

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIVI JEOTERMAL SAHALAR İÇİN TANK MODELLERİ KULLANILARAK
İLERİYE YÖNELİK BASINÇ PERFORMANSLARINDAKİ
BELİRSİZLİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayşe ÖZTÜRK**

Anabilim Dalı : Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği

Programı : Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ömer İnanç TÜREYEN

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIVI JEOTERMAL SAHALAR İÇİN TANK MODELLERİ KULLANILARAK
İLERİYE YÖNELİK BASINÇ PERFORMANSLARINDAKİ
BELİRSİZLİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayşe ÖZTÜRK
(505061508)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ömer İnanç TÜREYEN (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mustafa ONUR (İTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Sinan ÖZEREN (İTÜ)

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Enerjiye olan ihtiyacın her gün arttığı günümüzde rezervuar mühendislerinin amacı rezervuarların performansını maksimum seviyeye çıkarmaktır. Bu nedenle de rezervuar mühendisleri, üretimden önce ve sonra yapılacak bütün çalışmalara yön verecek olan rezervuar parametrelerini ve ileriye dönük rezervuar performansını belirleyebilmek için üretimin belirli aşamalarında farklı yöntemler kullanırlar.

Haziran 2010

Ayşe ÖZTÜRK
(Kimya Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Dünyada Jeotermal Enerji	3
1.2 Türkiye’de Jeotermal Enerji	8
1.3 Jeotermal Rezervuarların Modellenmesi	10
2. TANK MODELLERİ.....	13
2.1 İzotermal Tank Modelleri	15
2.1.1 Tek Tank Açık Model.....	15
2.1.2 2 Tank Açık Model	18
2.1.3 2 Tank Kapalı Model	20
2.1.4 3 Tank Açık Model	20
2.1.5 3 Tank Kapalı Model	22
2.1.6 İzotermal Modellerin Sayısal Çözümü	23
2.2 İzotermal Olmayan Tank Modelleri	27
3. TANK MODELLERDE MODEL SEÇİMİ VE İLERİYE YÖNELİK PERFORMANS DEĞERLENDİRMELERİ	31
3.1 Tarihsel Çakıştırma Problemi	31
3.1.1 En Küçük Kareler Yöntemi	31
3.1.2 Rastgele Maksimum Olasılık Yöntemi	32
3.2 Yapay Uygulama	33
3.3 Balçova-Narlıdere Saha Uygulaması	38
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR.....	45

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Jeotermalden elektrik üreten ülkelerin kurulu kapasitesi.	5
Çizelge 1.2 : Dünyada jeotermal enerjinin kullanım kapasitesi	6
Çizelge 1.3 : Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliği	8
Çizelge 1.4 : Türkiye'nin jeotermal enerji santralleri.	9
Çizelge 2.1 : Tank etkileşimleri.	25
Çizelge 3.1 : Dört farklı tank modeli ile gözlenmiş verilere karşılaştırma yapılarak tahmin edilen model parametreleri ve parametrelere ait güvenilirlik aralıkları.....	35
Çizelge3.2 : Beş farklı tank modeli İzmir Balçova-Narlıdere verilerine yapılan tarihsel karşılaştırma sonucunda elde edilen model parametreleri ve gerekli istatistikler.....	40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Jeotermal sistem.	2
Şekil 1.2 : Dünyada jeotermal rezervler.....	3
Şekil 1.3 : Dünyada jeotermalden elektrik üretilen kurulu kapasite.	4
Şekil 1.4 : Jeotermal enerjinin doğrudan kullanım alanları.	7
Şekil 1.5 : Türkiye’de jeotermal enerji kaynakları.	8
Şekil 2.1 : Tank modelleri.....	14
Şekil 2.2 : Tek tank modeli	15
Şekil 2.3 : 2 tank açık model.....	19
Şekil 2.4 : 2 tank kapalı model.....	20
Şekil 2.5 : 3 tank açık model.....	20
Şekil 2.6 : 3 tank kapalı model.....	22
Şekil 2.7 : N_i tane tank içeren sistemin şematik gösterimi	23
Şekil 2.8 : 6 tanklı modeli.	24
Şekil 2.9 : i tankı ve bağlantıları	27
Şekil 3.1 : Gerçek rezervuarın şematik gösterimi.	34
Şekil 3.2 : Yapay basınç verileri	34
Şekil 3.3 : 2 tank.açık model için ileriye dönük performans belirsizlikleri	37
Şekil 3.4 : 3 tank.açık model için ileriye dönük performans belirsizlikleri	38
Şekil 3.5 : İzmir Balçova Jeotermal sahasına ait su seviyesi verileri.	39
Şekil 3.6 : İzmir Balçova Jeotermal sahasına ait rastgele maksimum olasılık yöntem sonuçları.....	42

