

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

JEOTERMAL REZERVUARLARIN PERFORMANSLARININ
SONLU ELEMANLAR METODU İLE BELİRLENMESİ

İbrahim CAN

121371

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ERZURUM
2002

Her hakkı saklıdır

.Yrd..Doç..Dr..Ahmet.BUDAK.....danışmanlığında İbrahim CAN tarafından hazırlanan
bu çalışma 25../....10../..2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora..... tezi olarak
kabul edilmiştir.

Başkan : Prof..Dr..Mustafa.Y. KILINÇ

İmza :



Üye : Prof..Dr..Rüstem.GÜL

İmza :



Üye : .Yrd..Doç..Dr..Ahmet BUDAK

İmza :



Üye : .Yrd..Doç..Dr..Vahdettin TOSUNOĞLU

İmza :



Üye : .Yrd..Doç..Dr..Reşat ACAR

İmza :



121377

Yukarıdaki sonucu onaylarım

(imza)



Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

JEOTERMAL REZERVUARLARIN PERFORMANSLARININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE BELİRLENMESİ

İbrahim CAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ahmet BUDAK

Çalışmada, Sıcak su egemen jeotermal rezervuarların zamana bağlı performanslarını belirlemek üzere iki boyutlu (alansal) kütle ve enerji transferi kısmi diferansiyel denklemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü için gerekli formülasyon yapılmış, elde edilen formülasyon doğrultusunda bir bilgisayar programı geliştirilerek ülkemizin en büyük jeotermal sahalarından biri olan Denizli-Kızıldere jeotermal sahasının değişik üretim senaryolarına göre zamana bağlı simülasyonunda kullanılmıştır.

Geliştirilen bilgisayar programı genel olup, herhangi bir sıcak su egemen jeotermal rezervuarın zamana bağlı simülasyonunu yapabilmektedir.

Kızıldere jeotermal rezervuarından 1984–1998 yılları arasında yapılan jeotermal akışkan üretimi sonucunda rezervuar basıncında meydana gelen basınç düşümünden hareketle rezervuarın kalınlığı 1200 m, porozitesi 0.15 ve permeabilitesi $4.17 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ olarak bulunmuştur.

Kızıldere jeotermal rezervuarına altı değişik üretim senaryosu uygulanarak her bir üretim senaryosu için ortalama rezervuar ömrü ile her bir üretim kuyusunun ömürleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, rezervuar ömrünün rezervuardan yapılan toplam jeotermal akışkan üretiminin 670 t/h, 870 t/h, 1000 t/h, 1305 t/h, 1500 t/h ve 1740 t/h olması halleri için sırasıyla 103.3 yıl, 36.2 yıl, 24.6 yıl, 13.1 yıl, 9.65 yıl ve 6.9 yıl olarak belirlenmiştir.

2002, 107 sayfa

Anahtar kelimeler: Jeotermal enerji, jeotermal rezervuar, sonlu elemanlar metodu, simülasyon, Kızıldere jeotermal sahası

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DETERMINATION OF GEOTHERMAL RESERVOIRS PERFORMANCE BY FINITE ELEMENTS METHOD

İbrahim CAN

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet BUDAK

In this study, an essential formulation has been derived to solve two dimensional (areal) mass and energy transport partial differential equations by finite elements method for the purpose of transient performance determination of hot water dominated geothermal reservoirs. A computer programme has been developed by using derived formulation and transient simulation of Denizli-Kızıldere geothermal reservoir, which is one of the largest geothermal fields in Turkey, has been done.

The developed computer programme is a general one which is capable of simulating any of the two dimensional hot water dominated geothermal reservoir.

Using Kızıldere geothermal reservoir pressure drawdown versus time between 1984 and 1998 it has been found that the reservoir thickness is 1200 m, porosity is 0.15 and permeability is $4.17 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$.

At the Kızıldere geothermal reservoir, six varied production scenario has been put into practice, and reservoir and production wells life has separately been determined.

It has been determined that Kızıldere geothermal reservoir life is 103.3 years, 36.2 years, 24.6 years, 13.1 years, and 6.9 years for 670 t/h, 870 t/h, 1000 t/h, 1305 t/h, 1500 t/h, and 1740 t/h total geothermal fluid production, respectively.

2002, 107 pages

Keyword: Geothermal energy, geothermal reservoir, finite elements method, simulation, Kızıldere geothermal field

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında ilgi, teşvik ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yard. Doç. Dr. Ahmet BUDAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez konusunun belirlenmesinde ve sonraki çalışmalarında çok yakın desteğini gördüğüm Sayın Prof. Dr. Yakup BASMACI’ya

ve ismini sayamadığım çalışmada emeği geçen Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü elemanlarına teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim CAN

Eylül 2002

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Jeotermal Enerji Sistemlerinin Sınıflandırılması	4
1.1.1. Entalpilerine Göre Sınıflandırma	4
1.1.2. Isının Taşınım Şekline Göre Sınıflandırma	4
1.1.3. İçerdikleri Akışkanın Kompozisyonuna Göre Sınıflandırma	5
1.2. Jeotermal Enerji ve Çevre	5
1.3. Jeotermal Enerjinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Tarihsel Gelişimi	6
1.4. Kaynak Özetleri	9
1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	12
2. KURAMSAL TEMELLER	16
2.1. Matematik Model	17
2.1.1. Kütle ve Enerji Transferi Denklemlerinin Türetilmesi	18
2.2. Gözenekli Ortamdaki Akışkan ve Isı Akımı İle İlgili Yapılan Kabuller	19
2.3. Diferansiyel Denklemlerdeki Parametreler İçin Temel Bağlıntılar	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM	25
3.1. Kütle Transferi Denkleminin İntegral Formunun Oluşturulması	26
3.2. Enerji Transferi Denkleminin İntegral Formunun Oluşturulması	28
3.3. Kütle Transferi Denkleminin Sonlu Elemanlar Modeli	31
3.4. Enerji Transferi Denkleminin Sonlu Elemanlar Modeli	34
3.5. Enterpolasyon Fonksiyonu	38
3.6. Zamana Bağlı Terimlerin Türevlerinin elde edilmesi	42
3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Jeotermal Rezervuar Modellenmesinde İzlenilen Adımlar	44
3.8. Bilgisayar Programı ve Akış Diyagramı	46
3.9. Geliştirilen Bilgisayar Programının Örnek Problemle Tahkiki	48
3.10 Kızıldere Jeotermal Rezervuarının İncelenmesi	52
3.10.1. Kızıldere Jeotermal Sahasının Jeolojisi	53
3.10.2. Kızıldere Jeotermal Sahasının Hidrojeolojisi	56
3.10.3. Kızıldere Jeotermal Rezervuarının Fiziksel Parametreleri	60
3.10.4. Kızıldere Jeotermal Sahasındaki Üretim Kuyularının Özellikleri	63
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	65
4.1. Kızıldere Jeotermal Rezervuarının 1984-1998 Yılları Arasındaki Simülasyonu	68
4.2. Kızıldere Jeotermal Rezervuarının Çeşitli Üretim Senaryolarına Göre Performansının Değerlendirilmesi	76

4.3.	2003 Yılından İtibaren Değişik Üretim Senaryolarının Uygulanması Halinde Ortalama Rezervuar Ömrünün Tahmini	81
4.4.	2003 Yılından İtibaren Değişik Üretim Senaryolarının Uygulanması Halinde KD14, KD15 ve KD16 Kuyularının Ömürlerinin Tahmini ...	87
4.5.	2003 Yılından İtibaren Değişik Üretim Senaryolarının Uygulanması Halinde KD6, KD13, KD20, KD21 ve KD22 Kuyularının Ömürlerinin Tahmini	100
5.	SONUÇ	101
KAYNAKLAR		105



SİMGELER DİZİNİ

A^e	Üçgen elemanın alanı
$\bar{K}_m$	Ortamanın termal dispersiyon tensörü
T	Sıcaklık
U	Rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın birim kütlelerinin iç enerjisi
U_r	Rezervuar kayasının birim kütlelerinin iç enerjisi
Z	Deniz seviyesinden olan derinlik
b	Rezervuar kalınlığı
c_p	Rezervuar kayasının ısı kapasitesi
ds	Sonsuz küçük yay uzunluğu
h	Rezervuardaki akışkanın entalpisi
h_i	Rezervuardaki akışkanın başlangıçtaki entalpisi
h_r	Rezervuar kayasının entalpisi
k	Perleabilite
$\bar{k}$	Lokal iç iletkenlik (intrinsic permeability) tensörü
$\hat{n}$	Birim normal vektör in x ve y yönündeki bileşenleri
n_x	Birim normal vektör $\hat{n}$ in x yönündeki bileşeni
n_y	Birim normal vektör $\hat{n}$ in y yönündeki bileşeni
p	Basınç
p_i	Başlangıçtaki basınç
q'	Rezervuardan çekilen sıvı fazdaki akışkanın kütlesi
t	Zaman
ϕ	Porozite
ρ	Rezervuardaki akışkanın yoğunluğu
$\bar{v}$	Rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın ortalama hızı
∇	Del operatörü (sadece yatay düzlemde, x ve y, tanımlanmıştır)
μ	Rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın dinamik viskozitesi

ρ_r	Rezervuar kayasının yoğunluğu
$\bar{\lambda}$	Rezervuardaki sıvı fazdaki akışkandan dispersiyon ile olan ısı akımı
$\bar{\lambda}_r$	Rezervuar kayasından kondüksiyon ile olan ısı akımı
β	Rezervuar kayasının düşey yöndeki sıkışabilirliği
$\phi_i(x, y)$	Başlangıçtaki porozite dağılımı
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi
Ω^e	Sonlu eleman
Γ^e	Sonlu eleman sınırı
ψ_j^e	Lagrange enterpolasyon fonksiyonudur.
Δt	Zaman artımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Bir jeotermal sistemin genelleştirilmiş modeli	3
Şekil 1.2.	Türkiye'nin neotektoniği, volkanik etkinliği ve jeotermal alanlar	7
Şekil 3.1.	Tipik üçgen eleman	27
Şekil 3.2.	Üçgen lineer eleman için enterpolasyon fonksiyonu	38
Şekil 3.3.	Hazırlanan bilgisayar programına ait akış diyagramı	47
Şekil 3.4.	Test problemi olarak simülasyonu yapılan jeotermal rezervuarın sonlu elemanlar ağı	49
Şekil 3.5.	Test problemindeki 10 aylık simülasyon sonunda hesaplanan eş basınç eğrileri	50
Şekil 3.6.	Test probleminin 10 aylık simülasyon sonunda Faust ve Mercer (1975) tarafından hesaplanan eş basınç eğrileri	51
Şekil 3.7.	Kızıldere jeotermal sahasının yer bulduru haritası	52
Şekil 3.8.	Kızıldere'deki ana fay hatları ile kuyu lokasyonlarının durumu	54
Şekil 3.9.	Kızıldere jeotermal sahasının jeoloji haritası	55
Şekil 3.10.	Kızıldere jeotermal sahasının hidrojeolojik modeli	57
Şekil 3.11.	Kızıldere jeotermal sahasının hidrojeolojik birimleri	59
Şekil 3.12.	Kızıldere jeotermal sahasının eş sıcaklık eğrileri haritası	62
Şekil 3.13.	Kızıldere jeotermal sahasındaki üretim kuyularının kuyu dibi basınçlarının derinlikle değişimi	64
Şekil 4.1.	Kızıldere jeotermal sahasının simülasyonunda kullanılan sonlu elemanlar ağı	66
Şekil 4.2.	Kızıldere jeotermal sahasına ait sonlu elemanlar ağının üretim bölgesine ait kısmı	67
Şekil 4.3.	Kızıldere jeotermal rezervuarında 1984-1998 yılları arasında ortalama rezervuar basıncının zamanla değişimi	70
Şekil 4.4.	Kızıldere jeotermal rezervuarında 1984-1998 yılları arasında ortalama rezervuar basıncının kümülatif üretimle değişimi	71
Şekil 4.5.	KD6 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi	72
Şekil 4.6.	KD13 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi	72
Şekil 4.7.	KD14 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi	73
Şekil 4.8.	KD15 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi	73
Şekil 4.9.	KD16 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi	74
Şekil 4.10.	KD 20 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi	74
Şekil 4.11.	KD 21 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi	75
Şekil 4.12.	KD22 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi	75

Şekil 4.13. Kızıldere jeotermal rezervuarında $Z=-513$ m den yapılan çeşitli üretim debileri için ortalama rezervuar basıncının zamanla değişimi	79
Şekil 4.14. Kızıldere jeotermal rezervuarında $Z=-513$ m den yapılan çeşitli üretim debileri için ortalama rezervuar basıncının kümülatif üretimle değişimi	80
Şekil 4.15. KD6 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın zamanla değişimi ($Z=-667$ m)	83
Şekil 4.16. KD6 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın kümülatif üretimle değişimi ($Z=-667$ m)	84
Şekil 4.17. KD13 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın zamanla değişimi ($Z=-571$ m)	85
Şekil 4.18. KD13 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın kümülatif üretimle değişimi ($Z=-571$ m)	86
Şekil 4.19. KD14 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın zamanla değişimi ($Z=-400$ m)	88
Şekil 4.20. KD14 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=-400$ m)	89
Şekil 4.21. KD15 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=-299$ m)	90
Şekil 4.22. KD15 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=-299$ m)	91
Şekil 4.23. KD16 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=-466$ m)	92
Şekil 4.24. KD16 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=-466$ m)	93
Şekil 4.25. KD20 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=-616$ m)	94
Şekil 4.26. KD20 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=-616$ m)	95
Şekil 4.27. KD21 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=-694$ m)	96
Şekil 4.28. KD21 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=-694$ m)	97
Şekil 4.29. KD22 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=-684$ m)	98
Şekil 4.30. KD22 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=-684$ m)	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Test probleminde kullanılan jeotermal rezervuara ait parametreler	48
Çizelge 3.2. Kızıldere jeotermal rezervuarının fiziksel parametreleri	61
Çizelge 3.3 Kızıldere jeotermal sahasındaki üretim kuyularının özellikleri	63
Çizelge 4.1. Kızıldere jeotermal rezervuarından 1984-1998 yılları arasında yapılan üretimin üretim kuyularına göre dağılımı	68
Çizelge 4.2. Kızıldere jeotermal rezervuarından değişik üretim senaryolarına göre yapılan jeotermal akışkan üretimi ve bu üretimin kuyulara dağılımı ..	76
Çizelge 4.3. 2003 yılından itibaren değişik üretim senaryolarının uygulanması halinde KD14, KD15 ve KD16 kuyularının kuyu dibi basınçlarının (KDB) 20 bara düşme süreleri ve üretebilecekleri toplam jeotermal akışkan miktarları	87
Çizelge 4.4. 2003 yılından itibaren değişik üretim senaryolarının uygulanması halinde ortalama rezervuar basıncının (ORB) 20 bara düşme süresi içerisinde KD6, KD13, KD20, KD21 ve KD22 kuyularından üretilebilecek toplam jeotermal akışkan miktarları	100

1. GİRİŞ

Tüm dünyada enerjiye olan talep giderek artmakla birlikte enerji ihtiyacının büyük bir kısmı petrol, kömür, hidrolik ve bazı gelişmiş ülkelerde de nükleer santrallerden karşılanmaktadır. Fakat fosil enerji kaynaklarının tükenmekte olması ve nükleer santrallerin çevreyi tehdit etmesi, araştırmaları yenilenebilir temiz enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Bu nedenle ülkeler, alışılmış enerji kaynaklarının yanı sıra yenilerinin bulunup işletilmesi için yoğun araştırmalara yönelmişlerdir. Özellikle 1970'li yıllardaki dünya petrol krizinin ardından yenilenemeyen fosil enerji üretiminden ziyade yenilenebilir enerji üretiminin arttırılmasına yönelik çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar, su, güneş, jeotermal, gel-git, deniz akıntıları ve dalga enerjileri gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla ilgiyi ise jeotermal enerji görmektedir (Lund and Freeston 2001).

Jeotermal enerjinin kullanım alanları oldukça fazladır. Başta elektrik enerjisi üretimi olmak üzere, ısıtmacılıkta, soğutmacılıkta, kurutmacılıkta, konservecilikte, kimyasal madde üretiminde, kağıt ve tekstil sanayiinde jeotermal enerjiden doğrudan yada dolaylı olarak yararlanılmaktadır.

Jeotermal enerji, yer kabuğunun sahip olduğu ısı enerjisinin yeraltındaki sulara aktarılması sonucu aşırı ısınmış akışkanın kendiliğinden yeryüzüne çıkarak yada sondajlarla çıkarılarak taşıdıkları enerjinin ekonomik kullanıma dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir (DPT.YBM 1997). Jeotermal akışkanı oluşturan suların kökeni yağış suları olduğu için yeraltındaki rezervuar sürekli beslenmekte ve beslenmenin üzerinde kontrolsüz bir şekilde kullanım olmadıkça bu kaynakların tükenmesi söz konusu olmadığından dolayı jeotermal enerji tükenmeyen ve yenilenebilir bir alternatif enerji kaynağıdır.

Sıcaklığı yıllık ortalama yüzey sıcaklığının üstünde, doğal olarak yeraltında oluşmuş ve çevresindeki yer altı ve yerüstü sularına oranla daha fazla erimiş maddeler ve gazlar içerebilen su, buhar ve gazlar jeotermal kaynaklar olarak tanımlanmaktadır

(Şimşek 1993). Ayrıca herhangi bir akışkan içermemesine rağmen bazı teknik yöntemlerle ısısından yararlanılan, yerin derinliklerindeki sıcak kuru kayalarda jeotermal enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir.

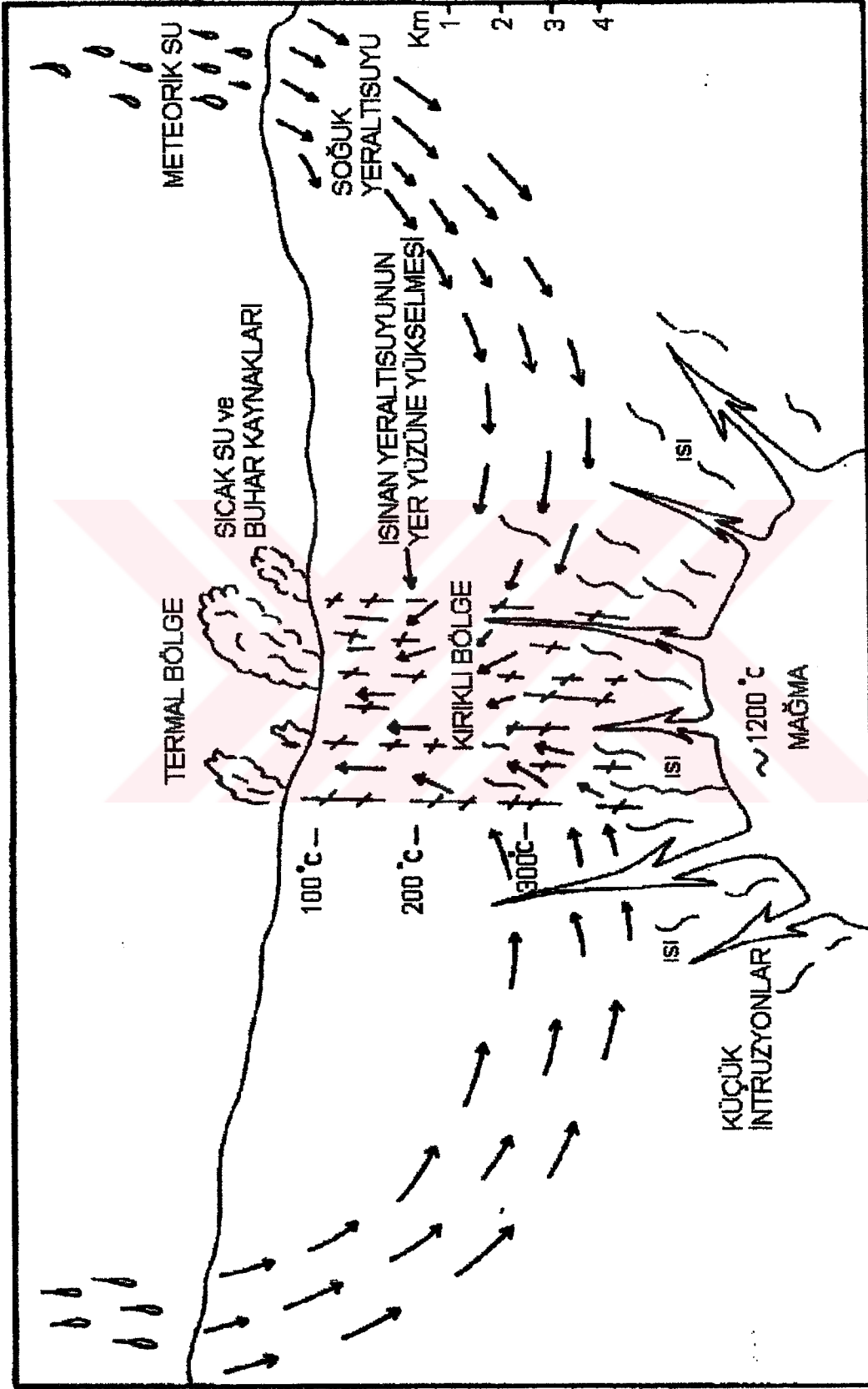
Yer kabuğunun derinliklerinde henüz soğumamış bir magma kütlesi veya genç bir volkanizma ısı kaynağını oluşturabilmektedir. Bu ısı kaynağının aşırı derecede ısıttığı jeotermal akışkan normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilmektedir.

Yüzeyden kırık ve çatlaklar aracılığı ile derinlere süzülen meteorik kökenli sular (yağış suları) değişik derinliklerde yer alan ve geçirimsiz örtü kayalarla yüzeylenmiş olan gözenekli ve/veya ikincil permeabiliteli akiferlerde birikerek söz konusu ısı kaynağı tarafından ısıtılır ve mineralce zenginleşir.

Genel anlamda jeotermal akiferler, yüksek geçirimli akım kanallarına sahip olan ve yeraltısuyunu ileten jeolojik ortamlardır. Jeotermal akiferler için jeotermal rezervuar veya hazne kaya terimi de kullanılmaktadır (Şimşek 1993).

Permeabilite, kayaçların akışkanı iletebilme kabiliyetidir ve kayaçların kalitesi ile ilgilidir. İkincil permeabilite ise kayaçların tabiatında var olan gözenekliliğinden başka tektonik hareketler sonucundaki kırılmalar, yer değiştirmeler ve basınç ve çekme kuvvetleri ile oluşan gözeneklilik sonucu oluşur. İkincil permeabilite tektonik kayaçların akışkanı iletebilme kabiliyetini artırır.

Yerkabuğunun derinliklerinde ısınan bu meteorik sular kırık ve çatlak sistemlerinin oluşturduğu yollarla yeryüzüne ulaştıklarında sıcak su kaynaklarını oluştururlar (şekil 1.1).



Şekil 1.1. Bir jeotermal sistemin geliştirilmiş modeli (Yüksel 1987)

1.1. Jeotermal Enerji Sistemlerinin Sınıflandırılması

Jeotermal enerji sistemleri entalpilerine, ısının taşınım şekline ve içerdikleri akışkanın kompozisyonuna göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadırlar (Pinder 1979, Grant *et al.* 1982, Edwards *et al.* 1982, Kjaran and Eliasson 1983).

1.1.1. Entalpilerine Göre Sınıflandırma

Entalpi, jeotermal rezervuar mühendisliğinde büyük öneme sahip olan bir termodinamik özelliktir. Basıncı bir jeotermal rezervuardaki akışkanın entalpisi rezervuardaki sıcaklığın ve basıncın fonksiyonudur. Jeotermal rezervuarlar entalpilerine göre aşağıdaki gibi üçe ayrılırlar.

1. Düşük entalpili sahalar: Sıcaklığı 30-70°C arasında değişen jeotermal kaynaklar genel olarak sağlık amaçlı banyolar ve yerel ısıtma uygulamalarında kullanılmaktadır.
2. Orta entalpili sahalar: Sıcaklığı 70-180°C arasındaki jeotermal kaynaklar elektrik üretimi dışında özellikle sanayideki kullanımlara uygundur.
3. Yüksek entalpili sahalar: Sıcaklığı 180°C nin üzerindeki jeotermal sahalar. Elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Ancak elektrik üretimi için kabul edilen 180°C lik alt sınır geliştirilen yöntemlerle her geçen gün aşağıya çekilmektedir.

1.1.2. Isının Taşınım Şekline Göre Sınıflandırma

Eğer yerin ısı enerjisi bir kütle taşınımı şeklinde değil de sadece kondüksiyonla (iletimle) yeryüzüne taşıyorsa bu tür jeotermal sistemlere kondüktif jeotermal sistemler denir. Sıcak kuru kaya olarak bilinen jeotermal kaynaklar bu sınıfa girmektedirler.

Yerin ısı enerjisinin yeraltı sularının sirkülasyonu ile taşınarak gözenekli ve geçirimli uygun formasyonlarda biriktirilmesi sonucu oluşan hidrotermal sistemler de konvektif jeotermal sistemler adını alır.

1.1.3. İçerdikleri Akışkanın Kompozisyonuna Göre Sınıflandırma

İçerdikleri akışkanın kompozisyonuna göre en yaygın jeotermal rezervuarlar su egemen jeotermal rezervuarlardır. Bu tür jeotermal rezervuarlara örnek olarak Wairakei - Yeni Zelanda, Cerro Prieto – Meksika, Kızıldere – Türkiye verilebilir.

Başlıca olarak ürettikleri akışkanın buhar olarak öne çıkması durumunda bu tür rezervuarlara da buhar egemen jeotermal rezervuarlar denir. Buhar egemen jeotermal rezervuarlara en iyi örnek Kaliforniya'daki Gayzerler dir.

Yukarıdakilerden farklı olarak rezervuarda sıcak su ile buharın beraber bulunması halinde böyle sistemlere de iki fazlı sistemler denilmektedir.

1.2. Jeotermal Enerji ve Çevre

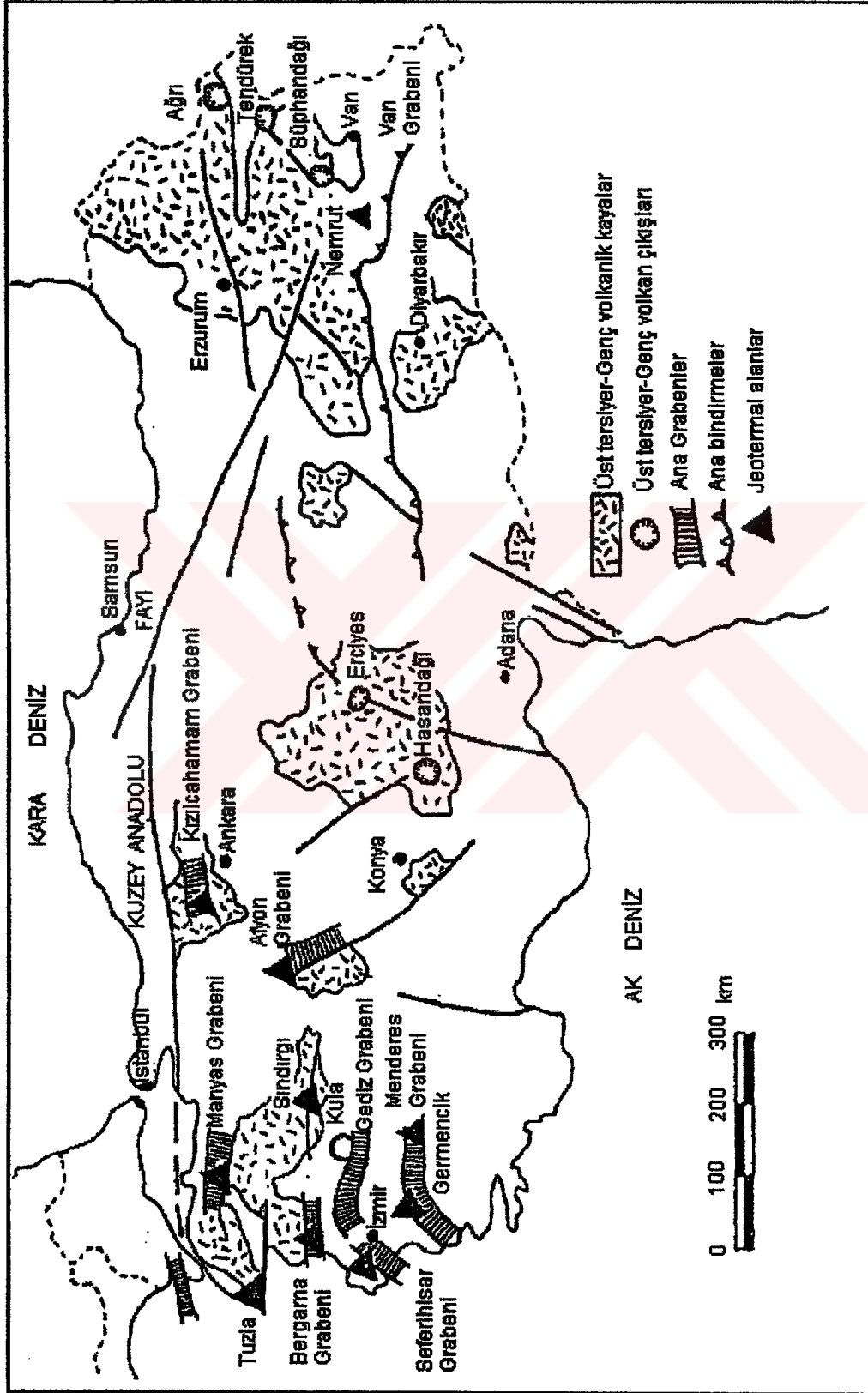
Genel durum itibariyle jeotermal enerji kullanımında çevre kirliliği yoktur. Çünkü jeotermal kaynağın özünde çevreye zararlı katı atıklar ve gazlar bulunmamaktadır. Kısıtlayıcı etken olarak beliren teçhiz ve iletim borularındaki CaCO_3 kabuklaşması sorunu inhibitör kullanımı ve diğer tekniklerden yararlanma yoluyla çözümlenmektedir. Jeotermal akışkan içinde tarımsal sulamada zararlı olabilecek oranlardaki bor ve aşırı tuzluluk gibi olumsuzluklar ise re-enjeksiyon sondajları yapılarak önlenmektedir.

Jeotermal merkezi ısıtma sistemleri sayesinde havaya CO_2 , SO_x , ve NO_x atılmamakta, hava kirlenmemekte, asit yağmurları olmamakta, ormanlar ve bitki örtüsü zarar görmemekte, temiz çevre ve sağlıklı ortam ucuza sağlanmış olmaktadır.

1.3. Jeotermal Enerjinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Tarihsel Gelişimi

İlk çağlardan beri ilkel yollarla sağlık amaçlı olarak yararlanılan doğal sıcak su kaynakları ilk defa 1827 yılında İtalya'da asitborik elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Daha sonra 1905 yılında İtalya'nın Larderello yöresinde yine ilk defa jeotermal buhardan elektrik üretimine başlanmış ve 1912 yılında gücü 250 Kwe olan ilk turbojeneratör kurulmuştur. Jeotermal enerjiden ısıtma amacıyla yararlanılmaya ise 1930'larda İzlanda'nın Reykjavik kentinde başlanmıştır. 1949 yılında Yeni Zelanda Wairakei sahasında turistik bir otele sıcak su temini amacıyla başlanan sığ sondajlara daha sonra elektrik elde edebilmek amacıyla devam edilmiş ve 1954 yılında 200 Mwe kapasiteli bir santral kurulmuştur. 1960 yılında Amerika'da, 1961 yılında Meksika'da ve 1966 yılında Japonya'da santraller kurularak jeotermal enerjinin kullanımı dünya çapında yayılmıştır. 1992 yılı verilerine göre dünyadaki jeotermal enerjiden elde edilen elektrik kurulu güç kapasitesi 6275.3 Mwe dir (Erişen vd 1996). 2000 yılı itibariyle dünyadaki ısıtma amaçlı doğrudan kullanım ise 15145 Mwt dir (Lund and Freeston 2001).

Ülkemizin yer aldığı Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde orta ve düşük entalpili hidrotermal sistemlerden su+buhar içerikli yüksek entalpili sistemlere kadar değişen bir jeotermal potansiyel vardır (şekil 1.2). Batı Anadolu'da mevcut bulunan önemli jeotermal alanlar genellikle graben yapılarına bağlı olarak oluşmuştur. Orta ve Doğu Anadolu'da jeotermal gelişme yakın zamanlara kadar etkinliğini sürdürmüş genç ve yaygın volkanikliğin yanı sıra Neotektonik dönemde Anadolu Levhası'nın uğradığı değişikliklerle de yakından ilişkili olmuştur. Anadolu Levhası üzerinde yer alan Kuzey Anadolu Fay Zonu ve buna bağlı aktif açılma yapıları ile Marmara ve Güneydoğu Anadolu bölgelerindeki tortul havzaların derinliklerinde değerlendirilebilecek nitelikte jeotermal alanlar gelişmiştir (Erişen vd. 1996).



Şekil 1.2. Türkiye'nin neotektoniği, volkanik etkinliği ve jeotermal alanlar (Yüksel 1987)

Ülkemizde jeotermal enerji aramaları 1962 yılında başlamış ve ilk araştırma kuyusu 1963 yılında İzmir Balçova'da açılarak 40 m derinlikte 124°C lik akışkan (sıcaksu+buhar) üretimi sağlanmıştır. 1968 yılında elektrik üretimine elverişli Denizli Kızıldere jeotermal alanı keşfedilmiştir. Ön çalışmalarda Türkiye'nin jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretim potansiyeli 4500 Mwe olarak tahmin edilmiştir (Göktekin ve Alkan 1986). Ülkemizin jeotermal enerjiye dayalı ilk ve tek elektrik santrali 1984 yılında 20.4 Mwe kapasite ile bu sahada kurulmuş olup üretimini halen sürdürmektedir (Okandan ve Polat 1987). Dünya genelinde kurulu jeotermal elektrik santralleri kapsamında Türkiye, 20.4 MWe kurulu güçlü Denizli-Kızıldere Santrali ile 14. sırada bulunmaktadır (Özcan 1998). 2000 yılı için jeotermal enerjiden elektrik üretim kapasitesinin 1000 Mwe olarak tahmin edilmesine rağmen, ülkemizin tek jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üreten santrali olan Kızıldere jeotermal santrali karşılaşılan bazı sorunlardan dolayı halen 7-8 Mwe kapasitesinde çalışmaktadır. Aydın-Germencik'de 100 MWe gücünde santrali besleyecek potansiyel bulunmakta ise de şimdilik 25 MWe gücünde ve 187.3 GWh/yıl üretim kapasitesinde bir santralin kurulması için ön çalışmalar başlatılmıştır. Ayrıca Aydın-Salavatlı ve Çanakkale-Tuzla'da sırasıyla 171 ve 173°C sıcaklıklı ve kullanılabilir potansiyeli 50-100 MWe arasında olan rezervuarlar bulunmaktadır (Özcan 1998).

