

# KARBONDİOKSİTİN JEOTERMAL REZERVUARIN ÜRETİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ\*

**Fatma Bahar Hoşgör\*\*<sup>1</sup>**

Arş. Gör.,  
oztorun@itu.edu.tr

**Ömer İnanç Türeyen<sup>1</sup>**

Doç. Dr.,  
inanct@itu.edu.tr

**Abdurrahman Satman<sup>1</sup>**

Prof. Dr.,  
mdsatman@itu.edu.tr

**Murat Çınar<sup>1</sup>**

Yrd. Doç. Dr.,  
cinarmura@itu.edu.tr

<sup>1</sup> İTÜ, Maden Fakültesi,  
Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü,  
İstanbul

## ÖZ

Ülkemizdeki jeotermal sistemler incelendiğinde, genel olarak rezervuar suyunda önemli miktarda çözülmüş karbondioksit bulunduğu görülmektedir. Karbondioksit, rezervuarın basınç ve sıcaklık davranışlarını, suyun termodinamik davranışlarını ve faz kompozisyonlarını etkilemektedir. Bu nedenle, jeotermal rezervuarların modellenmesi sırasında karbondioksitin de modellemede dikkate alınması oldukça önemlidir. Bu çalışmada, karbondioksit içeren jeotermal sahaların akışkan ve ısı üretimi davranışını incelemek ve tahmin etmek amacı ile izotermal olmayan akışı göz önünde bulunduran lumped parametre modeli geliştirilmiştir. Jeotermal sistemlerin davranışlarının kapsamlı olarak incelenmesine olanak veren bu model ile üretim, doğal beslenme ve re-enjeksiyon sebebi ile rezervuarda oluşan basınç, sıcaklık, doymuşluk ve faz davranışı ile beraber karbondioksit miktarındaki değişim de modellenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Karbondioksit içeren jeotermal sistemler, rezervuar modellemesi, boyutsuz parametre modeli

# EFFECTS OF CARBONDIOXIDE ON PRODUCTION PERFORMANCE OF GEOTHERMAL RESERVOIR

## ABSTRACT

Almost every geothermal fields in Turkey contains some amounts of dissolved carbondioxide in reservoir fluid. Even small quantities of carbondioxide have profound effects on the thermodynamic behavior of water, phase compositions and the reservoir pressure and temperature behavior. In this study, a new nonisothermal lumped parameter model was developed to examine the behavior of mass and heat production of geothermal fluids with the consideration of carbondioxide. This model can be utilized to better understand the behavior of geothermal systems and to monitor the change of pressure, temperature, saturation and amount of dissolved carbondioxide occured from production, reinjection and natural recharge.

**Keywords:** Geothermal systems containing carbondioxide, reservoir modelling, lumped parameter (tank) model

Geliş tarihi : 30.04.2015  
Kabul tarihi : 26.05.2015

\* 8-11 Nisan 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İzmir'de düzenlenen 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi'nde sunulan bildiri, dergimiz için yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Hoşgör, F. B., Türeyen, Ö. İ., Satman, A., Çınar, M. 2015. "Karbondioksitin Jeotermal Rezervuarın Üretim Performansı Üzerindeki Etkisi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 664, s. 54-64.

## 1. GİRİŞ

Ülkemiz enerjide genel olarak dışa bağımlı olmakla beraber, jeotermal kaynak zenginliği açısından dünya çapında en ön sıralarda yer almaktadır. Bu enerji kaynağının kullanımının, mevcut kullanım ve potansiyel dikkate alındığında önümüzdeki yıllarda gelişme potansiyelinin olduğu görülmektedir [8, 12]. Bu enerji kaynağının kullanımının en etkin şekilde yapılabilmesinde rezervuar mühendisliğinin önemi oldukça fazladır. Oluşturulan ilk jeotermal rezervuar modellerinde jeotermal su modellenirken saf su varsayımı yapılmaktadır. Fakat tüm dünyada birçok jeotermal rezervuarda su içinde çözülmüş olarak H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> gibi yoğunlaşmayan gazlar bulunabilmektedir ve kütlece %10 mertebelerine varabilmektedir. Ülkemizde hemen hemen tüm jeotermal rezervuarlarda rezervuar suyunun içinde çözülmüş olarak karbondioksit bulunmaktadır. Türkiye'de enerji üretimi bakımından en büyük kapasiteye sahip olan Kızıldere Germencik, Salavatlı ve Afyon Ömer-Gecek gibi jeotermal rezervuarları incelendiğinde çoğunun karbondioksit içerdiği gözlemlenmektedir. Bu sahalarından Kızıldere kütlece olarak sıg zonlarda %1,5, derin zonlarda %3 ve Ömer-Gecek %0,4 çözülmüş karbondioksit içermektedir [10]. Bu tip sahaların modellemeleri yapılırken karbondioksit etkisinin göz ardı edilmesi hatalı sonuçlara sebep olur.

Çözülmüş 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. Ayrıca, karbondioksit jeotermal sahada üretim başladığı zaman akışın termodinamik özelliklerini kontrol eder. Bu nedenle, bu tür rezervuarlar modellenirken, karbondioksit etkisinin dikkate alınması gerekmektedir.

Jeotermal sistemlerin modellenmesi için yapılan ilk çalışmalardan biri, Whiting ve Ramey [5] tarafından verilmiştir. Bu çalışmada, öncelikle jeotermal sistemlerin modellenmesi için kütle korunumu prensibinin yanında, aynı zamanda da enerjinin korunumu prensibinin de uygulanması gerektiğinden bahsedilmiştir. Herhangi bir tank üstünde kütle korunumu ve enerji korunumu uygulanarak buhar ağırlıklı sistemlerde basıncın ve sıcaklığın nasıl değiştiği modellenmiştir.

Karbondioksitin jeotermal sistemlerin modellenmesindeki önemi, başta Zvyoloski ve O'Sullivan olmak üzere sayılı araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Zvyoloski ve O'Sullivan [17], jeotermal rezervuarların sayısal simülasyonunda korunum denklemlerinin kullanılmasını ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, üç adet korunum denklemi kullanmışlardır. Bunlar, su için kütle korunumu denklemi, tüm sistem

için enerji korunumu denklemi ve karbondioksit için kütle korunumu denklemleridir.

Atkinson ve arkadaşları (1980), başlangıçta iki fazlı koşullara sahip olan ve önemli miktarlarda karbondioksit içeren Bagnore sahasının modellenmesi için lumped parametre modeli geliştirmişlerdir. 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 kullanılmakta ve bu iki tank arasında kütle transferi gerçekleşebilmektedir.

O'Sullivan ve diğerleri [9], jeotermal rezervuarların, akışkanın sıkıştırılmış 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], saf su sistemi için geliştirilmiş olan boyutsuz parametre modelini su-karbondioksit sisteminin davranışını veren bir termodinamik paket ekleyerek geliştirmişlerdir. Batistelli ve arkadaşları [3] ise jeotermal modellemesinde önemli bir yazılım olan TOUGH2 simülörünü rezervuar akışkanının tuzlu su ve akışkan içinde yoğunlaşmayan gazlar olması durumu için geliştirmişlerdir. Hoşgör ve arkadaşları [6], basit sistemler için model sunmuşlardır. Mevcut çalışmada ise karbondioksit içeren jeotermal sistemlerin davranışını kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

## 2. KÜTLE VE ENERJİ KORUNUMU DENKLEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

### 2.1 Termodinamik Paket

Su içinde çözülmüş karbondioksitin kütlece oranı ile karbondioksitin kısmi basıncı arasındaki ilişki Henry kanunu ile açıklanmaktadır. CO<sub>2</sub>'in kısmi basıncı ile CO<sub>2</sub>'in su içerisindeki kütle oranı arasındaki ilişki Henry Yasası ile verilir.

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

Burada  $p_{CO_2}$ , CO<sub>2</sub>'in kısmi basıncı (Pa);  $f_{CL}$ , sıvı su içerisindeki CO<sub>2</sub>'in kütle oranı;  $H(T)$ , Henry sabiti (Pa<sup>-1</sup>) ve T, sıcaklıktır (K). Denklem 1'den görüldüğü üzere, Henry sabiti sıcaklığın fonksiyonudur ve Sutton [14] tarafından geliştirilmiş olan aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

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

Cramer [4] çalışmasında, Henry sabiti için Denklem 3'te verilen ilişkiyi vermektedir:

$$H(T) = \sum_{i=0}^5 B(i)T^i \quad (3)$$

Burada  $B$ , Denklem 3'te kullanılan sabit katsayıları vermektedir ve bu katsayılar Tablo 1'de sunulmaktadır.

