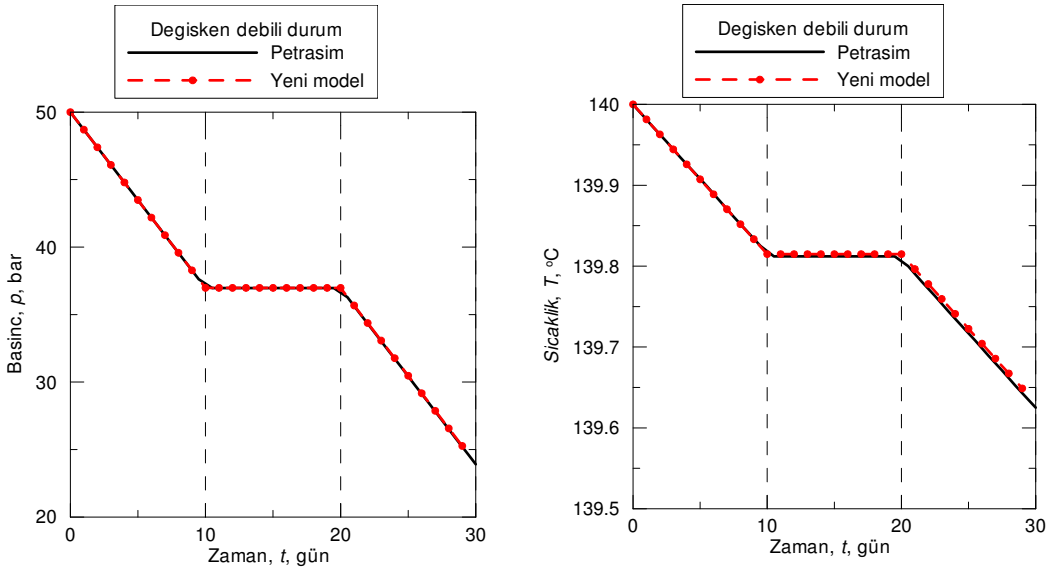
Tablo 1. Model doğrulaması için kullanılan parametre değerleri.

β_r,	[1/°C]	0
ϕ_r,	[kesirsel]	0.2
c_r,	[1/bar]	1.33×10^{-4}
ρ_w,	[kg/m^3]	928.5*
ρ_r,	[kg/m^3]	2650
C_m	[J/(kg °C)]	1000
V_r,	[m^3]	1.00×10^7
T_i	[°C]	140
p_i,	[bar]	50
W_p,	[kg/s]	20+
W_{inj},	[kg/s]	15+
T_{inj}	[°C]	60
$h_{w,ini}$	[kJ/kg]	255.3

* p = 50 bar ve T = 140 °C'deki suyun yoğunluğu
+ 0-10 gün üretim/reenjeksiyon dönemi ve 20-30 gün arası üretim/re-enjeksyion dönemi üretim ve reenjeksiyon debileri. 10-20 gün arası kapama dönemi $W_p = W_{inj}$ = 0 kg/s (bkz Şekil 3).



Şekil 3. Üretim üretim/reenjeksiyon debisi-zaman senaryosu.



(a) Basınç (b) Sıcaklık

Şekil 4. İzotermal olmayan tek-tank lumped-parametre modeli (a) basınç ve (b) sıcaklık çözümlerinin PetraSim çözümleriyle kıyaslanması; doğal beslenmesiz durum.

Son olarak, yeni model çözümleri jeotermal sistemin beslenmeli olduğu durum için PetraSim çözümleri ile kıyaslanmaktadır. Bu uygulamada Şekil 3'de verilen değişken üretim/reenjeksiyon debi senaryosu aynen kullanılmış ve jeotermal sisteme beslenme olduğu düşünülmüştür. Beslenme indeksi katsayısı bu uygulamada α_s = 1 kg/s olarak alınmıştır.

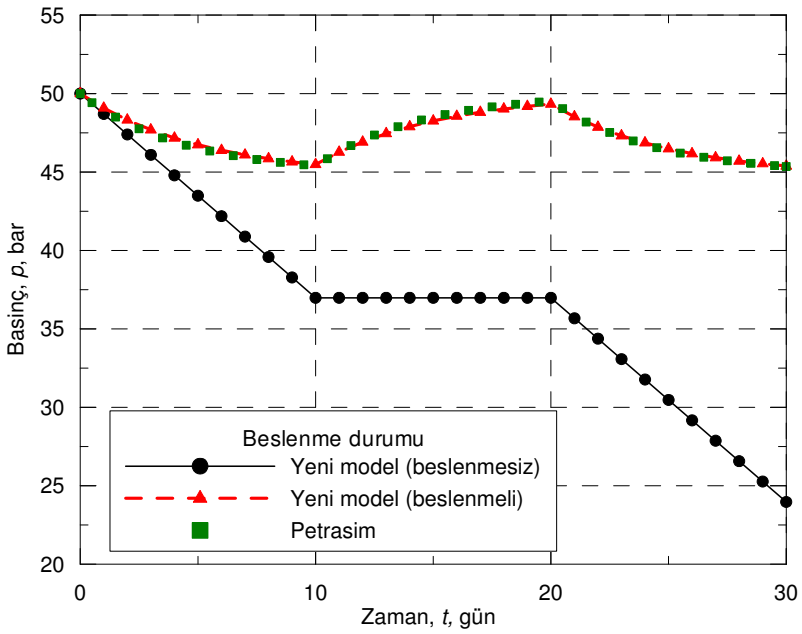
Rezervuara (tanka) beslenme sağlayan kaynağın sıcaklığının rezervuarın ilk denge sıcaklığına eşit (T_s = T_i = 140 °C) olduğu ve ayrıca beslenme kaynağının entalpisinin rezervuarın başlangıç durumundaki basınç ve sıcaklığındaki entalpisine eşit olduğu ($h_{w,s}$ = 592.4 kJ/kg) ve zamanla değişmediği kabul edilmiştir. Diğer model parametrelerine ait değerler Tablo 1'de verilmektedir.

PetraSim (veya Tough II)'de beslenmenin nasıl modellendiği dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır. Bu çalışma kapsamında, PetraSim ile yapılan modellemelerde ısı ve akışkan akışı 1B (x-yönünde) olarak incelenmektedir. Hacmi 10^7 m^3 olan bir küp olarak modellenen rezervuar bloğunun sağ ve sol uçlarına hacimleri çok büyük (her birinin hacmi 10^{56} m^3) olan iki akifer bloğu eklenerek rezervuarın beslenmesi modellenmektedir. Bu büyük bloklar, rezervuarın sağ ve sol sınırlarında basıncın (ilk basınç olan 50 barda) ve sıcaklığın (ilk sıcaklık olan 140ºC'de) tüm zaman değerlerinde sabit kalmasını sağlamaktadır.

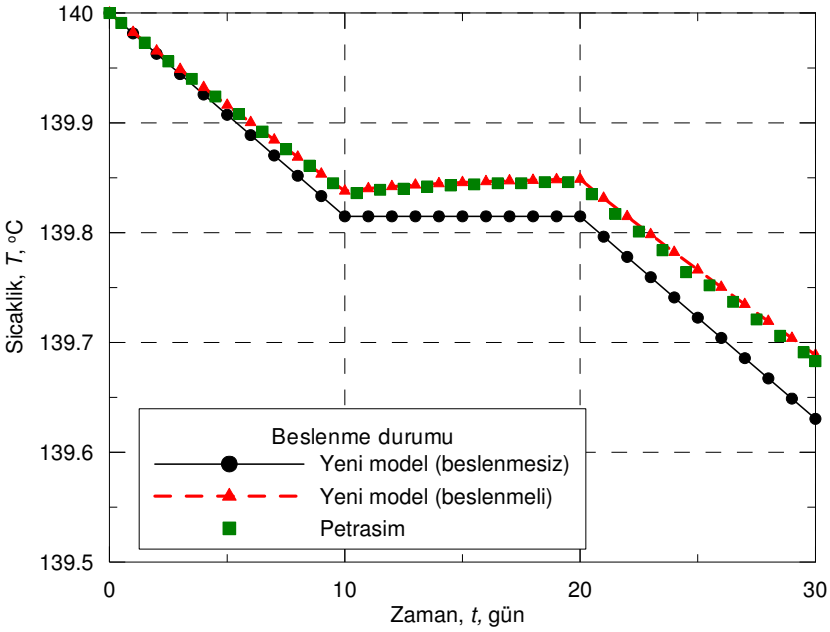
PetraSim'de modelleme yapabilmek için gerekli olan geçirgenlik (k) değeri, bölümümüzde yapılan bir lisans bitirme çalışması [11] kapsamında geliştirilen Denklem 6 ile verilen ilişki ile hesaplanmaktadır. Sağ ve sol uçları sabit basınçlı izotermal 1B rezervuar modelini temel alan bitirme çalışmasında, beslenme indeksi (α_s) ile geçirgenlik (k) arasındaki ilişkiyi veren Denklem 6 aşağıdaki gibidir:

$$\alpha_s = 2\frac{wh}{L_x}\frac{k}{\mu_w}\rho_w \qquad (6)$$

Örnek uygulamada, α_s = 1 kg/(s-bar) alındığı için, Denklem 13'den k/μ_w = 2.49x10^{-6} m^2/(bar-s) bulunmuş ve bu değerden μ_w (@p_i = 50 bar, T_i = 140 °C) = 2.024x10^{-9} bar-s değeri kullanılarak k = 5.061x10^{-15} m^2 değeri hesaplanmıştır. Her blok için PetraSim'de aynı geçirgenlik ve gözeneklilik değerleri (sırasıyla k = 5.061x10^{-15} m^2 ve ϕ = 0.2) kullanılarak PetraSim basınç ve sıcaklık çözümleri elde edilmiştir (Şekil 5 ve 6). Şekil 5 ve 6'da gösterilen PetraSim basınç ve sıcaklık değerleri rezervuar olarak düşünülen ortadaki bloğun (rezervuarın) basınç ve sıcaklık değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 5. İzotermal olmayan tek-tank lumped-parametre modeli basınç çözümlerinin PetraSim basınç çözümleriyle kıyaslanması; beslenmeli tank durumu.



Şekil 6. İzotermal olmayan tek-tank lumped-parametre modeli sıcaklık çözümlerinin PetraSim sıcaklık çözümleriyle kıyaslanması; beslenmeli tank durumu.

Şekil 4, 5 ve 6'da yapılan kıyaslamalardan görüleceği gibi, izotermal olmayan tek-tank lumped-parametre modelinin basınç ve sıcaklık çözümleri PetraSim simülatörü sonuçlarıyla mükemmel bir uyum göstermektedir.

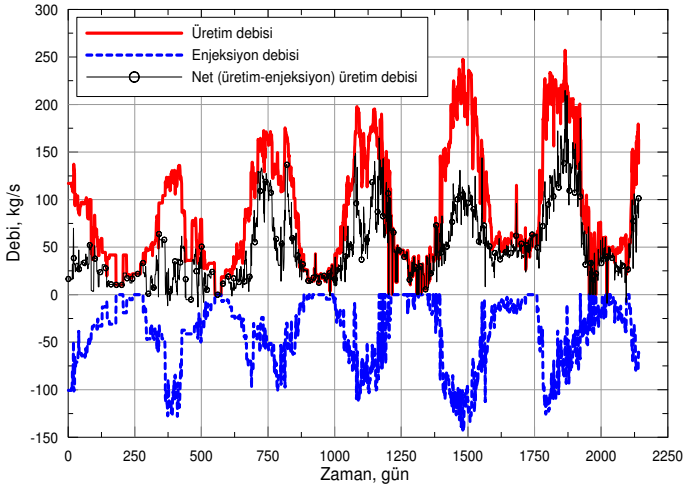
Beslenmenin basınç ve sıcaklık çözümleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, beslenmesiz durum için lumped-parametre modelinden türetilmiş (Şekil 4a ve 4b'de daha önce verilmiş) olan basınç ve sıcaklık çözümleri Şekil 5 ve 6'da ayrıca gösterilmektedir. Görüldüğü ve beklenildiği gibi, sisteme rezervuar ilk basınç ve sıcaklığında bir beslenme (akışkan girişi) olduğunda, hem rezervuar basıncı hem de sıcaklık daha az düşmektedir. Beslenme kapama döneminde basınç ve sıcaklığın yükselmesine yardımcı olmaktadır. Ancak dikkat edilecek olursa, kapama döneminde beslenmenin sıcaklık üzerinde meydana getirdiği artış etkisi basınçta meydana getirdiği artış etkisine göre oldukça küçüktür. Bu sonuç, sistem beslenmeli bile olsa, sıcaklığın rezervuarın başlangıçtaki ilk sıcaklığına ulaşması; bir başka deyişle rezervuarın enerji bakımından yenilenebilirliği, için basınca göre çok daha uzun kapama sürelerinin gerekli olduğunu göstermektedir.

4. İZOTERMAL OLMAYAN TEK-TANK MODELİ İLE YAPILAN BAZI UYGULAMALAR

Bu bölümde, çalışmada geliştirilen izotermal olmayan modelin uygulamaları sunulmaktadır. Yapılan uygulamalar, İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal sistemine benzer "yapay" bir saha içindir. Bu uygulamalarda amaç, uygulanan üretim/reenjeksiyon senaryolarına bağlı olarak geliştirilen modelden türetilen basınç ve sıcaklık davranışının bazı model parametrelerine (doğal beslenme sıcaklığı, doğal beslenme indeksi, gözeneklilik, kayaç sıkıştırılabilirliği, kaba hacim, gibi) karşı duyarlılığını incelenmektir. Ayrıca, düşük sıcaklıklı tek-faz sıvı içeren bir jeotermal sistemin basınç ve sıcaklık davranışını hangi model parametrelerinin kontrol ettiğini araştırmaktır.

4.1. Model Parametre Etkilerinin İncelenmesi; İzmir Balçova-Narlıdere Sahası Yapay Örneği

Bu bölümde verilen uygulamalarda kullanılan üretim/reenjeksiyon debisi verileri Şekil 7'de sunulmakta olup 01 Ocak 2000 – 10 Kasım 2005 arası İzmir Balçova-Narlıdere sahasında uygulanan gerçek üretim/reenjeksiyon verilerini temsil etmektedir [12]. Şekil 7'de zaman ekseninde "0" değeri 01 Ocak 2000'ye, son veri noktası (2141 gün değeri) ise 10 Kasım 2005'e karşılık gelmektedir. Debiler sahadan yapılan ve enjekte edilen toplam debilerdir.



Şekil 7. 01 Ocak 2000 -10 Kasım 2005 arası dönemi İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal sahasında uygulanan yaklaşık üretim ve enjeksiyon debisi verileri [12].

Türeyen, Sarak ve Onur [13] tarafından bu kongrede sunulan bir diğer çalışmada, Şekil 7'de verilen net üretim debisi verileri kullanarak, ND-1 kuyusunda yaklaşık 4.5 yıl boyunca kaydedilmiş dinamik su seviyesi verilerine 5 farklı izotermal lumped-parametre modelleri ile tarihsel çakıştırma yapılmış ve verilere en iyi tarihsel çakışmayı sağlayan modelin, beslenmeli tek-tank izotermal model olduğu belirlenmiştir. Bu model kullanılarak yapılan tarihsel çakıştırma ile elde edilen model parametre değerleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. İzotermal tek-tank açık model parametre değerleri.

α_s, [kg/(s-bar)]	45
κ, [kg/bar]	8.4×10^7

Burada izotermal akış varsayımına dayanan modeldeki κ parametresinin bir grup parametresi olduğuna (yani izotermal olmayan akış modelinde yer alan bazı bireysel parametrelerin çarpımı olduğuna) dikkat edilmelidir. κ parametresi

$$\kappa = V_r \phi_r c_t \rho_w \tag{7}$$

denklemiyle tanımlanmaktadır. Bu grup parametre içindeki c_t sabit sıcaklıkta toplam (etken kayaç ya da gözenek, c_r + akışkan, c_w) sıkıştırılabilirliği temsil etmektedir:

$$c_t = c_r + c_w = \frac{1}{\phi_r}\left(\frac{\partial \phi_r}{\partial p}\right)_T + \frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial \rho_w}{\partial p}\right)_T \tag{8}$$

Burada bir noktayı vurgulamak faydalı olacaktır: İzotermal olmayan akış modelinde, etken kayaç sıkıştırılabilirliğinin, c_r, sabit olduğu (yani basınç ve sıcaklıkla değişmediği) kabul edilirken; akışkan sıkıştırılabilirliği c_w'nin basınç ve sıcaklıkla değişimi göz önünde bulundurulmaktadır.

Bu nedenle, c_w'nin sabit olarak düşünüldüğü izotermal akış modelinde, c_w*'nin* değerinin tam karşılığının ne olacağı ya da hangi p ve T değerinde hesaplanacağı çok açık olmamakla birlikte, izotermal akış modelinde c_w'nin ilk basınç p_i ve ilk sıcaklık T_i'deki değerini ve aynı şekilde κ grup parametresinde yer alan akışkan yoğunluğu, ρ_w, ve gözeneklilik, ϕ_r, değerlerinin ilk basınç p_i ve ilk sıcaklık T_i 'deki değerlerini yaklaşık olarak temsil edeceği beklenebilir.