Türkiye'nin yaklaşık 20000 Mw kurulu elektrik enerjisi gücü bulunduğu göz önüne alınırsa, jeotermal enerjiden elde edilen elektrik üretiminin tüm elektrik üretimindeki payı %0.05 kadardır. Enerji konusunda dışa bağımlılığı azaltıp ülke ekonomisine büyük oranda katkıda bulunabileceğinden dolayı, ülkemizin jeotermal enerji potansiyelini en verimli şekilde kullanması gerekmektedir. Günümüzde, birinci derecede elektrik güç üretiminde kullanılan jeotermal enerji, yer ve endüstriyel ısıtmada da kullanılmakta ve bir çok ülkenin ekonomisinde bir enerji kaynağı seçeneği olarak yer almaktadır. Bu bakımdan, jeotermal kaynaklardan maksimum enerjiyi elde edebilmek için jeotermal rezervuarların en verimli şekilde işletilmesi gerekmektedir.

1.4. Kaynak Özetleri

Jeotermal rezervuar mühendisliği ile ilgili ilk yayınlarda, incelenen rezervuarın içerdiği enerji ile ilgilenilmiştir. Bu, doğal olarak rezervuar mühendislerini ilgilendikleri jeotermal kaynağın boyutları hakkındaki belirsizlikleri gidermeye yönlendirmiştir. Rezervuarın boyutları hakkında jeolojik ve jeofizik yöntemlerle az çok bir fikir edindikten sonra açılan kuyuların kapasiteleri merak konusu olmuştur. Kuyunun verimi ne olacak? Ne zaman debisi azalmaya başlayacak? Ne zaman ömrünü tamamlayacak? Önümüzdeki kaç yıl eldeki mevcut kuyular ihtiyaca cevap verecek? Zamanla kuyularda ısıl kirlenme yani kuyu sularının sıcaklığında azalma olacak mı? (Kjaraan and Eliasson).

İşte yukarıdaki sorulara cevap vermek için çeşitli stokastik ve deterministik modeller önerilmiştir (Pinder 1979, Serpen 2000). Jeotermal rezervuardaki ısı ve akışkan akımının deterministik modelleri çoğu zaman içerisinde zamana göre türevi de içeren kısmi diferansiyel denklemlerden ibarettir. Genellikle bu kısmi diferansiyel denklemlerin analitik çözümü mümkün olmadığından uygun bir sayısal yöntem kullanılmıştır. Bu sayısal yöntemlerden en çok kullanılanları sonlu farklar yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemidir.

Jeotermal rezervuarlardaki ısı ve akışkan akımının matematiksel olarak modellenmesi ve sayısal çözümleri için bir çok araştırmacı çaba sarf etmiştir. Deterministik jeotermal rezervuar modellerinin en basit olanları boyutsuz yada diğer bir deyişle sıfır boyutlu (zero dimensional – lumped parameter model) modellerdir. Bu tür jeotermal rezervuar modellerinde tek bağımsız değişken zamandır. Bu nedenle bu tür modeller matematiksel olarak ya adi diferansiyel denklemlerle yada buna denk cebirsel bir ifade ile verilirler (Kjaraan 1983). Boyutsuz modeller, henüz üretime başlamamış bir jeotermal rezervuarın performansını kabaca tahmin etmede kullanışlıdır.

İlk boyutsuz jeotermal rezervuar modeli Whiting ve Ramey (1969) tarafından sunulmuştur. Bu araştırmacılar, Yeni Zelanda Wairakei hidrotermal sistemini modellemek için rezervuar mühendisliği konseptini kullanarak boyutsuz bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde rezervuar kayası ve akışkan özellikleri ve basınç değerleri tüm rezervuar için

ortalama bir değer alınmaktadır. Geliştirilen bu model ile rezervuar performansının tahmini mümkün olabilmektedir. Bu model, rezervuarın termodinamik olarak dengede olduğunu, basıncın bütün rezervuarda eşit dağıldığını, üretilen akışkanın rezervuarın her kısmından eşit üretildiğini kabul etmektedir.

Başka bir lumped-parameter model çalışması Brigham ve Morrow (1977) tarafından yapılmıştır. Bu model buhar egemen sistemler için geliştirilmiştir. Bu araştırmacılar sistemi kapalı bir sistem olarak düşünmüşler ve üç değişik şekilde ele almışlar. Birincisinde, sistemin tamamen buhar ile dolu ve izotermal olduğunu kabul etmişlerdir. İkincisinde, buhar zonunun alt kısmı, su zonunda kaynamanın meydana geldiği bir yüzey ile ayrıldığı düşünülmüştür. Buhar zonundaki akım izotermal ve su zonundaki akım non-izotermaldir. Kaynamadan dolayı buhar üretildiği için su seviyesinde bir azalma olmaktadır. Bu nedenle bu modele düşen su seviyeli model denmiştir. Üçüncüsünde, buhar zonunu alttan su zonu yüzeylemektedir. Fakat kaynamanın bütün buhar zonu içerisinde meydana geldiği ve su seviyesinde bir düşmenin olmadığı kabul edilmektedir. Bu nedenle bu modele de sabit su seviyeli model denilmiştir.

Atkinson vd. (1978) yaptığı lumped-parameter model çalışmasında buhar ve su zonları ile birlikte buhar zonunda karbondioksit ve diğer sıkışamayan gazların bulunduğunu kabul etmiştir. Bu model İtalya'nın Bagnore sahasında başarıyla uygulanmıştır.

Okandan (1986, 1988) tarafından lumped-parameter model kullanılarak Denizli Kızıldere jeotermal rezervuarının performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada değişik rezervuar hacmi ve porozite değerleri kullanılarak kurulu olan elektrik santralinin ömrü için tahminlerde bulunmuştur.

Bu tür yaklaşımların, yani boyutsuz modellerin en önemli eksikliği çözümün uzaysal bağımlılığını ihmal etmesidir. Boyutsuz modellerde, rezervuardan üretilecek olan jeotermal akışkanın ne kadarının rezervuarın hangi noktasından üretileceğini tarif etmek mümkün değildir. Aynı zamanda, jeotermal rezervuardan belli bir süre yapılan üretim

sonunda rezervuarın her hangi bir noktasındaki basıncı veya basınç düşümünü belirlemek de mümkün değildir.

Yukarıdaki nedenlerden dolayı jeotermal sistemi "distributed-parameter model" olarak ele alacak deterministik modellere ihtiyaç vardır. Distributed-parameter modeller, jeotermal rezervuarı iki veya üç boyutlu olarak inceleyen modellerdir. Bu nedenle bu modellere iki veya üç boyutlu modellerde denilmektedir. Bu tür modellerde, jeotermal rezervuardan üretimi yapılacak olan jeotermal akışkanın ne kadarının rezervuarın hangi noktasından olacağını tanımlamak mümkündür. Özellikle, simülasyonu yapılmak istenilen jeotermal rezervuarın, rezervuar kalınlığı, porozite, permeabilite, basınç ve sıcaklık gibi özelliklerinin uzaysal dağılımı iyi bir şekilde belirlenebildiği durumlarda üç boyutlu distributed-parameter modellerle daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek mümkün olmaktadır.

Mercer (1973) su egemen sistemler için iki boyutlu bir distributed-parameter model önermiştir. Bu modelde basınç ve sıcaklık parametreleri bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Modelin sayısal çözümü için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Araştırmacı önerdiği bu model ile Yeni Zelanda Wairakei sahasının simülasyonunu yapmıştır.

İki fazlı sistemler için ilk distributed-parameter model çalışması Lasseter vd (1975) tarafından yapılmıştır. Bu model jeotermal rezervuar simülatörlerinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Bu çalışmada termodinamik eşitliklerin kullanılması bağımlı değişkenlerin sayısını azaltmış ve model çalışmalarına önemli katkısı olmuştur. Modelde bağımlı değişken olarak suyun yoğunluğu ve iç enerjisi, sayısal çözüm için de sonlu farklar metodu kullanılmıştır.

Mercer ve Faust (1975) hem su hem de buhar egemen sistemler için iki boyutlu bir distributed-parameter model sunmuşlardır. Sunulan modelde, ısı ve sıcak su, sıcak su buhar karışımı ve buhar akımının simülasyonu yapılmıştır. Bağımlı değişken olarak entalpi ve basınç değerleri, sayısal çözüm için de sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

Toronyi ve Farouq Ali (1977) porozite, permeabilite, başlangıç basıncı, su fazı doygunluğunun üretim üzerindeki etkilerini araştırmak için bir iki boyutlu model sunmuşlardır. Modelin sayısal çözümü sonlu farklar metodu ile yapılmıştır. Modelde bağımlı değişken olarak su fazı doygunluğu ile basınç parametreleri kullanılmıştır.

Filiz (1982) Ege Bölgesi'ndeki önemli jeotermal alanların her birini ortamın izotoplarından olan Oksijen-18 (O^{18}), Döteryum (H^2), Tritiyum (H^3), Karbon-13 (C^{13}) teknikleriyle araştırmıştır. Araştırmacı uyguladığı bu izotop tekniklerinden Tritiyum ile Kızıldere jeotermal rezervuarındaki akışkanın en az 50 yaşında olduğunu tespit etmiştir. Aynı araştırmacı uyguladığı izotop tekniklerinden Oksijen-18 ile de Kızıldere jeotermal rezervuarındaki suların tamamen meteorik kökenli olduğunu tespit etmiştir.

Karahanoğlu (1983) deplasman, boşluk basıncı ve sıcaklık gibi bilinmeyen değişkenler ile elasto-plastik gerilme-birim uzama ilişkisini kullanarak jeotermal rezervuarlar için tümüyle eşlendirilmiş sonlu elemanlar modeli sunmuştur. Karahanoğlu'nun sunmuş olduğu matematiksel model, denge, sıvı akımı ve enerji akımı denklemlerini kullanarak gözenekli ortamda eş zamanlı tasman, kütle akımı ve ısı akımı mekanizmalarını birleştirmektedir. Model su egemen sistemler için geliştirilmiş olup, modelin sayısal çözümünde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır.

Serpen (2000) çalışmasında, Denizli Kızıldere jeotermal sahasının teknik ve teknik olmayan sorunlarını inceleyerek stokastik yöntemle rezervuarın potansiyelini tahmin etmeye çalışmıştır. Araştırmacı çalışmasında rezervuar kayacı ve akışkana ait parametrelerin tümüne yakınının yeraltı ile ilgili olduğunu göz önüne alarak bu parametrelere ait belirsizliklerin yaratacağı hataları minimuma indirebilmek amacıyla stokastik bir çalışma yapmış ve Monte Carlo simülasyonunu uygulamıştır.

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bir jeotermal rezervuarın analizi ne kadar iyi yapılırsa üretim kapasitesi ve ömrü de o kadar uzun olur. Jeotermal rezervuarın üretim ve beslenme şekli rezervuarın en önemli

unsurlarındandır. Bu nedenle rezervuardan yapılacak üretim politikasının iyi belirlenmesi ve sürekli denetlenmesi gerekir.

Bu nedenle, sıcak su egemen jeotermal rezervuarların zamana bağlı performanslarını belirlemek üzere iki boyutlu (alansal) enerji ve kütle transferi kısmi diferansiyel denklemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü için gerekli formülasyonu elde etmek ve bu formülasyon doğrultusunda bir bilgisayar programı geliştirerek ülkemizin en büyük jeotermal sahalarından biri olan Denizli-Kızıldere jeotermal sahasının çeşitli üretim senaryolarına göre simülasyonunu yapmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada Mercer ve Faust (1975) tarafından önerilen model esas alınmıştır. Bu model kütle korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu prensiplerinden hareketle sıcak su egemen jeotermal rezervuarlardaki enerji ve kütle transferi için iki adet kısmi diferansiyel denklemden oluşan bir matematik model dir. Bu matematik modeli oluşturan kısmi diferansiyel denklemleri analitik olarak çözmek mümkün değildir. Bu nedenle, bu matematik modeli kullanarak bir jeotermal rezervuarın simülasyonunu yapabilmek için modeli oluşturan kısmi diferansiyel denklemlerin herhangi bir sayısal çözüm yöntemi ile çözülmesi gerekmektedir. Kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde en çok kullanılan sayısal yöntemler ise sonlu farklar yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm uzayı daha iyi tarif edilebilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, sıcak su egemen jeotermal rezervuarlardaki enerji ve kütle transferinin matematik modelini oluşturan iki adet kısmi diferansiyel denklemin sayısal çözümünde sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiştir.

Sayısal çözüm yöntemlerinin belli bir hataya sahip yaklaşımlar içerdiği ve matematikte de hataya karşı integral denklemlerin çözümünün diferansiyel denklemlerin çözümünden daha az duyarlı oldukları bilinmektedir. Bu nedenle, sıcak su egemen jeotermal rezervuarlardaki enerji ve kütle transferinin matematik modelini oluşturan iki adet kısmi diferansiyel denklemin eşdeğer integral denklemlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Enerji ve kütle transferi kısmi diferansiyel denklemlerinin integral formlarının nasıl elde edildiği 3.1 ve 3.2 alt başlıkları altında detaylı olarak anlatılmıştır.

Elde edilen bu integral denklemlerinin her birinin sonlu elemanlar modelinin nasıl oluşturulacağı, yani matris formunda nasıl yazılacakları 3.3 ve 3.4 alt başlıkları altında ayrıntılı olarak verilmiştir. Daha sonra kütle ve enerji transferi için elde edilen sonlu eleman modelleri birleştirilerek matris formunda tek bir adi diferansiyel denklem takımı haline getirilmiştir.

Bir jeotermal rezervuarın x-y düzleminle sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu yapılırken önce rezervuar alanının herhangi bir geometriye sahip sonlu sayıda elemana bölünmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Kızıldere jeotermal sahasının x-y düzlemindeki sonlu elemanlar ağı üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulmuş ve bu amaçla “Argus ONE Mesh Maker” programı kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar ağını oluşturan her bir eleman için yukarıdaki adi diferansiyel denklem takımındaki katsayılar matrisi elemanlarının hesaplanması ve bunların birleştirilmesinden meydana gelen sistem matrisinin oluşturulması için MATLAB altında çalışan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program genel olup her hangi bir sıcaklık egemen jeotermal rezervuarın simülasyonu yapılabilir.

Bir jeotermal rezervuarın çeşitli üretim senaryolarına göre simülasyonuna başlamadan önce o jeotermal rezervuara ait bir takım bilgilere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada jeotermal rezervuardaki sıcaklık dağılımı, rezervuarda açılmış olan kuyulardaki yığılımlı üretimin ve basıncın zaman içerisindeki değişimi hakkında bilgiye ihtiyaç duyulmuştur. Jeotermal rezervuara ait elde edilen basınç ve sıcaklık verileri yardımıyla rezervuardaki akışkanın entalpisi, yoğunluğu ve viskozitesi bulunabilir. Daha önce yer bilimciler tarafından yapılmış olan çalışmalardan yararlanılarak jeotermal rezervuarın geometrisi, beslenme şekli, fayların yerleri ve rezervuarın jeolojik ve hidrojeolojik sınırları belirlenebilir. Ayrıca jeotermal rezervuarın kalınlığı, porozitesi ve permeabilitesi gibi özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Ancak bunların doğrudan belirlenmesi mümkün değildir. Jeotermal kuyularda yapılan basınç yükselme testleri sonucunda bu parametreler hakkında ön bir bilgi edinilebilir. Jeotermal rezervuarın doğrudan belirlenemeyen özelliklerini belirleme işlemi bir nevi optimizasyon problemidir. Kızıldere jeotermal rezervuarının doğrudan

belirlenemeyen parametreleri olan kalınlığı, porozitesi ve permeabilitesi “history matching” ile, yani rezervuardaki kuyulardan elde edilen basınç ve akışkan üretiminin zamanla değişimi dataları kullanılarak optimize edilmiştir. Datalar MTA, TEK ve literatürdeki değişik kaynaklardan alınmıştır.

Böylece Kızıldere jeotermal rezervuarına ait bütün parametreler belirlendikten sonra rezervuarın şu anki ortalama üretimi olan 670 t/h akışkanı üreten 8 adet kuyudan her birinin ayrı ayrı bu üretimlerini daha ne kadar süre devam ettirebilecekleri, yani bu kuyuların kuyu dibi basınçlarının doygunluk basıncı olan 20 bar’a ne zaman düşeceği belirlenmiştir. Şu anki üretiminin devam ettirilmesi durumunda rezervuarın ömrünün yaklaşık 103.3 yıl olacağı tespit edilmiştir.

Kızıldere jeotermal sahasındaki 8 adet üretim kuyusunun hepsinin derinlikleri aynı olmadığı için kuyu dibi basınçları da farklı olmaktadır. Boyutsuz modellerle sadece ortalama rezervuar basıncı göz önüne alınabilirken kullanılan iki boyutlu distributed-parameter model sayesinde üretim kuyularının her birini ayrı ayrı değerlendirmek mümkün olmuştur.

Toplam jeotermal akışkan üretiminin sırasıyla 870 t/h, 1000 t/h, 1305 t/h, 1500 t/h ve 1740 t/h değerlerine çıkarılması durumunda ortalama rezervuar ömrü ve bu üretimlerin gerçekleştirildiği 8 adet kuyunun ömürleri ile üretilebilecek toplam akışkan miktarları ayrı ayrı belirlenmiştir. Örneğin, boyutsuz modellerle hangi kuyunun ömrünün kaç yıl olacağı belirlenemezken bu çalışmada KD15 kuyusunun ömrünün rezervuardaki toplam üretim debisinin 670 t/h olması durumunda yaklaşık 38.1 yıl olacağı belirlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Tabiat kanunlarının temeli nedensellik prensibidir. Diğer bir deyimle tabiat kanunları nedensellik prensibi esas alınarak ifade edilir. Fizikçi olan antik çağdaki filozoflar nedensellik prensibini sayılar arasındaki belli ilişkiler, örneğin oranlar yardımıyla ifade etmeye çalışmışlar ve bu esasa dayanan tek bir tabiat kanunu ile bütün tabiat olaylarını formüle edebileceklerini düşünmüşlerdir.

Daha sonraki fizikçilerden Galileo ve Newton ise bir tabiat olayının bütün safhaları arasındaki ilişkiyi doğrudan doğruya tesis etmek yerine sadece tabiat olayının bir safhası ile diğer bir safhası arasındaki ilişkiyi tespit etmeye çalışmışlardır. Yani belli bir halin kısa bir zaman sonra ne hale geleceğini yada belli bir zerrenin çok yakınındaki zerrelere nasıl tesir edeceğini ifade etmişlerdir.

Bu şekilde ifade edilen bir tabiat kanunu, olayın bir safhası ile zaman ve mekan bakımından bu safhanın ardından gelen safha arasındaki bağıntıyı belirler. Bu nedenle bu şekilde ifade edilen bir tabiat kanunu nedensellik prensibinin özel bir halini ifade eder.

Bu metoda göre tanımlanan bir tabiat kanunu, zamanı, uzayı ve olayı karakterize eden büyüklüklerin sonsuz küçük değişimlerinden meydana gelen terimlerle ifade edilebilir. Bu terimler genellikle olayı karakterize eden değişkenlerin değişmesinin zaman ve uzayı karakterize eden değişkenlerin değişmesine oranı olarak, matematiksel bir deyimle türev olarak ifade edilirler.

Fiziksel bir olayı temsil eden diferansiyel denklemin başlangıç ve sınır şartları olarak adlandırılan;

- İncelenen fizik olayının geometrisini,
- Olaya tesir eden bütün fiziksel katsayı ve parametreleri,
- Başlangıçtaki durum

- İncelenen olayın bu olayı çevreleyen olaylarla ilişkilerini

içermesi gerekir. Gene bir diferansiyel denklemin bir fiziksel olayın matematik modellenmesinde kullanılabilmesi için;

- Denklemin çözümü mevcut olmalıdır.
- Denklemin çözümü tek olmalıdır.
- Denklemin çözümü stabil olmalıdır.

şartlarının sağlanması gerekir (Omay 1977).

Yukarıdaki bakış açısı altında fiziksel olayları temsil eden diferansiyel denklemlerin çoğu zaman bire bir ortaya koyulması mümkün olmaz. Bu yüzden birçok halde gerçeğe uygun bir takım varsayımların yapılmasını gerekir. Çalışmada incelenen konu için yapılan varsayımlar ve yukarıda söz konusu edilen şartlar yeri geldiğinde irdelenmiş ve belli bir başlık altında verilmemiştir.

2.1. Matematik Model

Bu çalışmada, matematik model olarak, Mercer ve Faust (1975) tarafından geliştirilen ve jeotermal rezervuarlardaki ısı ve akışkan akımının karakteristiklerinin benzeşimini sağlayan ve kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumu prensiplerini esas alan “distributed-parameter” model kullanılmıştır.

2.1.1. Kütle, Enerji Transferi Denklemlerinin Türetilmesi

Kütlenin korunumu prensibinden hareketle, rezervuardaki akışkan için kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir (Mercer and Faust (1975)).

$$b \frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + b \nabla(\rho \bar{v}) - bq' = 0 \quad (2.1)$$

2. KURAMSAL TEMELLER

Tabiat kanunlarının temeli nedensellik prensibidir. Diğer bir deyimle tabiat kanunları nedensellik prensibi esas alınarak ifade edilir. Fizikçi olan antik çağdaki filozoflar nedensellik prensibini sayılar arasındaki belli ilişkiler, örneğin oranlar yardımıyla ifade etmeye çalışmışlar ve bu esasa dayanan tek bir tabiat kanunu ile bütün tabiat olaylarını formüle edebileceklerini düşünmüşlerdir.

Daha sonraki fizikçilerden Galileo ve Newton ise bir tabiat olayının bütün safhaları arasındaki ilişkiyi doğrudan doğruya tesis etmek yerine sadece tabiat olayının bir safhası ile diğer bir safhası arasındaki ilişkiyi tespit etmeye çalışmışlardır. Yani belli bir halin kısa bir zaman sonra ne hale geleceğini yada belli bir zerrenin çok yakınındaki zerrelere nasıl tesir edeceğini ifade etmişlerdir.

Bu şekilde ifade edilen bir tabiat kanunu, olayın bir safhası ile zaman ve mekan bakımından bu safhanın ardından gelen safha arasındaki bağıntıyı belirler. Bu nedenle bu şekilde ifade edilen bir tabiat kanunu nedensellik prensibinin özel bir halini ifade eder.

Bu metoda göre tanımlanan bir tabiat kanunu, zamanı, uzayı ve olayı karakterize eden büyüklüklerin sonsuz küçük değişimlerinden meydana gelen terimlerle ifade edilebilir. Bu terimler genellikle olayı karakterize eden değişkenlerin değişmesinin zaman ve uzayı karakterize eden değişkenlerin değişmesine oranı olarak, matematiksel bir deyimle türev olarak ifade edilirler.

Fiziksel bir olayı temsil eden diferansiyel denklemin başlangıç ve sınır şartları olarak adlandırılan;

- İncelenen fizik olayının geometrisini,
- Olaya tesir eden bütün fiziksel katsayı ve parametreleri,
- Başlangıçtaki durum

Burada,

ϕ - porozite

ρ - rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın yoğunluğu

b - rezervuar kalınlığı

$\bar{v}$ - rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın ortalama hızı

q' - rezervuardan çekilen sıvı fazdaki akışkanın kütlesi

Bu denklemdeki Del operatörü (∇) sadece yatay düzlemde, x ve y , tanımlanmıştır. Yine bu denklem, üç boyutlu kütle denge denkleminin rezervuar kalınlığı üzerinde düşey integrasyonu sonucu elde edilmiştir. Rezervuarın alt ve üst kısımlarının yatay olduğu kabul edilmiştir.

Gözenekli ortamdaki akışkan akımı için momentum dengesi aşağıdaki şekilde yazılabilir (Mercer and Faust (1975)).

$$\bar{v} = -\frac{\bar{k}}{\mu} \nabla p \quad (2.2)$$

Burada,

$\bar{k}$ - lokal iç iletkenlik (intrinsic permeability) tensörü

μ - rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın dinamik viskozitesi

p - rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın basıncı

Bu denklemde de yine Del operatörü sadece yatay düzlemde tanımlanarak yerçekiminin etkisi ihmal edilmiştir.

Su- kaya sistemi için termal enerji denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir (Mercer and Faust (1975)).

$$b \frac{\partial(\phi \rho U)}{\partial t} + b \nabla(\rho U \bar{v}) + b \nabla \bar{\lambda} + b \nabla \bar{v} + b q' U' = 0 \quad (2.3)$$

$$b \frac{\partial[(1-\phi) \rho_r U_r]}{\partial t} + b \nabla \bar{\lambda}_r = 0 \quad (2.4)$$

Burada,

U - rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın birim kütlesinin iç enerjisi

U_r - rezervuar kayasının birim kütlesinin iç enerjisi

ρ_r - rezervuar kayasının yoğunluğu

$\bar{\lambda}$ - rezervuardaki sıvı fazdaki akışkandan dispersiyon ile olan ısı akımı

$\bar{\lambda}_r$ - rezervuar kayasından kondüksiyon ile olan ısı akımı

2.2. Gözenekli Ortamdaki Akışkan Ve Isı Akımı İle İlgili Yapılan Kabuller

Gözenekli ortamdaki akışkanın akımı son derece yavaş olduğu için sistemin termal dengede olduğu kabul edilebilir. Bu nedenle su ve kaya için kondüksiyon/dispersiyon terimi birleştirilerek ortamın kondüksiyon/dispersiyon terimi aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Mercer and Faust (1975)).

$$\bar{\lambda}_m = -\bar{K}_m \nabla T \quad (2.5)$$

Burada,

$\bar{K}_m$ - ortamın termal dispersiyon tensörü

T - sıcaklık

Mercer (1973), ortamın termal dispersiyonunu; kayadaki kondüksiyon, sıvıdaki difzyon ve sıvıdaki hıza bağlı dispersiyon olarak üçe ayırmaktadır. Somerton *et al.* (1974) ortamın termal kondaktivitesinin sıcaklık ve porozitenin fonksiyonu olduğunu

belirtmiştir (Mercer and Faust (1975). Bu çalışmada bu etkiler ihmal edilerek aşağıdaki kabul yapılmıştır.

$$\overline{K_m} = K_m(x, y) \quad (2.6)$$

Termal denge ve dispersiyon ile ilgili yapılan kabullerin yardımı ile (2.3) ve (2.4) denklemleri aşağıdaki şekilde birleştirilebilir.

$$b \frac{\partial}{\partial t} [\phi \rho h + (1 - \phi) \rho_r h_r] + b \nabla(\rho h \bar{v}) - b K_m \nabla^2 T - b q' h' = 0 \quad (2.7)$$

Burada,

h ve h_r sırası ile rezervuardaki sıvı fazdaki akışkanın ve rezervuar kayasının entalpileridir.

Sonuç diferansiyel denklemlerin yazılabilmesi için bilinmeyenler olarak iki tane bağımlı değişken belirlenmeli ve diğer bağımlı değişkenler bu iki bilinmeyen fonksiyonu şeklinde ifade edilmelidirler. Seçilecek bu iki bilinmeyen kendi başına sistemin termodinamik durumunu ifade etmelidir. Yine bu iki parametrenin arazi şartlarında elde edilebilir olması gerekir. Bu nedenlerden dolayı entalpi (h) ve basınç (p) bilinmeyenler olarak seçilebilir.

(2.1) denkleminin ilk terimine zincir kuralı uygulanarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial(\phi \rho)}{\partial t} = \rho \frac{\partial \phi}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \frac{\partial h}{\partial t} \right] \quad (2.8)$$

(2.2) denklemi (2.3) ve (2.7) denklemlerinde yerine konulup (2.8) denklemi ile birleştirilerek akışkan (kütle) taşınımı için aşağıdaki (2.9) ve ısı (enerji) taşınımı için (2.10) diferansiyel denklemleri elde edilir.

$$b \left[\rho \frac{d\phi}{dp} + \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \right] \frac{\partial p}{\partial t} + b \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \frac{\partial h}{\partial t} - b \nabla \left(\frac{\rho k}{\mu} \nabla p \right) - b q' = 0 \quad (2.9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & b \left[(\rho_h - \rho_r h_r) \frac{d\phi}{dp} + \phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right] \frac{\partial p}{\partial t} \\ & + b \left[\phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p + \phi \rho \right] \frac{\partial h}{\partial t} - b \nabla \frac{\rho h k}{\mu} \nabla p \\ & - b \nabla \left\{ K_m \left[\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \nabla p + \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \nabla h \right] \right\} - b q' h' = 0 \end{aligned} \right. \quad (2.10)$$

2.3. Diferansiyel Denklemlerdeki Parametreler İçin Temel Bağlılıklar

(2.9) ve (2.10) denklemlerini h ve p bağımlı değişkenlerine göre elde etmek için aşağıdaki kabuller yapılabilir (Mercer and Faust (1975)).

- Porozite basıncın fonksiyonudur ve aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$\phi = \phi_i(x, y) [1 + \beta(p - p_i)] \quad (2.11)$$

Burada,

$\phi_i(x, y)$ - başlangıçtaki porozite dağılımı

p_i - başlangıçtaki basınç dağılımı

β - rezervuar kayasının düşey yöndeki sıkışabilirliği

(2.11) denkleminin p'ye göre türevi alınarak aşağıdaki (2.13) denklemi elde edilir.

$$\frac{d\phi}{dp} = \phi_i \beta \quad (2.12)$$

- Rezervuar kayasının entalpisi rezervuar sıcaklığının fonksiyonudur.

$$\partial h_r = \left(\frac{dh_r}{dT} \right)_p dT = c_p dT \quad (2.13)$$

Dew ve Martin (1965) c_p için aşağıdaki (2.14) nolu ampirik denklemi vermektedir (Mercer and Faust (1975)).

$$c_p = \frac{T + 2000}{10000} + \frac{\Delta T}{20000} \quad (2.14)$$

Burada,

c_p - rezervuar kayasının ısı kapasitesi (Btu/lb-°F)

T - sıcaklık (°F)

(2.14) denklemi cgs birim sistemine göre modifiye edilip (2.13) denkleminde yerine konulursa aşağıdaki (2.15) denklemi elde edilir.

$$h_r = 2.040615 \times 10^9 + 8.498886 \times 10^6 T + 3.76427 \times 10^3 T^2 \quad (2.15)$$

Burada,

h_r - rezervuar kayasının entalpisi (ergs/g)

T - sıcaklık (°C)

- Dinamik viskozite sıcaklığın fonksiyonudur. Meyer *et al.* (1967) dinamik viskozite için aşağıdaki ampirik formülü vermişlerdir (Mercer and Faust (1975).

$$\mu = 10^{-6} \left\{ 241.4 \times 10^{\left[\frac{247.8}{T+133.15} \right]} \right\} \quad (2.16)$$

Burada;

μ : akışkanın dinamik viskozitesi (g/cm-sec)

T : sıcaklık (°C)

Denklem (2.16) akışkan sıcaklığının 0°C ile 300°C arasında olması halinde geçerlidir.

- Akışkan entalpisi basıncın fonksiyonudur

$$h = 1 \times 10^7 \left(809.674 + 94.4665 \times pp - 4.50247 pp^2 + 0.120265 pp^3 \right. \\ \left. - 162.7 / pp + 29.8163 / pp^2 - 1.75263 / pp^3 \right) \quad (2.17)$$

- Jeotermal rezervuardaki akışkanın sıcaklığı basınç ve entalpinin fonksiyonudur.

$$T = -28.1515 - 0.137458 pp + 0.301117 hh + 3536.37 / hh - 4.31919 \times 10^{-5} hh^2 \quad (2.18)$$

- Jeotermal rezervuardaki akışkanın yoğunluğu basınç ve entalpinin fonksiyonudur.

$$\rho = 0.989875 + 4.00984 \times 10^{-4} pp - 4.00489 \times 10^{-5} hh + 2.66608 / hh \\ + 5.46283 \times 10^{-7} pphh - 1.29958 \times 10^{-7} hh^2 \quad (2.19)$$

Yukarıdaki denklem (2.17), (2.18) ve (2.19) deki pp ve hh aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\left. \begin{array}{l} pp = p/10^7 \\ hh = h/10^7 \end{array} \right\} \quad (2.20)$$



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, önceki bölümde kuramsal temelleri verilen matematik modelin sayısal çözümünün sonlu elemanlar metodu ile nasıl yapılacağı anlatılacaktır. Daha sonra bu model kullanılarak simülasyonu yapılacak olan Denizli Kızıldere jeotermal sahası ile ilgili yerbilimi bilgileri özet olarak verilecektir.

Önceki bölümde elde edilen (2.9) ve (2.10) nolu kısmi diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri mümkün değildir. Bu nedenle, bu kısmi diferansiyel denklemlerinin çözümü için bir sayısal yöntem gerekmektedir. Sayısal yöntemler belli bir hataya sahip yaklaşımlar içermektedirler. Matematikte, hataya karşı integral denklemlerin çözümünün diferansiyel denklemlerin çözümünden daha az duyarlı oldukları bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, önce (2.9) ve (2.10) nolu kısmi diferansiyel denklemlerinin eşdeğer integral denklemleri elde edilmelidir. Elde edilen bu integral denklemlerin sayısal çözümleri, daha önce küçük elemanlara bölünmüş olan çalışma sahasının her bir elemanı üzerinde integrasyon işlemi gerçekleştirilerek, uzaysal terimler için sonlu elemanlar ve zamanla ilgili terimler için sonlu farklar metodu ile elde edilebilir.

