



**Bu bir MMO
yayıdır**

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

TÜRKİYEDEKİ ÇÖZÜNMÜŞ KARBONDİOKSİT İÇEREN JEOTERMAL SİSTEMLERİN MODELLENMESİ İÇİN BASİT VE HIZLI MODELLER

**ÖMER İNANÇ TÜREYEN
ABDURRAHMAN SATMAN
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**



TÜRKİYEDEKİ ÇÖZÜNMÜŞ KARBONDİOKSİT İÇEREN JEOTERMAL SİSTEMLERİN MODELLENMESİ İÇİN BASİT VE HIZLI MODELLER

Fast and Easy Models for Modeling Geothermal Systems in Turkey

Ömer İnanç TÜREYEN
Abdurrahman SATMAN

ÖZET

Jeotermal enerji temiz, ucuz ve yenilenebilir olması nedeniyle oldukça çekici bir enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynağının etkin şekilde kullanılması için rezervuar mühendisliğinin etkin şekilde kullanılması ve rezervuar modelinin geliştirilmesi gerekmektedir. Rezervuar modellenmesi için literatürde çeşitli matematiksel modeller mevcuttur. Burada önemli olan eldeki jeotermal rezervuar için uygun ve kullanımı kolay bir modelin seçilmesidir.

Türkiye'deki keşfedilmiş jeotermal rezervuarların iki ortak özelliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki sıvı su ağırlıklı olmasıdır. Diğer ortak özellik ise jeotermal su içinde çözünmüş olarak bulunan karbon dioksittir. Türkiye'deki sahaların modellenmesi sırasında özellikle karbon dioksitin dikkate alınması gerekmektedir. Sıvı suyun hakim olduğu rezervuarlarda karbon dioksit miktarının rezervuar basıncını çok fazla etkilememesine rağmen, karbon dioksit miktarının değişiminin modellenmesi oldukça kritiktir çünkü karbon dioksit miktarının kuyu başı basınçlarına ve dolayısı ile de üretime olan etkisi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada özellikle Türkiye'deki jeotermal sahaların modellenmesi için kullanılacak ve literatürde yer alan basit ve hızlı modeller verilmektedir. Bu modeller sıvının hakim olduğu jeotermal sistemler için geçerlidir. Bu modellerin geliştirilmesinde basıncın modellenmesi için su üstünde kütle korunumu, karbon dioksit oranının değişiminin modellenmesinde karbon dioksit üstünde kütle korunumu ve sıcaklığın modellenmesinde tüm sistem üstünde enerjinin korunumu kullanılmıştır. Geliştirilen bu modeller kullanılarak bazı parametrelerin jeotermal rezervuarın performansı üstündeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal rezervuar modellenmesi, karbon dioksit, basınç, sıcaklık

ABSTRACT

Geothermal energy is an attractive source of energy because it is environmentally friendly, cheap and renewable. In order to manage the reservoir in a sustainable manner, reservoir modeling is a must. Many models exist in the literature. The important factor is to use an appropriate model that best describes the behavior of the reservoir.

There are two common characteristics of the geothermal reservoirs in Turkey. One is that almost all are liquid dominated. The other is that almost all of them contain some amount of carbon dioxide. Even though, the carbon dioxide does not have a significant effect regarding the reservoir pressure, the effects inside the well during flow can be substantial. Hence, modeling the carbon dioxide behavior is crucial in geothermal engineering.

In this study we mainly review some of the very simple models given in the literature. These models have been developed for geothermal reservoirs in Turkey, since they are valid for liquid dominated geothermal systems. In developing these models, three conservation equations are considered. A mass balance on water for modeling pressure, a mass balance on carbon dioxide for modeling the change of carbon dioxide content and finally an overall energy balance for modeling the temperature. Using the models, effects of various parameters on the performance is given.

Key Words: Geothermal reservoir modeling, carbon dioxide, pressure, temperature.

1. GİRİŞ

Herhangi bir jeotermal sahanın iyi yönetilebilmesi için ileriye yönelik performans tahminlerinin iyi yapılması gerekmektedir. Modellemede jeotermal rezervuarlar için, ve özellikle Türkiye deki jeotermal rezervuarlar için, tahmini yapılması gereken en önemli üç adet değişken bulunmaktadır. Bunlardan ilki basıncıdır. Basınç rezervuarın sürdürülebilir olarak işletilmesinin arkasındaki en önemli değişkendir. Rezervuar basıncı rezervuar akışkanının yüzüne taşınabilmesi için gerekli enerjiyi sağlamaktadır.

Jeotermal rezervuarlarda diğer modellenmesi gereken değişken ise sıcaklıktır. Jeotermal sahalarda uygulama ne olursa olsun esas olan enerji üretimidir. Rezervuarda oluşabilecek herhangi bir sıcaklık düşümü üretilen enerji miktarını da azaltacağından sıcaklığın da modellenmesi oldukça önemli hale gelmektedir. Rezervuar sıcaklığının düşmesi sonucunda aynı miktarda enerjinin üretilebilmesi için debinin artırılması gerekecektir ve bu da dolayısı ile daha fazla basınç düşümüne neden olacaktır.

