

SIVI JEOTERMAL SAHALAR İÇİN GENELLEŞTİRİLMİŞ TANK MODELLERİ

Ömer İnanç TÜREYEN
Mustafa ONUR
Hülya SARAK

ÖZET

Bu çalışmada sıvı jeotermal rezervuarların basınç ve sıcaklık davranışlarının tahmini amacıyla genel tank modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model birden fazla tankın basınç ve sıcaklığını modelleyecek kapasitededir. Bu tanklar birden fazla jeotermal rezervuarı ya da rezervuar-akifer sistemlerini temsil etmektedirler. Modelin temeli kütle ve enerji dengesi denklemlerinin (tekrar basma, doğal beslenme ve üretimden oluşabilecek basınç ve sıcaklık davranışlarını modelleyebilmek amacıyla) sistemdeki her tank için bir arada çözülmesine dayanır. Geliştirilen bu model aynı zamanda Levenberg-Marquardt optimizasyon algoritması ile birleştirilerek sahadan gelebilecek basınç ve sıcaklık verilerine tarihsel çakıştırma olanağı vermektedir.

Bu çalışmanın asıl amacı, sahadan elde edilen basınç verilerinin yanında sıcaklık verilerinin tarihsel çakıştırma işleminde kullanılmasının model parametrelerinin tahmininde avantaj sağlayıp sağlayamayacağını belirlemesidir. Sonuçlar tarihsel çakıştırma işleminde basınç verilerinin sıcaklık verileri ile kullanılmasının kaba hacim ve gözeneklilik gibi bazı model parametrelerinin daha iy tahmin edilmesine neden olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Tank modelleri, jeotermal rezervuar.

ABSTRACT

In this study, we develop a non-isothermal lumped-parameter model for predicting both the temperature and pressure behaviors of liquid dominated geothermal reservoirs. The model is capable of modeling both pressure and temperature behaviors of multiple tanks. These tanks can represent multiple geothermal reservoirs or geothermal reservoirs with aquifers. Energy and mass balance equations are coupled to predict both temperature and pressure behaviors of a geothermal system resulting from re-injection of low temperature water into the system, production and natural recharge. The model is also coupled with an optimization routine (based on the Levenberg-Marquardt method) for performing history matching to field pressure and/or temperature measurements, from which model parameters could be inferred.

One of the objectives of this study is to investigate whether using temperature and pressure data together provides benefits in determining various model parameters. Our results show that using temperature measurements in addition to pressure measurements for history matching improves the estimation of certain reservoir parameters such as the bulk volume of the reservoir and porosity. Considering synthetic examples, it is shown that the model developed provides a tool for estimating certain reservoir parameters such as bulk volume, porosity, recharge index, initial reservoir pressure and temperatures from measurements of reservoir temperature and pressure data.

Key Words: Lumped-parameter model, geothermal reservoir.

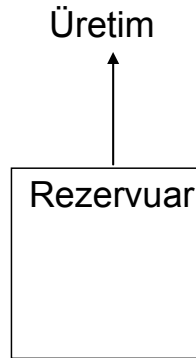
1. GİRİŞ

Literatüre bakılığında jeotermal rezervuarların modellenmesi için genel olarak iki yaklaşım bulunmaktadır: Tank modelleri ve uzaysal değişimleri dikkate alan sayısal modeller. Sayısal modellerde rezervuar hücrelere bölünür ve her bir hücre üstünde kütle dengesi ve enerji dengesi denklemleri çözülerek rezervuarın sıcaklık ve basınç davranışları hesaplanır. Bu denklemler sonlu farklar gibi sayısal yöntemler kullanılarak çözülmektedir. Sayısal modeller heterojenlik, farklı rezervuar geometrileri, farklı kuyu koşulları, çok fazlı, çok komponentli akış ve bunlar gibi birçok karmaşık olayı modelleyebilecek yapıya sahiptir. Fakat sayısal modellerin kullanılması için çok fazla sayıda veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun da ötesinde sayısal modellerdeki hücre sayıları arttıkça bu modellerin çalışma süreleri de önemli derecede artmaktadır. Bu da beklendiği gibi tarihsel çakıştırmaya işlemleri açısından bir dezavantaj oluşturmaktadır.

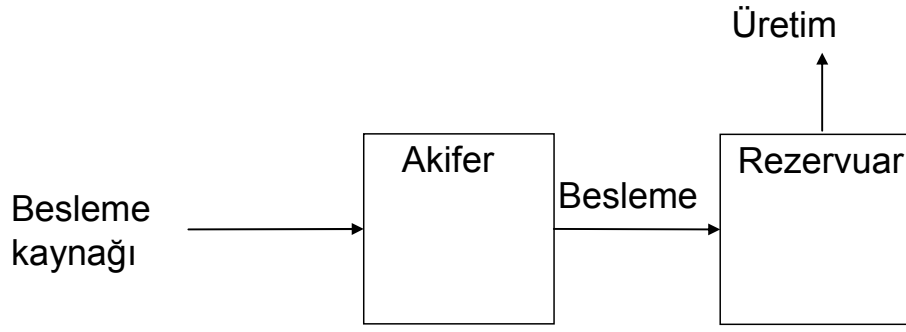
Tank modellerinde ise sayısal modellerin aksine jeotermal rezervuar birkaç parametre ile temsil edilmektedir. Dolayısı ile tank modellerinde çalışma süreleri sayısal modellere kıyasla oldukça düşüktür. Tank modelleri özellikle sayısal model oluşturmaya yetecek verilerin henüz elde edilmediği rezervuarın erken zamanlarında sayısal modellere iyi bir alternatif oluşturmaktadırlar.

Literatürde tank modellerinin uygulamaları izotermal sistemler için mevcuttur [1,2,3,4]. Yakın zamanda ise [5] izotermal olmayan tank modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model tek tanklı bir sistemdir ve rezervuarı kapalı ya da beslemeli olması durumlarını göz önüne alabilmektedir. Bu çalışmada tarihsel çakıştırmaya sıcaklık verilerinin de dahil edilmesiyle rezervuarın kaba hacmi ve gözenekliliğini bulabildiklerini gösterilmektedirler. Bilindiği gibi izotermal modeller kullanılarak basınç verilerine yapılan tarihsel çakıştırmalarda kaba hacim ve gözeneklilik değerleri bireysel olarak bulunamamaktadır.

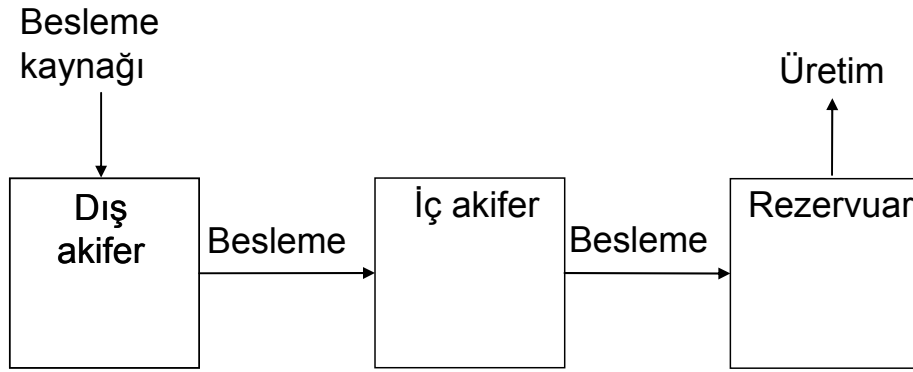
Bu çalışmada jeotermal rezervuarların basınç ve sıcaklık davranışlarının modellenmesi amacıyla geliştirilmiş tank modeli geliştirilmiştir. Bu model birden fazla tank için tasarlanmıştır. Geliştirilen bu modelde tanklar, jeotermal rezervuarları ya da jeotermal rezervuarlarla birlikte akiferleri modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Burada akifer rezervuarın dış kısımlarını, alt kısımlarını ya da rezervuarın bağlantıda olduğu hidrolojik üniteleri temsil etmektedir. Bir başka deyişle rezervuardan uzak fakat rezervuara akışkan desteği veren jeolojik üniteler olarak alınmaktadır. Bu amaçla tanklar farklı yapılandırılmalarda kullanılabilir. Şekil 1-5 tankların hangi yapılandırılmalarda kullanılabileceğine örnekler göstermektedir.