Sonlu elemanlar metodu, diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde kullanılan bir yöntemdir. Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesinin sonlu sayıdaki birbirine bağlı elemanlardan oluştuğu kabul edilir. Genellikle üçgen, dikdörtgen ve dörtgen gibi basit geometrik şekillerden oluşan bu elemanlar daha sonra herhangi bir şekle sahip çözüm bölgesini tanımlamak için değişik yollarla bir araya getirilirler.

Sonlu elemanlar metodu;

- Yapı mühendisliğinde
- Zemin mekaniğinde; şevlerin gerilme analizinde, barajlarda ve tünellerde
- Hidrolikte; yeraltı suyu akımında, sürüntü maddelerinin taşınımında
- Elektrik mühendisliğinde; devre analizlerinde, manyetik potansiyel dağılımı gibi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır.

3.1. Kütle Transferi Denkleminin İntegral Formunun Oluşturulması

Diferansiyel denklemlerin integral formlarının elde edilmesi aşağıda takip edilecek olan üç adımda gerçekleştirilmektedir (Mercer *et al.* 1975, Pinder and Gray 1977, Zienkiewicz 1979, Zyvoloski 1983, Reddy 1984, Kwon and Bang 1997).

İlk adımda, (2.9) nolu kısmi diferansiyel denklemi, x ve y ye göre türevi alınabilen bir w şekil fonksiyonu ile çarpılır. Elde edilen ifadenin her eleman üzerinde (3.2) ile gösterilen integrali alınır.

$$\left. \begin{aligned} A &= b \left[\rho \frac{d\phi}{dp} + \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \right] \\ B &= b \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \\ C &= \frac{b \rho k}{\mu} \\ D &= b q' \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

olmak üzere;

$$0 = \int_{\Omega^e} w \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(C \frac{\partial p}{\partial y} \right) + A \frac{\partial p}{\partial t} + B \frac{\partial h}{\partial t} - D \right] dx dy \quad (3.2)$$

İkinci adımda, (3.2) denklemindeki ilk iki terimin Green formülü ile kısmi integrali alınarak aşağıdaki (3.3) ve (3.4) denklemleri elde edilir (Zienkiewicz 1979).

$$\int_{\Omega^e} w \frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx dy \equiv - \int_{\Omega^e} \frac{\partial w}{\partial x} \left(C \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx dy + \oint_{\Gamma^e} w \left(C \frac{\partial p}{\partial x} \right) n_x ds \quad (3.3)$$

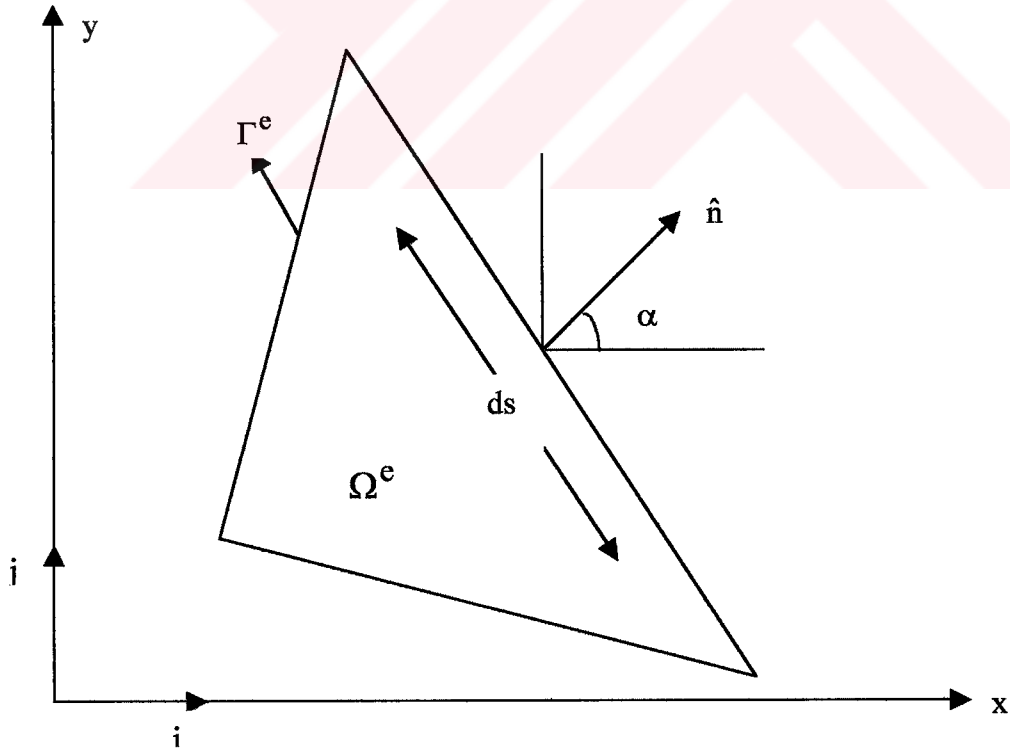
$$\int_{\Omega^e} w \frac{\partial}{\partial y} \left(C \frac{\partial p}{\partial y} \right) dx dy \equiv - \int_{\Omega^e} \frac{\partial w}{\partial y} \left(C \frac{\partial p}{\partial y} \right) dx dy + \oint_{\Gamma^e} w \left(C \frac{\partial p}{\partial y} \right) n_y ds \quad (3.4)$$

$$\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} = \cos \alpha \hat{i} + \sin \alpha \hat{j} \quad (3.5)$$

Burada;

n_x ve n_y : birim normal vektör $\hat{n}$ in x ve y yönündeki bileşenleri

ds : sonsuz küçük yay uzunluğu



Şekil 3.1. Tipik üçgen eleman: Ω^e eleman, Γ^e eleman sınırı, $\hat{n}$ eleman birim normali

(3.3) ve (3.4) denklemleri (3.2) denkleminde yerine konularak ve

$$q_n \equiv n_x \left(\frac{b\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + n_y \left(\frac{b\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (3.6)$$

olmak üzere aşağıdaki (3.7) denklemi elde edilir.

$$0 = \left\{ \int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial w}{\partial x} \left(\frac{b\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial w}{\partial y} \left(\frac{b\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + wb \left[\rho \frac{d\phi}{dp} + \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \right] \frac{\partial p}{\partial t} \right] dx dy \right. \\ \left. + wb \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \frac{\partial h}{\partial t} - wb q' \right. \\ \left. - \oint_{\Gamma^e} w \left[n_x \left(\frac{b\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + n_y \left(\frac{b\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \right] ds \right\} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki (3.6) denklemi ile tanımlanan q_n , genellikle fiziksel olarak bir anlama sahiptir. Örneğin, anizotropik bir ortamdaki ısı transferi probleminde q_n eleman sınırına dik ısı akışını gösterir.

3.2. Enerji Transferi Denkleminin İntegral Formunun Oluşturulması

Enerji transferi denkleminin integral formunun oluşturulmasında da aynen kütle transferi denkleminin integral formunun oluşturulmasında takip edilen adımlar takip edilecektir.

(2.10) nolu kısmi diferansiyel denklemi, x ve y ye göre türevi alınabilen bir w şekil fonksiyonu ile çarpılır. Elde edilen ifadenin her eleman üzerinde (3.9) ile gösterilen integrali alınır.

$$\begin{aligned}
A &= b \left[(\rho h - \rho_r h_r) \frac{d\phi}{dp} + \phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right] \\
B &= b \left[\phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p + \phi \rho \right] \\
C &= \frac{b \rho h k}{\mu} \\
D &= b K_m \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \\
E &= b K_m \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \\
F &= b q' h'
\end{aligned} \quad (3.8)$$

olmak üzere;

$$0 = \int_{\Omega^e} w \left[\begin{aligned} & -\frac{\partial}{\partial x} \left((C + D) \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left((C + D) \frac{\partial p}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ & -\frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial h}{\partial y} \right) + A \frac{\partial p}{\partial t} + B \frac{\partial h}{\partial t} - F \end{aligned} \right] dx dy \quad (3.9)$$

(3.9) denklemindeki ilk dört terimin Green formülü ile kısmi integrali alınarak aşağıdaki (3.10), (3.11), (3.12) ve (3.13) denklemleri elde edilir.

$$\int_{\Omega^e} w \frac{\partial}{\partial x} \left((C+D) \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx dy \equiv - \int_{\Omega^e} \frac{\partial w}{\partial x} \left((C+D) \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx dy + \oint_{\Gamma^e} w \left((C+D) \frac{\partial p}{\partial x} \right) n_x ds \quad (3.10)$$

$$\int_{\Omega^e} w \frac{\partial}{\partial y} \left((C+D) \frac{\partial p}{\partial y} \right) dx dy \equiv - \int_{\Omega^e} \frac{\partial w}{\partial y} \left((C+D) \frac{\partial p}{\partial y} \right) dx dy + \oint_{\Gamma^e} w \left((C+D) \frac{\partial p}{\partial y} \right) n_y ds \quad (3.11)$$

$$\int_{\Omega^e} w \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial h}{\partial x} \right) dx dy \equiv - \int_{\Omega^e} \frac{\partial w}{\partial x} \left(E \frac{\partial h}{\partial x} \right) dx dy + \oint_{\Gamma^e} w \left(E \frac{\partial h}{\partial x} \right) n_x ds \quad (3.12)$$

$$\int_{\Omega^e} w \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial h}{\partial y} \right) dx dy \equiv - \int_{\Omega^e} \frac{\partial w}{\partial y} \left(E \frac{\partial h}{\partial y} \right) dx dy + \oint_{\Gamma^e} w \left(E \frac{\partial h}{\partial y} \right) n_y ds \quad (3.13)$$

(3.10), (3.11), (3.12) ve (3.13) denklemleri (3.9) denkleminde yerine konularak ve

$$\left. \begin{aligned} q_{np} &\equiv n_x \left((C+D) \frac{\partial p}{\partial x} \right) + n_y \left((C+D) \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ q_{nh} &\equiv n_x \left(E \frac{\partial h}{\partial x} \right) + n_y \left(E \frac{\partial h}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\}$$

olmak üzere aşağıdaki (3.14) denklemi elde edilir.

$$0 = \left\{ \int_{\Omega^e} \left[\begin{aligned} & \frac{\partial w}{\partial x} \left(\left(\frac{b\rho h k}{\mu} + bK_m \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right. \\ & + \frac{\partial w}{\partial y} \left(\left(\frac{b\rho h k}{\mu} + bK_m \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right) \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial w}{\partial x} \left(bK_m \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial w}{\partial y} \left(bK_m \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ & + wb \left[(\rho h - \rho_r h_r) \frac{d\phi}{dp} + \phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right] \frac{\partial p}{\partial t} \\ & \left. + wb \left[\phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p + \phi \rho \right] \frac{\partial h}{\partial t} \right] dx dy \right\} \\ & - \int_{\Gamma^e} w q_{np} ds - \int_{\Gamma^e} w q_{nh} ds \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

3.3. Kütle Transferi Denkleminin Sonlu Elemanlar Modeli

(3.7) integral denklemindeki “p” ve “h” bağımlı değişkenleri için bir Ω^e sonlu elemanı üzerinde aşağıdaki şekilde bir yaklaşımın olduğunu kabul edelim (Reddy 1984).

$$\left. \begin{aligned} p(x, y, t) &\approx \sum_{j=1}^n p_j^e(t) \psi_j^e(x, y) \\ h(x, y, t) &\approx \sum_{j=1}^n h_j^e(t) \psi_j^e(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Burada;

p_j^e ve h_j^e : sırasıyla $p(x,y,t)$ ve $h(x,y,t)$ nin (x_j, y_j) koordinatında t zamanındaki değerleri,

ψ_j^e : Lagrange enterpolasyon fonksiyonudur.

(3.15) denklemi (3.7) denkleminde yerine konulduğunda aşağıdaki (3.16) denklemi elde edilir.

$$0 = \int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial w}{\partial x} \left(\frac{b\rho k}{\mu} \sum_{j=1}^n p_j \frac{\partial \psi_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial w}{\partial y} \left(\frac{b\rho k}{\mu} \sum_{j=1}^n p_j \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) + wb \left[\rho \frac{d\phi}{dp} + \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \right] \sum_{j=1}^n \psi_j \frac{\partial p_j}{\partial t} + wb \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \sum_{j=1}^n \psi_j \frac{\partial h_j}{\partial t} - wbq' \right] dx dy - \oint_{\Gamma^e} w q_n ds \quad (3.16)$$

n tane bilinmeyen $(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ veya $(h_1, h_2, h_3, \dots, h_n)$ çözülebilmesi için n tane birbirinden bağımsız cebirsel denkleme ihtiyacımız olduğu için n tane bağımsız $w : w = \psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n$ fonksiyon seçmelidir. $w = \psi_i$ olarak herhangi bir i 'inci sonlu elemana ait cebirsel denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$0 = \left\{ \begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \left\{ \int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \left(\frac{b \rho k}{\mu} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \left(\frac{b \rho k}{\mu} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \right] dx dy \right\} p_j \\ & + \int_{\Omega^e} \left\{ \psi_i b \left[\rho \frac{d\phi}{dp} + \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \right] \sum_{j=1}^n \psi_j \frac{\partial p_j}{\partial t} \right. \\ & \quad \left. + \psi_i b \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \sum_{j=1}^n \psi_j \frac{\partial h_j}{\partial t} - b q' \psi_i \right\} dx dy \\ & - \oint_{\Gamma^e} \psi_i q_n ds \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

(3.17) denklemi her bir eleman için matris formunda aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$[M_1]_{3 \times 3} \{p\}_3 + [N_1]_{3 \times 3} \{h\}_3 + [K_1]_{3 \times 3} \{p\}_3 = \{f_1\}_3 + \{Q_1\}_3 \quad (3.18)$$

(3.18) denklemindeki $[M_1]$, $[N_1]$, $[K_1]$, $\{f_1\}$ ve $\{Q_1\}$ matrislerinin herhangi bir ij elemanı

$$\left. \begin{aligned} M_{lij}^e &= \int_{\Omega^e} b \left[\rho \frac{d\phi}{dp} + \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \right] \psi_i \psi_j dx dy, \quad N_{lij}^e = \int_{\Omega^e} b \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \psi_i \psi_j dx dy \\ K_{lij}^e &= \int_{\Omega^e} \frac{b \rho k}{\mu} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) dx dy \\ f_{lij}^e &= \int_{\Omega^e} b q' \psi_i dx dy, \quad Q_{lij}^e = \oint_{\Gamma^e} q_n \psi_i ds \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

şeklinde elde edilir.

3.4. Enerji Transferi Denkleminin Sonlu Elemanlar Modeli

Aşağıda kütle transferi denkleminin sonlu elemanlar modelinin elde edilmesinde izlenen yol takip edilerek (3.14) denkleminin sonlu elemanlar modeli oluşturulacaktır.

$$0 = \int_{\Omega^e} \left[\begin{aligned} & \frac{\partial w}{\partial x} \left(\left(\frac{bphk}{\mu} + bK_m \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right) \sum_{j=1}^n p_j \frac{\partial \psi_j}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial w}{\partial y} \left(\left(\frac{bphk}{\mu} + bK_m \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right) \sum_{j=1}^n p_j \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial w}{\partial x} \left(bK_m \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \sum_{j=1}^n h_j \frac{\partial \psi_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial w}{\partial y} \left(bK_m \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \sum_{j=1}^n h_j \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \end{aligned} \right] dx dy \quad (3.20)$$

$$+ wb \left[\begin{aligned} & \left(\rho h - \rho_r h_r \right) \frac{d\phi}{dp} + \phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \sum_{j=1}^n \psi_j \frac{\partial p_j}{\partial t} \\ & + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \end{aligned} \right]$$

$$+ wb \left[\phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p + \phi \rho \sum_{j=1}^n \psi_j \frac{\partial h_j}{\partial t} - wbq'h' \right]$$

$$- \oint_{\Gamma^e} wq_{np} ds - \oint_{\Gamma^e} wq_{nh} ds$$

$$0 = \left\{ \begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \left[\int_{\Omega^e} \left[\left(\frac{b p k}{\mu} + b K_m \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial p} \right)_h \right) \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \right] dx dy \right] p_j \\ & + \sum_{j=1}^n \left[\int_{\Omega^e} \left[b K_m \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial h} \right)_p \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \right] dx dy \right] h_j \\ & + \int_{\Omega^e} \left[\psi_i b \left[(\rho_h - \rho_r h_r) \frac{d\phi}{dp} + \phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial p} \right)_h \right] \sum_{j=1}^n \psi_j \frac{\partial p_j}{\partial t} \right. \\ & \quad \left. + \psi_i b \left[\phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial h} \right)_p + \phi \rho \sum_{j=1}^n \psi_j \frac{\partial h_j}{\partial t} - b q' h' \psi_i \right] \right] dx dy \\ & - \oint_{\Gamma^e} \psi_i q_{np} ds - \oint_{\Gamma^e} \psi_i q_{nh} ds \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Yukarıdaki (3.21) denklemi her bir eleman için matris formunda aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$[M_2]_{3 \times 3} \{\dot{p}\}_{3 \times 1} + [N_2]_{3 \times 3} \{\dot{h}\}_{3 \times 1} + [K_2]_{3 \times 3} \{p\}_{3 \times 1} + [L]_{3 \times 3} \{h\}_{3 \times 1} = \{f_2\}_{3 \times 1} + \{Q_2\}_{3 \times 1} \quad (3.22)$$

Burada;

$$\left. \begin{aligned}
M_{2ij}^e &= \int_{\Omega^e} b \left[(\rho h - \rho_r h_r) \frac{d\phi}{dp} + \phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \right] \psi_i \psi_j dx dy \\
N_{2ij}^e &= \int_{\Omega^e} b \left[\phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p + \phi \rho \right] \psi_i \psi_j dx dy \\
K_{2ij}^e &= \int_{\Omega^e} \left[\left(\frac{b \rho h k}{\mu} + b K_m \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right) \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \right] dx dy \\
L_{ij}^e &= \int_{\Omega^e} \left[\left(b K_m \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \right) \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \right] dx dy \\
f_{2i}^e &= \int_{\Omega^e} b q' h' \psi_i dx dy \\
Q_{2i}^e &= \oint_{\Gamma^e} \psi_i q_{np} ds + \oint_{\Gamma^e} \psi_i q_{nh} ds
\end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

(3.18) ve (3.22) denklemleri birleştirildiğinde elde edilen (3.24) diferansiyel denklem takımının çözümünden p ve h bilinmeyenleri elde edilebilir.

$$[A] \left\{ \begin{array}{c} \frac{dp}{dt} \\ \frac{dh}{dt} \end{array} \right\} + [B] \left\{ \begin{array}{c} p \\ h \end{array} \right\} + \{C\} = 0 \quad (3.24)$$

Burada;

$[A]$ matrisinin elemanları;

$$\left. \begin{aligned}
A_{(2i),(2j-1)}^e &= \int_{\Omega^e} b \left[(\rho h - \rho_r h_r) \frac{d\phi}{dp} + \phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right] \psi_i \psi_j dx dy \\
A_{(2i-1),(2j-1)}^e &= \int_{\Omega^e} b \left[\rho \frac{d\phi}{dp} + \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h \right] \psi_i \psi_j dx dy \\
A_{(2i),(2j)}^e &= \int_{\Omega^e} b \left[\phi h \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p + (1 - \phi) \rho_r c_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p + \phi \rho \right] \psi_i \psi_j dx dy \\
A_{(2i-1),(2j)}^e &= \int_{\Omega^e} b \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \psi_i \psi_j dx dy
\end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

[B] matrisinin elemanlar;

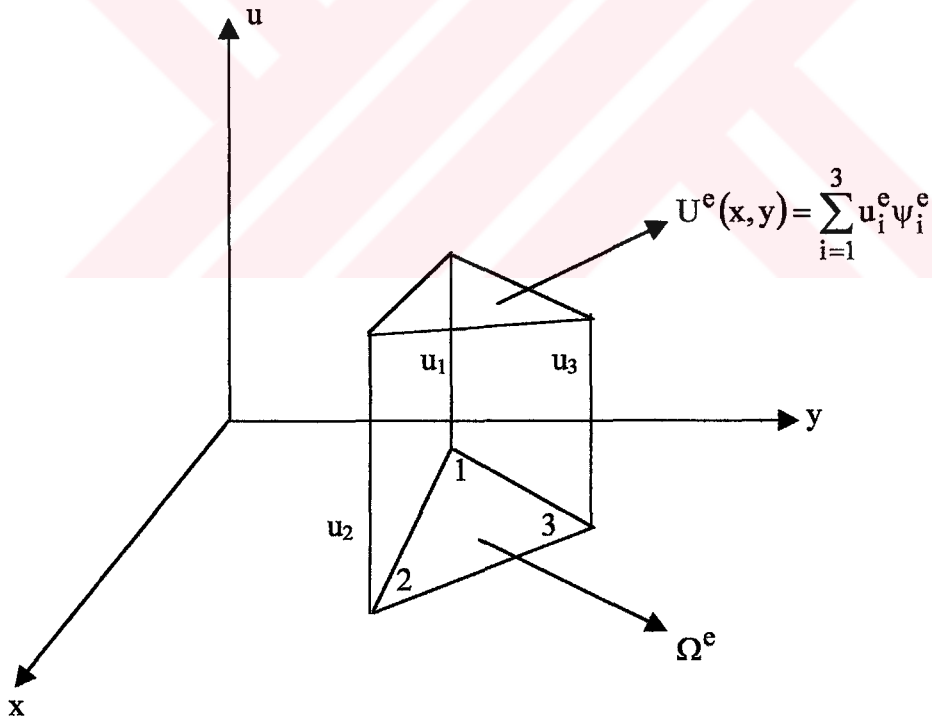
$$\left. \begin{aligned}
B_{(2i-1),(2j-1)}^e &= \int_{\Omega^e} \frac{b \rho k}{\mu} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) dx dy \\
B_{(2i-1),(2j)}^e &= 0 \\
B_{(2i),(2j-1)}^e &= \int_{\Omega^e} \left[\left(\frac{b \rho h k}{\mu} + b K_m \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right) \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \right] dx dy \\
B_{(2i),(2j)}^e &= \int_{\Omega^e} \left[b K_m \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right) \right] dx dy
\end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

{C} vektörünün elemanları;

$$\left. \begin{aligned} C_{(2i-1)}^e &= - \int_{\Omega^e} b q_w' \psi_i dx dy - \oint_{\Gamma^e} q_n \psi_i ds \\ C_{(2i)}^e &= - \int_{\Omega^e} b q_h' \psi_i dx dy - \oint_{\Gamma^e} q_{np} \psi_i ds - \oint_{\Gamma^e} q_{nh} \psi_i ds \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

3.5. Enterpolasyon Fonksiyonu

Bu çalışmada, sonlu elemanlar ağında kullanılan elemanlar lineer üçgen eleman olarak seçilmiştir. Bu nedenle aşağıda lineer üçgen eleman için enterpolasyon fonksiyonu ψ^e nin nasıl elde edileceği anlatılmıştır.



Şekil 3.2. Üçgen lineer eleman için enterpolasyon fonksiyonu

Ω^e elemanı üzerindeki herhangi bir (x, y) noktasındaki sonlu eleman çözümü $U^e(x, y)$, x ve y nin lineer fonksiyonu şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U^e(x, y) = c_1 + c_2x + c_3y = \{1, x, y\} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

(3.28) denklemi herhangi bir i düğüm noktası için yazılırsa ($i = 1, 2, 3$)

$$U^e(x_i^e, y_i^e) = u_i^e \quad (3.29)$$

şeklini alır. Buradan hareketle c_i katsayıları bulunabilir. (3.29) denklemi her bir düğüm noktası için düğüm noktası koordinatları kullanılarak yazılırsa;

$$\left. \begin{aligned} u_1 &\equiv u(x_1, y_1) = c_1 + c_2x_1 + c_3y_1 \\ u_2 &\equiv u(x_2, y_2) = c_1 + c_2x_2 + c_3y_2 \\ u_3 &\equiv u(x_3, y_3) = c_1 + c_2x_3 + c_3y_3 \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

elde edilir. (3.30) denklemi matris formunda düzenlenirse;

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 2 & x_2 & y_2 \\ 3 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{Bmatrix} \quad (3.31)$$

elde edilir.

(3.31) denkleminde c_i ($i = 1, 2, 3$) katsayılarının çözülebilmesi için bu denklemdeki katsayılar matrisinin tersinin alınabilmesi gerekir. Katsayılar matrisinin tersinin olabilmesi için bu matristeki herhangi iki satır veya sütunun aynı olmaması gerekir.

Katsayılar matrisindeki iki satır veya sütunun aynı olması eleman üzerindeki üç noktanın da aynı doğru üzerinde olması veya üç noktadan ikisinin birbirine çok yakın olması durumunda gerçekleşir. Bu nedenle sonlu eleman ağı oluşturulurken üçgen elemanın en küçük açısının 22.5° den az olmaması tavsiye olunmaktadır (Reddy 1984).

(3.31) denklemindeki katsayılar matrisinin tersini aldığımızda;

$$[A^e]^{-1} = \frac{1}{2A^e} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

bulunur.

$$\left. \begin{aligned} 2A^e &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \\ \alpha_i &= x_j y_k - x_k y_j \\ \beta_i &= y_j - y_k \\ \gamma_i &= -(x_j - x_k) \end{aligned} \right\} \quad (i \neq j \neq k) \quad (3.33)$$

$$\{c\} = [A^e]^{-1} \{u^e\} \quad (3.34)$$

eşitliğinden hareketle c_i katsayıları;

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{2A^e}(\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \alpha_3 u_3) \\ c_2 &= \frac{1}{2A^e}(\beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 + \beta_3 u_3) \\ c_3 &= \frac{1}{2A^e}(\gamma_1 u_1 + \gamma_2 u_2 + \gamma_3 u_3) \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

olarak elde edilir.

Burada;

A^e : üçgen elemanın alanı

$2A^e$: katsayılar matrisinin determinanı

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$: geometrik sabitler olup aşağıdaki şekilde tanımlanmışlardır.

(3.35) denkleminde elde edilen c_i katsayıları (3.28) denkleminde yerine konulursa Ω^e elemanı üzerindeki herhangi bir (x,y) noktasındaki sonlu eleman çözümü;

$$\left. \begin{aligned} U^e(x,y) &= \frac{1}{2A^e} \left[\begin{aligned} &(\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \alpha_3 u_3) + (\beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 + \beta_3 u_3)x \\ &+ (\gamma_1 u_1 + \gamma_2 u_2 + \gamma_3 u_3)y \end{aligned} \right] \\ &= \sum_{i=1}^3 u_i^e \psi_i^e(x,y) \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

şeklinde elde edilir.

Buradan ψ_i^e üçgen eleman lineer enterpolasyon fonksiyonu;

$$\psi_i^e = \frac{1}{2A^e} (\alpha_i^e + \beta_i^e x + \gamma_i^e y) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.37)$$

şeklinde yazılabilir. Bu lineer enterpolasyon fonksiyonu (3.38) ile verilen özelliklere sahiptir.

$$\sum_{i=1}^3 \psi_i^e = 1, \quad \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \psi_i^e}{\partial x} = 0, \quad \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \psi_i^e}{\partial y} = 0, \quad (3.38)$$

3.6. Zamana Bağlı Terimlerin Türevlerinin Elde Edilmesi

(3.18) ve (3.22) denklemleri ile bu denklemlerin birleştirilmiş formu olan (3.24) denklemi birinci dereceden adi diferansiyel denklem sistemleridir. Seçilen başlangıç ve sınır şartlarına göre denklem sistemini çözebilmek için zamana bağlı terimlerin türevlerinin sonlu farklar yöntemi ile alınması gerekir. (3.24) denklemi sonlu farklar metodu ile aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{[A]}{\Delta t} \left(\begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} - \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t \right) + [B] \left(\theta \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} + (1-\theta) \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t \right) + \{C\} = 0 \quad (3.39)$$

veya

$$[D]^t \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} = \{f\}^t \quad (3.40)$$

Burada;

$$\left. \begin{aligned} [D]^t &= \frac{[A]}{\Delta t} + \theta[B] \\ \{f\}^t &= -\{C\}^t + \frac{[A]}{\Delta t} \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t - (1-\theta)[B] \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

Yukarıdaki (3.40) denklemi cebirsel denklem sistemine karşılık gelmektedir. Bu denklem sistemini çözmek için seçilecek θ değerine bağlı olarak çeşitli yöntemler bulunmaktadır.

- Explicit Yöntem: Bu yöntemde $\theta = 0$ alınmak suretiyle (3.41) denklemindeki $[D]^t$ ve $\{f\}^t$ aşağıdaki şekli alır.

$$\left. \begin{aligned} [D]^t &= \frac{[A]}{\Delta t} \\ \{f\}^t &= -\{C\}^t + \frac{[A]}{\Delta t} \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t - [B] \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

Bu yöntem her Δt için doğru sonuç veremeyebileceği için çözümün stabilitesi şartlı olarak sağlanmaktadır (Huyakorn and Pinder 1983).

- Fuly Implicit Yöntem: Bu yöntemde $\theta = 1$ alınmak suretiyle (3.41) denklemindeki $[D]^t$ ve $\{f\}^t$ aşağıdaki şekli alır.

$$\left. \begin{aligned} [D]^t &= \frac{[A]}{\Delta t} + [B] \\ \{f\}^t &= -\{C\}^t + \frac{[A]}{\Delta t} \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

Bu yöntemde her Δt için stabilite şartı sağlanmaktadır (Huyakorn and Pinder 1983).

- Crank-Nicholson Yöntem: Bu yöntemde $\theta = \frac{1}{2}$ alınmak suretiyle (3.41)

denklemindeki $[D]^t$ ve $\{f\}^t$ aşağıdaki şekli alır.

$$\left. \begin{aligned} [D]^t &= \frac{[A]}{\Delta t} + \frac{[B]}{2} \\ \{f\}^t &= -\{C\}^t + \frac{[A]}{\Delta t} \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t - \frac{[B]}{2} \begin{Bmatrix} p \\ h \end{Bmatrix}^t \end{aligned} \right\} \quad (3.44)$$

Bu yöntemde her Δt için stabilite şartı sağlanmaktadır (Huyakorn and Pinder 1983).

3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Jeotermal Rezervuar Modellenmesinde İzlenilen Adımlar

2. bölümde çıkarılması anlatılan kısmi diferansiyel denklemlerin, 3.1 - 3.4 bölümlerinde sonlu elemanlar yöntemi ile çözümüne ait bilgiler verilmişti. Bu başlık altında amaca yönelik adımlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- İncelenmesi düşünülen rezervuarın uygun bir şekilde sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Böylece düğüm noktası koordinatları ve buradan eleman düğüm

noktası numaraları elde edilir. Analiz için diğer veriler hazırlanır (porozite, permeabilite vs).

- Başlangıç anı $t = 0$ kabul edilerek, simülasyon süresi ve Δt zaman artımı tespit edilir.
 - Analizin ilk adımında ($t=0$ anında) basınç ve entalpi için kullanılacak olan (başlangıç) değerleri rezervuardaki kuyularda ölçülen değerlerden elde edilir. Ara düğüm noktalarındaki değerler ise; basınç aynı kalmak üzere, entalpi uygun bir enterpolasyon metodu ile elde edilir.
 - Analiz $t=0$ dan itibaren seçilen Δt zaman artımlarıyla simülasyon sonuna kadar tekrarlanır. Her bir adımda ise aşağıdaki sıra izlenir.
1. (3.24) denklemi ile verilen A, B ve C üçgen sonlu eleman matrisleri (3.25), (3.26) ve (3.27) denklemleri kullanılarak elde edilir. (3.25), (3.26) ve (3.27) denklemlerindeki elemanların hesaplanmasında bölüm 2.3 de verilen temel bağıntılar, integrallerin alınmasında Pinder and Gray (1979), enterpolasyon fonksiyonlarının oluşturulmasında (3.37) bağıntıları kullanılmıştır. (3.24) bağıntısındaki zamana bağlı türevlerin alınmasında bölüm 3.6 da kısaca anlatılan Fuly İmplicit yöntemi kullanılmıştır. (3.27) bağıntılarındaki kapalı integraller rezervuar sınırlarında sızma olamadığı kabulü nedeniyle sıfıra eşit olduğundan göz önüne alınmamıştır.
 2. Her bir eleman için elde edilen A, B ve C matrisleri uygun şekilde birbirleriyle süperpoze edilir.
 3. Eğer söz konusu adım ilk adım ise başlangıç şartları uygulanır.
 4. Sınır şartları uygulanır. Bunun için analizin her bir adımında kullanılacak olan sınır şartları;

Entalpi için: Sahada jeolojik olarak bir süreklilik söz konusu olduğu ve bu nedenle rezervuar sınırlarında sıcaklık sabit kalacağından simülasyonun bütün adımlarında başlangıçtaki entalpi değerleri kullanılır.

Basınç için: Simülasyonun ilk adımında başlangıçtaki değerleri, bu adımda ise bir önceki adımda hesaplanan basınç değeri kullanılır.

5. Elde edilen bu denklem takımı çözülerek bu adım için p ve h nin yeni değerleri bulunur.

3.8. Bilgisayar Programı ve Akış Diyagramı

Su egemen jeotermal sistemler için geliştirilmiş olan bilgisayar programı genel bir program olup herhangi bir su egemen jeotermal rezervuarın zamana bağlı simülasyonunu yapabilmektedir.

