



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

KARBONDİOKSİTİN JEOTERMAL REZERVUARIN ÜRETİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

**FATMA BAHAR HOŞGÖR
ÖMER İNANÇ TÜREYEN
ABDURRAHMAN SATMAN
MURAT ÇINAR
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

KARBONDİOKSİTİN JEOTERMAL REZERVUARIN ÜRETİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Fatma Bahar HOŞGÖR
Ömer İnanç TÜREYEN
Abdurrahman SATMAN
Murat ÇINAR

ÖZET

Günümüzde, sürdürülebilir ve yenilenebilir olmasının yanında ucuz ve temiz bir enerji kaynağı olan jeotermal enerji kullanımı giderek artmaktadır. Ülkemizdeki jeotermal sahalar incelendiğinde, rezervuarların başlangıçta sıvı etken oldukları ve rezervuar suyunun içinde etkisi göz ardı edilemeyecek miktarda çözünmüş karbondioksit bulunduğu görülür. Suyun termodinamik davranışları, faz kompozisyonları ve rezervuarın basınç ve sıcaklık davranışları karbondioksit varlığından oldukça etkilenmektedir. Bu çalışmada, jeotermal sistem tek veya çoklu tanklar ele alınarak kütle ve enerji denklemleri herbir tank için beraber çözülmüş, bu sayede üretim, doğal beslenme ve re-enjeksiyon sebebi ile rezervuarda oluşan basınç ve sıcaklık değişimleri ile karbondioksit miktarındaki değişim de modellenmiştir. Duyarlılık analizleri yapılarak, çözünmüş karbondioksit oranının, üretim hızının, re-enjeksiyon miktarının jeotermal rezervuarın basınç, sıcaklık ve gaz doymuşluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir. 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.

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

ABSTRACT

Nowadays, utilization of geothermal energy has increased greatly due to its cleanliness, safeness, renewability and sustainability. 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. Even small quantities of carbon dioxide have profound effects on the thermodynamic behavior of water, phase compositions and the reservoir pressure and temperature behavior. In this study each component of a geothermal system is represented using a tank that is composed of fluid and rock and three conservation equations; mass balances on water and carbon dioxide and an overall energy balance; are solved simultaneously for each tank. By doing so, we are able to keep track of average reservoir pressure, average reservoir temperature and the amount of carbon dioxide. Sensitivity analysis are made to study the effect of dissolved CO₂ and to monitor the change of pressure, temperature and gas saturation that occurs from production, reinjection and natural recharge. This modeling study can be utilized to better understand the behavior of hot water systems that contain carbon dioxide and to forecast future performance of the geothermal system.

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

1. GİRİŞ

Temiz, güvenli sürdürülebilir ve yenilenebilir özellikleri nedeniyle jeotermal enerji günümüzde çekiciliğini dünyada ve ülkemizde arttırmaktadır. Özellikle Türkiye’de son dokuz yıl içinde jeotermal enerjinin kullanımında büyük gelişmeler sağlanmıştır. Mevcut olarak Türkiye’nin elektrik kurulu kapasitesi 310 MW_e olarak ve doğrudan kullanım kapasitesi ise 2705 MW_t olarak verilmektedir [12]. 2005 yılında elektrik kurulu kapasitesinin 17.8 MW_e [8] olduğu değerlendirilirse ülkemizde jeotermal enerji kullanımının ne derecede geliştiği görülmektedir. Korkmaz vd., [8] sıcaklığı 100°C’den yüksek 38 sahada yaptıkları çalışma sonucunda elektrik potansiyelinin istatistiksel P₁₀ değerini 1673 MW_e P₉₀ değerini ise 3140 MW_e olarak vermektedir. Yine aynı çalışma Isıl potansiyel için P₁₀ değerini 5600 MW_t ve P₉₀ değerini ise 11400 MW_t olarak vermektedir. Mevcut kullanım ve potansiyel dikkate alındığında jeotermal enerjinin kullanımının ülkemizde önümüzdeki yıllarda gelişme potansiyelinin olduğu görülmektedir.

Birçok jeotermal rezervuar karbondioksit içermektedir. Sıvının etken olduğu jeotermal rezervuarlarda su içerisinde çözünmüş karbondioksit miktarı kütlece %5’e kadar çıkmaktadır. Örneğin Türkiye’nin önemli jeotermal sahalarından biri olan Kızıldere sahasında çözünmüş karbondioksit miktarı %1.5’tir [10]. 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 gazlaşma (ayırışma) noktası basıncı karışımdaki karbondioksit oranına bağlı olarak değişir. Karbondioksit içeren jeotermal sistemler saf su sistemlerine nazaran daha yüksek gazlaşma noktası basıncına sahiptir ve karbondioksit miktarı arttıkça gazlaşma noktası basıncı da artar.

Literatürde jeotermal sistemlerin modellenmesinde karbondioksitin etkisi birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Zvoloski ve O’Sullivan [17], jeotermal rezervuarların sayısal simülasyonunda korunum denklemlerinin kullanılmasını ayrıntılı 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 ve diğerleri [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 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], Whitening ve Ramey [8] tarafından saf su sistemi için geliştirilmiş olan boyutsuz parametre modelini su-karbondioksit sisteminin davranışını veren bir termodinamik paket ekleyerek geliştirmişlerdir.

Batistelli vd., [3] ise TOUGH2 simülatörünün rezervuar akışkanının tuzlu su ve akışkan içinde yoğunlaşmayan gazlar olması durumunda sayısal çözümlerin nasıl yapıldığından ve özellikle de asıl değişkenlerin nasıl alınması gerektiğinden bahsetmiştir. Hoşgör vd., [6] tarafından gerçekleştirilen çalışma aslında bu bildiride yapılan çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Fakat Hoşgör vd., [6] verdiği sonuçlar oldukça basit sistemler için verilmiştir. Bu çalışmada, karbondioksit içeren jeotermal sistemlerin davranışı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Jeotermal sistem tek veya çoklu tanklar ele alınarak kütle ve enerji denklemleri herbir tank için beraber çözülmüş, üretim, doğal beslenme ve re-enjeksiyon sebebi ile rezervuarda oluşan basınç ve sıcaklık değişimleri ile karbondioksit miktarındaki değişim de gözlemlenmiştir. Bu sayede jeotermal sistemin performansı değerlendirilerek ileriye yönelik işletme stratejileri belirlenebilir.