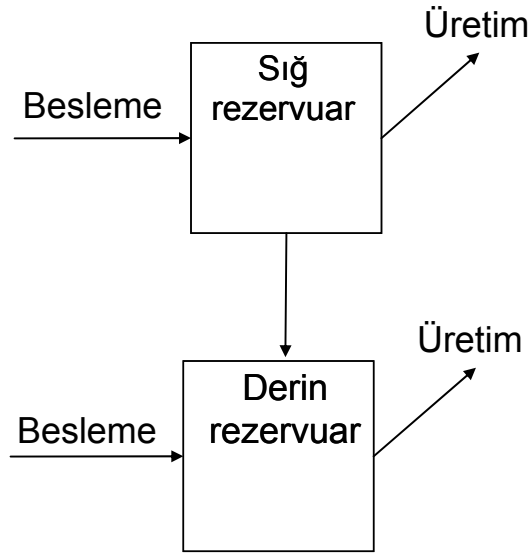
Şekil 1. Rezervuarı Temsilen Tek Tank.



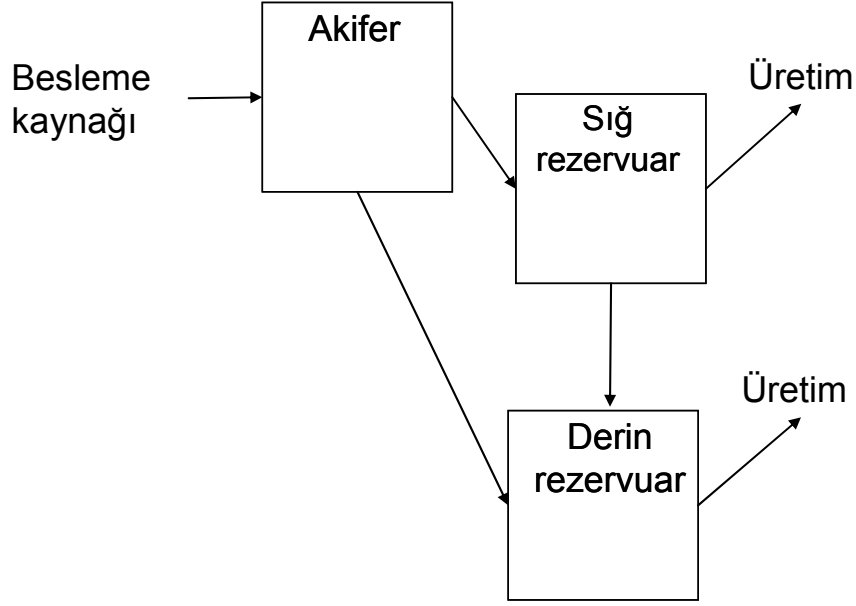
Şekil 2. Birbiri İle Bağlantılı Rezervuar ve Akiferi Temsilen İki Tank.



Şekil 3. Birbiri İle Bağlantılı Rezervuar ve Akiferleri Temsilen Üç Tank.



Şekil 4. Birbiri İle Bağlantılı İki Rezervuarı Temsilen İki Tank.



Şekil 5. Birbiri ile Bağlantılı İki Rezervuar ve Bir Akiferi Temsilen Üç Tank.

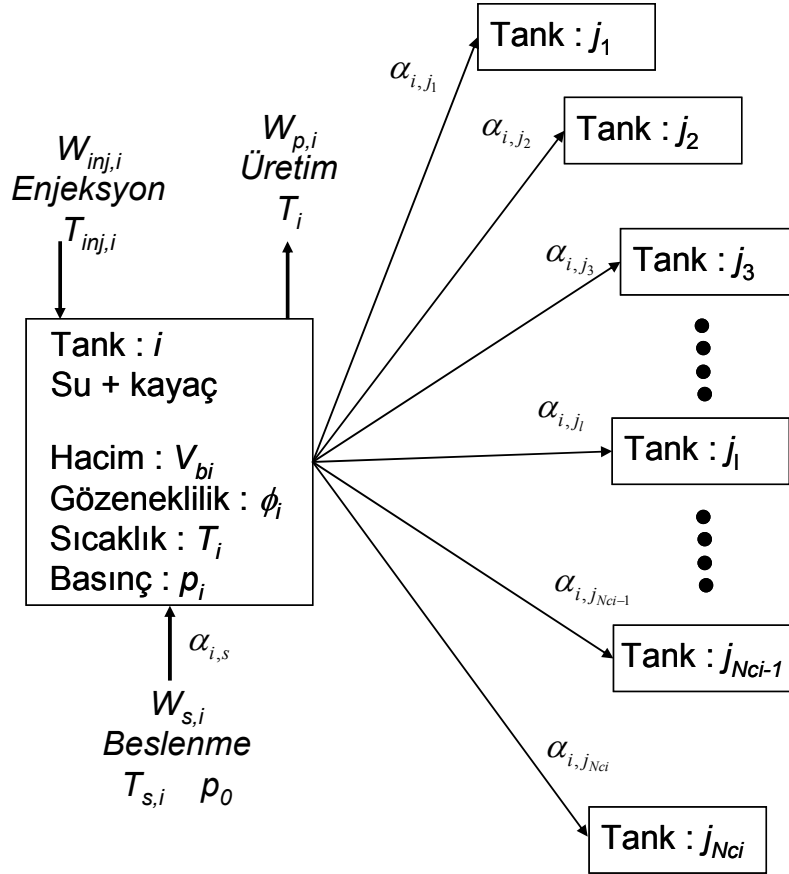
Şekil-1'de izole olmuş kapalı rezervuarı temsil eden tek tank sistem gösterilmektedir. Eğer rezervuar akiferler tarafından besleniyorsa, Şekil 2 ve 3 deki yapılandırmalar kullanılabilir. Birbiri ile bağlantılı rezervuarları modellemek için ise Şekil 4 ve 5' deki gibi yapılandırmalar kullanılabilir.

Grant vd., Axelsson, Sarak vd., Tureyen vd. [1,2,3,4] tarafından göz önünde bulundurulmuş tank modelleri izotermal modellerdir. Bu tür modeller ile sahanın basınç davranışı pratik olarak doğru modellenebilmesine rağmen, sıcaklık davranışları modellenememektedir. Çünkü bu modellerde rezervuar sıcaklığının sabit olduğu kabul edilmektedir. Jeotermal rezervuarlarda özellikle tekrar basma yapıldığında, sıcaklıktaki değişimler önemli boyutlarda olabilmektedir. Hatta, tekrar basmanın yapılmadığı izole bir jeotermal sistemde bile, üretimden dolayı sıcaklık değişimleri mevcuttur [5]. Rezervuarın ortalama sıcaklığını doğal olarak rezervuar hacmi, üretim debisi, tekrar basma debisi, tekrar basma sıcaklığı, beslenme debisi ve beslenme sıcaklığının fonksiyonudur.

