

# JEOTERMAL REZERVUARLARDA KARBON DİOKSİT MİKTARININ ÇOKLU TANK MODELİ İLE MODELLENMESİ

*Modeling Of Carbon Dioxide Amount With Multiple Tank Model In Geothermal Reserves*

**Alper Süleyman CAN**  
**Ömer İnanç TÜREYEN**  
**Abdurrahman SATMAN**

## ÖZET

Türkiye’de son on yılda jeotermal enerjinin kullanımı konusunda büyük gelişmeler yaşanmaktadır. Jeotermal enerjinin kullanımının artmasıyla birlikte jeotermal rezervuar mühendisliği uygulama ve araştırmaları da önemini gittikçe arttırmaktadır. Jeotermal rezervuarların sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için kullanımı kolay ve uygun bir rezervuar modelinin oluşturularak ileriye yönelik gerçekçi tahminler yapılması gereklidir. Jeotermal rezervuarlar için literatürde çeşitli modelleme yöntemleri mevcuttur.

Türkiye’deki jeotermal sahaların hemen hemen hepsinde jeotermal su içinde çözülmüş değişen miktarlarda karbon dioksit bulunmaktadır. Bu çözülmüş karbon dioksitin üretim açısından etkileri oldukça önemlidir. Genel olarak kuyu içinde akış sırasında karbon dioksit açığa çıkarak buhar üretimine yardımcı olmaktadır. Rezervuar içindeki karbon dioksit miktarı zaman içinde üretim / reenjeksiyondan dolayı değişime uğramaktadır. Üretime etkisinin büyük olmasından dolayı, ileriye yönelik tahminlerin yapılmasında rezervuar içinde zamanla değişen karbon dioksit miktarlarının da hesaba katılması gerekir.

Bu çalışmada, rezervuar içindeki basınç, sıcaklık ve karbon dioksit miktarının değişiminin modellenmesi amacıyla bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model kütle dengesi ve enerji dengesi denklemlerine dayanmaktadır. Kütle dengesi denklemleri jeotermal akışkan ve karbon dioksit için yapılmaktadır. Enerji dengesi ise sıcaklığın hesaplanması için tüm sistem için yapılmaktadır. Bu çalışmada ise sadece karbon dioksit miktarlarının değişimi göz önünde bulundurulacaktır. Yapılan çalışmada gerçekleştirilen üretim / reenjeksiyon stratejilerinin ve doğal beslenmenin karbon dioksit miktarının değişimi üstündeki etkileri incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Karbon dioksit, tank modelleri, jeotermal rezervuar mühendisliği.

## ABSTRACT

Over the last decade, there has been increasing activity in the use of geothermal energy in Turkey. With the increase in utilization of geothermal energy, geothermal reservoir engineering is becoming more and more pronounced in terms of both practice and research. In order to have a sustainable development of a geothermal field, an appropriate and easy to use model of the reservoir is a must for providing realistic future performance predictions. There exist various modeling strategies in the literature for modeling geothermal reservoirs.

One of the common characteristics of the geothermal fields in Turkey is that almost all are liquid dominated reservoirs and that almost all of them contain some amount of dissolved carbon dioxide. The dissolved carbon dioxide has considerable effects on the production performance. Carbon dioxide has the effect such that, it causes much higher flashing pressure inside the well and therefore aids in maintaining the production. However, because of production / reinjection operations in the field, the

amount of carbon dioxide declines with time in the reservoir therefore causing a change in the production performance. Hence it becomes crucial to include the change of carbon dioxide content when making future performance predictions.

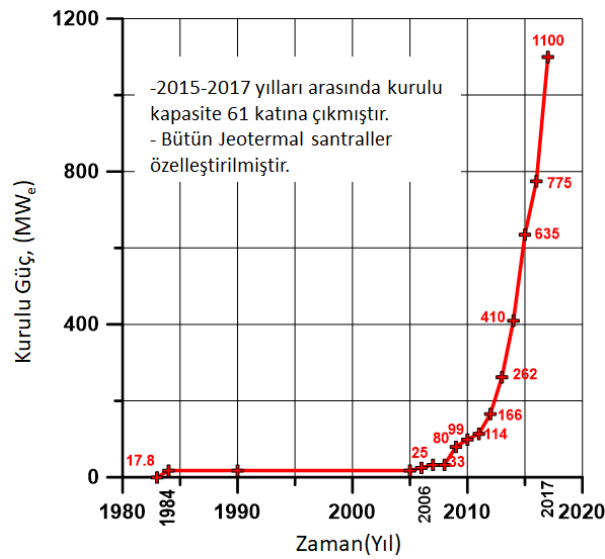
In this study, a model has been developed for modeling the pressure, temperature and the change in the carbon dioxide content of geothermal reservoirs. The developed model is based on solving two mass balance equations (one for water and the other for carbon dioxide) and an overall energy balance equation. The developed model is capable of modeling the behaviors for a number of tanks that may represent various components of a geothermal system such as the reservoir, aquifer or the recharge source. In this study we present only the results of modeling the change in the carbon dioxide content of the reservoir. The effects of recharge and of production / reinjection operations on the carbon dioxide content is considered.

**Key Words:** Carbon dioxide, tank models, geothermal reservoir engineering.

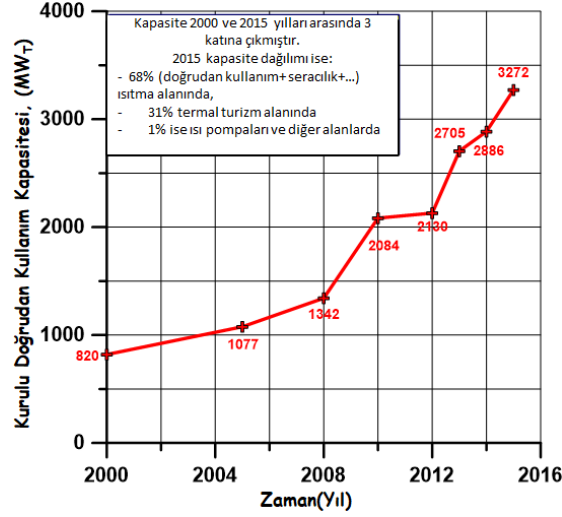
## 1. GİRİŞ

Türkiye’de jeotermal enerjiden elektrik üretimi 1984 yılında Kızıldere sahasında başlamıştır. 2006 yılına kadar da ülkenin tek jeotermal elektrik santrali olarak görev yapmaya devam etmiştir. 2006 yılından itibaren ise özel sektörün de devreye girmesi ile birlikte kurulu güç kapasitesi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde, Türkiye’de jeotermal elektrik santrali kurulu güç kapasitesi Kasım 2018 itibariyle 1347 MW<sub>e</sub>’ye ulaşmıştır. Doğrudan kullanım kapasitesi ise yaklaşık olarak 3300 MW<sub>t</sub>’dir. Türkiye’deki güç santrali kurulu kapasitesi ve doğrudan kullanım kapasiteleri sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmektedir. Şekil 1’den de anlaşılacağı gibi 2006 yılından sonra Türkiye’de kurulu güç kapasitesindeki artış çok hızlı gerçekleşmiştir. Şu an Türkiye’deki tüm güç santralleri özel sektörde bulunmaktadır. Şekil 2’de gösterildiği üzere, kurulu doğrudan kullanım kapasitesi ise 2000 ve 2015 yılları arasında yaklaşık olarak 3 katına çıkmıştır.

Açıkça görülmektedir ki Türkiye’de jeotermal enerji kullanımı geçtiğimiz yirmi yıla yakın bir süredir sürekli olarak artış göstermektedir. Bu artışla birlikte jeotermal rezervuar mühendisliği gittikçe önem kazanmaktadır. Türkiye’deki jeotermal sahalar değerlendirildiğinde rezervuar mühendisliği uygulamalarında mutlaka sahaların içerdiği karbon dioksiti miktarı da hesaba katılmalıdır.

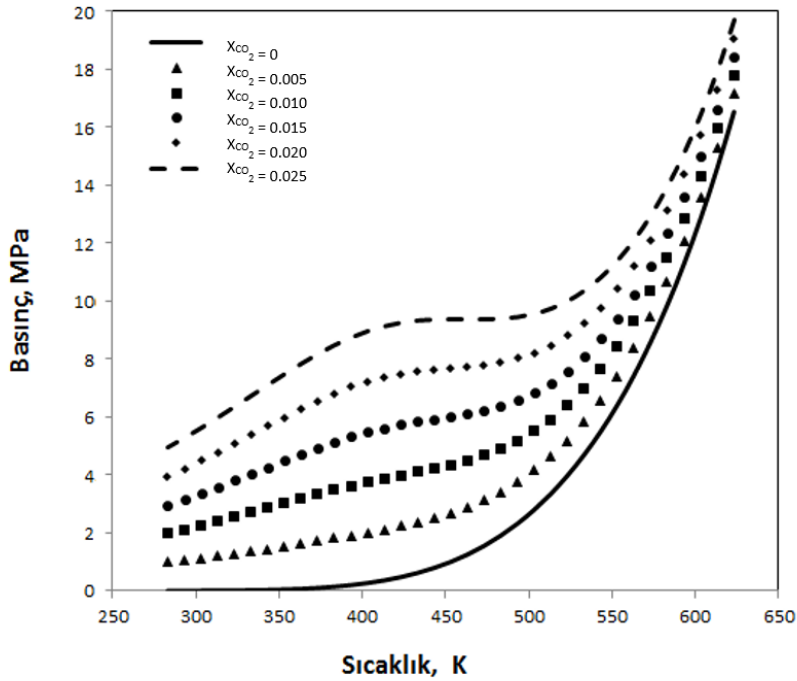


**Şekil 1:** Türkiye’deki kurulu güç kapasitesinin zamanla değişimi [1].



Şekil 2: Türkiye'deki kurulu doğrudan kullanım kapasitesinin zamanla değişimi [1].

Suyun içinde çözülmüş olarak bulunan karbon dioksitin üretim davranışına etkisi oldukça önemli derecededir. Çözülmüş karbon dioksitin en önemli etkisi suyun ayrışma basıncı üstündedir. Farklı karbon dioksit oranları için su-karbon dioksit karışımının etkileri Şekil 3'de verilmektedir. Şekil 3'de  $X_{CO_2}$  (kesir)olarak verilen değerler suyun içinde çözülmüş karbon dioksitin kütleli olarak oranını vermektedir.

