

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**JEOTERMAL KUYULAR İÇİN ÇOK GİRİŞLİ KUYU
İÇİ P-T AKIŞ MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Murat ÇINAR**

Anabilim Dalı : PETROL VE DOĞAL GAZ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : PETROL VE DOĞAL GAZ MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2005

**JEOTERMAL KUYULAR İÇİN ÇOK GİRİŞLİ KUYU İÇİ
P-T AKIŞ MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Murat ÇINAR
(505031502)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Haziran 2005**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Abdurrahman SATMAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mustafa ONUR
Prof.Dr. İlyas ÇAĞLAR**

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Umarım yüksek lisans çalışması olarak yaptığım bu çalışma ileri de yapılacak olan benzer çalışmalara kaynak teşkil eder.

Tez konusunun belirlenmesi ile başlayan çalışma süresince yapmış olduğu yönlendirme ve göstermiş olduğu ilgiden dolayı danışmanım Prof. Dr. Abdurrahman SATMAN'a teşekkür ederim. Tez sırasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa ONUR'a ayrıca teşekkür ederim.

Bu çalışma sırasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen ailemi, araştırma görevlisi arkadaşlarımı ve çok yakında eşim olacak kız arkadaşımı anmadan edemeyeceğim.

Murat ÇINAR

5 Mayıs 2005

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	
ÇİZELGE LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	2
1.2 Sunulan Çalışma	3
BÖLÜM 2 TEK FAZLI AKIŞIN MODELLENMESİ	4
2.1 Basınç Düşümünün Hesaplanması	4
2.2 Sıcaklık Düşümünün Hesaplanması	7
BÖLÜM 3 İKİ FAZLI AKIŞIN MODELLENMESİ	2
3.1 Basınç Düşümünün Hesaplanması	12
3.2 Sıcaklık Düşümünün Hesaplanması	17
3.3 Gazın Sıvıdan Ayrılma Basıncının Bulunması	20
BÖLÜM 4 ÇOK GİRİŞLİ KUYU MODELİ	22
BÖLÜM 5 KUYU İÇİ AKIŞ MODELİNİN UYGULAMALARI	25
5.1 Modelin AF – 21 Kuyusuna Uygulanması	25
5.2 CO ₂ Derişiminin Basınç ve Sıcaklık Profiline Etkisi	31
5.3 Çok Girişli Kuyu Uygulaması	35
BÖLÜM 6 SONUÇLAR	40
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	44

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 5.1	Girişlerin özellikleri	27
Çizelge 5.2	Kuyuya ait parametrelerin değerleri	30
Çizelge 5.3	Uygulamada kullanılan veriler	32
Çizelge 5.4	Çok girişli kuyu uygulamasına ait veriler	36

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Kontrol Hacmi	4
Şekil 2.2	: Kuyu içi ısı probleminin şematik gösterimi	8
Şekil 2.3	: Sunulan boyutsuz zaman fonksiyonu korelasyonunun literatürdeki benzerleri ile karşılaştırılması	10
Şekil 3.1	: Su – CO ₂ çözeltisinin iki faz bölgesindeki basınç – özgül entalpi - sıcaklık ilişkisi	13
Şekil 3.2	: Hız ve konsantrasyon profillerinin şematik gösterimi	14
Şekil 4.1	: Birden fazla rezervuardan kuyunun beslenmesi durumunun gösterimi	23
Şekil 5.1	: Programın akış şeması	27
Şekil 5.2	: AF – 21 kuyusunun dinamik basınç ve sıcaklık profilleri	28
Şekil 5.3	: Statik – dinamik sıcaklık profilleri	29
Şekil 5.4	: Ölçülen sıcaklık değerleriyle hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	30
Şekil 5.5	: Ölçülen basınç değerleriyle hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	31
Şekil 5.6	: CO ₂ derişiminin sıcaklık ve basınç profiline etkisi	33
Şekil 5.7	: Sıvıdan ayrılan CO ₂ miktarının derinlik ile değişimi	34
Şekil 5.8	: CO ₂ derişiminin yoğunluk üzerine etkisi	35
Şekil 5.9	: Çok girişli kuyu uygulamasının şematik gösterimi	37
Şekil 5.10	: Çok girişli kuyu uygulamasının basınç sıcaklık profilleri	37
Şekil 5.11	: Sıvıdan ayrılan CO ₂ miktarının derinlik ile değişimi	38
Şekil 5.12	: Yoğunluğun derinlik ile değişimi	39

SEMBOL LİSTESİ

a	: jeotermal gradyan, °C / m
A'	: difüzyon derinliği, m
c	: ısı kapasite, cal/g -°C
C	: integrasyon sabiti
d	: çap, m
dL	: uzunluk, m
dX	: genişlik, m
dZ	: yüksekli, m
f	: Moody sürtünme katsayısı
f_g	: gazın hacimsel oranı (void fraction)
f_L	: sıvının hacimsel oranı (liquid hold up)
f(t)	: boyutsuz zaman fonksiyonu
g	: yerçekimi ivmesi, m / s ²
g_c	: birim değişimi faktörü, 32.17 (lb _m - ft) / lb _f / s ²
h	: entalpi, Btu/lb _m
k	: geçirgenlik, md
k_e	: formasyonun ısıl iletkenliği, cal / m-gün-°C (33.6 Btu / ft-gün-°F)
K_H	: Henry sabiti, boyutsuz
m	: kütle, kg
N_f	: tabaka sayısı
n_{CO2}	: CO ₂ 'nin sıvı fazdaki mol oranı
p	: basınç, bar
p_R	: ortalama rezervuar basıncı, bar
p_{CO2}	: CO ₂ 'nin kısmi basıncı, bar
p_{fp}	: gazın sıvı fazdan ayrılma basıncı, bar
p_s	: sıvının denge buhar basıncı, bar
q	: debi, m ³ / s
Q	: Isı, cal
r₂'	: koruma borusunun iç çapı, m
S	: Zar faktörü, boyutsuz
t	: zaman, gün
t_D	: iletim için boyutsuz zaman (Fourier time)
T	: Sıcaklık, °C
T_{ei}	: kuyudibi sıcaklığı, °C
T_e	: ortam sıcaklığı, °C
T_i	: akan akışkanın sıcaklığı, °C
w	: kütleli debi, kg / h
x	: kütleli oran
y	: kuyunun dibinden yukarı ölçülen uzaklık ,m
Y_{CO2}	: sıvıdan ayrılan CO ₂ miktarı

Grek semboller

α	: formasyonun ısıl diffüzivitesi (thermal diffusivity), $m^2/gün$, ($0.96 ft^2/gün$)
ρ	: yoğunluk, kg / m^3
μ	: akma viskozitesi, cp
v	: akışkanın hızı, m / sn
v_{sg}	: yüzeysel hız (superfacial in-situ velocity), m / s
v_{∞}	: kabarcıkların yükselme hızı (terminal rise velocity of bubbles in bubbly flow), m / s
θ	: borunun yatayla yaptığı açı
Φ	: Boyutsuz düzeltme parametresi

Alt indisler

m	: karışım
g	: gaz
L	: sıvı
w	: su
CO_2	: Karbondioksit

JEOTERMAL KUYULAR İÇİN ÇOK GİRİŞLİ KUYU İÇİ AKIŞ MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ ÖZET

Birden çok tabakanın (veya formasyonun) giriş yaptığı jeotermal kuyuların sıcaklık ve basınç profillerinin oluşturulabilmesi için kuyu içi basınç – sıcaklık (p-T) modeli geliştirilmiştir. Kuyuya farklı noktalardan, farklı sıcaklıklarda ve basınçta akışkan girişi olabilmektedir.

Dünyada jeotermal sahaların çok az bir kısmını gazın etken olarak bulunduğu sistemler sınıflandırılmasına girmektedir. Jeotermal sistemlerin çoğunluğu, suyun etken olarak bulunduğu sistemlerdir. Ülkemizde de jeotermal sistemlerin çoğunluğunu suyun etken olarak bulunduğu sistemler oluşturmaktadır. Özellikle Türkiye’de, jeotermal suların birçoğu çözünmüş halde CO₂ içermektedir. CO₂’nin varlığı, suyun henüz buhar fazına geçmeye başlamadığı yüksek basınç koşullarında, iki fazlı akışın oluşmasına neden olmaktadır. Kuyu içi akış modeli geliştirilirken akışın kararlı olduğu ve CO₂’nin kısmi basıncının hesaplanmasında Henry yasasının geçerli olduğu varsayılmaktadır. Rezervuardan kuyuya olan akış Darcy denklemi ile tanımlanmıştır. Modele girişlerin derinlikleri ile rezervuar özellikleri girilmekte ve çıktı olarak basınç ve sıcaklık profilleri alınmaktadır. Model, kuyunun ölçülmüş basınç ve sıcaklık profillerinin varlığında, CO₂’nin derişimini hesaplayabilmektedir.

Model, Afyon Ömer-Gecek sahasındaki AF-21 kuyusuyla test edildi. Bu kuyuya sıcaklıkları farklı iki noktadan giriş olmaktadır. Rezervuar suyu çözünmüş olarak kütlece % 0.4 oranında CO₂ içermektedir. Model bu kuyuya uygulanmakta; sonuç olarak hesaplanan değerler karşılaştırılarak, rezervuarların kuyuya giriş özellikleri ve suyun CO₂ içeriği tahmin edilmektedir.

**DEVELOPMENT OF THE MULTI-FEED P-T WELLBORE MODEL FOR
GEOTHERMAL WELLS
SUMMARY**

A wellbore pressure – temperature (p-T) model for geothermal wells with multiple feed zones is developed. The temperature and pressure of those feed zones may be different. Especially in Turkey, geothermal waters contain considerable amounts of CO₂ dissolved in water. The presence of CO₂ leads to two phase flow at higher pressure conditions than the vapor pressure of water. The wellbore model considers all these conditions. The model assumes that the flow is in steady state and Henry's law is valid for CO₂'s partial pressure calculations. The main inputs of the model are reservoir properties and the depths of the feed points. The main outputs are pressure and temperature profiles. If measured profiles of temperature and pressure are available then the model can be used to estimate the mass fraction of CO₂.

The model is applied to AF-21 well at Afyon Ömer-Gecek geothermal field. There are two feed points one of which is colder in the well. Reservoir water consists of 0.4 % CO₂ by mass. The field data from AF-21 well were analyzed with the model and a good match between the calculated and measured data was obtained. Also the CO₂ content was estimated.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Jeotermal kuyuların basınç ve sıcaklık profillerinin (P, T – Derinlik) belirlenmesi, jeotermal kaynağın akılcı bir şekilde değerlendirilmesine yardımcı olabilmektedir. Jeotermal kuyular genelde yüksek sıcaklık ve debiye sahiptirler. Bu koşullar kuyu boyunca basınç ve sıcaklık ölçümlerinin yapılmasını zorlaştırmakta ve ölçümlerdeki hataları arttırmaktadır. Ayrıca Türkiye’deki jeotermal suların çoğunluğunun çözünmüş halde CO₂ içermesi, bu gazın sudan ayrıştığı noktalarda CaCO₃ birikimine yol açmakta, bu da gazın ayrıştığı noktada, kuyu çapının daralmasına neden olmaktadır. Gerekli önlemlerin alınabilmesi için CO₂ ‘nin sudan ayrıldığı noktanın belirlenmesi son derece önemlidir [1, 2]. Örneğin CaCO₃ birikiminin önlenmesi için kimyasal inhibitör enjeksiyonu operasyonlarında CO₂ ‘nin sudan ayrıldığı noktanın belirlenmesi, enjeksiyonun hangi noktaya yapılacağını tespiti için gerekmektedir [1]. CO₂’nin varlığı, suyun henüz buhar fazına geçmeye başlamadığı basınç koşullarında, iki fazlı akışın oluşmasına neden olmaktadır.

İki fazlı akış hesaplamaları gaz ve sıvı fazların bir arada bulunmasından dolayı karmaşıktır. Gaz ve sıvı fazların ara yüzeyleri birçok farklı konfigürasyonda olabilmektedir. Bu olay akış rejimi olarak adlandırılmaktadır [3]. Hesaplamaların doğru bir şekilde yapılabilmesi için akış rejiminin ve bu akış rejimi değişim kriterlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Sunulan modelde iki fazlı akışın kabarcıklı akış rejiminde “bubble flow” olduğu varsayılmıştır. Bu akış rejiminin özelliği gazın ayrı kabarcıklar halinde sıvının içinde yayılmış olarak akmasıdır [3].

Kuyu içinde iki fazlı akış sırasında sıvı ve gaz fazları ayrı hızlarda akmaktadırlar. Göreli olarak düşük yoğunluğa ve akmazlığa sahip gaz fazı sıvı fazdan daha hızlı akmaktadır. Bunun sonucu olarak da hızlı akan gaz sıvıya destek olmaktadır. Bu olay sıvının tutulması “liquid hold up” olarak fazlar arasındaki hız farkı ise kayma “slip” olarak adlandırılır [3]. Model geliştirilirken bu etkiler göz önüne alınmıştır.

Bütün bunlara ek olarak jeotermal sahaların karmaşık jeolojik özellikleri, kuyu içi akış olayını çok daha karmaşık hale getirebilmektedir. Örneğin farklı derinliklerdeki farklı rezervuarlardan, farklı sıcaklıklarda kuyuya girişler olabilmektedir. Yapılan çalışmada, CO₂'nin varlığında, farklı derinliklerdeki rezervuarlardan kuyuya girişler olması durumunda basınç ve sıcaklık profillerinin oluşturulabilmesi için bir basınç – sıcaklık (p-T) modeli sunulmaktadır. Modelde rezervuardan kuyuya olan akış Darcy denklemi ile tanımlanmıştır.

Jeotermal sahaların çok az bir kısmı buharın etken olduğu sistemler sınıflandırmasına girmektedir. Çoğunluğu ise su – buhar karışımı, iki fazlı akışkan üreten suyun etken olduğu sistemlerdir [4]. Ülkemizde de jeotermal sistemlerin çoğunluğu, suyun baskın olarak bulunduğu ve içeriğinde CO₂ olan sistemlerdir. Bu sistemler kuyu başında gaz fazının çok büyük bir kısmı CO₂ olan, iki fazlı bir karışım üretmektedir. Bu tür sistemlerin basınç ve sıcaklık profillerinin belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde gerekli faktörler:

- i. Çözünmüş olarak sıvı suyun içinde bulunan CO₂ 'nin, sıvıdan ayrılma noktası ve fazlar arasındaki kütle geçişi,
- ii. Tek veya iki faz akışta potansiyel ve sürtünme basınç kayıpları,
- iii. Formasyona olan ısı kayıpları.