Modellenmesi gereken parametreler arasında yer alan karbon dioksit ise özellikle Türkiye deki sahalarda için çok büyük önem taşımaktadır. Su içinde çözülmüş olan karbon dioksitin en önemli etkisi ayrışma basıncı üstündedir. Çözülmüş olan karbon dioksitin miktarı arttıkça ayrışma basıncı da artmaktadır. Ayrışma basıncının değişmesi genel olarak rezervuar içindeki basıncı etkilemese bile kuyu içindeki akış davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Azalan karbon dioksit oranının doğal sonucu akış sırasında kuyu başı basınçlarının azalmasıdır. Bu nedenle rezervuar içindeki karbon dioksitin proje süresince nasıl değiştiğinin modellenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada literatürde bulunan modeller kullanılarak yukarıda belirtilen üç değişkenin modellenmesi tartışılmaktadır. Önce modelleme sırasında kullanılacak analitik modeller tanımlanmaktadır ve bu modellerin temelleri verilmektedir. Daha sonra geliştirilen bu modeller kullanılarak yapay bir örnek üstünde basınç, sıcaklık ve karbon dioksit miktarı davranışları açıklanmaktadır.

2. MODELLEME

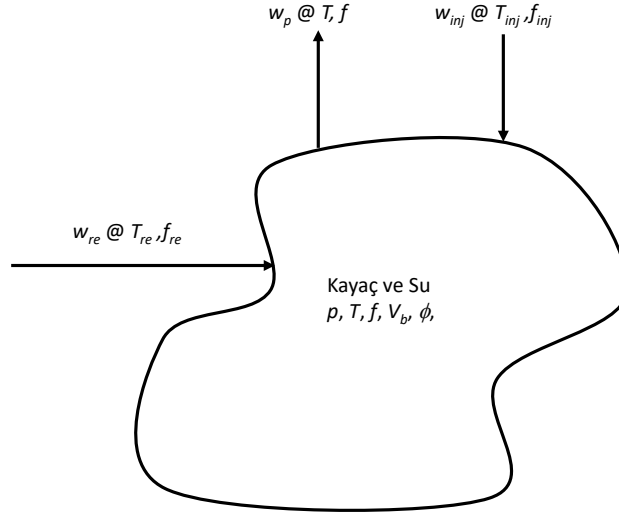
Bu bölümde herhangi bir kontrol hacmi üstünde kütlelerin korunumu ve enerjinin korunumu prensipleri kullanılarak basınç, sıcaklık ve karbon dioksit miktarının değişimi modellenmektedir. Kütlelerin korunumu prensibi iki kez kullanılmaktadır. İlkinde su üstünde, ikincisinde ise karbon dioksit üstünde kullanılmaktadır. Bu sayede basınç ve karbon dioksit miktarının değişimi modellenmektedir. Enerjinin korunumu tüm kontrol hacmi için gerçekleştirilir ve sıcaklık modellenmesi bu sayede yapılabilmektedir. Şekil-1’de korunum prensiplerinin uygulanacağı kontrol hacmi verilmektedir.

Burada p basıncı (bar), T sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), f suyun içinde çözülmüş karbon dioksit kütlelerinin suyun kütlelerine oranı (kesir), V_b kaba hacmi (m^3), ϕ gözenekliliği (kesir) ve w kütleli akış debisini (kg/s) göstermektedir. Kontrol hacminin su ve kayaktan oluştuğu varsayılmaktadır. w_p kütleli debisi ile yapılan üretim ve w_{inj} kütleli debisi ile yapılan enjeksiyon sabit olarak alınmıştır. Yapılan üretim akışkanın sıcaklığı rezervuar sıcaklığına eşit alınmaktadır ve içerdiği karbon dioksit miktarı oranı ise f kadardır. Yapılan enjeksiyon ise belirlenen bir T_{inj} sıcaklığında gerçekleştirilir ve belirlenen bir f_{inj} oranında karbon dioksite sahiptir. Beslenme kaynağından gelen akışkan w_{re} kütleli debisi ile

gelmektedir ve bu debi rezervuar basıncına bağlı olarak değişmektedir. Beslenme kaynağının sıcaklığı ise T_{re} değerinde sabit olarak alınmıştır ve beslenme suyunun içerdiği karbon dioksit oranı f_{re} kadardır. Kontrol hacminde sadece sıvı su olduğu varsayımı yapılmaktadır.

2.1 Basıncın Modellenmesi

Basıncı modelleyebilmek için kontrol hacmi içindeki suyun üstünde kütle korunumu prensibini uygulamamız gerekmektedir. Kontrol hacminde kütle korunumu prensibinin uygulanması Denklem 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Korunum prensiplerinin uygulandığı kontrol hacmi.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Kütlelerin kontrol hacminde} \\ \text{birikme debisi} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Kontrol hacmine enjekte} \\ \text{edilen kütleli debi} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Kontrol hacminden} \\ \text{üretilen kütleli debi} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Beslenme kaynağından} \\ \text{kontrol hacmine giren} \\ \text{kütleli debi} \end{array} \right) \quad (1)$$

Denklem 1'de verilen kütle korunumu daha önceden verilen değişkenler cinsinden yazacak olursak Denklem 2 elde edilir:

$$\frac{dm}{dt} = w_{inj} - w_p + w_{re} \quad (2)$$

Burada t zamanı (s) göstermektedir. Denklem 2'de beslenme kaynağından kontrol hacmine giren debi için Schilthuis [1] su girişi modeline benzer bir yaklaşım kullanırsa Denklem 3 elde edilmektedir.

$$\frac{d(\rho_w V_b \phi)}{dt} = w_{inj} - w_p + \alpha(p_{re} - p_0) \quad (3)$$