**Tablo 1.** Cramer'in Henry Sabiti İçin Verdiği İlişkide Kullandığı Sabit Katsayılar [4]

B (0)	$7.83666 \times 10^7$
B (1)	$1.96025 \times 10^6$
B (2)	$8.20574 \times 10^4$
B (3)	$-7.40674 \times 10^2$
B (4)	2.18380
B (5)	$-2.20999 \times 10^{-3}$

Basitlik açısından, sıvı fazdaki su-karbonyoksit karışımının yoğunluk ve akmazlıkları sıvı suyun yoğunluk ve akmazlık değerlerine eşit alınacaktır. Sıvı fazdaki su-karbonyoksit karışımının entalpi hesabı O'Sullivan ve diğerleri (1990) tarafından ortaya konan denklem ile hesaplanır.

$$h_L = h_w(1 - f_{CL}) + (h_{CO_2} + h_{sol})f_{CL} \quad (4)$$

Burada  $h_L$ , sıvı fazın entalpisi (J/kg);  $h_w$ , sıvı fazdaki suyun entalpisi (J/kg);  $h_{CO_2}$ , gaz fazdaki  $CO_2$ 'nin entalpisi (J/kg) ve  $h_{sol}$  ise su karbonyoksit solüsyonunun entalpisi.  $h_{CO_2}$ , Sutton tarafından geliştirilen denklem ile hesaplanır [14].

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

Su karbonyoksit solüsyonunun entalpisi de Ellis ve Golding [5] tarafından geliştirilmiş aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

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

Gaz fazın basıncı, denklem 7'da görüldüğü üzere buharın kısmi basıncıyla  $CO_2$ 'in kısmi basınçlarının toplamına eşittir.

$$P_G = P_s + P_{CO_2} \quad (7)$$

Burada  $P_G$ , gazın basıncı (Pa) ve  $P_s$ , buharın kısmi basıncıdır (Pa).  $P_s$  değerleri IAPWS'e (2007) göre hesaplanırken gaz fazın yoğunluğu denklem 8 kullanılarak bulunur.

$$\rho_G = \rho_s + \rho_{CO_2} \quad (8)$$

Burada  $\rho_G$ , gaz fazın yoğunluğu ( $kg/m^3$ );  $\rho_s$ , buharın yoğunluğu ( $kg/m^3$ ) ve  $\rho_{CO_2}$  ( $kg/m^3$ ), gaz fazdaki  $CO_2$ 'in yoğunluğudur. Gaz fazın akmazlık değeri denklem 9 ile hesaplanır.

$$\mu_G = \mu_s(1 - f_{CG}) + \mu_{CO_2} f_{CG} \quad (9)$$

Burada  $\mu_G$ , gaz fazın akmazlığı (Pa.s);  $\mu_s$ , buharın akmazlığı (Pa.s);  $\mu_{CO_2}$ , gaz fazdaki  $CO_2$ 'in akmazlığı ve  $f_{CG}$ , gaz fazdaki  $CO_2$ 'inin oranıdır. Gaz fazın entalpi değeri denklem 10 kullanılarak hesaplanır [9].

$$h_G = h_s(1 - f_{CG}) + h_{CO_2} f_{CG} \quad (10)$$

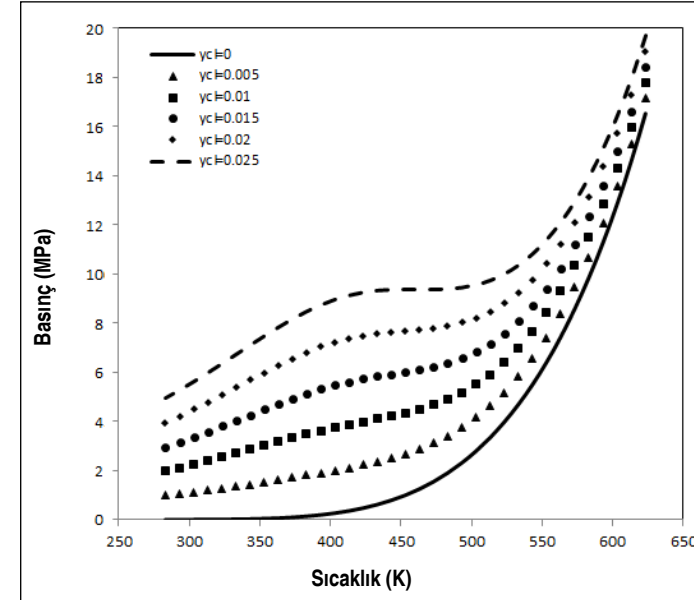
Burada  $h_G$ , gaz fazın entalpisi (J/kg);  $h_s$ , buharın entalpisi (J/kg) ve  $h_{CO_2}$ , gaz fazdaki  $CO_2$ 'in entalpisi. Son olarak, herhangi bir sıcaklık ve basınçta gaz fazındaki  $CO_2$ 'in kütle oranı denklem 11 ile hesaplanır:

$$f_{CG} = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_G} \quad (11)$$

## 2.2 Karbonyoksitin Suyun Özelliklerine Olan Etkileri

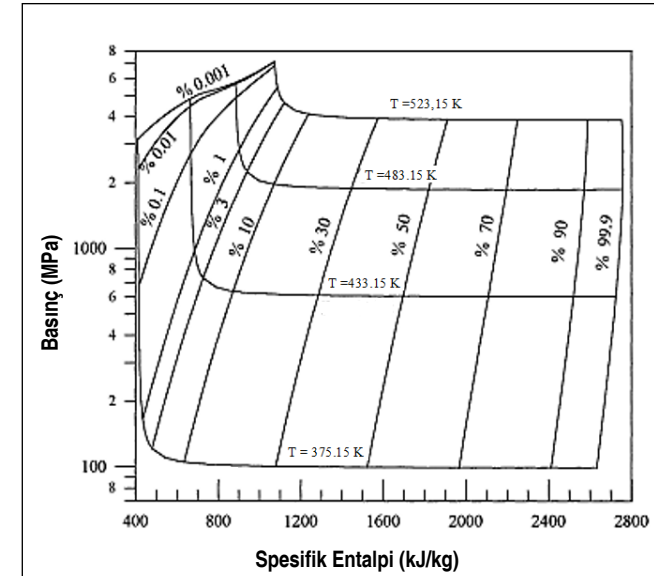
Bu bölümde, çözünmüş karbon dioksitin su özellikleri üstüne olan etkileri incelenecektir. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi karbonyoksitin varlığı, suyun yoğunluk ve akmazlık değerlerini çok fazla etkilememektedir. Karbonyoksitin en büyük etkisi ayrışma basıncı üstüne kendisini göstermektedir. Kütlece çok düşük miktarlardaki çözünmüş karbonyoksit oranları ayrışma basıncını önemli ölçülerde etkileyebilmektedir.

Şekil 1'de farklı kütle oranları için basınç – sıcaklık grafiği verilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, karbonyoksitin varlığının ayrışma basıncı üstüne etkileri oldukça büyüktür. Örneğin 473 K sıcaklığını ele alalım. Bu sıcaklık değerinde saf suyun ayrışma basıncı yaklaşık olarak 1.5 MPa'dır. Eğer suyun içinde çözünmüş karbon dioksit oranı  $f_{CL}=0.005$  (yani kütlece %0.5) olursa, Şekil 1'den ayrışma basıncı yaklaşık olarak 3.1 MPa'a yükselmektedir. Eğer çözünmüş karbonyoksit oranı  $f_{CL}=0.025$  (yani kütlece %2,5) olursa, ayrışma basıncı 8.9 MPa olmaktadır. Görüldüğü gibi, karbonyoksit oranındaki küçük artışlar ayrışma basıncında çok büyük artışlara neden olmaktadır. Eğer jeotermal sistemin modellenmesinde karbonyoksit oranı hesaba katılmaz ise kuyular içinde ayrışma derinliği hesaplamalarında çok büyük hatalar yapılabilir. Sığ ayrışma derinlikleri beklenirken gerçek ayrışma derinlikleri çok daha derinlerde bulunabilir. Üretim sırasında ayrışma noktası rezervuar içine girmişse, rezervuar içinde bir gaz fazı oluşumu söz konusu olacaktır. Böyle bir durumda, rezervuar basıncının zamanla düşüşü daha yavaşlayacaktır. Bir başka deyişle basınç daha yavaş azalacaktır. Bunun nedeni, ayrışma basıncının altındaki basınçlarda ortamda gaz oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi, gaz sıkıştırılabilirliği sıvı sıkıştırılabilirliklerine göre çok daha fazladır. Oluşan gaz fazı, yapılan üretime karşı genişerek basıncın daha yavaş düşmesini sağlar.