2. KÜTLE VE ENERJİ KORUNUMU DENKLEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde su-karbondiyoksit sistemlerinin davranışları ve geliştirilen modelin matematiksel temelleri verilmektedir. İlk kısımda, su – karbondiyoksit sistemlerinin davranışını modellemek amacıyla literatürde geliştirilen ve bu çalışmada kullanılan termodinamik paket açıklanacaktır. Bunu su – karbondiyoksit sistemlerinin davranışlarının açıklanması takip edecektir. Son olarak da geliştirilen lumped parametre modeli ayrıntılı bir şekilde 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.

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

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 [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'de verilen ilişkiyi vermektedir:

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

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

Tablo 1. Cramer [4] 'in Henry sabiti için verdiği ilişkide kullandığı sabit katsayılar.

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

Basitlik açısından sıvı fazdaki su-karbondiyoksit karışımının yoğunluk ve akma özellikleri sıvı suyun yoğunluk ve akma özelliklerine eşit alınacaktır. Sıvı fazdaki su-karbondiyoksit 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 CO₂'in entalpisi (J/kg) ve h_{sol} ise su karbondiyoksit solüsyonunun entalpisidir. h_{CO_2} Sutton [14] tarafından geliştirilen denklem ile hesaplanır.



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

Su karbondioksit 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 CO₂'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, 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 akma hızı değeri denklem 9 ile hesaplanır.

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

Burada, μ_G gaz fazın akma hızı (Pa.s), μ_s buharın akma hızı (Pa.s), μ_{CO_2} gaz fazdaki CO₂'in akma hızı ve f_{CG} gaz fazdaki CO₂'in oranıdır. Gaz fazın entalpi değeri denklem 10 kullanılarak hesaplanır (O'Sullivan vd., 1985):

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

Burada, h_G gaz fazın entalpisi (J/kg), h_s buharın entalpisi (J/kg) ve h_{CO_2} gaz fazdaki CO₂'in entalpisidir. Son olarak, herhangi bir sıcaklık ve basınçta gaz fazındaki CO₂'in kütle oranı denklem 11 ile hesaplanır:

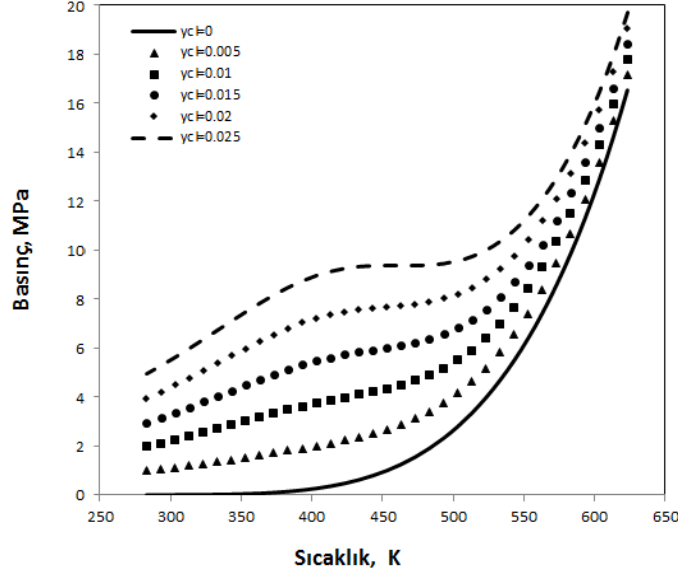
$$f_{CG} = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_G} \quad (11)$$

2.2 Karbondioksitin Suyun Özelliklerine Olan Etkileri

Bu bölümde çözülmüş karbon dioksitin su özellikleri üstüne olan etkileri incelenecektir. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi karbondioksitin varlığı suyun yoğunluk ve akma hızı değerlerini çok fazla etkilememektedir. Karbondioksitin en büyük etkisi ayrışma basıncı üstünde kendisini göstermektedir. Kütlece çok düşük miktarlardaki çözülmüş karbon dioksit oranları ayrışma basıncını önemli ölçülerde etkileyebilmektedir.

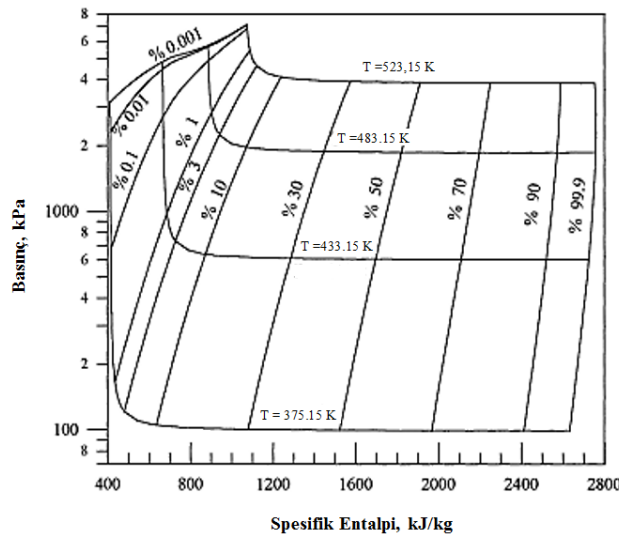
Şekil 1'de farklı kütle oranları için basınç – sıcaklık grafiği verilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi karbon dioksitin varlığının ayrışma basıncı üstüne etkileri oldukça büyüktür. Örneğin 473 K sıcaklığını ele alalım. Bu sıcaklık değerinde saf suyun ayrışma basıncı yaklaşık olarak 1.5 MPa'dır. Eğer suyun içinde çözülmüş karbon dioksit oranı $f_{CL}=0.005$ (yani kütlece %0.5) olursa bu durumda Şekil 1'den ayrışma basıncını yaklaşık olarak 3.1 MPa'a yükselmektedir. Eğer çözülmüş karbon dioksit oranı $f_{CL}=0.025$ (yani kütlece %2.5) olursa bu durumda ayrışma basıncı 8.9 MPa olmaktadır. Görüldüğü gibi karbondioksit oranındaki küçük artışlar ayrışma basıncında çok büyük artışlara neden olmaktadır. Eğer jeotermal sistemin modellenmesinde karbon dioksit oranı hesaba katılmaz ise kuyular içinde