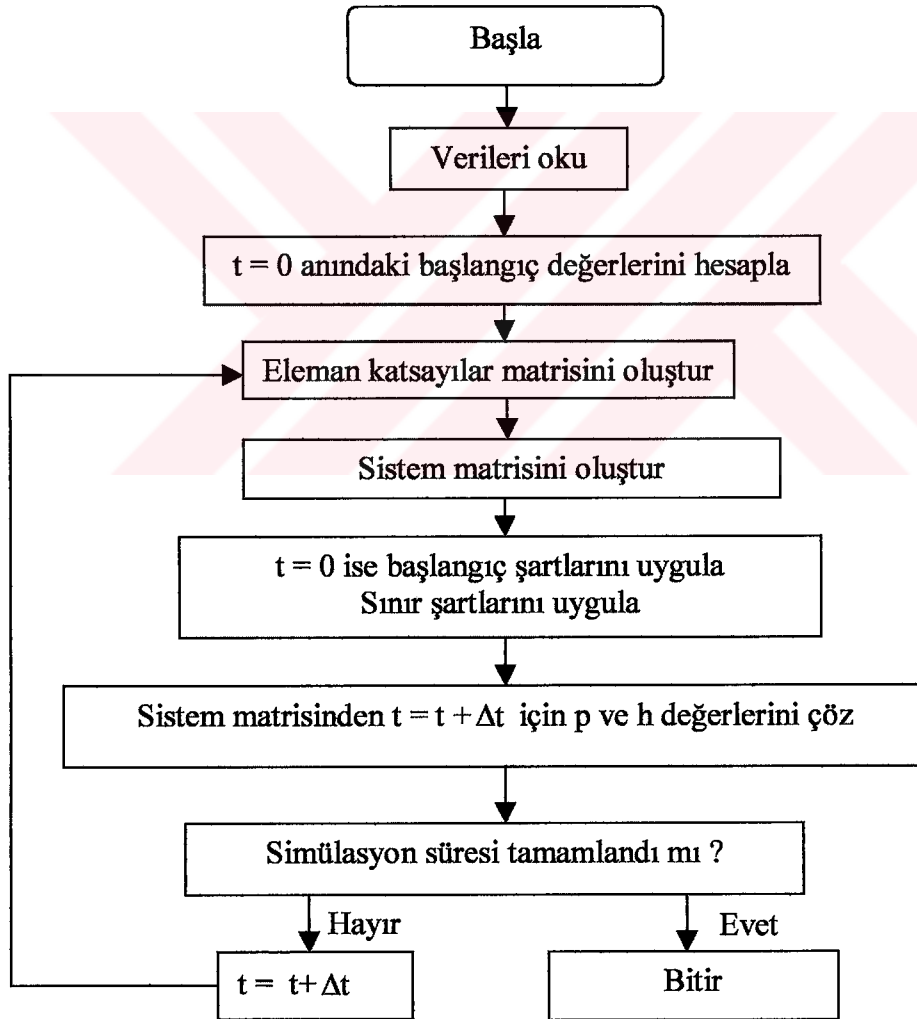
Geliştirilmiş olan bilgisayar programına veri olarak sırasıyla;

- Sonlu eleman ağındaki her bir düğüm noktasının numarası ve koordinatları
- Sonlu eleman ağını oluşturan her bir üçgen sonlu elemanın eleman numarası ve köşe noktalarına karşılık gelen düğüm noktası numaraları (saat ibresi dönüş yönünün tersinde olmak üzere)
- Zaman artımı
- Simülasyon süresi
- Termal kondaktivite
- Rezervuar kayası yoğunluğu
- Rezervuar kayası özgül ısısı
- Rezervuar kayasının düşey sıkışabilirliği
- Rezervuar kalınlığı
- Permeabilite
- Porozite

- Sonlu eleman ağındaki her bir düğüm noktasındaki başlangıç anındaki basınç değerleri
- Sonlu eleman ağındaki her bir düğüm noktasındaki başlangıç anındaki entalpi değerleri

veri olarak girilmektedir.

Veri girişi ve adımları yukarıda kısaca özetlenen bilgisayar programına ait akış diyagramı şekil 3.3 de verilmiştir.



Şekil 3.3. Hazırlanan bilgisayar programına ait akış diyagramı

3.9. Geliştirilen Bilgisayar Programının Örnek Problemle Tahkiki

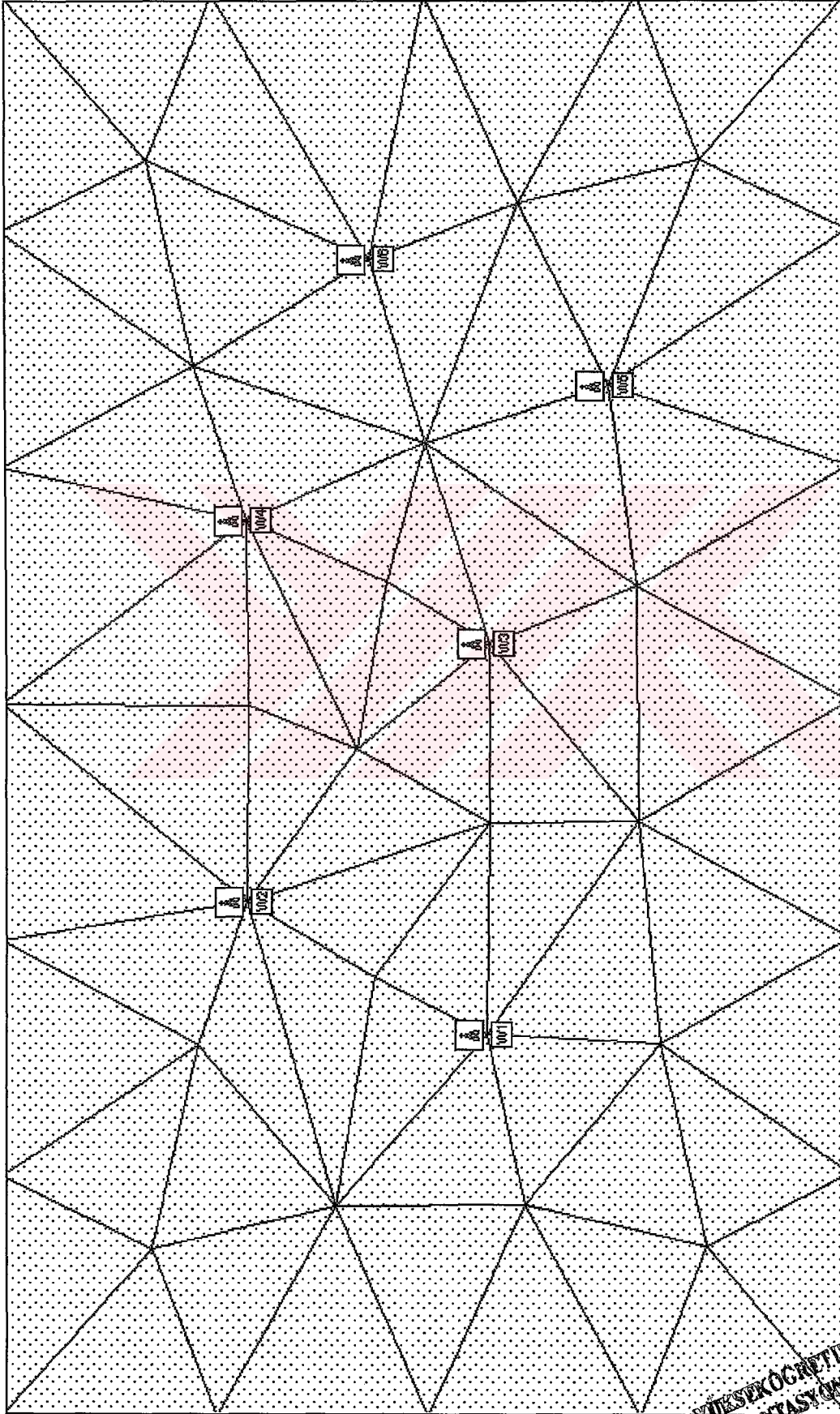
Mercer ve Faust (1975) 5.5x3.5 km boyutlarında 500 m kalınlığında diğer parametreleri aşağıda çizelge 3.1 de verilen jeotermal rezervuarın 10 aylık simülasyonunu yapmışlardır. Sınır şartı olarak jeotermal rezervuarın dört kenarından da sızma olmadığı kabul edilmiştir. Başlangıç şartı olarak da bütün rezervuarda basınç $P=6.895 \times 10^7$ din/cm², entalpi $h=1.047 \times 10^7$ erg/g ve sıcaklık $T=242.1^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

5.5x3.5 km boyutlarındaki örnek jeotermal rezervuarın 66 elemanlı ve 44 düğüm noktalı sonlu elemanlar ağı “Argus One Mesh Maker” programı ile oluşturularak aşağıda şekil 3.4 de verilmiştir.

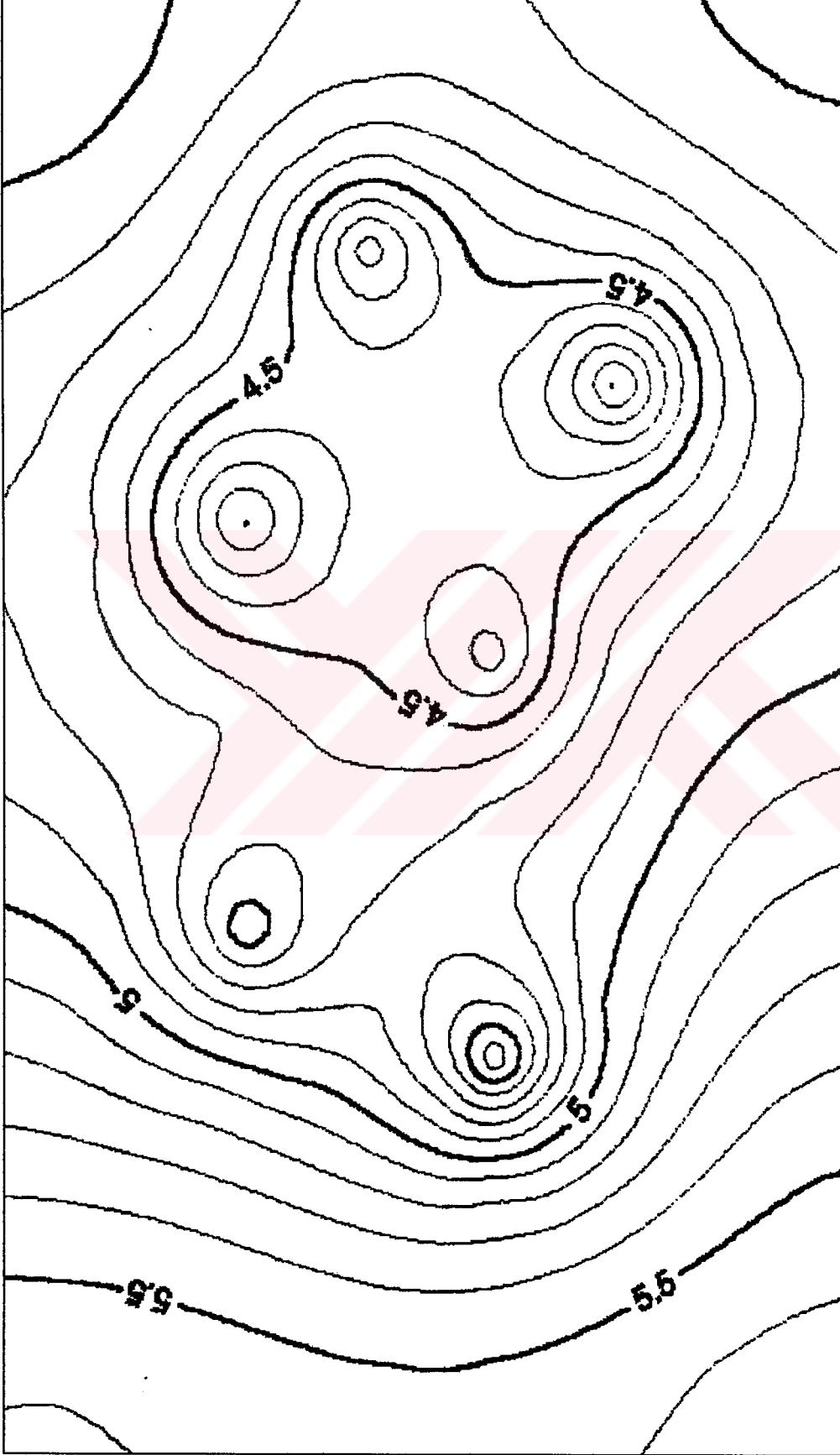
Mercer ve Faust (1975) tarafından incelenen bu problem geliştirilen bilgisayar programı ile yeniden çözülmüştür. Boyutları 5.5x3.5 km olan jeotermal rezervuar 66 elemanlı ve 44 düğüm noktalı sonlu elemanlar ağı ile modellenerek (şekil 3.4) 10 aylık simülasyonu yapılmış, 10 ay sonundaki eş basınç eğrileri şekil 3.5 de verilmiştir. Aynı problemin Mercer ve Faust (1975) tarafından elde edilen 10 aylık simülasyon sonundaki eş basınç eğrileri de aşağıda şekil 3.6 de verilmiştir. Şekil 3.5 ve şekil 3.6 den de görüldüğü gibi her iki çözümün sonuçları hemen hemen çakışmış durumdadırlar.

Çizelge 3.1. Test probleminde kullanılan jeotermal rezervuara ait parametreler

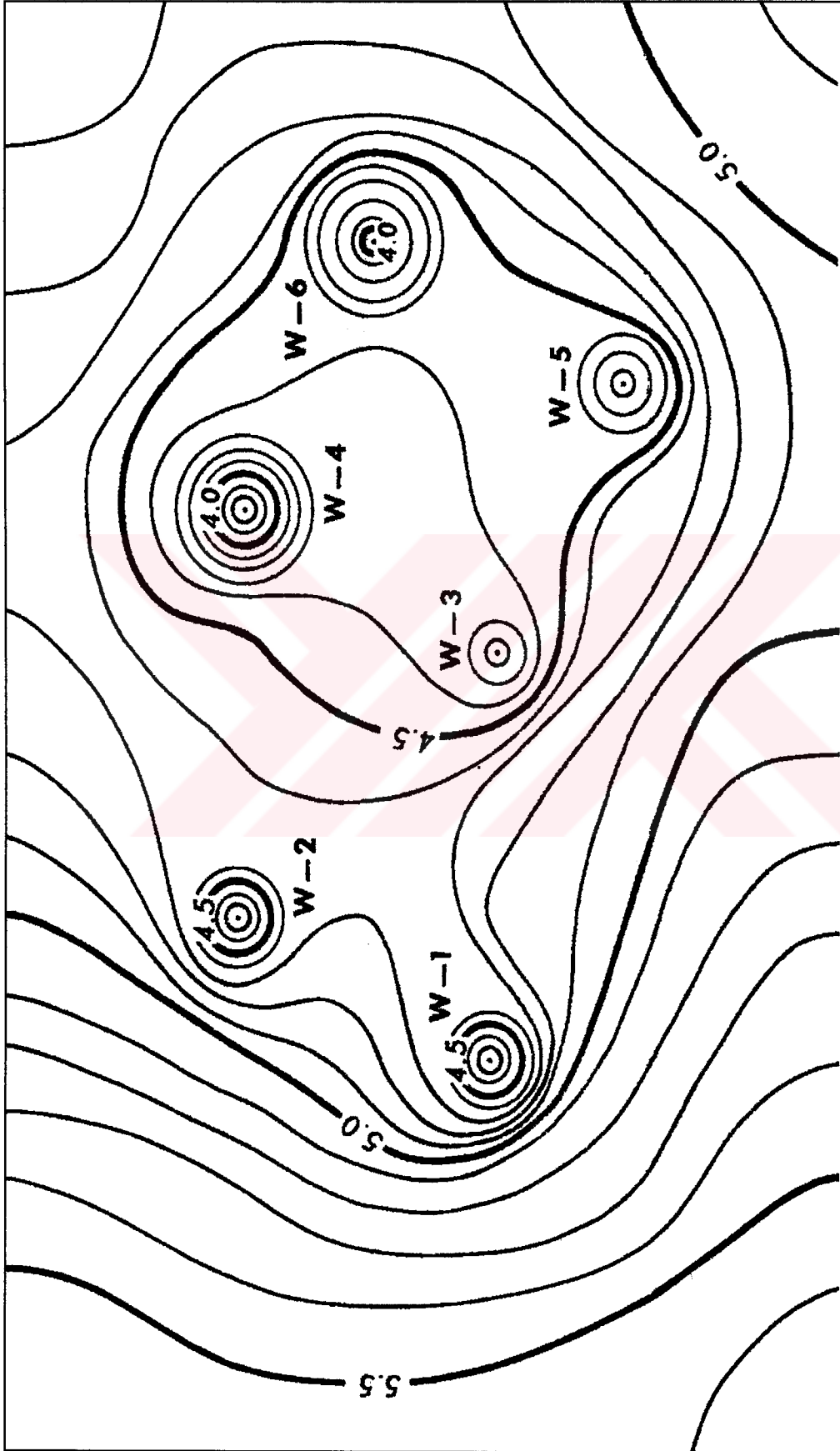
Parametre	Sembol	Değeri	Üretim debileri	
Permeabilite	K	$2.5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$	Kuyu 1	20000 g/s
Termal kondaktivite	K_m	$3.2 \times 10^5 \text{ erg/sec-cm.}^\circ\text{C}$	Kuyu 2	15000 g/s
Porozite	ϕ	0.1	Kuyu 3	12500 g/s
Rezervuar kayası yoğunluğu	ρ_r	2.5 g/cm^3	Kuyu 4	17500 g/s
Rezervuar kayası özgül ısısı	c_p	$1.01 \times 10^7 \text{ erg/g.}^\circ\text{C}$	Kuyu 5	20000 g/s
Düşey sıkışabilirlik	β	$7.25 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{din}$	Kuyu 6	15000 g/s
Toplam üretim debisi			100000 g/s	



Şekil 3.4.10 Test problemi olarak simülasyonu yapılan jeotermal rezervuarın sonlu elemanlar ağı



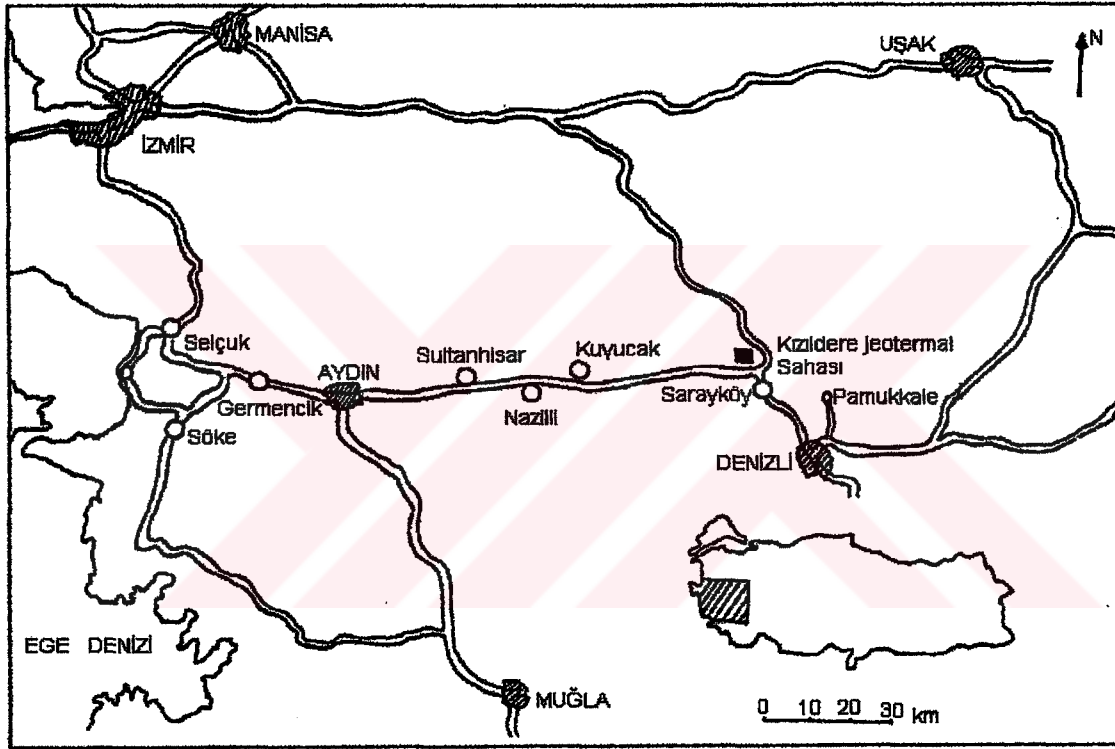
Şekil 3.5. Test problemindeki 10 aylık simülasyon sonunda hesaplanan eş basınç eğrileri ($\times 10^7$ din/cm²)



Şekil 3.6. Test probleminin 10 aylık simülasyon sonunda Faust ve Mercer (1975) tarafından hesaplanan eş basınç eğrileri

3.10. Kızıldere Jeotermal Rezervuarının İncelenmesi

Kızıldere jeotermal sahası Büyük Menderes Nehri'nin kuzeyinde Buharkent ile Sarayköy arasında yer almaktadır (şekil 3.7). Kızıldere jeotermal sahasında 20 adet derin sondaj yapılmıştır. Kızıldere santralını ise 8 adet derin kuyu beslemektedir. Kızıldere'deki ana fay hatları ile kuyu lokasyonlarının durumu şekil 3.8 de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kızıldere jeotermal sahasının yer bulduru haritası

Batı Anadolu'da Büyük Menderes Grabeni, Gediz Grabeni ile Çürüksu Grabeni çok önemli jeotermal sistemlere sahiptir. Bunlar, yerkabuğu hareketleri ve mağmatizma ile doğrudan ilişkili olup, aktif fayların oluşturduğu deprem kuşakları üzerinde yoğunlaşmaktadırlar (Eşder 1994).

Kızıldere jeotermal sistemi kuzeyden jeotermal enerji açısından aktif olmayan Gökdere fayı ile bunun güneyinde jeotermal akışkanları rezervuarlara ve yeryüzüne taşıyan yaklaşık D-B doğrultulu Kızıldere Fayı ve buna KB ve GB'dan dayanan KD-GB

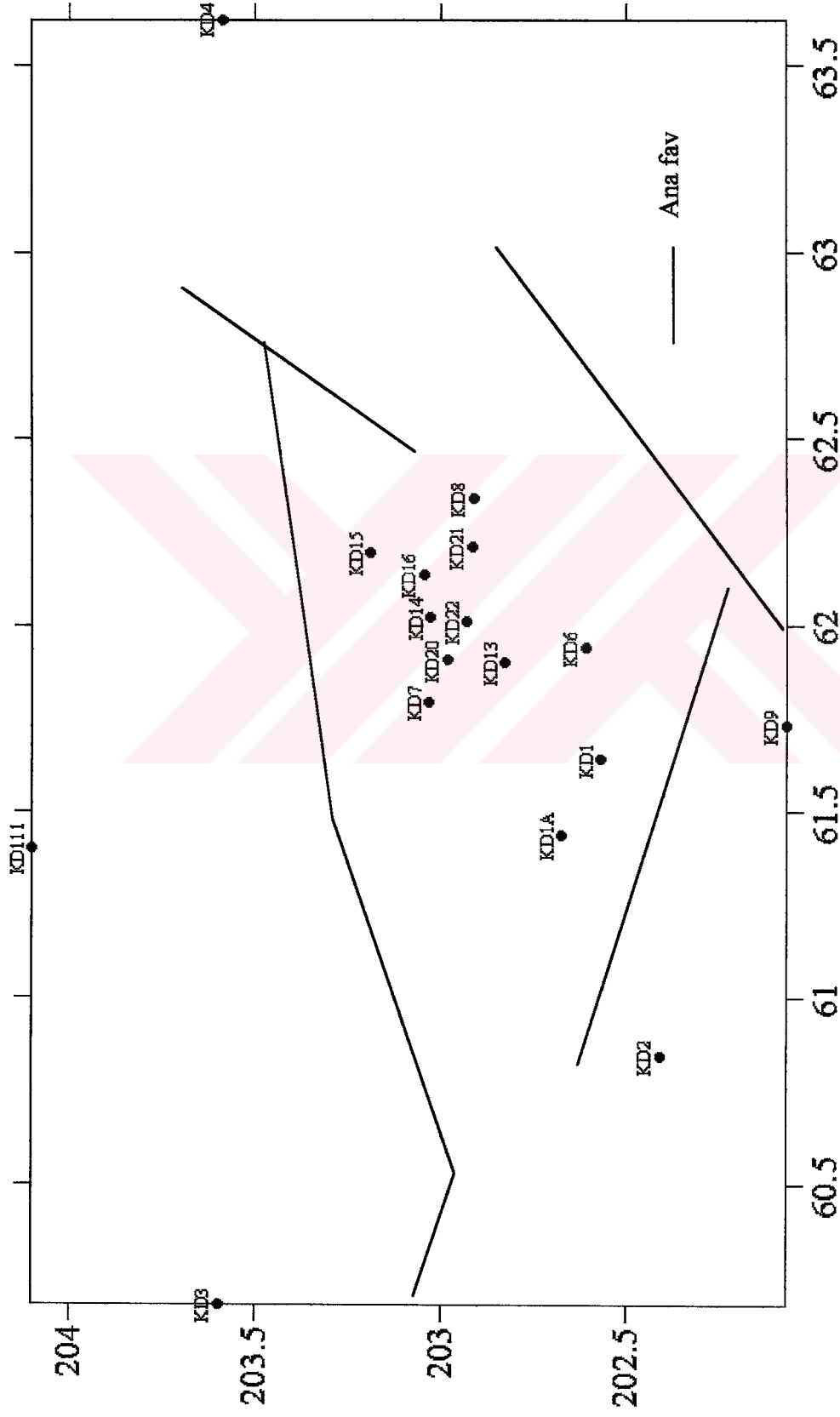
doğrultulu jeotermal etkinliği olan doğrultu atımlı faylar tarafından sınırlanmaktadır (şekil 3.8).

3.10.1. Kızıldere Jeotermal Sahasının Jeolojisi

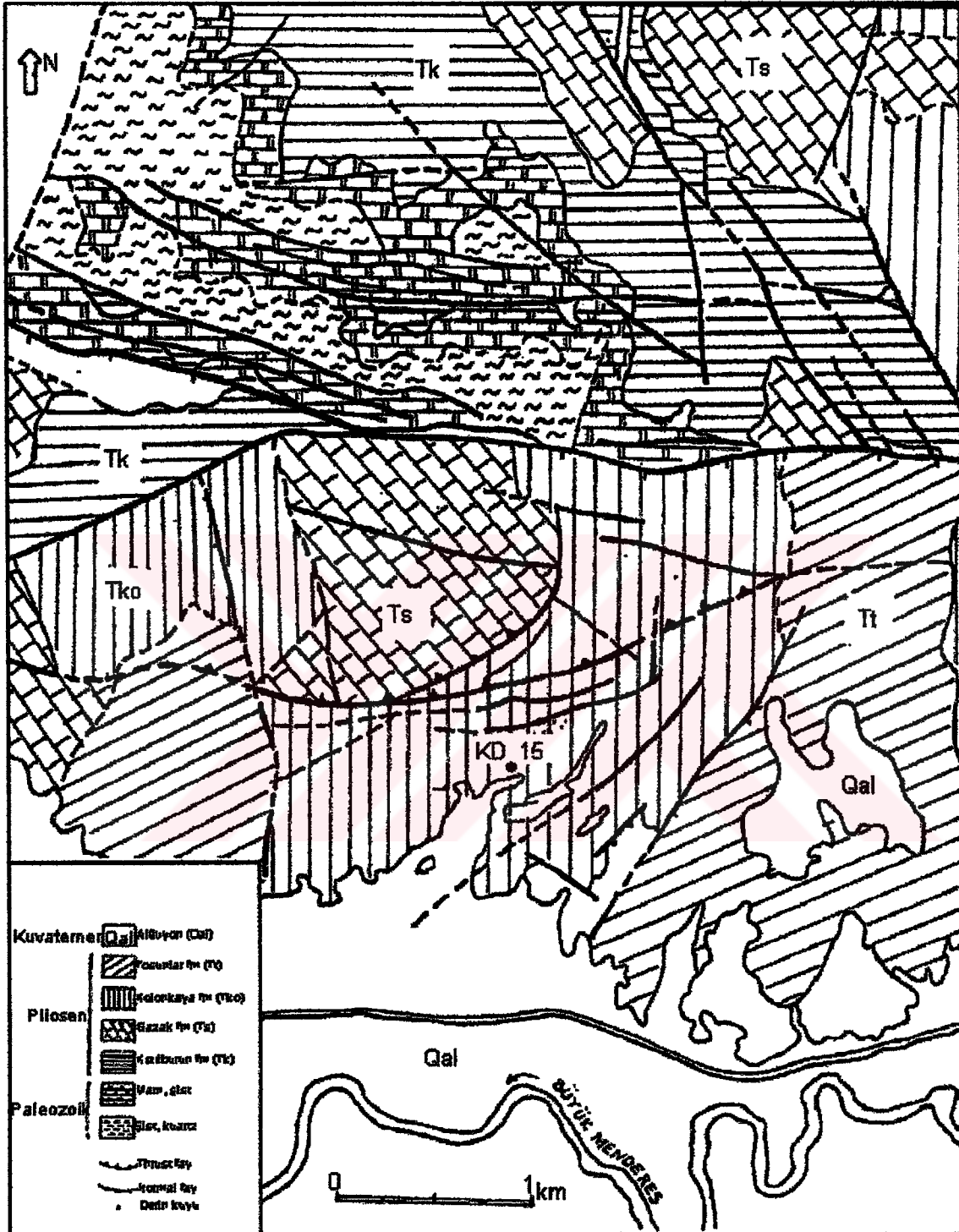
Kızıldere jeotermal sahası Büyük Menderes Grabeni içerisinde yer almaktadır. Bölgede Menderes Masifi'ne ait metamorfik kayalar ile Pliyosen ve Kuvaternere ait çökel kayaları bulunmaktadır. Menderes masifinin temelini gnayslar oluşturmaktadır. Bu birimin üzerinde Pliyosen sedimentleri yer almaktadır. Bu Pliyosen sedimentleri tabandan tavana doğru Kızılburun formasyonu, Sazak formasyonu, Kolonkaya formasyonu ve Tosunlar formasyonu olmak üzere dört litolojik birime ayrılmaktadır (şekil 3.9).

Kızılburun formasyonu Büyük Menderes Masifi üzerine gelen ilk birimdir. Birimin kalınlığı 200 m civarında ve litoloji özellikleri genellikle değişkendir. İlk olarak eski topografya alçaklıklarını doldurmuş ve sonra daha geniş bir alana yayılmıştır.

Kızılburun formasyonunun üzerinde Sazak formasyonu yer almaktadır. Sazak formasyonu başlıca kireçtaşı, marn, miltaşı ve kiltaşından oluşmuştur. Birim aynı zamanda Kızıldere jeotermal alanında birinci hazne kayayı oluşturmaktadır. Birimin kalınlığı 100-300 m dir.



Şekil 3.8. Kızıldereli'deki ana fay hatları ile kuyu lokasyonlarının durumu (Dominco 1974 ten değiştirilerek)



Şekil 3.9. Kızıldere jeotermal sahasının jeoloji haritası (Şimşek 1982)

Sazak formasyonu üzerinde olan Kolonkaya formasyonu genellikle kumtaşı marnlardan oluşmuştur. Kolonkaya formasyonu, havzanın yayılımına ve ortama göre kumtaşı, marn, kıltaşı ve yer yer jipsli olarak görülür. Birimin kalınlığı 350-450 m dır. Alt Pliyosen'e ait en üst birim olan Kolonkaya formasyonunun üzerine Plio-Kuvaterner Tosunlar formasyonu gelir. Birim, Yenice batısında, sarı kumtaşları ile marnlı seviyeler, Yenice doğusunda kumtaşı ve bol fosilli kumlu kireçtaşlarından oluşur. Birimin kalınlığı 350 m civarındadır (Şimşek 1985).

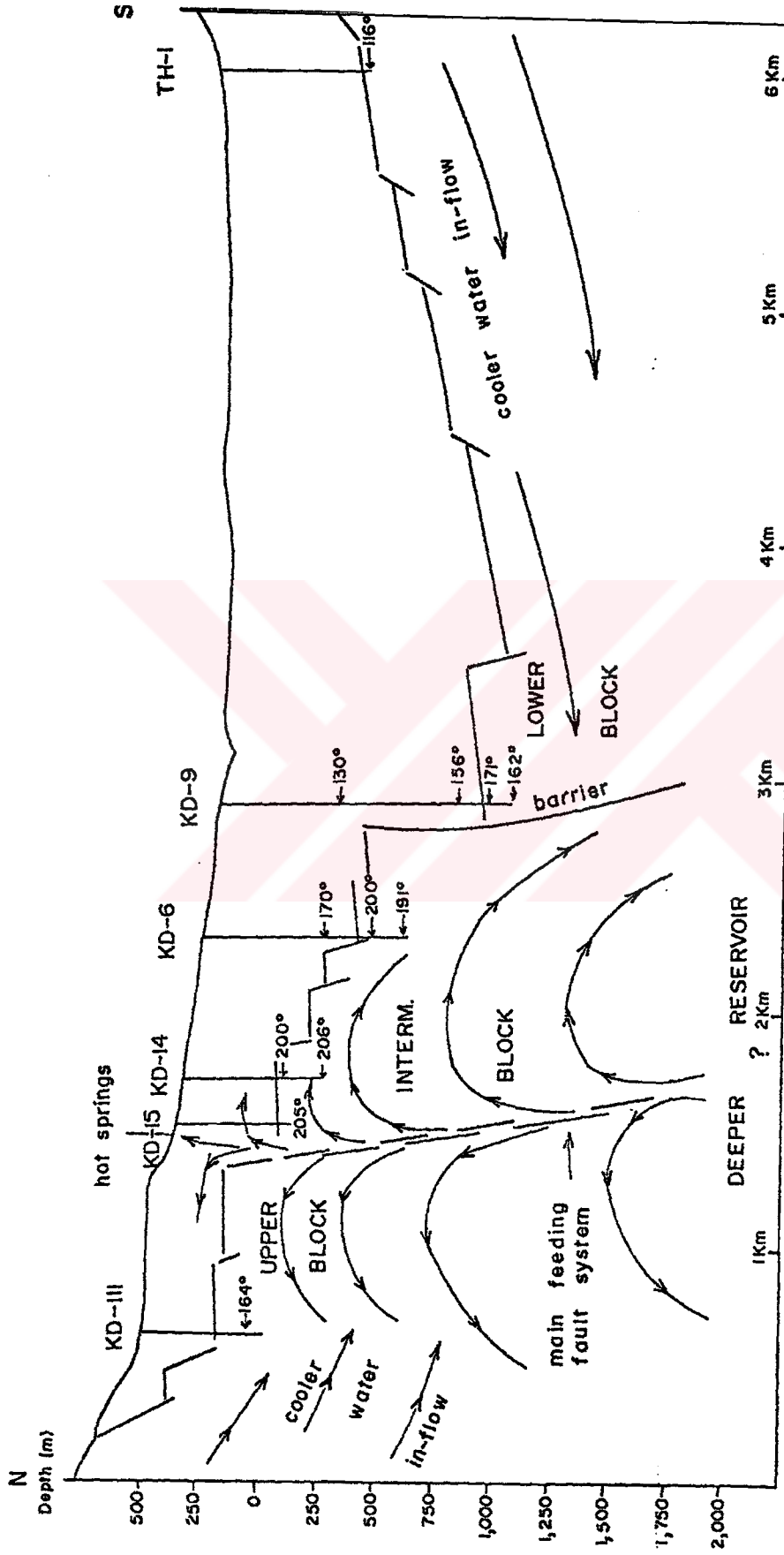
3.10.2. Kızıldere Jeotermal Sahasının Hidrojeolojisi

Hidrotermal sistemli jeotermal alanlarda, jeotermal enerji oluşumu ısıtıcı, hazne kaya, örtü kaya ve beslenme öğelerinin bulunmasına bağlıdır. Kızıldere jeotermal sahasının Dominco (1974) tarafından oluşturulmuş hidrojeolojik modeli şekil 3.10 da verilmiştir. Bu modele ve Filiz (1982) tarafından yapılan izotop çalışmasına göre Kızıldere jeotermal sahası kuzeyde metamorfiklerden ve güneyde ise Babadağ horstunun kuzeyinde kalan daha geniş bir havzadan beslenmektedir. İlk zamanlarda Dominco (1974), Kızıldere jeotermal sahasının beslenmesini 1000 t/h olarak tahmin etmesine rağmen sonradan yapılan uzun dönemli üretim testleri sonucunda sahanın beslenmesinin 550 t/h civarında olduğu belirlenmiştir (Serpel 2000).