Burada ρ_w suyun yoğunluğunu (kg/m^3), p_0 kontrol hacminin ilk basıncını (bar) ve α ise beslenme katsayısını ($\text{kg}/(\text{bar}\cdot\text{s})$) göstermektedir. Beslenme katsayısı kısaca kontrol hacminde oluşacak birim basınç düşümünde beslenme kaynağından kontrol hacmine gelecek kütleli su debisini vermektedir. Kontrol hacminin kaba hacmi için sabit varsayımı yapıldığında ve türevli terim için zincir kuralı uygulandığında Denklem 4 elde edilir:

$$\kappa \frac{dp}{dt} = -w_n + \alpha(p_{re} - p) \quad (4)$$

Burada κ depolama katsayısını (kg/bar), w_n ise net üretim debisini (kg/s) vermektedir. Depolama katsayısını Denklem 5'de verilen ifade ile de temsil etmek mümkündür:

$$\kappa = \rho_w V_b \phi c_t \quad (5)$$

Burada c_t toplam sıkıştırılabilirliği (1/bar) vermektedir ve kayaç ve su sıkıştırılabilirliklerinin toplamı olarak alınır. Net üretim debisi ise Denklem 6 tarafından verilmektedir:

$$w_n = w_p - w_{inj} \quad (6)$$

Denklem 4 ile verilen diferansiyel denklemin çözümü Denklem 7 ile verilmektedir [2]:

$$\Delta p = \frac{w_n}{\alpha} \left(1 - e^{-\frac{\alpha}{\kappa} t} \right) \quad (7)$$

Burada $\Delta p = p_o - p$ şeklinde verilmektedir.

2.2 Sıcaklığın Modellenmesi

Sıcaklık davranışını modelleyebilmek için enerjinin korunumu prensibinin kontrol hacmi üstünde uygulanması gerekmektedir. Enerjinin korunumu prensibi Denklem 8 ile verilmektedir:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Enerjinin kayaç ve su} \\ \text{içinde birikme debisi} \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{l} \text{Üretimden dolayı} \\ \text{çıkan enerji debisi} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Enjeksiyondan dolayı} \\ \text{giren enerji debisi} \end{array} \right) \quad (8)$$
$$+ \left(\begin{array}{l} \text{Beslenme kaynağının kontrol} \\ \text{hacmine giren enerji debisi} \end{array} \right)$$

Denklem 8'de verilen enerjinin korunumu prensibini daha önceden verilen değişkenler cinsinden yazacak olursak Denklem 9 elde edilmektedir:

$$V_b \frac{d}{dt} [(1-\phi)\rho_r C_r T + \phi\rho_w u_w] = -w_p h_w + w_{inj} h_{w,inj} + w_{re} h_{w,re} \quad (9)$$

Burada ρ_r kayacın yoğunluğunu (kg/m³), C_r kayacın ısı kapasitesini (J/(kg°C)), u_w suyun iç enerjisini (J/kg), h_w suyun entalpisini (J/kg), $h_{w,inj}$ enjekte edilen suyun entalpisini (J/kg) ve $h_{w,re}$ beslenme kaynağından gelen suyun entalpisini (J/kg) vermektedir.

Denklem 9'da öncelikle bazı basitleştirmeler yapılması gerekmektedir. Bunlar Denklem 10 ve Denklem 11'de verilmektedir.

$$u_w = h_w = C_w T \quad (10)$$

$$V_b [(1-\phi)\rho_r C_r + \phi\rho_w C_w] = \gamma \quad (11)$$

Burada C_w suyun ısı kapasitesini (J/(kg°C)) vermektedir. w_{re} terimi yerine Schilthuis yaklaşımı kullanılırsa Denklem 9 Denklem 12 ile ifade edilebilir.

$$\gamma \frac{dT}{dt} = -w_p C_w T + w_{inj} C_w T_{inj} + \Delta p \alpha C_{w,re} T_{re} \quad (12)$$

Denklem 12'de verilen Δp terimi yerine daha önceden bulunan ve Denklem 7 ile verilen ilişki kullanılıp denklem çözülmüşse Denklem 13 elde edilmektedir. Denklem 13'de verilen çözüm ve benzerleri literatürde yer almaktadır (Satman, 2010; Tahirova, 2016).

$$T(t) = -\frac{w_n C_{w,re} T_{re}}{w_p C_w - \gamma \frac{\alpha}{\kappa}} e^{-\frac{\alpha}{\kappa} t} + \frac{w_{inj} C_{w,inj} T_{inj} + w_n C_{w,re} T_{re}}{w_p C_{w,p}} + \left[T_0 + \frac{w_n C_{w,re} T_{re}}{w_p C_w - \gamma \frac{\alpha}{\kappa}} - \frac{w_{inj} C_{w,inj} T_{inj} + w_n C_{w,re} T_{re}}{w_p C_{w,p}} \right] e^{-\frac{w_p C_w}{\gamma} t} \quad (13)$$

Burada T_0 ilk sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) vermektedir.

