

KARBONDİOKSİT İÇEREN REZERVUARLARIN YENİ BİR BOYUTSUZ PARAMETRE (TANK) MODELİ İLE MODELLENMESİ

Fatma Bahar HOŞGÖR
Murat ÇINAR
Ömer İnanç TÜREYEN
Abdurrahman SATMAN

ÖZET

Türkiye'deki jeotermal sahaların en belirgin özellikleri rezervuarların başlangıçta sıvının etken olduğu türde olması ve rezervuar akışkanı olan sıcak suyun çözünmüş olarak karbondioksit içermesidir. Çözünmüş karbondioksit oranı az olsa dahi, söz konusu özellik rezervuar basınç davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Karbondioksit, rezervuar akışkanının gazlaşma (iki faza geçme) noktası basıncını artırır. Üretimle basınç düşerken daha yüksek basınçta gazlaşma olduğundan ve iki fazlı akışkanın yüksek sıkıştırılabilirlik özelliğinden dolayı, rezervuar basıncı korunmuş olur. Bu nedenle, bu tür rezervuarlar modellenirken, karbondioksit etkisinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, karbondioksit etkisini içeren yeni bir boyutsuz parametre (tank) modeli tanıtılmaktadır. Model geliştirilirken su ve karbondioksit için kütle dengesi ve tüm sistemi içeren enerji dengesi denklemleri kullanılmıştır. Bu şekilde, ortalama rezervuar basıncı ve sıcaklığı ile beraber karbondioksit miktarı da takip edilebilmektedir. Karbondioksitin rezervuar davranışı üzerinde etkisini göstermek amacıyla yapay saha verileri kullanılarak oluşturulan bir örnek verilmiştir. Sunulan model, karbondioksit içeren sıcak su sistemlerinin davranışını daha iyi anlamak ve geleceğe yönelik üretim performanslarının tahmin etmek amacıyla kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Karbondioksit içeren jeotermal sistemler, rezervuar modellemesi, boyutsuz parametre (tank) modeli

ABSTRACT

Two of the common characteristics of Turkey's geothermal fields are that they are initially all liquid dominated and almost all contain some amounts of carbon dioxide. However, such small quantities of carbon dioxide have profound effects on the reservoir pressure behavior. Carbon dioxide has the tendency to shift the flashing point of the reservoir fluid to a considerably higher value. This causes a gas phase to form in the reservoir. Due to the gas phase formed during production, reservoir pressure can be maintained better. When modeling such a reservoir, it is crucial that the effects of carbon dioxide be included in the model. In this study we present a new lumped parameter (tank) model capable of considering the effects of carbon dioxide. The model is based on three conservation equations; mass balances on water and carbon dioxide and an overall energy balance. By doing so, we are able to keep track of average reservoir pressure, average reservoir temperature and the amount of carbon dioxide. A Synthetic field example is given to illustrate the affects of CO₂ on reservoir behavior. It can be utilized to better understand the behavior of hot water systems that contain carbon dioxide and to forecast future performance.

Key Words: Geothermal systems containing carbondioxide, reservoir modelling, lumped parameter (tank) model

1. GİRİŞ

Birçok jeotermal rezervuar karbondioksit içermektedir. Sıvının etken olduğu jeotermal rezervuarlarda su içerisinde çözülmüş karbondioksit miktarı kütlece %5'e kadar çıkabilmektedir. Örneğin Türkiye'nin önemli jeotermal sahalarından biri olan Kızıldere sahasında çözülmüş karbondioksit miktarı ortalama %1.5'tir [1]. Jeotermal rezervuarlar modellenirken (sayısal modelleme veya lumped parametre modellemesi ile) karbondioksit etkisinin modele dahil edilmesi gerekmektedir. Karbondioksit jeotermal sahada üretim başladığı zaman akışın termodinamik özelliklerini kontrol eder. Su-karbondioksit karışımının ayrışma (iki faza geçme) noktası basıncı karışımdaki karbondioksit oranına bağlı olarak değişir. Karbondioksit içeren jeotermal sistemler saf su sistemlerine nazaran daha yüksek ayrışma noktası basıncına sahiptir ve karbondioksit miktarı arttıkça ayrışma noktası basıncı da artar.

Literatürde jeotermal sistemlerin modellenmesinde karbondioksitin etkisi birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Zvoloski ve O'Sullivan [12], jeotermal rezervuarların sayısal simülasyonunda korunum denklemlerinin kullanılmasını detaylı olarak incelemişlerdir. Özet olarak, çalışmalarında üç adet korunum denklemi kullanmışlardır. Bunlar, su için kütle korunumu denklemi, tüm sistem için enerji korunumu denklemi ve karbondioksit için kütle korunumu denklemleridir. Bu çalışmada temel değişkenler basınç, entalpi ve sıcaklık olarak belirlenmiştir.