Yukarıda da belirtildiği gibi şekil 3.10 ile verilen hidrojeolojik modelden bir hidrotermal sistem ortaya çıkarabilmek için ısıtıcı, hazne kaya, örtü kaya ve beslenme gibi parametreleri dikkate almak gerekir. Kızıldere jeotermal sahası için bu parametreler hakkında bilgi aşağıda verilmiştir.

- **Isıtıcı**

Jeotermal alanlarda gerekli ısı kaynağı, ya genç bir volkanizma veya genç tektonik etkinlikle oluşabilir.



Şekil 3.10. Kızıldere jeotermal sahasının hidrojeolojik modeli (Dominco 1974)

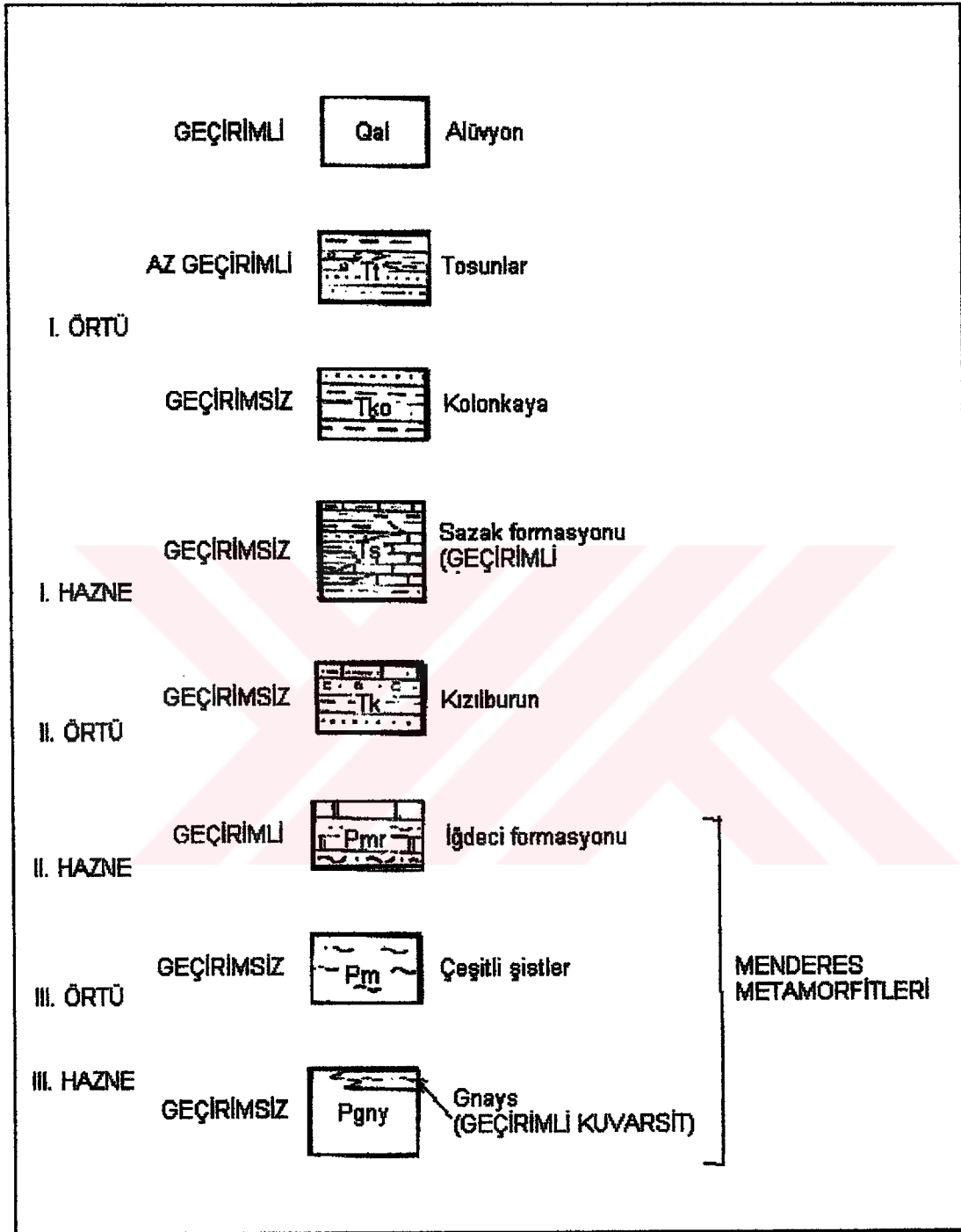
Kızıldere jeotermal sisteminin bir parçası olan ısıtıcı kaynağın ne olduğu hakkında değişik görüşler ileri sürülmüştür. Şimşek (1982), Kızıldere jeotermal sisteminde meteorik suların genç graben sistemlerinin derine inen ve birbirleri ile ilişkili kırıklarında dolaştığını ve bu suların yüksek jeotermal gradyan ve grabenler altındaki olası mağma yaklaşımından ve bunlardan kaçan mağmatik enemasyonlar yardımıyla ısındığını savunmaktadır. Uysallı vd., (1985), Kızıldere jeotermal sisteminin ısıtıcısı ve bu ısıtıcının kökeni hakkında aşağıdaki görüşleri ileri sürmektedirler.

“Bugünkü jeotermal sistemlerin ısı kaynağı Batı Anadolu'da yer alan geçmişteki kalkalkalen volkanizma olmayıp, yakın zamana kadar sürmüş ve geçici olarak aktivitesini durdurmuş alkalin volkanizmadır. Kızıldere jeotermal sistemi çok aktif tektonik bir yerde yer almakta olup buradaki ısı kaynağı bütünüyle faylarla irtibatlı üst manto olup bu mağmatik merkezlerden türeyen ve kabuğun yukarı kısımlarına kondüksiyon ve konveksiyon yoluyla hareket eden mağmatik emanasyonlardır. Batı Anadolu'da grabenleşme bölgesinin altında yüzeye doğru yakınlaşmış üst mantodan türeyen ısı ve yine üst mantodan salınan bazik mağmalar jeotermal sistemler için bölgesel ölçekte bir ısı kaynağı olarak büyük ve önemli bir rol oynamaktadırlar”.

- **Hazne Kaya (Rezervuar)**

Bir jeotermal sistemde, jeotermal akışkanın yeraltında birikebileceği gözenekli ve geçirimli, rezervuar diye tabir edilen, bir ortamın bulunması gerekmektedir. Aşağıda şekil 3.11 de de görüldüğü gibi Kızıldere jeotermal sahasında da bu özelliklere sahip üç adet gözenekli ve geçirimli ortamın bulunduğu tespit edilmiştir. Bu rezervuarlardan ilk ikisinin varlığı, konumları ve karakteristikleri 1964-1985 yılları arasında yapılan jeolojik ve jeofizik araştırmalar sonucunda belirlenmiştir. Üçüncü rezervuar ise 1985-1986 yılları arasında yapılan sondaj çalışmaları ile ortaya çıkarılmıştır (Uysallı vd. 1985).

Yapılan jeolojik çalışmalar sonucunda, Kızıldere jeotermal sisteminde 1. rezervuarın miyosen yaşlı kireçtaşlarından, 2. rezervuarın paleozoik mermerlerden ve 3. rezervuarında gnayslardan oluştuğu tespit edilmiştir (Şimşek 1982, Uysallı vd. 1985).



Şekil 3.11. Kızıldere jeotermal sahasının hidrojeolojik birimleri (Şimşek 1982)

Fakat Serpen (2000), kireçtaşları ve mermerleri stratigrafik ve litolojik farklılıklardan dolayı ayrı hazneler olarak görmenin doğru olamayacağını, bir hidrotermal rezervuarın stratigrafi ve litolojinin ötesinde daha çok tektonizmanın meydana getirdiği çatlak sisteminin içinde sıcak su akımlarının olduğu ve jeokimyasal açıdan da bütünlük gösteren bir oluşum olduğunu, bu nedenle hidrolojik açıdan da birlikte hareket eden bu hazneleri tek bir rezervuar olarak kabul etmek gerektiğini belirtmektedir.

- **Örtü Kaya**

Kızıldere jeotermal sahasında rezervuarları birbirinden ayıran örtü kayalar şekil 3.11 den de görüleceği üzere şöyledir. Birinci örtü kaya, kireçtaşlarının üzerinde yer alan, üstte kıltaşı altta silttaşı-kıltaşı ardalanmasından oluşan geçirimsiz kolonkaya formasyonudur. Kalınlığı 365 m civarında tahmin edilmektedir (Uysallı vd. 1985). İkinci örtü kaya ise mermerlerin üzerindeki şistlerden oluşmaktadır.

- **Beslenme**

Daha önce de belirtildiği gibi Kızıldere jeotermal sahasında beslenme büyük ölçüde güneyden olmakla birlikte grabenin iki yakasından gelen meteorik suların derin dolaşımıyla olmaktadır. Yapılan uzun dönemli üretim testleri sonucunda sahanın beslenmesinin 550 t/h civarında olduğu belirlenmiştir (Serpen 2000).

3.10.3. Kızıldere Jeotermal Rezervuarının Fiziksel Parametreleri

Kızıldere jeotermal rezervuarının simülasyonunda aşağıda çizelge 3.2. de verilen parametreler kullanılmıştır. Sıcaklık sınırlarda 160°C sabit kabul edilmiş olup sıcaklığın üretim bölgesindeki yersel değişimi aşağıda şekil 3.12 de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kızıldere jeotermal rezervuarının fiziksel parametreleri

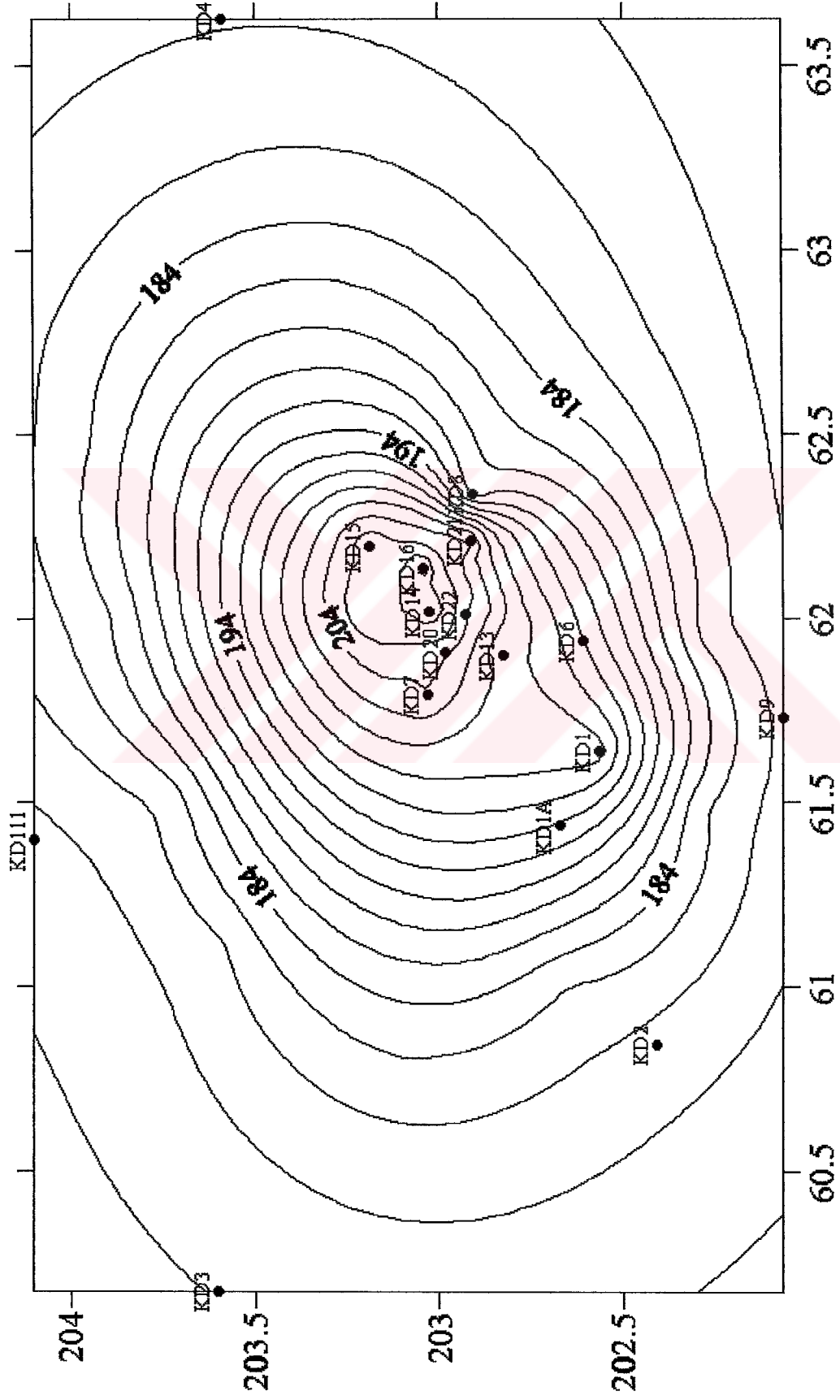
Parametre	Değeri
Permeabilite (k)	$4.17 \times 10^{-10} \text{ (cm}^2\text{)}^*$
Porozite (ϕ)	0.15^*
Termal kondaktivite (K_m)	$320000 \text{ (erg/sec-cm } ^\circ\text{C)}^{**}$
Rezervuar kayası yoğunluğu (ρ_r)	$2.8 \text{ (g/cm}^3\text{)}^{***}$
Rezervuar kayası özgül ısısı (c_p)	$0.9 \times 10^7 \text{ (erg/g } ^\circ\text{C)}^{**}$
Rezervuar kayasının düşey sıkışabilirliği (β)	$4.06 \times 10^{-11} \text{ (cm}^2\text{/din)}^{****}$
Rezervuar kalınlığı (b)	1200 (m)^*

*Rezervuardaki 1984-1998 yılları arasındaki ortalama basınç düşümünden optimize edildi.

**Rzhevsky and Novik (1971).

***Rzhevsky and Novik (1971), Serpen (2000).

****Rzhevsky and Novik (1971), Horne (1990).



Şekil 3.12. Kızıldere jeotermal sahasının eş sıcaklık eğrileri haritası (°C)

Kızıldere jeotermal rezervuarında jeotermal akışkan üretiminin yapıldığı bölge çevresine (yanal rezervuar) göre daha fazla kırıklı ve çatlaklıdır. Yani yanal rezervuardaki faylanma bu bölgeye nazaran daha azdır (Şimşek 1985). Bu nedenle yanal rezervuarda permeabilite $5.56 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ ve porozite 0.05 alınmıştır. Yine Dominco (1974) tarafından verilen hidrojeolojik model dikkate alınarak yanal rezervuarın kalınlığı 1800 m olarak alınmıştır.

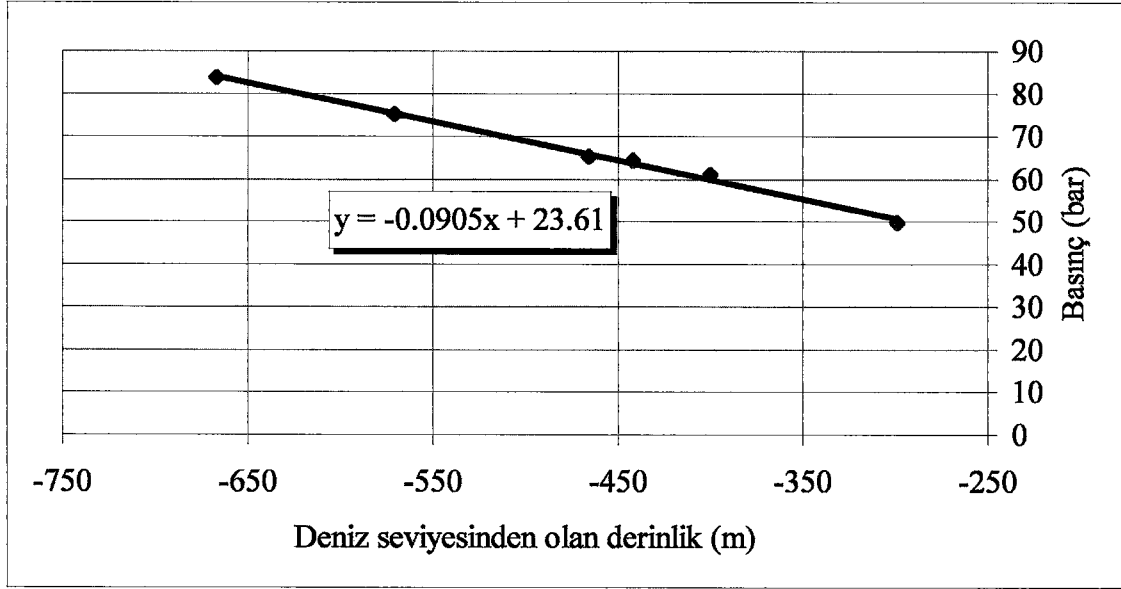
3.10.4. Kızıldere Jeotermal Sahasındaki Üretim Kuyularının Özellikleri.

Kızıldere jeotermal sahasında jeotermal akışkandan elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kuyuların özellikleri aşağıda çizelge 3.3 de verilmiştir. Bu kuyulardan KD7 kuyusunda üretime başladıktan kısa süre sonra serbest su yüzeyi olduğu için devre dışı bırakılarak üretime geri kalan 8 adet kuyu ile devam edilmiştir. KD20, KD21 ve KD22 kuyularının kuyu dibi basınçları aşağıda şekil 3.13 de verilen basınç gradyan eğrisinden elde edilmiştir.

Çizelge 3.3. Kızıldere jeotermal sahasındaki üretim kuyularının özellikleri

Kuyu adı	Derinlik (m)	Koordinatlar			Sıcaklık (°C)	Kuyu dibi basıncı (bar)	Toplam üretimdeki payı (%)
		X (km)	Y (km)	Z (m)			
KD6	851	202.610	61.939	184.01	194	83.75	9
KD7	645	203.033	61.795	203.15	204	64.29	-
KD13	760	202.829	61.901	189	198	75.11	10
KD14	597	203.029	62.020	197	210	61.02	12
KD15	510	203.190	62.195	211	208	49.73	13
KD16	667	203.046	62.135	201	211.5	65.14	19
KD20	810	202.984	61.906	194	204	79.34*	14
KD21	898	202.916	62.211	204	205	86.40*	13
KD22	888	202.931	62.011	193	204	85.49*	10

Kuyu dibi basıncı şekil 3.13 deki basınç gradyanı eğrisinden elde edilmiştir.



Şekil 3.13. Kızıldere jeotermal sahasındaki üretim kuyularının kuyu dibi basınçlarının derinlikle değişimi

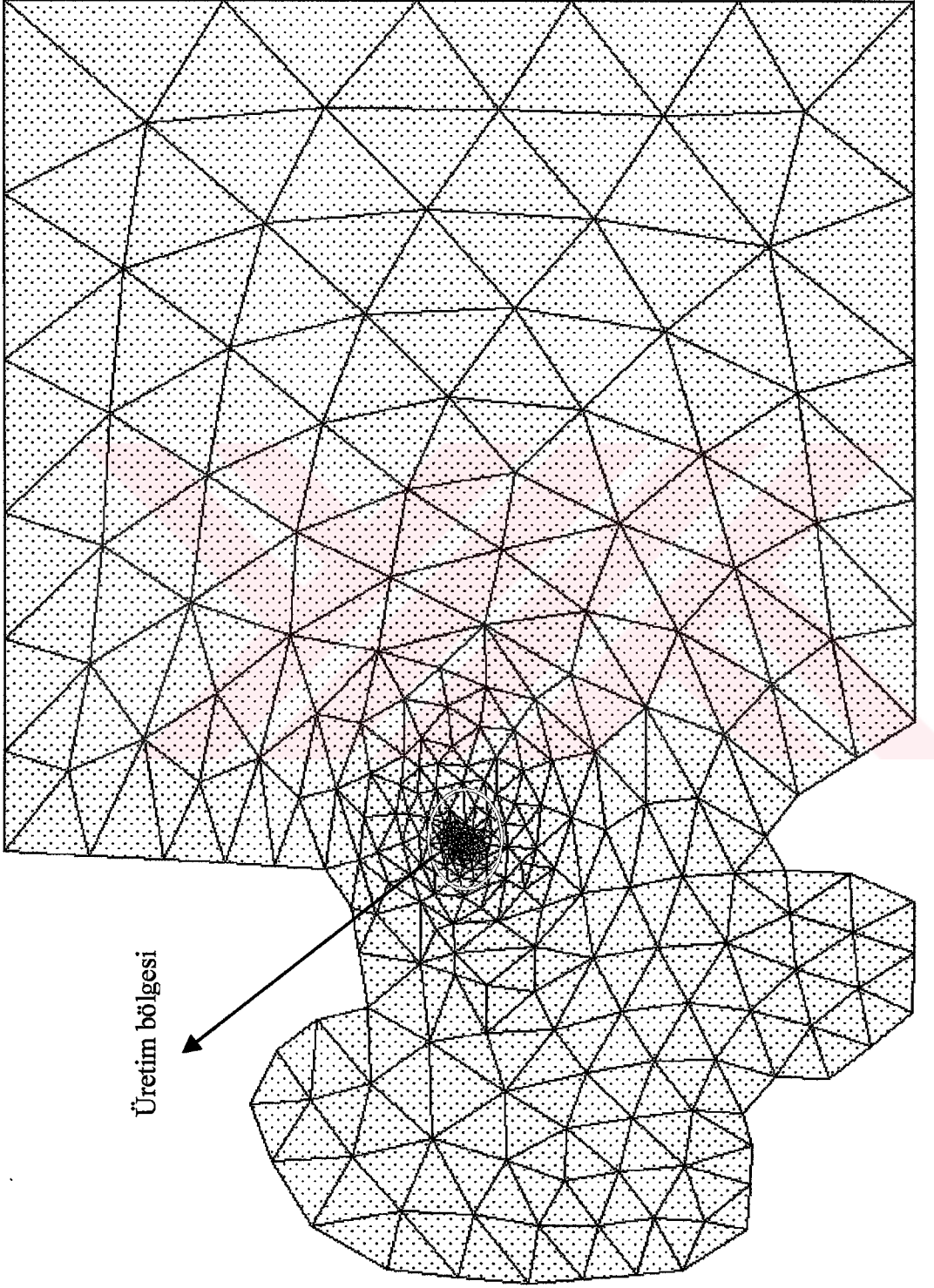
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında geliştirilen bilgisayar programı ile Kızıldere jeotermal rezervuarının değişik üretim senaryoları için simülasyonları yapılmıştır.

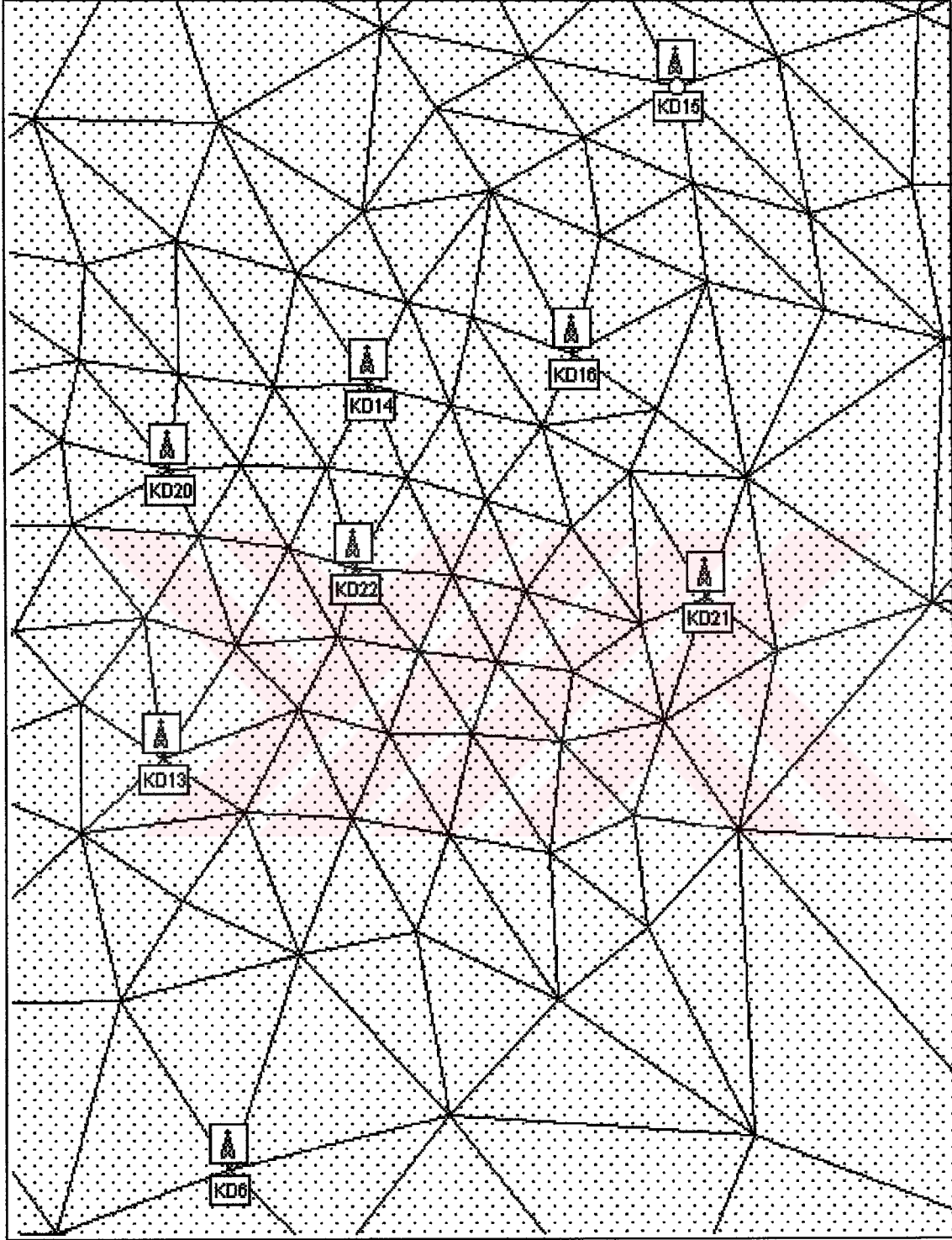
Bu simülasyonlarda şekil 4.1 ve şekil 4.2 de verilen 315 düğüm noktası ve 577 üçgen elemandan oluşan sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında “Argus One Mesh Maker” programı kullanılmıştır.

Kızıldere jeotermal sahasının Tezcan (1967) tarafından yapılan jeofizik etütleri sonucunda sahanın batı, kuzeybatı ve güneybatı kesimlerinde çok yüksek rezistiviteli geçirimsiz jipslerin bulunduğu tespit edilmiştir. Aynı çalışmada, sahanın doğuya doğru ise düşük rezistiviteli formasyonlarla uzadığı belirlenmiştir. Bu nedenle sahanın doğusu, sınırlarının matematiksel olarak geçirimsiz olduğunu kabul edebilecek kadar doğuya doğru uzatılmıştır. Buna göre şekil 4.1 de verilen sonlu elemanlar ağında sınırlarda akışkan akımının (sızmanın) olmadığı yani rezervuar sınırlarının geçirimsiz olduğu kabul edilmiştir. Fakat jeolojik olarak sahada bir süreklilik söz konusu olduğu için sınırlarında sıcaklığın sabit olduğu yani kondüksiyonla ısı iletiminin olduğu kabul edilmiştir.

Çözümlerde çizelge 3.1 deki fiziksel parametreler kullanılmış, çizelge 4.1 ve 4.2 de verilen her bir kuyunun ortalama üretim debisi çizelge 3.3 deki her bir kuyunun toplam üretimdeki payları oranından elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Kızıldere jeotermal sahasının simülasyonunda kullanılan sonlu elemanlar ağı



Şekil 4.2. Kızıldere jeotermal sahasına ait sonlu elemanlar ağının üretim bölgesine ait kısmı

4.1. Kızıldere Jeotermal Rezervuarının 1984-1998 Yılları Arasındaki Simülasyonu

Bu çalışma kapsamında geliştirilen bilgisayar programı ile Kızıldere jeotermal rezervuarının 1984-1998 yılları arasında kalan 15 yıllık süre için simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyonda çizelge 4.1 de verilen 8 adet üretim kuyusuna ait ortalama üretim debileri kullanılmıştır.