İzmir Balçova-Narlıdere sisteminin ilk rezervuar (yaklaşık 500 m derinlikteki) basıncının p_i = 50 bar ve ilk sıcaklığının T_i = 140 ^oC olduğunu varsayarsak, bu basınç ve sıcaklık değerlerinde suyun yoğunluğu ρ_w = 928.5 kg/m^3 ve sıkıştırılabilirliği c_w = 5.92x10^{-5} 1/bar olarak hesaplanmaktadır. Balçova-Narlıdere sistemi için gözeneklilik ve kayaç sıkıştırılabilirlik (c_r) değerleri tam olarak bilinmemektedir. Belirsizlik olmakla beraber, ilk basınç ve sıcaklıktaki gözenekliliğin ϕ_i = 0.05 (%5) ve etken kayaç sıkıştırılabilirliği c_r = 1.33x10^{-4} 1/bar kabul edilirse, Tablo 2'de verilen κ değeri için İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal rezervuarının kaba (kayaç artı su) hacmi V_r = 9.42x10^9 m^3, sıvı hacmi ise $V_r x \phi_i$ = 4.709x10^8 m^3 olarak Denklem 7 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

Bildiğimiz kadarıyla, İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal sistemine enjekte edilen suyun dönüş sıcaklığı 60°C civarındadır. Dolayısıyla, modellemede enjekte edilen suyun sıcaklığı T_{inj} = 60°C olarak alınmaktadır.

4.1.1. Doğal Beslenme Sıcaklığı T_s'nin Rezervuar Basınç ve Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi

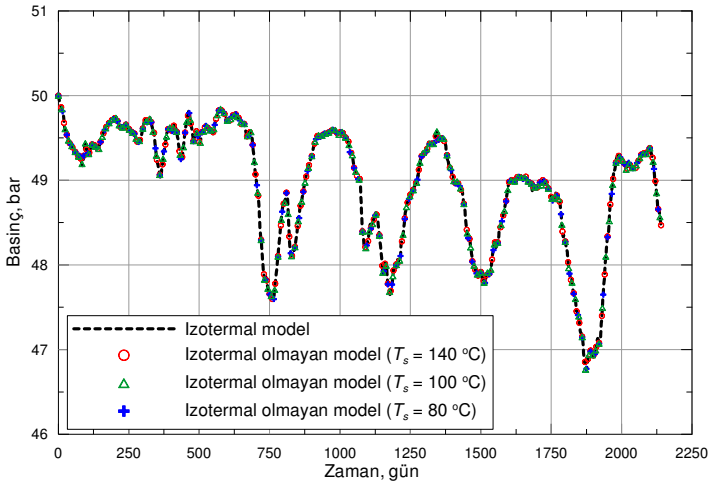
İzmir Balçova-Narlıdere sahası için uyarlanan veriler (Şekil 7, Tablo 2 ve Tablo 3) kullanılarak; 80, 100 ve 140ºC olmak üzere 3 farklı doğal beslenme suyu sıcaklığı için jeotermal rezervuarın basınç (veya su seviyesi) ve sıcaklık davranışı izotermal olmayan tek-tank modeli ile incelenmiştir. Elde edilen basınç (ve su seviyesi) ve sıcaklık davranışı, sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmektedir. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla izotermal tek-tank modelinden elde edilen basınç (ve su seviyesi) ve sıcaklık davranışı da Şekil 8 ve 9'da gösterilmektedir.

Tablo 3. İzotermal olmayan beslenmeli tek-tank modeli parametre değerleri.

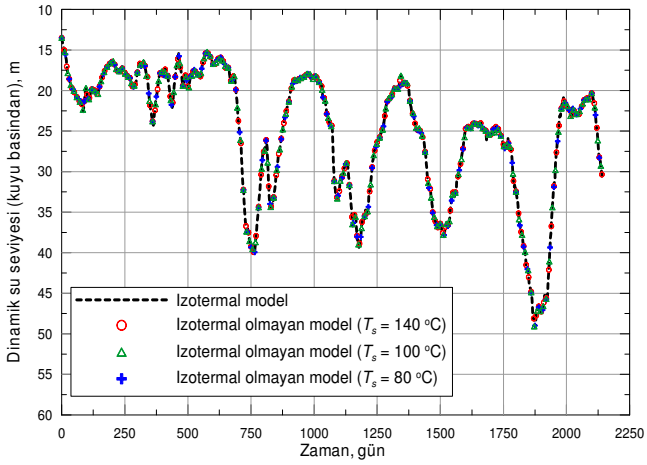
α_s, kg/(s-bar)	45	c_r, 1/bar	1.33x10^{-4}
p_i, bar	50	c_w, 1/bar	5.92x10^{-5} @50 bar ve 140ºC
T_i, ºC	140	c_t, 1/bar	1.92x10^{-4}
ϕ_i	0.05	ρ_w, kg/m^3	928.5 @50 bar ve 140ºC
V_r, m^3	$= \kappa/\phi\rho_w c_t$ = 9.42x10^9	ρ_m, kg/m^3	2650
C_m, J/kg-ºC	1000	β_r, 1/ ºC	0.
T_{inj}, ºC	60	$h_{w,inj}$, J/kg	255263
h_{ws}, J/kg	592125 @50 bar T_s = 140ºC 422742 @50 bar T_s = 100ºC 338850 @50 bar T_s = 80ºC		

Şekil 8'den da anlaşılabileceği gibi beslenme suyu sıcaklığının rezervuar basınç (veya su seviyesi) davranışı üzerinde pratik olarak etkisi olmamaktadır. Ayrıca, izotermal model ile izotermal olmayan model basınç ve su seviyesi eğrileri birbirlerinin aynısıdır.

Buna karşılık, Şekil 9'dan görülebileceği gibi, rezervuar sıcaklığı sürekli azalmaktadır. Bunun nedenleri; (i) rezervuar sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta suyun hem doğal beslenme hem de reenjeksiyon ile rezervuara girmesi, (ii) rezervuar sıcaklığına eşit sıcaklıkta (140ºC) doğal beslenme ile su girişi olsa da rezervuara reenjeksiyon olması ve net üretimin pozitif olması bir başka ifadeyle rezervuardaki akışkan kütlesini sürekli azalması şeklinde özetlenebilir. Rezervuar ilk sıcaklığı ile aynı sıcaklıkta (140 ºC) beslenme olması durumunda sistemin sıcaklığı 2141 gün sonunda yaklaşık 0.1ºC azalırken, beslenme suyunun 100ºC olması durumunda yaklaşık 0.16ºC ve 80ºC olması durumunda ise yaklaşık 0.19 ºC azalmaktadır. İzotermal model, rezervuar sıcaklığındaki bu değişimleri tahmin etmekte yetersiz kalmakta ve rezervuar sıcaklığının tüm zamanlar için 140°C'de sabit kalacağını öngörmektedir.

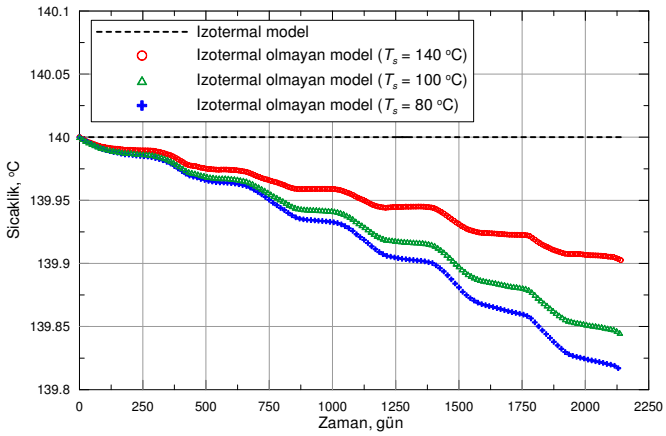


(a) Rezervuar basıncı



(b) Kuyu su seviyesi

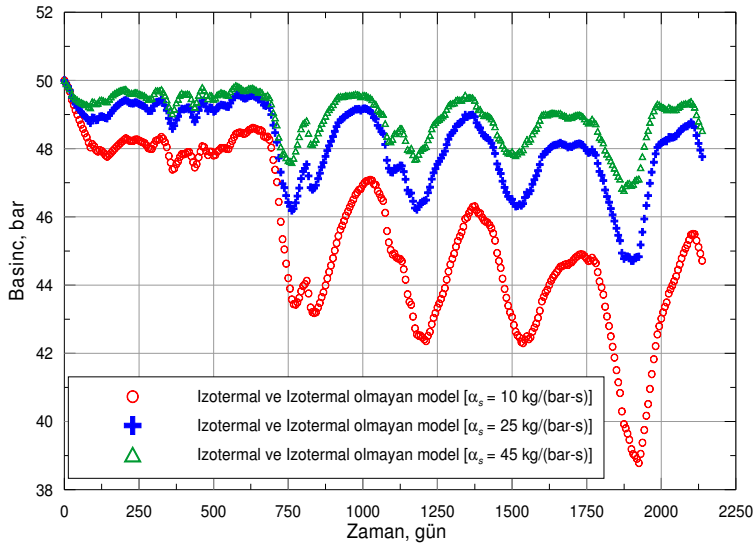
Şekil 8. Doğal beslenme sıcaklığı T_s'nin (a) rezervuar basıncı ve (b) su seviyesi üzerindeki etkisi; İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.