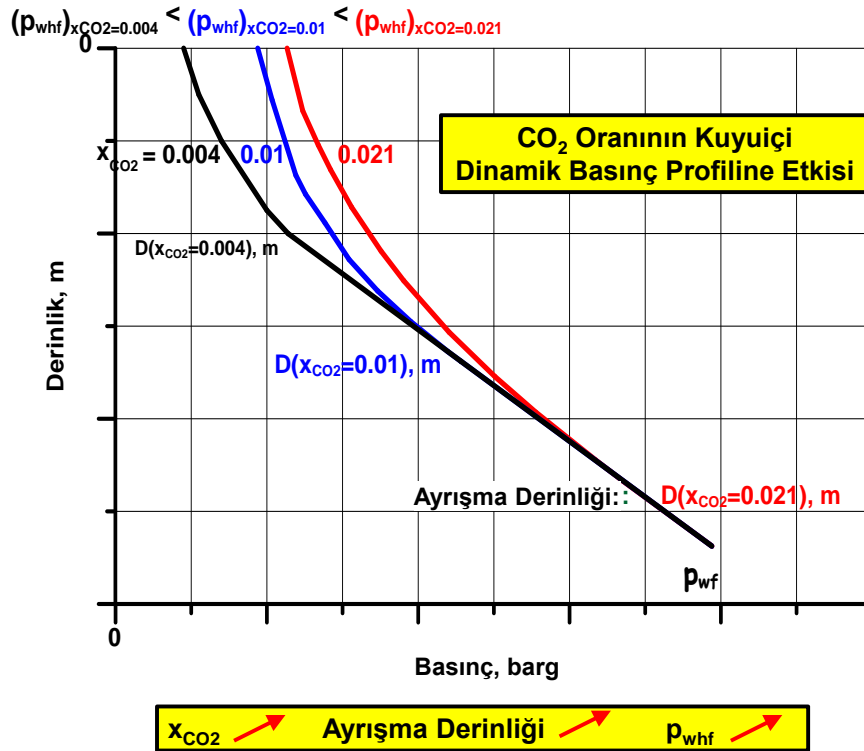


Şekil 3: Farklı karbon dioksit oranları için su - karbon dioksit karışımı için ayrışma basıncı eğrileri [2].

Çözülmüş karbon dioksit oranının  $X_{CO_2}=0.005$  (%0.5) olmasında dahi ayrışma basıncının arttığı Şekil 3'den açıkça anlaşılmaktadır. En büyük etki yaklaşık olarak 373 K (100 °C) ile 523 K (250 °C) sıcaklıkları arasında görülmektedir. Bu sıcaklıklar arasında karbon dioksit oranını arttırmak ayrışma

basıncındaki en büyük artışlara neden olmaktadır. Karbon dioksit oranının  $X_{CO_2}=0.025$  (%2.5) olması ayrışma basıncını 373 K (100 °C) ile 523 K (250 °C) aralığında yaklaşık olarak 10 MPa'a (100 bar) çıkarabilmektedir. Unutulmamalıdır ki Türkiye'deki sahaların, özellikle Menderes Grabeni ve Alaşehir bölgelerindeki jeotermal sahalar, 373 K (100 °C) ile 473 K (250 °C) sıcaklık aralığında yer almaktadır.

Her ne kadar çoğu durumda rezervuar sıcaklık ve basınçları ayrışma eğrisinin üstünde yer alsın da (yani karbon dioksit su içinde çözülmüş olarak bulunmaktadır), üretim sırasında kuyu içinde ayrışma koşulları oluşmaktadır. Şekil 4'de farklı karbon dioksit oranları için kuyu içi dinamik basınç profilleri yer almaktadır. Burada  $p_{whf}$ , kuyu başı akış basıncını göstermektedir, y-ekseni aşağıya doğru artıyor olup derinliği vermektedir ve  $p_{wf}$ , ise kuyu dibi akış basıncını vermektedir. Üç farklı karbon dioksit oranı (%0.4, %1 ve %2.1) için dinamik profiller verilmektedir. Derinlerde (tüm eğrilerin çakıştığı bölgede) eğriler doğrusal davranış göstermektedir. Doğrusal davranış, sıvı akışının bir göstergesidir ve sıvı yoğunluğunun basınç değişiminden fazla etkilenmemesinden dolayı hemen hemen sabit oluşundan kaynaklanmaktadır. Doğrusal davranıştan sapma gaz fazının oluştuğunu ve iki fazlı akışın başladığını göstermektedir. Şekil 4'de dikkat edilecek olursa ayrışma derinliği en fazla olan aynı zamanda en çok karbon dioksit içeren (%2.1) durumdur. Daha önce de belirtildiği gibi suyun içinde daha fazla karbon dioksit çözülmüş olması ayrışma basıncını artırmaktadır. Böylece daha yüksek karbon dioksit oranlarında kuyu içinde daha derin noktalarda ayrışma gerçekleşecektir. Ayrıca, profillerden de anlaşılacağı gibi, daha fazla karbon dioksit oranı, daha derinlerde ayrışma sağlayacağından, daha yüksek bir kuyu başı akış basıncına (kuyu dibi basınçlarının tüm durumlar için aynı olmasına rağmen) neden olmaktadır. Bu da üretim açısından istenen bir durumdur.



Şekil 4: Farklı karbon dioksit oranları için, kuyu içi dinamik basınç profilleri [3].

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı rezervuar içinde üretim / reenjeksiyondan dolayı oluşabilecek karbon dioksit miktarlarındaki değişimin rezervuar jeotermal mühendisliği çalışmalarında dikkate alınması çok önemlidir. Karbon dioksit miktarlarının dikkate alınmaması üretim performanslarının ileriye yönelik tahminlerinde yanlış hesaplamalara neden olabilmektedir.

Türkiye'deki jeotermal rezervuarların modellenmesinde karbon dioksitin değişimini de hesaba katan modeller gerekmektedir. Bu çalışmada, sıvının etken olduğu jeotermal rezervuarlar için basınç,

sıcaklık ve karbon dioksit miktarlarındaki değişimlerin hesaplanabilmesi için bir model geliştirilmiştir. Bu model kullanarak özellikle karbon dioksit değişimlerini etkileyen parametrelerin ne olduğunu ve bunların ne derece etkili oldukları bu çalışmada araştırılmıştır. Bildiride önce geliştirilen modelin detayları verilmektedir. Daha sonra yapay örnek üstünde çeşitli parametrelerin etkileri incelenmiştir. Son olarak Sonuçlar verilmektedir.

## 2. MODELLEME

Bu bölümde öncelikle jeotermal sistemlerin modellenmesi için kullanılan modeller hakkında genel bilgi verilecektir. Daha sonra bu çalışmada geliştirilen matematiksel model tanıtılacak ve literatürde yer alan bazı analitik yaklaşımlar ile sağlanması sunulacaktır.

### 2.1. Literatür Taraması

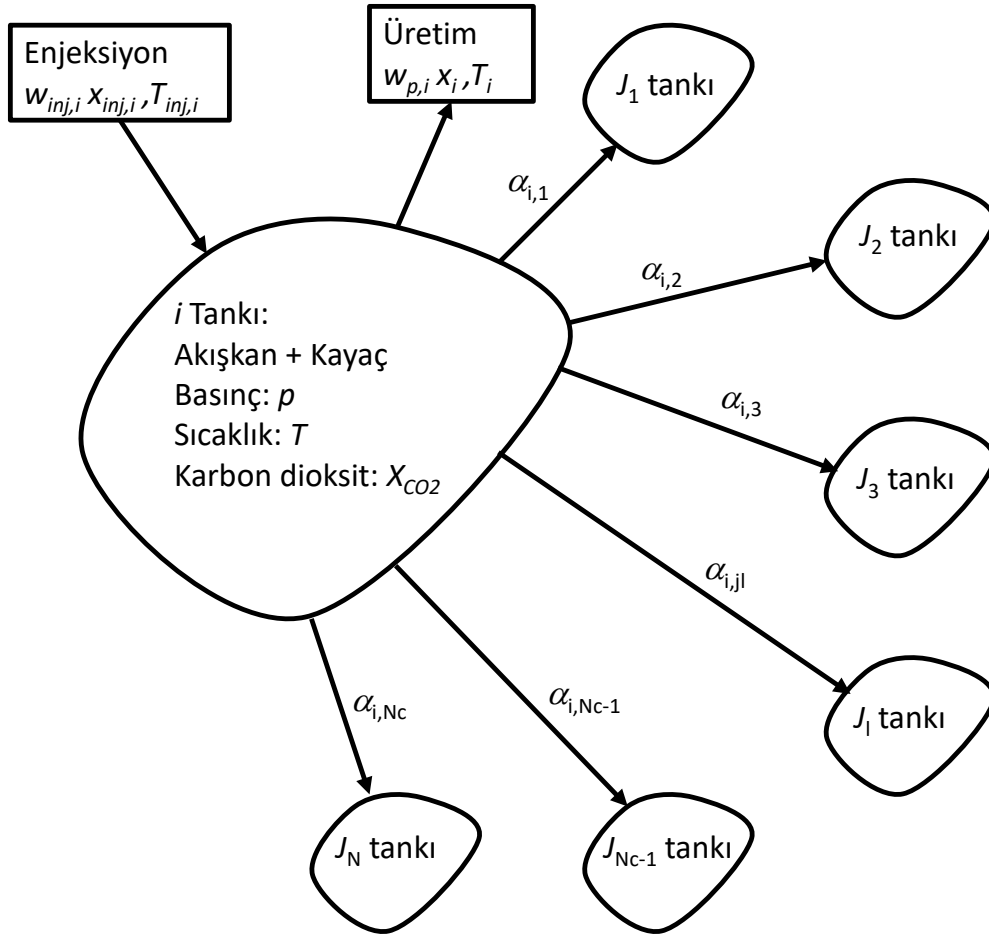
Jeotermal rezervuarların performanslarının modellenmesi amacıyla literatürde çok sayıda model bulunmaktadır. Modelleri genel olarak üç başlık altında toplayabilmek mümkündür; sayısal modeller, tank modelleri ve debi azalım eğrileri. Bu bölümde daha çok karbon dioksit modellemesinin dikkate alındığı literatür verilecektir.