Model geliştirilirken rezervuardan kuyuya olan akışın kararlı olduğu ve CO₂'nin kısmi basıncının hesaplanmasında Henry yasasının geçerli olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca iki fazlı akışta gaz fazının su buharı içeriği ihmal edilmiştir.

1.1 Literatür Taraması

Literatürde birçok mevcut jeotermal kuyu içi simülatörü bulunmaktadır. WELLSIM [5], GWELL [6] ve WELLCARD [7] bunlardan bazılarıdır. Bu simülatörler CO₂ gibi yoğunlaşmayan gazların olması durumunu içermekle birlikte sadece kuyu içinde akışı simüle etmekle sınırlıdır. Rezervuar özelliklerinin de hesaba katılması için bu simülatörlerin bir rezervuar simülatörü ile birleştirilmeleri gerekmektedir. Bunların dışında literatürde bulunan MULFEWS [8] yazılımı rezervuar özelliklerini de hesaplamalara doğrudan katabilmektedir.

1.2 Sunulan Çalışma

Bu çalışma CO₂ içeren suyun etken olduğu jeotermal sistemler için birden fazla tabakadan kuyuya giriş olması durumunda kuyu içi akışı modellemeyi amaçlamaktadır. Kararlı akış koşulları varsayılmış ve rezervuardan kuyuya olan akış, kuyu içi akış ile birleştirilerek sistem bir bütün olarak düşünülmüştür. Rezervuarlardan kuyuya akan sıvı, kuyu boyunca ilerlerken, sıvı içinde çözünmüş olarak bulunan gazın açığa çıkarak, iki fazlı bir akışkan oluşturacağı düşünülmüştür. İki fazlı akış modellenirken akış rejimlerindeki farklılaşma göz önüne alınmakla birlikte iki fazlı akışın sadece kabarcıklı akış “bubble flow” rejiminde olacağı varsayılmıştır. Sıvının tutulması “hold up” etkileri göz önüne alınmış ve daha sonra basınç düşümü hesaplamalı homojen model varsayımı kullanılarak yapılmıştır.

Model geliştirilirken gaz kısmının bileşiminde sadece CO₂ olduğu varsayılmış, az miktardaki su buharı varlığı ihmal edilmiştir. Ayrıca CO₂'nin kısmi basıncının hesaplanmasında, Henry yasasının geçerli olduğu varsayılmaktadır. İki fazlı akış sıcaklık profillerinin belirlenmesinde, Alves [9] tarafından Ramey denkleminin geliştirilmesiyle analitik çözümden faydalanılmıştır.

Kuyunun birden fazla tabakadan beslenmesi durumunda, akışın öncelikle kuyu dibine yakın olan girişten sırayla başladığı düşünülmüştür. Burada kuyuya giriş noktalarında debinin artacağı ve giren suyun sıcaklığının kuyu içindeki akışkanın sıcaklığından farklı olabileceği göz önüne alınmıştır. Giriş anında ısı dengelinin olduğu varsayılarak karışımın sıcaklığı hesaplanmıştır.

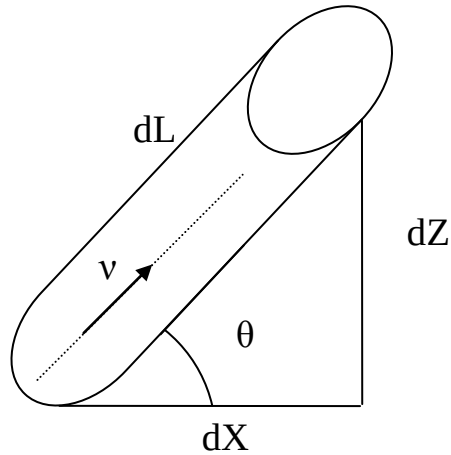
BÖLÜM 2

TEK FAZLI AKIŞIN MODELLENMESİ

Boru içinde akış hesaplamalarının neredeyse tamamı momentum, kütle ve enerji korunumu ilkelerine dayanmaktadır [10]. Bu ilkelerin uygulanması basınç ve sıcaklığın uzaklık ile değişiminin hesaplanmasını olanaklı hale getirmektedir. Bu bölümde kararlı akış koşullarında tek fazlı akış için basınç ve sıcaklık gradyanları denklemlerinin nasıl türetilebileceği sunulmaktadır.

2.1 Basınç Düşümünün Hesaplanması

Tek boyutlu tek fazlı akışkan akışı için kontrol hacmi Şekil 2.1 ile gösterilmektedir. Sistem yatay ile açı yapmaktadır ve akışkan yukarıya doğru akmaktadır. Sistem kararlı akış koşullarında olduğu yani debinin zamanla değişmediği kabul edilmiştir. Newton'nun ikinci kanunu göre; sisteme etkiyen kuvvetlerin toplamı sistemin momentum değişimine eşit olmalıdır. Şekil 2.1 ile gösterilen kontrol hacmi için momentum ve kütle korunumu yazılırsa,



Şekil 2.1 – Kontrol hacmi.

Kütle korunumu,

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial L} = 0 \quad (2.1)$$

Kararlı akışta kütle birikimi olmayacağından,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial L} = 0 \quad (2.2)$$

Momentum korunumu,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial L}(\rho v^2) = -\frac{\partial p}{\partial L} - \tau \frac{\pi d}{A} - \rho g \sin \theta \quad (2.3)$$

Denklem 2.2 ve 2.3 kararlı akış varsayımıyla birleştirilirse,

$$\rho v \frac{\partial v}{\partial L} = -\frac{\partial p}{\partial L} - \tau \frac{\pi d}{A} - \rho g \sin \theta \quad (2.4)$$

Basınç gradyanı için çözülürse,

$$\frac{\partial p}{\partial L} = -\tau \frac{\pi d}{A} - \rho g \sin \theta - \rho v \frac{\partial v}{\partial L} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5 incelenecek olursa, basınç gradyanının üç farklı bileşenden oluştuğu görülebilir.

$$\frac{dp}{dL} = \left(\frac{dp}{dL} \right)_s + \left(\frac{dp}{dL} \right)_p + \left(\frac{dp}{dL} \right)_k \quad (2.6)$$

Burada S alt indisi ile belirtilen terim sürtünme, P alt indisiyle belirtilen terim potansiyel enerji, K alt indisi ile belirtilen terim ise kinetik enerji dolayısıyla oluşan basınç kayıplarını temsil etmektedir.

Sürtünmeden kaynaklanan basınç düşümünün hesaplanması, kayma gerilmelerinin tanımlanmasıyla mümkündür. Newtonyen akışkanlar için,

$$\tau = f \frac{\rho v^2}{8} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7, 2.5'te yerine koyarsak sürtünmeden kaynaklanan basınç düşümü bileşeni aşağıdaki hali alır:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_s = -f \frac{\rho v^2}{8} \frac{\pi d}{\pi d^2 / 4} = -\frac{f \rho v^2}{2d} \quad (2.8)$$

Burada sürtünme katsayısı, aşağıdaki korelasyon yardımıyla hesaplanabilir [11].

$$f = \frac{1.325}{\left[\ln \left(\frac{e}{3.7D} + 5.74 N_{Re}^{-0.9} \right) \right]^2} \quad (2.9)$$

Sürtünme katsayısının belirlenmesi, Reynolds sayısının hesaplamasını gerektirmektedir.

$$N_{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.10)$$

Denklem 2.5 ve 2.8 birleştirilirse,

$$\frac{\partial p}{\partial L} = -\frac{f \rho v^2}{2d} - \rho g \sin \theta - \rho v \frac{\partial v}{\partial L} \quad (2.11)$$

Kinetik enerji dolayısıyla oluşan basınç kayıpları, sürtünme ve potansiyel enerjiden kaynaklanan basınç düşümlerine kıyasla oldukça düşük olacağından ihmal edilebilir. Ayrıca, yukarı doğru akışta basınç daima akış yönünde düşecektir ve yaygın olarak basınç düşümü akış doğrultusunda pozitif alınmaktadır. Bu nedenle Denklem 2.5 pozitif basınç gradyanı vermesi için -1 ile çarpılmalıdır. Böylece Denklem 2.5 aşağıdaki forma indirgenir.

$$\frac{\partial p}{\partial L} = \frac{f \rho v^2}{2d} + \rho g \sin \theta \quad (2.12)$$

Kuyunun düşey olduğunu varsayılırsa,

$$\frac{\partial p}{\partial L} = \frac{f \rho v^2}{2d} + \rho g \quad (2.13)$$

Denklem 2.13'ün kuyu dibinden herhangi bir referans noktasına integrali alınırsa,

$$\int_{P_{wf}}^P \frac{\partial p}{\partial L} = \int_0^L \left(\frac{f \rho v^2}{2d} + \rho g \right) \quad (2.14)$$

Burada kuyu dibinden, kuyu içinde kuyu dibinden L kadar uzakta bir noktaya Denklem 2.13'ün integrali alınmıştır.

$$P_{wf} - p = \bar{\rho}gL + \frac{\bar{f}\bar{\rho}v^2}{2d}L \quad (2.15)$$

Alınan aralıkta ρ ve f ortalama olarak hesaplanmaktadır. Akışkanın hızı debi ile ilişkilendirilirse,

$$v = \frac{q}{A} = \frac{4q}{\pi d^2} \quad (2.16)$$

Denklem 2.16, 2.15'te yerine koyulursa,

$$P_{wf} - p = \bar{\rho}gL + \frac{8}{\pi^2} \frac{\bar{f}\bar{\rho}q^2}{d^5}L \quad (2.17)$$

Denklem 2.17 kullanılarak kuyu boyunca basınç düşümü hesaplanabilir. Bu hesaplamalarda suyun yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki korelasyon yardımıyla bulunabilir [11].

$T \leq 483$ °K için,

$$\rho_w = \frac{1000}{1.16849 - 0.001477T + 3.0564410^{-6}T^2} \quad T(^{\circ}K), \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (2.18)$$

Suyun akmaazlığı ise aşağıdaki ilişkiden yine sıcaklığa bağlı olarak hesaplanabilir [11].

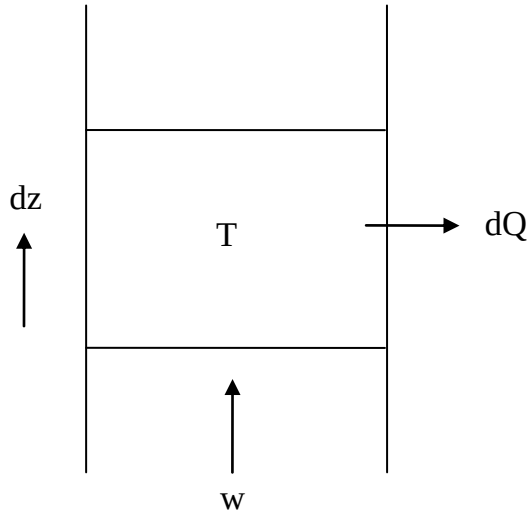
$$\mu = \frac{2.185}{0.04012T + 5.154710^{-6}T^2 - 1}, \quad \mu(cp), T(^{\circ}F) \quad (2.19)$$

2.2 Sıcaklık Düşümünün Hesaplanması

Kuyu içi sıcaklık profillerinin belirlenmesinde, Ramey tarafından sunulan analitik denklem kullanılmıştır [12]. Bu denklem formasyona olan ısı kayıpları göz önüne alınarak türetilmiştir. Başlıca iki varsayıma dayanmaktadır: (1) Isı kuyudan çevrel olarak uzaklaşır ve (2) Kuyunun yakın çevresinde birçok termal dirençle karşılaşan kuyu içi ısı akışı, formasyondaki ısı akışından hızlıdır ve kararlı akış çözümüyle

temsil edilebilir. Bu denklem birçok araştırmacı tarafından incelenmiş, geçerliliği sınanmıştır [9, 13, 14]. Erken zamanlar hariç, Ramey'nin önerdiği yaklaşımın mükemmel bir yaklaşım olduğu, erken zamanlar için ise olduğundan yüksek değerler verdiği saptanmıştır [13, 14].

Kuyu içi akış problemlerinin çözümü, enerji, momentum ve kütle dengelerinin birlikte çözümünden geçmekle birlikte, çözüme aşağıdaki gibi yakınsanabilir. Şekil 2.2 kuyu içi ısı probleminin şematik gösterimidir. Başlangıçta kuyumuz akışkanla doludur ve bu akışkan formasyonla ısı olarak dengededir; yani kuyu içi depolanma etkileri göz önünde bulundurulmamaktadır. Kuyu akmaya başladığında kararlı akış koşulları geçerlidir; akışkan sabit debi ile akmaktadır. Akışkanın ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişmediği varsayılmaktadır ve akış yönündeki ısı iletimi ve sürtünme kaynaklı ısınma ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Kuyu boyunca akış tek boyutludur. Kuyu boyunca akışkan daha soğuk olan formasyona ısı vermektedir. Formasyona olan ısı kayıpları ısı iletimi ile gerçekleşir ve sadece çevrel yöndedir. Ayrıca formasyonun ısı özelliklerinin sıcaklıkla değişmediği varsayılmıştır. Burada dQ formasyona olan ısı kaybını göstermektedir.



Şekil 2.2 – Kuyu içi ısı probleminin şematik gösterimi.

Yukarıdaki varsayımlar göz önüne alındığında, Şekil 2.2' de şematik olarak gösterilen sistem için enerji korunumu aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$wcT = wc \left(T + \frac{\partial T}{\partial L} dz \right) + dQ \quad (2.20)$$

Denklem 2.20’de gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$dQ = -wc \frac{\partial T}{\partial z} dz \quad (2.21)$$

Koruma borusundan formasyona olan ısı iletimi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [10].

$$dQ = \frac{2\pi k (T - T_e)}{f(t)} dz \quad (2.22)$$

Denklem 2.21 ve 2.22 birleştirilirse,

$$\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{2\pi k_e}{wcf(t)} (T - T_e) = 0 \quad \text{veya} \quad \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{T}{A'} - \frac{T_e}{A'} = 0 \quad (2.23)$$

Burada dış ortam sıcaklığı doğrusal jeotermal gradyan kullanılarak şu şekilde tanımlanabilir.

$$T_e = T_{ei} - aL \sin \theta \rightarrow T_e = T_{ei} - az \quad (\text{Dübeý kuyu için}) \quad (2.24)$$

Denklem 2.23’te A' difüzyon derinliği olarak isimlendirilmektedir ve kuyu içinde ısı direncin ihmal edilebilir olduğu durumda aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [12].

$$A' = \frac{wcf(t)}{2\pi k_e} \quad (2.25)$$

Difüzyon derinliğinin büyük değerlerinde yani yüksek üretim debilerinde, formasyona olan ısı kayıpları çok az olacaktır. Küçük değerlerinde ise akışkan kuyu içinde önemli ölçüde ısı kaybedecektir.