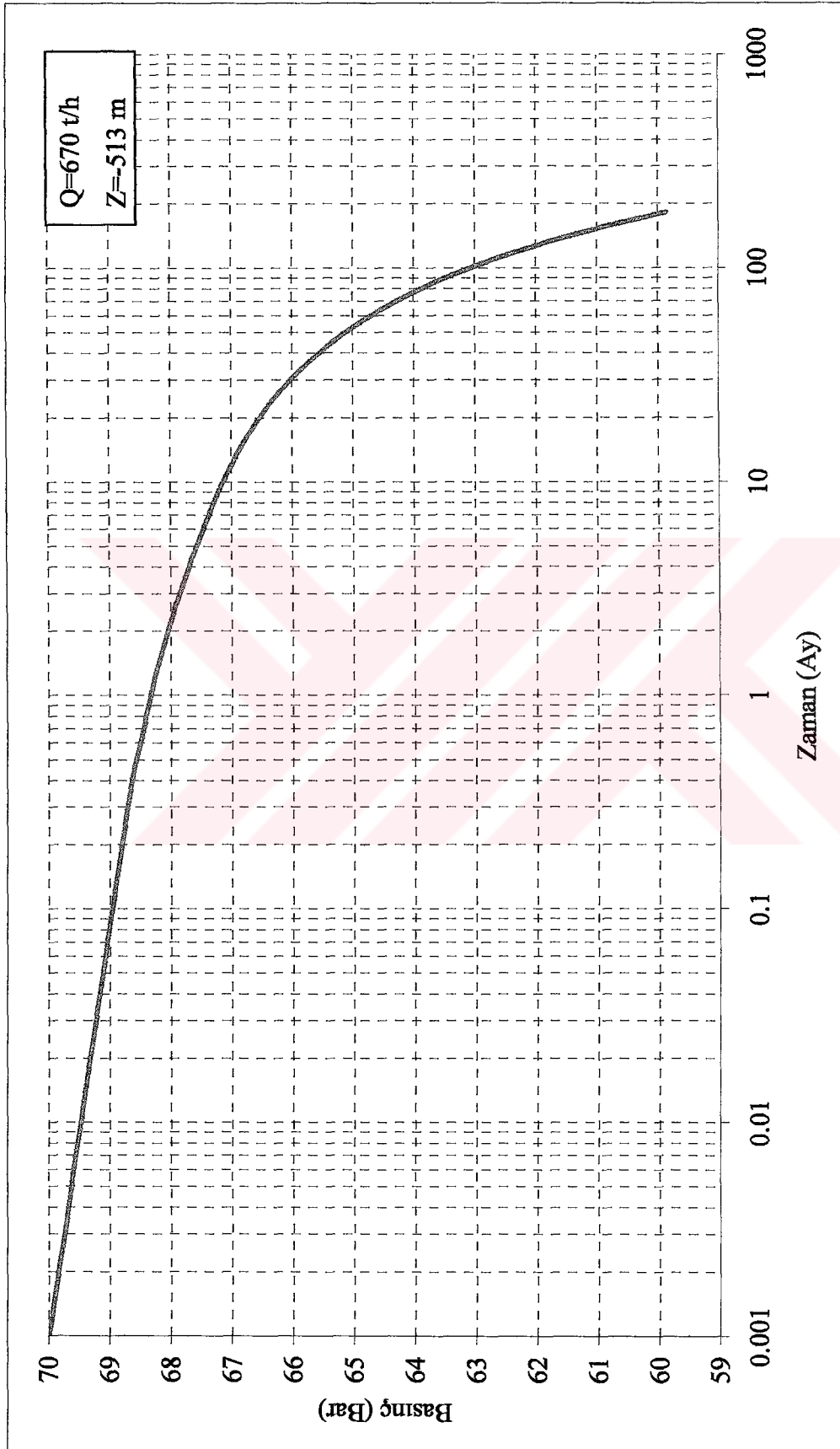
Kızıldere jeotermal rezervuarından 1984 yılından beri elektrik enerjisi üretiminde kullanmak amacıyla jeotermal akışkan üretimi yapılmaktadır. 1998 yılı sonu itibariyle rezervuardan toplam 87.948×10^6 ton jeotermal akışkan üretimi yapılmıştır. Başlangıçta deniz seviyesinden -513 m de ortalama 70 bar olan rezervuar basıncı 15 yıl sonunda 10.3 bar düşmüştür (Serpen 2000). 87.948×10^6 ton jeotermal akışkan üretimi 8 üretim kuyusundan çizelge 4.1 de verilen şekilde yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Kızıldere jeotermal rezervuarından 1984-1998 yılları arasında yapılan üretimin üretim kuyularına göre dağılımı

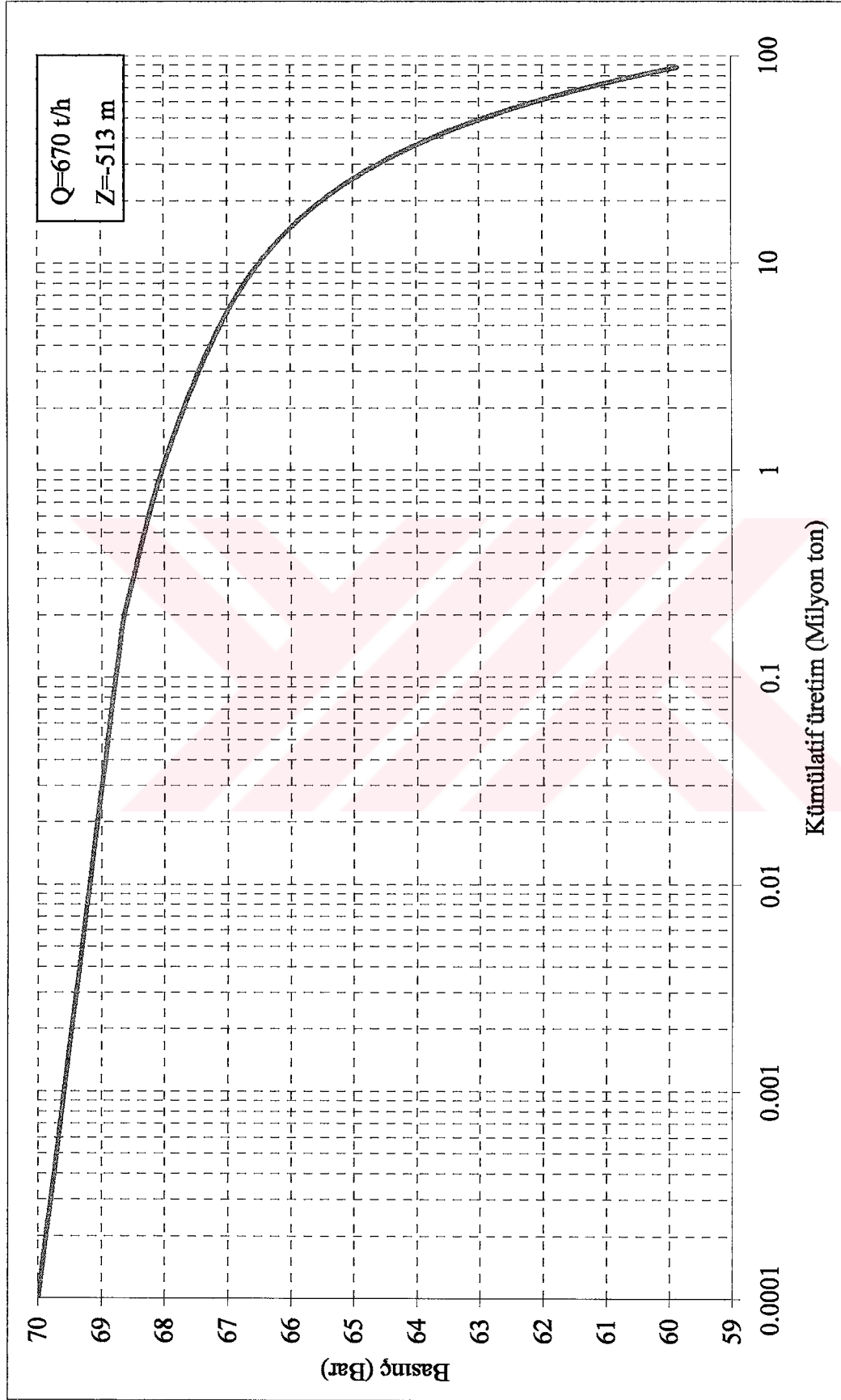
Kuyu adı	Ortalama üretim debisi (t/h)	Toplam üretim (10^6 ton)
KD6	60.24	7.915
KD13	66.93	8.795
KD14	80.32	10.554
KD15	87.01	11.433
KD16	127.15	16.710
KD20	93.70	12.313
KD21	87.01	11.433
KD22	66.93	8.795
Toplam Üretim		87.948

Yapılan simülasyon sonucunda deniz seviyesinden –513 m de ortalama rezervuar basıncında 10.14 bar düşüm elde edilmiştir (şekil 4.3, şekil 4.4). 10 günlük adımlarla 548 adımda yapılan 15 yıllık simülasyon sonucunda elde edilen basınç düşümü ile gerçek saha verileri arasında sadece 0.16 bar gibi çok küçük bir fark vardır. Bu da, çizelge 3.1 de verilen rezervuar parametrelerin gerçeğe çok yakın seçildiğini ve kullanılan simülasyon modelinin oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Yine yapılan bu 15 yıllık simülasyon sonucunda toplam üretimin gerçekleştirildiği her bir üretim kuyusundaki kuyu dibi basıncının zamanla değişimi şekil 4.5 den 4. 12 ye kadar olan şekillerde verilmiştir.

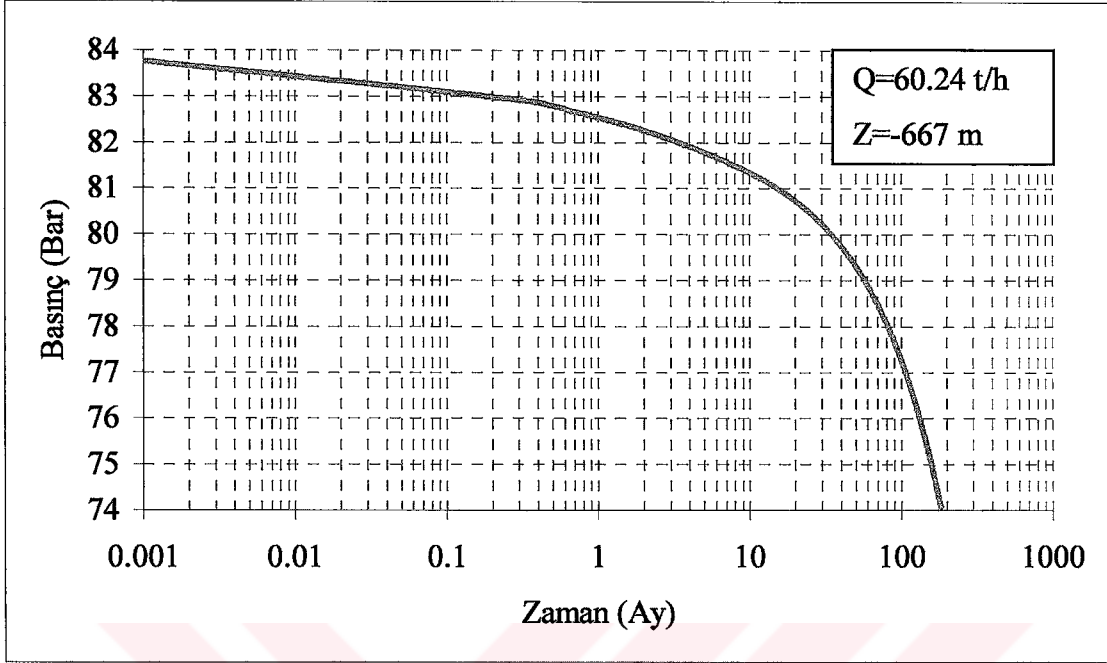
Şekil 4.5 den şekil 4.12 ye kadar olan şekiller incelendiğinde, bu 15 yıllık simülasyon sonucunda en düşük kuyu dibi basıncı düşümü 9.69 bar ile KD6 kuyusunda ve en yüksek kuyu dibi basıncı düşümü 10.4 bar ile KD16 kuyusunda gerçekleştiği görülmektedir. KD6 kuyusunun hem üretim bölgesinin kenarında yer alması (şekil 3.9) hem de toplam üretimdeki payının en az olması (çizelge 3.3) nedeniyle 15 yıl sonunda bu kuyudaki kuyu dibi basıncındaki düşme diğer kuyulara nazaran daha az olmuştur. KD16 kuyusunun da toplam üretimdeki payının en fazla olması nedeniyle (çizelge 3.3) 15 yıl sonunda kuyu dibi basıncındaki en fazla düşme bu kuyuda gerçekleşmiştir.



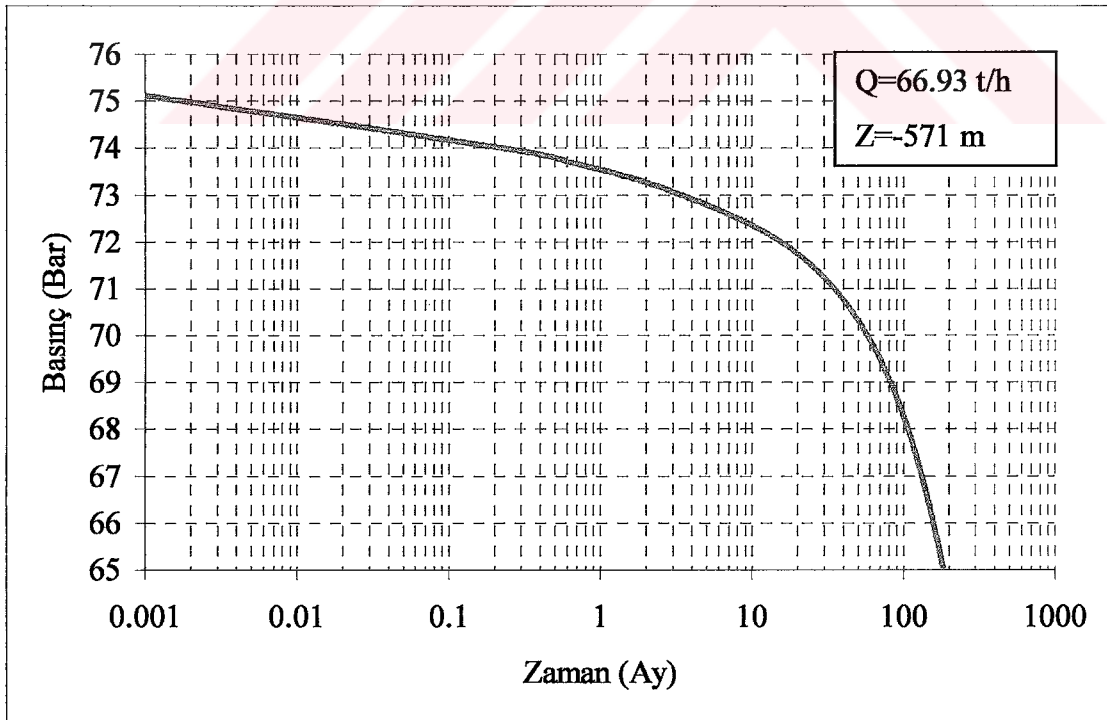
Şekil 4.3. Kızıldere jeotermal rezervuarında 1984-1998 yılları arasında ortalama rezervuar basıncının zamanla değişimi



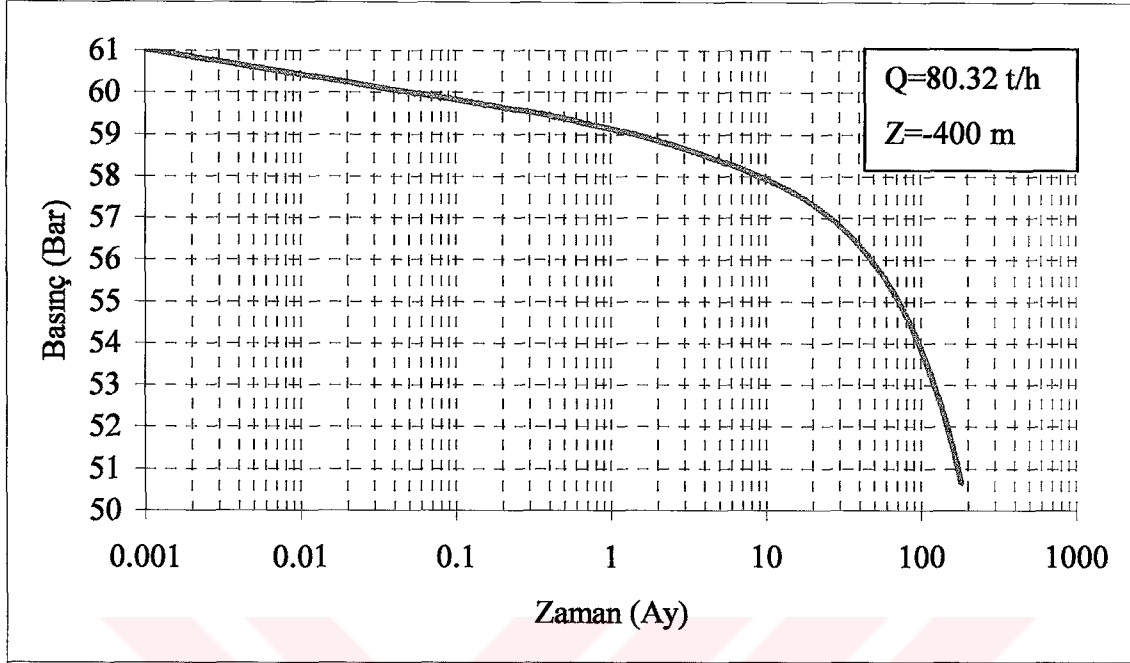
Şekil 4.4. Kızıldere jeotermal rezervuarında 1984-1998 yılları arasında ortalama rezervuar basıncının kümülatif üretimle değişimi



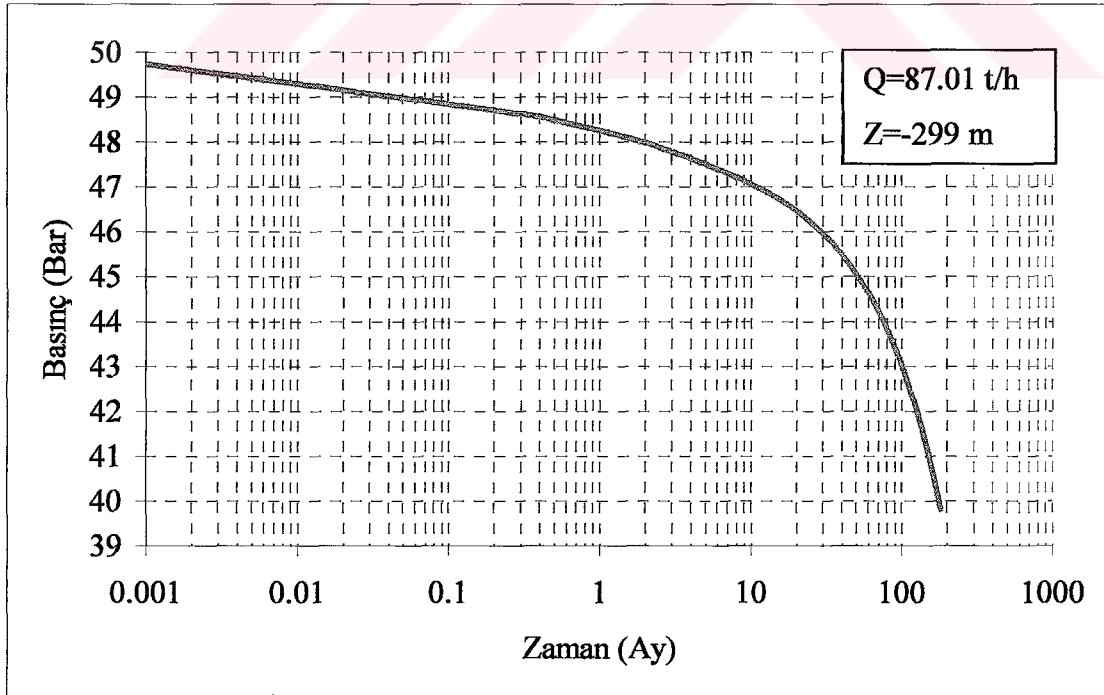
Şekil 4.5. KD6 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi



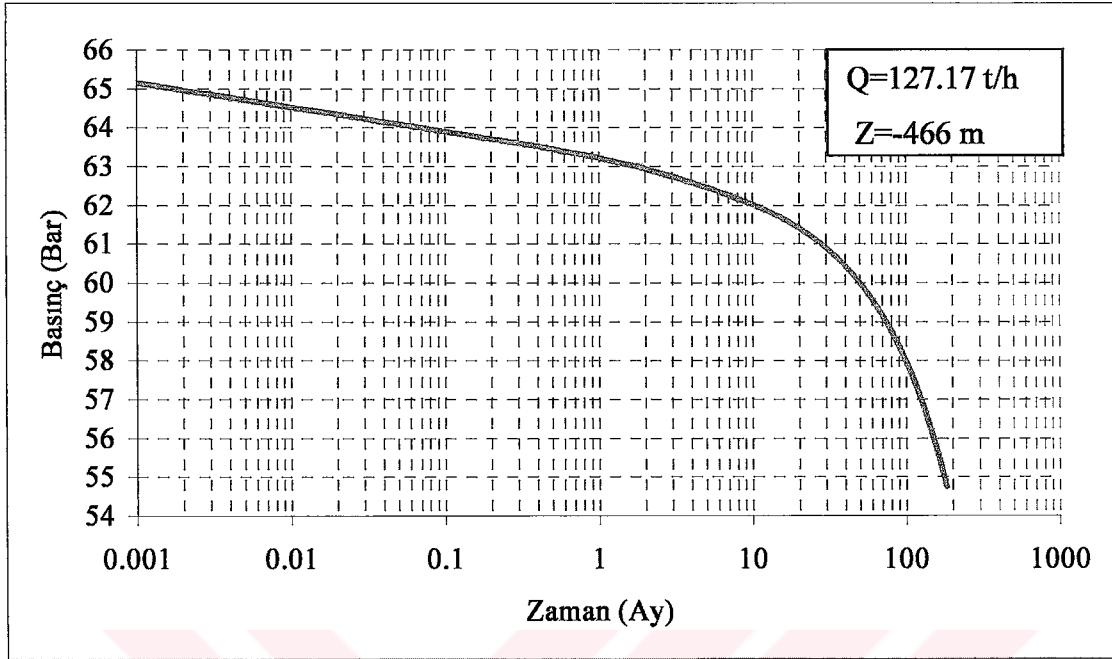
Şekil 4.6. KD13 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi



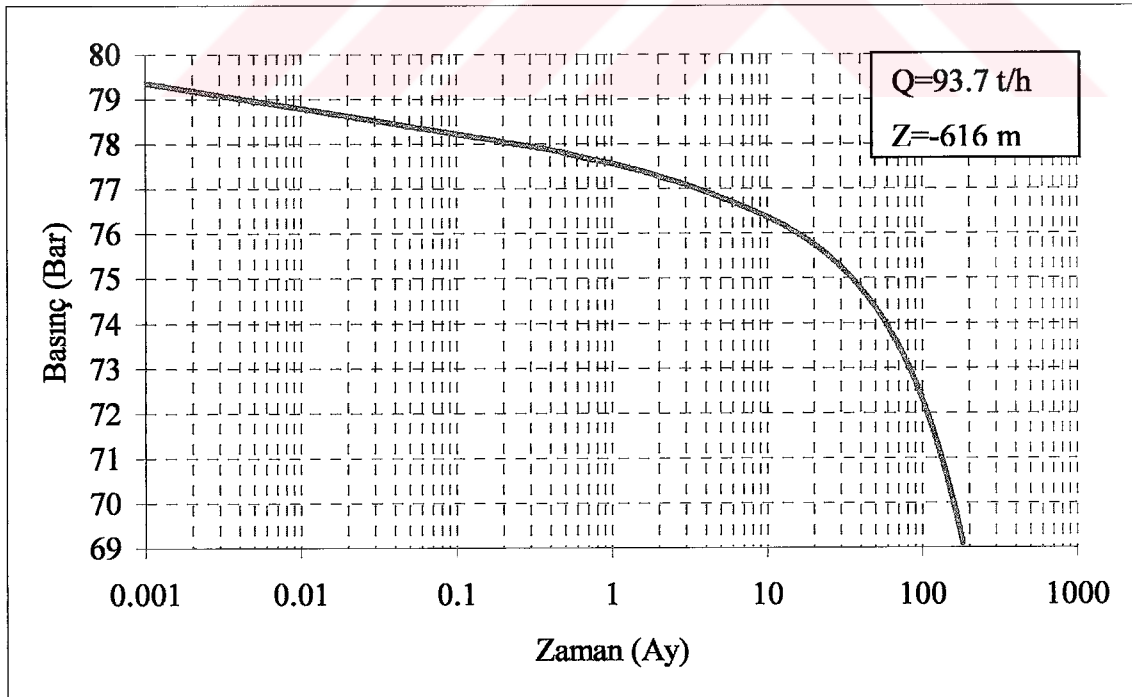
Şekil 4.7. KD14 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi



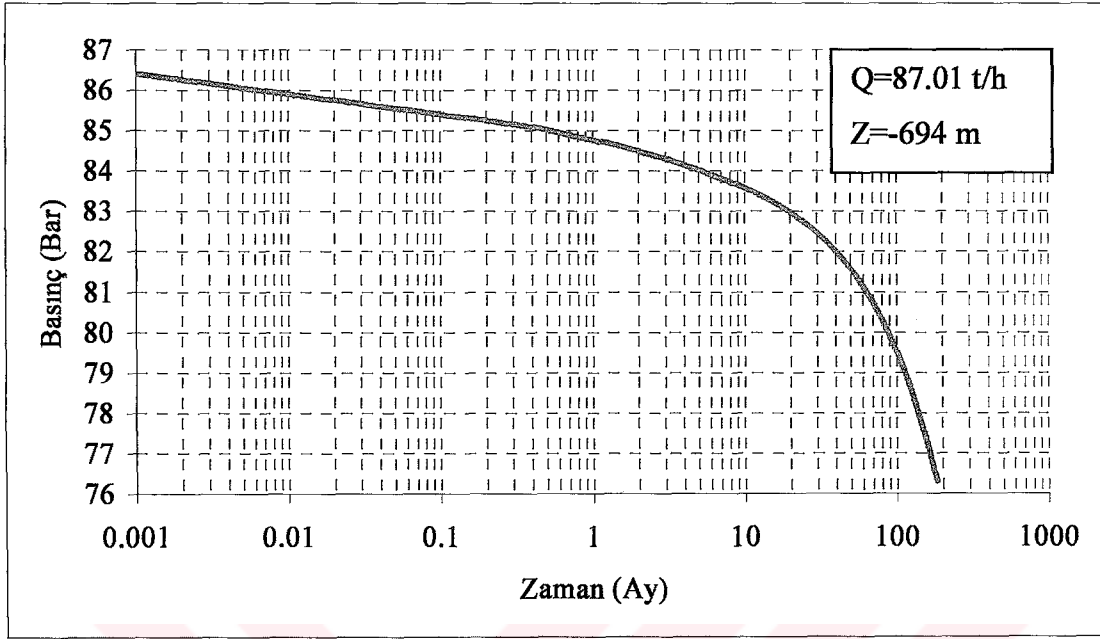
Şekil 4.8. KD15 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi



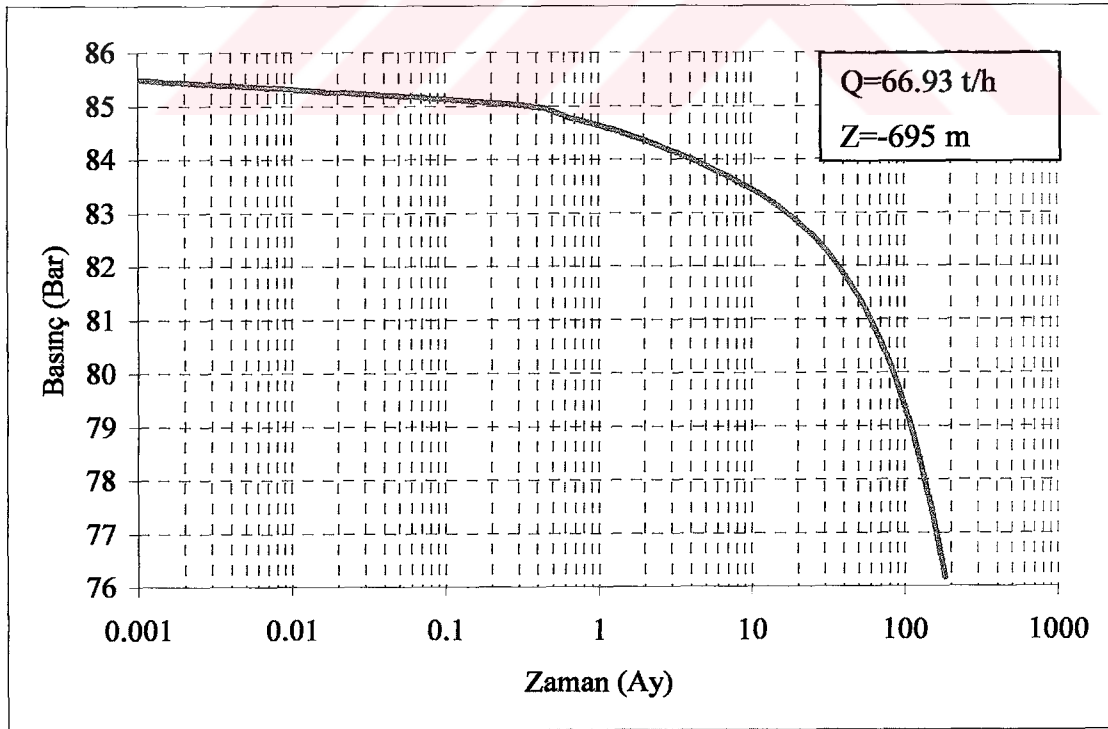
Şekil 4.9. KD16 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi



Şekil 4.10. KD 20 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi



Şekil 4.11. KD 21 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi



Şekil 4.12. KD22 kuyusunda 1984-1998 yılları arasında kuyu dibi basıncının zamanla değişimi

4.2. Kızıldere Jeotermal Rezervuarının Çeşitli Üretim Senaryolarına Göre Performansının Değerlendirilmesi

Kızıldere jeotermal rezervuarı için doymuşluk basıncı, yani jeotermal akışkanın üretilbileceği en düşük rezervuar basıncı 20 bar olarak kabul edilirse başlangıçta deniz seviyesinden –513 m de 70 bar olan ortalama rezervuar basıncının 50 bar düşmesine izin verilebilir. Bu nedenle rezervuardan değişik üretim senaryolarına göre yapılacak jeotermal akışkan üretimi sonucunda rezervuar basıncında ne kadar süre sonra 50 bar basınç düşümü meydana gelecek ve kümülatif olarak ne kadar jeotermal akışkan üretimi yapılabileceği merak konusudur. Üretim kuyularının hepsi aynı derinlikte olmadıkları için her bir üretim senaryosuna göre kuyuların kuyu dibi basınçlarının 20 bara düşme süreleri de farklı olacaktır. Bu nedenle hangi kuyudan ne kadar süre faydalanılacağı da belirlenmesi gerekmektedir. Kızıldere jeotermal sahasındaki elektrik üretim santralını 10 MW güçte çalıştırmak için 870 t/h, 15 MW güçte çalıştırmak için 1305 t/h ve 20 MW güçte çalıştırmak için 1740 t/h debide jeotermal akışkana ihtiyaç vardır (Aksoy 1997, Durak ve Yeltekin 2000). Bu ihtiyaçlar göz önüne alınarak rezervuardan yapılması muhtemel altı üretim senaryosu aşağıda çizelge 4.2 de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kızıldere jeotermal rezervuarından değişik üretim senaryolarına göre yapılan jeotermal akışkan üretimi ve bu üretimin kuyulara dağılımı

Kuyu adı	Toplam üretim debisi (t/h)					
	670	870	1000	1305	1500	1740
KD6	60.24	78.3	90	117.45	135	156.6
KD13	66.93	87	100	130.5	150	174
KD14	80.32	104.4	120	156.6	180	208.8
KD15	87.01	113.1	130	169.65	195	226.2
KD16	127.15	165.3	190	247.95	285	330.6
KD20	93.70	121.8	140	182.7	210	243.6
KD21	87.01	113.1	130	169.65	195	226.2
KD22	66.93	87	100	130.5	150	174

Yukarıda çizelge 4.2 de verilen üretim senaryolarına göre Kızıldere jeotermal rezervuarının simülasyonu yapılarak deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının ve her bir üretim kuyusunun kuyu dibi basıncının zamanla ve kümülatif üretimle değişimi aşağıda şekil 4.13 den 4.30 a kadar olan şekillerde verilmiştir.

- **670 t/h üretim debisi için rezervuarın ömrü ve üretilebilecek toplam jeotermal akışkan miktarı**

Şekil 4.13 incelendiğinde, şu anda Kızıldere jeotermal sahasında 8 üretim kuyusundan yapılan saatte toplam 670 ton üretime bu şekilde devam edilirse deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının 20 bara yaklaşık 103.3 yılda düşeceği görülmektedir. Serpen (2000) Kızıldere jeotermal sahası için yaptığı stokastik çalışmada bu sürenin 75 ile 135 yıl arasında değiştiğini hesaplamıştır. Aynı üretim senaryosu için şekil 4.14 den deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının 20 bara düşene kadar rezervuardan kümülatif olarak 600 milyon ton jeotermal akışkan üretilebileceği görülmektedir.

- **870 t/h üretim debisi için rezervuarın ömrü ve üretilebilecek toplam jeotermal akışkan miktarı**

Kızıldere jeotermal rezervuarından toplam 870 t/h jeotermal akışkan üretilmesi halinde deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının 20 bara yaklaşık 36.2 yılda düşeceği hesaplanmıştır (şekil 4.13). Bu üretim senaryosu için 36.2 yıl sonundan rezervuardan 276 milyon ton jeotermal akışkanın üretilebileceği tespit edilmiştir.

- **1000 t/h üretim debisi için rezervuarın ömrü ve üretilebilecek toplam jeotermal akışkan miktarı**

Kızıldere jeotermal rezervuarından toplam 1000 t/h jeotermal akışkan üretilmesi halinde deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının 20 bara yaklaşık 24.6

yılda düşeceği hesaplanmıştır (şekil 4.13). Bu üretim senaryosu için 24.6 yıl sonundan rezervuardan 216 milyon ton jeotermal akışkanın üretilbileceği tespit edilmiştir.

- **1305 t/h üretim debisi için rezervuarın ömrü ve üretilbilecek toplam jeotermal akışkan miktarı**

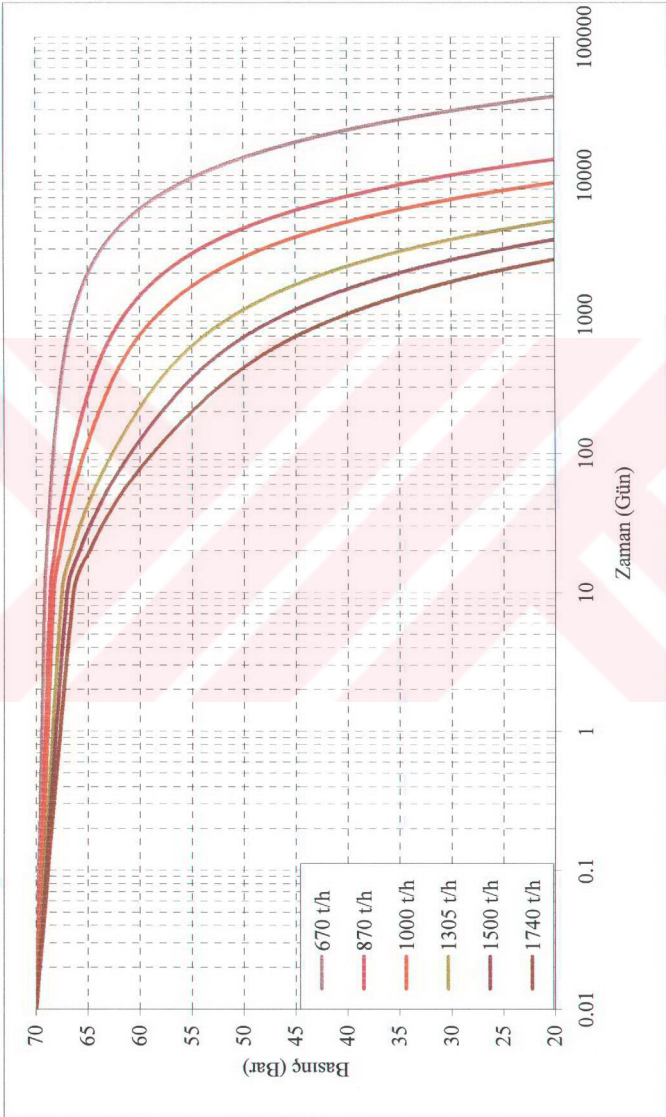
Kızıldere jeotermal rezervuarından toplam 1305 t/h jeotermal akışkan üretilmesi halinde deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının 20 bara yaklaşık 13.1 yılda düşeceği hesaplanmıştır (şekil 4.13). Bu üretim senaryosu için 13.1 yıl sonundan rezervuardan 149 milyon ton jeotermal akışkanın üretilbileceği tespit edilmiştir.