Bu çalışmada Onur vd. [5] yapmış olduğu çalışma genişletilerek birden fazla tank için çalışan model tasarlanmıştır. İlk olarak modelin detayları açıklanmaktadır. Daha sonra bu modellerin kullanım alanlarının ve sıcaklık bilgisinin önemi ve avantajlarının vurgulandığı yapay örnekler sunulacaktır.

2. GENELLEŞTİRİLMİŞ İZOTERMAL OLMAYAN TANK MODELİ

Bu çalışmada geliştirilen modelin temeli tek fazlı sıvı sistemler için kütle dengesi ve enerji dengesine dayanmaktadır. Genel olarak sistemin N_t adet tanktan oluştuğu varsayılmaktadır. Daha sonra her bir tank üstünde aynı anda kütle ve enerji dengesi denklemleri çözülmektedir. Şekil 6 tek bir tankın özelliklerini vermektedir.



Şekil 6. Herhangi Bir Tank ve Bu Tankın Genel Özellikleri.

Şekil 6'dan da anlaşılacağı gibi model içindeki her bir tank su ve kayaç kısımlarından oluşmaktadır. Buna ek olarak her bir i tankı V_{bi} hacmi (m^3), ϕ_i gözenekliliği, T_i sıcaklığı ve p_i basıncına sahiptir. Her bir i tankı $i=1,2,..,N_t$, diğer herhangi bir j_i tankı ile bağlantı yapabilmektedir. i tankının yapabildiği toplam bağlantı sayısı N_{ci} ile ve her bir bağlantı yapılan tank ise j_i ($i=1,2,..,N_{ci}$) ile gösterilmektedir. i tankına yapılan tekrar basma $T_{inj,i}$ ($^{\circ}C$) sıcaklığında ve $W_{inj,i}$ (kg/s) debisi ile gerçekleştirilir. i tankından yapılan üretim ise T_i ($^{\circ}C$) sıcaklığında ve $W_{p,i}$ (kg/s) debisi ile gerçekleştirilir. Buna ek olarak i tankı beslenme kaynağına bağlı olabilir. Bu beslenme kaynağının basıncı p_0 (bar) ve sıcaklığının $T_{s,i}$ ($^{\circ}C$) zaman içinde değişmediği varsayılmaktadır. Beslenme kaynağından i tankına olan akışın kütle debisi ise Schilthuis [6] ilişkisi ile verilmektedir.

$$W_s = \alpha_{i,s} (p_i - p_0) \quad (1)$$

Burada $\alpha_{i,s}$ (kg/(bar-s)) birim basınç düşümünde beslenme kaynağından i tankına olan kütle debisini temsil eden beslenme katsayısını vermektedir. Buna benzer olarak i tankına bağlı olan tanklardan i tankına kütle debisi W_{i,j_l} (kg/s) Denklem 2 ile verilmektedir.

$$W_{i,j_l} = \alpha_{i,j_l} (p_{j_l} - p_i) \quad (2)$$

Bu varsayımlar altında, i tankı için kütle dengesi Denklem 3 de verilmektedir.

$$V_{bi} \frac{d(\rho_w \phi_r)_i}{dt} + \alpha_{i,s} (p_0 - p_i(t)) + \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{i,j_l} (p_{j_l}(t) - p_i(t)) + [W_{p,i}(t) - W_{inj,i}(t)] = 0 \quad (3)$$

Denklem 3 $i=1,2,\dots,N_t$ tanklar için uygulanmaktadır. Burada $\rho_{w,i}$ (kg/m^3) i tankı içindeki suyun yoğunluğunu ve t (s) ise zamanı temsil etmektedir. Denklem 3'ün ilk terimi rezervuar içinde kütlenin depolanmasını, ikinci terim beslenme kaynağından i tankına olan kütle debisini, üçüncü terim bağlantılı diğer tanklardan olan kütle debisini ve son terim ise rezervuardan yapılan net kütle üretim debisini temsil etmektedir.

Jeotermal rezervuarlar için ısı aktarımı baskın olarak taşınım yolu ile gerçekleşir. Bir başka değişle, sıcaklıktaki değişim, üretim, tekrar basma ya da doğal beslenmeden kaynaklanan akışkan akışından dolayı olmaktadır. Bu çalışmada ısı iletiminden dolayı olan ısı aktarımı ihmal edilmiştir. Bu varsayımlar altında i tankı için enerji dengesini Denklem 4 vermektedir.

$$\frac{d}{dt} \left[(1-\phi) V_b \rho_m C_m T + V_b \phi \rho_w u_w \right]_i - W_{inj,i}(t) h_{w,inj,i}(T_{inj,i}, t) + W_{p,i}(t) h_{w,i}(T_i, t) - \alpha_{i,s} [p_i(t) - p_0] h_x + \sum_{j=1}^{N_{ei}} \alpha_{i,j_i} (p_{j_i}(t) - p_i(t)) h_y = 0 \quad (4)$$

Denklem 4 $i=1,2,\dots,N_t$ tanklar için uygulanmaktadır. Burada ρ_m (kg/m^3) kayaç yoğunluğunu, C_m ($\text{J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$) kayacın özgül ısı kapasitesini, ρ_w (kg/m^3) suyun yoğunluğunu, $h_{w,inj}$ (J/kg) enjekte edilen suyun özgül entalpisini ve u_w (J/kg) suyun özgül iç enerjisini vermektedir.

$$h_x = \begin{cases} h_{w,i}(T_i, t) & \text{eğer } p_i > p_0 \\ h_{ws,i} & \text{eğer } p_i < p_0 \end{cases} \quad (5)$$

ve

$$h_y = \begin{cases} h_{w,i}(T_i, t) & \text{eğer } p_i > p_{j_i} \\ h_{w,j_i}(T_{j_i}, t) & \text{eğer } p_i < p_{j_i} \end{cases} \quad (6)$$

Burada h_{ws} (J/kg) beslenme suyunun özgül entalpisini ve h_w (J/kg) ise tank içindeki suyun özgül entalpisini vermektedir.

Denklem 4'ün ilk terimi kayaç ve su içinde biriken enerji miktarını, ikinci terim tanka basmadan gelen ısıyı, üçüncü terim üretim ile tanktan uzaklaştırılan ısıyı, dördüncü terim beslenme kaynağından tanka gelen ısıyı ve beşinci terim ise diğer tanklardan gelen ısıyı göstermektedir. Bu modelde ayrıca gözenekliliğin basınç ve sıcaklık ile değişimi de hesaba katılmaktadır.

$$\phi(p, T) = \phi_0 [1 + c_r (p - p_0) - \beta_r (T - T_0)] \quad (7)$$

Burada ϕ_0 ilk koşullardaki tankın gözenekliliğini, c_r ($1/\text{bar}$) kayacın sıkıştırılabilirliğini ve β_r ($1/^\circ\text{C}$) ise kayacın ısıl genleşme katsayısını göstermektedir.