2.3 Rezervuar içinde karbon dioksit davranışının modellenmesi

Karbon dioksit oranının (f) davranışını modelleyebilmek için kütle korunumu prensibini bu defa kontrol hacminde sadece karbon dioksit üstünde uygulamak gerekmektedir. Buna göre karbon dioksit için kütle korunumu Denklem 14 ile verilmektedir.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Karbon dioksit} \\ \text{kütlesinin birikme debisi} \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{c} \text{Üretim ile çıkma} \\ \text{karbon dioksit debisi} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Enjeksiyon ile giren} \\ \text{karbon dioksit debisi} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Beslenme kaynağından kontrol} \\ \text{hacmine giren karbon dioksit debisi} \end{array} \right) \quad (14)$$

Daha önceden verilen değişkenler cinsinden Denklem 14'ü yazacak olursak Denklem 15 elde edilir.

$$\frac{dm_{CO_2}}{dt} = w_{inj} f_{inj} + w_{re} f_{re} - w_p f \quad (15)$$

Karbon dioksitin kütlesi Denklem 16 ile belirlenebilir.

$$m_{CO_2} = V_b \phi \rho_w f \quad (16)$$

Kaba hacmin, gözenekliliğin ve suyun yoğunluğunun çok fazla değişmediği göz önünde bulundurulursa, bu değişkenler için sabit varsayımı yapılabilir. Ayrıca Denklem 15'de beslenme debisi yerine Schilthuis yaklaşımı kullanılırsa Denklem 17 elde edilmektedir.

$$\frac{\kappa}{c_t} \frac{df}{dt} = w_{inj} f_{inj} + \alpha \Delta p f_{re} - w_p f \quad (17)$$

Denklem 17'deki Δp terimi için Denklem 7 kullanılabilir. Bundan sonra Denklem 17 çözüldüğünde Denklem 18 elde edilir (Hoşgör vd., 2016).

$$f(t) = f_0 e^{-\frac{w_p c_t}{\kappa} t} + \frac{w_{inj} f_{inj} + w_n f_{re}}{w_p} + \frac{w_n f_{re}}{w_p - \frac{\alpha}{c_t}} e^{-\frac{w_p c_t}{\kappa} t} - \frac{w_n f_{re}}{w_p - \frac{\alpha}{c_t}} e^{-\frac{\alpha}{\kappa} t} - \frac{w_{inj} f_{inj} + w_n f_{re}}{w_p} e^{-\frac{w_p c_t}{\kappa} t} \quad (18)$$

Denklem 18'in çıkartılışında enjekte edilen karbon dioksit oranı sabit olarak alınmaktadır. Bir başka yaklaşım da bunu değişken olarak almaktır. Jeotermal sahalarda eğer karbon dioksit enjeksiyonu

gerçekleşecekse enjekte edilecek karbon dioksit oranı üretilen karbon dioksit oranının bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Basitlik olması açısından bu ilişki doğrusal kabul edilmiştir ve Denklem 19'da verilmektedir.

$$f_{inj} = \beta f \quad (19)$$

Denklem 19'da verilen model kullanıldığında karbon dioksit için kütle dengesi denkleminin çözümünden Denklem 20 elde edilmektedir.

$$f(t) = f_0 e^{-\frac{(w_p - \beta w_{inj})c_t}{\kappa} t} + \frac{(w_p - \beta w_{inj})w_n f_{re} \left(1 - e^{-\frac{\alpha t}{\kappa}}\right) - \frac{\alpha w_n f_{re}}{c_t} \left(1 - e^{-\frac{(w_p - \beta w_{inj})c_t}{\kappa} t}\right)}{(w_p - \beta w_{inj}) \left[(w_p - \beta w_{inj}) - \frac{\alpha}{c_t} \right]} \quad (20)$$

Denklem 18 ve Denklem 20'de verilen f_0 terimi karbon dioksit oranının ilk değerini vermektedir.

3. YAPAY UYGULAMA

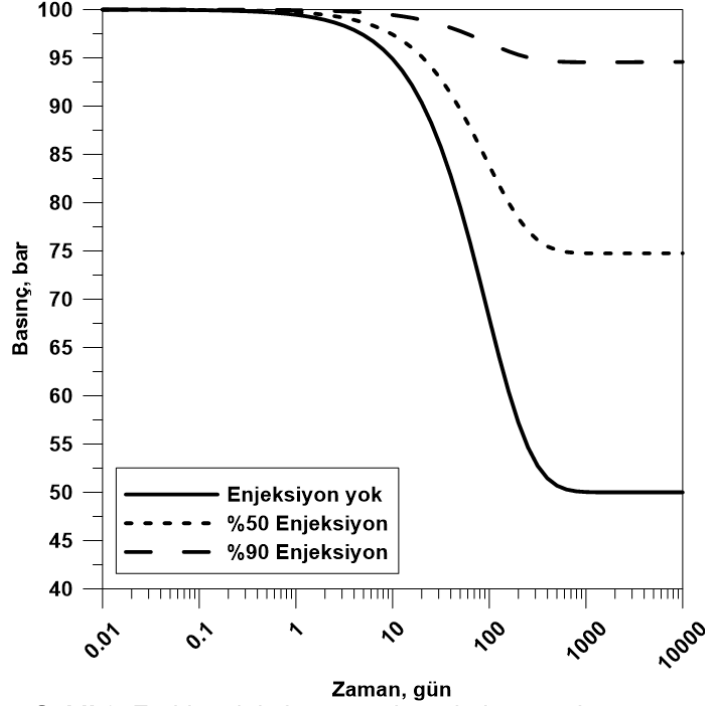
Bu bölümde yapay örnek üstünde basınç, sıcaklık ve karbon dioksit oranının davranışları gösterilmektedir. Yapay örnekte kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1: Yapay örnekte kullanılan rezervuar ve akışkan özellikleri.