Şekil 1. Su içinde çözünmüş Karbonyoksitin Ayrışma Basıncı Üstüne Olan Etkileri

Şekil 2'de, kütlece  $f_{CL}=0.015$  (yani kütlece %1,5) oranında su içinde çözünmüş olan karbonyoksitin basınç – spesifik entalpi davranışı üstüne olan etkileri gösterilmektedir. Basınç azaldıkça, ayrışma basıncına gelindiğinde gaz açığa çıkmaya başlamaktadır. İlk etapta izotermal eğriler üstüne basıncın hızla azaldığı görülmektedir. Bu, gazın ilk bileşiminin tamamına yakınının karbonyoksitten meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Basınç, üretimden dolayı daha da düşmeye devam ettiğinde gaz fazı içindeki buhar miktarı da artmaktadır. Gaz fazının çoğunluğu buhar tarafından oluştuğunda ise basıncın



Şekil 2. Su içinde  $f_{CL}=0.015$  Kütlece Orana Sahip Karbonyoksitin Basınç Spesifik Entalpi Diyagramına Olan Etkisi [11]

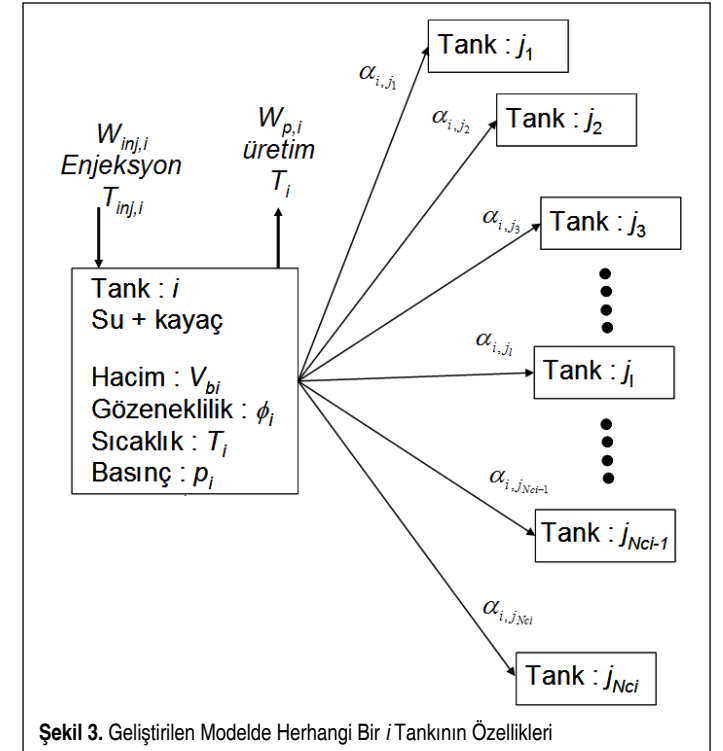
azalım davranışı saf suyunkine daha da yaklaşmaktadır. Yani basıncın azalışı hemen hemen yok denecek kadar azdır.

## 2.3 Lumped Parametre Modeli

Lumped parametre modellerinde jeotermal sistemin tanklardan oluştuğu varsayımı yapılmaktadır. Bu tanklar jeotermal sistemin farklı bileşenlerini temsil etmektedir (rezervuar, akifer vb.). Tanklar arasındaki konfigürasyonlar değişebileceği gibi, tankların sayıları da farklı jeotermal sistemler için farklılıklar gösterebilmektedir.

Geliştirilen modelin anlatımı herhangi bir  $i$  tankı üstüne yapılacaktır. Daha sonra, tüm jeotermal sistem için çözümlerin nasıl yapılacağı açıklanacaktır. Şekil 3'te, jeotermal sistem içindeki herhangi bir  $i$  tankı ve ona bağlı olan diğer tanklar (kütle ve enerji alış verişinin yapıldığı) gösterilmektedir [6, 15].

Geliştirilen modelde her bir tankın kayaç ve sudan (Su buhar, sıvı veya her iki fazda bulunabilmektedir.) oluştuğu varsayımı yapılmaktadır. Bu  $i$  tankının basıncı  $p_i$  ve sıcaklığı ise  $T_i$  ile gösterilmektedir. Tankın gözenekli ortam olduğu varsayımı yapılmakta ve gözenekliliği ise  $\phi_i$  ile gösterilmektedir. Tankın kaba hacmi  $V_{bi}$  ile gösterilmekte ve kaba hacmin basınç ve sıcaklıktan bağımsız, yani zaman ile değişmediği varsayımı yapılmaktadır. Tank, daha önce de bahsedildiği gibi, başka tanklarla kütle ve enerji alış verişini yapabilmektedir. Şekil 3'teki  $i$  tankının bağlantı yaptığı  $N_{ci}$  kadar tank olduğunu varsayalım. Kütle ve enerji alış verişleri  $i$  tankı ile tüm bu tanklar ile ger-



Şekil 3. Geliştirilen Modelde Herhangi Bir  $i$  Tankının Özellikleri

çekleştirilecektir. Bunların dışında,  $i$  tankı içine belirlenen bir  $T_{inj}$  sıcaklığında  $W_{inj}$  kütleli debisi ile enjeksiyon yapılabilmektedir. Ayrıca  $W_{p,L}$  kütleli debisi ile sıvı üretimi ve  $W_{p,G}$  kütleli debisi ile de gaz üretimi gerçekleşmektedir. Yapılan üretimler, tank hangi sıcaklıkta ise o sıcaklıkta yapılmaktadır.

Tanklar arasında kütle transferi Schilthuis [13] benzeri bir yaklaşım ile gerçekleştirilmektedir. Buna göre, herhangi bir  $i$  tankı ile bağlı olduğu herhangi bir  $j_i$  tankı arasında kütle debisi denklem 12 ile verilmektedir:

$$W_{i,j_i} = \alpha_{i,j_i} (p_{j_i} - p_i) \quad (12)$$

Burada  $W_{i,j_i}$ , tank  $i$  ve tank  $j_i$  arasında taşınan sıvı fazın kütleli olarak akış debisi (kg/s);  $p_{j_i}$ , tank  $j_i$ 'nin basıncı (Pa);  $p_i$ , tank  $i$ 'nin basıncı (Pa) ve  $\alpha_{i,j_i}$  besleme indeksidir (kg/(bar.s)). Gazın kütleli akış debisi, 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:

$$\alpha_{L,i,j_i} = \psi_{i,j_i} \lambda_L \quad (13)$$

Burada  $\psi_{i,j_i}$ , kayaç kısmın besleme indeksi ( $m^3$ ) ve  $\lambda_L$  akışkan kısmın besleme indeksidir (kg/(Pa.s.m<sup>3</sup>)). Akışkan kısım için denklem 14 kullanılır.

$$\lambda_L = \frac{k_{r,L} \rho_L}{\mu_L} \quad (14)$$

Burada  $k_{r,L}$ , sıvının göreceli geçirgenliğidir. Kayaç kısım için denklem 15 kullanılır:

$$\psi_{i,j_i} \propto \frac{kA}{d} \quad (15)$$

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  $\psi_{i,j_i}$ 'nin içinde yer aldıklarından  $k$ ,  $A$  ve  $d$ 'nin değerlerinin tek tek bilinmesi gerekli değildir. Diğer taraftan, besleme indeksinin akışkan kısmı, verilen basınç, sıcaklık ve doymuşluk değerlerine göre hesaplanır.

Geliştirilen model sistem, içindeki her bir tank üstünde üç adet denklem çözülmesine dayanmaktadır. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir:

1. Su için kütle dengesi
2. Kayaç ve akışkanlar üstünde enerji dengesi denklemi

### 3. Karbondiyoksit için kütle dengesi denklemi

#### 2.3.1 Su İçin Kütle Dengesi Denklemi

Su için basit kütle dengesi denklemini aşağıda verildiği şekilde yazabiliriz:

$$V_{b,i} \frac{d}{dt} (\rho_L S_L \phi + \rho_G S_G \phi)_i - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{L,i,j_l} (p_{j_l} - p_i) - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{G,i,j_l} (p_{j_l} - p_i) + W_{p,L,i} + W_{p,G,i} + W_{inj,L,i} = 0 \quad (16)$$

Burada  $S$ , doymuşluğu göstermektedir (kesir). Denklem 16'daki ilk terim,  $i$  tankı içindeki kütleli birikim debisidir. İkinci terim, diğer tanklardan gelen sıvı su kütle debisini; üçüncü terim, diğer tanklardan gelen su buharı kütle debisini; dördüncü terim, yapılan sıvı su üretim debisini; beşinci terim, yapılan su buharı üretim debisini ve son terim ise yapılan sıvı su enjeksiyon debisini göstermektedir. Buradan da anlaşıldığı gibi, model içinde rezervuar içine buhar basma işlemi hesaba katılmamıştır.