- **1500 t/h üretim debisi için rezervuarın ömrü ve üretilbilecek toplam jeotermal akışkan miktarı**

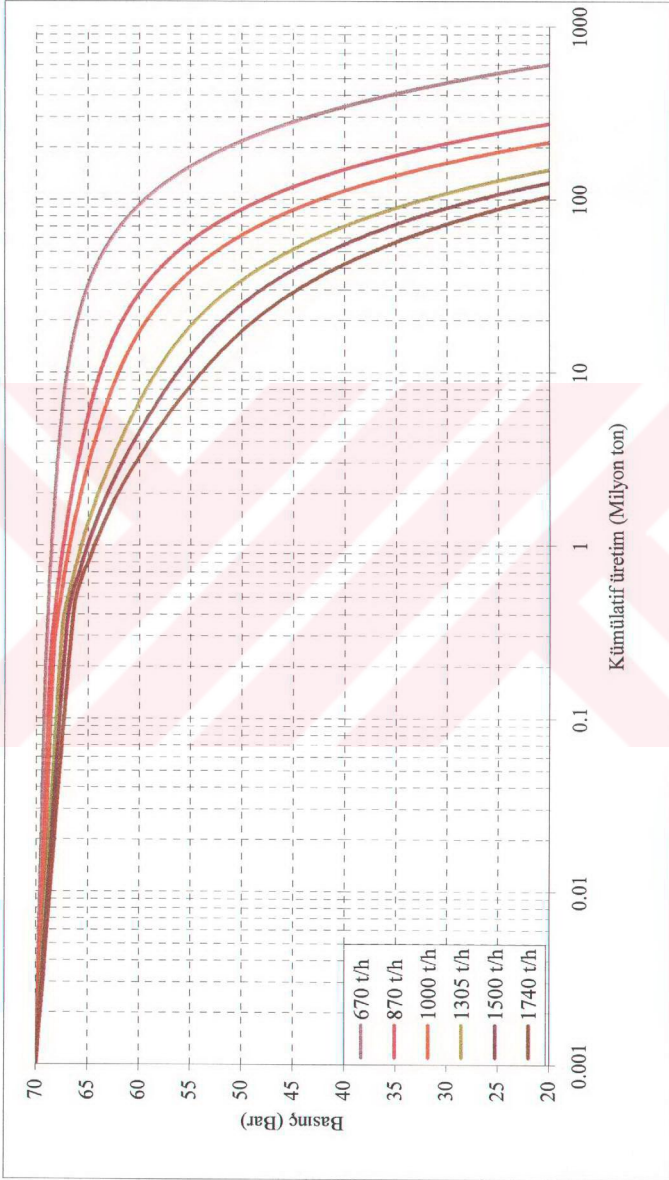
Kızıldere jeotermal rezervuarından toplam 1500 t/h jeotermal akışkan üretilmesi halinde deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının 20 bara yaklaşık 9.7 yılda düşeceği hesaplanmıştır (şekil 4.13). Bu üretim senaryosu için 9.7 yıl sonundan rezervuardan 126 milyon ton jeotermal akışkanın üretilbileceği tespit edilmiştir.

- **1740 t/h üretim debisi için rezervuarın ömrü ve üretilbilecek toplam jeotermal akışkan miktarı**

Kızıldere jeotermal rezervuarından toplam 1740 t/h jeotermal akışkan üretilmesi halinde deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının 20 bara yaklaşık 6.9 yılda düşeceği hesaplanmıştır (şekil 4.13). Göktekin ve Alkan (1994) yapmış oldukları boyutsuz model çalışmasında bu süreyi 6 yıl olarak tahmin etmişlerdir. Bu üretim senaryosu için 6.9 yıl sonundan rezervuardan 105 milyon ton jeotermal akışkanın üretilbileceği tespit edilmiştir.



Şekil 4.13. Kızıldere jeotermal rezervuarında $Z=513$ m den yapılan çeşitli üretim debileri için ortalama rezervuar basıncının zamanla değişimi



Şekil 4.14. Kızıldere jeotermal rezervuarında $Z=-513$ m den yapılan çeşitli üretim debileri için ortalama rezervuar basıncının kümülatif üretimle değişimi

4.3. 2003 Yılından İtibaren Değişik Üretim Senaryolarının Uygulanması Halinde Ortalama Rezervuar Ömrünün Tahmini

2002 yılı sonu itibariyle yani 1984–2002 yılları arasındaki 19 yıllık süre sonunda deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının 12.03 bar düşeceği görülmektedir (şekil 4.13). Bu nedenle 2003 yılından itibaren ortalama rezervuar basıncının 20 bara düşmesi için 37.97 bar basınç düşümüne izin verilebilir.

- **2003 yılından itibaren ortalama jeotermal akışkan üretiminin 870 t/h olması halinde rezervuarın ömrü**

Kızıldere jeotermal rezervuarındaki jeotermal akışkan üretiminin 2003 yılından itibaren 8 adet üretim kuyusundan saatte toplam 870 tona çıkarılması durumunda ortalama rezervuar basıncının yaklaşık 31 yılda 20 bara düşeceği ve bu süre içerisinde 236 milyon ton jeotermal akışkanın üretilebileceği tespit edilmiştir (şekil 4.13 ve şekil 4.14). Rezervuardan 1984-2002 yılları arasında da 670 t/h üretimle 112 milyon ton üretim yapıldığı için toplam olarak 50 yıl sonunda 348 milyon ton jeotermal akışkan üretilmiş olacaktır.

- **2003 yılından itibaren ortalama jeotermal akışkan üretiminin 1000 t/h olması halinde rezervuarın ömrü**

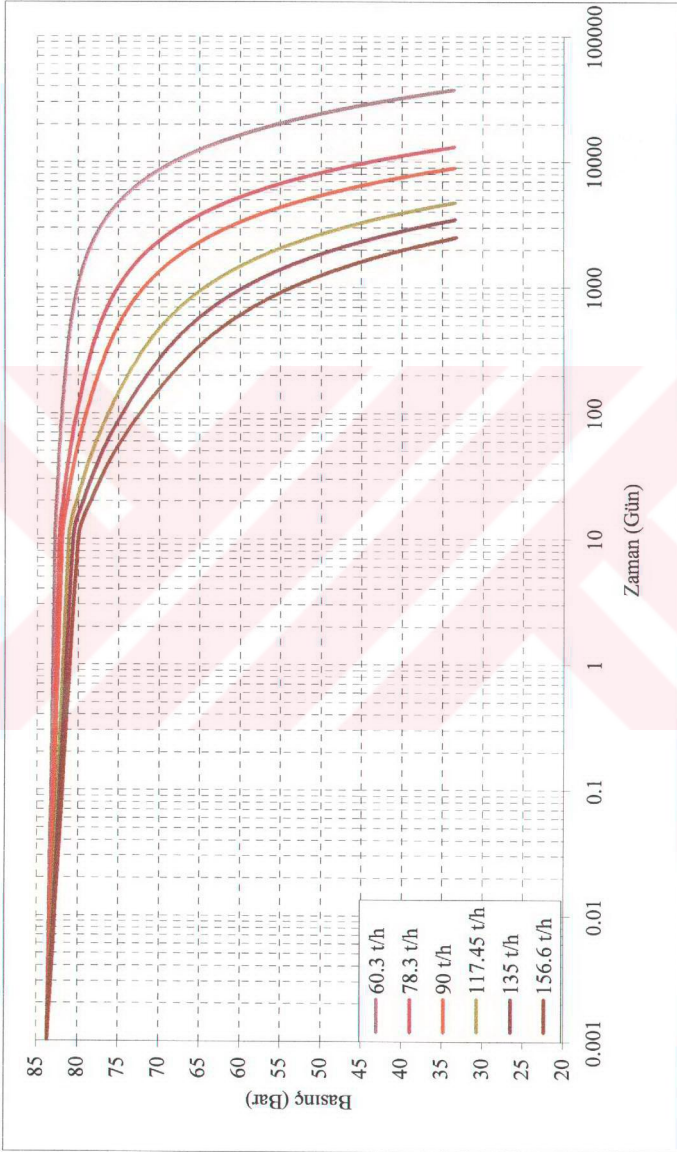
Jeotermal akışkan üretiminin 2003 yılından itibaren saatte 1000 tona çıkarılması durumunda ortalama rezervuar basıncının yaklaşık 22 yılda 193 milyon ton jeotermal akışkan üreterek 20 bara düşeceği görülmektedir. (şekil 4.13 ve şekil 4.14). Rezervuardan 1984-2002 yılları arasında da 670 t/h üretimle 112 milyon ton üretim yapıldığı için toplam olarak 41 yıl sonunda 305 milyon ton jeotermal akışkan üretimi yapılmış olacaktır.

- **2003 yılından itibaren ortalama jeotermal akışkan üretiminin 1305 t/h olması halinde rezervuarın ömrü**

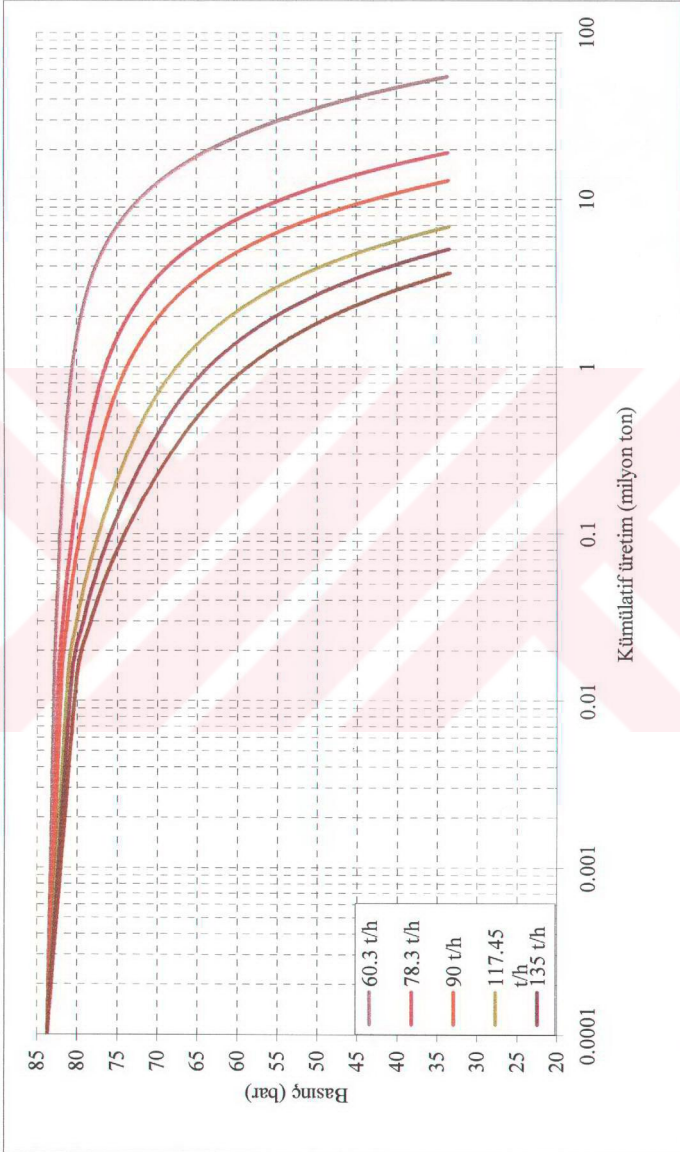
2003 yılından itibaren jeotermal akışkan üretiminin saatte 1305 tona çıkarılması istenirse, yaklaşık 12 yıl da 137 milyon ton jeotermal akışkan üretimi sonunda rezervuar basıncı 20 bara düşer (şekil 4.13 ve şekil 4.14). Rezervuardan 1984-2002 yılları arasında da 670 t/h üretimle 112 milyon ton üretim yapıldığı için toplam olarak 31 yıl sonunda 249 milyon ton jeotermal akışkan üretimi yapılmış olur.

- **2003 yılından itibaren ortalama jeotermal akışkan üretiminin 1500 ve 1740 t/h olması halinde rezervuarın ömrü**

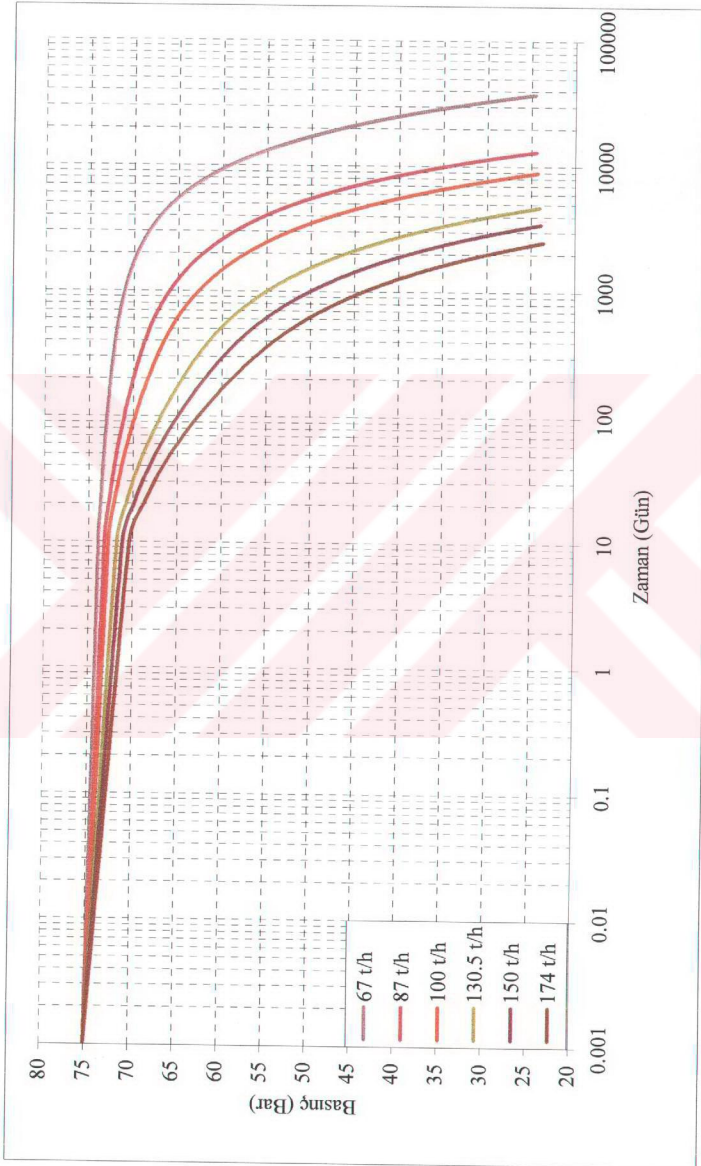
Jeotermal akışkan üretiminin 2003 yılından itibaren 1500 t/h ve 1740 t/h olması durumunda sırasıyla 9 yıl da 118 milyon ton ve 6.5 yılda 99 milyon ton jeotermal akışkan üretimim yapılarak ortalama rezervuar basıncı 20 bara düşer (şekil 4.13 ve şekil 4.14). Rezervuardan 1984-2002 yılları arasında da 670 t/h üretimle 112 milyon ton üretim yapıldığı için toplam olarak 28 yıl sonunda 230 milyon ton ve 25.5 yılda 211 milyon ton jeotermal akışkan üretimi yapılmış olur.



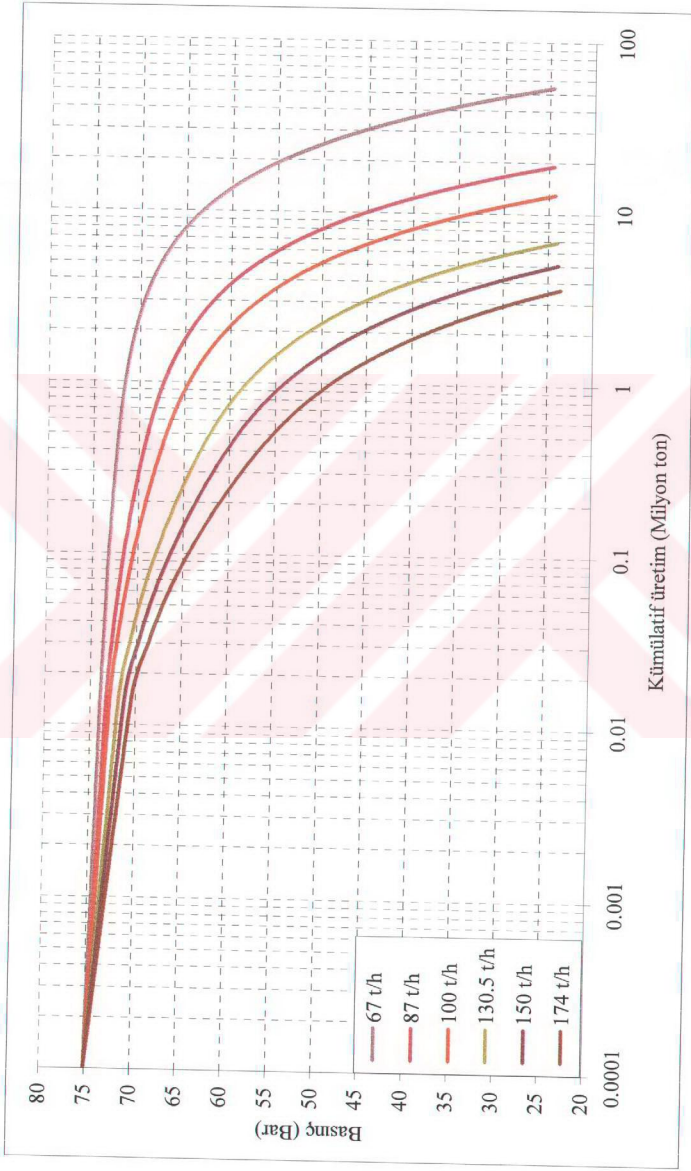
Şekil 4.15. KD6 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın zamanla değişimi ($Z=667$ m)



Şekil 4.16. KD6 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın kümülatif üretimle değişimi ($Z=667$ m)



Şekil 4.17. KD13 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın zamanla değişimi ($Z=571$ m)



Şekil 4.18. KD13 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basının kümülatif üretimle değişimi ($Z=571$ m)

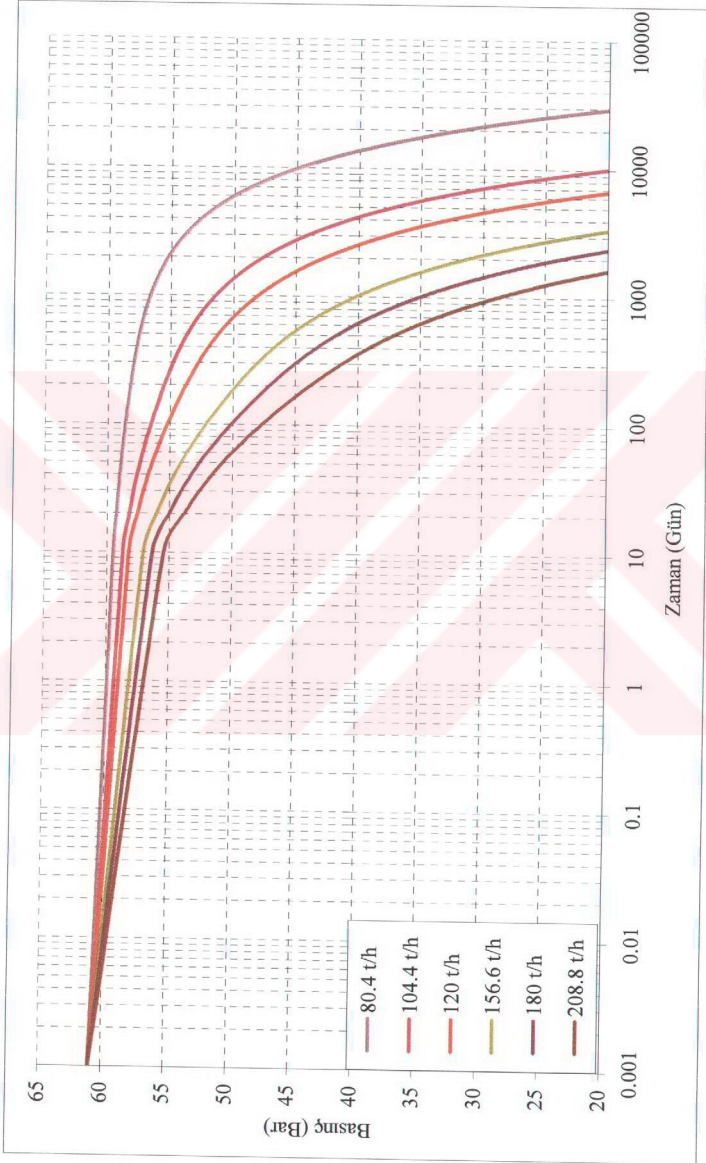
4.4. 2003 Yılından İtibaren Değişik Üretim Senaryolarının Uygulanması Halinde KD14, KD15 ve KD16 Kuyularının Ömürlerinin Tahmini

Kızıldere jeotermal sahasındaki 8 adet üretim kuyusundan KD14, KD15 ve KD16 nın kuyu dibi derinlikleri deniz seviyesinden -513 m olan ortalama rezervuar derinliğinden daha sığdır (çizelge 3.3). Bu nedenle, bu kuyuların kuyu dibi basınçlarının 20 bara düşme süresi ortalama rezervuar basıncının 20 bara düşme süresinden daha azdır. Diğer bir deyişle, bu kuyular ömürlerini diğerlerine nazaran daha önce tamamlayacaklardır. Örneğin, rezervuardan 670 t/h üretim yapıldığı zaman ortalama rezervuar basıncının 20 bara düşme süresi 103 yıl iken (şekil 4.13) bu süre KD14 kuyusunda 81 yıl (şekil 4.19), KD15 kuyusunda 58 yıl (şekil 4.21) ve KD16 kuyusunda ise 91 yıldır (şekil 4.23).

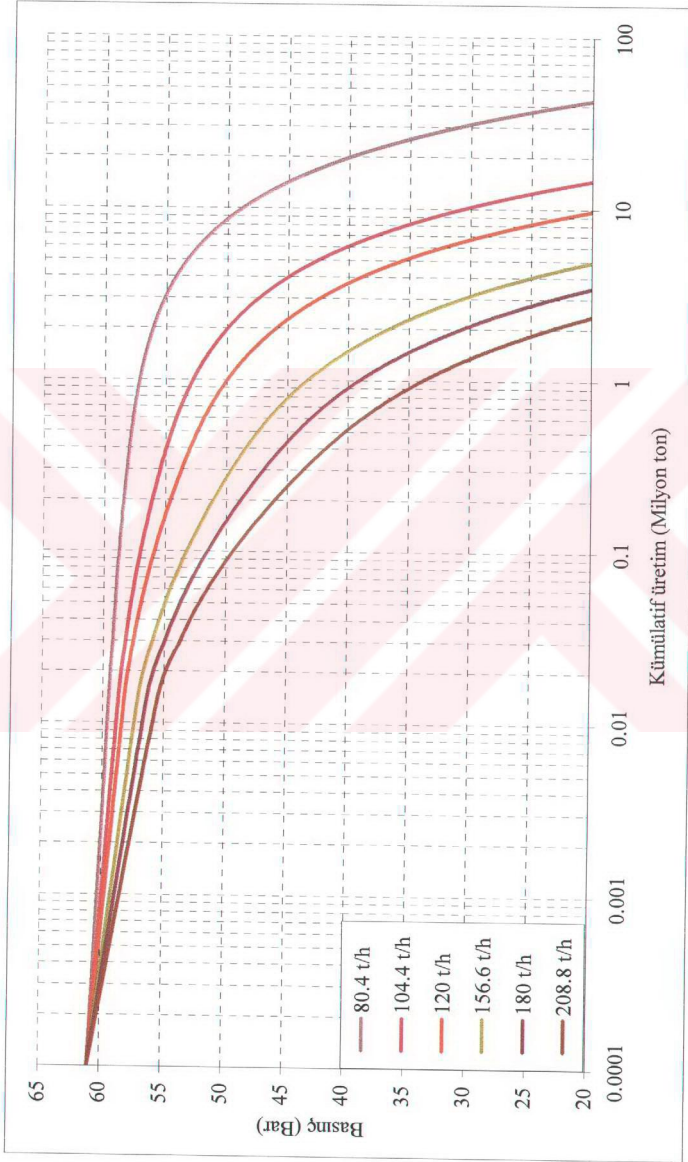
2003 yılından itibaren değişik üretim senaryolarının uygulanması durumunda KD14, KD15 ve KD16 kuyularının kuyu dibi basınçlarının ne kadar sürede 20 bara düşeceği ve toplam ne kadar jeotermal akışkan üretebilecekleri şekil 4.19 - 4.25 den görülebileceği gibi aşağıda çizelge 4.3 te de verilmiştir.

Çizelge 4.3. 2003 yılından itibaren değişik üretim senaryolarının uygulanması halinde KD14, KD15 ve KD16 kuyularının kuyu dibi basınçlarının (KDB) 20 bara düşme süreleri ve üretebilecekleri toplam jeotermal akışkan miktarları

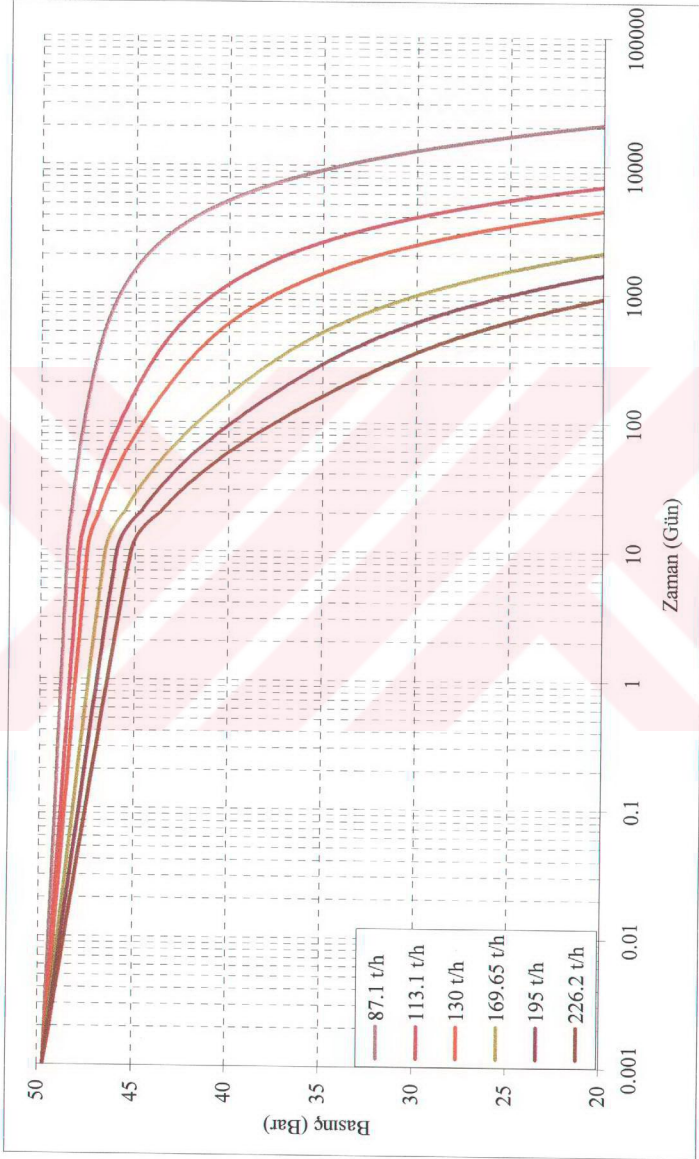
Kuyu adı		Toplam üretim debisi (t/h)					
		670	870	1000	1305	1500	1740
KD14	KDB'nin 20 bara düşme süresi (yıl)	62.9	23.4	16.2	8.7	6.2	4.3
	Toplam Üretim ($\times 10^6$ ton)	57.7	34.8	30.4	25.3	23.2	21.2
	KDB'nin 20 bara düşme süresi (yıl)	38.1	14.2	9.7	5	3.5	2.3
KD15	Toplam Üretim ($\times 10^6$ ton)	43.6	28.6	25.5	21.9	20.5	19.1
	KDB'nin 20 bara düşme süresi (yıl)	72	26.8	18.7	10.1	7.3	5.1
	Toplam Üretim ($\times 10^6$ ton)	101.5	60	52.3	43.1	39.4	36



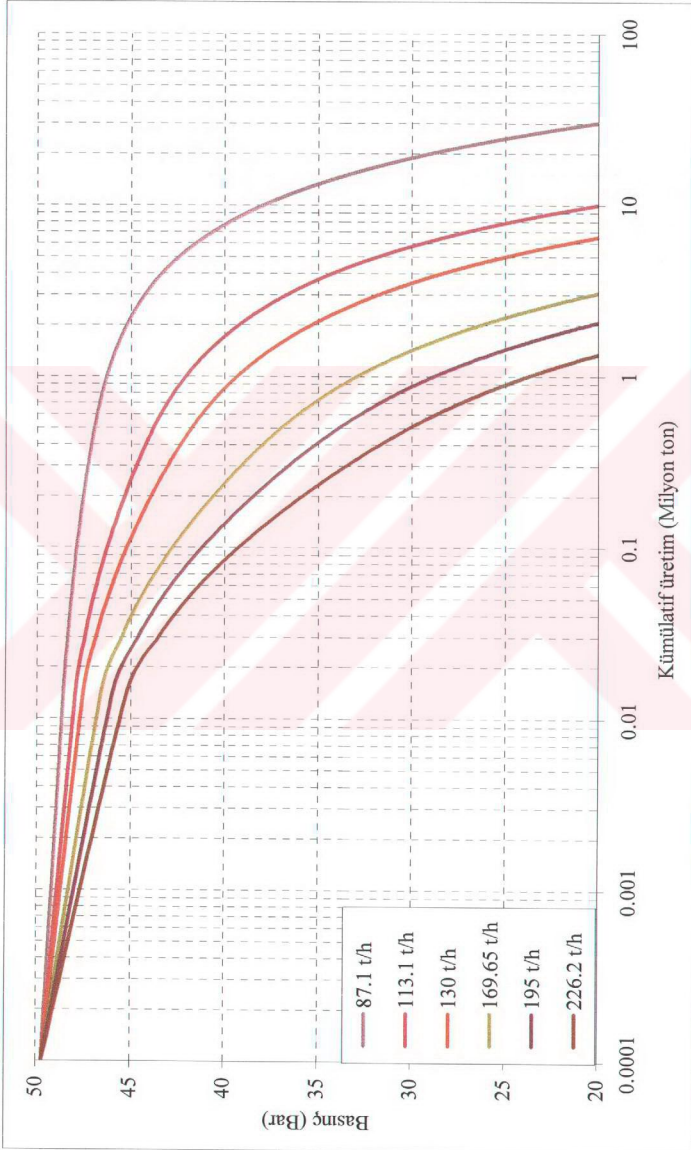
Şekil 4.19. KD14 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncın zamanla değişimi (Z=400 m)



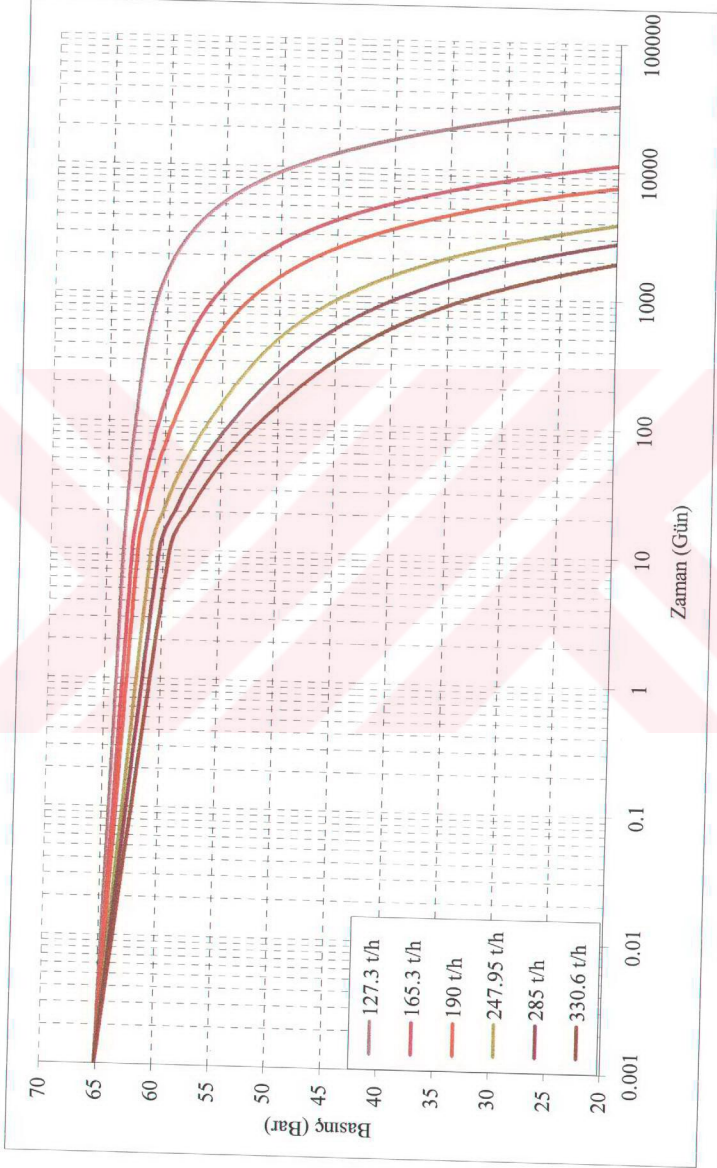
Şekil 4.20. KD14 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=400$ m)



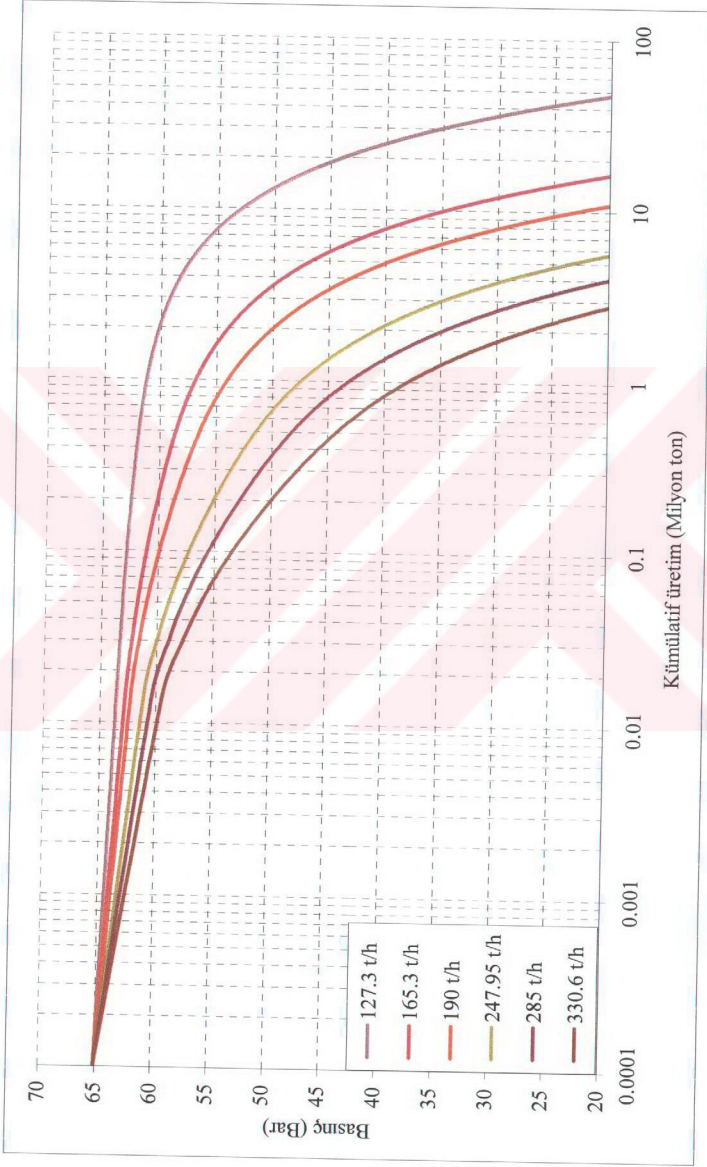
Şekil 4.21. KD15 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi (Z=299 m)