Whiting ve Ramey (1969) [4] jeotermal rezervuarların modellenmesi ile ilgili olarak ilk önemli çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Buna göre Whiting ve Ramey (1969) [4] sıvının etken olduğu ve buharın etken olduğu rezervuarların modellenmesi için tank modeli geliştirmişlerdir. Zyvoloski ve O'Sullivan (1980) [5] korunum denklemlerinin jeotermal rezervuar simülasyonu içerisinde kullanılmasını incelemişlerdir. Simülasyon çalışmalarında karbon dioksit kütle korunumu denklemlerini de dikkate almışlardır. Çalışmalarında daha çok simülasyonun gerçekleştirilmesi sırasında hangi parametrelerin asıl değişkenler olarak alınacağı araştırılmıştır. Atkinson vd. (1980) [6] buhar fazının etken olduğu rezervuarlar için model geliştirmiş ve Bagnore jeotermal rezervuarını modellemişlerdir. O'Sullivan vd. (1985) [7] farklı üç tip jeotermal rezervuar için (tek faz sıvı, iki faz ve tek faz gaz olmak üzere) simülasyon sırasında değişkenlerin nasıl ayarlanması gerektiği konusunda oldukça detaylı bilgiler vermektedirler. Alkan ve Satman (1990) [8] sıvının etken olduğu rezervuarlar için çözünmüş karbon dioksitin davranışının da modellenebileceği modeller geliştirmişlerdir. Burada karbon dioksitin etkin bir şekilde modellenebilmesi için karbon dioksitin farklı sıcaklık ve basınçlarda özelliklerini veren bir termodinamik paket de kullanılmıştır. Hoşgör vd. (2015) [2] su için ve karbon dioksit için kütle korunumunu ve ayrıca tüm sistem için enerjinin korunumunu kullanarak boyutsuz modeller için her tip rezervuarda (tek faz sıvı, iki faz sıvı ve gaz ya da tek faz gaz olmak üzere) çalışabilen model geliştirmişlerdir. Hoşgör vd. (2015) [2] yapay örnekler üstünde tek faz sıvı rezervuarın üretim sonucunda iki faza geçmesi durumunda basınç, sıcaklık ve karbon dioksit miktarının nasıl davrandığını çalışmışlardır. Hoşgör vd., (2016) [9] boyutsuz rezervuar modelleri için karbon dioksit miktarının üretim / reenjeksiyon işlemleri sonucu nasıl değiştiğinin analitik denklemlerini geliştirmişlerdir.

### 2.2. Matematiksel Model

Bu çalışmada geliştirilen modelin temeli korunum kanunlarına dayanmaktadır. İlk korunum su için kütle korunumudur. Daha sonra sıcaklığın da hesaplanabilmesi için enerjinin korunumu prensibi uygulanmıştır. Son olarak ta karbon dioksit miktarının hesaplanabilmesi amacıyla karbon dioksit için kütle korunum kanunu uygulanmıştır. Bu üç korunum kanununun uygulanması ile birlikte geliştirilen model ile herhangi bir kontrol hacmi için üretim / reenjeksiyon işlemleri sonucunda basıncın değişimi, sıcaklığın değişimi ve karbon dioksit miktarının değişimi modellenebilmektedir. Tüm korunum kanunları belirli bir kontrol hacmi için uygulanmaktadır. Bu kontrol hacminin şematik gösterimi Şekil 5'de verilmektedir (Şekil 5'deki  $i$  tankı). Öncelikle belirtilmelidir ki, bu çalışmada geliştirilen model istenilen sayıda kontrol hacmi üstünde çalışmaktadır. Burada kontrol hacimleri korunum kanunlarının uygulandığı hacimlerdir ve jeotermal sistemlerin çeşitli bileşenlerini modellemek için kullanılmaktadır.

Bu bileşenler rezervuar, akifer, doğal beslenme kaynağı olabileceği gibi, bir rezervuarı birden fazla kontrol hacmi ile temsil etmek te mümkün olabilmektedir. Kontrol hacminin akışkan ve kayaçtan oluştuğu varsayılmaktadır. Kontrol hacmi için uygulanan korunum yasaları sonucunda ise basınç, sıcaklık ve karbon dioksit miktarı temel değişkenler olarak belirlenmektedir. Geliştirilen bu modelde kontrol hacimlerinin boyutları bulunmamaktadır. Bir başka deyişle, kontrol hacimlerinin hangi şekilde olduklarının hiçbir önemi yoktur. Burada önemli olan hacimlerinin bilinmesidir. Üstünde korunum kanunlarının uygulandığı kontrol hacminden  $w_p$  (kg/s) kütleli debi ile üretim yapıldığı varsayılmaktadır. Doğal olarak üretilen akışkanın sıcaklığı ya da karbon dioksit miktarı üstünde herhangi bir kontrol bulunmadığından dolayı üretilen akışkanın karbon dioksit miktarı ve sıcaklığı rezervuar karbon dioksit miktarı ve sıcaklığına eşit alınmıştır. Burada üretim sırasında kuyu içinde akış sırasında oluşan herhangi bir etki (çevreye olan ısı kayıpları ya da ayrışma basıncına ulaşma gibi) hesaba katılmamaktadır.



**Şekil 5:** Geliştirilen modelde kullanılan ve korunum kanunlarının uygulandığı kontrol hacmi.

Kontrol hacmine enjeksiyon  $w_{inj}$  (kg/s) kütleli debisi ile yapıldığı varsayılmaktadır. Üretimden farklı olarak burada enjeksiyon sıcaklığı ve enjeksiyon karbon dioksit oranları sırasıyla  $X_{CO2,inj}$  ve  $T_{inj}$  olarak belirlenmiştir. Yani burada enjeksiyon karbon dioksit oranı ve enjeksiyon sıcaklığı kullanıcı tarafından belirlenmektedir.

Şekil 5'den de anlaşılacağı gibi  $i$  kontrol hacmi diğer tanklara istenen sayıda bağlantı yapabilmektedir. Herhangi bir  $i$  kontrol hacminin toplamda yaptığı diğer kontrol hacimleri ile olan bağlantı sayısı  $N_c$  ile gösterilmektedir.  $i$  tankının yaptığı tankların numaraları bu durumda  $j_1, j_2, \dots, j_{Nc-1}, j_{Nc}$  şeklindedir.

### 2.2.1. Su için kütle korunumu

Bu bölümde su için uygulanacak olan kütle korunumu denkleminin ayrıntıları verilmektedir. Kontrol hacmindeki su fazı için kütle korunumu denklemlerinin uygulanması basıncın hesaplanmasına yönelik yapılmaktadır. Kontrol hacimleri arasında her iki yönde akışkan akışına izin verilmektedir. Doğal olarak akışkanın yönü basıncın daha büyük olduğu kontrol hacminden daha küçük olan kontrol hacmine doğru olacaktır. Kontrol hacimleri arasındaki akışkan akışının modellenmesi için Schilthuis (1936) [10] yaklaşımına benzer bir yaklaşım benimsenmiştir. Tanklar arasındaki kütleli debiyi veren ilişki Denklem (1)'de verilmektedir.

$$w_{i,jl} = \alpha_{i,jl}(p_{jl} - p_i) \quad (1)$$

Burada  $\alpha$  (kg/(bar.s)) kontrol hacimleri arasındaki beslenme katsayısını vermektedir. Beslenme katsayısı toplu bir parametre (lumped parameter) olup, içinde kayaç ve akışkan özelliklerini barındırmaktadır. Örneğin kayaç geçirgenliğinin ya da akışa açık alanın artması durumunda beslenme katsayısının artması beklenir. Bunun yanında akışkanın akmazlığının artması durumunda ise beslenme katsayısının azalması beklenir.

Şekil 5'de verilen  $i$  tankı için kütle korunumu denklemi Denklem (2)'de verilmektedir. Denklem (2)'den de anlaşılacağı gibi, kontrol hacminin içine giren kütle pozitif ve çıkan kütle de negatif olarak alınmaktadır.

$$\left( \begin{array}{c} \text{Kütle kontrol} \\ \text{hacminde birikme} \\ \text{debisi} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Diğer kontrol} \\ \text{hacimlerinden} \\ \text{gelen kütle} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{üretilen} \\ \text{kütle} \\ \text{miktarı} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{enjekte edilen} \\ \text{kütle miktarı} \end{array} \right) = 0 \quad (2)$$

Denklem (2)'de verilen ve su için uygulanan kütle korunumu prensibinin rezervuar / akışkan özellikleri cinsinden matematiksel ifadesi Denklem (3)'de verildiği şekildedir.

$$V_{b,i} \frac{d(\rho_w \phi)_i}{dt} - \sum_{l=1}^{N_c} \alpha_{i,jl}(p_{jl} - p_i) + w_{p,i} + w_{inj,i} = 0 = r_w \quad (3)$$

Burada  $V_b$  (m<sup>3</sup>) kontrol hacminin kaba hacmini,  $\phi$  (kesir) kontrol hacminin gözenekliliğini ve  $\rho_w$  (kg/m<sup>3</sup>) kontrol hacmi içindeki suyun yoğunluğunu vermektedir. Denklem (3)  $r_w$  fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir.