ayırışma derinliği hesaplamalarında çok büyük hatalar yapılabilir. Sığ ayırışma derinlikleri beklenirken gerçek ayırışma derinlikleri çok daha derinlerde bulunabilir. Üretim sırasında eğer ayırışma noktası rezervuar içine girmişse bu durumda 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 ayırışma basıncının altındaki basınçlarda ortamda gaz oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi de gaz sıkıştırılabilirliği sıvı sıkıştırılabilirliklerine göre çok daha fazladır. Oluşan gaz fazı yapılan üretim karşı genleşerek basıncın daha yavaş düşmesini sağlar.



Şekil 1. Su içinde çözünmüş karbondioksitin ayırışma basıncı üstüne olan etkileri.

Şekil 2'de kütlece $f_{CL}=0.015$ (yani kütlece %1.5) oranında su içinde çözünmüş olan karbon dioksitin basınç – spesifik entalpi davranışı üstüne olan etkileri gösterilmektedir. Basınç azaldıkça ayırışma basıncına gelindiğinde gaz açığa çıkmaya başlamaktadır. İlk etapta izotermal eğriler üstünde basıncın hızla azaldığı görülmektedir. Bu, gazın ilk bileşiminin tamamına yakınının karbondioksitten 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 azalım davranışı saf suyununkiye daha da yaklaşmaktadır. Yani basıncın azalışı hemen hemen yok denecek kadar azdır.

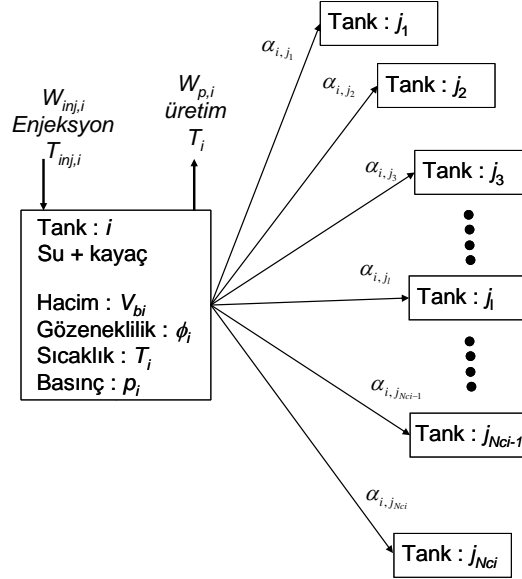


Şekil 2. Su içinde $f_{CL}=0.015$ kütle oranına sahip karbon dioksitin basınç – spesifik entalpi diyagramına olan etkisi [11].

2.3 Geliştirilen Model

Bu bölümde geliştirilen lumped parametre modelinin tüm matematiksel ayrıntıları verilmektedir. Lumpede parametre modellerinde jeotermal sistemin tanklardan oluştuğu varsayımı yapılmaktadır. Bu tanklar jeotermal sistemin farklı bileşenlerini temsil etmektedirler (rezervuar, akifer vb.). Tanklar arasındaki konfigürasyonlar değişebileceği gibi tankların sayıları da farklı jeotermal sistemler için farklılıklar gösterebilmektedir.

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



Şekil 3. Geliştirilen modelde herhangi bir i tankının özellikleri.

Geliştirilen modelde her bir tankın kayaç ve sudan (su buharı, 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 ϕ_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'deki i tankının bağlantı yaptığı N_{ci} kadar tank olduğunu varsayalım. Kütle ve enerji alış verişleri i tankı ile tüm bu tanklar ile gerçekleştirilecektir. 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 gerçekleştirilmektedir. 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_{L,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 α_{L,i,j_i} besleme indeksi (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, 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 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 karşılaştırma sırasında ayarlanabilecek bir parametre olan ψ_{i,j_i} 'nin içinde yer aldıklarından k , A ve d 'nin değerlerinin bireysel olarak 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 çözümlenmesine dayanmaktadır. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir:

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

2.3.1 Su için kütle dengesi denklemi

Su için basit kütle dengesi denklemini denklem 16'da 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'da ilk terim i tankı içindeki kütle 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 is yapılan sıvı su enjeksiyon debisini göstermektedir. Anlaşılacağı 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.

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

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. Δt 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.

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

2.3.2 Kayaç ve akışkanlar için enerji dengesi denklemi

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

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

Burada C spesifik ısı kapasitesini (j/(kgK)), u ise spesifik iç enerjiyi (j/kg) göstermektedir. Denklem 19’da 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.

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

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

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

2.3.3 Karbondioksit üstünde uygulanan kütle dengesi denklemi

Karbondioksit için kullanılan kütle dengesi denklemi denklem 22’de verilmektedir.

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

Denklem 22’de birinci terim karbon dioksitin sıvı su ve gaz fazındaki birikimini göstermektedir. İkinci terim diğer tanklardan sıvı su içinde gelen karbondioksit debisini, üçüncü terim diğer tanklardan gaz fazı ile gelen karbon dioksit debisini, dördüncü terim sıvı üretimi ile çıkan karbon dioksit debisini ve son terim de gaz üretimi ile çıkan karbon dioksit miktarını vermektedir.

Diğer tanklardan olan karbon dioksit geçişi için kütle oranının hangi koşulda kullanılacağı denklem 23’de verilmektedir.