Atkinson vd. [2], buhar fazın etken olduğu rezervuarlar için boyutsuz parametre modeli geliştirerek önemli miktarda karbondioksit içeren Bagnore jeotermal rezervuarını modellemişlerdir. Bagnore sahası başlangıç koşullarında iki faz içerdiğinden dolayı araştırmacılar bu sahaya iki tanktan oluşan bir model uyarlamışlardır. Bu tanklardan biri sıvı bölgesini diğeri de buhar bölgesini modellemek amacıyla kullanılmaktadır ve bu iki tank arasında kütle transferi gerçekleşebilmektedir.

O'Sullivan vd. [6], jeotermal rezervuarların, akışkanın sıkılaştırılmış sıvı, iki faz veya tek faz gaz olması durumuna göre sayısal simülasyonu yapılırken temel değişkenlerin nasıl ayarlanması gerektiği ile ilgili ayrıntılı bilgi vermişlerdir. Ortaya koydukları yaklaşım günümüzde de birçok sayısal modelde kullanılmaktadır.

Alkan ve Satman [1], Whiting ve Ramey [11] tarafından saf su sistemi için geliştirilmiş olan boyutsuz parametre modelini su-karbondioksit sisteminin davranışını veren bir termodinamik paket ekleyerek geliştirmişlerdir.

Hoşgör vd. [4] karbondioksitin etkilerini de içeren bir tank model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada Hoşgör vd.'nin [4] elde ettiği ilk sonuçlar verilmektedir.

2. SU-CO₂ SİSTEMLERİ

Bu bölümde, kısaca su-karbondioksit sistemlerinin davranışları tanımlanacaktır. İlk kısımda, bu çalışmada kullanılan su-CO₂ sisteminin davranışını modelleyen termodinamik pakette bulunan önemli denklemler verilecek, bir sonraki kısımda karbondioksitin su-CO₂ karışımları üzerindeki etkisi açıklanacaktır.

2.1. Termodinamik Paket

Bu bölümde anlatılacak termodinamik paket literatürde daha önce yer alan korelasyon ve bağıntıları içermektedir. CO₂'in kısmi basıncı ile CO₂'in su içerisindeki kütle oranı arasındaki ilişki Henry Yasası ile verilir.

$$f_{CL} = p_{CO_2} H(T) \quad (1)$$

Burada, p_{CO_2} CO₂' in kısmi basıncı (Pa), f_{CL} sıvı su içerisindeki CO₂ 'in kütle oranı, $H(T)$ Henry sabiti (Pa⁻¹) ve T sıcaklıktır (K). Denklem 1'den görüldüğü üzere Henry sabiti sıcaklığın fonksiyonudur ve Sutton (1976) tarafından geliştirilmiş olan aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$H(T) = \left[5.4 - 3.5 \left(\frac{T - 273.15}{100} \right) + 1.2 \left(\frac{T - 273.15}{100} \right)^2 \right] 10^{-9} \quad (2)$$

Kolaylık olması açısından sıvı fazdaki su-karbondioksit karışımının yoğunluk ve akmazlıkları sıvı suyun yoğunluk ve akmazlık değerlerine eşit alınacaktır. Sıvı fazdaki su-karbondioksit karışımının entalpi hesabı O'Sullivan vd. [6] tarafından ortaya konan denklem ile hesaplanacaktır.

$$h_L = h_w(1 - f_{CL}) + (h_{CO_2} + h_{sol})f_{CL} \quad (3)$$

Burada, h_L sıvı fazın entalpisi (J/kg), h_w sıvı fazdaki suyun entalpisi (J/kg), h_{CO_2} gaz fazdaki CO₂'in entalpisi (J/kg) ve h_{sol} ise solüsyonun entalpisidir. h_{CO_2} Sutton [7] tarafından geliştirilen denklem ile hesaplanır.

$$h_{CO_2} = -2.18 \times 10^5 + 732T + 0.252T^2 - 2.63 \times 10^{-5}T^3 \quad (4)$$

Solüsyonun entalpisi de Ellis ve Golding [3] tarafından geliştirilmiş aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$h_{sol} = \left[-1.351 + 0.01692(T - 273.15) - 7.5524 \times 10^{-5}(T - 273.15)^2 + 1.318 \times 10^{-7}(T - 273.15)^3 \right] \times 10^6 \quad (5)$$

Gaz fazın basıncı, denklem 6'da görüldüğü üzere buharın kısmi basıncıyla CO₂'in kısmi basınçlarının toplamına eşittir.

$$p = p_s + p_{CO_2} \quad (6)$$

Burada, p gazın basıncı (Pa) ve p_s buharın kısmi basıncıdır (Pa). p_s , değerleri IAPWS'e [5] göre hesaplanırken gaz fazın yoğunluğu denklem 7 kullanılarak bulunur.