Denklem 16'da verilen denklem içinde dikkat edilecek olursa, birikim teriminde zaman türevi mevcuttur. Zaman türevini alabilmek için sayısal yaklaşım yapılmıştır. Sayısal yaklaşım olarak sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu farklar yönteminin kullanılması durumunda denklem 17 elde edilir.

$$V_{b,i} \frac{(\rho_L S_L \phi + \rho_G S_G \phi)^{n+1} - (\rho_L S_L \phi + \rho_G S_G \phi)^n}{\Delta t} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{L,i,j_l} (p_{j_l} - p_i) - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{G,i,j_l} (p_{j_l} - p_i) + W_{p,L,i} + W_{p,G,i} + W_{inj,L,i} = 0 \quad (17)$$

Denklem 17'de benimsenen yaklaşım, herhangi bir zaman için çözüm elde edilmek istendiğinde, zaman içinde adım atmayı gerektirmektedir. Denklem 17'de  $n$  şimdiki zaman adımını;  $n+1$  ise bir sonraki zaman adımını belirtir.  $\Delta t$  ise atılan adımın büyüklüğünü göstermektedir (s). Çözüm sırasında, denge problemi yaşamamak amacıyla kapalı (implicit) yaklaşım uygulanmış ve birikim dışındaki diğer tüm terimler  $n+1$  zaman adımında değerlendirilmiştir. Bu durum, denklem 18'de verilmektedir.

$$V_{b,i} \frac{(\rho_L S_L \phi + \rho_G S_G \phi)^{n+1} - (\rho_L S_L \phi + \rho_G S_G \phi)^n}{\Delta t} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{L,i,j_l} (p_{j_l}^{n+1} - p_i^{n+1}) - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{G,i,j_l} (p_{j_l}^{n+1} - p_i^{n+1}) + W_{p,L,i}^{n+1} + W_{p,G,i}^{n+1} + W_{inj,L,i}^{n+1} = 0 \quad (18)$$

#### 2.3.2 Kayaç ve Akışkanlar İçin Enerji Dengesi Denklemi

Kayaç ve akışkanlar için enerji dengesi denklemi, denklem 19'da verilmektedir.

$$V_{b,i} \frac{d}{dt} [(1-\phi)\rho_m C_m T + \phi \rho_L S_L u_L + \phi \rho_G S_G u_G] - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{L,i,j_l} (p_{j_l} - p_i) h_{L,\xi} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{G,i,j_l} (p_{j_l} - p_i) h_{G,\xi} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \gamma_{i,j_l} (T_{j_l} - T_i) + W_{p,L,i} h_{L,i} + W_{p,G,i} h_{G,i} + W_{inj,L,i} h_{inj,L,i} \quad (19)$$

Burada  $C$ , spesifik ısı kapasitesini (j/(kgK));  $u$  ise spesifik iç enerjiyi (j/kg) göstermektedir. Denklem 19'daki birinci terim, kayaç, sıvı su ve gaz fazları içinde enerjinin birikimini temsil etmektedir. İkinci terim, diğer tanklardan sıvı su ile gelen enerji debisini; üçüncü terim, diğer tanklardan gaz fazı ile gelen enerji debisini; dördüncü terim, ısı iletimi sonucu diğer tanklardan gelen enerji debisini; beşinci terim, sıvı üretimi sonucu tanktan çıkan enerji debisini; altıncı terim, gaz üretimi sonucu tanktan çıkan enerji debisini ve son terim ise sıvı enjeksiyonu sonucu tanka giren enerji debisini göstermektedir. Diğer tanklardan gelen enerji debisinin hesabı yapılırken, basınç farkını çarpan, entalpi teriminin nasıl ele alınacağı önemlidir. Burada, entalpinin ne olacağına akış yönüne göre karar verilmektedir ve bu denklem 20'de gösterilmektedir.

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

Zaman türevini hesaplamak amacıyla sonlu farklar yöntemi kullanılıp kapalı yaklaşım uygulanırsa, denklem 21'de verilen ayrık denkleme ulaşılmış olur.

$$V_{b,i} \frac{[(1-\phi)\rho_m C_m T + \phi \rho_L S_L u_L + \phi \rho_G S_G u_G]^{n+1} - [(1-\phi)\rho_m C_m T + \phi \rho_L S_L u_L + \phi \rho_G S_G u_G]^n}{\Delta t} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{L,i,j_l}^{n+1} (p_{j_l}^{n+1} - p_i^{n+1}) h_{L,\xi}^{n+1} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{G,i,j_l}^{n+1} (p_{j_l}^{n+1} - p_i^{n+1}) h_{G,\xi}^{n+1} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \gamma_{i,j_l}^{n+1} (T_{j_l}^{n+1} - T_i^{n+1}) + W_{p,L,i}^{n+1} h_{L,i}^{n+1} + W_{p,G,i}^{n+1} h_{G,i}^{n+1} + W_{inj,L,i}^{n+1} h_{inj,L,i}^{n+1} \quad (21)$$

#### 2.3.3 Karbondiyoksit Üstünde Uygulanan Kütle Dengesi Denklemi

Karbondiyoksit için kullanılan kütle dengesi denklemi, denklem 22'de verilmektedir.

$$V_{b,i} \frac{d}{dt} (\rho_L S_L \phi f_{CL} + \rho_G S_G \phi f_{CG})_i - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{L,i,j_l} (p_{j_l} - p_i) f_{CL,\xi} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{G,i,j_l} (p_{j_l} - p_i) f_{CG,\xi} + W_{p,L,i} y_{CL,i} + W_{p,G,i} y_{CG,i} = 0 \quad (22)$$

Denklem 22'deki birinci terim, karbondiyoksitin sıvı su ve gaz fazındaki birikimini göstermektedir. İkinci terim, diğer tanklardan sıvı su içinde gelen karbondiyoksit debisini; üçüncü terim, diğer tanklardan gaz fazı ile gelen karbondiyoksit debisini; dördüncü terim, sıvı üretimi ile çıkan karbondiyoksit debisini ve son terim de gaz üretimi ile çıkan karbondiyoksit miktarını vermektedir.

Diğer tanklardan olan karbondiyoksit geçişi için kütleli oranı hangi koşulda kullanılacağı denklem 23'te verilmektedir.

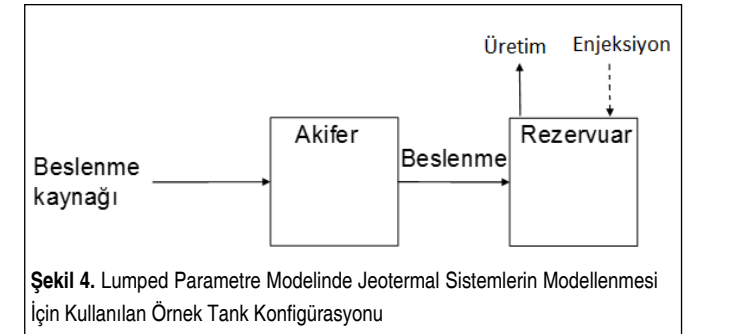
$$f_{\xi} = \begin{cases} f_i & \text{if } p_i > p_{j_i} \\ f_{j_i} & \text{if } p_i < p_{j_i} \end{cases} \quad (23)$$

Zaman türevi için sonlu farklar kullanılıp, değişkenler için kapalı (implicit) yaklaşım kullanıldığında denklem 24 elde edilir.

$$V_{b,i} \frac{(\rho_L S_L \phi f_{CL} + \rho_G S_G \phi f_{CG})_i^{n+1} - (\rho_L S_L \phi f_{CL} + \rho_G S_G \phi f_{CG})_i^n}{\Delta t} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{L,i,j_l}^{n+1} (p_{j_l}^{n+1} - p_i^{n+1}) f_{CL,\xi}^{n+1} - \sum_{l=1}^{N_{ci}} \alpha_{G,i,j_l}^{n+1} (p_{j_l}^{n+1} - p_i^{n+1}) f_{CG,\xi}^{n+1} + W_{p,L,i}^{n+1} f_{CL,i}^{n+1} + W_{p,G,i}^{n+1} f_{CG,i}^{n+1} = 0 \quad (24)$$

## 3. UYGULAMALAR

Bu bölümde, rezervuar suyunun içinde çözünmüş karbondiyoksitin olması durumunda rezervuar performansı araştırılmıştır. CO<sub>2</sub>'nin jeotermal rezervuarlardaki etkisini gözlemlemek amacıyla farklı örnekler verilmiştir. Geliştirilen model, Şekil 4'te verilen rezervuar ve akiferi temsil eden iki tanklı yapay örnek üzerinde uygulanmıştır.