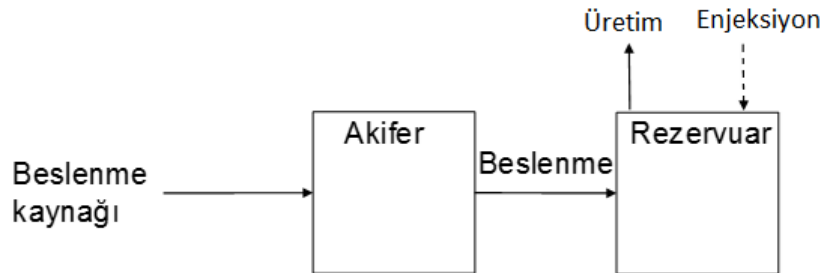
$$f_{\xi} = \begin{cases} f_i & \text{if } p_i > p_{j_i} \\ f_{j_i} & \text{if } p_i < p_{j_i} \end{cases} \quad (23)$$

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

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

3. ÖRNEK UYGULAMALAR

Bu bölümde, rezervuar suyunun içinde çözülmüş karbon dioksitin olması durumunda rezervuarın üretim performansının nasıl olduğu araştırılmıştır. CO₂’in jeotermal rezervuarlardaki etkisini gözlemlemek amacıyla farklı örnekler verilmiştir. Geliştirilen model, Şekil 4’de verilen rezervuar ve akiferi temsil eden iki tanklı yapay örnek üzerinde uygulanmıştır.



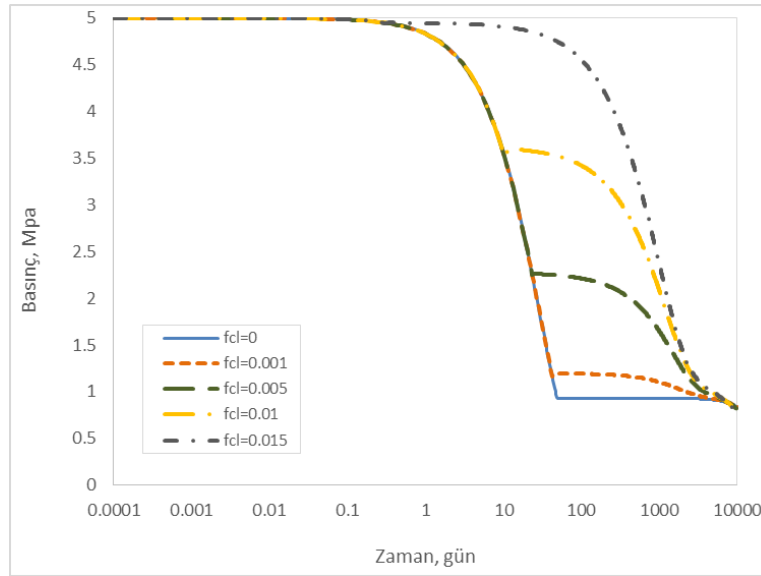
Şekil 4. Lumped parametre modelinde jeotermal sistemlerin modellenmesi için kullanılan örnek tank konfigürasyonu.

3.1 CO₂ 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 3’de verilmektedir. Rezervuar 10000 gün boyunca 300 kg/s ile üretim yapmıştır. Dört farklı karbon dioksit oranı (%0, %0.5, %1, %1.5) için model çalıştırılmış ve böyle bir sistemin basınç, gaz doymuşluğu, suyun içindeki karbon dioksit oranının değişimi ve gaz fazındaki çözünmüş CO₂ oranlarının davranışı incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 5 – Şekil 8 arasında verilmektedir.

Tablo 3. Jeotermal sistemin özellikleri.

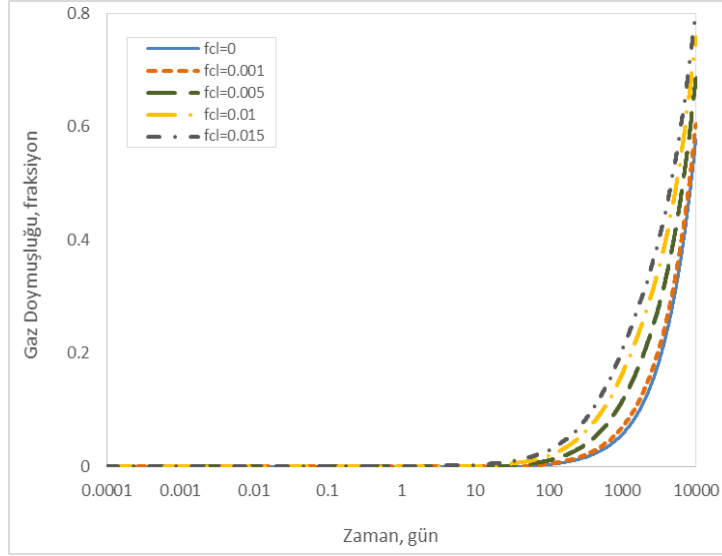
Kaba hacim, m ³	1×10 ⁹
Gözeneklilik, kesir	0.1
İlk basınç, Pa	50×10 ⁵
İlk sıcaklık, K	450
Kayaç sıkıştırılabilirliği, 1/Pa	1×10 ⁻⁹
Kayaç ısı genleşme katsayısı, 1/K	0
Kayaç yoğunluğu, kg/m ³	2600
Kayacın ısı kapasitesi, j/(kg.K)	1000
Kayaç geçirgenliği, m ²	1×10 ⁻¹⁴
Üretim debisi, kg/s	300
Enjeksiyon debisi, kg/s	0



Şekil 5. Farklı karbondioksit oranları için basınç davranışı.