Denklem 2.25’deki $f(t)$ terimi boyutsuz zaman fonksiyonudur ve formasyona olan karasız ısı geçişini ifade eder. Literatürde bu fonksiyonun hesaplanması için birçok yöntem mevcuttur [12, 13, 14]. Burada sunulan çalışmada kullanılan denklem ise Agarwal ve diğerleri tarafından verilen çizelgedeki verilere eğri çakıştırılarak bulunmuştur [16]. Boyutsuz zaman fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

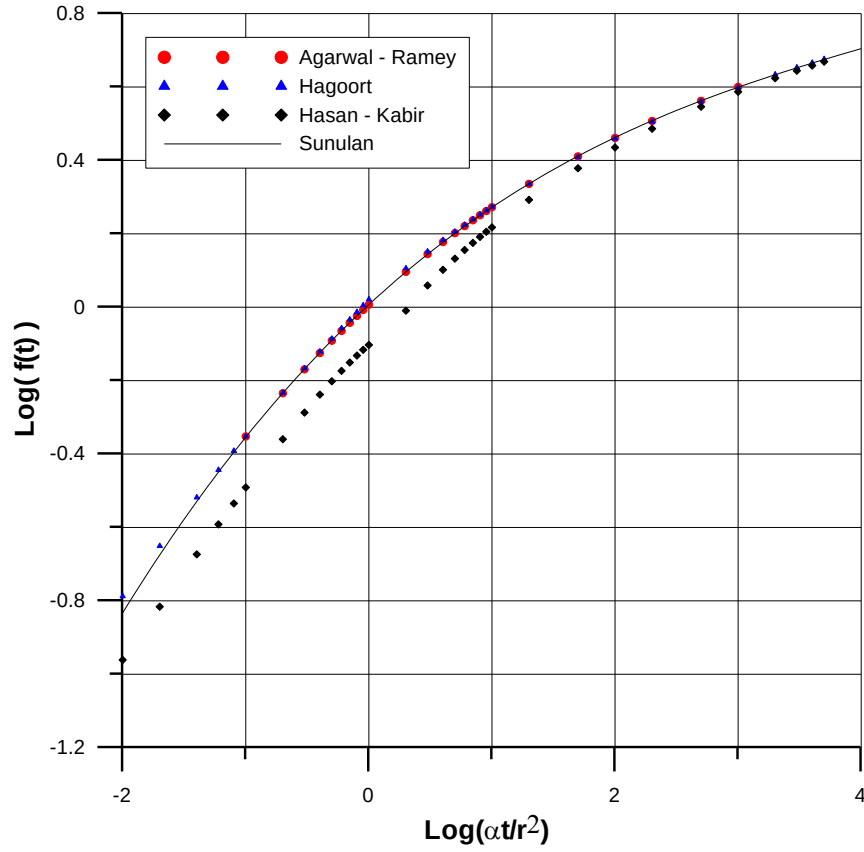
$$\log [f(t)] = 0.007165 + 0.30947 \log(t_D) - 0.04807 [\log(t_D)]^2 + 0.003574 [\log t_D]^3 \quad (2.26)$$

$$10^{-2} \leq t_D \leq 10^4, \text{ için}$$

Burada,

$$t_D = \frac{\alpha t}{(r_2')^2} \quad (2.27)$$

Sunulan boyutsuz zaman fonksiyonunun literatürdeki benzerleri ile karşılaştırılması Şekil 2.3 ile gösterilmektedir. Sunulan korelasyon Agarwal ve Ramey tarafından verilerle uyum halindedir. Hagoort [13] ve Hasan – Kabir [15] tarafından verilen korelasyonlar kademelidirler; değişik aralıklarda değişik fonksiyonlar ile tanımlanmışlardır. Sunulan korelasyon ise geniş bir aralıkta tek bir fonksiyonla doğruluğundan ödün vermeden tanımlanmıştır.



Şekil 2.3 - Sunulan boyutsuz zaman fonksiyonu korelasyonunun literatürdeki benzerleri ile karşılaştırılması.

Denklem 2.23 integrasyon faktörü yöntemiyle çözülürse,

$$T = \frac{\int \exp \int \left(\frac{1}{A'} \right) dz \frac{T_e}{A'} dz + C}{\exp \int \left(\frac{1}{A'} \right) dz} \quad (2.28)$$

Denklem 2.28 çözülürse aşağıdaki formu alır.

$$T = T_{ei} - az + aA' + Ce^{-z/A'} \quad (2.29)$$

Kuyuya akan akışkanın sıcaklığıyla, kuyu dibi sıcaklığının farklı olabileceğini düşünürsek, Denklem 2.29 için sınır koşulları aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$T = T_i @ z = 0 \quad (2.30)$$

Denklem 2.30 ile verilen sınır koşulları için Denklem 2.29 çözüldüğünde, integrasyon sabiti,

$$C = T_i - T_{ei} - aA' \quad (2.31)$$

olarak bulunur. Denklem 2.31, Denklem 2.29'da yerine koyup düzenlenirse aşağıdaki formu alır.

$$T = (T_{ei} - az) + (T_i - T_{ei}) \exp(-z/A') + [1 - \exp(-z/A')] aA' \quad (2.32)$$

Denklem 2.32 kullanılarak kuyu boyunca sıcaklık profili oluşturulabilir.

BÖLÜM 3

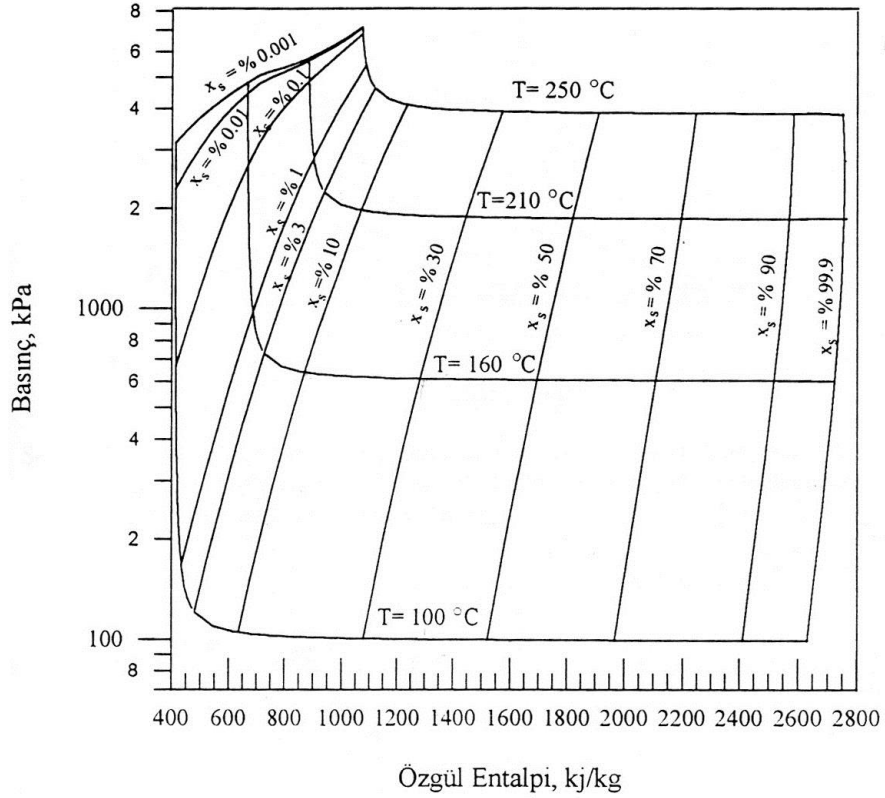
İKİ FAZLI AKIŞIN MODELLENMESİ

Kuyu içinde akışkanın yükselmesiyle birlikte basınç düşmekte, buna bağlı olarak jeotermal suyun içinde çözünmüş olarak bulunan CO₂ sıvıdan ayrılmakta ve ikinci bir faz oluşturmaktadır. Model geliştirilirken gaz kısmının bileşiminde sadece CO₂ olduğu varsayılmış, az miktardaki su buharı varlığı ihmal edilmiştir. Şekil 3.1 su – CO₂ çözeltilerinin iki faz bölgesindeki basınç – özgül entalpi – sıcaklık ilişkisini göstermektedir. İncelediğimiz basınç – sıcaklık – entalpi aralıklarında buharın kalitesi çok düşük olmaktadır. Ayrıca CO₂'nin kısmi basıncının hesaplanmasında, Henry yasasının geçerli olduğu varsayılmaktadır.

3.1 Basınç Düşümünün Hesaplanması

İki fazlı akış hesaplamaları gaz ve sıvı fazların bir arada bulunmasından dolayı karmaşıktır. Gaz ve sıvı fazların ara yüzeyleri birçok farklı konfigürasyonda olabilmektedir. Bu olay akış rejimi olarak adlandırılmaktadır. Hesaplamaların doğru bir şekilde yapılabilmesi için akış rejiminin ve bu akış rejimi değişim kriterlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma geliştirilirken iki fazlı akışın kabarcıklı akış rejiminde “bubble flow” olduğu varsayılmıştır. Bu akış rejimini özelliği gazın ayrı kabarcıklar halinde sıvının içinde yayılmış olarak akmasıdır.

Kuyu içinde iki fazlı akış sırasında sıvı ve gaz fazları ayrı hızlarda akmaktadırlar. Göreli olarak düşük yoğunluğa sahip gaz fazı sıvı fazdan daha hızlı akmaktadır. Bunun sonucu olarak da hızlı akan gaz sıvıya destek olmaktadır. Bu olay sıvının tutulması “liquid hold up” olarak, fazlar arasındaki hız farkı ise kayma “slip” olarak adlandırılır [3]. Model geliştirilirken bu etkiler göz önüne alınmıştır.

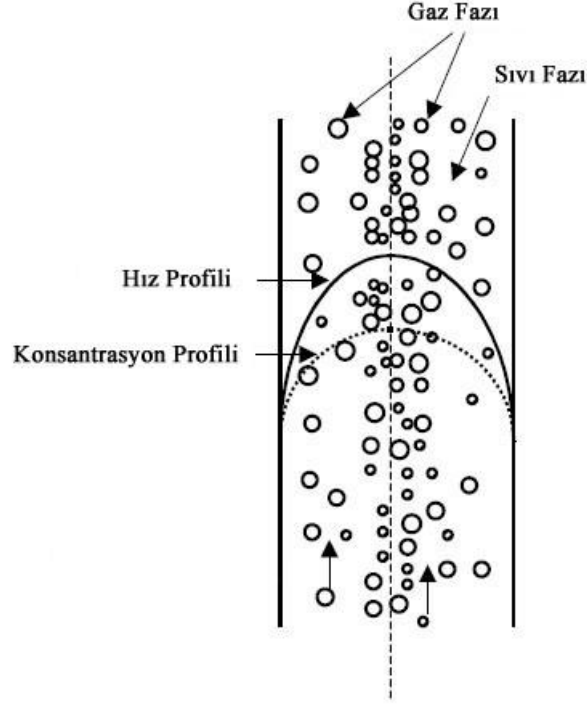


Şekil 3.1 – Su – CO₂ çözeltisinin iki faz bölgesindeki basınç – özgül entalpi - sıcaklık ilişkisi [17].

Kabarcıklı akış rejimi için doğruluğundan bir şey kaybetmeden karmaşıklığı en aza indirmek için Denklem 2.14 kullanılabilir [3]. Buradaki yaklaşım fazları ayrı ayrı iki akışkan olarak değil de tek bir akışkan olarak ele almaktır. Literatürde bu yaklaşım homojen model veya karışım modeli olarak geçmektedir. Ancak buradaki yaklaşım akışkanı bir bütün olarak düşünüp tek bir denklem seti kullanırken, fazlar arasındaki görelî hız farkını hesaba katmaktadır. Bu açıdan literatürdeki “drift flux” modellerine benzemektedir [18].

Kabarcıklı akış rejiminde gaz kabarcıkları borunun ortasından akma eğilimindedirler. Bu nedenle düşey akışta gaz konsantrasyonu borunun ortasında en yüksek değerdedir [19] (Şekil 3.2). Kabarcıklı akışta diğeri bir mekanizma ise gazın sıvı içinde yükselme eğiliminden kaynaklanmaktadır.

Kabarcıklı akış rejimi için doğruluğundan bir şey kaybetmeden karmaşıklığı en aza indirmek için homojen akış denklemi kullanılabilir [3]. Böylece Denklem 2.13 aşağıdaki formu alır:



Şekil 3.2 – Hız ve konsantrasyon profillerinin şematik gösterimi [21].

$$\frac{\partial p}{\partial L} = \frac{f_m \rho_m v_m^2}{2d} + \rho_m g \quad (3.1)$$

Denklem 3.1 de yoğunluk, sürtünme katsayısı ve akışkanın hızı karışımın özellikleri olarak verilmiştir. Denklem 3.1 ile hesaplamaların nasıl yapılacağına geçmeden önce bazı temel tanımları vermekte fayda vardır.

Herhangi bir fazın yüzeysel hızı (superfacial velocity) hacimsel debinin kesit alanına oranı olarak tarif edilir.

$$v_{sL} = \frac{q_L}{A} \quad \text{ve} \quad v_{sg} = \frac{q_g}{A} \quad (3.2)$$

Aslında herhangi bir fazın aktığı kesit alanı iki fazlı akışta toplam kesit alanından farklı olacaktır, zira bu toplam alanın bir kısmı diğer faz tarafından doldurulmuştur. Bu nedenle fazın gerçek hızı, ki bu yerinde hız (in-situ velocity), tanımlanır.

$$v_L = \frac{q_L}{A_L} \quad \text{ve} \quad v_g = \frac{q_g}{A_g} \quad (3.3)$$

Yukarı doğru akışta görel olarak daha hafif olan gaz fazı sıvı faza göre daha hızlı akmaktadır, aradaki fark yani kayma aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$v_s = v_g - v_L \quad (3.4)$$

Gazın yerinde hacim oranı (void fraction), toplam kesit alanının gazın aktığı alana oranı olarak tanımlanır.

$$f_g = \frac{A_g}{A} \quad (3.5)$$

Benzer şekilde sıvının yerinde hacim oranı (liquid hold up),

$$f_L = \frac{A_L}{A} \quad (3.6)$$

olarak tanımlanır ve,

$$f_L = 1 - f_g \quad (3.7)$$

olarak verilir.