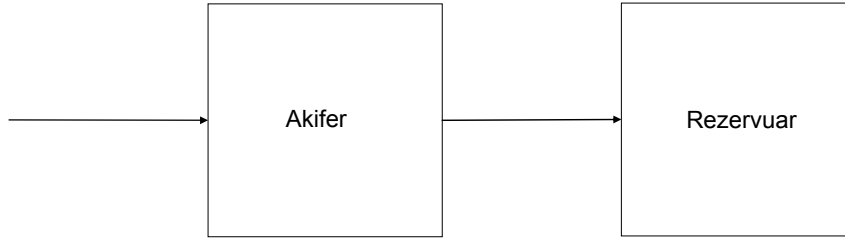
Modelin geliştirilmesinde farklı üretim/basma debileri dikkate alınmıştır. Suyun iç enerjisi ve entalpisi buhar tabloları [7] kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 3 ve 4 doğrusal olmayan denklemlerdir. Dolayısıyla denklemlerin çözümü için Newton-Raphson yöntemi kullanılmaktadır. Denklemlerdeki zamanın kısmi türevi için sonlu farklar yöntemi kullanılmaktadır.

3. YAPAY UYGULAMALAR

Bu bölümde geliştirilmiş tank modeli için bazı yapay uygulamalar verilmektedir. Burada amaç bu modelin hangi problemler için kullanılabileceği ve sıcaklık verilerinin model parametrelerinin tahmininde nasıl kolaylık sağlayacağını araştırılmasıdır.

3.1. Tekrar Basma Problemi

Geliştirilen modelin kullanılabileceği alanlardan birisi de tekrar basma problemidir. Bu bölümde biri akiferi diğeri rezervuarı temsil eden birbirine bağlı iki tanklı sistemin tekrar basma sırasında basınç ve sıcaklık davranışları incelenecektir. Burada amaç, tekrar basma lokasyonunun basınç ve sıcaklık üstündeki etkilerini incelemektir. İki durum karşılaştırılmaktadır; (1. durum) akiferin içine tekrar basma, (2. durum) rezervuarın içine tekrar basma. Akiferi ve rezervuarı temsil eden iki tanklı sistem Şekil 7'de gösterilmektedir.



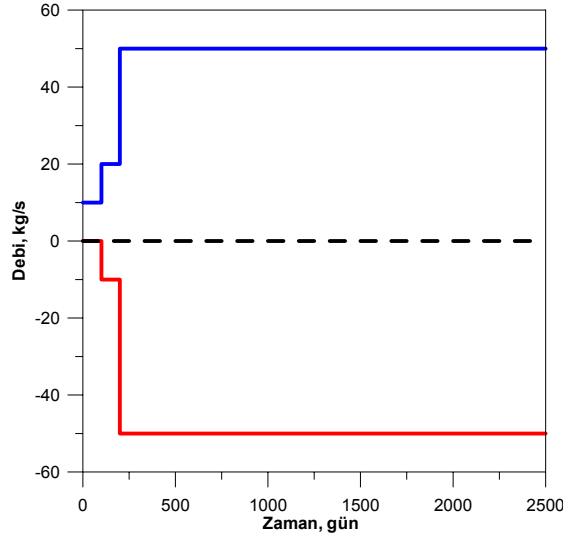
Şekil 7. Rezervuar ve Akiferi Temsil Eden İki Tanklı Sistem.

Akiferin ve rezervuarın bazı özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Tekrar Basma Problemi İçin Rezervuar ve Akifer Özellikleri.

| | |
|---|--------------------|
| α_r , (kg/(bar-s)) | 10 |
| $V_{rezervuar}$, m ³ | 1×10^8 |
| V_{akifer} , m ³ | 1×10^9 |
| P_0 , bar | 50 |
| $T_{0,rezervuar}$, °C | 140 |
| $\phi_{rezervuar}$ | 0.1 |
| ϕ_{akifer} | 0.1 |
| $C_{r,rezervuar}$, 1/bar | 1×10^{-4} |
| $C_{r,akifer}$, 1/bar | 1×10^{-4} |
| $\beta_{r,rezervuar}$, 1/°C | 0 |
| $\beta_{r,akifer}$, 1/°C | 0 |
| $\rho_{m,rezervuar}$, kg/ m ³ | 2600 |
| $\rho_{m,akifer}$, kg/ m ³ | 2600 |
| $C_{m,rezervuar}$, J/(kg°C) | 1000 |
| $C_{m,akifer}$, J/(kg°C) | 1000 |

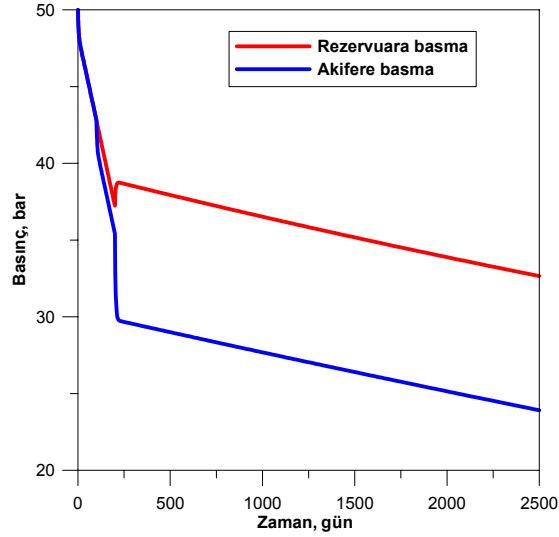
Üretim / basma senaryosu Şekil 8'de verilmektedir. İlk 100 gün boyunca rezervuardan sadece 10 kg/s debi ile üretim yapılmaktadır. Daha sonraki 100 gün boyunca 20 kg/s üretim ve 10 kg/s debi ile basma yapılmaktadır. Son 2300 gün ise 50 kg/s debi ile üretim ve 50 kg/s debi ile basma yapılmaktadır. Enjekte edilen akışkanın sıcaklığının 60°C olduğu akiferin ilk sıcaklığının ise 100°C olduğu varsayılmaktadır. Şekil 8'deki negatif değerler basma yapıldığı anlamına gelmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi iki durum ele alınmaktadır. İlk durumda basma rezervuara yapılmakta, ikinci durumda ise basma akifere yapılmaktadır.



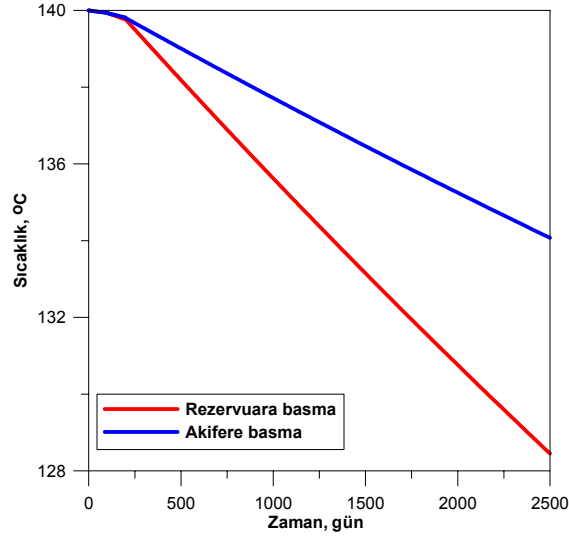
Şekil 8. Üretim / Basma Senaryosu.