$$\rho_G = \rho_s + \rho_{CO_2} \quad (7)$$

Burada, ρ_G gaz fazın yoğunluğu (kg/m³), ρ_s buharın yoğunluğu (kg/m³) ve ρ_{CO_2} (kg/m³) gaz fazdaki CO₂'in yoğunluğudur. Gaz fazın akmazlık değeri denklem 8 ile hesaplanır.

$$\mu_G = \mu_s(1 - f_{CG}) + \mu_{CO_2}f_{CG} \quad (8)$$

Burada, μ_G gaz fazın akmazlığı (Pa.s), μ_s buharın akmazlığı (Pa.s), μ_{CO_2} gaz fazdaki CO₂'in akmazlığı ve f_{CG} gaz fazdaki CO₂'in oranıdır. Gaz fazın entalpi değeri denklem 9 kullanılarak hesaplanır:

$$h_G = h_s(1 - f_{CG}) + h_{CO_2}f_{CG} \quad (9)$$

Burada, h_G gaz fazın entalpisi (J/kg), h_s buharın entalpisi (J/kg) ve gaz fazdaki CO₂'in entalpisidir. Son olarak, herhangi bir sıcaklık ve basınçta gaz fazındaki CO₂'in kütle oranı denklem 10 ile hesaplanır:

$$f_{CG} = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_G} \quad (10)$$

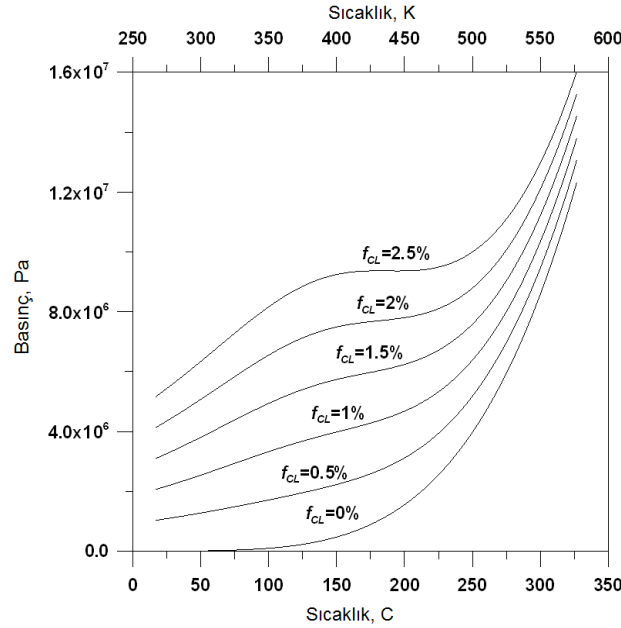
Denklem 6,7,8,9 ve 10 O'Sullivan vd.'den [6] alınmıştır.

2.2. CO₂'in Suyun Özelliklerine Etkisi

Bu alt bölümde, çözülmüş CO₂'in suyun faz davranışı üzerindeki etkisi açıklanacaktır. Su-karbondiyoksit karışımının farklı sıcaklıklardaki gazlaşma noktası basıncı denklem 6 kullanılarak, buharın kısmi basıncı IAPWS [5] kullanılarak ve CO₂'nin kısmi basıncı denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerlere göre oluşturulan Şekil 1, su içerisinde kütleli olarak farklı oranlarda çözülmüş olarak bulunan CO₂'in basınç ve sıcaklıkla değişimini göstermektedir.

CO₂'in su-karbondiyoksit karışımı üzerindeki en büyük etkisi ayrışma noktası basıncında yarattığı değişimdir. Örneğin, yaklaşık 200°C'de saf su 1.5×10^6 Pa basınçta kaynamaya başlarken eğer su fazında %0.5 oranında çözülmüş CO₂ bulunursa bu karışım yaklaşık 3.1×10^6 Pa basınçta kaynamaya başlar. Kütlece çözülmüş CO₂ oranı %2.5'e çıkartıldığında ise karışım yaklaşık olarak 8.9×10^6 Pa basınçta gazlaşmaya başlamaktadır. Bu örnekten de görüldüğü gibi suda çözülmüş CO₂ miktarı çok küçük de olsa suyun gazlaşma noktası basıncında büyük değişimlere sebep olmaktadır. Eğer bu etki üretim sırasında dikkate alınmaz ise, kuyu içerisinde oluşacak ayrışma noktası derinliğinde hatalara sebep olur ve daha derinde ortaya çıkması gereken ayrışma noktasının derinliği daha kısa olarak hesaplanır.

Ayrışma noktası basıncının altındaki basınçlarda gaz fazının ortaya çıkması üretim ile birlikte oluşan basınç düşüm hızını yavaşlatır. Gazların sıvılara göre daha çok sıkıştırılabilir olması gazların sıvılardan daha fazla genişleyerek, oluşacak basınç düşümünün daha yavaş gerçekleşmesine olanak sağlar.