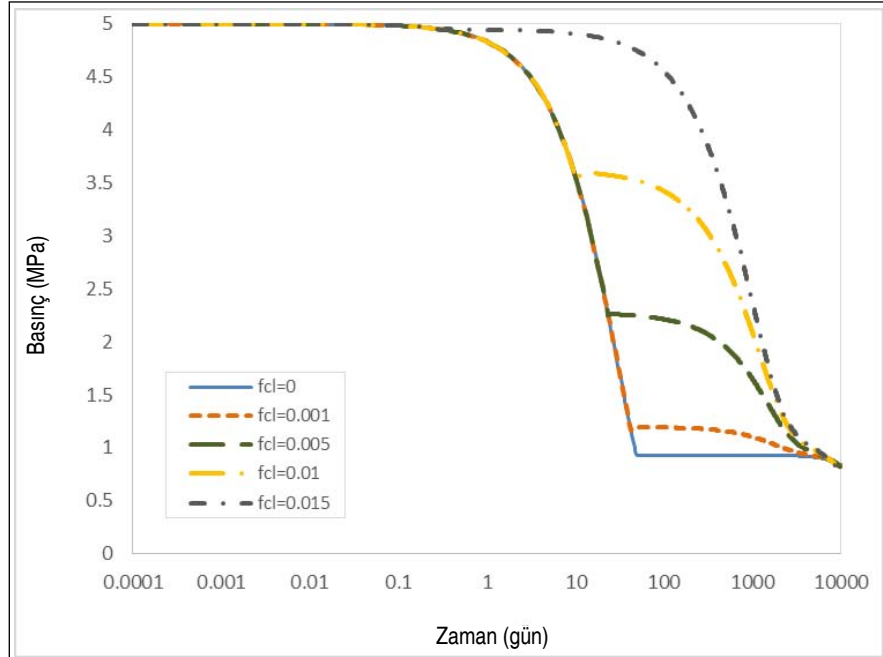


Tablo 2. Jeotermal Sistemin Özellikleri

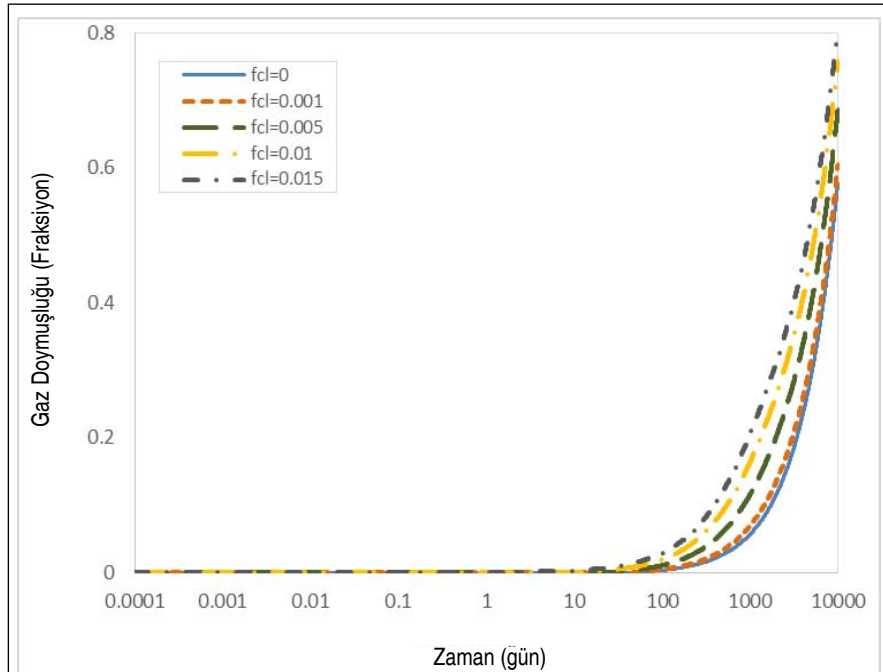
Özellik	Değer
Kaba Hacim (m <sup>3</sup> )	1×10 <sup>9</sup>
Gözeneklilik (kesir)	0.1
İlk Basınç (Pa)	50×10 <sup>5</sup>
İlk Sıcaklık (K)	450
Kayaç Sıkıştırılabilirliği (1/Pa)	1×10 <sup>-9</sup>
Kayaç Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	0
Kayaç Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	2600
Kayacın ısı kapasitesi [j/(kg.K)]	1000
Kayaç Geçirgenliği (m <sup>2</sup> )	1×10 <sup>-14</sup>
Üretim Debisi (kg/s)	300
Enjeksiyon Debisi (kg/s)	0

### 3.1 CO<sub>2</sub> Miktarının Etkisi

İlk uygulamada, rezervuar ve akifer suyunun içinde aynı miktarda çözünmüş karbon dioksitin olması durumunda rezervuarın üretim performansının nasıl olduğu araştırılmıştır. Oluşturulan jeotermal sistemin özellikleri Tablo 2’de verilmektedir. Rezervuar 10.000 gün boyunca 300 kg/s ile üretim yapmıştır. Dört farklı karbon dioksit oranı (%0, %0,1,%0,5, %1, %1,5)



Şekil 5. Farklı Karbon dioksit Oranları İçin Basınç Davranışı



Şekil 6. Gaz Doymuşluğunun Zamanla Değişimi

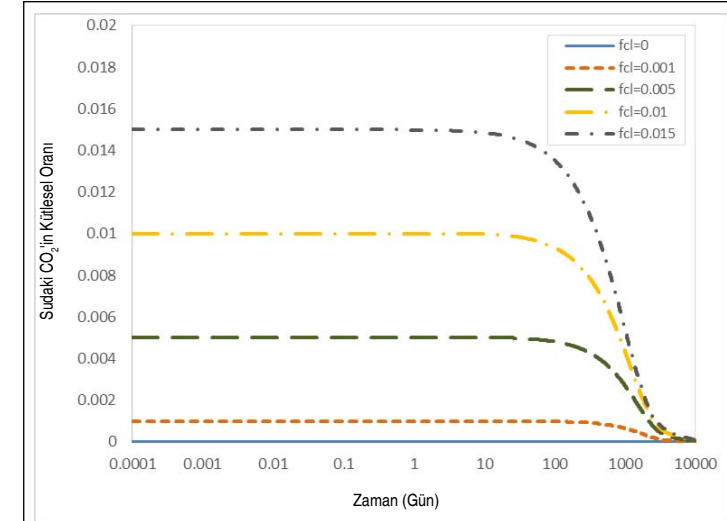
için model çalıştırılmış ve böyle bir sistemin basınç, gaz doymuşluğu, suyun içindeki karbon dioksit oranının değişimi ve gaz fazındaki çözünmüş CO<sub>2</sub> oranlarının davranışı incelenmiştir. Sonuçlar, Şekil 5 – Şekil 8 arasında verilmektedir.

Şekil 5’te farklı karbon dioksit oranları için basınç davranışı görülmektedir. Suyun içinde karbon dioksit hiç bulunmaması durumunda basınç hızlı bir şekilde azaldıktan sonra, ani bir değişim ile basınç düşümü yavaşlamıştır. İlk baştaki hızlı azalım, rezervuarda sadece sıvı su fazının bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi, sıvı suyun sıkıştırılabilirliği gazlara göre çok düşük olduğundan basınç hızla azalmaktadır. Yaklaşık 100 günde ayrışma basıncına geldiğinde ise gaz fazı (Sadece su buharıdır; çünkü karbon dioksit bulunmamaktadır.) açığa çıkar. Gaz fazının sıvı suya göre çok yüksek olan sıkıştırılabilirliği basıncın düşüm hızını azaltmaktadır. Suyun içinde karbon dioksit çözülmeye başladığında ise bu davranışın daha erken gerçekleştiği görülmüştür. Karbon dioksit miktarı arttıkça da ayrışma daha erken zamanlarda gerçekleşmekte ve basınç davranışı daha yüksek değerlerde değişmeye başlamaktadır. Bu beklenen bir davranıştır. Daha önce de belirtildiği gibi karbon dioksitin en büyük etkisi, suyun ayrışma basıncı üstündedir.