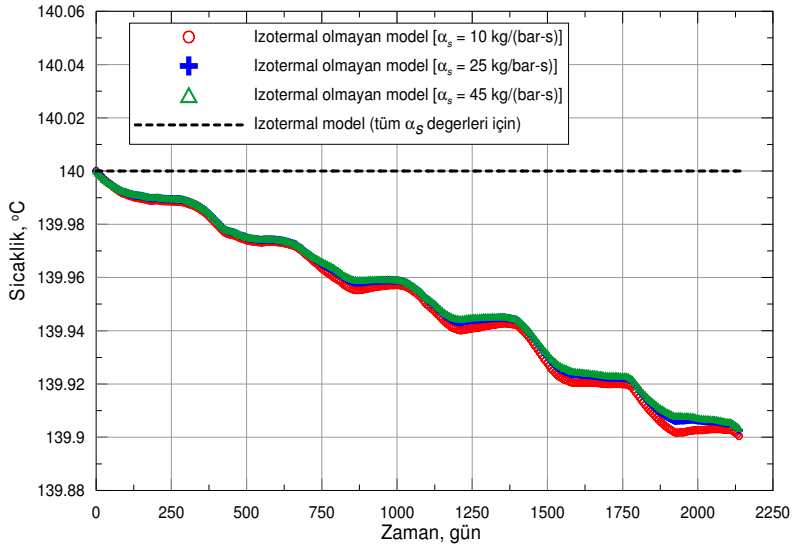
Şekil 9. Doğal beslenme sıcaklığı T_s'nin rezervuar sıcaklığı üzerindeki etkisi; İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.

4.1.2. Doğal Beslenme İndeksi α_s'nin Rezervuar Basınç ve Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, izotermal ve izotermal olmayan modeller kullanılarak beslenme indeksi (α_s)'nin 10, 25 ve 45 kg/s olmak üzere üç farklı değeri için rezervuar basınç ve sıcaklığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Her üç farklı beslenme indeksi için doğal beslenme sıcaklığı T_s = 140°C alınmış ve diğer parametreler için Tablo 3'de verilen değerleri kullanılmıştır. Üretim/reenjeksiyon debisi Şekil 7'deki gibidir. Elde edilen sonuçlar Şekil 10 ve 11'de gösterilmektedir.



Şekil 10. Doğal beslenme indeksi α_s'nin rezervuar basıncı üzerindeki etkisi; İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.



Şekil 11. Doğal beslenme indeksi α_s'nin rezervuar sıcaklığı üzerindeki etkisi; İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.

Beslenme indeksi değeri (α_s) azaldıkça rezervuar basıncı daha fazla düşmektedir (Şekil 10). Beslenme indeksi değerinin azalması rezervuara daha az beslenme olduğu anlamına geldiği için α_s değeri azaldıkça rezervuar basıncında daha fazla düşme gözlenmesi beklenilen bir sonuçtur. Ayrıca, aynı α_s değeri için, izotermal model ile izotermal olmayan model basınç eğrileri birbirlerinin aynısıdır.

Bir başka deyişle, izotermal olmayan akış etkileri, basınç üzerinde pratik açıdan çok önemli olmamaktadır. Doğal beslenme sıcaklığı rezervuar ilk sıcaklığına eşit olduğu için, beslenme indeksinin (α_s) rezervuarın sıcaklık davranışı üzerinde çok önemli bir etkisi gözlemlenmemektedir; α_s'in 4.5 kat azalması durumunda bile rezervuar sıcaklığı çok az düşüm göstermektedir (Şekil 11). Bu sonuç, rezervuar basıncının tersine, sıcaklığın beslenme indeksi α_s'ye çok duyarlı olmadığına işaret etmektedir.

4.1.3. Kaba Hacim, Gözeneklilik ve Kayaç Sıkıştırılabilirliğinin Rezervuar Basınç ve Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi

Şekil 8 ve 10'dan da görülebileceği gibi, grup parametresi κ değeri (Denklem 14) ve beslenme indeksi α_s aynı değerde tutulduğunda, izotermal ve izotermal olmayan modellerden elde edilen basınç (veya su seviyesi) eğrileri pratik olarak üst üste çakışmaktadır. Bugüne kadar tek-faz sıvı içeren sistemler için yaptığımız diğer tüm uygulamalarda da bu sonuç elde edilmiştir. Dolayısıyla, ister izotermal ister izotermal olmayan model kullanılsın κ ve α_s parametrelerine ait değerler değiştirilmediği sürece, her iki modelden de pratik anlamada birbiriyle aynı olan basınç (veya su seviyesi) değerlerinin veya davranışlarının hesaplanacağıdır. Bir başka deyişle, izotermal model, izotermal olmayan koşullarda da rezervuar basıncı veya su seviyesi davranışını tahmin etmede kullanılabilecek geçerli bir modeldir. Bunun da temel nedeni, tek-faz sıvı içeren jeotermal rezervuarların basınç veya su seviyesi davranışının sadece κ ve α_s parametreleri tarafından kontrol edilmesidir.

Ancak bu sonuç, Şekil 9 ve Şekil 11'den görüldüğü gibi rezervuarın sıcaklık davranışı için geçerli değildir. Bir başka deyişle, izotermal model; doğal beslenme, üretim ve reenjeksiyon aktivitelerinden dolayı oluşan rezervuar içindeki sıcaklık davranışını yansıtamamaktadır.

Bu nedenle, rezervuarın sıcaklık davranışını tahmin etmek için izotermal olmayan modelin kullanımı gereklidir. Bu bölümde sunulan örneklerle, grup parametresi κ'yı oluşturan rezervuar kaba hacımı (V_r), ilk gözeneklilik (ϕ_i) ve etken kayaç sıkıştırılabilirlik (c_r) değerlerinin basınç ve sıcaklık üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Yapılan dört farklı uygulamada, κ değeri = 8.4×10^7 kg/bar değerinde sabit tutularak, V_r, ϕ_i ve c_r'nin bireysel değerleri değiştirilmiştir (Tablo 4). Diğer model parametreleri için kullanılan değerler Tablo 3'dekilerle ve üretim/reenjeksiyon senaryosu ise Şekil 7'de verilenle aynıdır. Elde edilen sonuçlar Şekil 12 (basınç) ve Şekil 13 (sıcaklık) de gösterilmektedir.

Tablo 4. İzotermal olmayan beslenmeli tek-tank modeli parametre değerleri.

	V_r, m^3	ϕ_i	c_r, 1/bar	c_t, 1/bar	ρ_w, kg/m^3	κ, kg/bar
Durum 1	9.42×10^9	0.05	1.33×10^{-4}	1.92×10^{-4}	928.5	8.4×10^7
Durum 2	1.89×10^9	0.25	1.33×10^{-4}	1.92×10^{-4}	928.5	8.4×10^7
Durum 3	9.42×10^8	0.5	1.33×10^{-4}	1.92×10^{-4}	928.5	8.4×10^7
Durum 4	1.89×10^9	0.07	5.99×10^{-4}	6.58×10^{-4}	928.5	8.4×10^7

Şekil 12 ve 13'den çıkarılan sonuçlar şöyle özetlenebilir:

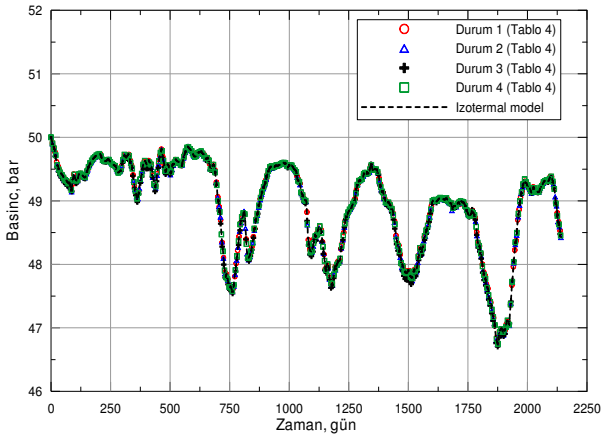
(a) Rezervuar basıncı sadece iki parametre κ ve α_s, tarafından kontrol edilmektedir. κ grup parametresini oluşturan rezervuar kaba hacmi (V_r), gözeneklilik (ϕ_i) ve kayaç sıkıştırılabilirliği (c_r)'nin bireysel değerlerinin rezervuar basınç sinyalinden tarihsel çakıştırma ile belirlenmesi olanaklı değildir. Grup parametresi κ ve α_s'nin değerleri sadece basınç sinyalinin tarihsel çakıştırmasından tekil olarak belirlenebilmektedir. Bu sonuç hem izotermal hem de izotermal olmayan model basınç çözümleri için geçerlidir.