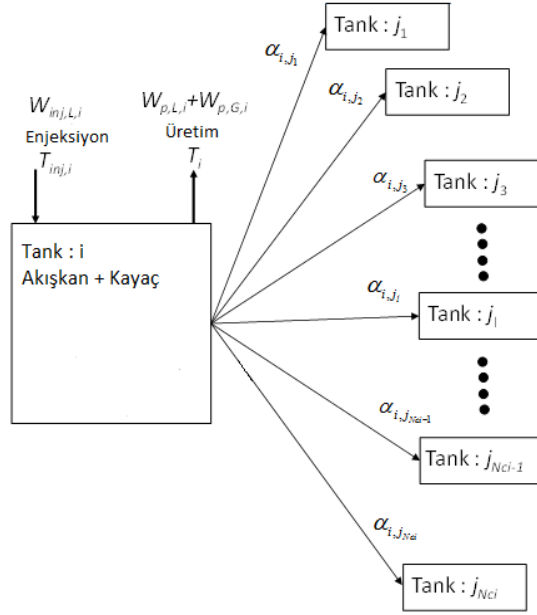


Şekil 1. CO₂ oranındaki değişimin su-karbondiyoksit karışımının basınç-sıcaklık davranışına etkisi.

3. MODELİN TANITIMI

Oluşturulan modelde, jeotermal sistemin her bir bileşeni kayaç ve akışkandan oluşan bir tank olarak tanımlanmıştır. Tanklar, bir rezervuarı, akiferi, ısı kaynağını veya doğal boşaltım gerçekleştirebilecek atmosfere açık bir bloğu temsil etmektedir. Bazı durumlarda, rezervuar veya akiferi temsil etmek için birden fazla tank kullanılabilir. Burada, herhangi bir tankın başka bir tank ile keyfi sayıda bağlantı

yaptığı düşünülmüştür. Bu genelleştirilmiş yaklaşım daha önce Türeyen ve Akyapı [9] tarafından kullanılmıştır. Şekil 2’de tank i’nin komşu tanklar ile yaptığı bağlantılar gösterilmektedir.



Şekil 2. Modeli oluşturan temsili tanklar.

Modelin tamamının N_i adet tanktan oluştuğu ve sistemdeki tank i'nin diğer tanklar ile N_{ci} sayıda bağlantısı olduğu varsayılmıştır. Burada, N_{ci} sayısı sistemdeki her bir tank farklı sayıda bağlantı yapabileceği için tanka göre değişebilir. Tanktan üretilen sıvının sıcaklığı T_i 'dir ve eğer tanka sıvı fazda su enjekte edilmek istenirse sıcaklığı T_{inj} olacaktır. Üretim gaz ve sıvının kütlelerinin toplamı olan toplam kütle üretimi ile belirtilir ve her bir fazın üretim kütlesi o fazın mobilitesine göre hesaplanır.

Tank j_j ve tank i arasındaki sıvı kütlesinin akış hızı Schithuis'un [8] yaklaşımına benzer bir şekilde denklem 11 ile bulunabilir.

$$W_{L,i,j_i} = \alpha_{L,i,j_i} (p_{j_i} - p_i) \quad (11)$$

Burada, W_{L,i,j_i} tank i ve tank j_i arasında taşınan sıvı fazın kütle olarak akış hızı (kg/s), p_{j_i} tank j_i 'nin basıncı (Pa), p_i tank i 'nin basıncı (Pa) ve α_{L,i,j_i} besleme indeksidir (kg/(bar.s)). Gazın kütle akış hızı denklem 11'de sıvı yerine gaz için olan besleme indeksi girilerek hesaplanır. Bu noktada besleme indeksinin kayaç (basınç ve sıcaklığa bağlı olmayan) ve akışkan (basınç ve sıcaklığın kuvvetli fonksiyonu olan) olmak üzere iki kısımdan oluştuğu belirtilmelidir. Besleme indeksi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\alpha_{L,i,j_i} = \psi_{i,j_i} \lambda_L \quad (12)$$

Burada, ψ_{i,j_i} kayaç kısmın besleme indeksi (m^3) ve λ_L akışkan kısmın besleme indeksidir ($kg/(Pa.s.m^3)$). Akışkan kısım için denklem 13 kullanılır.

$$\lambda_L = \frac{k_{r,L} \rho_L}{\mu_L} \quad (13)$$

Burada, $k_{r,L}$ sıvının görel geçirgenliğidir. Kayaç kısım için denklem 14 kullanılır:

$$\psi_{i,j_i} \propto \frac{kA}{d} \quad (14)$$

Burada k tankı oluşturan ortamın geçirgenliği (m^2), A tanklar arası transfer olan akışkanın geçtiği yüzey alanı (m^2) ve d karakteristik uzunluk yani bir tanktan diğer tanka transfer olurken akışkanın kat ettiği yolun uzunluğudur (m). Girdi parametresi veya tarihsel çakıştırma sırasında ayarlanabilecek bir parametre olan ψ_{i,j_i} 'nin içinde yer aldıklarından k , A ve d 'nin değerlerinin bilinmesi gerekli değildir.