### 2.2.2. Tüm kontrol hacmi için enerjinin korunumu

Bu bölümde sıcaklığın hesaplanması için tüm kontrol hacmi için uygulanan enerjinin korunumu denklemi verilmektedir. Enerjinin korunumunda ısı geçişlerinin modellenmesinde hem taşınım yoluyla geçiş hem de iletim yoluyla geçiş hesaba katılmaktadır. Tanklar arasında ısı iletimi Denklem (4)'de verildiği gibi modellenmektedir.

$$Q_{i,jl} = \gamma_{i,jl}(T_{jl} - T_i) \quad (4)$$

Burada  $Q$  (J/s) kontrol hacimleri arasındaki ısı debisini  $\gamma$  (J/(°C.s)) ısı iletim katsayısını ve  $T$  (°C) sıcaklığı vermektedir. Kontrol hacmi için enerjinin korunumu denklemi

$$\left( \begin{array}{c} \text{Enerjinin kontrol} \\ \text{hacminde birikme} \\ \text{debisi} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{enjekte edilen} \\ \text{enerji miktarı} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{üretilen} \\ \text{enerji} \\ \text{miktarı} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Diğer kontrol} \\ \text{hacimlerinden} \\ \text{gelen enerji} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Diğer kontrol hacimleri} \\ \text{ile iletim yoluyla} \\ \text{olan ısı geçişi} \end{array} \right) = 0 \quad (5)$$

Denklem (5)'de verilen enerjinin korunumu denkleminin akışkan ve kayaç özellikleri cinsinden matematiksel ifadesi Denklem (6)'da verilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \left[ (1 - \Phi_i) V_{b,i} \rho_{m,i} C_{m,i} T_i + V_{b,i} \Phi_i \rho_{w,i} u_{w,i} \right] + w_{inj,i} h_{w,inj,i} + w_{p,i} h_{w,i} - \sum_{l=1}^{N_c} \alpha_{i,j_l} (p_{j_l} - p_i) h_{\xi} - \sum_{l=1}^{N_c} \gamma_{i,j_l} (T_{j_l} - T_i) = 0 = r_E \quad (6)$$

Burada  $\rho_m$  (kg/m<sup>3</sup>) kayaç yoğunluğunu,  $C_m$  (J/(kg.°C)) kayacın spesifik ısı kapasitesini ve  $h_w$  (j/kg) suyun spesifik entalpisini vermektedir.  $h_{\xi}$  akış yönüne bağlıdır ve Denklem (7) ile verilmektedir.

$$h_{\xi} = \begin{cases} h_{w,i} & \text{if } p_i > p_{j_l} \\ h_{w,j_l} & \text{if } p_i < p_{j_l} \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2.3. Karbon dioksit için kütle korunumu

Bu bölümde karbon dioksit miktarının hesaplanması için karbon dioksit için uygulanan kütle korunumu denklemi verilmektedir. Bu çalışmada karbon dioksit sadece su içinde çözülmüş olarak ele alınmaktadır. Bir başka deyişle, kontrol hacimlerinin hiç birinde ayrışma basıncının altına inilmemektedir. Gaz fazında karbon dioksit olmadığı varsayımı yapılmıştır. Kontrol hacmi için karbon dioksit için uygulanan kütle korunumu prensibi Denklem (8) ile verilmektedir.

$$\left( \begin{array}{c} \text{Karbon dioksit kütlelerinin} \\ \text{kontrol hacminde} \\ \text{birikme debisi} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Diğer kontrol} \\ \text{hacimlerinden gelen karbon} \\ \text{dioksit kütle miktarı} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Üretilen} \\ \text{karbon dioksit} \\ \text{kütle miktarı} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Enjekte edilen} \\ \text{karbon dioksit} \\ \text{kütle miktarı} \end{array} \right) = 0 \quad (8)$$

Denklem (8) ile verilen enerjinin korunumu denkleminin akışkan ve kayaç özellikleri cinsinden matematiksel ifadesi Denklem (9) ile verilmektedir.

$$V_{b,i} \frac{d(\rho_{w,i} \Phi_i X_{i,CO_2})}{dt} - \sum_{l=1}^{N_c} \alpha_{i,j_l} (p_{j_l} - p_i) X_{i,CO_2,\xi} w_{p,i} X_{i,CO_2} + w_{inj,i} X_{i,CO_2} = 0 = r_C \quad (9)$$

Burada  $X_{CO_2}$  (kesir) su içinde çözülmüş karbon dioksitin kütle oranını vermektedir.  $X_{CO_2,\xi}$  ise akış yönüne bağlıdır ve Denklem (10) ile verilmektedir.

$$X_{CO_2,\xi} = \begin{cases} X_{CO_2,i} & \text{if } p_i > p_{j_l} \\ X_{CO_2,j_l} & \text{if } p_i < p_{j_l} \end{cases} \quad (10)$$



### 2.2.3. Korunum denklemlerinin çözümü

Bu bölümde Denklem (3), (6) ve (9) ile verilen denge denklemlerinin çözümü verilmektedir. Bu denklemler bu çalışma kapsamında sayısal olarak çözülmektedirler. Buna göre, zaman türevleri ileri sonlu farklar yöntemi kullanılarak ele alınmıştır. Bu durumda çözümler zaman içinde adım atarak oluşturulmaktadır. Denklemler doğrusal olmayan denklemlerdir. Bu nedenle denklemlerin doğrusallaştırılması amacıyla Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Newton Raphson yönteminde her bir zaman adımı için Denklem (11) ile verilen sistem çözülmektedir. Tüm kontrol hacimleri için çözümler aynı anda yapılmaktadır.

$$\mathbf{J}\delta = -\mathbf{r} \quad (11)$$

Burada  $\mathbf{J}$  jacobı matrisi,  $\delta$  fark vektörünü ve  $-\mathbf{r}$  ise Denklem (3), (6) ve (9) ile verilen fonksiyonların oluşturduğu vektördür. Jacobı matrisi ve fonksiyonların vektörü sırasıyla Denklem (12) ve (13) ile verilmektedir.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_{W,1}}{\partial p_1} & \frac{\partial r_{W,1}}{\partial T_1} & \frac{\partial r_{W,1}}{\partial f_1} & \frac{\partial r_{W,1}}{\partial p_2} & \frac{\partial r_{W,1}}{\partial T_2} & \frac{\partial r_{W,1}}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial r_{W,1}}{\partial p_{N_i}} & \frac{\partial r_{W,1}}{\partial T_{N_i}} & \frac{\partial r_{W,1}}{\partial f_{N_i}} \\ \frac{\partial r_{E,1}}{\partial p_1} & \frac{\partial r_{E,1}}{\partial T_1} & \frac{\partial r_{E,1}}{\partial f_1} & \frac{\partial r_{E,1}}{\partial p_2} & \frac{\partial r_{E,1}}{\partial T_2} & \frac{\partial r_{E,1}}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial r_{E,1}}{\partial p_{N_i}} & \frac{\partial r_{E,1}}{\partial T_{N_i}} & \frac{\partial r_{E,1}}{\partial f_{N_i}} \\ \frac{\partial r_{C,1}}{\partial p_1} & \frac{\partial r_{C,1}}{\partial T_1} & \frac{\partial r_{C,1}}{\partial f_1} & \frac{\partial r_{C,1}}{\partial p_2} & \frac{\partial r_{C,1}}{\partial T_2} & \frac{\partial r_{C,1}}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial r_{C,1}}{\partial p_{N_i}} & \frac{\partial r_{C,1}}{\partial T_{N_i}} & \frac{\partial r_{C,1}}{\partial f_{N_i}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial p_1} & \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial T_1} & \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial f_1} & \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial p_2} & \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial T_2} & \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial p_{N_i}} & \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial T_{N_i}} & \frac{\partial r_{W,N_i}}{\partial f_{N_i}} \\ \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial p_1} & \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial T_1} & \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial f_1} & \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial p_2} & \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial T_2} & \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial p_{N_i}} & \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial T_{N_i}} & \frac{\partial r_{E,N_i}}{\partial f_{N_i}} \\ \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial p_1} & \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial T_1} & \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial f_1} & \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial p_2} & \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial T_2} & \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial p_{N_i}} & \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial T_{N_i}} & \frac{\partial r_{C,N_i}}{\partial f_{N_i}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$-\mathbf{r} = \begin{bmatrix} -r_{W,1} \\ -r_{E,1} \\ -r_{C,1} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ -r_{W,N_T} \\ -r_{E,N_T} \\ -r_{WC,N_T} \end{bmatrix} \quad (13)$$

## 2.2. Matematiksel Modelin Doğrulanması

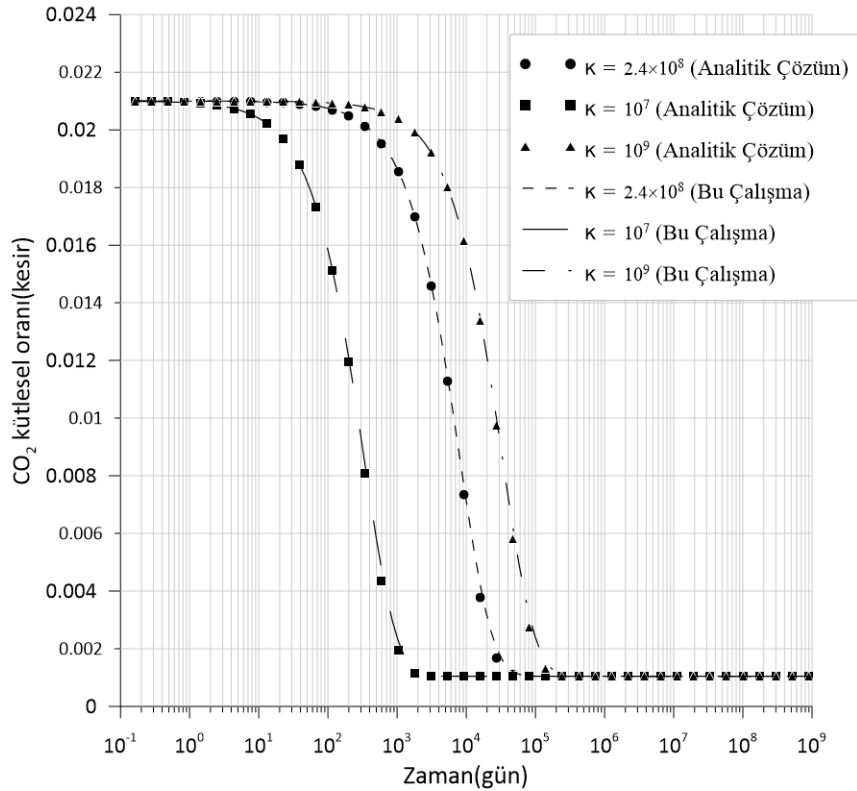
Bu çalışmada geliştirilen modelin sağlanması amacıyla Hoşgör vd., (2016) [9] tarafından geliştirilen analitik model kullanılmıştır. Model bir yapay örnek üstünde doğrulanmıştır. Hoşgör vd., (2016) [9] geliştirdikleri model tek tanklı açık sistemler için geçerlidir. Dolayısı ile bu çalışmada geliştirilen model her ne kadar çoklu tank sistemleri için geçerli olsa da, doğrulama tek tanklı sistem üstünde yapılacaktır. Burada açık sistemden kast edilen, tankın sabit basınçlı bir doğal beslenme kaynağına bağlı olmasıdır. Tek tanktan oluşan yapay modelde kullanılan parametreler Tablo 1’de verilmektedir. Doğrulama için iki farklı karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki farklı depolama kapasitesi ( $\kappa$ , kg/bar) için yapılmıştır. Depolama kapasitesi Denklem (14) ile verilmektedir.

$$\kappa = V_b \rho_w \phi c_t \quad (14)$$

Burada  $c_t$  toplam sıkıştırılabilirliği göstermektedir. Farklı depolama kapasiteleri için analitik model ve bu çalışmada geliştirilen sayısal modelin karşılaştırmaları Şekil 6’da verilmektedir.