(b) Rezervuar sıcaklığı ise, grup parametresi κ'nın (Denklem 14) değerini belirleyen tüm parametrelerin bireysel değerlerinden etkilenmektedir. Bu parametrelerden rezervuar sıcaklığı üzerinde en önemli etkiye sahip olan rezervuar kaba hacmi V_r'dir (bkz. Durum 1, Durum 2 ve Durum 3; Tablo 4 ve Şekil 13). Gözeneklilik (ϕ_i) ve etken kayaç sıkıştırılabilirliği (c_r) değerleri de sıcaklık üzerinde etkilidir. Ancak göreli olarak V_r'nin etkisine göre bu parametrelerin etkisi daha azdır (bkz Durum 2 ve Durum 4; Tablo 4 ve Şekil 13).

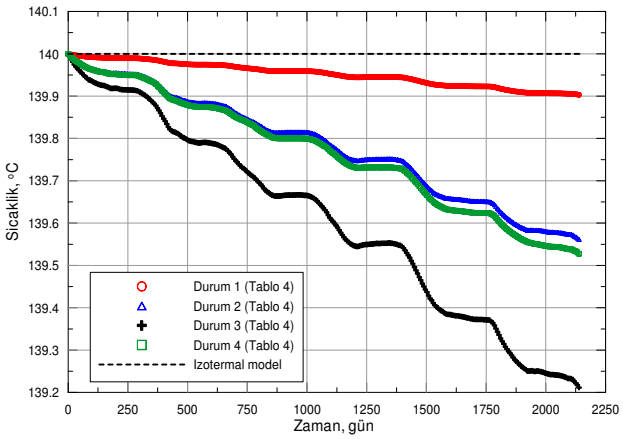
(c) Tüm diğer parametreler bilindiğinde (ρ_m, β_r, C_m), hem rezervuar basıncı hem de rezervuar sıcaklığı verilerine tarihsel çakıştırma yapılarak, beslenme indeksi α_s, rezervuarın kaba hacmi (V_r), gözeneklilik ve ekten kayaç sıkıştırılabilirliğinin değerlerini tekil olarak belirlemek olası gözükmektedir.

(d) Bir önceki şıkta verilen sonuç, basınç verilerinin tarihsel çakıştırmasından değerleri belirlenemeyecek parametrelerden olan rezervuar kaba hacmi V_r, gözeneklilik ϕ_i ve etken kayaç sıkıştırılabilirliği c_r'nin değerlerinin, ölçülmüş sıcaklık verilerinin basınç ile birlikte tarihsel çakıştırmada kullanılmasıyla belirlenebileceğini göstermektedir. Bu da, sıcaklık verilerinin modellemede kullanılmasının ne derece önemli olduğunu göstermektedir.

Bundan sonraki alt bölümde, yukarıda belirtilen gözlemler, İzmir Balçova-Narlıdere sahası için yapılan bir tarihsel çakıştırma örneği ile gerçeklenmektedir.



Şekil 12. V_r, ϕ_i ve c_r'nin rezervuar basıncı üzerindeki etkisi (dört durum için de $\kappa = 8.4 \times 10^7$ kg/bar); İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.



Şekil 13. V_r, ϕ_i ve c_r'nin rezervuar sıcaklığı üzerindeki etkisi (dört durum için de $\kappa = 8.4 \times 10^7$ kg/bar); İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.

4.2. Tarihsel Çakıştırma ile Model Parametrelerinin Belirlenmesi; İzmir Balçova-Narlıdere Sahası Yapay Örneği

Bu bölümde, İzmir Balçova-Narlıdere sahası için yapay olarak türetilen basınç ve sıcaklık verilerinin çalışmada geliştirilen izotermal olmayan beslenmeli tek-tank modeli ile tarihsel çakıştırmasından hangi rezervuar parametrelerinin güvenilir olarak belirlenebileceği incelenmektedir.

Yapay uygulama için göz önünde bulundurulan model parametre değerleri Tablo 3'de verildiği gibi olup, doğal beslenme sıcaklığı T_s = 140°C alınmıştır. Üretim debisi ve enjeksiyon debisi senaryosu ise Şekil 7'deki gibidir. İzotermal olmayan beslenmeli modele bu parametre ve üretim/reenjeksiyon debisi verileri girilerek, 2141 günlük basınç ve sıcaklık verisi türetilmiştir. Türetilen basınç ve sıcaklık verilerini "gerçek" saha verilerine benzetebilmek için üzerlerine sıfır ortalamalı belirli bir standart sapmaya sahip normal dağılımdan çekilmiş rastgele hatalar eklenmiştir. Basınç verilerine eklenen hataların standart sapması σ_p = 0.08 bar, sıcaklık verilerine eklenen hataların standart sapması ise 0.002°C'dir. Tarihsel çakıştırmada kullanılacak hata içeren "ölçülmüş" basınç ve sıcaklık Şekil 14'de sunulmaktadır.

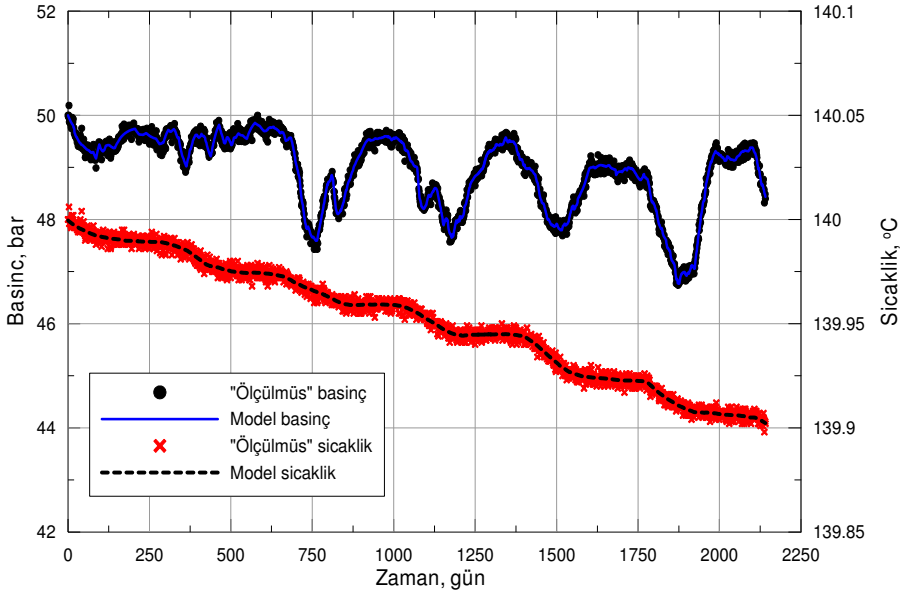
Günümüzde basınç ve sıcaklık ölçümlerinin mevcut teknoloji ile hangi çözünürlükle kaydedilebileceği üzerinde durmakta yarar vardır. Burada çözünürlük ile kastedilen, basınç ya da sıcaklık ölçerin kaydedebileceği en küçük basınç ve sıcaklık değişimidir. Bildiğimiz kadarıyla, günümüzdeki en yeni teknoloji ile basınç ölçümleri 0.001 bar (veya 0.01 psi), sıcaklık ölçümleri ise 0.001°C çözünürlükle kaydedilebilmektedir. Dolayısıyla, bu yapay uygulamada basınç ve sıcaklık verilerine eklenen rastgele hatalar bu çözünürlük değerlerinden biraz yüksek olmakla beraber, gerçeğe yakındır.