Diğer taraftan, besleme indeksinin akışkan kısmı verilen basınç, sıcaklık ve doymuşluk değerlerine göre hesaplanır. Tank i için kütle dengesi denklem 15'deki gibi yazılabilir:

$$V_i \frac{d}{dt} (\rho_L S_L \phi + \rho_G S_G \phi)_i - \sum_{l=1}^{N_{ei}} \alpha_{L,i,j_i} (p_{j_i} - p_i) - \sum_{l=1}^{N_{ei}} \alpha_{G,i,j_i} (p_{j_i} - p_i) + W_{p,L,i} + W_{p,G,i} + W_{inj,L,i} = 0 \quad (15)$$

Burada, S doymuşluk (kesir) ve ϕ gözenekliliktir (kesir). Denklemde ilk terim tank içerisindeki birikimi, ikinci terim ve üçüncü terimler sırasıyla diğer tanklardan gelecek sıvı ve gaz kütlesi katkılarını temsil eder. İletimden dolayı tank j_i ve tank i arasında oluşan enerji akışı denklem 16 ile verilmiştir.

$$Q = \gamma_{i,j_i} (T_{j_i} - T_i) \quad (16)$$

Burada, Q enerji hızı (J/s) ve γ_{i,j_i} iletim indeksidir (J/(K.s)). Tank i ile gaz, sıvı ve kayaç arasında bölgesel olarak ısı dengenin var olduğu varsayılarak enerji dengesi denklemi şu şekilde verilir:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} [(1-\phi)V\rho_m C_m T + V\phi(\rho_L u_L S_L + \rho_G u_G S_G)] + W_{p,L,i} h_{L,i} + W_{p,G,i} h_{G,i} + W_{inj,L,i} h_{L,inj,i} \\ & - \sum_{l=1}^{N_{ei}} \alpha_{L,i,j_i} (p_{j_i} - p_i) h_{L,\xi} - \sum_{l=1}^{N_{ei}} \alpha_{G,i,j_i} (p_{j_i} - p_i) h_{G,\xi} - \sum_{l=1}^{N_{ei}} \gamma_{i,j_i} (T_{j_i} - T_i) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Burada, ρ_m kayacın yoğunluğunu (kg/m^3), C_m kayacın spesifik ısı kapasitesini (J/(kg.K)), u iç enerjiyi (J/kg) ve h entalpiyi (J/kg) simgeler. Diğer tanklardan gelen enerji katkısı göz önüne alındığında denklem 18'deki durumlar kullanılır.

$$h_{\xi} = \begin{cases} h_i & \text{if } p_i > p_{j_i} \\ h_{j_i} & \text{if } p_i < p_{j_i} \end{cases} \quad (18)$$

Son olarak CO_2 için kütle dengesi denklem 19 ile verilir.

$$\begin{aligned} & V_i \frac{d}{dt} (\rho_L S_L \phi f_{CL} + \rho_G S_G \phi f_{CG})_i - \sum_{l=1}^{N_{ei}} \alpha_{L,i,j_i} (p_{j_i} - p_i) f_{CL,\xi} - \sum_{l=1}^{N_{ei}} \alpha_{G,i,j_i} (p_{j_i} - p_i) f_{CG,\xi} + W_{p,L,i} f_{CL,i} \\ & + W_{p,G,i} f_{CG,i} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Burada, f CO_2 'in sıvı veya gaz fazdaki kütle oranıdır ve denklem 18'dekine benzer bir yaklaşım uygulanır.

$$f_{\xi} = \begin{cases} f_i & \text{if } p_i > p_{j_i} \\ f_{j_i} & \text{if } p_i < p_{j_i} \end{cases} \quad (20)$$

Denklem 15, 17 ve 19 lineer olmayan denklemlerdir ve Newton-Raphson tekniği ile çözülebilirler. Temel değişkenlerin seçiminde O'Sullivan vd. [6] ortaya koyduğu yaklaşımdan faydalanılır. Tank tek faz akışkan içeriyorsa temel değişkenler basınç, sıcaklık ve CO_2 'in kısmi basıncıdır. Eğer tank gaz ve sıvı fazı aynı anda içeriyorsa CO_2 'in kısmi basıncı yerine gazın doymuşluğu temel değişken olarak seçilir.