Şekil 9 ve 10 her iki durum için sırasıyla rezervuar basıncı ve rezervuar sıcaklıklarını karşılaştırmaktadır. Şekil 9'dan anlaşılacağı gibi, basmanın rezervuara yapılması basıncın daha yüksek değerlerde kalmasını sağlamaktadır. Burada ilginç olan bir nokta ise basma miktarının üretim miktarına eşit olmasına rağmen basıncın azalmasıdır. Burada sıcaklık düşümünün etkisi açıkça görülmektedir. Sistem kapalı olduğu için, soğuyan akışkanın hacmi azalır ve bu nedenle basınç düşer.

Rezervuardaki soğuma etkisi Şekil 10'da açıkça görülmektedir. Görüldüğü gibi basmanın akifere yapılması sıcaklığın korunması açısından daha avantajlı görünmektedir. Çünkü soğuk akışkanın rezervuara basılması rezervuarı daha çabuk soğutmaktadır.

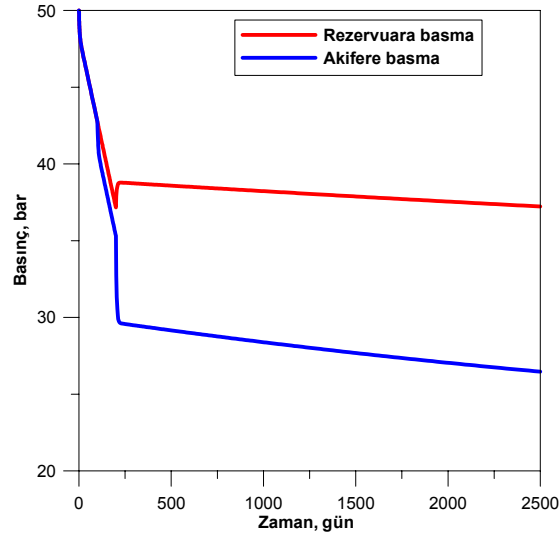


Şekil 9. Tekrar Basma İşleminin Akifere ve Rezervuara Yapılması Durumunda Rezervuar Basıncının Karşılaştırılması.

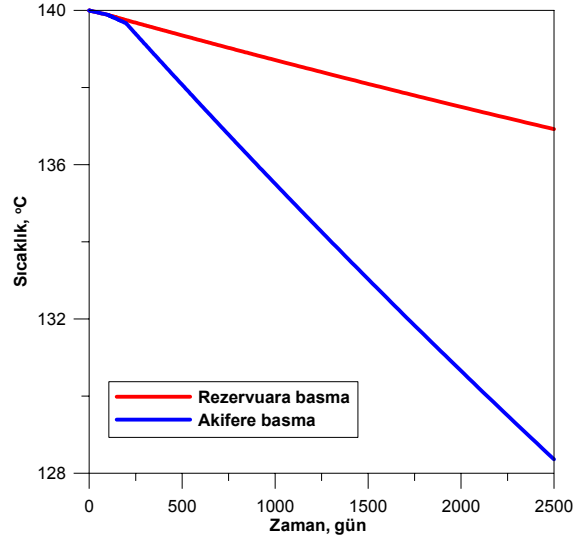


Şekil 10. Tekrar Basma İşleminin Akifere ve Rezervuara Yapılması Durumunda Rezervuar Sıcaklığının Karşılaştırılması.

Bir önceki örnekte tekrar basılan suyun sıcaklığı 60°C ve akifer sıcaklığı da 100°C olarak alınmıştır. Şimdi ise yukarıda verilen basınç ve sıcaklık karşılaştırmalarını akifer sıcaklığının 60°C ve tekrar basılan suyun sıcaklığının 100°C olması durumunda tekrardan incelenecektir. Sonuçlar Şekil 11 ve 12' de verilmektedir.



Şekil 11. Tekrar Basma İşleminin Akifere ve Rezervuara Yapılması Durumunda Rezervuar Basıncının Karşılaştırılması.



Şekil 12. Tekrar Basma İşleminin Akifere ve Rezervuara Yapılması Durumunda Rezervuar Sıcaklığının Karşılaştırılması.

Şekil 11'den anlaşılacağı gibi basıncın yüksek tutulması açısından rezervuara basmak daha avantajlı olmaktadır. Şekil 12'den de anlaşılacağı gibi sıcaklık açısından da aynı sonuca varmak mümkündür. Tekrar basma işlemi rezervuara yapmak sıcaklığın daha yukarıda tutulmasını sağlamaktadır.

Yukarıda verilen örneklerden anlaşılacağı üzere, basıncın yüksek tutulması açısından, tekrar basma işleminin rezervuara yapılması her koşulda avantajlıdır. Sıcaklığın yüksek tutulması istenirse, basma işleminin nereye yapılacağı basılan akışkanın ve akiferin sıcaklıklarına bağlıdır. Eğer basılan suyun sıcaklığı akiferinkinden yüksekse rezervuara basmak, düşük ise akifere basmak daha avantajlıdır.

3.2. Sıcaklık Verilerinin İçeriği

Bu bölümde sıcaklık verilerinin rezervuar hakkında nasıl daha fazla bilgi verdiği yapay örnek üstünde gösterilmektedir. Bunun için kapalı tek tank sistemi ele alınmaktadır. Rezervuar ile ilgili bazı özellikler Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Tekrar Basma Problemi İçin Rezervuar ve Akifer Özellikleri.

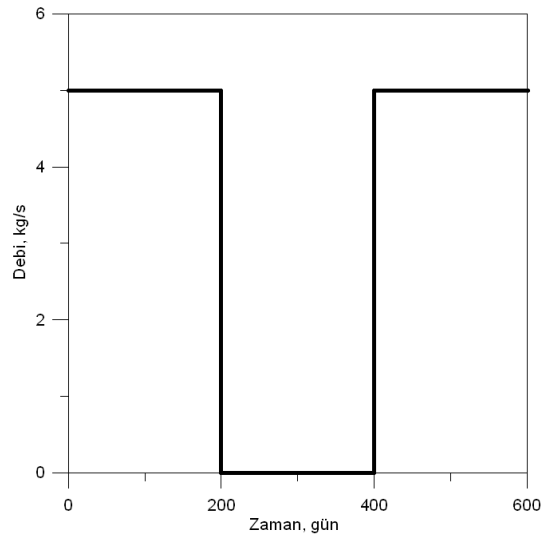
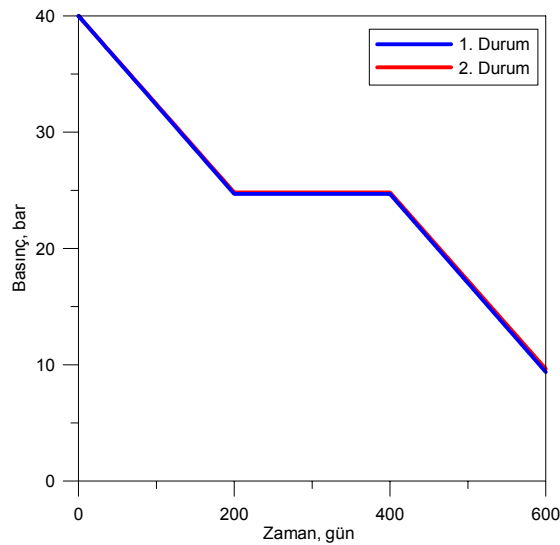
| | |
|---|--------------------|
| α_r , (kg/(bar-s)) | 0 |
| $p_{0,rezervuar}$, bar | 40 |
| $T_{0,rezervuar}$, °C | 100 |
| $C_{r,rezervuar}$, 1/bar | 1×10^{-4} |
| $\beta_{r,rezervuar}$, 1/°C | 0 |
| $\rho_{m,rezervuar}$, kg/ m ³ | 2600 |
| $C_{m,rezervuar}$, J/(kg°C) | 1000 |