**Tablo 1:** Doğrulama örneğinde kullanılan parametreler.

Kaba hacim, m <sup>3</sup>	31.5×10 <sup>9</sup>
Gözeneklilik, kesir	0.05
Beslenme katsayısı, kg/(bar.s)	10
Başlangıç karbon dioksit kütle oranı, kesir	0.021
Toplam sıkıştırılabilirlik, 1/bar	1.7×10 <sup>-4</sup>
Üretim debisi, kg/s	2000
Reenjeksiyon debisi, kg/s	1500
Reenjeksiyon karbon dioksit kütle oranı, kesir	0
İlk basınç, bar	150
Reenjeksiyon sıcaklığı, °C	110



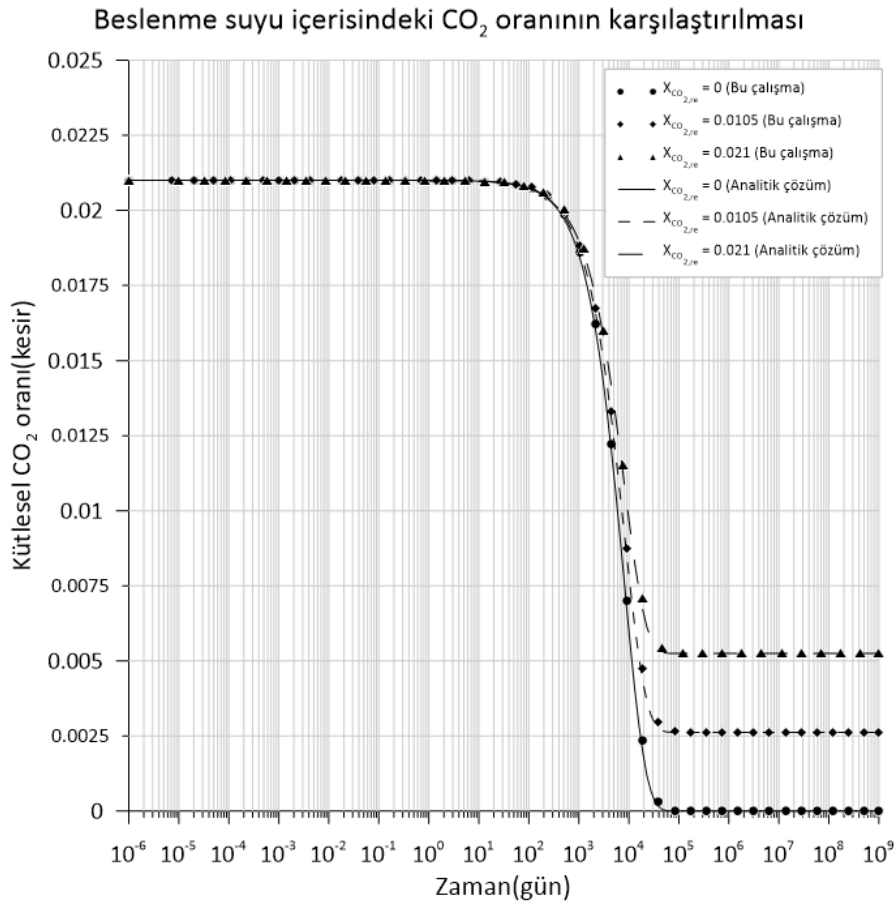
**Şekil 6:** Farklı depolama sabitleri için analitik model ve bu çalışmada geliştirilen model sonuçlarının karşılaştırması.

Şekil 6'dan da anlaşılacağı gibi karbon dioksit oranlarının değişimi için model sonuçları ile analitik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar birebir örtüşmektedir. Dikkat edilecek olursa, tüm karbon dioksit kütle oranları kararlı duruma ulaşmıştır. Hoşgör vd., 2016 [9] verdiği analitik çözümlerde karbon dioksit oranının kararlı durumunu veren ifade Denklem (15) ile verilmektedir.

$$X_{CO_2,ss} = \frac{w_{inj} X_{CO_2,inj} + w_n X_{CO_2,re}}{w_p} \quad (15)$$

Burada  $X_{CO_2,ss}$  (kesir) kararlı durumdaki karbon dioksit oranını,  $X_{CO_2,re}$  (kesir) doğal beslenme karbon dioksit oranını ve  $w_n$  (kg/s) ise net üretim debisini vermektedir. Bu örnek için doğal beslenme karbon dioksit oranı %0.5 olarak alınmıştır. Denklem (15) kullanılarak elde edilen sonuca göre kararlı karbon dioksit oranının %0.125 olması gerekmektedir. Şekil 6 da bunu açıkça göstermektedir.

Diğer karşılaştırma doğal beslenme karbon dioksit oranı için yapılmıştır. Doğal beslenme karbon dioksit oranı, doğal beslenme kaynağından gelen suyun içerdiği karbon dioksit oranını göstermektedir. Karşılaştırma sonuçları Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7'den de anlaşılacağı gibi, Analitik model sonuçlarıyla bu çalışmada geliştirilen model sonuçları tüm doğal beslenme karbon dioksit oranları için örtüşmektedir. Ayrıca Denklem (15) kullanılarak kararlı karbon dioksit oranları hesaplanmıştır ve sonuç olarak geliştirilen model ile birebir örtüşen sonuçlar ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 7:** Farklı doğal beslenme karbon dioksit oranları için analitik model ve bu çalışmada geliştirilen model sonuçlarının karşılaştırması.

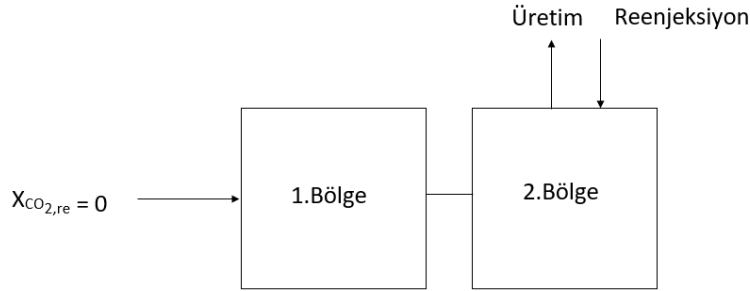
### 3. YAPAY ÖRNEK

Bu bölümde karbon dioksit oranlarının rezervuar içinde farklı üretim / enjeksiyon stratejilerine ve ayrıca farklı doğal beslenme karbon dioksit oranlarına göre nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bunun için bir rezervuar iki farklı kontrol hacmi kullanılarak modellenmiştir. Bu ayırım, rezervuarın doğal beslenme kaynağına yakın olan kısmı ile doğal beslenme kaynağına uzak olan kısmı arasındaki farkı ortaya koymak için yapılmıştır. Doğal beslenme kaynağına yakın olan bölge “1. Bölge” ve doğal beslenme kaynağına uzak olan bölge ise “2. Bölge” olarak adlandırılmıştır. Bölgeler ve akışkan ile ilgili tüm özellikler Tablo 2’de verilmektedir.

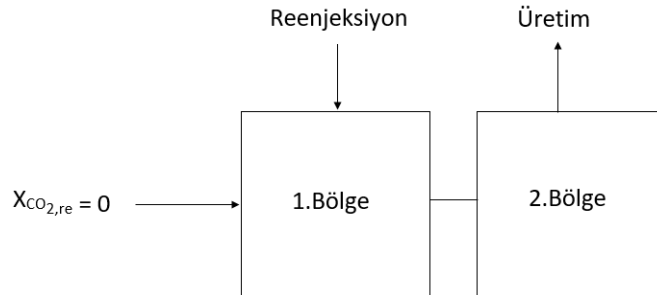
**Tablo 2:** Yapay örnekte kullanılan bölgelerin ve akışkanın özellikleri.

	1. Bölge	2. Bölge
Kaba hacim, m <sup>3</sup>	63×10 <sup>9</sup>	31.5×10 <sup>9</sup>
Gözeneklilik, kesir	0.05	0.05
Kayaç yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>	2600	2600
Kayaç sıkıştırılabilirliği, 1/bar	94×10 <sup>-6</sup>	94×10 <sup>-6</sup>
Kayaç spesifik ısı kapasitesi, J/(kg.°C)	1000	1000
İlk basınç, bar	150	150
İlk sıcaklık, °C	200	200
İlk karbon dioksit kütle oranı, kesir	0.021	0.021
Doğal beslenme katsayısı, kg/(bar.s)	40	40
Reenjeksiyon sıcaklığı, °C	110	110
Üretim debisi, kg/s	2000	
Reenjeksiyon debisi, kg/s	1500	
Reenjeksiyon karbon dioksit kütle oranı, kesir	0	

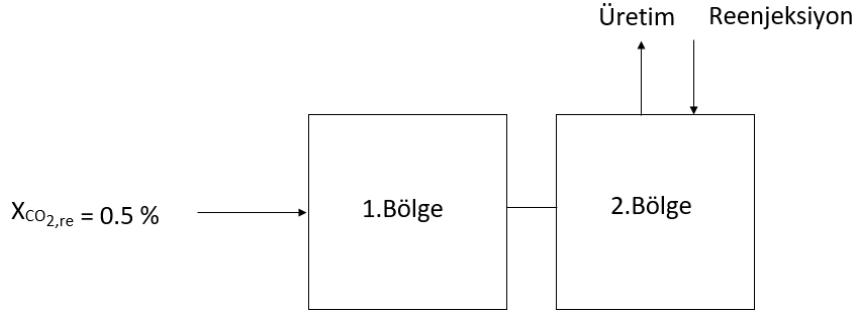
Toplamda sekiz senaryo ele alınmıştır. Burada üretim / reenjeksiyon işlemlerinin nereye yapıldığı (doğal beslenme bölgesine yakın ya da uzak yerlere) ve ayrıca doğal beslenme karbon dioksit oranının ne olduğuna bağlı olarak rezervuar içindeki karbon dioksit oranının nasıl değiştiği incelenmiştir. Toplamda sekiz adet senaryo kullanılmıştır. Bu senaryoların özetleri Şekil 8 - Şekil 15 arasında verilmektedir.