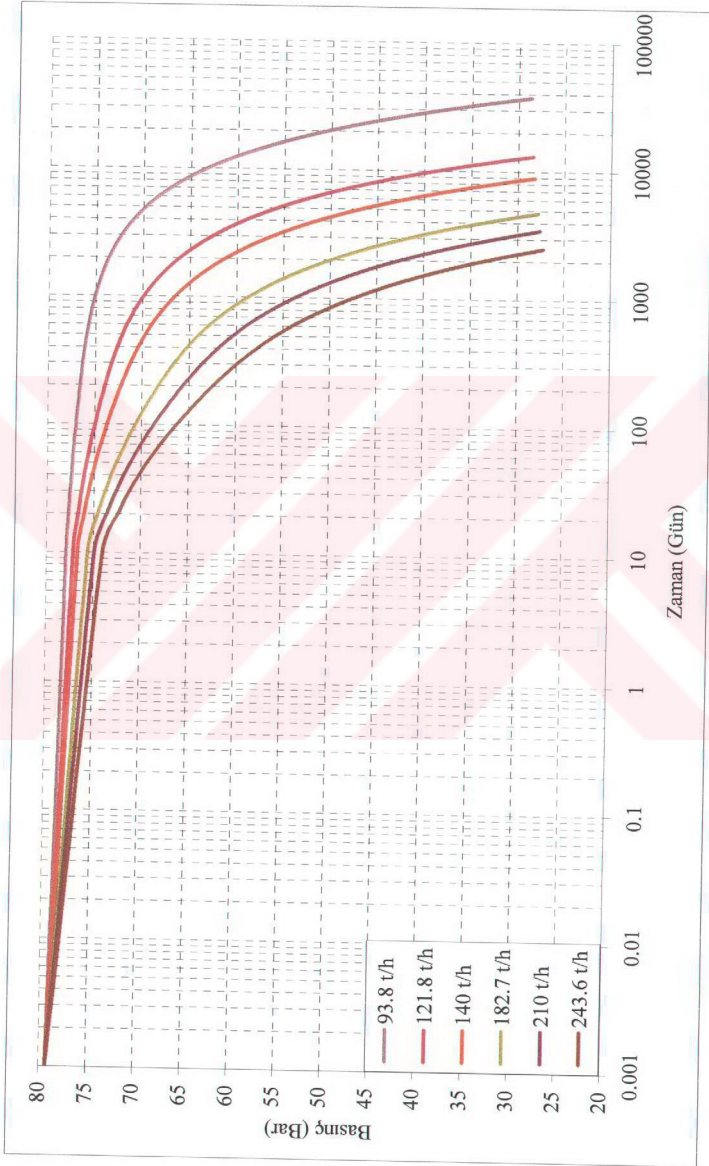
Şekil 4.22. KD15 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi (Z=-299 m)



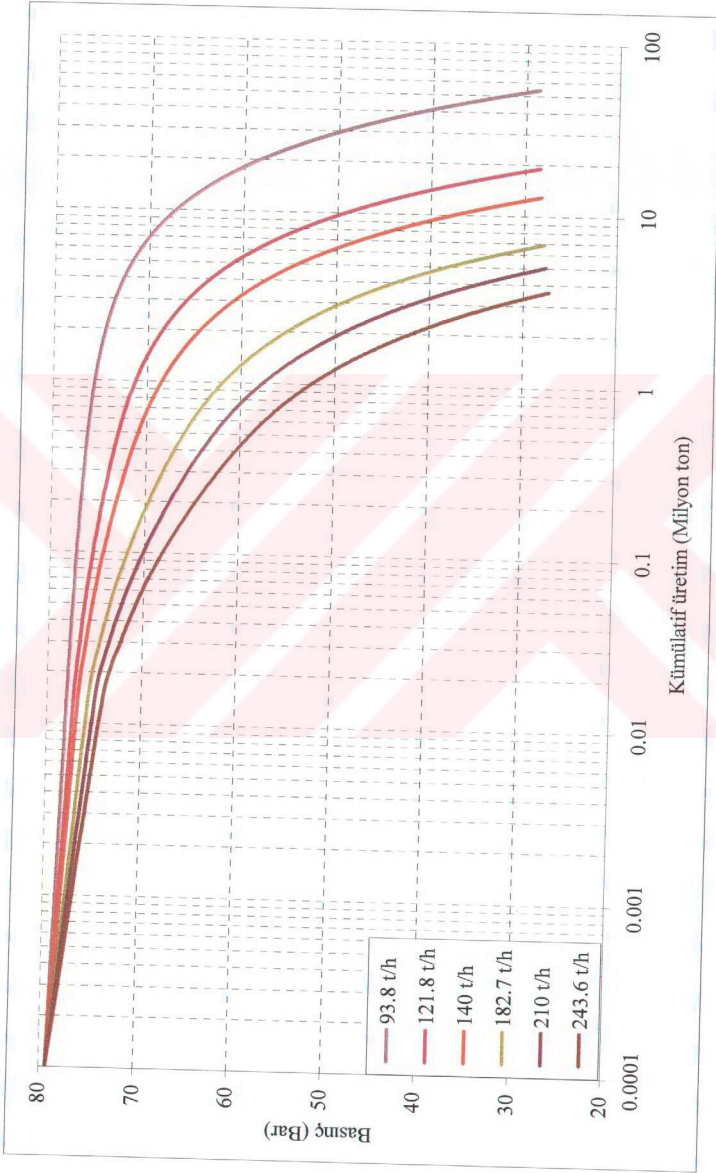
Şekil 4.23. KD16 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=466$ m)



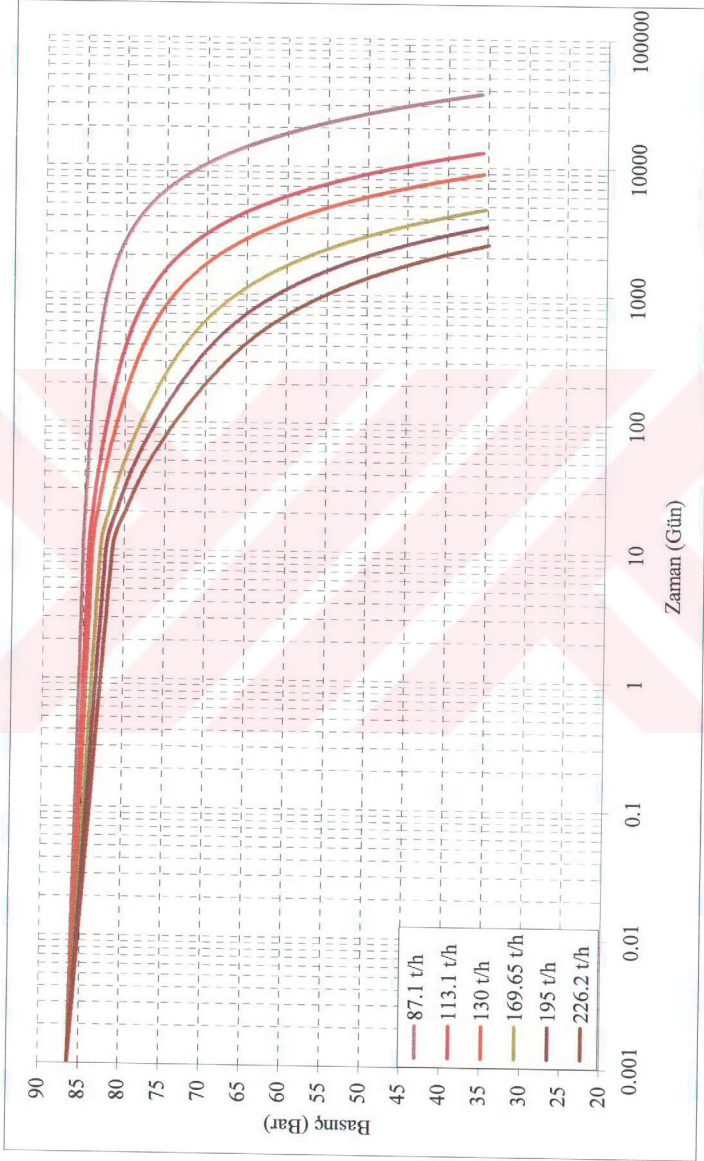
Şekil 4.24. KD16 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=-466$ m)



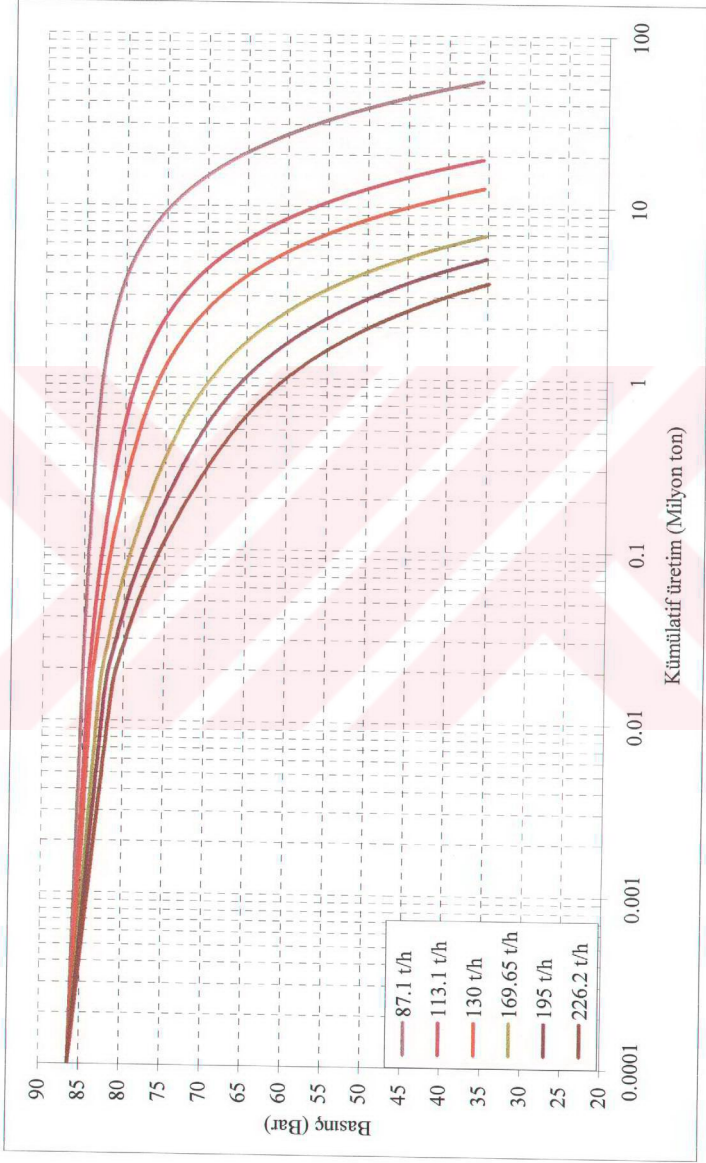
Şekil 4.25. KD20 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=616$ m)



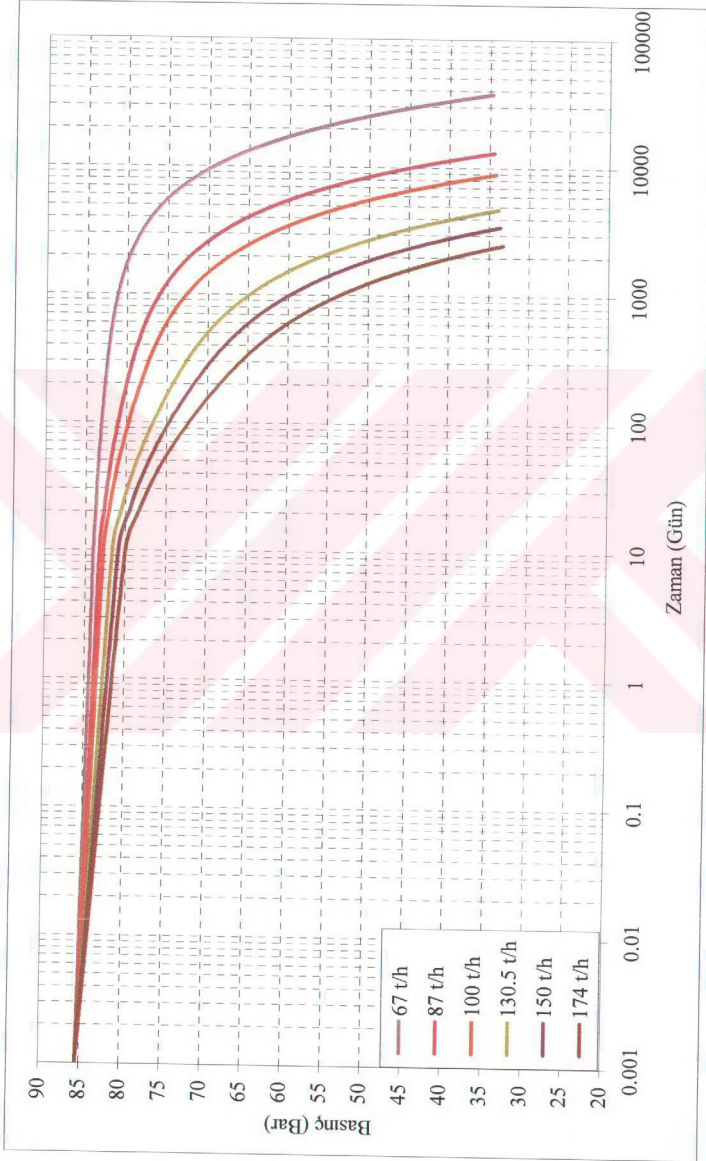
Şekil 4.26. KD20 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=-616$ m)



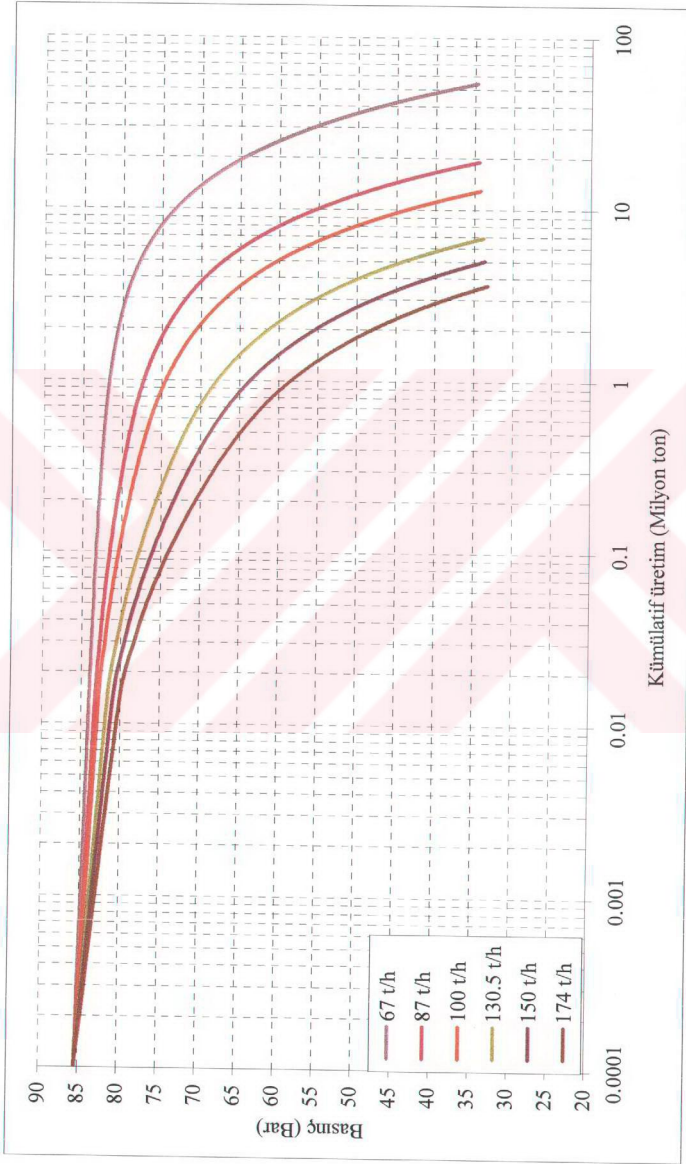
Şekil 4.27. KD21 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=694$ m)



Şekil 4.28. KD21 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=694$ m)



Şekil 4.29. KD22 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının zamanla değişimi ($Z=684$ m)



Şekil 4.30. KD22 kuyusundan yapılan çeşitli üretim debileri için kuyu dibi basıncının kümülatif üretimle değişimi ($Z=684$ m)

4.5. 2003 Yılından İtibaren Değişik Üretim Senaryolarının Uygulanması Halinde KD6, KD13, KD20, KD21 ve KD22 Kuyularının Ömürlerinin Tahmini

KD6, KD13, KD20, KD21 ve KD22 kuyularının kuyu dibi derinlikleri deniz seviyesinden –513 m olan ortalama rezervuar derinliğinden daha derindir (çizelge 3.3). Bu nedenle, ortalama rezervuar basıncının 20 bara düşmesi sırasında bu kuyuların kuyu dibi basınçlarının yaklaşık 30 - 35 bar civarında olduğu görülmektedir (şekil 4.15, 4.17, 4.25, 4.27, 4.29). Dolayısıyla bu kuyular ortalama rezervuar basıncının 20 bara düşmesinden sonra bir süre daha üretimlerine devam edebilirler. Aşağıda çizelge 4.4 de, bu kuyuların değişik üretim senaryolarına göre ömürleri ve üretebilecekleri toplam jeotermal akışkan miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.4. 2003 yılından itibaren değişik üretim senaryolarının uygulanması halinde ortalama rezervuar basıncının (ORB) 20 bara düşme süresi içerisinde KD6, KD13, KD20, KD21 ve KD22 kuyularından üretilebilecek toplam jeotermal akışkan miktarları

Kuyu adı		Toplam üretim debisi (t/h)					
		670	870	1000	1305	1500	1740
KD6	ORB nın 20 bara düşme süresi (yıl)	84.3	30.9	21.8	12.2	9	6.5
	Toplam Üretim ($\times 10^6$ ton)	54.6	31.2	27.2	22.6	20.7	19
KD13	ORB nın 20 bara düşme süresi (yıl)	84.3	30.9	21.8	12.2	9	6.5
	Toplam Üretim ($\times 10^6$ ton)	60.6	34.7	30.2	25.1	23	21.1
KD20	ORB nın 20 bara düşme süresi (yıl)	84.3	30.9	21.8	12.2	9	6.5
	Toplam Üretim ($\times 10^6$ ton)	84.9	48.6	42.3	35.1	32.2	29.5
KD21	ORB nın 20 bara düşme süresi (yıl)	84.3	30.9	21.8	12.2	9	6.5
	Toplam Üretim ($\times 10^6$ ton)	78.8	45.1	39.3	32.6	30	27.4
KD22	ORB nın 20 bara düşme süresi (yıl)	84.3	30.9	21.8	12.2	9	6.5
	Toplam Üretim ($\times 10^6$ ton)	60.6	34.7	30.2	25.1	23	21.1

5. SONUÇ

Bu çalışmada, sıcak su egemen jeotermal rezervuarların iki boyutlu (alansal) ve zamana bağlı (transient) simülasyonu için sonlu elemanlar yöntemini temel alan bir yöntem kullanılmış, gerekli formülasyonlar yapılarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan bilgisayar programı genel bir program olup MATLAB altında çalışmaktadır. Dolayısıyla herhangi bir sıcak su egemen jeotermal rezervuarın iki boyutlu zaman bağlı simülasyonu yapılabilmektedir.

Geliştirilen bilgisayar programına ait sonuçlar diğer bazı araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların uyduğu görülmüştür.

Geliştirilen bilgisayar programı ile ülkemizin en büyük jeotermal sahalarından biri olan Denizli – Kızıldere jeotermal sahasının, değişik üretim senaryolarına göre, iki boyutlu ve zamana bağlı simülasyonu yapılmıştır.

Kızıldere jeotermal sahasından, 1984 yılından beri elektrik üretiminde kullanılmak amacıyla düzenli bir şekilde jeotermal akışkan üretimi yapılmakta ve rezervuardaki basınç düşümü takip edilmektedir. Buradan hareketle (history matching) rezervuarın üretim bölgesindeki kalınlığının 1200 m, porozitesinin 0.15 ve permeabilitesinin de $4.17 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ (çizelge 3.1) olduğu bulunmuştur.

Kızıldere’de 20 MW gücünde bir elektrik santrali olmasına rağmen santral şu ana kadar yaklaşık ortalama 8 MW gücünde çalıştırılmıştır. Santralin bu şekilde ne kadar zaman daha çalıştırılabileceği, tam kapasite ile çalıştırılıp çalıştırılamayacağı yada şu anki üretimin ne kadar artırılabilceği gibi sorulara bu çalışmada cevap aranmıştır. Rezervuarın ömrü olarak, başlangıçta deniz seviyesinden –513 m deki ortalama 70 bar olan rezervuar basıncının doymuşluk basıncı olan 20 bara düşme süresi kabul edilmiştir. Kızıldere jeotermal sahasında 1984 yılından beri yaklaşık ortalama 670 t/h jeotermal akışkan üretimi yapılmıştır. Rezervuardan bu üretime devam edilecek olursa, rezervuarın ömrü, yani deniz seviyesinden –513 m deki ortalama rezervuar basıncının

doymuşluk basıncı olan 20 bara düşme süresi 103.3 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu süre içerisinde rezervuardan toplam 600 milyon ton jeotermal akışkan üretilebileceği tespit edilmiştir.

20 MW gücündeki santralin tam kapasite ile çalıştırılmasının istenmesi halinde rezervuardan 1740 t/h üretim yapılması gerektiğinden bu üretimi rezervuarın ancak 6.9 yıl yapabileceği, yani bu durumda rezervuarın ömrünün 6.9 yıl olacağı hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi 103.3 yıl ile 6.9 yıl arasında çok büyük bir fark vardır. Fakat rezervuarın ömrünün 103.3 yıl olması durumunda da 20 MW kurulu gücü olan santralin yarı kapasite ile bile çalışmadığı gerçeği vardır. Bu nedenle değişik üretim senaryolarına göre rezervuarın ömrünün ne kadar olacağı tespit edilmiştir.

Kızıldere jeotermal sahasındaki jeotermal akışkan üretiminin 2003 yılından itibaren saatte 870 tona çıkarılması veya santralin 10 MW gücünde çalıştırılması halinde, rezervuarın 31 yılda ömrünü tamamlayacağı hesaplanmıştır. 1984-2002 yılları arasında da 19 yıl üretim yapıldığı için rezervuardan toplam 50 yıl faydalanılmış olacaktır. Böylece 50 yıllık süre içerisinde toplam 348 milyon ton jeotermal akışkan elde edilebilir.

Saatteki üretimin 1000 tona çıkarılması halinde rezervuarın ömrü 2003 yılından itibaren 192 milyon ton üretimle 22 yıl olacağı hesaplanmıştır.

Santralin 15 MW gücünde çalıştırılmasının istenilmesi halinde rezervuardan saatte 1305 ton jeotermal akışkan üretilmesi gerekeceğinden 2003 yılından itibaren rezervuarın ömrü 137 milyon ton üretim sonucunda 12 yıl olacağı hesaplanmıştır.

Jeotermal akışkan üretiminin 1500 t/h olması halinde ise rezervuarın ömrünün 2003 yılından itibaren 118 milyon ton üretime karşın 9 yıl olacağı belirlenmiştir.

Kızıldere jeotermal sahasındaki kuyuların hepsinin kuyu dibi derinlikleri aynı olmadığı için ortalama rezervuar derinliği olan deniz seviyesinden -513 m den daha sığ olan kuyular ömürlerini diğerlerine nazaran daha erken tamamlamaktadırlar.

Rezervuarın toplam üretim debisinin 670 t/h olması halinde ömrü 103.3 yıl iken KD15 kuyusunun ömrü 57.1 yıl, KD14 kuyusunun ömrü 81.9 yıl ve KD16 kuyusunun ömrü 91 yıl olacağı hesaplanmıştır.

2003 yılından itibaren üretimin 870 t/h olması halinde rezervuarın ömrünün bu yıldan itibaren 31 yıl olacağının hesaplanmasına karşın, KD15 kuyusunun ömrünün 14.2 yıl, KD14 kuyusunun ömrünün 23.4 yıl ve KD16 kuyusunun ömrünün 26.8 yıl olacağı hesaplanmıştır. Diğer üretim senaryolarının uygulanması halinde bu kuyularının ömürlerinin ne kadar yıl olacağı çizelge 4.3 te verilmiştir.

Kızıldere jeotermal sahası için ilk defa böyle bir iki boyutlu bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma sayesinde herhangi bir üretim senaryosu için rezervuarın ve her bir üretim kuyusunun ömürleri ve üretebilecekleri akışkan miktarları ayrı ayrı tespit edilmiştir.

Çalışmada elde edilen bilgisayar programının, herhangi bir jeotermal rezervuardan elde edilebilecek toplam faydanın en büyük yapılması doğrultusunda kullanılması mümkündür..

Yukarıda da görüldüğü gibi, Kızıldere jeotermal sahasında halihazırda kurulu bulunan 20 MW gücündeki santral rezervuarın besleme süresi 6.9 yıl gibi kısa bir süredir. Hem santral tam kapasite ile çalıştırıp hem de rezervuarın ömrünün artırılmasının yollarını aramak gerekmektedir.

Bu gibi durumlarda dünyada başvuru olan yol geri basma (reinjection) işlemidir. Geri basma işlemi, jeotermal akışkanın elektrik üretim santralında kullanıldıktan tekrar rezervuara geri basılması işlemidir. Böylece hem rezervuardaki basınç düşümünün hem de çevre kirliliğinin önüne geçilebilmektedir.

Kızıldere'deki santral 20 MW gücünde çalıştırırken üretilen 1740 t/h jeotermal akışkanın yaklaşık 1500 t/h lik kısmı atık su olarak Menderes Nehri'ne atılacaktır. Bu sulardaki yüksek konsantrasyondaki, yaklaşık 20 ppm, bor büyük bir çevre kirliliğine

neden olacaktır. Bunu önlemek içinde Kızıldere'deki atık jeotermal sular mutlaka geri basma işlemine tabi tutulmalıdır.

Geri basma işlemi faydasının yanında bilinçsiz uygulanması halinde zararlıda olabilmektedir. Örneğin, geri basma kuyusu veya kuyuları uygun yerlerde seçilmez ise rezervuarda ısırl kirlenmeye, yani rezervuarın soğumasına neden olabilirler. Buda rezervuara faydadan çok zarar verir.

Bu nedenle ileride yapılacak olan çalışmalarda, rezervuarda en az ısırl kirlenmeye neden olacak ve basınç düşümünü önlemeye en fazla katkıda bulunacak geri basma kuyularının yerlerinin tespitine ihtiyaç vardır.

İleride yapılması gereken bir başka çalışma ise, halihazırdaki üretim kuyularının toplam üretimdeki paylarını rezervuar basıncında en az düşüm meydana getirecek şekilde optimize etmektir.

KAYNAKLAR

- Aksoy, N., 1997. Kızıldere (Denizli) Jeotermal Enerji Sahasının Reenjeksiyon Olanakları, Yüksek Lisans Tezi, DEÜ, İzmir.
- Atkinson, P. G., Celati, R., Corsi, R., Kucuk, F. And Ramey, H. J., 1978. Thermodynamic Behaviour Of The Bagnore Geothermal Field. *Geothermics*, 7, 185-208.
- Brigham, W. E., and Morrow, C. B., 1977. P/Z Behaviour For Heothermal Steam Reservoirs. *Soc. Pet. Eng. J.* 17, 407-412.
- Durak, S., ve Yeltekin, K., 2000. Jeotermal Kuyularda Yapılan Testler Jeotermal Sahaların İzlenmesi. Yerel Yönetimlerde Jeotermal Enerji ve Jeoteknik Uygulamalar Sempozyumu, 187-208, İller Bankası Genel Müdürlüğü, Ankara.
- DPT.YBM., 1996. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Enerji Hammaddeleri Alt Komisyonu: Jeotermal Enerji Çalışma Grubu Raporu. DPT 54 s, Ankara
- Edwards, L.M., Chilingar, G.V., Rieke III, H.H. and Fertl, W.H., 1982. *Handbook of Geothermal Energy*. Gulf Publishing Company, 613 s, Houston.
- Erişen, B., Akkuş, İ., Uygur, N., ve Koçak, A., 1996. Türkiye Jeotermal Envanteri. MTA Genel Müdürlüğü, 480 s, Ankara.
- Filiz, Ş., 1982. Ege Bölgesindeki Önemli Jeotermal Alanların O^{18} , H^2 , H^3 , C^{13} İzotoplarıyla İncelenmesi. TUBİTAK Araştırma Projesi, 95 s, TBAG-351, İzmir.
- Grant, M.A., Donaldson, I.G. and Bixley, P.F., 1982. *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press, 369 s, London.
- Göktekin, A., ve Alkan, H., 1986. Türkiye'deki Jeotermal Sahaların Rezerv ve Performans Değerlendirmesi. Türkiye 4. Enerji Kongresi, Teknik Oturum Tebliğleri 1, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, İzmir.
- Huyakorn, P. S. and Pinder G. F., 1983. *Computational Methods In Subsurface Flow*. Academic Press, London, 475 s.
- Karahanoğlu, N., 1983. Finite Element Simulation Of Hot-Water Type Geothermal Reservoirs. PhD Theses, 126 s, ODTU, Ankara.

- Kjaran, S.P. and Eliasson, J., 1982. Geothermal Reservoir Engineering Lecture Notes. UNU Geothermal Training Programme, 250 s, Iceland.
- Kwon, Y. W. and Bang, H. 1997. The Finite Element Method Using MATLAB. CRC Pres, New York, 519 s.
- Lasseter, T. J., Witherspon, P. A. and Lippmann, M. J., 1975. The Numerical Simulation Of Heat And Mass Transfer In Multidimensional Two-Phase Geothermal Reservoirs. Proc. 2nd. U. N. Symposium On Development And Use Of Geothermal Resources, 3, 1715-1775
- Lund, J.W. and Freeston, D.H., 2001. World-Wide Direct Uses Of Geothermal Energy 2000. Geothermics, 30, 29-68.
- Mercer, J. W., 1973. Finite Element Approach To The Modeling Of Hydrothermal Systems. PhD Theses, 106 p, University Of Illinois, Urbana.
- Mercer, J. W., and Faust, C. R., 1975. Simulation Of Water And Vapor Dominated Hydrothermal Reservoirs. Soc. Pet. Eng. J. 15, 1-15.
- Mercer, J. W., Pinder, G. F. and Donaldson, I. G., 1975. A Galerkin Finite Element Analysis Of The Hydrothermal Systems At Wairekei, New Zealand. Jour. Geophysical Res., 17, 2608-2621.
- Okandan, E. And Polat, T., 1986. Field Development And Power Generation In Kızıldere, Turkey. Geothermics, 15, 725-730.
- Okandan, E., 1986. Aydın-Germencik ve Denizli-Sarayköy Jeotermal Sahaları Enerji Üretim Potansiyeli. Türkiye 4. Enerji Kongresi, Teknik Oturum Tebliğleri 1, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, İzmir.
- Omay, E., 1977. Yeraltısuyu Akımının Matematik Modeli. İ.T.Ü.D., 35, 31-45.
- Özcan, M., 1998. 21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi. TÜSİAD, 316 s. Ankara.
- Pinder, G. F. and Gray, W. G., 1977. Finite Element Simulation In Surface And Subsurface Hydrology. Academic Press, 295 s.
- Pinder, G. F., 1979. State-Of-The-Art Review Of Geothermal Reservoir Medelling. Lawrence Berkeley Laboratory, 144 s, California.
- Reddy, J. N., 1984. An Introduction To Finite Element Methods. John Wily, New York, 679 s.

- Serpen, U., 2000. Kızıldere Jeotermal Rezervuarının Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, İTÜ, 278 s, İstanbul.
- Şimşek, Ş., 1993. Jeotermal Hidrojeoloji. Lecture Notes, H.Ü., 78 s, Ankara.
- Tezcan, K., 1967. Denizli Sarayköy Jeotermik Enerji Araştırmaları Gravite ve Rezistivite Etüdüleri. MTA 3896 nolu Derleme Rapor, Ankara.
- Torony, R. M., and Farouq Ali, M., 1977. Two-Phase Two-Dimensional Simulation Of A Geothermal Reservoir. Soc. Pet. Eng. J. 17, 171-181.
- Whiting, R. L., and Ramey, H. J., 1969. Application of Material and Energy Balances to Geothermal Steam Production. Jour. Of Pet. Tech. (july), 893-900.
- Yüksel, V., 1987. MTA'nın Jeotermal Enerjiye Yönelik Çalışmaları ve Ekonomiye Katkısı. MTA 50. Yıl Simpozyumu Bildirileri, 256-263.
- Zienkiewicz, O. C., 1979. The Finite Element Method. McGraw Hill Book Company, UK, 787 s.
- Zyvoloski, G. 1983. Finite Element Methods For Geothermal Reservoirs. Int. Jour. For Num. And Anal. Met. In. Geom., 7, 75-86.

ÖZGEÇMİŞ

Erzurum'da 1969 yılında doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 1987 yılında girdiği Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1991 yılında mezun oldu. Ekim 1994-Ocak 1996 yılları arasında, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde 1992 yılından beri Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.