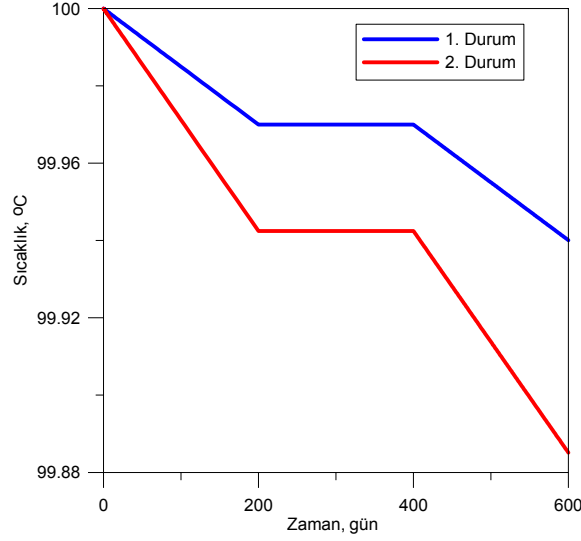
İki durum göz önüne alınmıştır ve Tablo 3'de verilmektedir. Bu iki durumda farklı kaba hacimler ve gözeneklilikler kullanılmıştır. Fakat her iki durum içinde gözenek hacmi (yani kaba hacim ve gözenekliliğin çarpımı) sabit alınmıştır.

Tablo 3. Her İki Durum İçin Rezervuar Kaba Hacmi ve Gözeneklilik.

| | V_b, m^3 | ϕ | $V_b\phi$ |
|---------|-----------------|--------|-----------------|
| Durum 1 | 4×10^8 | 0.1 | 4×10^7 |
| Durum 2 | 2×10^8 | 0.2 | 4×10^7 |

Üretim senaryosu Şekil 13'de verilmektedir. İlk 200 günlük zaman boyunca 5 kg/s debi ile üretim, sonraki 200 gün boyunca kapama ve son 200 günlük dönemde ise tekrar 5 kg/s debi ile üretim gerçekleşmektedir. Şekil 14 her iki durum için rezervuarın basınç davranışını göstermektedir. Görüldüğü gibi her iki durumda da basınç sinyalleri hemen hemen aynıdır. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü; basınç rezervuarın gözenek hacminin ($V_b\phi$) fonksiyonudur. Şekil 15 Rezervuarın sıcaklık davranışını vermektedir. Görüldüğü gibi rezervuar kaba hacmi ve gözenekliliğin farklı değerleri farklı sıcaklık davranışlarına neden olmaktadır. Bu nedenler basınca yapılacak tarihsel karşılaştırma hacim ve gözenekliliği ayrı ayrı bulamazken, sıcaklık verilerine karşılaştırma ise bulabilecektir.

**Şekil 13.** Her İki Durum İçin Ortak Kullanılan Üretim Senaryosu.**Şekil 14.** Her İki Durum İçin Basınç Karşılaştırması.



Şekil 15. Her İki Durum İçin Sıcaklık Karşılaştırması.

3.3. Tarihsel Çakıştırma Yöntemiyle Parametre Tahmini

Bu bölümde Levenberg-Marquardt algoritmasını temel alan ve tarihsel çakıştırma için kullanılan optimizasyon algoritması açıklanmaktadır. Bu algoritma kullanılarak basınç ve sıcaklık verilerinin analizini yapmak mümkün olmaktadır. Böylece model parametrelerinin tahmini yapılabilmektedir. İlk önce kullanılan tarihsel çakıştırma algoritması, daha sonra da yapay örnek sunulacaktır.

3.3.1. Tarihsel Çakıştırma Problemi

Tarihsel çakıştırma işlemi Denklem 8'de verilen ağırlıklı en küçük kareler fonksiyonunun minimizasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Denklem 8 de verilen hedef fonksiyonu farklı tanklardan elde edilen basınç, sıcaklık ya da basınç ve sıcaklığa aynı anda tarihsel çakıştırma yapılacak şekilde tasarlanmıştır.

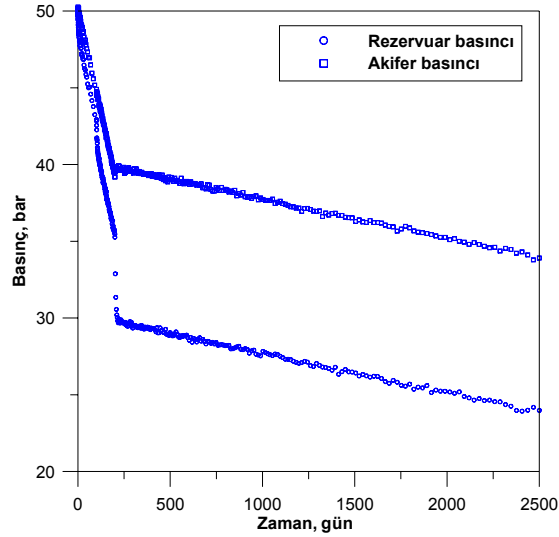
$$O(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ \frac{1}{2} I_p \sum_{l=1}^{N_{pl}} \left[\frac{P_{m,l,i} - P_{c,l,i}}{\sigma_{p,l,i}} \right]^2 + \frac{1}{2} I_T \sum_{k=1}^{N_{Tk}} \left[\frac{T_{m,k,i} - T_{c,k,i}}{\sigma_{T,k,i}} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

Burada I_p ve I_T terimleri indikatör olarak kullanılmaktadır ve sadece "1" yada "0" değerini alabilirler. Bu indikatörler basınca, sıcaklığa yada hem basınç hem sıcaklığa tarihsel çakıştırma yapılmasını sağlamaktadır. P_m ve T_m sahada ölçülen basınç ve sıcaklık verilerini göstermektedir. p_c ve T_c model tarafından hesaplanan basınç ve sıcaklığı göstermektedir. N_p ve N_T tarihsel çakıştırma yapılacak toplam basınç ve sıcaklık veri sayısını göstermektedir. σ_p ve σ_T ise basınç ve sıcaklık verileri üstündeki hataların standart sapmasını göstermektedir. \mathbf{m} ile gösterilen model parametre vektörü kaba hacmi, gözeneklilik, beslenme kaynağı ya da tanklar arası beslenme katsayısını, ilk basıncı, beslenme sıcaklığını, kayaç sıkıştırılabilirliğini, kayaç genleşme katsayısını, kayaç özgül ısını ve kayaç yoğunluğunu ihtiva etmektedir.