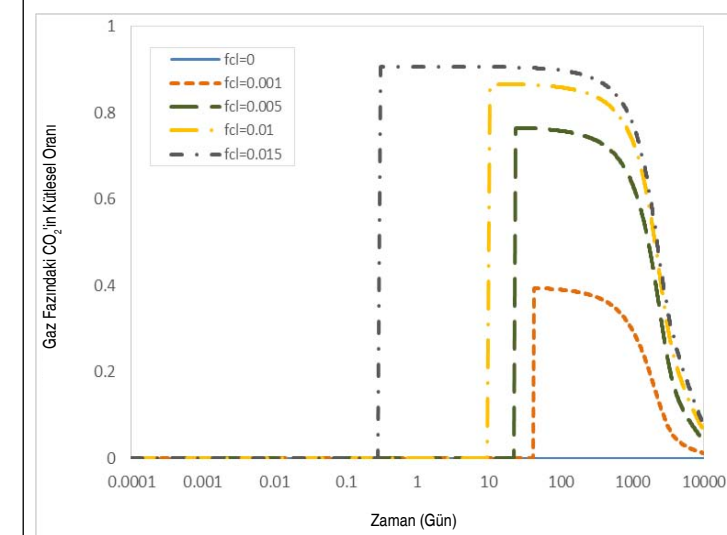
Şekil 6’da gaz doymuşluğunun zamanla nasıl değiştiği görülmektedir. Beklendiği gibi, ayrışma gerçekleştikten sonra gaz doymuşluğu artmaya başlar. Daha yüksek karbon dioksit oranlarında ise gaz doymuşluğu daha önceden meydana gelmektedir.

Şekil 7, suyun içindeki karbon dioksit oranının nasıl değiştiğini göstermektedir. Buna göre, karbon dioksit miktarları üretim ile azalım göstermektedir. Bu da beklenen bir sonuçtur; çünkü ayrışma basıncına eriştikten sonra suyun içindeki karbon dioksit, gaz fazına geçmektedir.

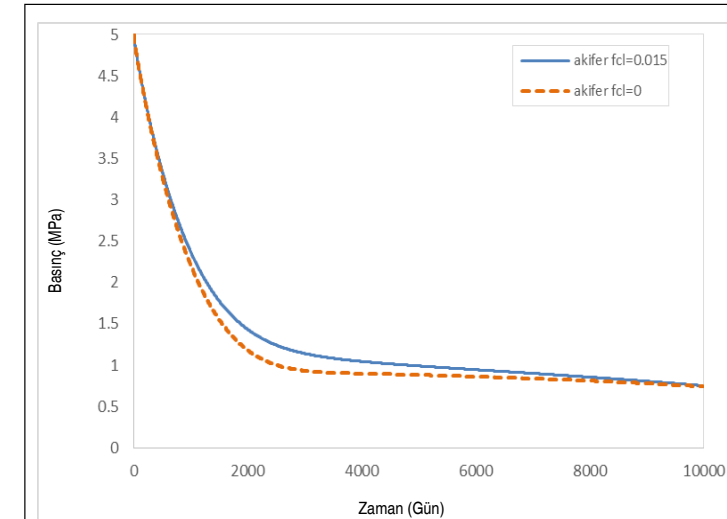
Son olarak Şekil 8’de, gaz fazı içindeki karbon dioksit miktarının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Gaz fazı oluşmaya başladığı an, gaz içindeki karbon dioksit oranının ani bir artış ile çok yüksek değerlere çıktığı gözlemlenir. Bu da açığa çıkan gaz fazının yüksek oranda karbon dioksitten meydana geldiğini göstermektedir. Üretim zamanı



Şekil 7. Suyun İçindeki Karbon dioksit Oranının Değişimi



Şekil 8. Gaz Fazı İçindeki Karbon dioksit Miktarının Değişimi



Şekil 9. Besleme Kaynağının İçerisindeki CO<sub>2</sub> Miktarına Göre Rezervuar Basıncının Değişimi

ve hızına bağlı olarak da zamanla gaz fazı içindeki karbon dioksit miktarı azalmaktadır.

### 3.2 Besleme Kaynağındaki CO<sub>2</sub> Miktarının Etkisi

Bu uygulamada, rezervuarı besleyen kaynak ve akiferdeki çözünmüş CO<sub>2</sub> miktarının rezervuar performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Burada da ilk uygulamadaki rezervuar özellikleri geçerlidir. Besleme kaynağının içerisinde çözünmüş CO<sub>2</sub> olmaması ve kütleli olarak %1,5 oranında çözünmüş CO<sub>2</sub> olması durumları ele alınmıştır.

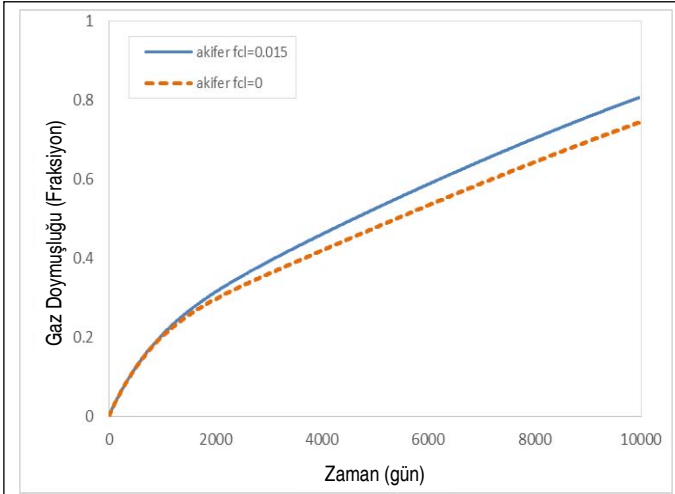
Şekil 9’da, rezervuarın basınç davranışı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, iki faza geçildiğinde, eğer rezervuarı besleyen akiferde CO<sub>2</sub> varsa, karbon dioksitin kısmi basıncının da etkisiyle rezervuardaki basınç düşümü daha az olmaktadır.

Gazlaşma noktası basıncına ulaşıldıktan sonra gaz fazı açığa çıktığı için gaz doymuşluğu artmaktadır. Rezervuarı besleyen akiferde çözünmüş CO<sub>2</sub> varsa, gaz doymuşluğundaki artış Şekil 10’da görüldüğü üzere daha fazladır. Bu artış, yaklaşık 3500 günden sonra daha da artmaktadır; çünkü Şekil 11 ve 12’den anlaşıldığı üzere, akiferde CO<sub>2</sub> olmadığı durumda üretime bağlı olarak rezervuardaki CO<sub>2</sub> tükenmiştir ve bu gaz doymuşluğunu negatif etkilemiştir.

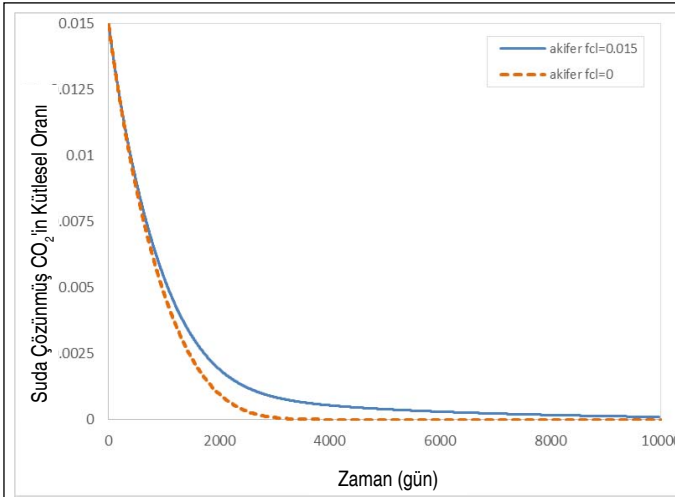
Şekil 11 ve 12, sırasıyla, besleme kaynağının içerisindeki CO<sub>2</sub> miktarına göre rezervuar suyundaki ve gaz fazındaki CO<sub>2</sub>'in kütleli oranındaki değişimleri göstermektedir. Suda çözünmüş CO<sub>2</sub> miktarı üretim ile azalmaktadır; ama bu azalım, eğer besleme kaynağında CO<sub>2</sub> varsa daha yavaş gerçekleşir. Rezervuarı besleyen akiferde CO<sub>2</sub>'in olmadığı durumda üretime bağlı olarak CO<sub>2</sub> tamamen tükenmiştir. Gaz fazındaki CO<sub>2</sub> miktarı başlangıçta sistemde gaz olmadığı için sıfırdır ve gazlaşma noktası basıncına ulaşıldıktan sonra gaz fazı açığa çıkmaya başlar. Eğer rezervuarı besleyen akiferde başlangıçta çözünmüş CO<sub>2</sub> varsa, gaz fazındaki CO<sub>2</sub>'in kütleli orandaki azalım, akiferden rezervuar suyuna gelen CO<sub>2</sub> miktarı ile yavaşlar, aksi taktirde Şekil 12’de görüldüğü gibi CO<sub>2</sub>, üretim hızına ve zamana bağlı olarak tamamen bitebilir.