İzotermal olmayan akış modeli ile basınç ve sıcaklık gözlem verilerine birlikte çakıştırma yapılarak (Denklem 4 ile verilen hedef fonksiyonda $I_p = I_T = 1$ alınarak) toplam 7 farklı parametrenin (p_i, T_i, T_s, α_s, ϕ_i, c_r, V_r) değerleri tahmin edilmiştir. Denklem 4'de tüm basınç ve sıcaklık gözlem noktaları için ağrılıklar $w_p = w_T = 1$, basınç ölçüm hatası standart sapması σ_p = 0.08 bar ve sıcaklık ölçüm hatası standart sapması σ_T = 0.002°C alınmıştır. Tablo 5'de söz konusu yedi parametre için elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Tablo 5'de "±" olarak verilen değerler tahmin edilen parametrelere ait %95 güvenilirlik aralıklarını temsil etmektedir. V_r, ϕ_i ve c_r parametrelerine ait güvenilirlik aralıkları değerleri incelendiğinde, bu parametreler arasında en güvenilir olarak rezervuar kaba hacmi V_r'nin çakıştırmadan hesaplandığı anlaşılmaktadır. Bu sonuçta, sıcaklık verilerinin bu parametreler arasında en çok V_r'ye duyarlı olduğuna işaret etmektedir. Basınç ve sıcaklıklar için elde edilen çakışmalar ise Şekil 14'de gösterilmektedir. Tablo 5'den görüldüğü gibi, doğru değerlerinden oldukça uzak sayılabilecek başlangıç değerleri ile tarihsel çakıştırma başlatılmış olmasına rağmen, kaba hacim (V_r), gözeneklilik (ϕ_i), etken kayaç sıkıştırılabilirliği (c_r), beslenme indeksi (α_s) ve beslenme sıcaklığı (T_s) için doğru değerlerine çok yakın değerler tarihsel çakıştırma sonunda bulunmuştur.

Tablo 5. İzotermal olmayan akış modeliyle basınç ve sıcaklık verilerine birlikte tarihsel çakıştırma yapılarak elde edilen sonuçlar.

Model Parametresi	(Bilinmeyen) Doğru Değer	Başlangıç Değerler	Çakıştırmadan Elde Edilen Değer
İlk basınç, p_i, bar	50	55	$50.0 \pm 6 \times 10^{-3}$
İlk sıcaklık, T_i, °C	140	145	$140.0 \pm 3 \times 10^{-4}$
Beslenme sıcaklığı, T_s, °C	140	70	139.0±1.32
α_s, kg/(s-bar)	45.0	10.0	45.0±0.3
ϕ_i, kesir	0.05	0.01	0.051±0.01
c_r, 1/bar	1.33×10^{-4}	5.33×10^{-5}	$1.27 \times 10^{-4} \pm 4 \times 10^{-5}$
V_r, m^3	9.42×10^{9}	9.42×10^{8}	$9.57 \times 10^{9} \pm 2 \times 10^{8}$
RMS = 0.08 bar basınç çakıştırması için, RMS = 0.002 °C sıcaklık çakıştırması için elde edilen değer.			

Bu örnek uygulama, V_r, ϕ_i, c_r, T_s gibi jeotermal sistemlerin basınç/sıcaklık performansını kontrol eden önemli parametrelerin basınç ve sıcaklık ölçüm verilerinden güvenilir olarak bulunabileceğini ve basınç verilerinin yanısıra sıcaklık verilerinin bu parametrelere ait bilgiyi içeren önemli bir endirekt veri kaynağı olduğunu göstermektedir. Bildiğimiz kadarıyla, İzmir Balçova-Narlıdere sahası da dahil olmak üzere hiçbir jeotermal sahamızda gözlem kuyularında sürekli kuyu dibi sıcaklık verileri kaydedilmemekte ve bu nedenle sıcaklık verilerinin modellemede sağlamış olduğu yarar göz ardı edilmektedir.



Şekil 14. "Ölçülmüş" basınç/sıcaklık-zaman verileri; İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.

4.3. İzotermal Olmayan Model İle Performans Tahmini; İzmir Balçova-Narlıdere Sahası Yapay Örneği

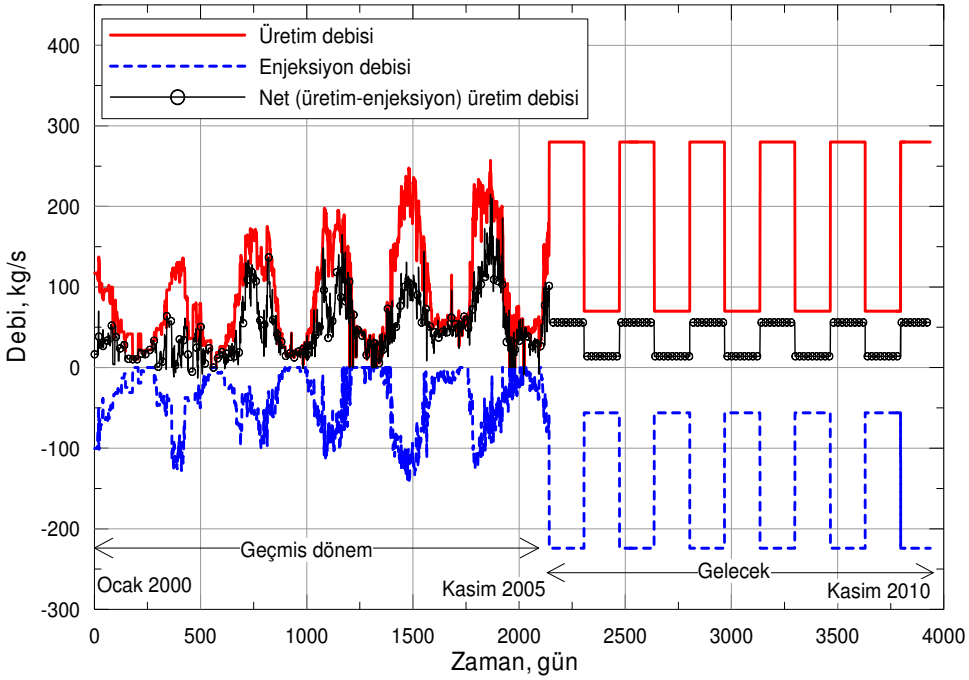
Bu bölümde, geliştirilen izotermal olmayan beslenmeli tek-tank modeli kullanılarak İzmir Balçova-Narlıdere sahası için yapılan yapay performans tahmini uygulamaları sunulmaktadır. Gelecek 5 yıl için yapılan performans tahminleri için iki farklı üretim/reenjeksiyon senaryosu (Şekil 15 ve Şekil 16) göz önünde bulundurulmuştur. Her iki üretim/reenjeksiyon senaryosu için net (üretim-reenjeksiyon) üretim debisi aynı olup Senaryo 1 için reenjeksiyon üretim oranı %80, Senaryo 2 için %86'dır.

Yapay performans tahmini uygulaması için göz önünde bulundurulan model parametre değerleri Tablo 3'de verildiği gibidir ve bu uygulamada doğal beslenme sıcaklığı T_s = 140°C olarak alınmıştır. Senaryo 1 ve 2 için yapılan performans tahminleri Şekil 17 (basınç ve su seviyesi) ve Şekil 18 (sıcaklık)'de sunulmaktadır.

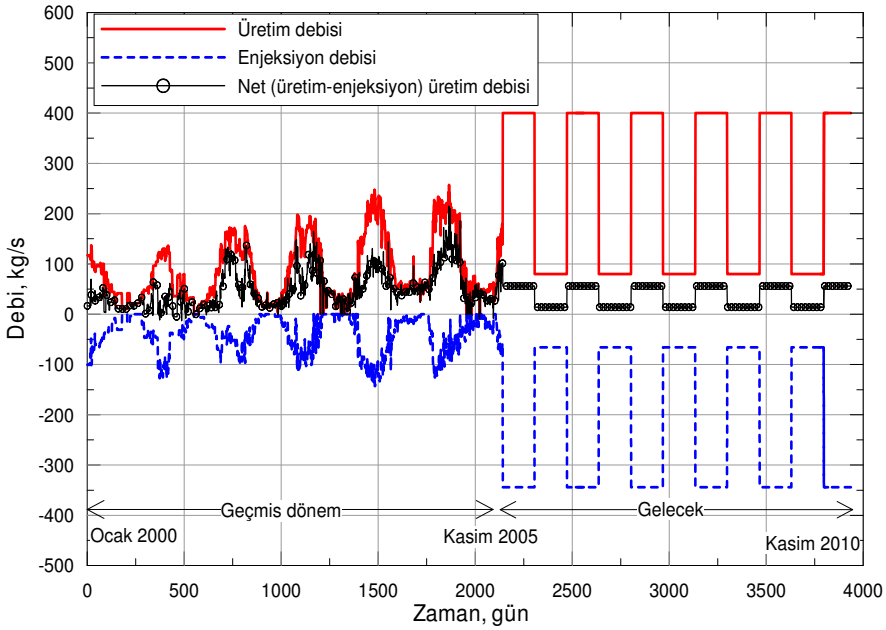
Şekil 17'den görüleceği gibi, ister izotermal ister izotermal olmayan model olsun, Senaryo 1 ve 2 için aynı basınç ve su seviyesi davranışları elde edilmektedir. Bunun nedeni her iki senaryoda da net (üretim eksi reenjeksiyon farkı) üretimin aynı olması ve izotermal ve izotermal olmayan tek-faz sıvı sistemlerde rezervuar basınç ve su seviyesinin sadece net üretim tarafından belirlenmesidir.