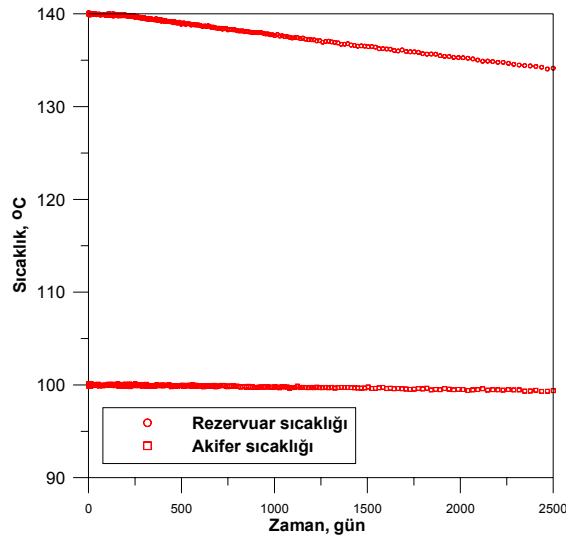
3.3.2. Tekrar Basma Problemi Üstüne Uygulama

Bu bölümde tarihsel çakıştırma algoritması daha önce verilen tekrar basma problemi üstünde uygulanacaktır. Rezervuar ve akifer Şekil 7'de, rezervuar ile ilgili özellikler ise Tablo 1'de verilmektedir. Bu örnek için akifer sıcaklığı 100°C alınırken tekrar basılan akışkanın sıcaklığı ise 60°C alınmaktadır. İlk olarak model seçilen belirli parametreler ile çalıştırılarak hem akiferden hem de rezervuardan elde edilen basınç ve sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Bu veriler sahadan elde edilen veriler gibi

değerlendirilerek bu verilere tarihsel karşılaştırma yapılacaktır. Gerçek saha verilerini daha iyi yansıtabilmesi amacıyla elde edilen sıcaklık ve basınçlara gürültü eklenmektedir. Eklenen gürültünün ortalamaları sıfır olarak alınmaktadır. Sıcaklık için eklenen gürültünün standard sapması $\sigma_T=0.05$ ve basınç için eklenen gürültünün standard sapması ise $\sigma_p=0.1$ olarak alınmaktadır. Bu veriler Şekil 16 ve 17 de verilmektedir.



Şekil 16. Rezervuar ve Akifer için Yaratılan Basınç Sinyali.



Şekil 17. Rezervuar ve Akifer için Yaratılan Sıcaklık Sinyali.

Tarihsel karşılaştırmanın bu probleme uygulanmasıyla rezervuar ve akiferin ilk sıcaklık ve basınçları, hacimleri, gözeneklilikleri ve tanklar arası beslenme katsayısı tahmin edilmeye çalışılacaktır. Bu da toplamda sekiz parametrenin tahmin edilmesi demektir. Probleme üç ayrı adımda yaklaşılmaktadır. İlk önce sadece rezervuarın basınç verilerine tarihsel karşılaştırma yapılmıştır. İkinci adımda rezervuar basıncının yanında rezervuar sıcaklık verileri de tarihsel karşılaştırmada kullanılmıştır. Son olarak hem rezervuar hem de akiferden gelen basınç ve sıcaklık verilerinin tümü tarihsel karşılaştırmada kullanılmıştır. Bu üç adım için Tablo 4-6 tahmin edilmesi gereken parametrelerin gerçek değerlerini, tahmin edilen parametreleri ve %95 güvenilirlik aralıklarını vermektedir. Güvenilirlik aralıkları oldukça önemli bilgiler vermektedir. Güvenilirlik aralıkları herhangi bir parametrenin tarihsel karşılaştırmada

kullanılan basınç ya da sıcaklığa ne kadar duyarlı olduğunun bir ölçütüdür. Eğer güvenilirlik aralığı küçükse bu tahmin edilen model parametresinin sıcaklık ya da basınca oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle, sıcaklık ya da basınç bu parametre hakkında bilgi vermektedir. Bu çalışmada hesaplanan güvenilirlik aralığı tahmin edilen değerden daha küçükse, güvenilirlik aralığının kabul edilebilir olduğu varsayılacaktır.

Tablo 4'den anlaşılacağı gibi sadece rezervuar basıncına tarihsel karşılaştırma yapmak sadece rezervuarın ilk basıncını ve beslenme katsayısının güvenilir bir şekilde bulunmasına neden olur. Diğer tahmin edilen parametrelerin güvenilirlik aralıkları çok yüksektir. Dolayısı ile bu parametreler ile ilgili yapılan tahminler kesin değildir. Tablo 4'den çıkarılacak diğer bir sonuç ise, rezervuarın ilk sıcaklığının ve beslenme katsayısının rezervuar basıncını en çok etkileyen iki parametre olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5 rezervuar basıncı ve rezervuar sıcaklığı verilerine aynı anda tarihsel karşılaştırma yapılması sonucu elde edilen parametreleri göstermektedir. Tablo 5'den görüldüğü gibi bu durumda tüm parametreler hassas bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Tüm tahmin edilen parametrelerin güvenilirlik aralıkları kabul edilebilir düzeydedir. Bu da sıcaklık verilerinin kullanılmasının ne kadar avantajlı olduğunu gösterir. Bunun da ötesinde, eğer hem akifer hem de rezervuarın basınç ve sıcaklık verileri kullanılacak olursa, Tablo 6'da görüldüğü ve beklendiği gibi tahmin edilen parametrelerin güvenilirlik aralıkları daha da azalmaktadır. Yani yeni veriler geldikçe daha doğru tahmin yapılmaktadır. Son olarak Şekil 18 ve 19 akifer ve rezervuar sıcaklık ve basınçları için yapılan tarihsel karşılaştırmaları göstermektedir.

Tablo 4. Sadece Rezervuar Basıncına Tarihsel Karşılaştırma Yapılması Sonucu Tahmin Edilen Parametreler.

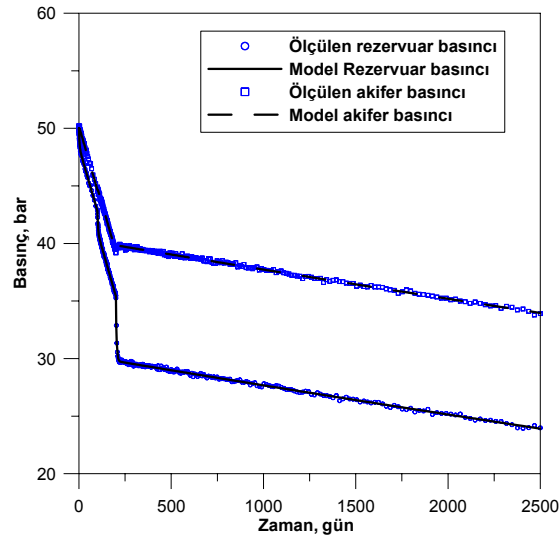
| Model parametresi | Bilinmeyen gerçek değer | Tahmin edilen parametreler |
|---|-------------------------|---|
| p_0 , bar | 50 | 50.006 ± 0.027 |
| $T_{0, rezervuar}$, °C | 140 | 162.71 ± 2724.77 |
| $T_{0, akifer}$, °C | 100 | 103.27 ± 3566.98 |
| α , kg/s | 5 | 5.024 ± 1.397 |
| $\phi_{rezervuar}$ | 0.1 | 0.081 ± 5.754 |
| ϕ_{akifer} | 0.1 | 0.005 ± 3.159 |
| $V_{rezervuar}$, m ³ | 1×10^8 | $1.17 \times 10^8 \pm 7.77 \times 10^9$ |
| V_{akifer} , m ³ | 1×10^9 | $2 \times 10^8 \pm 1.25 \times 10^{11}$ |
| Basınç için ortalama karekök hatası=0.1 bar | | |

Tablo 5. Rezervuar Basıncı ve Sıcaklığına Tarihsel Karşılaştırma Yapılması Sonucu Tahmin Edilen Parametreler.