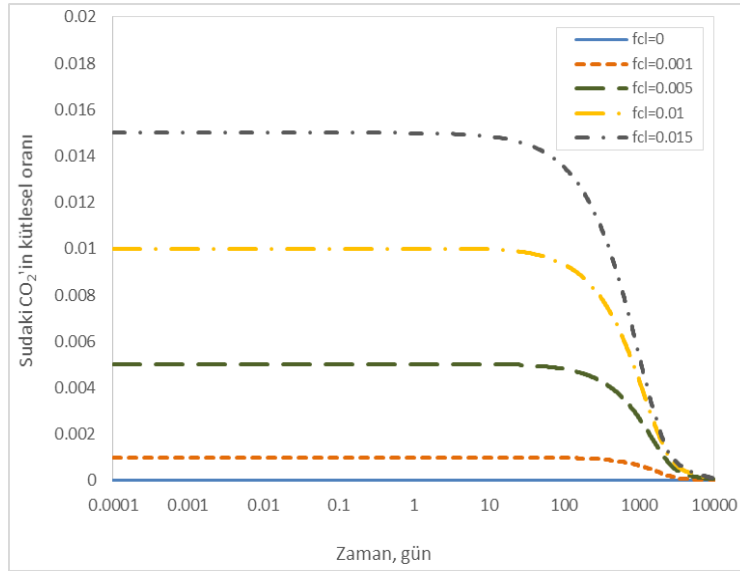
Şekil 5’de farklı karbon dioksit oranları için basınç davranışı görülmektedir. Suyun içinde hiç karbon dioksit bulunmaması durumunda basınç hızlı bir şekilde azaldıktan sonra ani bir değişim ile basınç düşümü yavaşlamıştır. İlk baştaki hızlı azalım rezervuarda sadece sıvı su fazının bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi sıvı suyun sıkıştırılabilirliği gazlara göre çok düşük olduğundan basınç hızla azalmaktadır. Yaklaşık 100 günde ayrışma basıncına geldiğinde ise gaz fazı (sadece su buharı 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 görülür. 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.



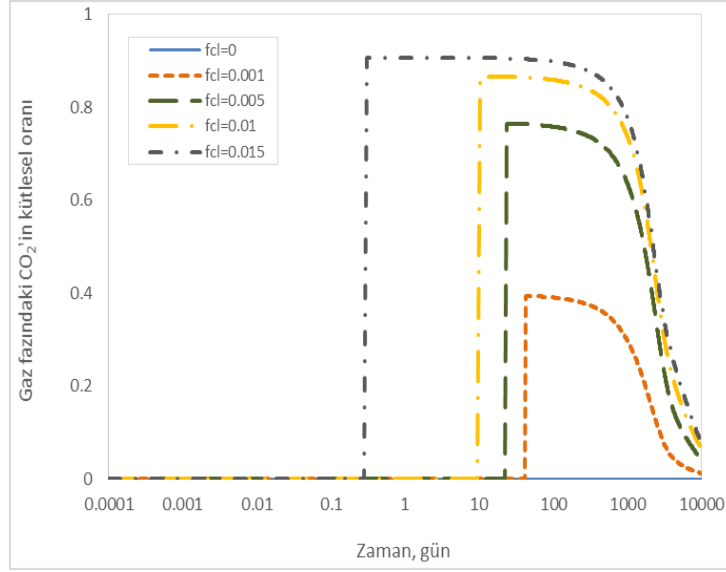
Şekil 6. Gaz doymuşluğunun zamanla değişimi.

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



Şekil 7. Suyun içindeki karbondioksit oranının değişimi.

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

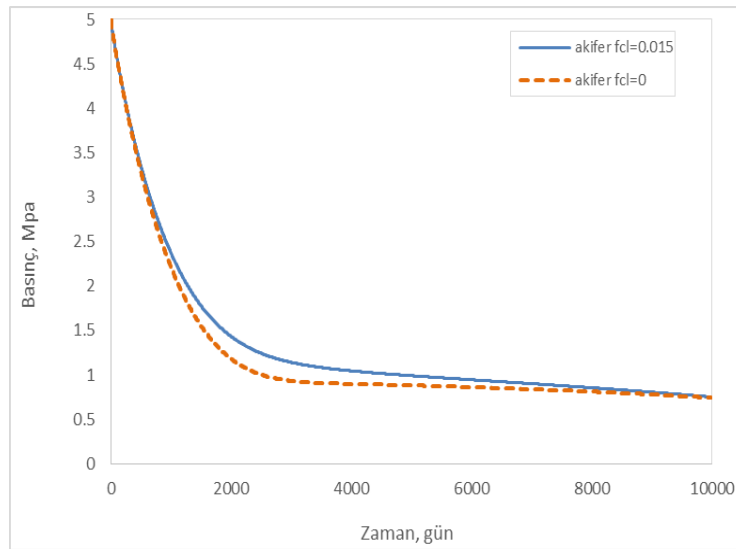


Şekil 8. Gaz fazı içindeki karbondioksit miktarının değişimi.

Son olarak Şekil 8'de gaz fazı içindeki karbondioksit miktarının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Gaz fazı oluşmaya başladığı an gaz içindeki karbondioksit oranının ani bir artış ile çok yüksek değerlere çıktığı gözlemlenir. Bu da açığa çıkan gaz fazının yüksek oranda karbondioksitten meydana geldiğini göstermektedir. Üretim zamanı ve hızına bağlı olarak da zamanla gaz fazı içindeki karbondioksit miktarı azalmaktadır.

3.2 Besleme kaynağındaki CO₂ miktarının etkisi

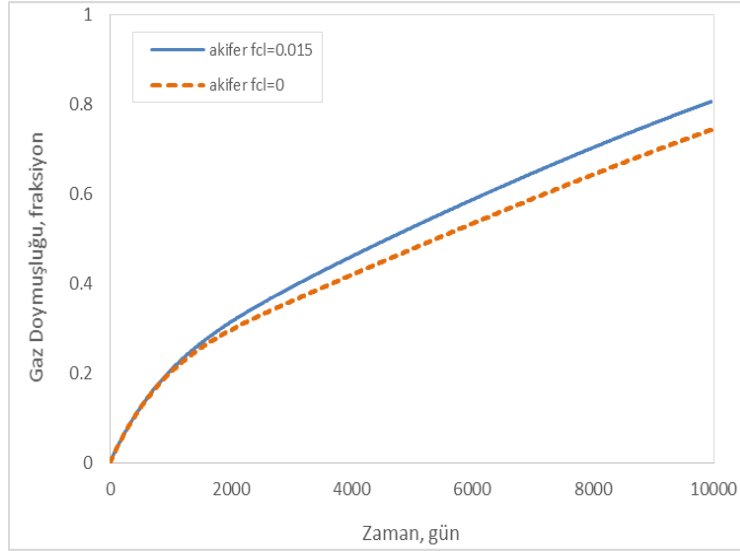
Bu uygulamada rezervarı besleyen kaynak ve akiferdeki çözünmüş CO₂ miktarının rezervuar performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Burada da, ilk uygulamadaki rezervuar özellikleri geçerlidir. Besleme kaynağının içerisinde çözünmüş CO₂ olmaması ve kütleli olarak %1.5 oranında çözünmüş CO₂ olması durumları ele alınmıştır.