Tek fazlı akışta olduğu gibi iki fazlı akışta da potansiyel enerji dolayısıyla oluşan basınç kayıpları toplam basınç gradyanının çok büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle sıvının yerinde hacim oranının (liquid hold up) doğru bir şekilde hesaplanması iki fazlı basınç düşümü hesaplamalarının en önemli kısmını oluşturmaktadır.

İki fazlı akışkanın yoğunluğu, sıvının yerinde hacim oranı cinsinden aşağıdaki şekilde verilir:

$$\rho_m = f_L \rho_L + (1 - f_L) \rho_g \quad (3.8)$$

Burada CO₂ gazının yoğunluğu aşağıdaki korelasyon yardımıyla hesaplanmıştır [20].

$$\frac{1}{\rho_{CO_2}} = \frac{188.82 T}{p_{CO_2}} - \frac{0.0824 + 1.249 \cdot 10^{-8} p_{CO_2}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{\frac{10}{3}}}, \quad T(^{\circ}K), p(bar) \quad (3.9)$$

Borunun kesit alanı bilinmekle birlikte, sıvı ve gaz fazlarının kapladığı kesit alanlar incelenen problemde bilinmeyenler sınıfına girmektedir. Bu nedenle sıvının yerinde

hacim oranı hesaplanırken yukarıda anlatılan ve Şekil 3.2 ile şematik olarak gösterilen mekanizmalar değerlendirilerek bazı yaklaşımlara gidilmiştir.

Denklem 3.2, 3.3, 3.5 ve 3.6 arasındaki ilişkiler göz önüne alındığında, yerinde hız ve yüzeysel hız arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$f_g = \frac{v_{sg}}{v_g} \quad (3.10)$$

Akışkanın kuyunun ortasındaki hızının, kesitin ortalama hızının C_0 katı olduğunu ve fazlar arasındaki yoğunluk farkının hafif faza v_d/f_g kadar hız katacağını varsayarsak gazın yerinde hızı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$v_g = C_0 v_m + \frac{v_d}{f_g} \quad (3.11)$$

Denklem 3.10 ve 3.11 birleştirilirse,

$$f_g = \frac{v_{sg}}{C_0 v_m + \frac{v_d}{f_g}} \quad (3.12)$$

elde edilir. Denklem 3.12'in her iki tarafı da f_g terimini içermesinden dolayı kapalı (implicit) formdadır. Literatürde “drift flux” olarak adlandırılan modeli ortaya atan Zuber ve Findley orijinal makalelerinde v_d (drift flux) terimini aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır [22].

$$v_d = v_\infty f_g (1 - f_g)^n \quad (3.13)$$

Burada v_∞ “terminal rise velocity” olarak adlandırılmaktadır. Bir sıvı kolonunu içinde yükselen bir gaz kabarcığı üzerine etkiyen kuvvetlerin eşitlenmesi sonucu bir süre sonra sabit bir hıza kavuşacaktır. v_∞ terimi bu hızı ifade etmektedir. Denklem 3.13'deki “n” terimi ise kabarcığın büyüklüğüne göre 0 ve 3 arasında değişen bir parametredir [22]. Kabarcıklı akış rejimi için bu parametre 0 olarak alınabilir [3]. Böylece Denklem 3.12 aşağıdaki forma indirgenir:

$$f_g = \frac{v_{sg}}{C_0 v_m + v_\infty} \quad (3.14)$$

Terminal yükselme hızı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [3].

$$v_{\infty} = 1.53 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_g)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{0.25} \quad (3.15)$$

İki fazlı akışta borunun ortası ve kenarları arasındaki hız farkını ifade eden denklem 3.14'teki C_0 parametresi literatürde 1.2 ve 2.0 arasında değişen değerlerde kullanılmıştır. 2.0 değeri genelde düşük debiler ve yüksek çaplar için kullanılmıştır. Debinin çok yüksek olduğu ve kabarcıklı akış rejiminin geçerli olduğu göz önünde bulundurarak hesaplamalarda bu parametre 1.2 olarak alınmıştır.

Jeotermal kuyularda genellikle koruma borusundan üretim yapılmaktadır. Bu nedenle çaplar büyük olmaktadır. Ancak burada en önemli parametre debidir. Debinin çok düşük neredeyse durgun olduğunu düşünürsek, kuyunun ortasında yoğun olarak akan kabarcıklar bu noktadaki hızı artıracak dolayısıyla C_0 parametresini arttıracaktır. Diğer yandan debi arttıkça bu farkın azalacağı düşünülebilir. Bu nedenlerden dolayı yüksek debiler için düşük değerler almak daha doğru olacaktır. Yapılan hesaplamalar varsayımlar ışığında bu parametrenin 1.2 alınmasının daha doğru olduğu görülmüştür.

Karışımın sürtünme katsayısı hesaplaması için Govier ve Aziz tarafından sunulan korelasyon kullanılmıştır [23].

$$f_m = 0.32 \left(\frac{dv_m \rho_L}{\mu_L} \right)^{-0.25} \quad (3.16)$$

Buradaki yaklaşım sürtünme dolayısıyla oluşan basınç kayıplarında sıvının etken olduğudur.

Yukarıda verilen denklem ve korelasyonlar kullanılarak kuyu içinde basınç profili oluşturulabilir.

3.1 Sıcaklık Düşümünün Hesaplanması

İki fazlı akış sıcaklık profillerinin belirlenmesinde, Alves tarafından Ramey'nin yaklaşımına benzer bir yaklaşımla elde edilen aşağıdaki denklemden faydalanılmıştır [9]. Bu denklemin türetilebilmesi için kütle, momentum ve enerji korunumu ilkelerinin bir kontrol hacmi üzerine uygulanması gerekmektedir. Kararlı akış için

kütle ve momentum korunumu sırasıyla Denklem 2.2 ve 2.5 ile verilmiştir. Enerji korunumu ise aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{dh}{dL} = -v \frac{dv}{dL} - g \sin \theta - \frac{Q \pi d}{w} \quad (3.17)$$

Formasyona olan ısı geçişi, genel ısı geçişi katsayısı (overall heat transfer coefficient) yaklaşımıyla aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$Q = U (T - T_e) \quad (3.18)$$

Genel ısı geçişi katsayısının tanımı:

$$U = \frac{1}{r \left(\frac{1}{U_0} + \frac{f(t)}{k} \right)}^{-1} \quad (3.19)$$

Burada parantezin içindeki ilk terim kuyu içindeki ısı geçişini ifade ederken ikinci terim rezervuardaki kararsız ısı geçişini ifade eder [9]. Jeotermal üretim göz önüne alındığında, kuyu içinde ısı direnç ihmal edilebilir [12]. Bu nedenlerden dolayı Denklem 3.19 aşağıdaki forma indirgenebilir.

$$U = \frac{1}{r} \frac{k}{f(t)} \quad (3.20)$$

Denklem 3.17 ve 3.18 birleştirildiğinde,

$$\frac{dh}{dL} = -v \frac{dv}{dL} - g \sin \theta - \frac{U \pi d}{w} (T - T_e) \quad (3.21)$$

elde edilir. Entalpi gradyanı basınç ve sıcaklık gradyanları cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{dh}{dL} = c \frac{dT}{dL} - \eta c \frac{dp}{dL} \quad (3.22)$$

Denklem 3.22, 3.21’de yerine yazılırsa,

$$c \frac{dT}{dL} - \eta c \frac{dp}{dL} = -v \frac{dv}{dL} - g \sin \theta - \frac{U \pi d}{w} (T - T_e) \quad (3.23)$$

elde ederiz. Denklem 3.23 düzenlenirse,

$$\frac{dT}{dL} + \frac{U\pi d}{cw} T = \frac{U\pi d}{cw} T_e + \frac{1}{c} \left(-v \frac{dv}{dL} - g \sin\theta + c\eta \frac{dp}{dL} \right) \quad (3.24)$$

A' parametresi cinsinden yazılırsa,

$$\frac{dT}{dL} + \frac{T}{A'} = \frac{T_e}{A'} + \frac{1}{c} \left(-v \frac{dv}{dL} - g \sin\theta + c\eta \frac{dp}{dL} \right) \quad (3.25)$$

Burada boyutsuz bir parametre Φ aşağıdaki şekilde tanımlanır,

$$\Phi = \frac{\left(-\rho v \frac{dv}{dL} - g \rho_m \sin\theta + c \rho \eta \frac{dp}{dL} \right)}{\frac{dp}{dL}} \quad (3.26)$$

ve Denklem 3.25'te yerine yazılırsa,

$$\frac{dT}{dL} + \frac{T}{A'} = \frac{T_e}{A'} + \frac{1}{\rho_m c} \frac{dp}{dL} \Phi \quad (3.27)$$

Yine kuyuyu çevreleyen formasyonun sıcaklığının, derinliğin doğrusal fonksiyonu olduğu düşünülürse Denklem 2.25'ten,

$$\frac{dT}{dL} + \frac{T}{A'} = \frac{T_{ei}}{A'} - \frac{aL \sin\theta}{A'} + \frac{1}{\rho_m c} \frac{dp}{dL} \Phi \quad (3.28)$$

bulunur. Denklem 3.28 kuyu içinde herhangi iki nokta arasında integre edilirse,

$$T = T_{ei} + aA' \sin\theta - aL \sin\theta + C \exp(-L / A') + A \frac{1}{\rho_m c} \frac{dp}{dL} \Phi \quad (3.29)$$

Yine Denklem 2.30 ile verilen sınır koşulunu uygulanırsa, interasyon sabiti C aşağıda verilen şekilde bulunur:

$$C = T_i - T_{ei} - aA' \sin\theta - A \frac{1}{\rho_m c} \frac{dp}{dL} \Phi \quad (3.30)$$

Denklem 3.30 3.29'de yerine koyulursa,

$$T = (T_{ei} - aL \sin \theta) + (T_i - T_{ei}) \exp(-L / A') + aA' \sin \theta [1 - \exp(-L / A')] + \frac{1}{\rho c} \frac{dp}{dL} \Phi A' [1 - \exp(-L / A')] \quad (3.31)$$

olarak bulunur. Sürtünme ve kinetik enerji dolayısıyla oluşan basınç kayıpları, potansiyel enerji nedeniyle oluşandan çok küçük olduğu düşünülürse burada,

$$\frac{dp}{dL} \approx \rho_m g \sin \theta \quad (3.32)$$

ve

$$\rho_m v \frac{dv}{dL} \approx 0 \quad (3.33)$$

olarak alınabilir. Kuyunun düşey olduğu düşünülürse Denklem 3.26 aşağıdaki forma indirgenir:

$$\Phi = (c \rho \eta - 1) \quad (3.34)$$

ve böylece Denklem 3.31,

$$T = (T_{ei} - aL) + (T_i - T_{ei}) \exp(-L / A') + aA' [1 - \exp(-L / A')] + \left(c \rho_m \eta g - \frac{g}{c} \right) A' [1 - \exp(-L / A')] \quad (3.35)$$

haline indirgenmiş olur. Tek fazlı akışta Denklem 3.35, Denklem 2.31'ye indirgenmektedir. Debinin 5 lb_m/sn 'den yüksek olduğu durumlarda, $\rho \eta g$ katsayısı 0 alınabilir [23]. Böylece Denklem 3.35 iki fazlı akış için aşağıdaki forma indirgenir.

$$T = (T_{ei} - aL) + (T_i - T_{ei}) \exp(-L / A') + aA' [1 - \exp(-L / A')] - \frac{g}{c} A' [1 - \exp(-L / A')] \quad (3.36)$$

Denklem 3.36 kullanılarak iki fazlı akış için kuyu içi sıcaklık profili oluşturulabilir.

3.3 Gazın Sıvıdan Ayrılma Basıncının Bulunması

Gazların sıvı içerisindeki çözünürlükleri, gazın kısmi basıncı büyük olmadıkça, gazın kısmi basıncıyla orantılıdır. Bu vargı Henry yasası olarak bilinmekte ve aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [25].

$$p_i = y_i p = K_H n_i \quad (3.37)$$

Burada K_H Henry sabiti olarak adlandırılmaktadır. Henry sabiti gazın kısmi basıncı ve çözünürlükleri arasındaki oranı ifade etmektedir ve sadece sıcaklığın fonksiyonudur. Denklem 3.37 çözünenin kısmi basıncının ve çözünürlüğünün düşük ve sıcaklığın çözünenin kritik sıcaklığından uzak olduğu durumlarda mükemmel bir yaklaşımdır [25]. Kaba bir yaklaşımla genel sistemler için çözünürlüğün mol yüzdesi olarak % 3'ü aşmaması gerektiği söylenebilir [25]. Ayrıca çözen ve çözünenin kimyasal olarak birbirinden çok ayrı olmaması gerekmektedir.

Denklem 3.37'dan anlaşılacağı üzere Henry kanununda gaz fazı fugasitesinin kısmi basınca eşit olduğu varsayılmıştır. Modelde CO_2 'nin kısmi basıncı hesaplamalarında Henry yasasının geçerli olduğu düşünülmüştür. Bu varsayımlar ışığında, su için Henry sabiti aşağıdaki korelasyondan bulunabilir [11].

$$\ln(K_H) = 4.517428673 + 2.554534 \times 10^{-2} T - 1.02213 \times 10^{-4} T^2 + 9.3068910^{-8} T^3, \quad T(^{\circ}\text{C}) \quad (3.38)$$

Denklem 3.37'da gazın sıvı içerisindeki mol oranı, CO_2 için aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{18}{44} X_{\text{CO}_2} \quad (3.39)$$

Burada X_{CO_2} CO_2 'nin sıvı içerisindeki kütle oranıdır. Denklem 3.37 ve 3.39 birleştirilirse CO_2 'nin kısmi basıncı,

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{18}{44} X_{\text{CO}_2} K_H \quad (3.40)$$

olarak bulunur. Denklem 3.40, 3.38 ile birlikte düşünüldüğünde sıcaklığın ve kütle oranının fonksiyonu olduğu görülür.