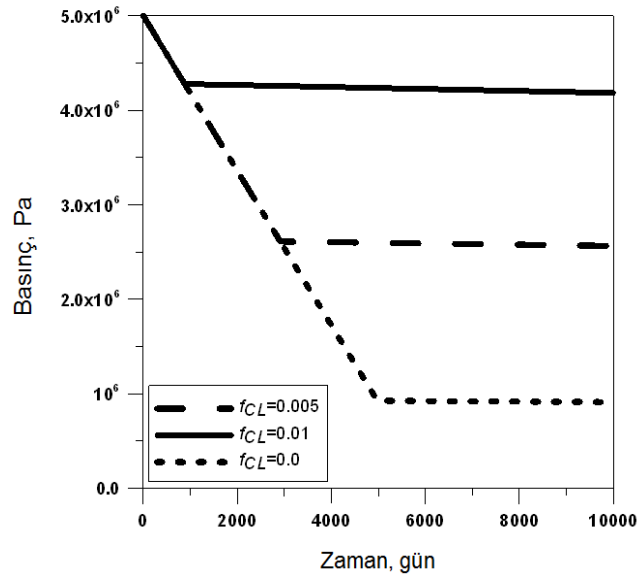
4. ÖRNEK

Bu bölümde, CO₂'in jeotermal rezervuar performansına etkisini gösterebilmek için sentetik veriler kullanılarak bir örnek model hazırlanmıştır. Oluşturulan modelin özellikleri tablo 1'de verilmiştir. Rezervuar 10000 gün boyunca 2 kg/s ile üretim yapmıştır. Böyle bir sistemin basınç davranışı CO₂'in kütleli olarak üç farklı oranı (%0, %0.5, %1) için hesaplanmış ve Şekil 3'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Rezervuarın özellikleri.

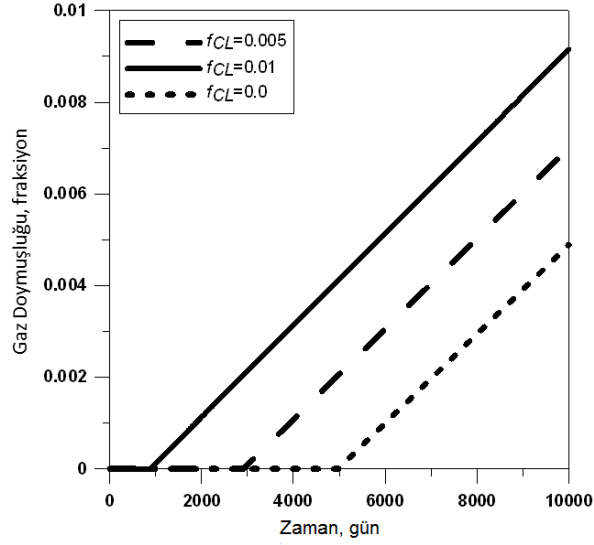
Kaba Hacim, m ³	1×10 ⁹
Gözeneklilik, oran	0.2
Başlangıç basıncı, Pa	50×10 ⁵
Başlangıç Sıcaklığı, K	450
Kayaç sıkıştırılabilirliği, Pa ⁻¹	5×10 ⁻¹⁰
Kayacın termal genişleme sabiti, K ⁻¹	0
Kayacın yoğunluğu, kg/m ³	2600
Kayacın ısı kapasitesi, J/(kg.K)	1000

Suyun içerisinde CO₂ yok ise üretim 5000 güne kadar sıkıştırılmış sıvı halinde olur ve 5000 günden sonra buhar ve su fazı rezervuarda bir arada bulunmaya başlar. Rezervuar akışkanı iki faza geçtiği zaman, sıvı içerisinde bulunan gazın sıvıya göre daha yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip olmasından dolayı, basınç düşüm hızı yavaşlar. Suda %0.5 oranında çözünmüş CO₂ varken iki faza geçiş daha hızlı sağlanır (yaklaşık 2500 günde). Geriye kalan 7500 gün boyunca gazın yüksek sıkıştırılabilirliğinden dolayı basınç oldukça sabit seyir eder. CO₂ miktarı arttıkça basınç korunumu daha erken zamanlarda gerçekleşir.



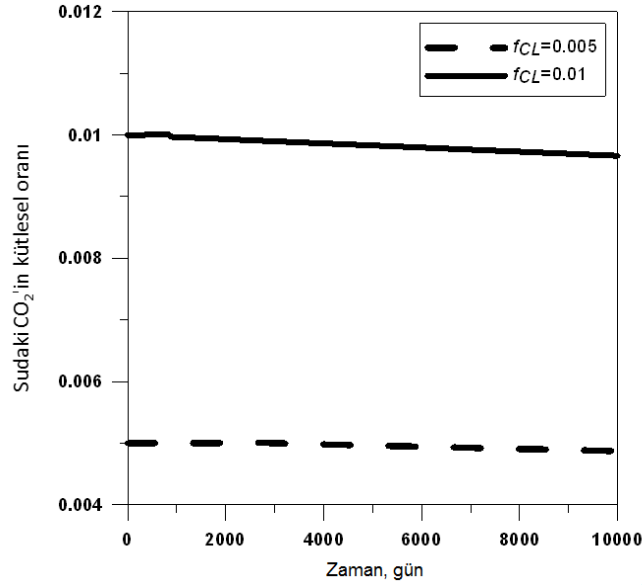
Şekil 3. Farklı miktarlarda suda çözünmüş CO₂'in basınç davranışları.