Şekil 17a'dan hem Senaryo 1 hem de Senaryo 2 için, 2005-2010 arası yaz ve kış dönemleri arasında, rezervuar basıncında yaklaşık periyodik olarak 1 bar basınç değişimi olacağı görülmektedir. Bu yaklaşık olarak su seviyesinde periyodik 11 m düşüm ve yükselime karşılık gelmektedir (Şekil 17b). Ayrıca not edilmesi gereken bir nokta, 2005'den sonra uygulanacak Senaryo 1 ve 2'ye göre su seviyesi 2005 seviyesine göre yaz dönemlerinde yaklaşık 5 m artış gösterecektir (Şekil 17b).

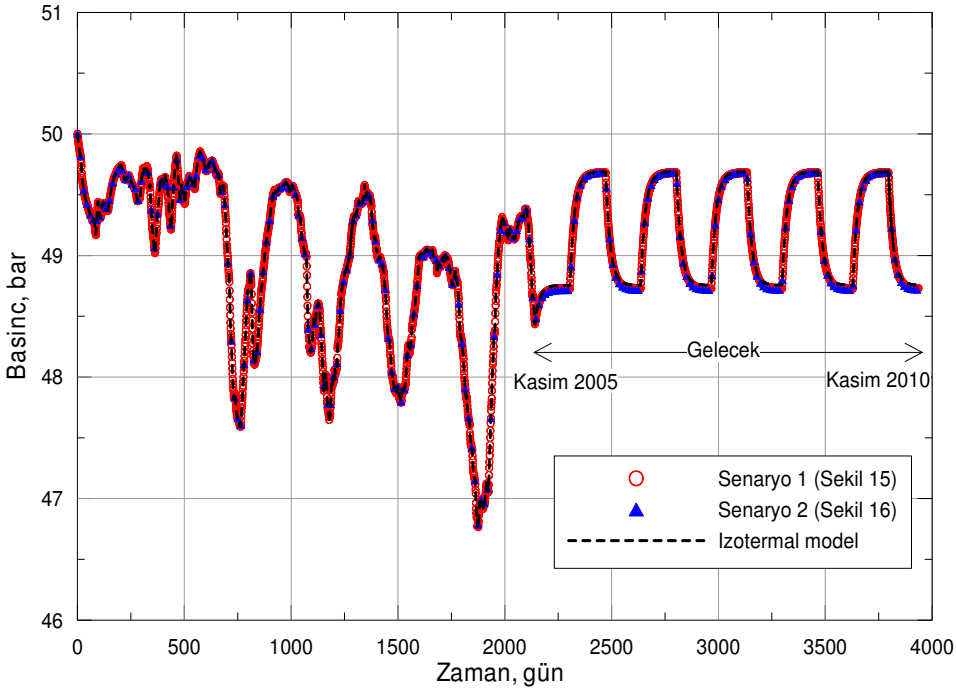
Buna karşın, izotermal olmayan modellerle rezervuar sıcaklığı için yapılan performans tahminlerinden (Şekil 18) görüleceği gibi, rezervuar sıcaklığı net üretim tarafından değil yapılan üretim ve reenjeksiyon oranı tarafından kontrol edilmektedir. Senaryo 2'de üretim reenjeksiyon oranı Senaryo 1'e göre %6 daha fazla olduğu için 2005-2010 arası beş yıllık dönemde rezervuar sıcaklığı, Senaryo 2'de Senaryo 1'e göre daha fazla düşmektedir. Göz önünde bulundurulan İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği için Senaryo 1 söz konusu olduğunda 2000 yılına göre (2000 yılı rezervuar sıcaklığı 140°C'dir) 2010 yılı sonunda rezervuar ortalama sıcaklığı 0.4°C, Senaryo 2 söz konusu olduğunda ise 0.55°C düşüm göstereceği tahmin edilmektedir.



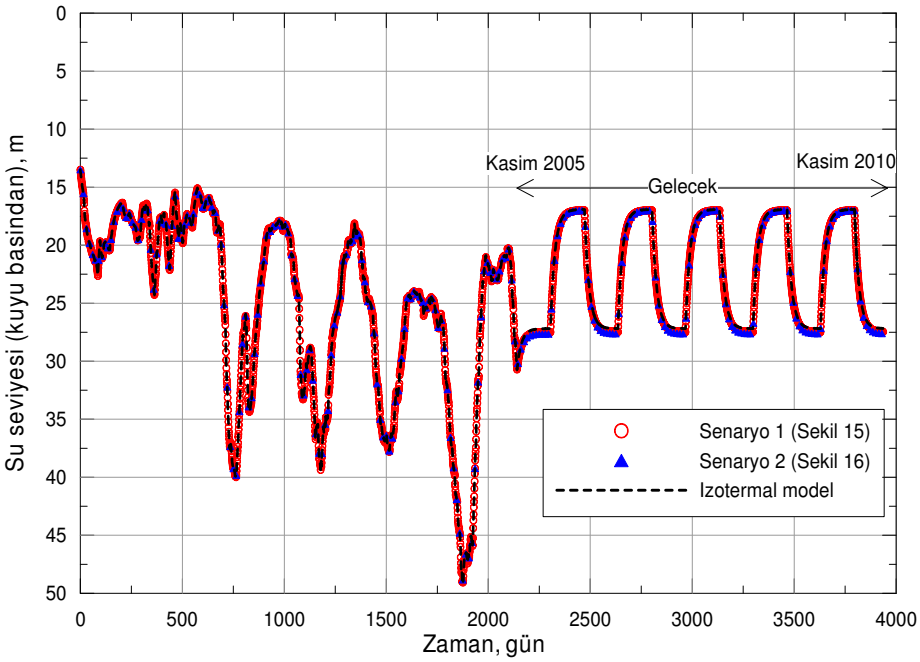
Şekil 15. Üretim/reenjeksiyon Senaryo 1; İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.



Şekil 16. Üretim/reenjeksiyon Senaryo 2; İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.

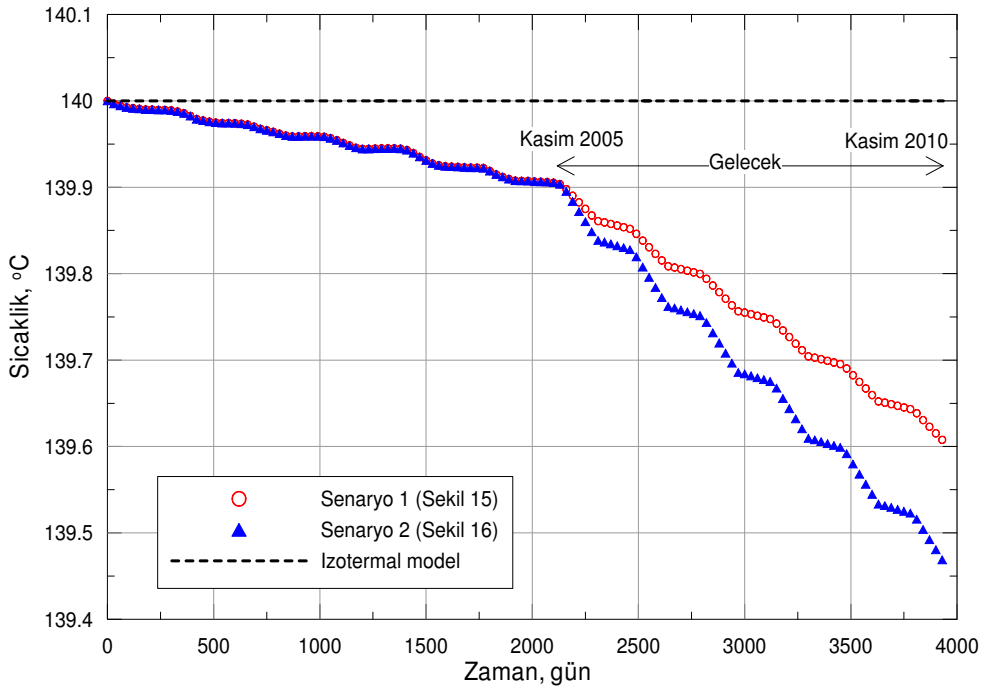


a) Basınç



b) Su seviyesi

Şekil 17. Rezervuar ortalama basıncı (a) ve su seviyesi (b) için performans tahmini, İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.



Şekil 18. Rezervuar ortalama sıcaklığı için performans tahmini, İzmir Balçova-Narlıdere sahası yapay örneği.