Kaba hacim, m ³	10×10 ⁹
Gözeneklilik, kesir	0.05
Karbon dioksit ilk oranı, kesir	0.02
İlk basınç, bar	100
İlk sıcaklık, °C	200
Kayaç sıkıştırılabilirliği, 1/bar	1×10 ⁻⁴
Beslenme kaynağı sıcaklığı, °C	200
Enjeksiyon suyu sıcaklığı, °C	90
Kayaç ısı kapasitesi, J/(kg·°C)	1000
Kayaç yoğunluğu, kg/m ³	2600
Suyun yoğunluğu, kg/m ³	870.9
Suyun ısı kapasitesi, J/(kg·°C) @ 200 °C	4449
Suyun ısı kapasitesi, J/(kg·°C) @ 90 °C	4184
Suyun sıkıştırılabilirliği, 1/bar	8.31×10 ⁻⁵
Toplam sıkıştırılabilirlik, 1/bar	1.831×10 ⁻⁴
Depolama kapasitesi, kg/bar	7.97×10 ⁷
Beslenme katsayısı, kg/(bar·s)	10
Üretim debisi, kg/s	500

İlk önce basınç davranışı ele alınacaktır. Şekil 2'de rezervuar basıncı davranışı gösterilmektedir. Üç farklı eğri, üç farklı enjeksiyon durumunu vermektedir. Buna göre, hiç enjeksiyon yapılmaması durumu, %50 enjeksiyon yapılması durumu ve %90 enjeksiyon yapılması durumları karşılaştırılmıştır. Her üç durum için de basınç davranışları aynı eğilimi göstermektedir. Buna göre, basınç önce azalır ve daha sonra da sabitlenir. Basıncın azalması üretimden kaynaklanmaktadır. Doğal olarak üretim yapıldığında rezervuardan kütle çıkarılacağı için basınç düşmektedir. Daha sonra ise basınç sabitlenmektedir. Bunun nedeni ise beslenme kaynağıdır. Üretime belli bir süre devam edilmesi durumunda rezervuardan net çekilen kütle ile beslenme kaynağından girecek olan kütle birbirlerine eşitlendiğinde kararlı akışa geçilmiş olur ve dolayısı ile basınç sabitlenmektedir. Şekil 1'den de

anlaşılacağı gibi, enjeksiyon oranı arttıkça kararlı akış basınçları da artmaktadır. Bu da beklenen bir sonuçtur çünkü, enjeksiyon arttıkça rezervuardan çekilen net kütle miktarı azalmaktadır.



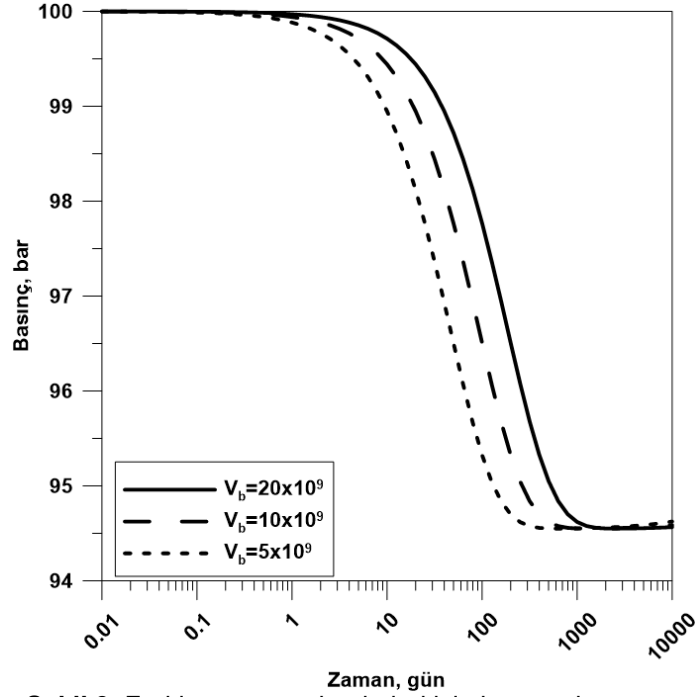
Şekil 2. Farklı enjeksiyon oranlarında basınç davranışı.

Jeotermal rezervuarın hacminin etkisini incelemek için farklı hacimlerde % 90 enjeksiyon oranında basınç eğrileri incelenmektedir. Sonuçlar Şekil 3'de verilmektedir. Denklem 7'de verilen modelde hacim açık olarak yer almamaktadır, fakat hacmin etkisi depolama kapasitesinde karşımıza çıkmaktadır. Hacmin artması depolama kapasitesinin artması anlamına gelir ve azalması da depolama kapasitesinin azalması demektir. Şekil 3 incelendiğinde hacim artışının ulaşılan kararlı basınç değerine etki etmediği görülmektedir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Denklem 7'nin zaman sonsuza giderken limiti alınırsa Denklem 21 elde edilir:

$$\Delta p_{ka} = \frac{W_n}{\alpha} \quad (21)$$

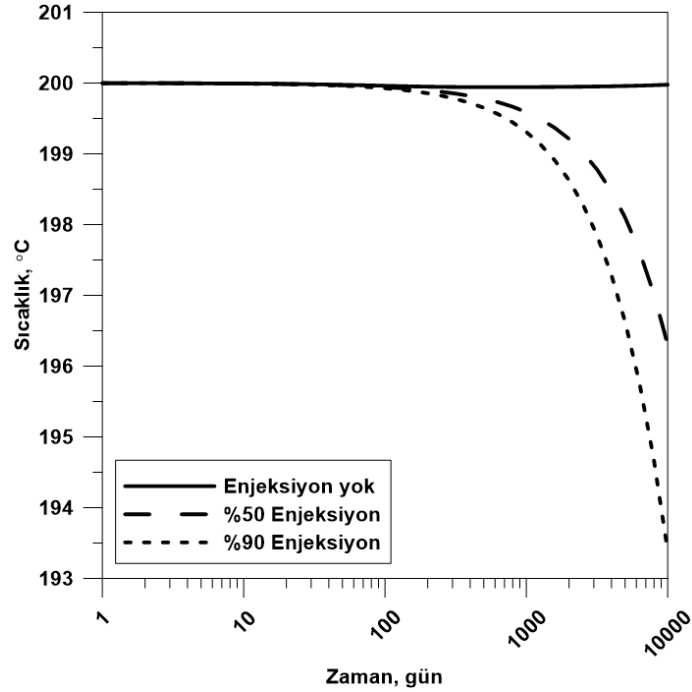
Burada ka alt indisi kararlı akış anlamına gelmektedir. Denklem 21'den görüldüğü gibi kararlı akış basıncının değeri depolanma katsayısından bağımsızdır. Hacmin artışı ya da azalışı kararlı akış basıncına ulaşma zamanını etkilemektedir. Eğer jeotermal rezervuarın hacmi küçükse kararlı akışa daha kısa sürede ulaşılmaktadır. Bu da beklenen bir sonuçtur çünkü hacmin azalması rezervuar içinde genleşebilecek su miktarının da azalması anlamına gelecektir.

Yukarıda verilen iki durum için (farklı enjeksiyon oranları ve farklı rezervuar hacmi değerleri) şimdi de sıcaklık karşılaştırması yapılacaktır. Şekil 4'de farklı enjeksiyon oranları için sıcaklık modellenmesi verilmektedir. Tahmin edileceği gibi sıcaklık düşüşleri büyük ölçüde enjeksiyon işlemlerinden kaynaklanmaktadır. 10000 gün sonunda en çok sıcaklık düşümüne sahip olan %90 enjeksiyonun gerçekleştirildiği senaryodur.

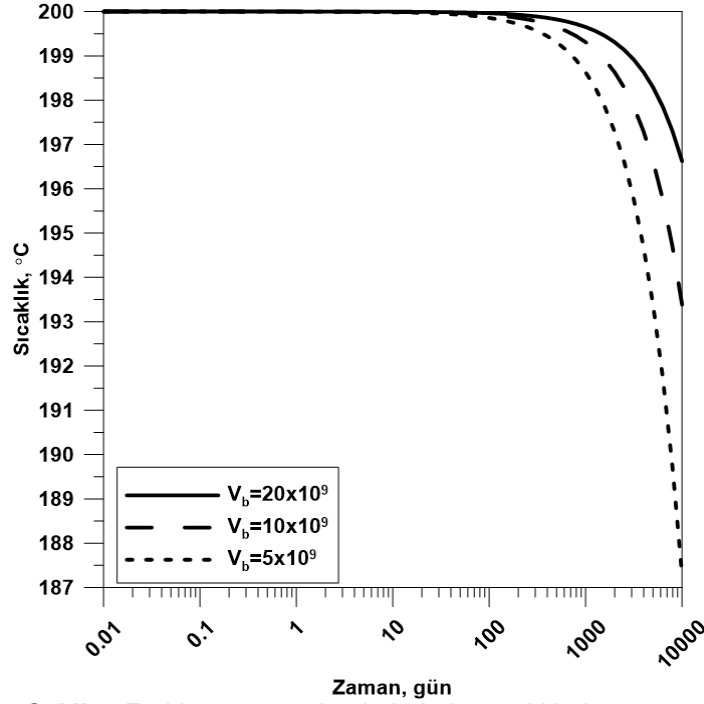


Şekil 3. Farklı rezervuar hacimleri için basınç davranışı.

Şekil 5’de ise farklı rezervuar hacimlerinin rezervuar sıcaklık davranışına olan etkilerini vermektedir. Şekil 5’in oluşturulmasında model içinde enjeksiyon oranı %90 olarak alınmıştır. Buna göre rezervuar ne kadar daha küçük olursa sıcaklığı o kadar fazla düşmektedir. Bu da beklenen bir davranıştır. Rezervuar hacmi küçüldükçe içerdiği toplam enerji miktarı da buna göre azalacaktır ve enjeksiyon sonucu soğutmak daha kolay hale gelmektedir.



Şekil 4. Farklı enjeksiyon oranlarında sıcaklık davranışı.

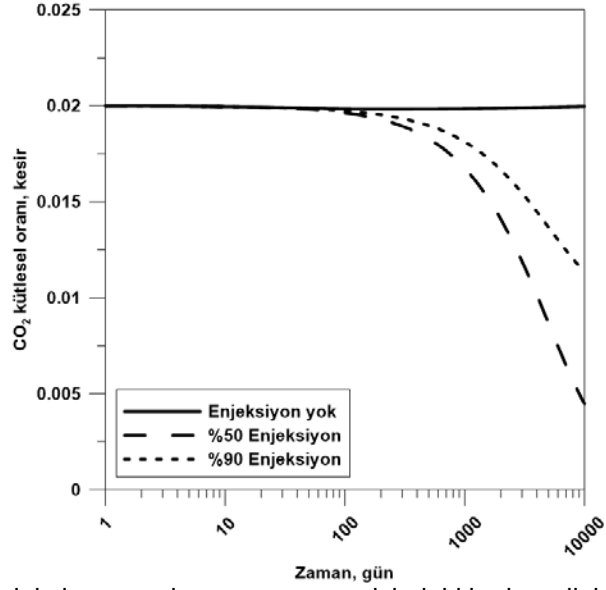


Şekil 5. Farklı rezervuar hacimlerinde sıcaklık davranışı.