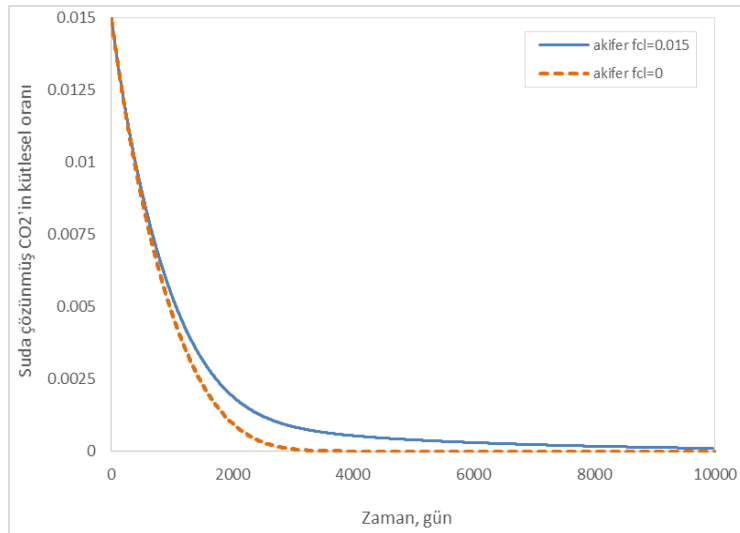
Şekil 9. Besleme kaynağının içerisindeki CO₂ miktarına göre rezervuar basıncının değişimi.

Şekil 9'da rezervuarın basınç davranışı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, iki faza geçildiğinde eğer rezervuarı besleyen akiferde CO_2 varsa karbondioksitin 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 çözülmüş CO_2 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_2 olmadığı durumda üretime bağlı olarak rezervuardaki CO_2 tükenmiştir ve bu gaz doymuşluğunu negatif etkilemiştir.



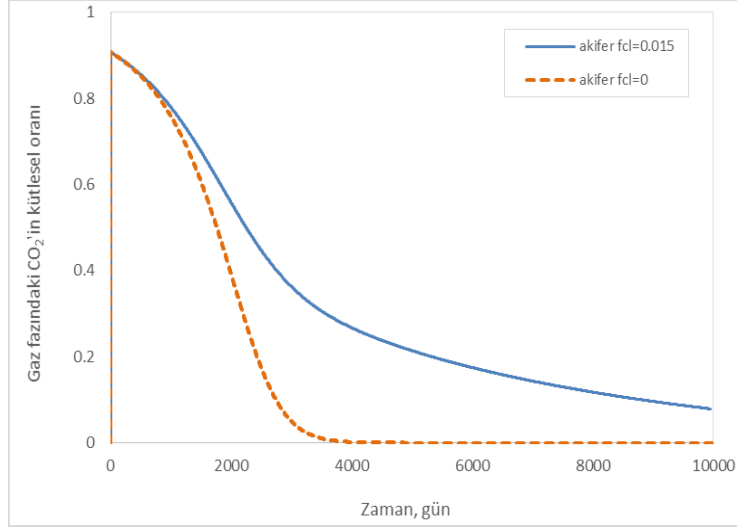
Şekil 10. Besleme kaynağının içerisindeki CO_2 miktarına göre rezervuarın gaz doymuşluğunun değişimi.



Şekil 11. Besleme kaynağının içerisindeki CO_2 miktarına göre rezervuar suyunda çözülmüş CO_2 'in kütle oranındaki değişim.

Şekil 11 ve 12 sırasıyla besleme kaynağının içerisindeki CO_2 miktarına göre rezervuar suyundaki ve gaz fazındaki CO_2 'in kütle oranındaki değişimleri göstermektedir. Suda çözülmüş CO_2 miktarı üretim ile azalmaktadır ama bu azalım eğer besleme kaynağında CO_2 varsa daha yavaş gerçekleşir.

Rezervuarı besleyen akiferde CO₂'in olmadığı durumda üretime bağlı olarak CO₂ tamamen tükenmiştir. Gaz fazındaki CO₂ miktarı başlangıçta sistemde gaz olmadığı için sıfırdır ve gazlaşma noktası basıncına ulaşıldıktan sonra gaz fazı açığa çıkmaya başlar. Eğer rezervuarı besleyen akiferde başlangıçta çözünmüş CO₂ varsa gaz fazındaki CO₂'in kütleli orandaki azalım akiferden rezervuar suyuna gelen CO₂ miktarı ile yavaşlar aksi taktirde Şekil 12'de görüldüğü gibi CO₂ üretim hızına ve zamana bağlı olarak tamamen bitebilir.



Şekil 12. Besleme kaynağının içerisindeki CO₂ miktarına göre rezervuarda gaz fazında bulunan CO₂'in kütleli oranındaki değişim.