### 3.3 Reenjeksiyon Miktarının Etkisi

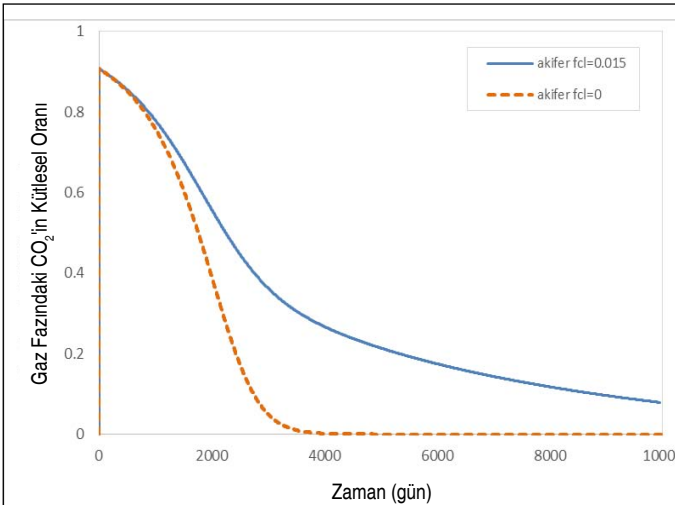
Üçüncü uygulamada, rezervuara reenjeksiyon yapılması durumunda jeotermal sistemin performansı incelenmiştir. Reenjeksiyon yokken ve sırasıyla %50, %80 ve %100 reenjeksiyon olması senaryoları araştırılmıştır.



Şekil 10. Besleme Kaynağının İçerisindeki CO<sub>2</sub> Miktarına Göre Rezervuarın Gaz Doymuşluğunun Değişimi



Şekil 11. Besleme Kaynağının İçerisindeki CO<sub>2</sub> Miktarına Göre Rezervuar Suyunda Çözünmüş CO<sub>2</sub>'in Kütle Oranındaki Değişim



Şekil 12. Besleme Kaynağının İçerisindeki CO<sub>2</sub> Miktarına Göre Rezervuarda Gaz Fazında Bulunan CO<sub>2</sub>'in Kütle Oranındaki Değişim

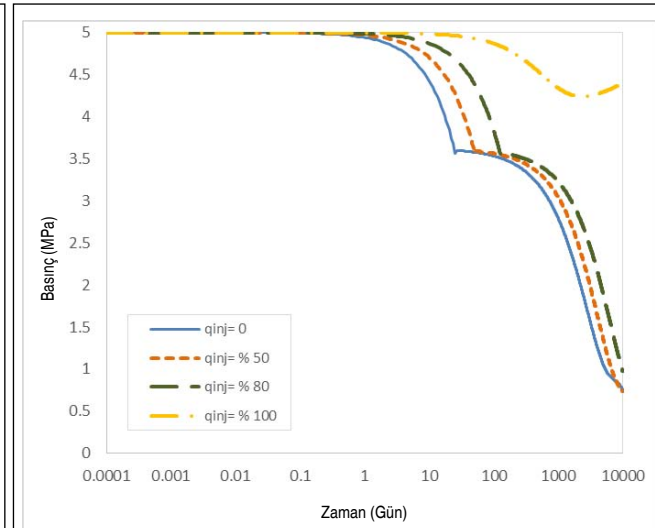
Tablo 4. Jeotermal Sistemin Özellikleri

Kaba Hacim (m <sup>3</sup> )	1×10 <sup>9</sup>
Gözeneklilik (Kesir)	0.2
İlk Basınç (Pa)	50×10 <sup>5</sup>
İlk Sıcaklık (K)	450
Kayaç Sıkıştırılabilirliği (1/Pa)	1×10 <sup>-9</sup>
Kayaç Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	0
Kayaç Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	2600
Kayacın Isıl Kapasitesi j/(kg.K)	1000
Kayaç Geçirgenliği (m <sup>2</sup> )	1×10 <sup>-15</sup>
Üretim Hızı (kg/s)	200
Çözünmüş CO <sub>2</sub> Miktarı (Kesir)	0.01
Reenjeksiyon Sıcaklığı (K)	373.15

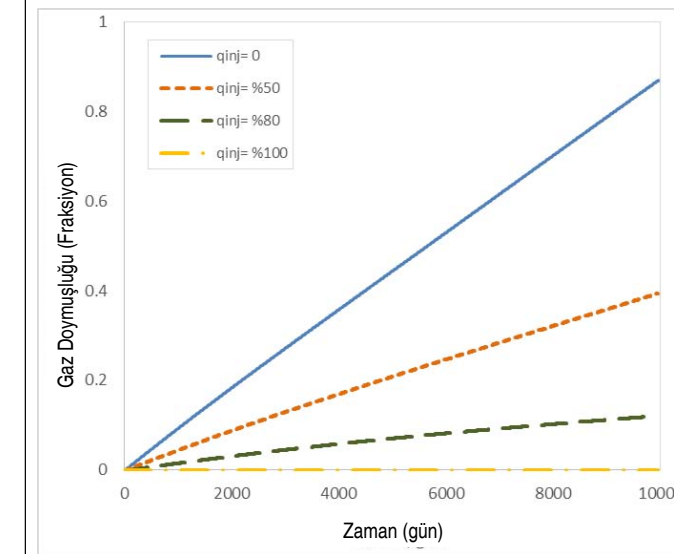
Oluşturulan jeotermal sistemin özellikleri Tablo 4'te verilmektedir.

Şekil 13'te görüldüğü üzere, reenjeksiyon miktarı arttıkça basınç düşümü azalmaktadır. Reenjeksiyon ile beraber akiferden de belli miktarda beslenme olduğu için %100 reenjeksiyon durumunda, rezervuarın başlangıçtaki basınç değerinde çok fazla bir düşüm olmamıştır ve iki fazlı sistem oluşmamıştır.

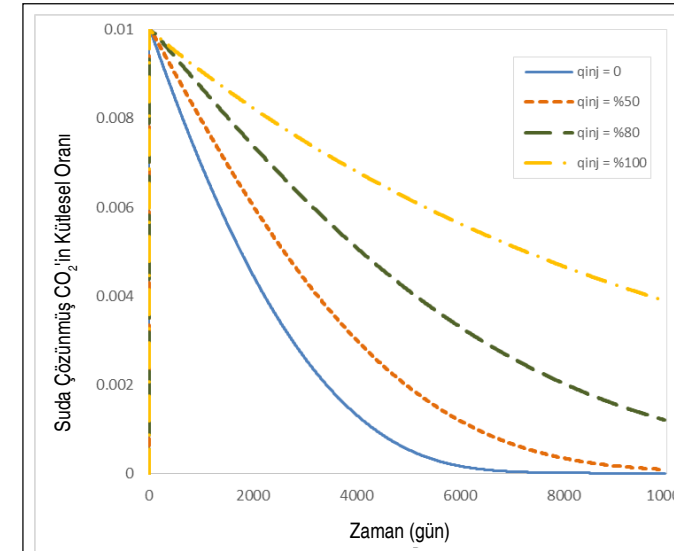
Şekil 14'te, sistemdeki gaz doymuşluğunun davranışı verilmiştir. Sistemde gazlaşma noktası basıncına gelindikten sonra gaz fazı açığa çıkmaya başlar. Gaz fazının açığa çıkma zamanı reenjeksiyon miktarının artması ile ötelenmektedir. Reenjeksiyon olmaması durumunda, üretimle beraber oluşan basınç düşümü ile gaz doymuşluğu miktarı artar. Basınç düşümü, reenjeksiyon ile azaldığından gaz doymuşluğu