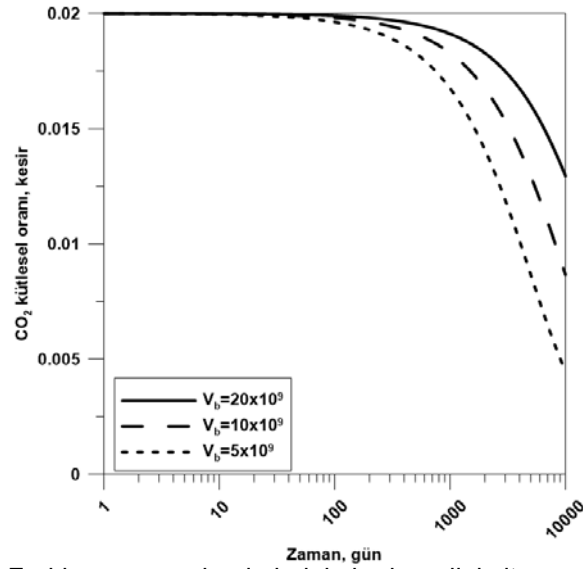
Karbon dioksitin kütleli oranının değişiminin enjeksiyon oranlarına göre sonuçları Şekil 6'da verilmektedir. Burada yapılan varsayımlardan birisi de enjekte edilen suyun içinde hiç karbon dioksit bulunmamasıdır. Ayrıca, beslenme kaynağından gelen suyun da rezervuar içindeki su kadar karbon dioksit içerdiği varsayılmaktadır. Şekil 6'ya bakıldığında karbon dioksit oranlarında enjeksiyon olması halinde önemli miktarlarda azalma görülmektedir. Bunun nedeni biraz önce de bahsedildiği gibi enjekte edilen suyun karbon dioksit içermemesidir. Karbon dioksit içermeyen su rezervuar içindeki oranı düşürmektedir. Enjeksiyon miktarı arttıkça da oran daha fazla düşmektedir. Enjeksiyonun hiç yapılmaması durumunda ise rezervuar içinde karbon dioksit miktarı hemen hemen hiç değişmemektedir. Şekil 6'da verilen sonuçlara göre rezervuar içindeki karbon dioksit oranının değişmesinde enjeksiyon miktarının büyük etkisi bulunmaktadır.

Şekil 7'de karbon dioksit oranının hacim ile nasıl değiştiği verilmektedir. Rezervuar hacmi büyüdükçe karbon dioksit oranındaki değişim daha da azalmaktadır. Bu da beklenen bir sonuçtur. Rezervuar hacmi küçüldükçe içindeki karbon dioksit içeren su miktarı da küçülmektedir. Dolayısı ile karbon dioksit içermeyen suyun basılmasıyla birlikte azalma daha fazla olmaktadır.

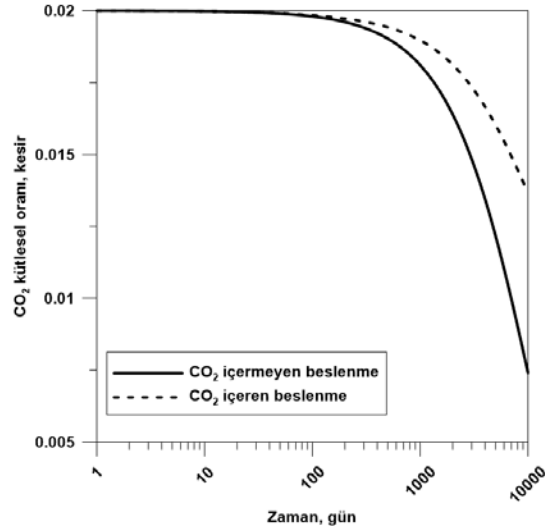
Son olarak beslenme kaynağından gelen suyun içerdiği karbon dioksit oranının rezervuar içindeki karbon dioksit oranına olan etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 8'de verilmektedir. Bu örnekte enjeksiyon oranı %50 olarak alınmıştır. Şekil 8'de iki durum söz konusudur. Bunlarda ilki beslenme suyunun rezervuar içindeki karbon dioksit kadar karbon dioksit içermesi, diğeri ise beslenme suyunun hiç karbon dioksit içermemesi. Şekil 8'den de anlaşılacağı gibi, beslenme suyunda karbon dioksit olması durumunda rezervuar içindeki karbon dioksit oranı daha az azalmaktadır. Rezervuar içindeki karbon dioksit oranının azalım nedeni, yapılan enjeksiyon dur. Enjekte edilen suyun içinde karbon dioksit olmadığı varsayımı yapılmaktadır. Bu nedenle beslenme kaynağında karbon dioksit olsun ya da olmasın karbon dioksit oranı azalmaktadır. Beslenme kaynağında karbon dioksit olmaması durumunda ise bu azalım tahmin edileceği gibi çok daha fazla olmaktadır.



Şekil 6. Farklı enjeksiyon oranlarının rezervuar içindeki karbon dioksit oranına etkisi.



Şekil 7. Farklı rezervuar hacimlerinin karbon dioksit oranına etkisi.



Şekil 8. Beslenme kaynağındaki karbon dioksit miktarının karbon dioksit oranına etkisi.