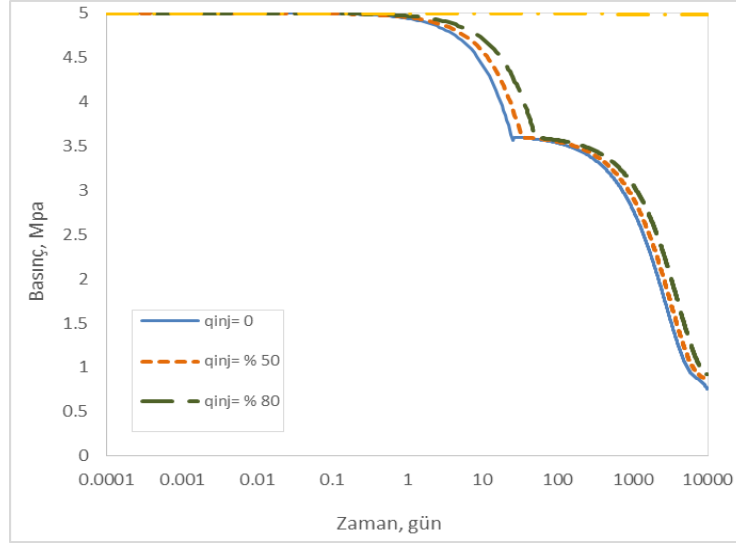
3.3 Reenjeksiyon miktarının etkisi

Üçüncü, uygulamada, rezervuara reenjeksiyon yapılması durumunda jeotermal sistemin performansı incelenmiştir. Reenjeksiyon yokken ve sırasıyla %50, %80 ve %100 reenjeksiyon olması senaryoları araştırılmıştır. Oluşturulan jeotermal sistemin özellikleri Tablo 4'de verilmektedir.

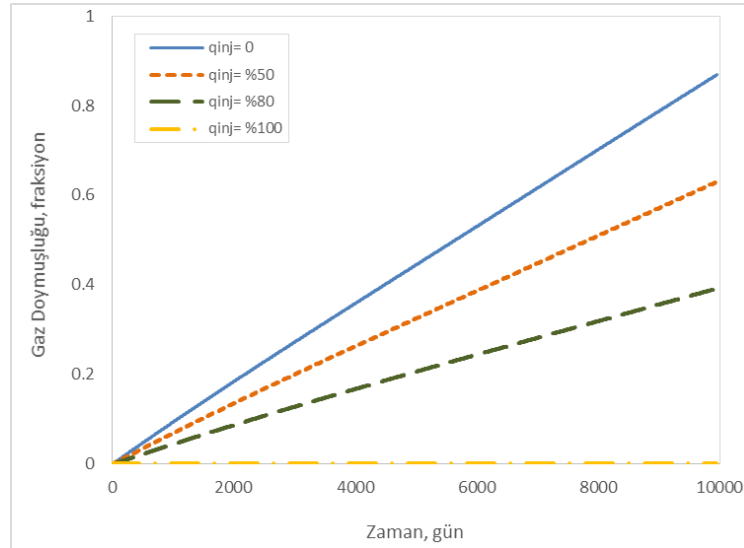
Tablo 4. Jeotermal sistemin özellikleri.

Kaba hacim, m ³	1×10 ⁹
Gözeneklilik, kesir	0.2
İlk basınç, Pa	50×10 ⁵
İlk sıcaklık, K	450
Kayaç sıkıştırılabilirliği, 1/Pa	1×10 ⁻⁹
Kayaç ısı genleşme katsayısı, 1/K	0
Kayaç yoğunluğu, kg/m ³	2600
Kayacın ısı kapasitesi, j/(kg.K)	1000
Kayaç geçirgenliği, m ²	1×10 ⁻¹⁵
Üretim hızı, kg/s	200
Çözünmüş CO ₂ miktarı, kesir	0.01
Reenjeksiyon sıcaklığı, K	373.15

Şekil 13'de görüldüğü üzere reenjeksiyon miktarı arttıkça basınç düşümü azalmaktadır. Reenjeksiyon ile beraber akiferden de beslenme olduğu için %100 reenjeksiyon durumunda rezervuarın başlangıçtaki basınç değerinden çok fazla bir düşüm olmamıştır.

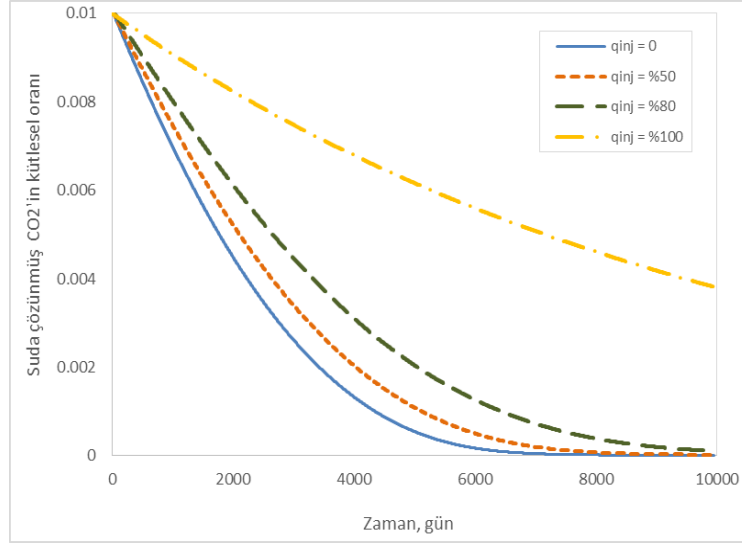


Şekil 13. Farklı reenjeksiyon yüzdelerine göre basınç davranışı.



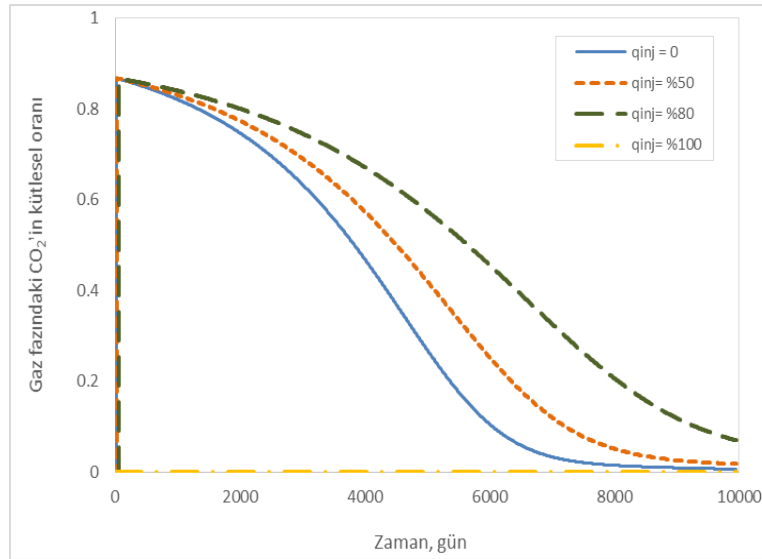
Şekil 14. Farklı reenjeksiyon yüzdelerine göre gaz doymuşluğu davranışı.