Çözünmüş halde gaz içeren akışkanın sıcaklığı kuyu boyunca yükseldikçe düşmektedir. Bunun sonucu olarak gazın olası basıncı artmakta ve bir süre sonra gazın olası basıncının ortam basıncını aştığı noktada gaz sıvıdan ayrılmaktadır. Gazın sıvıdan ayrılma basıncı,

$$p_p = p_{CO_2} + (1 - n_{CO_2}) p_s \quad (3.41)$$

olarak alınabilir [11]. Burada suyun buhar basıncı hesaplarında Antoine denklemi kullanılmıştır. Saf su için gerekli katsayılar konulduğunda Antoine denklemi aşağıdaki formu alır.

$$\log(p_s) = 8.07131 - \frac{1730.630}{T + 233.426} \quad (3.42)$$

Yukarıda verilen denklemler yardımıyla gazın sıvıdan ayrıldığı basınç hesaplanabilir. Bu noktadan sonra gaz sıvıdan ayrılarak ikinci bir faz oluşturacaktır. Sıvı içinde çözünmüş gaz miktarı sürekli azalacaktır.

Gaz fazda CO₂ ile birlikte çok az miktarda buhar çıkmaktadır. Ortam basıncı gazların kısmi basıncına eşit olacağından Denklem 3.43 ile ifade edilir.

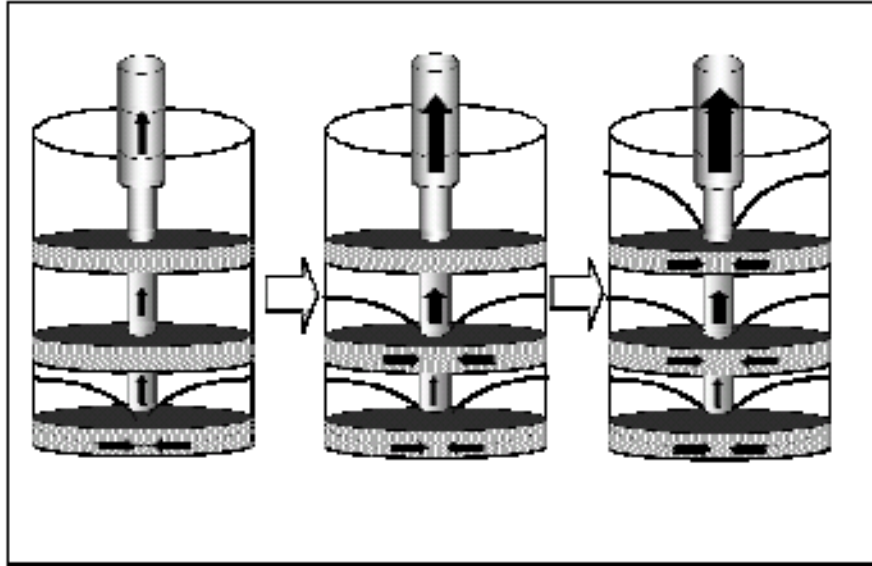
$$p = p_{CO_2} + p_s \quad (3.43)$$

Bu noktadan hareketle sıvı içerisinde kalan gaz miktarı yine Denklem 3.39 yardımıyla hesaplanabilir.

BÖLÜM 4

ÇOK GİRİŞLİ KUYU MODELİ

Jeotermal sahaların karmaşık jeolojik özellikleri, kuyu içi akış olayını çok daha karmaşık hale getirebilmektedir. Örneğin farklı derinliklerdeki farklı tabakalardan, farklı sıcaklıklarda kuyuya girişler olabilmektedir. Bu tabakaların özellikleri de dolayısıyla farklı olacaktır. Şekil 4.1 birden fazla tabakanın kuyuyu beslemesi durumunu göstermektedir. Kuyuya özellikleri (basınç, sıcaklık, kh, debi) farklı, üç tabakadan giriş olmaktadır. Rezervuardan kuyuya olan akışın sıvı fazda olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.1 - Birden fazla tabakadan kuyunun beslenmesi durumunun gösterimi [8].

Değişik formasyonlardan kuyuya olan akışın sırayla mı yoksa aynı anda mı olduğu, bu tarz bir ölçüm aletinin noksanlığından tam olarak anlaşılamamıştır [8]. Modelin basitleştirilmesi namına akışın en dipteki rezervuardan sırayla gerçekleştiği varsayılmıştır. En dipteki rezervuardan akışın başlaması bir basınç düşümü

yaratmakta ve bu basınç düşümü dolayısıyla yeni girişlerden akışlar sırasıyla olmaktadır (Şekil 4.1). Modelde her rezervuarın değişik özelliklerde olabileceği düşünülmüştür. Buna göre girişlerin ortalama rezervuar basınçları, akışkan sıcaklıkları ve geçirgenlik – kalınlık çarpımları farklılık gösterebilir.

Sistem bir bütün olarak düşünülmüştür. Tabakalardan kuyuya olan akışın tek fazlı ve kararlı olduğu varsayılmış ve Darcy denklemi ile tanımlanmıştır.

$$q_j = \frac{2\pi(kh)_j}{\left[\ln\left(\frac{(r_e)_j}{r_w}\right) + S_j - \frac{1}{2} \right]} \frac{[(p_R)_j - p_j]}{\mu}, \quad j = 1, 2, L, N_f \quad (4.1)$$

Farklı sıcaklıklardan kuyuya akan akışkanlar kuyu içinde karışmaktadırlar. Bu karışımın son sıcaklığı, giriş anında ısıl dengenin olduğu varsayılırsa aşağıdaki şekilde bulunabilir.

İki farklı giriş olduğu düşünülürse, toplam ısı, farklı girişlerdeki akışkanların ısıları toplamına eşit olacağından,

$$Q_t = Q_1 + Q_2 \quad (4.2)$$

ve

$$Q = mcT \quad (4.3)$$

Denklem 4.3, 4.4'te yerine konulursa,

$$m_t c T_{son} = m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 \quad (4.4)$$

Denklem 4.4'e suyun ısıl kapasitesinin sabit olduğu varsayımı eklenip, debi cinsinden yazılırsa,

$$q_t \rho_{son} T_{son} = q_1 \rho_1 T_1 + q_2 \rho_2 T_2 \quad (4.5)$$

olarak bulunur ve

$$q_t = q_1 + q_2 \quad (4.6)$$

Denklem 4.6 Denklem 4.5'de yerine yazılıp karışımın sıcaklığı cinsinden çözülürse:

$$T_{son} = \frac{q_1 \rho_1 T_1 + q_2 \rho_2 T_2}{\rho_{son} (q_1 + q_2)} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7 ikiden fazla tabakanın giriş yaptığı sistemler için yazılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$T_{son} = \frac{q_1 \rho_1 T_1 + q_j \rho_j T_j + L + q_{N_f} \rho_{N_f} T_{N_f}}{\rho_{son} (q_1 + q_j + L + q_{N_f})}, \quad j = 1, 2, L, N_f \quad (4.8)$$

BÖLÜM 5

KUYU İÇİ AKIŞ MODELİNİN UYGULAMALARI

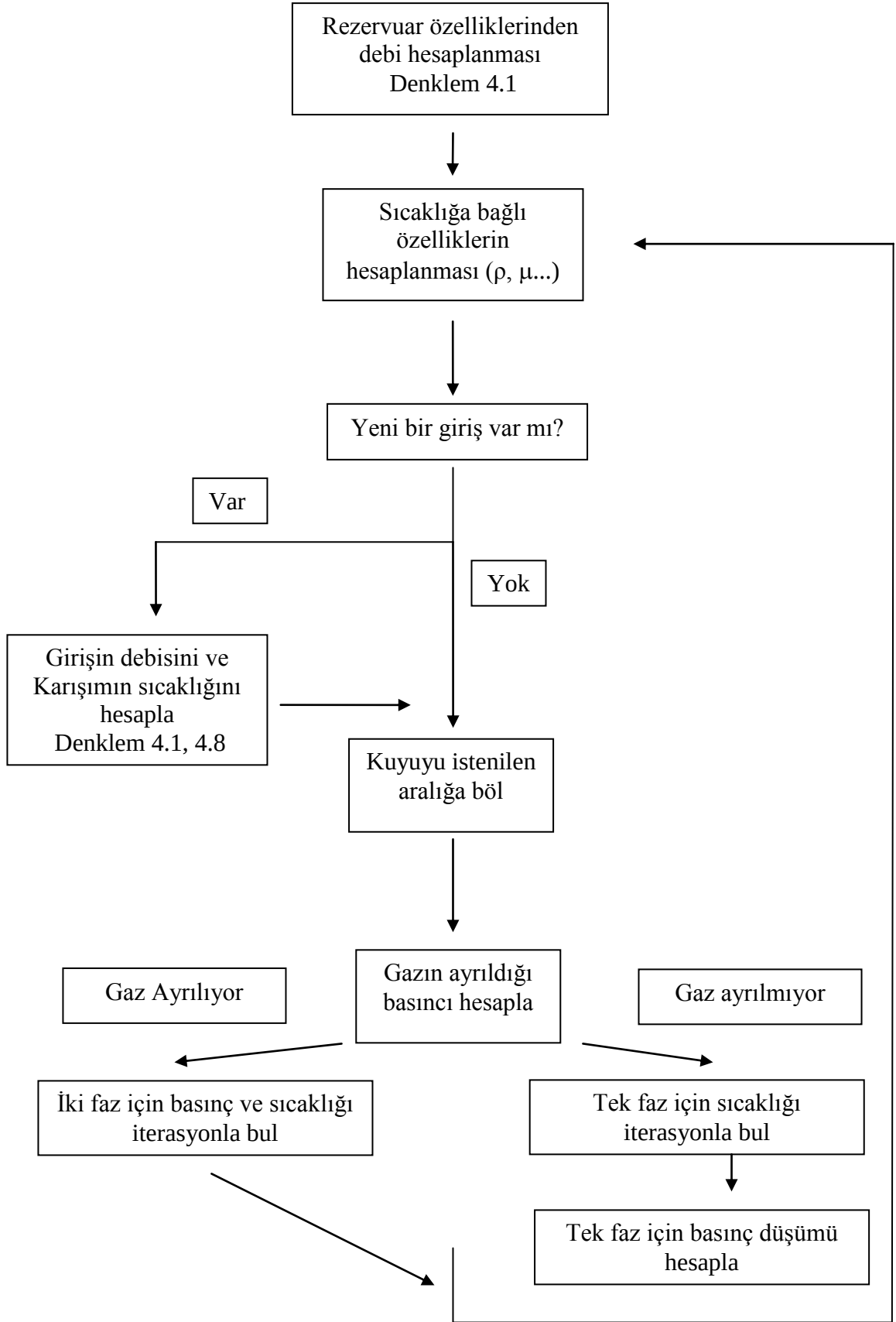
Model kullanılarak C programlama dilinde kuyu içindeki akışı simüle edecek bir bilgisayar programı yazılmıştır. Programın akış şeması Şekil 5.1 ile verilmektedir. Bu bölümde bu program kullanılarak Ömer-Gecek sahasında bulunan AF-21 kuyusunun verileri ile model verileri karşılaştırılarak modelin geçerliliği sınanacaktır. Daha sonra model çeşitli durumlar için uygulanacak ve basınç ve sıcaklığın diğer değişkenlerle nasıl değiştiği incelenecektir.

5.1 Modelin AF-21 Kuyusuna Uygulanması

AF-21 kuyusu Afyon Ömer-Gecek sahasında bulunmaktadır. Kuyu 1997 yılında delinmiş ve o tarihten bu yana aralıklarla üretime devam etmektedir. Kuyu başında su – gaz (CO₂) karışımı bir akışkan üretmektedir. Kuyu 212 m derinliğindedir.

Kuyuda 2004 yılının eylül ayında dinamik p-T testi uygulanmıştır. Yapılan sekiz saatlik üretim sonrası kuyu boyunca basınç ve sıcaklık ölçülmüştür. Test sırasında debi 45 lt/sn'dir. Test sonucu elde edilen basınç ve sıcaklık profilleri Şekil 5.2 ile verilmektedir.

Şekil 5.2 incelendiğinde, 180 m yakınlarında sıcaklık profilinin kırıldığını görürüz. Bu kırılma sıcaklığın aniden düştüğünü göstermektedir. Sıcaklık yaklaşık 2 °C düşmektedir. Bu kırılma kuyuya ikinci bir giriş olduğunun göstergesidir. Kuyu dibinden gelen akışkana 175 m civarında daha soğuk bir akışkan karışmaktadır. Sıcaklık profili ikinci bir giriş belirtmekle birlikte bu girişin özellikleri ile ilgili herhangi bir bilgi vermemektedir. Sadece karışımın dengelendiği sıcaklığı işaret etmektedir. Ancak ikinci girişin sıcaklığıyla ilgili bilgi statik sıcaklık profilinden bulunabilir (Şekil 5.3).

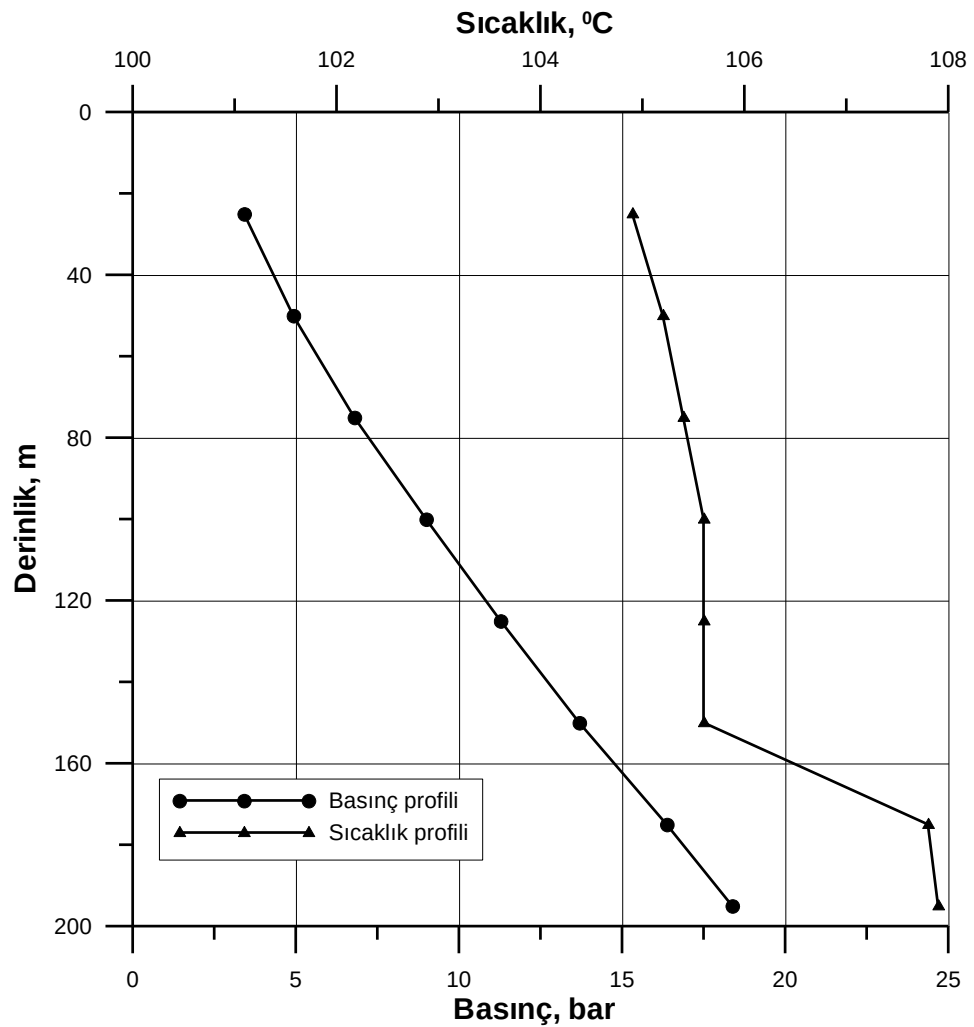


Şekil 5.1 – Programın akış şeması.