Şekil 4'de su içerisinde farklı miktarda çözünmüş olarak bulunan CO₂ için gaz doymuşluğunun zamanla değişimi gösterilmektedir. Beklenildiği üzere, rezervuarda gazlaşma noktası basıncına ulaşıldığı anda gaz doymuşluğu artmaya başlamaktadır. Doymuşluk değeri zamanla lineer olarak artmaktadır. Bu noktada, modelden hesaplanan basınç ve doymuşluk değerlerinin ortalama rezervuar basınç ve doymuşluk değerlerini yansıttığı göz önünde bulundurulmalıdır. Üretim sırasında gaz doymuşluğu konuma bağlı olarak değişir ve kuyu dibi basıncının gazlaşma noktası basıncından düşük olduğu durumda kuyu civarında en yüksek değere ulaşır.



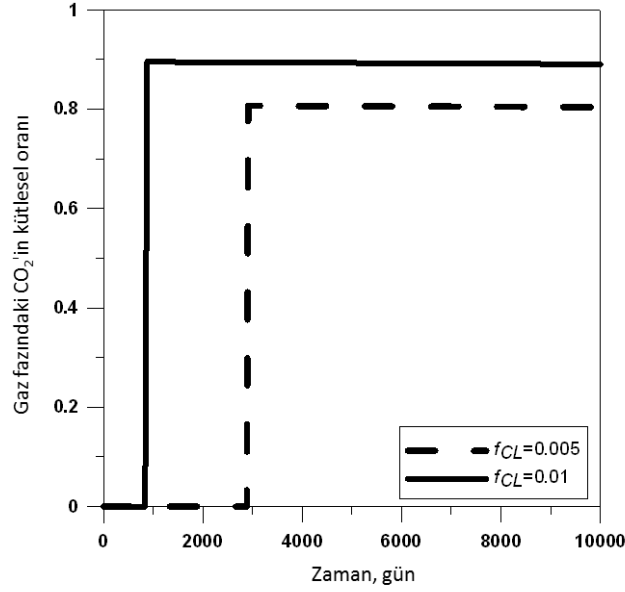
Şekil 4. Farklı miktarlarda suda çözünmüş CO₂'in basınç davranışları.

Şekil 5 suda çözünmüş CO₂ miktarının zamanla değişimini göstermektedir. %1 ve %0.5'lik başlangıç kütle oranının zamanla azaldığı görülmektedir. Ama beklenildiği gibi bu azalış çok küçüktür.



Şekil 5. Farklı miktarlarda suda bulunan CO₂'in zamanla değişimi.

Şekil 6 gaz fazındaki CO₂ miktarının zamanla değişimini göstermektedir. Başlangıçta hiç gaz fazı olmadığından kütle oranı sıfırdır. Gazlaşma noktası basıncına ulaşıldığı zaman gaz fazı oluşmaya başlar ve bu fazın çoğunluğunu CO₂'in oluşturduğu gözlemlenmektedir. Kütle olarak %1 oranında suda çözünmüş CO₂'in oluşturduğu sistemde gaz fazın %85'i CO₂'den oluşurken kütle olarak %0.5 oranında suda çözünmüş CO₂'in oluşturduğu sistemde gaz fazın %80'i CO₂'den oluşmaktadır.



Şekil 6. Farklı miktarlarda gaz fazında bulunan CO₂'in zamanla değişimi.

5. TARTIŞMA

Oluşturulan modelde CO₂'in kısmi basıncı ile suda çözülmüş CO₂'in kütle oranı arasındaki bağlantı denklem 1 ile hesaplanmıştır. Denklem 1'de yer alan Henry sabiti de denklem 2 ile bulunmuştur. Literatürde Henry sabitinin hesaplanabilmesi için farklı korelasyonlar yer almaktadır. Bunlardan biri Upton ve Santoyo [10]'nın ortaya koyduğu aşağıda verilen korelasyondur.

$$\ln K_H = a + b(T + 273.15) + c(T + 273.15)^2 + d(T + 273.15)^3 \quad (21)$$

Burada, a, b ve c katsayıları Tablo 2'de verilen değerlerdir.

Tablo 2. Denklem 21 için Regrasyon katsayıları.

a	4.517428673
b	2.5554535×10^{-2}
c	-1.02213×10^{-4}
d	9.30689×10^{-8}

Bunlara bağlı olarak, denklem 21'de verilen sabitler ve CO₂'in kısmi basıncı arasındaki ilişki denklem 22 ile verilebilir.

$$P_{CO_2} = \frac{18}{44} K_H f_{CL} \quad (22)$$

Upton ve Santoyo [10] tarafından verilen korelasyon ve modelde kullanılan korelasyonlar arasındaki fark önem teşkil edebileceğinden dolayı ilerki çalışmalarda denklem 21 ve 22'de verilen korelasyonlara göre model tekrar oluşturulacak ve rezervuar davranışı üzerindeki etkisi araştırılacaktır.