Şekil 14'de 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 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. Farklı reenjeksiyon yüzdelerine göre suda çözülmüş CO₂'in kütleli oranındaki değişim.

Şekil 15 ve 16 sırasıyla sudaki ve gaz fazındaki CO₂'in kütleli oranındaki değişimleri göstermektedir. Suda çözülmüş CO₂ miktarı üretim ile azalmaktadır ama bu azalım reenjeksiyon hızındaki artış ile azalır. Gaz fazındaki CO₂ miktarı başlangıçta sistemde gaz olmadığı için sıfırdır ve gazlaşma noktası basıncına ulaşıldıktan sonra büyük miktarı CO₂'den oluşan gaz fazı açığa çıkmaya başlar. Reenjeksiyon miktarı arttıkça gaz fazı daha geç açığa çıkar ve üretim oluşan CO₂'in kütleli orandaki azalım yavaşlar.



Şekil 16. Farklı reenjeksiyon yüzdelerine göre gaz fazındaki CO₂'in kütleli oranındaki değişim.

SONUÇLAR

- Bu çalışmada, CO₂ içeren jeotermal sistemlerin basınç ve sıcaklık davranışını veren bir boyutsuz (lumped) 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.
- Farklı sentetik örnekler üzerinde oluşturulan model uygulanmış, üretim, doğal beslenme ve re-enjeksiyon sebebi ile rezervuarda oluşan basınç ve sıcaklık değişimleri ile karbondioksit miktarındaki değişim de gözlemlenmiştir.
- Duyarlılık analizleri yapılarak, çözünmüş karbondioksit oranının, üretim hızının, re-enjeksiyon miktarının jeotermal rezervuarın basınç, sıcaklık ve gaz doymuşluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir.
- 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.

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] BATTISTELLI, A., CALORE, C. AND PRUESS, K., "The Simulator TOUGH2/EWASG for Modelling Geothermal Reservoirs with Brines and Non-Condensable Gas", *Geothermics*, v26, 437-464, 1997.
- [4] CRAMER, S.D., "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., 16 pp., 1982.
- [5] 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.
- [6] HOSGOR, F. B., ÇINAR, M., HAKLIDIR, F., TUREYEN, O.I., SATMAN, A., "A New Lumped Parameter (Tank) Model for Reservoirs Containing Carbon Dioxide", *Proceedings, 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 2013.*
- [7] IAPWS, "Revised Release on The IAPWS Industrial Formulation 1997 for The Thermodynamic Properties of Water and Steam", 2007.
- [8] KORKMAZ, E. D., SERPEN, U. and SATMAN, A., "Geothermal Boom in Turkey: Growth in Identified Capacities and Potentials", *Renewable Energy*, v68, 314-325, 2014.
- [9] 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.
- [10] SATMAN, A., SARAK, H., ONUR, M. AND KORKMAZ, E.P., "Modeling of Production/Reinjection Behavior of the Kizildere Geothermal Field by a 2-Layer Geothermal Reservoir Lumped Parameter Model", *Proceedings, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005.*
- [11] SATMAN, A. and UGUR, Z., "Flashing Point Compressibility of Geothermal Fluids with Low CO₂ Content and Its Use in Estimating Reservoir Volume", *Geothermics*, v31, 29-44, 2002.
- [12] SATMAN, A., Kişisel görüşme, 26 Eylül 2014.
- [13] SCHILTHUIS, R. J., "Active Oil and Energy", *Trans. AIME*, 118, 33-52, 1936.
- [14] 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.
- [15] TUREYEN, O. I. AND AKYAPI, E., "A Generalized Non-Isothermal Tank Model for Liquid Dominated Geothermal Reservoirs", *Geothermics*, 40, 50-57, 2011.
- [16] 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.
- [17] 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 ünvanını almıştır. Halen İTÜ Maden Fakültesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde "Karbondiyoksit içeren jeotermal sistemlerin modellenmesi" konulu doktora çalışmasına devam etmektedir. 2005-2015 Yılları arasında aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır.

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 öğretim üyesi olarak göreve başladı. Halen aynı bölümde öğretim üyesi görevine devam etmektedir. Lisans, yüksek lisans ve doktora seviyelerinde verdiği dersler arasında rezervuar mühendisliği, kuyu testleri analizi, petrol ve doğal gaz laboratuvarı, rezervuar karakterizasyonu, rezervuar mühendisliğinde optimizasyon yöntemleri yer almaktadır. İlgili duyduğu araştırma alanları arasında petrol ve jeotermal rezervuarlarının karakterizasyonu için tarihsel çakıştırma, kuyu testi analizleri, jeostatistiksel karakterizasyon, izotermal olmayan akış simülasyonu ve doğal gazın yeraltında depolanması 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.

Murat ÇINAR

Yard. Doç. Dr. Murat Çınar 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2005 yılında aynı bölümden yüksek mühendis unvanını aldıktan sonra bir süre bu bölümde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2007-2011 tarihleri arasında Amerika Birleşik Devletleri Stanford Üniversitesi'nde doktorasını tamamladı. Stanford Üniversitesi'nde yaptığı çalışmalardan ötürü Henry J. Ramey Fellowship ödülüne layık görüldü. 2012 yılından bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında ısı yöntemleri, kuyu testleri analizi ve jeotermal mühendisliği bulunmaktadır.