Şekil 5.3 AF – 21 kuyusunun statik sıcaklık profilini vermektedir. Şekil 5.3’ de statik sıcaklık eğrisi 107.3 °C’den 101 °C’ ye ani bir geçiş yapmaktadır. Bu etki göz önüne alınırsa, ikinci girişin sıcaklığı 101 °C olarak bulunur. İkinci girişin debisini hesaplamak için ise Denklem 4.7 kullanılabilir.

$$105.6 = \frac{(45 - q_2) \times 952.94 \times 107.8 + q_2 \times 101.03 \times 958.06}{954.06 \times 45} \rightarrow q_2 = 15 \text{ lt/sn}$$

Bu denklem çözüldüğünde ikinci girişin debisi 15 lt/sn olarak bulunur. Girişlerin debi, sıcaklık ve derinlikleri Çizelge 5.1 ile verilmektedir.

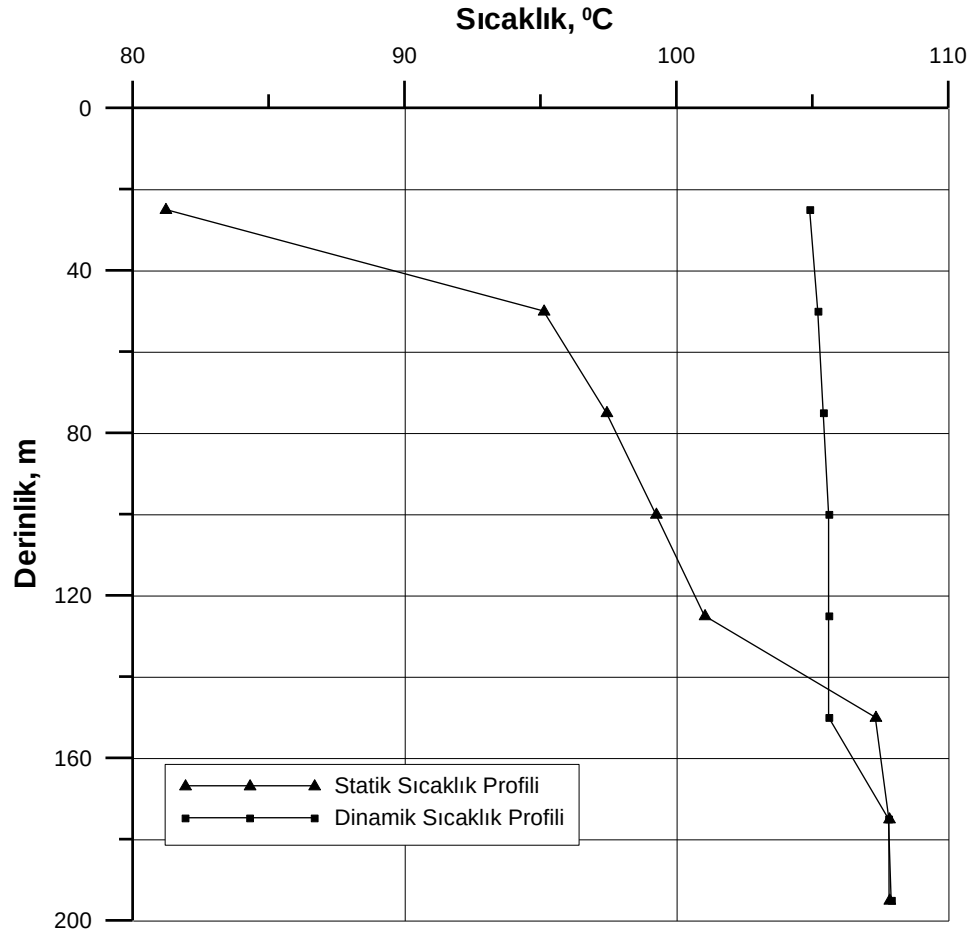


Şekil 5.2 – AF – 21 kuyusunun dinamik basınç ve sıcaklık profilleri.

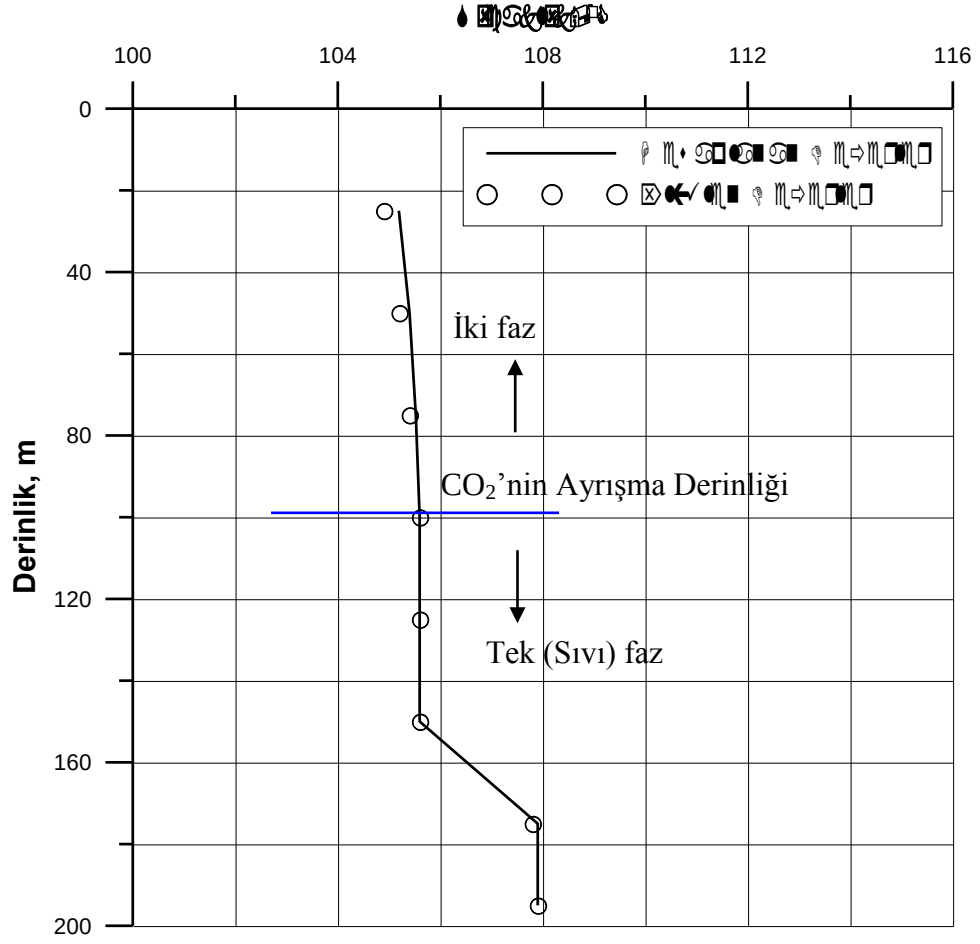
Çizelge 5.1 – Girişlerin özellikleri.

	Derinlik, m	Sıcaklık, °C	Debi, lt/sn
1. Giriş	195	107.80	30
2. Giriş	175	101.03	15
Karışım	175	105.6	45

Model Çizelge 1’deki verilerden faydalanılarak, AF – 21 kuyusuna uygulanmıştır. Model Şekil 5.2 ile verilen test verileri ile karşılaştırılarak suyun CO₂ içeriği kütlece %0.4 olarak bulunmuştur. Bu sonuç ölçülen değerle uyumludur. Yapılan ölçümlerde bu sahadaki rezervuar sularının kütlece % 0.4 oranında CO₂ içerdikleri bulunmuştur. CO₂’nin sıvıdan ayrılma noktası 99.67 m olarak bulunmuştur. Sonuçlar Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 ‘te sunulmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan kuyuya ait parametreler Çizelge 5.2 ile verilmektedir.



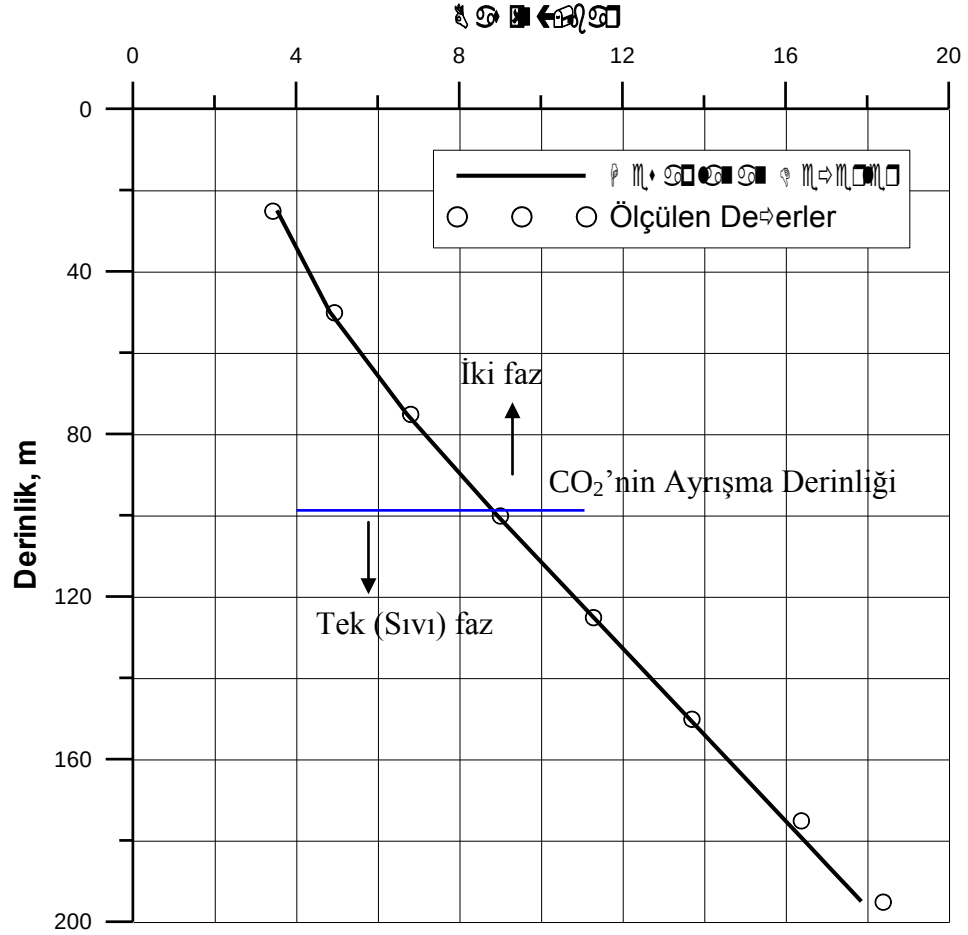
Şekil 5.3 – Statik – dinamik sıcaklık profilleri.



Şekil 5.4 - Ölçülen sıcaklık değerleriyle hesaplanan değerlerin karşılaştırılması.

Çizelge 5.2 – Kuyuya ait parametrelerin değerleri.

$T_{bh}, ^\circ F$	226.22
$P_{wf}, psia$	259.0
$t, gün$	0.3333
L, ft	639.7618
$\alpha, ft^2/gün$	0.96
$k_e, Btu/ft-gün- ^\circ F$	33.60
Jeotermal Gradyan, $^\circ F/ft$	0.46354
$c_w, Btu/lbm- ^\circ F$	1.00
θ°	90
r_w, ft	0.40104



Şekil 5.5 - Ölçülen basınç değerleriyle hesaplanan değerlerin karşılaştırılması.