4. TARTIŞMA

Bu bölümde daha önceden özetlenen basınç, sıcaklık ve karbon dioksit modelleri hakkında tartışma verilmektedir. İlk olarak sıcaklık modellemesi ile ilgili olarak bir konuya değinilecektir. Geliştirilen modellerde modellemesi yapılan sıcaklık kontrol hacminin ortalama sıcaklığını yansıtmaktadır. Verilen yapay örneklerde de görüldüğü gibi, sıcaklık düşümü hacimlerin rezervuar ölçeklerinde olması durumunda çok fazla değişmemektedir. Fakat bu rezervuar içinde yerel olarak büyük değişimlerin olmayacağı anlamına gelmemelidir. Modellenen sıcaklık ortalama sıcaklıktır. Yerel sıcaklık değişimlerinin de modellenmesi için yapılması gereken tüm rezervuarı tek bir kontrol hacmi ile değil birden fazla kontrol hacmi ile modellemektir. Bu sayede istenen bölgelerde boyut olarak daha küçük kontrol hacimleri kullanılarak modelleme gerçekleştirilebilir ve yerel sıcaklık değişimleri modellenabilir.

Basınç modellemesinde de modellenen ortalama basınç olmasına rağmen, sıcaklıkta olduğu kadar önemli değildir. Bunun nedeni, kuyulardan yapılan üretimden kaynaklı basınç değişimlerinin sıcaklığa göre rezervuar içinde çok daha hızlı hareket etmesindedir. Ayrıca ortalama basıncın modellenmesi son derece önemlidir çünkü üretimi sağlayan enerji rezervuarın ortalama basıncı tarafından sağlanmaktadır.

Rezervuara ait beslenme katsayısı ve depolama katsayısı değerleri üretim değerleri kullanılarak bulunabilmektedir. Buna göre yapılan (ve ölçülen) üretime karşılık sahadan gelen ortalama rezervuar basıncı verilerini sağlayacak en uygun model parametreleri bir optimizasyon ile tahmin edilir. Bu tahminler kullanılarak ileriye yönelik performans tahminleri yapılabilir. Sahadan ortalama rezervuar basıncı verilerinin elde edilmesi için ise gözlem kuyuları kullanılmalıdır ve bu gözlem kuyusu yerleri bu kuyulardan ölçülen basıncın ortalama rezervuar basıncını yansıtacak şekilde seçilmelidir.

Son olarak karbon dioksit ile ilgili olarak tekrarlanması gereken bir konu bulunmaktadır. Karbon dioksitin varlığının en büyük etkisi suyun ayrışma basıncı üstünedir. Karbon dioksit miktarı arttıkça ayrışma basıncı da artmaktadır. Türkiye deki rezervuarlar göz önünde bulundurulduğunda, rezervuar basınçlarının ayrışma basıncının altına düşmesi çok fazla söz konusu değildir. Ayrışmalar genel olarak kuyu içinde gerçekleşmektedir. Karbon dioksit miktarının artması ise ayrışma derinliğinin daha derinlerde meydana gelmesine neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak daha fazla kuyu başı basınçları gözlenmektedir. Yüksek kuyu başı basınçları istenen bir durumdur ve yüzeyde akışkanın daha rahat taşınmasına yol açar. Rezervuar içinde karbon dioksit oranlarının düşmesi kuyu içinde ayrışma derinliklerinin daha sığda olmasını sağlayarak kuyu başı basınçlarının da düşmesine neden olabilmektedir. Bu da yüzeyde buharın yeterli basınçta taşınmamasına neden olabilir. Bu tür sorunların öngörülebilmesi için rezervuar modellemesinde karbon dioksit miktarının da nasıl değiştiğini modellemek oldukça önemli olmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada literatürde yer alan bazı modeller kullanılarak jeotermal rezervuarlar için basınç, sıcaklık ve karbon dioksit oranının değişimini veren analitik denklemler tanıtılmaktadır. Buna göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Jeotermal rezervuarların modellenmesi için basit analitik denklemler tanıtılmaktadır.
- Basınç davranışının modellenmesinde en önemli parametrelerden birisi enjeksiyondur ve enjeksiyon oranı ne kadar yüksek olursa basınç o kadar korunabilir.
- Karbon dioksit değişimini etkileyen iki ana faktör bulunmaktadır. Bunlardan ilki yapılan enjeksiyon miktarıdır. İçinde karbon dioksit bulunmayan su ne kadar fazla enjekte edilirse rezervuar içinde karbon dioksit oranı da orantılı olarak düşecektir. Diğer faktör ise beslenme kaynağı içinde bulunan karbon dioksit miktarıdır. Rezervuar içindeki karbon dioksit miktarının değişimini etkileyeceğinden dolayı bilinmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Schilthuis, R. J., 1936. Active Oil and Reservoir Energy. Trans. AIME 118, pp. 33-52.
- [2] SARAK, H., ONUR, M., SATMAN, A., 2005. Lumped – Parameter models for low temperature geothermal reservoirs and their application. Geothermics 34, 728-755.
- [3] SATMAN, A., 2010. Sustainability of a geothermal reservoir. Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, April 25-29
- [4] TAHİROVA, G., 2016. Performance behavior of liquid dominated geothermal reservoirs under a constant energy production scheme. MSc Thesis, ITU Graduate School of Science, Engineering and Technology
- [5] HOŞGÖR, F. B., TÜREYEN, Ö. İ., SATMAN, A., 2016. Keeping inventory of carbon dioxide in liquid dominated geothermal systems. Geothermics 64, 55-60

ÖZGEÇMİŞ

Ömer İnanç TÜREYEN

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1997 yılında lisans ve 2000 yılında yüksek lisans unvanlarını aldı. 2005 yılında Stanford Üniversitesi'nde doktorasını tamamladıktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak göreve başladı. Halen aynı bölümde öğretim üyeliği görevine doçent olarak 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. İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında emekliye ayrılmıştır. İlgili alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliğinde üretim ve rezervuarla ilgili konular yer almaktadır.