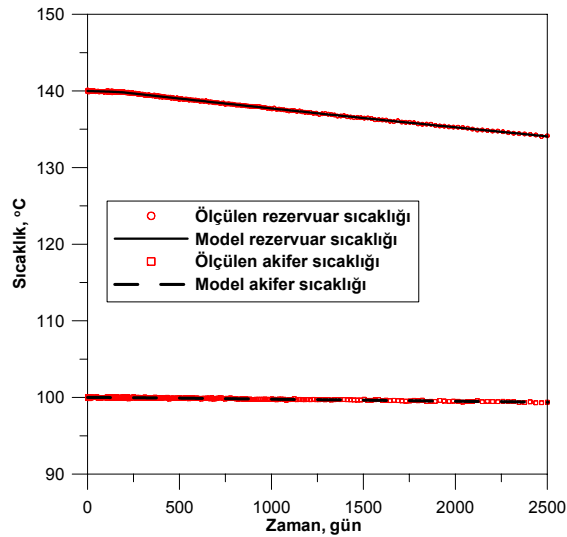
| Model parametresi | Bilinmeyen gerçek değer | Tahmin edilen parametreler |
|--|-------------------------|---|
| p_0 , bar | 50 | 50.006 ± 0.025 |
| $T_{0, rezervuar}$, °C | 140 | 140 ± 0.008 |
| $T_{0, akifer}$, °C | 100 | 101.7 ± 4.45 |
| α , kg/s | 5 | 5.006 ± 0.039 |
| $\phi_{rezervuar}$ | 0.1 | 0.102 ± 0.014 |
| ϕ_{akifer} | 0.1 | 0.098 ± 0.016 |
| $V_{rezervuar}$, m ³ | 1×10^8 | $9.56 \times 10^7 \pm 1.28 \times 10^7$ |
| V_{akifer} , m ³ | 1×10^9 | $1.02 \times 10^9 \pm 1.62 \times 10^8$ |
| Basınç için ortalama karekök hatası=0.1 bar Sıcaklık için ortalama karekök hatası=0.05 °C | | |

Tablo 6. Rezervuar ve Akiferin Basınç Ve Sıcaklığına Tarihsel Çakıştırma Yapılması Sonucu Tahmin Edilen Parametreler.

| Model parametresi | Bilinmeyen gerçek değer | Tahmin edilen parametreler |
|--|-------------------------|---|
| p_0 , bar | 50 | 50.008 ± 0.015 |
| $T_{0, rezervuar}$, °C | 140 | 140 ± 0.006 |
| $T_{0, akifer}$, °C | 100 | 100 ± 0.005 |
| α , kg/s | 5 | 4.99 ± 0.01 |
| $\phi_{rezervuar}$ | 0.1 | 0.099 ± 0.002 |
| ϕ_{akifer} | 0.1 | 0.1 ± 0.003 |
| $V_{rezervuar}$, m ³ | 1×10^8 | $1 \times 10^8 \pm 3.79 \times 10^5$ |
| V_{akifer} , m ³ | 1×10^9 | $9.99 \times 10^8 \pm 2.75 \times 10^7$ |
| Basınç için ortalama karekök hatası=0.1 bar Sıcaklık için ortalama karekök hatası=0.05 °C | | |



Şekil 18. Rezervuar ve Akifer Basınçlarına Yapılan Tarihsel Çakıştırma.



Şekil 19. Rezervuar ve Akifer Sıcaklıklarına Yapılan Tarihsel Çakıştırma.

SONUÇLAR

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sıvı baskın jeotermal rezervuarların modellenmesi amacıyla, genelleştirilmiş izotermal olmayan tank modeli geliştirilmiştir. Model kütle dengesi ve enerji dengesi denklemlerinin sistem içindeki her tank için çözülmesi prensibine dayanmaktadır. Böylelikle rezervuarın hem sıcaklık hem de basınç davranışları tahmin edilebilmektedir.
- Yapılan örnek uygulamalarda tartışıldığı gibi tekrar basma işlemleri rezervuar basıncının daha yüksek tutulabilmesi için rezervuara yapılmalıdır. Sıcaklığın daha yüksek tutulabilmesi için ise tekrar basma işleminin nereye yapılacağı akiferin ve tekrar basılan akışkanın sıcaklıklarına bağlıdır. Eğer tekrar basılan suyun sıcaklığı daha yüksek ise o zaman tekrar basma işlemi rezervuara yapılmalıdır. Ters durumda ise akifere yapılmalıdır.
- Yapılan tarihsel karşılaştırma örnekleri, basınç verilerinin yanında sıcaklık verilerinin de tarihsel karşılaştırmaya katılmasıyla rezervuar parametrelerinin tahmininin hem daha iyi yapılabildiğini hem de daha fazla parametre tahmini yapılabildiğini göstermektedir. Sadece basınç verilerini kullanmak yalnızca ilk basınç ve beslenme katsayısının güvenli bir şekilde tahminini sağlar. Diğer taraftan sıcaklık verilerinin ek olarak kullanılması kaba hacimlerin ve gözenekliliklerinde bulunmasında sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] GRANT, M.A., DONALDSON, I.G. AND BIXLEY, P.F. "Geothermal Reservoir Engineering", Academic Press, New York 369, 1982.
- [2] AXELSSON, G. "Simulation of Pressure Response Data from Geothermal Reservoirs by Lumped Parameter Models", proceedings 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 257-263, 1989.
- [3] SARAK, H., ONUR, M. AND SATMAN, A. "Lumped-Parameter Models for Low Temperature Geothermal Reservoirs and Their application". Geothermics, **34** 728-755, 2005.
- [4] TÜREYEN, O.I., SARAK, H. AND ONUR, M. "Assesing Uncertainty in Future Pressure Changes Predicted by Lumped-Parameter Models: A Field Application" proceedings 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 2007.
- [5] ONUR, M., SARAK, H., TÜREYEN, O.I., CİNAR, M. AND SATMAN, A. "A New Non-Isothermal Lumped-Parameter Model For Low Temperature, Liquid Dominated Geothermal Reservoirs and Its Applications" proceedings 33rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 2008.
- [6] SCHILTHUIS, R. J., "Active Oil and Reservoir Energy", Trans. AIME, 118, 33-52, 1936
- [7] Steam Tables, (1967) Thermodynamic Properties of Water and Steam Viscosity of Water and Steam Thermal Conductivity of Water and Steam, St. Martin's press, New York, 1967.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer İnanç TÜREYEN

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

Hülya SARAK

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1993 yılında lisans ve 1997 yılında yüksek lisans ve 2004 yılında doktora unvanlarını 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 2007 yılında görevine Yrd. Doç. Olarak devam etmektedir. Dr. Sarak'ın Petrol Mühendisleri Odasına üyeliği bulunmaktadır.

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 ziyaretçi profesör olarak görev yaptı. İlgili alanları arasında rezervuar ve üretim mühendisliği problemleri, kararsız kuyu basınç testi tasarımı, analiz ve modellemeleri, telli formasyon testleri, sayısal petrol, doğal gaz ve jeotermal rezervuar simülasyonu, jeotermal rezervuar mühendisliği, jeostatistiksel yöntemlerle rezervuar tanımlaması, otomatik olarak geçmiş, statik ve üretim verilerine çakıştırma ve doğrusal olmayan parametre tahmini yer almaktadır. Halen İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölüm Başkanlığı görevini yürüten Mustafa Onur, Petrol Mühendisleri Odası (Türkiye) ve Society of Petroleum Engineers (A.B.D.) üyesidir.