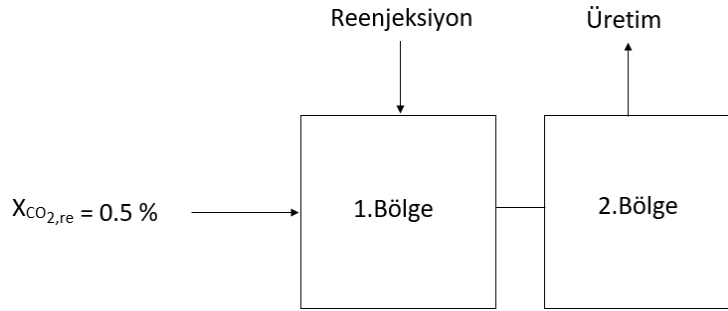
**Şekil 8:** Üretim ve reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağının uzağına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının sıfır olduğu senaryo.



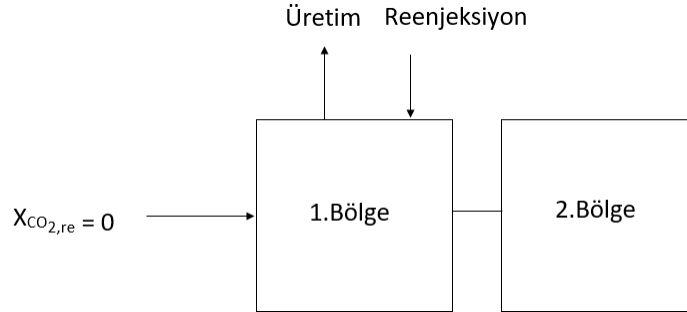
**Şekil 9:** Üretimin doğal beslenme kaynağından uzak olan, reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağının yakın olan bölgeye yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının sıfır olduğu senaryo.



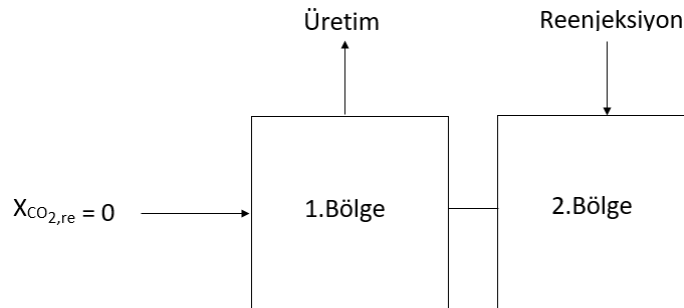
**Şekil 10:** Üretim ve reenjesiyonun doğal beslenme kaynağının uzağına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının %0.5 olduğu senaryo.



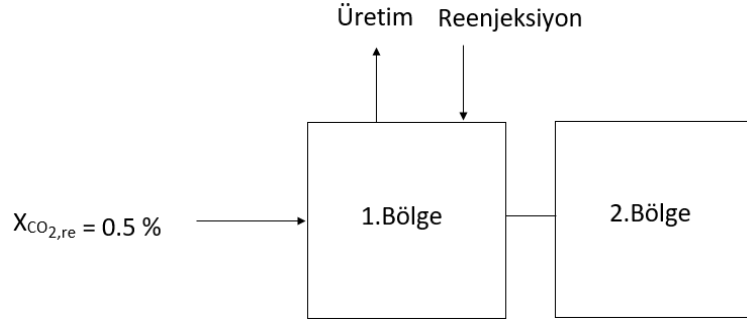
**Şekil 11:** Üretimin doğal beslenme kaynağından uzak olan, reenjesiyonun doğal beslenme kaynağının yakın olan bölgeye yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının %0.5 olduğu senaryo.



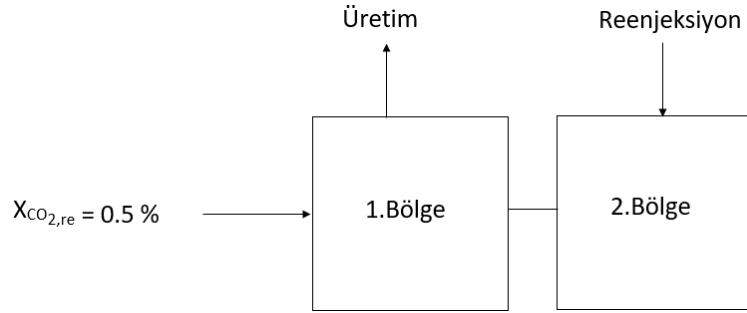
**Şekil 12:** Üretim ve reenjesiyonun doğal beslenme kaynağının yakınına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının sıfır olduğu senaryo.



**Şekil 13:** Üretimin doğal beslenme kaynağına yakın olan, reenjesiyonun doğal beslenme kaynağına uzak olan bölgeye yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının sıfır olduğu senaryo.

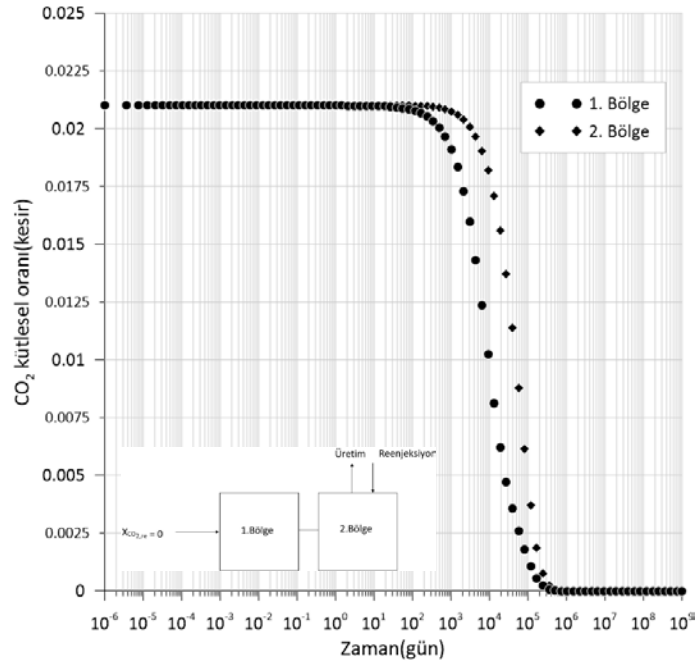


**Şekil 14:** Üretim ve reenjesiyonun doğal beslenme kaynağının yakınına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının %0.5 olduğu senaryo.



**Şekil 15:** Üretimin doğal beslenme kaynağına yakın olan, reenjesiyonun doğal beslenme kaynağına uzak olan bölgeye yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının %0.5 olduğu senaryo.

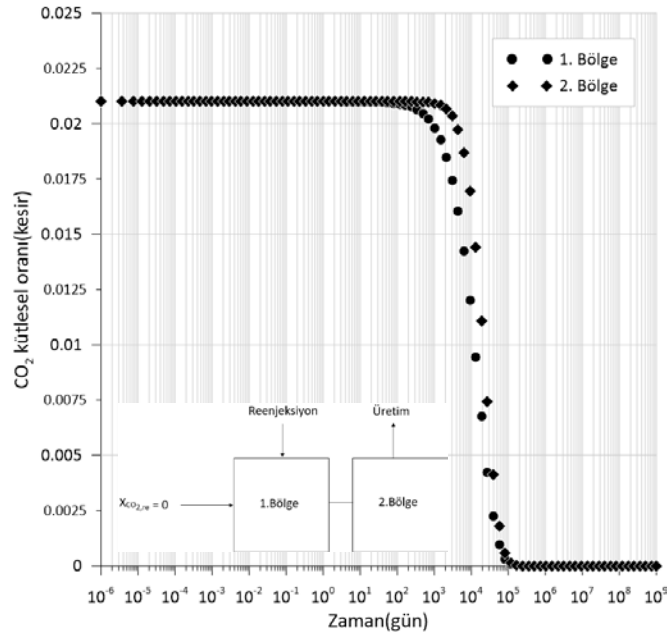
İlk senaryo da (Şekil 8) üretim ve reenjesiyon doğal beslenme kaynağından uzak bölgede gerçekleştirilmektedir. Doğal beslenme kaynağından gelen karbon dioksit oranı ise sıfır olarak alınmıştır. Her iki bölge için karbon dioksit oranlarının zaman içinde değişimi Şekil 16 ile verilmektedir.



**Şekil 16:** Üretim ve reenjesiyonun doğal beslenme kaynağının uzağına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının sıfır olduğu senaryo için karbon dioksit oranının değişimi.

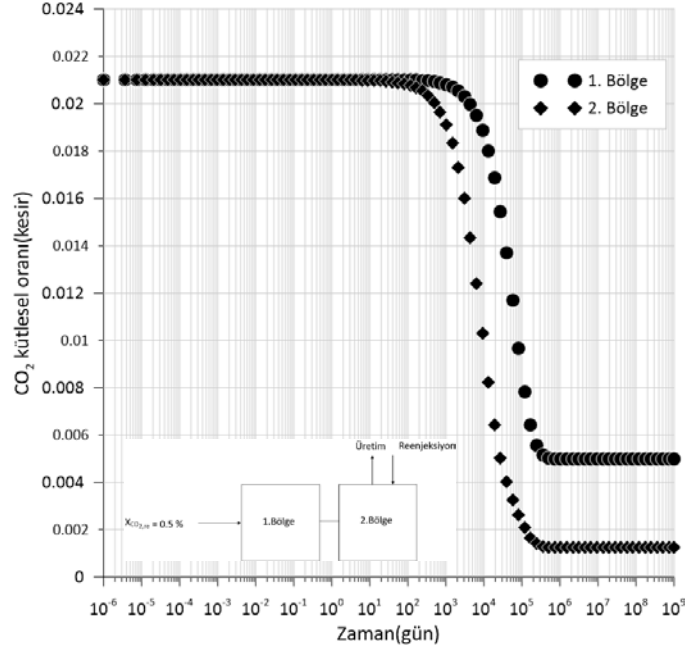
Şekil 16'dan da anlaşılacağı gibi zaman içinde karbon dioksit oranı her iki bölge için de düşüş göstermektedir. Bu da beklenen bir durumdur çünkü hem reenjekte edilen su içinde hem de doğal beslenmeyle gelen su içinde karbon dioksit bulunmamaktadır. Doğal beslenme kaynağına daha yakın olan 1. Bölgede düşüş daha erken zamanlarda başlamaktadır. Bunun nedeni doğal beslenme kaynağından herhangi bir karbon dioksit desteğinin olmamasındandır. 2. Bölgede ise düşüş daha yavaş olmuştur. 2. Bölge içine enjekte edilen su içinde karbon dioksit bulunmamasına rağmen karbon dioksit oranının azalmasının daha yavaş olmasının nedeni 1. Bölgeden 2. Bölgeye içinde karbon dioksit bulunan su geçişinin olmasındandır. Fakat 1. Bölgedeki karbon dioksit oranının azalmasıyla birlikte 1. Bölgeden 2. Bölgeye geçen karbon dioksit miktarı da azalmaktadır ve böylece de 2. Bölgede de karbon dioksit miktarı azalmaktadır. Her iki bölgedeki karbon dioksit oranları da sıfıra düşmektedir ve sıfır değerinde kararlı duruma geçmektedir. Bunun nedeni ise hem enjekte edilen suyun içinde hem de doğal beslenme kaynağından gelen suyun içinde hiç karbon dioksit bulunmamasından kaynaklanmaktadır.