4.4. Tartışma

Bu çalışmadaki temel amaç tek-faz sıvı akışının söz konusu olduğu jeotermal sistemlerde üretim/reenjeksiyon/beslenme etkilerinden dolayı izotermal olmayan akış koşullarında sistemin ortalama basınç ve sıcaklık davranışını tahmin etmede kullanılacak basit bir tek-tank modeli (Şekil 1) geliştirmekti. İzotermal ya da izotermal olmayan tüm lumped-parametre modellerinin tek zayıf noktası, kuyu civarı yerel etkileri ve heterojenliği modellemeye dahil ederek konuma bağlı olarak basınç ve sıcaklığı hesaplamamıza olanak tanımamasıdır. Dolayısıyla, lumped-parametre modellerinden hesaplanan basınç ve sıcaklıklar kuyuların ya da kuyu civarlarını değil, rezervuarın ortalama basınç ve sıcaklık davranışını temsil ederler. Bu anlamda, İzmir Balçova-Narlıdere yapay örneği için önceki bölümlerde sunulan basınç ve sıcaklık davranışları bu sahadaki rezervuar ortalama basınç ve sıcaklığını yansıtan gözlem kuyuları seçilmediği sürece, rezervuarın ortalama basınç ve sıcaklık davranışlarını temsil etmektedirler. Genelde, kuyularda veya üretim kuyularına yakın gözlem kuyularında ölçülen basınç (veya su seviyesi) ve sıcaklıkların rezervuar ortalama basınç ve sıcaklığından daha fazla düşüm göstermesi beklenen bir durumdur.

SONUÇLAR

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

(i) Tek-faz sıvı içeren jeotermal rezervuarların akışkan ve ısı üretimi davranışının değerlendirilmesi ve tahmin edilmesinde kullanılabilecek izotermal olmayan akışı göz önünde bulunduran yeni bir tek-tanklı lumped-parametre ("lumped-parametre") modeli sunulmuştur.

(ii) Literatürde mevcut izotermal akış varsayımı üzerine kurulu lumped-parametre modellerinin tersine, izotermal olmayan yeni lumped-parametre model ile söz konusu sistemlerin sıcaklık davranışı, üretim, reenjeksiyon ve doğal beslenme etkilerine bağlı olarak tahmin edilebilmektedir.

(iii) Söz konusu jeotermal rezervuarın basıncı sadece iki parametre (κ ve α_s) tarafından kontrol edilmektedir. κ grup parametresini oluşturan rezervuar kaba hacmi (V_r), gözeneklilik (ϕ_i) ve kayaç sıkıştırılabilirliği (c_r)'nin bireysel değerlerinin sadece rezervuar basınç (veya su seviyesi) sinyalinin tarihsel çakıştırması ile belirlenmesi mümkün değildir.
(iv) İzotermal akış varsayımlı modeller, söz konusu rezervuarların basınç veya su seviyesi, davranışını tanımlamak için yeterli olup, rezervuarın sıcaklık davranışını tanımlamakta ve sıcaklık verilerindeki rezervuar parametreleri (kaba hacim gibi) hakkında içerdiği bilgiyi kullanmakta yetersizdirler.
(v) Basınç (veya su seviyesi) verilerinin tarihsel çakıştırmada kullanılmasıyla tekil olarak belirlenemeyen ve jeotermal sistemin basınç ve sıcaklık davranışı üzerinde önemli etkilere sahip olan rezervuar kaba hacmi (V_r), gözenekliliği (ϕ_r) ve sıkıştırılabilirliği (c_r) gibi parametrelerin bireysel olarak belirlenmesi basınç ve sıcaklık verilerinin tarihsel çakıştırmada birlikte kullanılmasıyla mümkün olmaktadır. Bu ise, sıcaklık verilerinin önemli bir bilgi kaynağı olduğunu ve kuyu dibi sıcaklık verilerinin ölçülmesinin ve modellemede kullanılmasının önemini ve gerekliliğini göstermektedir.
(vi) Beslenme sıcaklığının 140ºC, rezervuar kaba hacminin 9.42 10^9 m^3 ve gözenekliliğin 0.05 olduğu varsayılırsa, İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal sahasında önümüzdeki 5 yıl içinde kış aylarında 280 kg/s ve yaz aylarında 70 kg/s ile üretim yapılması ve yapılan üretimin %80'inin enjekte edilmesi durumunda (Senaryo 1);
(a) rezervuarın ortalama sıcaklığındaki düşümün (rezervuar ilk sıcaklığı 140ºC'ye göre) yaklaşık 0.4ºC olacağı,
(b) rezervuar ortalama su seviyesinde kış aylarında yaklaşık 11 m düşüm olacağı tahmin edilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu bildiride sunulan çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 105M018 numaralı "Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Rezervuarların Akışkan ve Isı Üretim Davranışının Tank Modelleriyle Modellenmesi" başlıklı proje kapsamında yapılmıştır. Ayrıca, İTÜ BAP tarafından desteklenmektedir. Her iki kurumumuza da böyle bir projeyi desteklediği için teşekkür ederiz.

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] SARAK, 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," 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 257-263, 1989.
[4] ONUR, M., SARAK, H. ve SATMAN, A., "Jeotermal Rezervuarların Modellenmesi ve Performans Tahminlerindeki Belirsizliğin Değerlendirilmesi", TESKON 2005, TMMO Makine Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, 23-26 Kasım 2005.
[5] SCHILTHUIS, R.J., "Active Oil and Reservoir Energy," Trans., AIME 118, 37, 1936.
[6] Steam Tables, Thermodynamic Properties of Water and Steam Viscosity of Water and Steam Thermal Conductivity of Water and Steam, ST Martin's press, New York, 1967.
[7] BURDEN, R.L., FAIRES, J.D., "Numerical Analysis," 4th edition, PWS-KENT Publishing Co., Boston, 1989.

[8] ONUR, M., SARAK, H., ÇINAR, M., TÜREYEN, Ö. İ., SATMAN, A., TÜBİTAK 105M018 numaralı "Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Rezervuarların Akışkan ve Isı Üretim Davranışının Tank Modelleriyle Modellenmesi" başlıklı proje 2. Gelişme raporu, Mayıs 2007.
[9] PRUESS, K., OLDENBURG, C., MORIDIS, G.: *TOUGH2 User's Guide Version 2.0*, Ernest University of California, Lawrance Berkeley National Laboratory, Earth Sciences Division (November 1999)
[10] PetraSim, version 2.4.3, Thunderhead Engineering Consultants, Inc.
[11] AY, E., "Comparison of Lumped Parameter and 1D Linear Distributed Models Used in Reservoir Simulation," Lisans bitirme tezi, İTÜ, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, 2005
[12] AKSOY, N., Kişisel görüşme, 21 Aralık 2005.
[13] TÜREYEN, Ö.İ., SARAK, H., ONUR, M., "Lumped-Parametre Modelleriyle Yapılan Performans Tahminlerindeki Belirsizliğin Değerlendirilmesi; İzmir Balçova-Narlıdere ve Afyon Ömer-Gecek Sahalarına Uygulamalar, TESKON 2007, TMMO Makine Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, 18-21 Ekim 2007.

ÖZGEÇMİŞLER

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. 2006 yazında Schlumberger Şirketinin Pekin'deki Yerbilimleri Araştırma Merkezinde araştırmalar yaptı. İlgi alanları arasında rezervuar ve üretim mühendisliği problemleri, kararsız kuyu basınç testi tasarım, analiz ve modellemeleri, telli formasyon testleri, sayısal petrol, doğal gaz ve jeotermal rezervuar simülasyonu, jeotermal rezervuar mühendisliği, jeoistatistiksel yöntemlerle rezervuar tanımlaması, otomatik olarak statik ve üretim verilerine tarihsel 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.

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.

Murat ÇINAR

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında lisans ve 2006 yılında yüksek lisans derecelerini aldı. Nisan 2007'de YÖK bursuyla Stanford Üniversitesinde doktora çalışmasını yapmak üzere A.B.D'ye gitti. Halen Stanford Üniversitesinde doktora çalışmalarını yapmakta olan Murat Çınar, İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi kadrosundadır. İlgi alanları arasında, kuyu testleri, jeotermal rezervuar mühendisliği ve yerinde yakma kinetiği yer almaktadır.

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. İlgi alanları arasında rezervuar karakterizasyonu ve simülasyonu konuları yer almaktadır. Ömer İnanç Türeyen'in Petrol Mühendisleri Odasına ve Society of Petroleum Engineers kuruluşuna üyelikleri bulunmaktadır.

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 Asistan 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 Enerji Enstitüsü Müdürü ve İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. İlgi alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliği ve üretim ve rezervuarla ilgili konular yer almaktadır.