Şekil 13. Farklı Reenjeksiyon Yüzdelerine Göre Basınç Davranışı



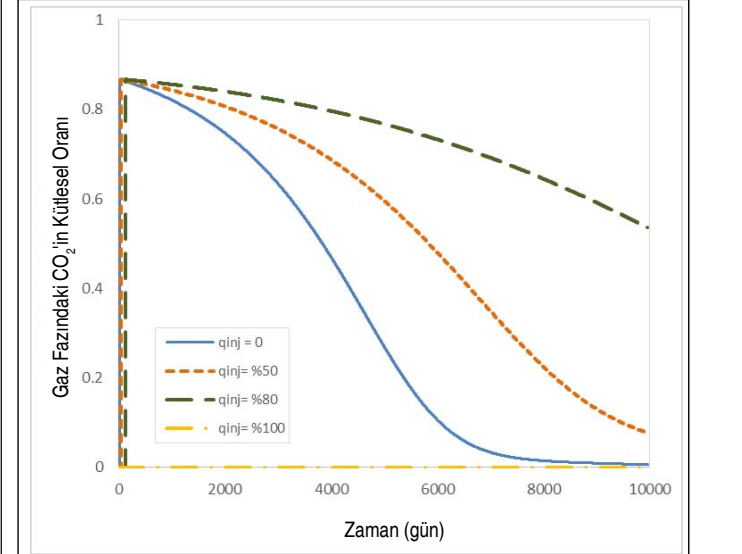
Şekil 14. Farklı Reenjeksiyon Yüzdelerine Göre Gaz Doymuşluğu Davranışı



Şekil 15. Farklı Reenjeksiyon Yüzdelerine Göre Suda Çözünmüş CO<sub>2</sub>'in Kütle Oranındaki Değişim

ğu miktarı da azalır. Örnek uygulamada, %100 reenjeksiyon olma durumunda basınç düşümü çok az olduğundan sistem, sıvı fazda üretime devam etmiş ve gaz fazı açığa çıkmamıştır.

Şekil 15 ve 16, sırasıyla, sudaki ve gaz fazındaki CO<sub>2</sub>'in kütle oranındaki değişimleri göstermektedir. Suda çözünmüş CO<sub>2</sub> miktarı üretim ile azalmaktadır; ama bu azalım, reenjeksiyon hızındaki artış ile azalır. Gaz fazındaki CO<sub>2</sub> miktarı başlangıçta sistemde gaz olmadığı için sıfırdır ve gazlaşma noktası basıncına ulaşıldıktan sonra, büyük miktarda CO<sub>2</sub>'den oluşan gaz fazı açığa çıkmaya başlar. Reenjeksiyon miktarı arttıkça, gaz fazı daha geç açığa çıkar ve üretim, oluşan CO<sub>2</sub>'in kütle oranındaki azalımı yavaşlar.



Şekil 16. Farklı Reenjeksiyon Yüzdelerine Göre Gaz Fazındaki CO<sub>2</sub>'in Kütle Oranındaki Değişim

## SONUÇ

- Bu çalışmada, CO<sub>2</sub> içeren jeotermal sistemlerin basınç ve sıcaklık davranışını veren boyutsuz (lumped) parametre modeli geliştirilmiştir.
- CO<sub>2</sub>'in en çok gazlaşma noktası basıncı üzerinde etkisi vardır ve sıvı fazda bulunan suyun içerisinde çok az olsa dahi, CO<sub>2</sub> 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.
- Farklı modelleme çalışmaları yapılarak üretim, doğal beslenme ve re-nejeksiyon sebebi ile rezervuarda oluşan basınç, sıcaklık, doymuşluk ve faz davranışlarındaki değişimler ile karbondioksit miktarındaki değişim de gözlemlenmiştir.
- Bu modelleme çalışması ile, karbondioksit içeren jeotermal sistemlerin davranışı kapsamlı olarak incelenebilir ve jeotermal sistemin gelecekteki performansı sürdürülebilirlik açısından değerlendirilerek en uygun işletme stratejileri belirlenebilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız (Proje No: 113M425).

## KAYNAKÇA

1. **Alkan, H., Satman, A.** 1990. "A New Lumped Parameter Model For Geothermal Reservoirs in the Presence of Carbon Dioxide," *Geothermics*, vol. 19, p. 469-479.
2. **Atkinson, P. G., Celati, R., Corsi, R., Küçük, F.** 1980. "Behavior of the Bagnore Steam/CO<sub>2</sub> Geothermal Reservoir, Italy," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 20, p. 228-238.
3. **Battistelli, A., Calore, C., Pruess, K.** 1997. "The Simulator TOUGH2/EWASG for Modelling Geothermal Reservoirs with Brines and Non-Condensable Gas," *Geothermics*, vol. 26, p. 437-464.
4. **Cramer, S. D.** 1982. "The Solubility of Methane, Carbon Dioxide and Oxygen in Brines From 0° to 300°C," *US Bureau of Mines, Report no. 8706, U.S.A.*, p. 16.
5. **Ellis, E. J., Golding, R. M.** 1963. "The Solubility of CO<sub>2</sub> Above 100°C in Pure Water and in Sodium Chloride Solutions," *American Journal of Science*, vol. 261, p. 47-60.
6. **Hoşgör, F. B., Çınar, M., Hakkıdır, F., Türeyen, O. I., Satman, A.** 2013. "A New Lumped Parameter (Tank) Model for Reservoirs Containing Carbon Dioxide," *Proceedings, 38<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA.*
7. **IAPWS, 2007.** Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for The Thermodynamic Properties of Water and Steam.
8. **Korkmaz, E. D., Serpen, U., Satman, A.** 2014. "Geothermal Boom in Turkey: Growth in Identified Capacities and Potentials," *Renewable Energy*, vol. 68, p. 314-325.
9. **O'sullivan, M. J., Bodvarsson, G. S., Pruess, K., Blakeley, M. R.** 1985. "Fluid and Heat Flow in Gas-Rich Geothermal Reservoirs," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 25, p. 215-226.
10. **Satman, A., Sarak, H., Onur, M., Korkmaz, E.P.** 2005. "Modeling of Production/Reinjection Behavior of the Kizildere Geothermal Field by a 2-Layer Geothermal Reservoir Lumped Parameter Model," *Proceedings, World Geothermal Congress, Antalya.*
11. **Satman, A., Ugur, Z.** 2002. "Flashing Point Compressibility of Geothermal Fluids with Low CO<sub>2</sub> Content and Its Use in Estimating Reservoir Volume," *Geothermics*, vol. 31, p. 29-44.
12. **Satman, A.** 2014. Kişisel Görüşme, 26 Eylül 2014.
13. **Schilthuis, R. J.** 1936. "Active Oil and Energy," *Trans. AIME*, vol. 118, p. 33-52.
14. **Sutton, F. M.** 1976. "Pressure-Temperature Curves for a Two-Phase Mixture of Water and Carbon Dioxide," *New Zealand Journal of Science*, vol. 19, p. 297-301.
15. **Türeyen, O. I., Akyapı, E.** 2011. "A Generalized Non-Isenthalpic Tank Model for Liquid Dominated Geothermal Reservoirs," *Geothermics*, vol. 40, p. 50-57.
16. **Whiting, R. L., Ramey, H. J.** 1969. "Application of Material and Energy Balances to Geothermal Steam Production", *Journal of Petroleum Technology*, vol. 21, p. 893-900.
17. **Zyvolosky, G. A., O'sullivan, M. J.** 1980. "Simulation of a Gas-Dominated, Two-Phase Geothermal Reservoir," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 20, p. 52-58.

<http://omys.mmo.org.tr/muhendismakina/>

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

Mühendis ve Makina Dergisi

Online Makale Yönetimi



| ANA SAYFA (GİRİŞ SAYFASI) |

YAZAR

HAKEM

EDİTÖR

» HOŞGELDİNİZ

YAZAR GİRİŞİ

e-Posta :

Şifre :

[Yeni Kullanıcı](#) | [Şifremi Unuttum](#)

MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ'ne makale gönderebilmek için sisteme kayıt olmanız gerekmektedir. Kayıt olabilmek için sol kısımda yer alan [Yeni Kullanıcı] bağlantısına tıklayınız.

Daha önce kayıt olduysanız, e-posta adresiniz ve şifrenizi girmeniz yeterlidir.

Şifrenizi hatırlamıyorsanız, şifrenizin e-posta adresinize gönderilebilmesi için [Şifremi Unuttum] bağlantısına tıklayınız.

Sistemle ilgili sorularınızı [yavin@mmo.org.tr](mailto:yavin@mmo.org.tr) e-posta adresine gönderebilirsiniz.

**makalelerinizi online sistem üzerinden ulaştırabilirsiniz**