İkinci senaryoda üretim doğal beslenme kaynağına uzak olan bölgeden (2. Bölge) reenjeksiyon ise doğal beslenme kaynağına yakın olan bölgeden (1. Bölge) yapılmaktadır. Sonuçlar Şekil 17 ile verilmektedir. Bir önceki senaryoda olduğu gibi her iki bölgenin karbondioksit oranları sıfır değerinde kararlı duruma ulaşmaktadır. Çünkü ne reenjekte edilen su içinde ne de doğal beslenme kaynağından gelen su içinde karbon dioksit bulunmamaktadır. Bu senaryoda 1. Bölgedeki karbon dioksit oranı daha erken düşüş göstermektedir. Bu da beklenen bir sonuçtur çünkü hem reenjeksiyon hem de doğal beslenme kaynağı desteği bu bölgeye olmaktadır. Dolayısı ile karbon dioksit düşümü ilk olarak bu bölgede görülmektedir.



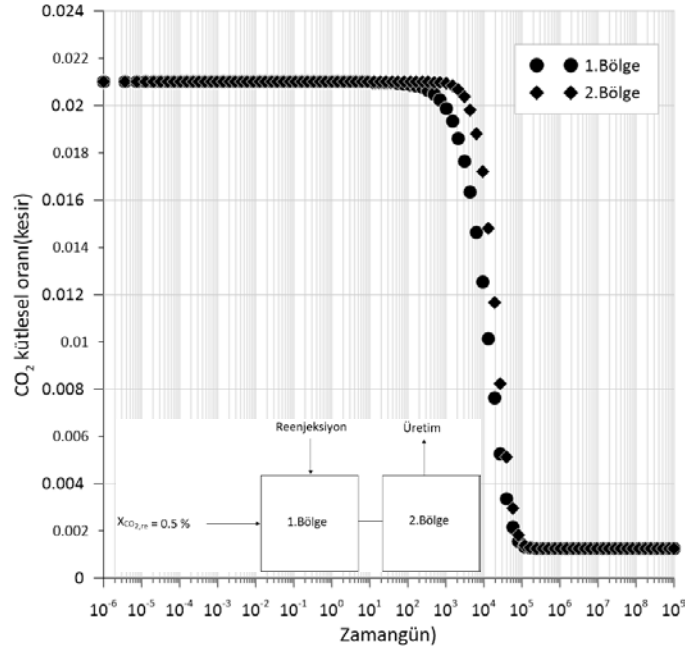
**Şekil 17:** Üretim ve reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağının uzağına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının sıfır olduğu senaryo için karbon oranının değişimi.

Üçüncü senaryoda üretim ve reenjeksiyon stratejisi birinci senaryo ile aynı alınmıştır. Yani hem üretim hem de reenjeksiyon doğal beslenme kaynağından uzak olan (2. Bölge) bölgeye yapılmaktadır. Fakat bu durumda doğal beslenme kaynağından gelen suyun içinde %0.5 oranında karbon dioksit bulunmaktadır. Sonuçlar Şekil 18 ile verilmektedir. Bu durumda karbon dioksit oranlarının kararlı durumları farklı değerlerde olmaktadır. 1. Bölgedeki karbon dioksit oranı %0.5'de sabitlenmektedir. Bu da beklenen bir sonuçtur çünkü 1. Bölgeye tek su girişi doğal beslenme kaynağından olmaktadır ve doğal beslenme kaynağındaki karbon dioksit oranı ise %0.5'dir. 1. Bölge karbon dioksit değeri ise %0.125 değerinde kararlı duruma ulaşmaktadır. Bu 1. Bölgenin kararlı karbon dioksit oranından daha düşüktür. Kararlı durumda 2. Bölgeye 1. Bölgeden %0.5 oranında karbon dioksit gelmektedir. Fakat aynı zamanda 1. Bölgeye %0 karbon dioksit oranıyla reenjeksiyon yapıldığından dolayı daha düşük bir değerinde kararlı duruma ulaşmaktadır. Bu oranın sağlanmasını Denklem (15) vermektedir.



**Şekil 18:** Üretim ve reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağının uzağına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının %0.5 olduğu senaryo.

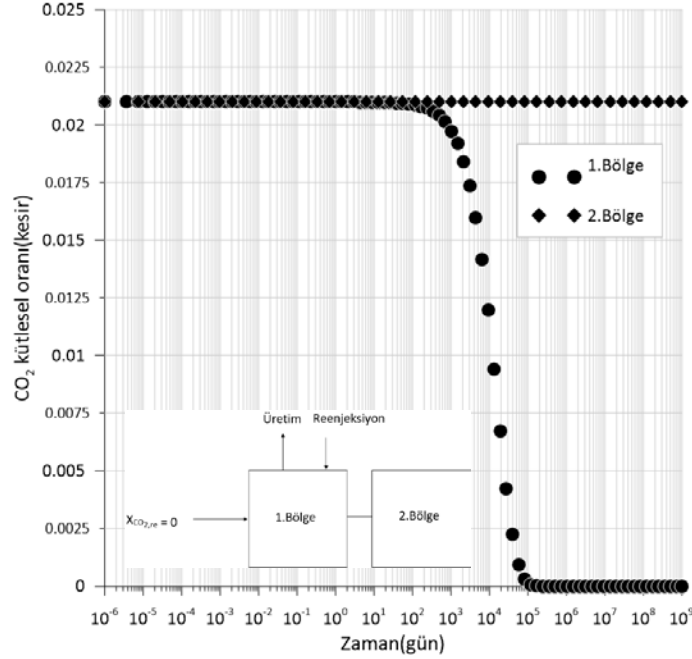
Dördüncü senaryo da üretim doğal beslenme kaynağından daha uzak olan bölgeden (2. Bölge) yapılırken reenjeksiyon ise beslenmeye yakın olan bölgeye yapılmaktadır. Sonuçlar Şekil 19 ile verilmektedir. Her iki bölge de kararlı duruma geçtiğinde karbon dioksit oranı % 0.125'de sabitlenmektedir. Bu da beklenen bir sonuçtur çünkü 1. Bölgenin sabitlenme değeri budur ve bu da olduğu gibi 2. Bölgeye de yansımaktadır. 2. Bölgeye herhangi bir reenjeksiyon işlemi olmadığı için 1. Bölge hangi değerde sabitlenirse 1. Bölgenin karbon dioksit değeri de o olacaktır. 1. Bölgede düşüş daha çabuk olmaktadır. Bunun nedeni reenjeksiyonun bu bölgeye yapılmasından kaynaklanmaktadır.



**Şekil 19:** Üretimin doğal beslenme kaynağından uzak olan, reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağının yakın olan bölgeye yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının %0.5 olduğu senaryo için karbon dioksit oranının değişimi.



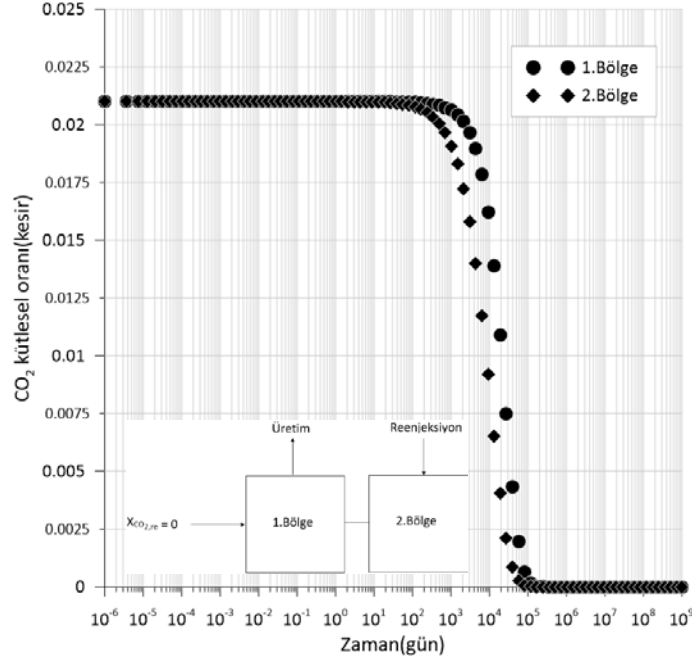
Beşinci senaryoda hem üretim hem de reenjeksiyon doğal beslenme kaynağına yakın olan (1. Bölge) bölgeden yapılmaktadır. Doğal beslenme kaynağından gelen suda ise karbon dioksit bulunmamaktadır. Sonuçlar Şekil 20 ile verilmektedir. Bekleneceği üzere doğal beslenme kaynağından uzak bölgede (2. Bölge) karbon dioksit oranında değişiklik olmamaktadır. Bunun nedeni ise 2. Bölgede herhangi bir işlemin yapılmamasından kaynaklanmaktadır. 1. Bölgenin karbon dioksit oranı ise sıfıra düşmektedir çünkü hem reenjeksiyon suyunda hem de doğal beslenme kaynağında karbon dioksit bulunmamaktadır.