5.2 CO₂ Derişiminin Basınç ve Sıcaklık Profiline Etkisi

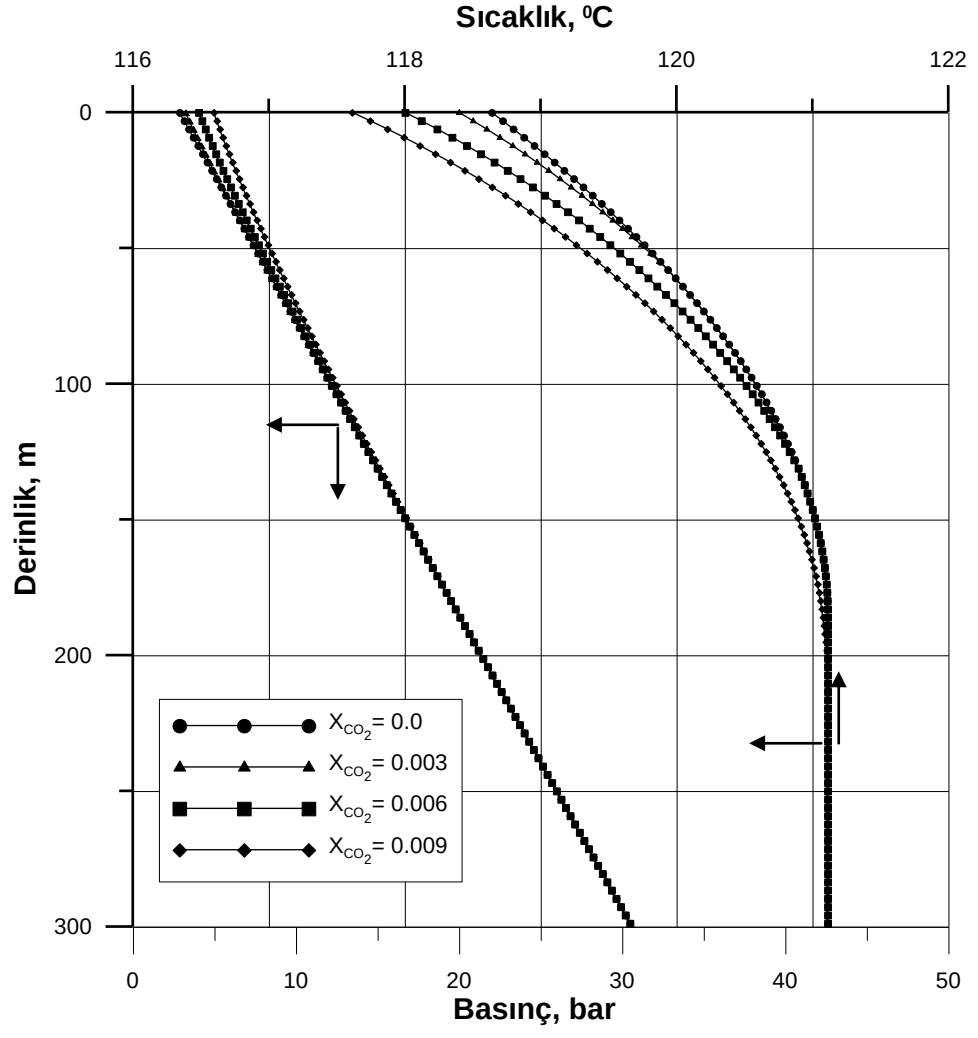
CO₂ Derişiminin basınç ve sıcaklık profiline etkisi araştırmak için bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulamada tek bir rezervuardan kuyunun beslendiği düşünülmüştür. Rezervuardan kuyuya olan akışın kararlı olduğu düşünülmüş ve Darcy denklemi ile debi hesaplanmıştır. Kuyuya sıvı fazda giren akışkan kuyu boyunca ilerlerken, CO₂ derişimine bağlı olarak, farklı noktalarda iki fazlı akışa geçmektedir. CO₂'nin farklı derişimleri için model uygulanmış, CO₂'nin sıcaklık ve basınç üzerine etkisi incelenmiştir. CO₂ derişimleri seçilirken Henry yasasının geçerlilik aralığı dikkate alınmıştır. Uygulamada kullanılan veriler Çizelge 5.3 ile verilmektedir.

Çizelge 5.3 – Uygulamada kullanılan veriler.

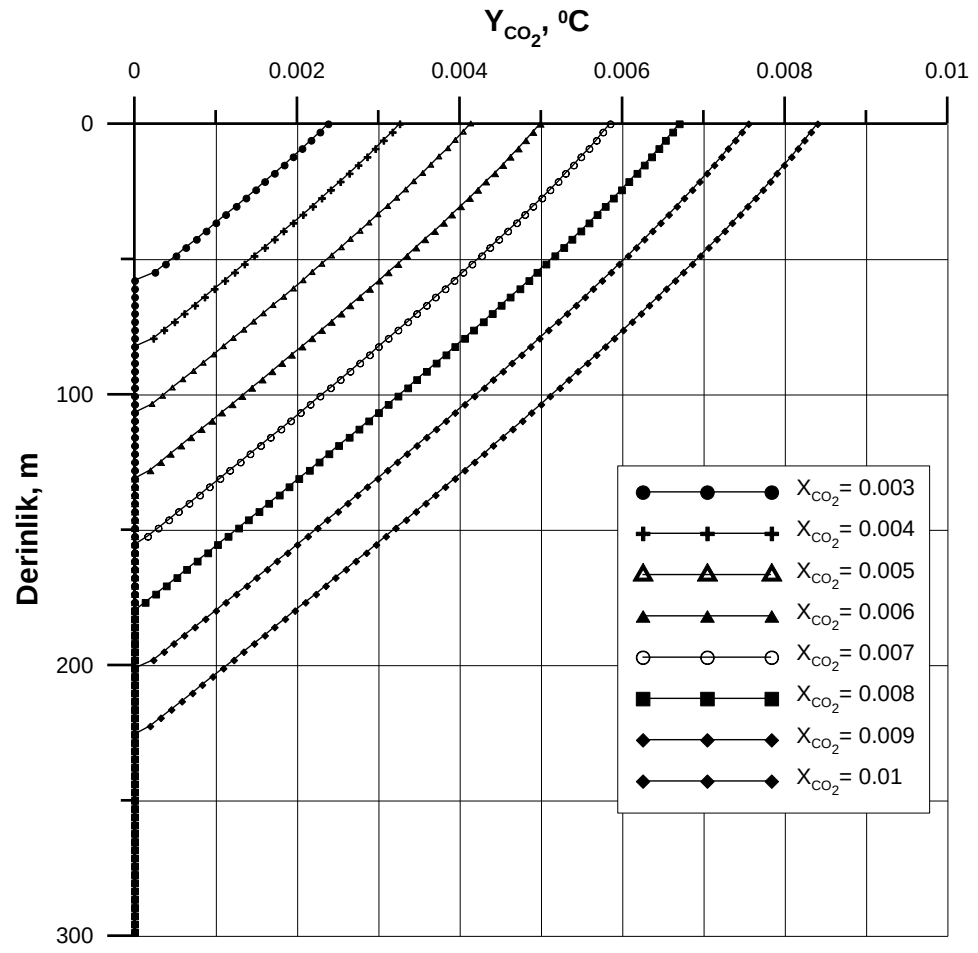
kh, md-ft	500.00
r_e, ft	1000.00
P_R, psia	2000.00
T_{bh}, °F	250.00
S	0.00
P_{wf}, psia	500.00
t, gün	30.00
L, ft	1000.00
α, ft²/gün	0.96
k_e, Btu/ft-gün- °F	33.60
Jeotermal Gradyan, °F/ft	0.18
c_w, Btu/lbm- °F	1.00
θ°	90
r_w, ft	0.40

Sonuçlar Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8 ile sunulmaktadır. Şekil 5.5’ te görüldüğü üzere, CO₂ derişiminin artması ile birlikte sıcaklık düşümü de artmaktadır. Bunun en önemli nedeni, ısıyı ısıl kapasitesi gaza oranla yüksek olan sıvının taşımasıdır. Bunun yanında CO₂ derişiminin artması basınç düşümünü azaltmaktadır. Yoğunluğu düşük olan CO₂ gaz fazına geçtiğinde karışımın yoğunluğunu düşürmekte buna bağlı olarak potansiyel enerji dolayısıyla oluşan basınç kayıpları azalmaktadır. Yine CO₂ derişiminin artması, gazın sıvıdan ayrıldığı noktayı daha derinlere kaydırmaktadır.

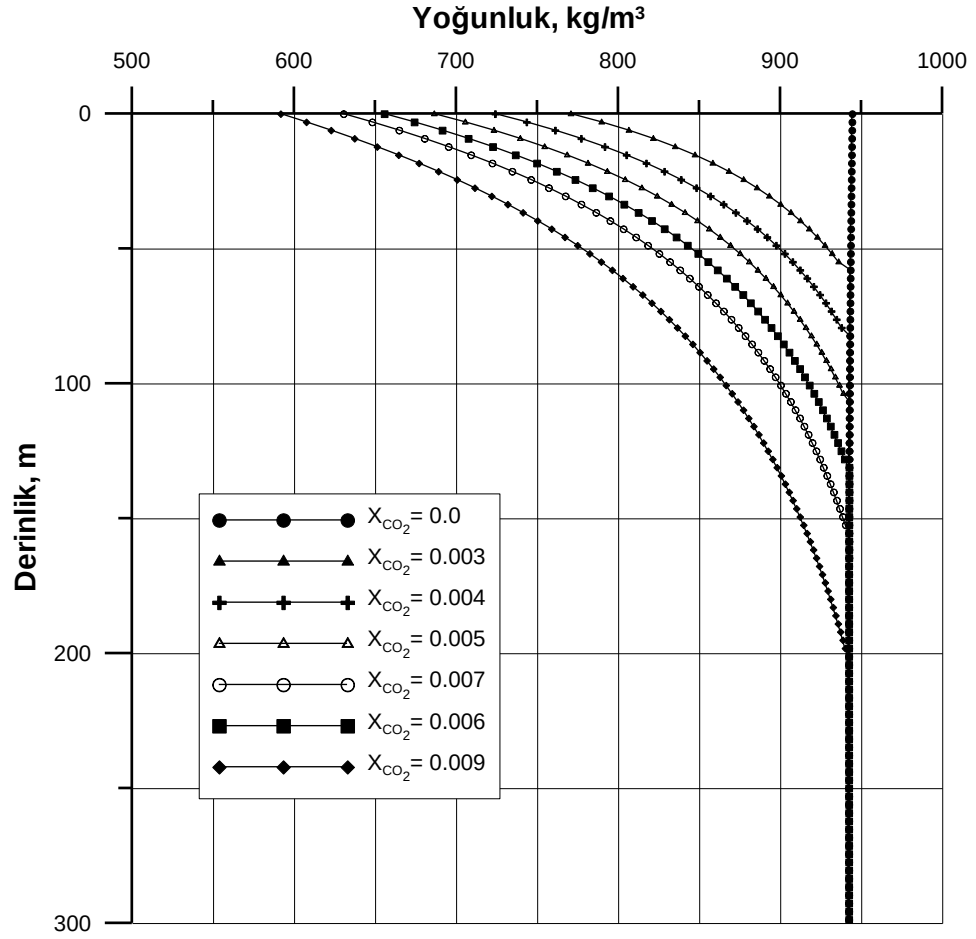
Şekil 5.8’de değişik CO₂ derişimlerinde, akışkanın yoğunluğunun derinlikle nasıl değiştiğini göstermektedir. Burada CO₂ derişimi arttıkça yoğunluğun daha fazla azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni açığa çıkan gazın karışımın yoğunluğunu düşürmesidir. Şekil 5.7 ise sıvıdan ayrılan CO₂ miktarının derinlik ile değişimi göstermektedir.



Şekil 5.6 – CO₂ derişiminin sıcaklık ve basınç profiline etkisi.



Şekil 5.7 – Sıvıdan ayrılan CO₂ miktarının derinlik ile değişimi.



Şekil 5.8 – CO₂ derişiminin akışkanın yoğunluk üzerine etkisi.

5.3 Çok Girişli Kuyu Uygulaması

Kuyuya birden fazla rezervuardan akışın olması durumunun incelenmesi için çok girişli kuyu uygulaması yapılmıştır. Burada kuyuya iki farklı noktadan giriş olmaktadır. Bu girişlerin rezervuar özellikleri farklı olup, farklı sıcaklıklarda sularla kuyuyu beslemektedirler. Bu uygulamaya ait veriler Çizelge 5.4 ile verilmektedir.

e	ait	kh, md-ft	500.00
---	-----	-----------	--------

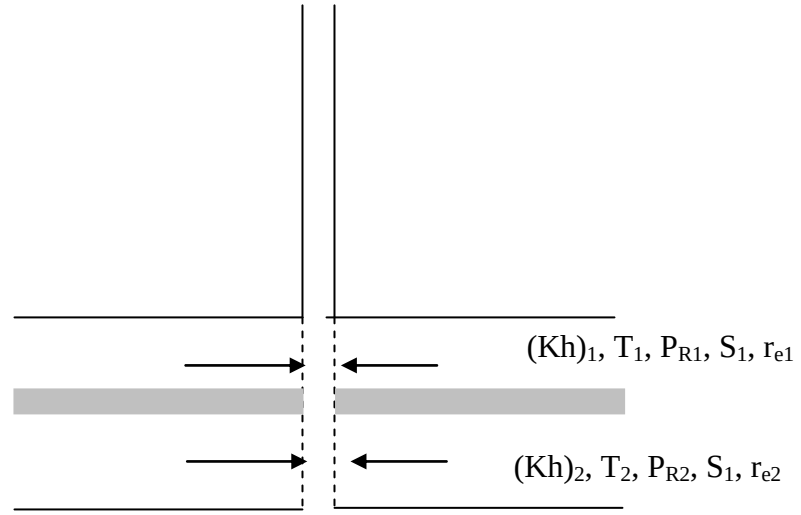
Çizelge 5.4 - Çok uygulamalarına ait

	r_e, ft	1000.00
	P_R, psia	2000.00
	T, °F	250.00
	Derinlik, ft	1000.00
İkinci girişe ait veriler	kh, md-ft	400.00
	r_e, ft	2000.00
	P_R, psia	1500.00
	T, °F	245.00
	Derinlik, ft	800.00
	S_1	0.00
	S_2	0.00
	P_{wf}, psia	500.00
	t, gün	30.00
	L, ft	1000.00
	α, ft²/gün	0.96
	k_e, Btu/ft-gün- °F	33.60
	Jeotermal Gradyan, °F/ft	0.40
	θ°	90
	c_w, Btu/lbm- °F	1.00
	r_w, ft	0.40

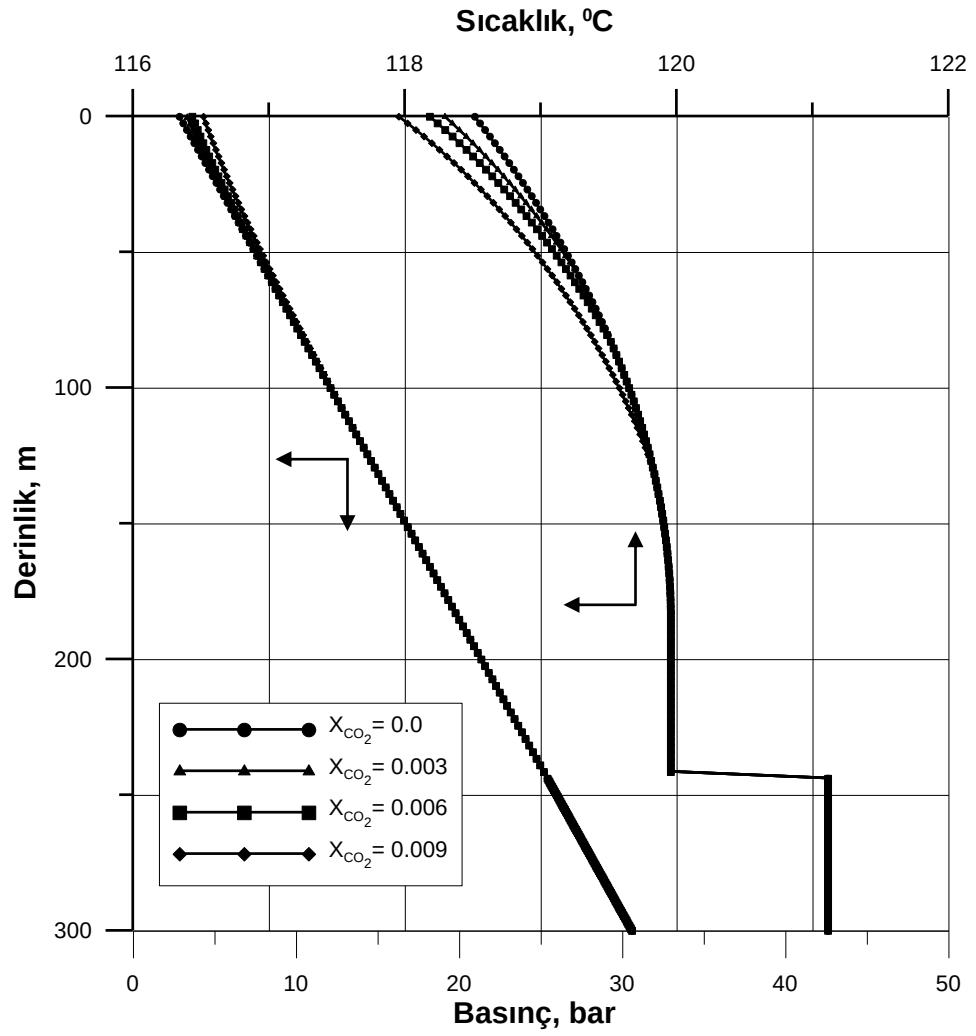
girişli kuyu veriler.