SONUÇ

Burada verilen çalışma halî hazırda devam eden bir çalışma olup şüana kadar elde edilen sonuçlar ve ilerde yapılması düşünölen çalışmalar aşğıdaki gibi sıralanabilir:

- Bu çalışmada, CO₂ içeren jeotermal sistemlerin basınç ve sıcaklık davranışını veren bir boyutsuz parametre modeli geliştirilmiştir.
- CO₂'in en çok gazlaşma noktası basıncı üzerinde etkisi vardır ve sıvı fazda bulunan suyun içerisinde çok az olsa dahi CO₂ çözünmesi gazlaşma noktası basıncını arttırmaktadır.
- Bu basıncın artması sebebi ile rezervuarda iki faza geçiş daha yüksek basınçlarda gerçekleşir. Rezervuarda üretim ile oluşan gaz fazı, gazın sıvılara göre daha fazla sıkıştırılabilirliğe sahip olmasından dolayı, basınç düşümünü yavaşlatmaktadır.
- Bu çalışmanın literatürde yer alan diğer çalışmalar ile karşılaştırılması daha yapılmamıştır. Bundan sonraki hedef modelin diğer çalışmalara göre doğrulunun ispatlanmasıdır.
- Daha sonra oluşturulan model, Türkiye'nin en önemli jeotermal sahalarından biri olan Kızıldere sahasının basınç ve sıcaklık davranışlarının modellenmesinde kullanılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] ALKAN, H. AND SATMAN, A., "A new lumped parameter model for geothermal reservoirs in the presence of carbon dioxide", *Geothermics*, 19, 469-479, 1990.
- [2] ATKINSON, P. G., CELATI, R., CORSI, R. AND KUCUK, F., "Behavior of the Bagnore steam/CO₂ geothermal reservoir, Italy", *Society of Petroleum Engineers Journal*, 20, 228-238, 1980.
- [3] ELLIS, E. J. AND GOLDING, R. M., "The solubility of CO₂ above 100°C in pure water and in sodium chloride solutions", *American Journal of Science*, 261, 47-60, 1963.
- [4] HOŞGÖR, B., ÇINAR, M., HAKLIDIR, F., TÜREYEN, O. I. AND SATMAN, A., "A New Lumped Parameter (Tank) Model for Reservoirs Containing Carbon Dioxide", *Proceedings of the 38th Stanford Geothermal Workshop*, Stanford, USA, 2013
- [5] IAPWS, "Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam", 2007.
- [6] O'SULLIVAN, M. J., BODVARSSON, G. S., PRUESS, K. AND BLAKELEY, M. R., "Fluid and heat flow in gas-rich geothermal reservoirs", *Society of Petroleum Engineers Journal*, 25, 215-226, 1985.
- [7] SUTTON, F. M., "Pressure-temperature curves for a two-phase mixture of water and carbon dioxide", *New Zealand Journal of Science*, 19, 297-301, 1976.
- [8] SCHILTHUIS, R. J., "Active Oil and Energy", *Trans. AIME*, 118, 33-52, 1936.
- [9] TÜREYEN, O. I. AND AKYAPI, E., "A generalized non-isothermal tank model for liquid dominated geothermal reservoirs", *Geothermics*, 40, 50-57, 2011.
- [10] UPTON, P. S. AND SANTOYO, E., "A Comprehensive Evaluation of Empirical Correlations for Computing the Solubility of CO₂ in Water", *Proceedings of the 24th NZ Geothermal Workshop*, New Zealand, 2002.
- [11] WHITING, R. L. AND RAMEY, H. J., "Application of material and energy balances to geothermal steam production", *Journal of Petroleum Technology*, 21, 893-900, 1969.
- [12] ZYVOLOSKY, G. A. AND O'SULLIVAN, M. J., "Simulation of a gas-dominated, two-phase geothermal reservoir", *Society of Petroleum Engineers Journal*, 20, 52-58, 1980.

ÖZGEÇMİŞ

Fatma Bahar HOŞGÖR

1981 yılı İstanbul doğumludur. 2003 yılında İTÜ Maden Fakültesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2006 yılında Yüksek Mühendis unvanını almıştır. Halen İTÜ

Maden Fakültesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde "Karbondiyoksit içeren jeotermal sistemlerin modellenmesi" konulu doktora çalışmasına devam etmektedir. 2005-2013 Yılları arasında aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır.

Murat ÇINAR

Murat Çınar halen İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde Öğretim üyesi olarak görevini sürdürmektedir. Doktorasını 2011 yılında Stanford Üniversitesi Enerji Kaynakları Mühendisliği Bölümünde tamamlayan Çınar, lisans ve yüksek lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde almıştır.

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 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 unvanlarını 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.