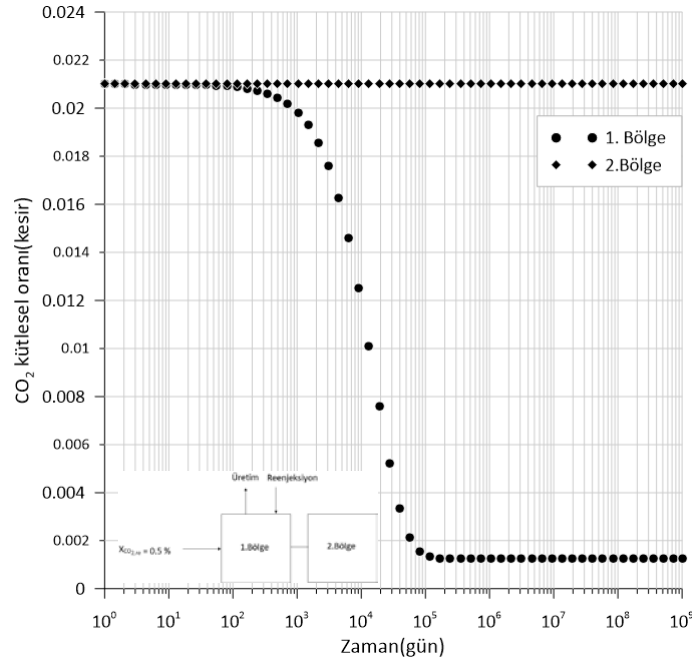
**Şekil 20:** Üretim ve reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağına yakınına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının sıfır olduğu senaryo için karbon dioksit oranının değişimi.

Altıncı senaryoda üretim doğal beslenme kaynağına yakın olan bölgeden (1. Bölge) yapılmaktadır ve reenjeksiyon ise doğal beslenme kaynağından uzak bölgede (2. Bölge) yapılmaktadır. Doğal beslenme kaynağından gelen su içinde karbon dioksit oranının sıfır olduğu varsayılmaktadır. Her iki bölgede de karbon dioksit oranı sıfıra düşmektedir. 2. Bölgeye reenjeksiyondan başka herhangi bir işlem yapılmamaktadır. Reenjeksiyon suyunun içinde de karbon dioksit bulunmadığı için 2. Bölgede karbon dioksit kararlı durumu %0 oranında elde edilir. 1. Bölgeye ise hem 2. Bölgeden hem de doğal beslenme kaynağından su girişi gerçekleşmektedir. Doğal beslenme kaynağında karbon dioksit olmadığı için ve ayrıca kararlı durumda 2. Bölgede de karbon dioksit olmayacağı için 1. Bölgede de kararlı durumda karbon dioksit oranı %0'dır.

Yedinci senaryo da tüm üretim / reenjeksiyon işlemleri doğal beslenmeye yakın bölgeye (1. Bölge) yapılmaktadır. Ayrıca doğal beslenme kaynağından gelen suyun da %0.5 karbon dioksit oranına sahip olduğu varsayılmıştır. Sonuçlar Şekil 22 ile verilmektedir. Beklendiği gibi, doğal beslenmeye uzak olan bölgenin (2. Bölge) karbon dioksit oranında herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir çünkü 2. Bölge içinde herhangi bir işlem gerçekleştirilmemektedir. 1. Bölgenin karbon dioksit oranı ise %0.125 değerinde sabitlenmektedir. Daha önce de açıklandığı gibi bu değer Denklem (15) ile elde edilebilmektedir. Bu durum için net üretim debisi 500 kg/s olmaktadır.



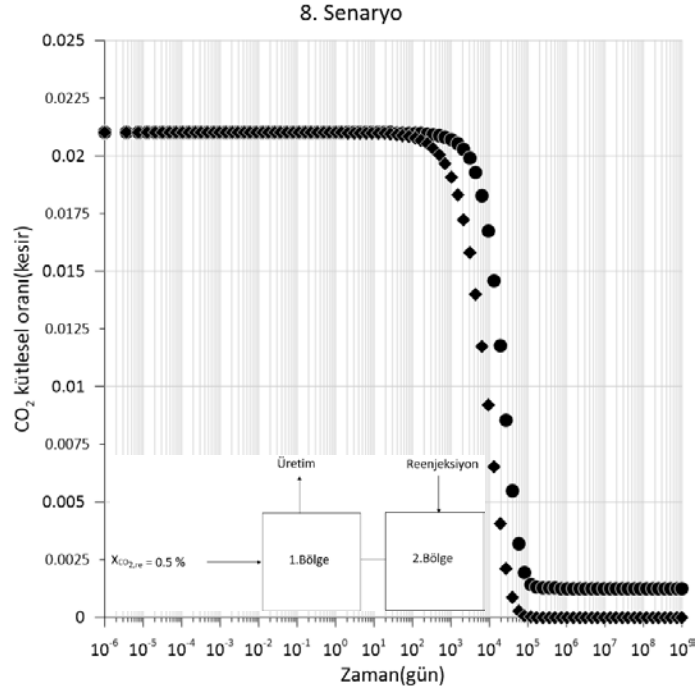
**Şekil 21:** Üretimin doğal beslenme kaynağına yakın olan, reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağına uzak olan bölgeye yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının sıfır olduğu senaryo.



**Şekil 22:** Üretim ve reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağının yakınına yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının %0.5 olduğu senaryo için karbon dioksit oranının davranışı.

Son senaryoda üretim doğal beslenme kaynağına yakın bölgeden (1. Bölge) reenjeksiyon ise doğal beslenme kaynağına uzak olan bölgeye (2. Bölge) yapılmaktadır. Doğal beslenme karbon dioksit oranının ise %0.5 olduğu varsayılmaktadır. Doğal beslenme kaynağından uzak olan bölgenin karbon dioksit oranı beklendiği gibi %0'da sabitlenmektedir çünkü bu bölgeye tek su girişi reenjeksiyon ile olmaktadır ve reenjeksiyon suyunu karbon dioksit içermemektedir. Doğal beslenme kaynağına yakın olan bölgenin kararlı durumdaki karbon dioksit oranı ise %0.125'de sabitlenmektedir. Bu da bir önceki

senaryoda olduğu gibi doğal beslenme kaynağından %0.5 karbon dioksit oranına sahip su ile reenjeksiyonun yapıldığı 2. Bölgeden gelen %0 karbon dioksit oranına sahip suyun karışması ile elde edilmektedir ve Denklem (15) ile sağlanmaktadır.



**Şekil 23:** Üretimin doğal beslenme kaynağına yakın olan, reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağına uzak olan bölgeye yapıldığı ve doğal beslenme karbon dioksit oranının %0.5 olduğu senaryo için karbon dioksit oranının davranışı.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada sıvının etken olduğu jeotermal rezervuarlar için basınç, sıcaklık ve karbon dioksit miktarının değişiminin hesaplanabilmesi amacıyla bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model kütle ve enerji dengesi denklemleri temel alınarak geliştirilmiştir. Üç bileşen için denge denklemleri uygulanmıştır. Basıncın modellenmesi amacıyla su için kütle korunumu prensibi, sıcaklığın modellenmesi amacıyla tüm sistem için enerjinin korunumu prensibi ve son olarak da karbon dioksit miktarının hesaplanabilmesi amacıyla karbon dioksit için kütle korunumu prensibi uygulanmıştır. Geliştirilen bu model literatürde yer alan analitik model ile sağlanmıştır. Model bu çalışmada rezervuar içinde karbon dioksit miktarının değişimini farklı üretim / reenjeksiyon stratejilerine göre modellemek için kullanılmıştır. Burada özellikle doğal beslenme kaynağının yeri üstünde vurgu yapılmaktadır ve üretim / reenjeksiyon işlemlerinin doğal beslenme kaynağına daha yakın ya da daha uzak bölgelere yapılmasının etkilerine bakılmıştır. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Rezervuar içinde karbon dioksit miktarının azalmasının en temel nedenlerinden birisi reenjekte edilen su içinde karbon dioksit bulunmamasıdır. Ayrıca doğal beslenme kaynağının karbon dioksit içeriği de rezervuardaki karbon dioksit miktarının değişmesinde önemli rol oynamaktadır.
- Sabit debide üretim / reenjeksiyon işlemlerinin devam etmesi halinde, karbon dioksit oranları kararlı duruma ulaşmaktadır. Kararlı durumdaki karbon dioksit oranları ise üretimin ve reenjeksiyonun hangi bölgeye yapıldığına göre ve aynı zamanda da doğal beslenme suyunda karbon dioksit olup olmadığına göre değişmektedir.
- Doğal beslenme kaynağından da karbon dioksit desteği olması durumunda üretimin ve reenjeksiyonun doğal beslenme kaynağından uzak bölgelerde yapılması kararlı durumda rezervuarın ortalama karbon dioksit miktarını en yüksek seviyede tutmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] SATMAN, A., “Kişisel görüşme”, İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, 2019.
- [2] HOŞGÖR, F. B., TÜREYEN, Ö. İ., SATMAN, A. ve ÇINAR, M., “Effects of carbon dioxide dissolve in geothermal water on reservoir production performance”, paper presented at the World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- [3] SATMAN, A., TÜREYEN, Ö. İ., KORKMAZ BAŞEL, E. D., GÜNEY, A., ŞENTÜRK, E. ve KİNDAP, A., “Effect of carbon dioxide content on the well and reservoir performances in the Kızıldere geothermal field”, paper presented at the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, 13-15 February 2017.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ALKAN, H. and SATMAN, A., "A new lumped parameter model for geothermal reservoirs in the presence of carbon dioxide", Geothermics, 19, 469-479, 1990.
- [9] HOŞGÖR, F. B., TÜREYEN, Ö. İ. Ve SATMAN, A., “Keeping inventory of carbon dioxide in liquid dominated geothermal reservoirs”, Geothermics, 64, 55-60, 2016
- [10] SCHILTHUIS, R. J., “Active Oil and Energy”, Trans. AIME, 118, 33-52, 1936.

## ÖZGEÇMİŞ

### Alper Süleyman CAN

Alper Süleyman Can 1992 yılında İstanbul’da doğmuştur. Fezziye Mektepleri Vakfı Özel Işık Lisesinde 2010 yılında lise eğitimini tamamlamıştır. 2016 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Aynı Üniversitenin Enerji Enstitüsünden 2019 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak yüksek mühendis unvanını almıştır. Şu an İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsünde doktorasını yapmaktadır. İlgi alanları arasında jeotermal rezervuar mühendisliği bulunmaktadır.

### 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 üyeliği görevine doçent olarak devam etmektedir. İlgi 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. İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü’nden 2017 yılında emekliye ayrılmıştır. İlgi alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliğinde üretim ve rezervuarla ilgili konular yer almaktadır.