Sonuçlar 5.10, 5.11 ve 5.12 numaralı şekiller ile verilmektedir. Kuyuya birden fazla farklı sıcaklıklarda giriş olması durumunun karakteristiği, Şekil 5.10'da görüldüğü gibi sıcaklık profilinde oluşan sapmalardır. Basınç profilinde ise yeni girişlerin belirgin bir etkisi yoktur. Sıcaklığı farklı girişlerin varlığı sıcaklık profillerinin incelenmesi ile saptanabilir.

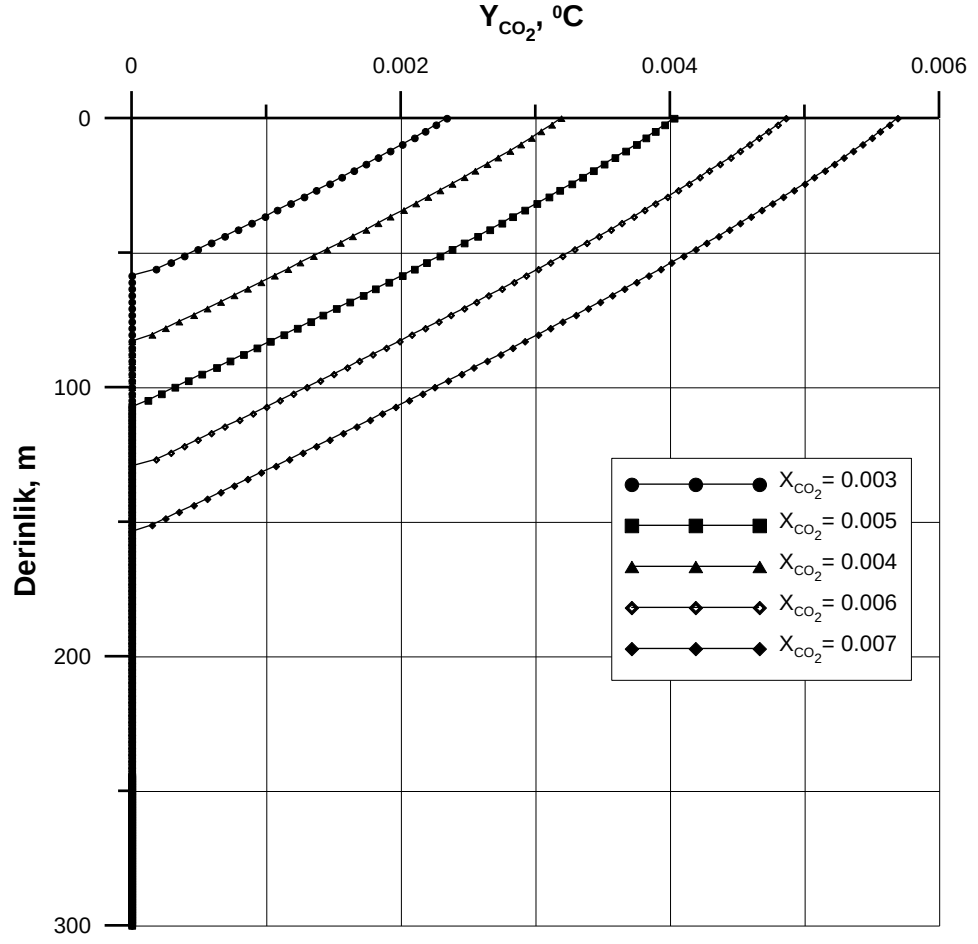
Şekil 5.11'da değişik CO₂ derişimlerinde, akışkanın yoğunluğunun derinlikle nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 5.12 ise sıvıdan ayrılan CO₂ miktarının derinlik ile değişimi göstermektedir.



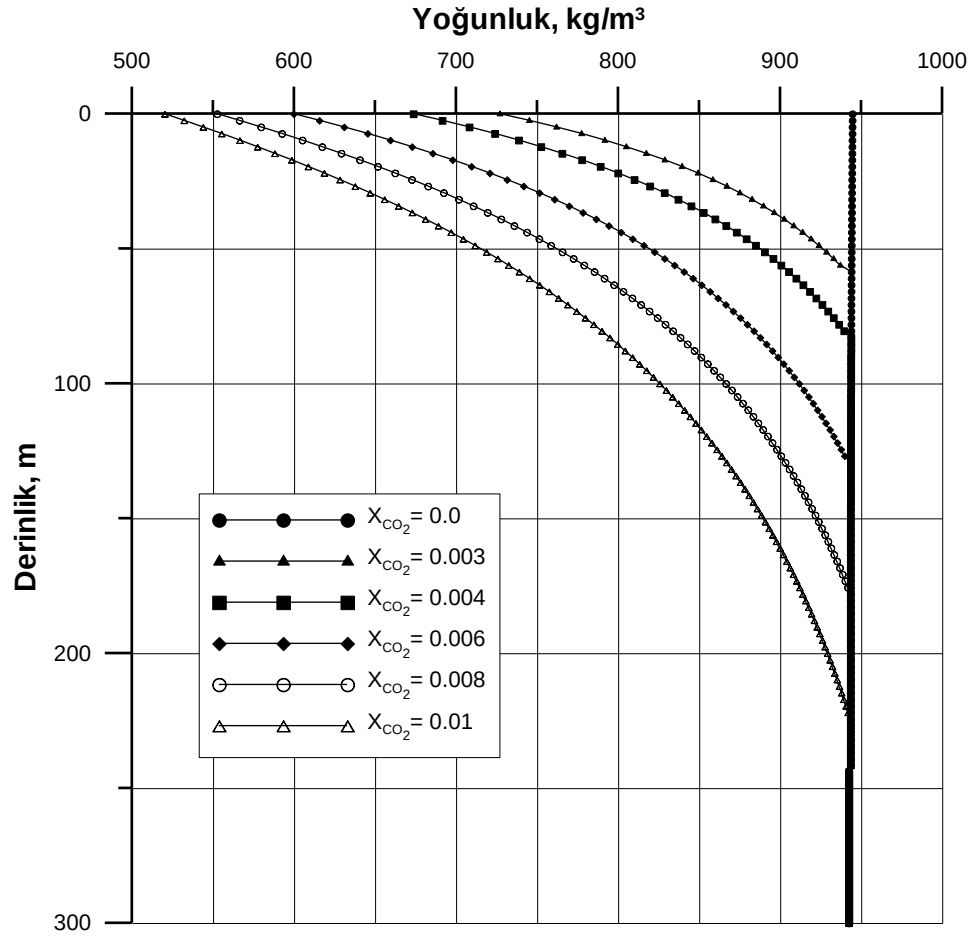
Şekil 5.9 – Çok girişli kuyu uygulamasının şematik gösterimi.



Şekil 5.10 – Çok girişli kuyu uygulamasının dinamik basınç ve sıcaklık profilleri.



Şekil 5.11 - Sıvıdan ayrılan CO₂ miktarının derinlik ile değişimi.



Şekil 5.12 – Yoğunluğun derinlik ile değişimi.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada, kuyuya birden fazla tabakanın giriş yaptığı jeotermal rezervuarlar için p-T modeli sunulmuştur. Yapılan varsayımlar (kabarcıklı akış, kinetik enerjiden kaynaklı basınç düşümünün ihmali, su buharının ihmali) göz önüne alındığında, modelin çok derin olmayan kuyular ve suyun etken olarak bulunduğu sistemler için kullanılabildiği anlaşılmaktadır. Model CO₂ içeren jeotermal kuyuların tek ve iki fazlı basınç ve sıcaklık profillerini hesaplayabilmektedir. Afyon Ömer – Gecek sahasındaki AF – 21 kuyusunun, dinamik ve statik profilleri değerlendirilmede kullanılmış, model ve saha verileri arasında iyi bir uyum yakalanmıştır

1. Modelle birlikte kuyu içinde sıcaklık profilini belirlemede kullanılan ve Ramey tarafından tanımlanmış olan boyutsuz zaman fonksiyonunun hesaplanması için yeni bir korelasyon sunulmuştur.
2. Model, saha verileri kullanılarak CO₂ içeriğini ve giriş özelliklerini tahmin etmekte kullanılabilmektedir.
3. Kuyuya birden fazla farklı sıcaklıklarda giriş olması durumunun karakteristiği, sıcaklık profilinde oluşan sapmalardır.

KAYNAKLAR

- [1] **Satman, A., ve Alkan, H.,** 1989. Modeling of Wellbore Flow and Calcite Deposition for Geothermal Wells in the Presence of CO₂, *SPE Paper No:* 19350.
- [2] **Satman, A., Ugur, Z., ve Onur, M.,** 1999. The Effect of Calcite Deposition on Geothermal Well Inflow Performance, *Geothermics*, June, 425-444.
- [3] **Hasan, A.,R., ve Kabir C.S.,** 2002. *Fluid Flow and Heat Transfer in Wellbores*, Society of Petroleum Engineers, Texas.
- [4] **Chierici, G.L., Giannone, G.G., Schlocchi, A, Terzi L.,** 1981. A Wellbore Model for Two-Phase Flow in Geothermal Reservoirs, *SPE Paper No:* 10315
- [5] **Gunn, C. ve Freeston, D.,** 1991. An Integrated Steady-State Wellbore Simulation and Analysis Package, *Proceedings*, 13. New Zealand Geothermal Workshop, 161 – 166
- [6] **Aunzo, Z. P., Bjornsson, G Aunzo, Z. P., Bjornsson, G. and Bodvarsson, G. S.,** 1991. Wellbore Models GWELL, GWNACL, and HOLA User's Guide, Lawrence Berkeley laboratory Report LBL-31428, DE92 009494.
- [7] **Takahashi, M.,** 1988. A Wellbore Flow Model in the presence of CO₂ Gas, *Proceedings*, 13th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, 151-157
- [8] **Tokita, H., Itoi, R.,** 2004. Development of the MULFEWS Multi-Feed Wellbore Simulator, 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford California, 26-28 January.

- [9] **Alves, I., N., Alhanati, F., J., S., Shoham, O.,** 1992. A Unified Model for Predicting Flowing Temperature Distribution in Wellbores and Pipelines, *SPE Production Engineering*, November, 363-367.
- [10] **Brill J. and Mukherjee H.,** 1999. *Multiphase Flow in Wells*, Society of Petroleum Engineers, Texas.
- [11] **Satman, A.,** 2004. Advanced Reservoir Geothermal Engineering, Course Notes, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [12] **Ramey, H., J.,** Wellbore Heat Transmission, 1961. *AIME Transactions*, 427-435.
- [13] **Hagoort, J.,** 2004. Ramey's Wellbore Heat Transmission Revisited, *SPE Journal*, December , 465-474.
- [14] **Wu, Yu-Shu ve Pruess, K.,** 1990. An Analytic Solution for Wellbore Heat Transmission in Layered Formations, *SPE Reservoir Engineering*, November, 531-538.
- [15] **Hasan, A., R., Kabir, C., S.,** 1994. Aspects of Wellbore Heat Transfer During Two-Phase Flow, *SPE Production & Facilities*, August, 211-216.
- [16] **Ramey, H., J.,** 1981. Reservoir Engineering Assessment of Geothermal Systems, Stanford University, Stanford, CA.
- [17] **Uğur, Z.,** 1996. Petrol ve Jeotermal Sahalarında Kalsiyum Karbonat Çökelmesinin Modellenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [18] **Taitel, Y.,** 1995. Advances in Two Phase Flow Mechanistic Modelling, *SPE Paper No: 27959*.
- [19] **Shi, H., Holmes, J.A., Durlafsky, L.J., Aziz, K., Diaz, L.R., Alkaya, B. ve G. Oddie,** 2003. Drift-Flux Modeling of Multiphase Flow in Wellbores, *SPE Paper No: 84228*.
- [20] **Sutton, F., M.,** 1976, Pressure-Temperature Curves for a Two-Phase Mixture of Water and Carbondioxide, *New Zealand Journal of Science*, 297-301.

- [21] **Yuguang, C.**, 2001. Modeling Gas-Liquid Flow in Pipes: Flow Pattern Transitions and Drift-Flux Modeling, *Yüksek Lisans Tezi*, Stanford University.
- [22] **Zuber, N. ve Findley J. A.**, 1965. Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems, *Journal of Heat Transfer*, November, 453-468.
- [23] **Aziz, K. ve Govier, G. W.**, 1972. *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*, New York , Van Nostrand Reinhold Co.
- [24] **Sagar, R.,K., Dotty, D., R., ve Schmidt, Z.**, 1991. Predicting Temperatures in a Flowing Oil Well, *SPE Production Engineering*, November, 441-448.
- [25] **Prausnitz, J. M., Lichtenthaler, R. N., Azevedo, E. G.**, 1999. *Molecular Thermodynamics of Fluid – Phase Equilibria*, Printice, New Jersey, Prentice Hall.

ÖZGEÇMİŞ

Murat ÇINAR 1980 yılında İstanbul'da dünyaya geldi. Orta Öğrenimini İstanbul'da Kadıköy Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği bölümünden 2003 yılında mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.