SEMBOL LİSTESİ

c_f	: sıvının sıkıştırılabilirliği, 1/bar
c_r	: kayanın sıkıştırılabilirliği, 1/bar
c_t	: toplam sıkıştırılabilirlik, 1/bar
C_r	: kayanın ısı kapasitesini, J/kg-°C
C_D	: ölçülmüş veri hatalarının kovaryans matrisi
e	: hata
h_s	: suyun entalpisi, J/kg
$h_{se,i}$	: i tankına enjekte edilen suyun entalpisi, J/kg
J	: verimlilik indeksi, STB/gün/psi
κ	: depolama sabiti, kg/bar
$\mathbf{m}$	: model parametreleri
$\mathbf{m}$	: tank modeline ait bilinmeyen parametre vektörü
M	: bilinmeyen model parametre sayısı
N_{ci}	: i tankının toplam tank bağlantı sayısı
N_d	: toplam veri sayısı
p_i	: initial rezervuar basıncı, bar
p_r	: rezervuar basıncı, bar
p_{o1}	: dış akifer basıncı, bar
p_{o2}	: iç akifer basıncı, bar
$p(t)$	: birim zamandaki rezervuar basıncı, bar
$\Delta p(t)$	: birim zamanda basınç değişimi, bar
T	: rezervuar sıcaklığı, °C
T_i	: i tankının sıcaklığı, °C
$T_{e,i}$	: i tankına enjekte edilen akışkanın sıcaklığı, °C
$T_{a,i}$	: besleme kaynağının sıcaklığı, °C
u_s	: suyun entalpisi, J/kg
V_b	: rezervuar hacmi, m ³
V_{bi}	: i tankının hacmi, m ³
w_a	: rezervuara doğru hareket eden kütle debisi, kg/s
$w_{a,i}$	: i tankına doğru hareket eden kütle debisi, kg/s
$w_{a,jL}$	: J_L tankından i tankına doğru hareket eden akışkanın kütle debisi, kg/s
w_e	: rezervuara enjekte edilen kütle debisi, kg/s
$w_{e,i}$	: i tankına enjekte edilen kütle debisi, kg/s
w_r	: rezervuarda biriken kütle debi, kg/s
$w_{\bar{u}}$	: üretim debisi, kg/s
$w_{\bar{u},i}$	: i tankının üretim debisi, kg/s
$w_{\bar{u},net}$	: net üretim debisi, kg/s
$\mathbf{y}$	: ölçülen basınç veya su seviyesi verisi
$\mathbf{y}_e$	: gürültü eklenmiş basınç veya su seviyesi verisi
z_u	: N_d boyutlu birbirden bağımsız standart normal dağılımdan elde edilen veri
α	: beslenme sabiti, kg/bar-s
α_{o1}	: dış akifer beslenme sabiti, kg/bar-s

α_{o2}	: iç akifer beslenme sabiti, kg/bar-s
β_r	: kayanın termal büyüme sabiti, 1/°C
ϕ	: porosite
ϕ_0	: initial porosite
ϕ_i	: i tankının porositesi
ρ_s	: su yoğunluğu, kg/m ³
ρ_r	: kaya yoğunluğu, kg/m ³

SIVI JEOTERMAL SAHALAR İÇİN TANK MODELLERİ KULLANILARAK İLERİYE YÖNELİK BASINÇ PERFORMANSLARINDAKİ BELİRSİZLİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Jeotermal sahaların modellemesinde, tank modellemesi veri sayısının az olduğu, üretimin ilk aşamalarında sıkça kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca, tank modellerinin diğer bir avantajı da tarihsel karşılaştırmada daha kısa sürede sonuca ulaşılmasıdır. Bu nedenlerle, tank modeller rezervuar özelliklerinde heterojenliği, karmaşık akışkan özelliklerini ve karmaşık kuyu geometrileri gibi zor durumların olmadığı rezervuarların modellemesinde kullanılır. Tank modellerinde rezervuar homojen tanklar olarak tanımlanır. Herbir tank için kütle ve enerji korunum denklemleri yazılarak bu denklemlerin çözülmesiyle ileriye yönelik sıcaklık ve basınç tahminleri yapılabilir. Rezervuarın işletilmesinde ileriye dönük çalışmalara yön verecek rezervuar performanslarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Daha da önemlisi, ileriye dönük basınç tahminlerini yapmanın yanında bu tahminler üstündeki belirsizliklerde tanımlanmalıdır. Bu çalışma da, tank modellemesinin avantajları göz önünde bulunduruldu ve tank modellemesi kullanılarak sıvı jeotermal sahaların modellemesi yapıldı. Farklı rezervuar modelleri için rezervuar parametreleri üretim verileri kullanılarak tarihsel karşılaştırma yöntemiyle tayin edildi ve rezervuarı en iyi temsil eden model belirlendi. Düşük sıcaklıklı sıvı jeotermal rezervuar modellemesinde sıcaklığın etkisi ihmal edildi. Sahayı temsil eden en iyi modelin belirlenmesinde tarihsel karşılaştırmanın ne kadar iyi olduğu ve tahmin edilen model parametrelerinin ne kadar güvenilir olduğu kriterleri kullanıldı. İleriye yönelik belirsizliklerin sayısallaştırılması için ise Rastgele maksimum olasılık yöntemi kullanıldı. Sentetik uygulamada rezervuar parametreleri bilinen sahanın modellemesi yapılarak aynı değerler elde edilmeye çalışıldı. Saha uygulaması için, İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal sahasının üretim verileri kullanılarak sahanın modellemesi yapıldı.

ASSESSMENT OF UNCERTAINTY IN PRESSURE PERFORMANS PREDICTIONS FOR LIQUID GEOTHERMAL RESERVOIRS USING TANK MODELS.

SUMMARY

In geothermal reservoir modeling, tank modeling is mainly used at the early life of the field when relatively little data is available. Also, the other advantage of tank modeling is that the result is obtained in shorter time during history matching. Because of that reason, tank modeling is used in reservoir which does not have heterogeneous, the fluid in reservoir is not complex and the well doesn't consist of different geometry structure. With tank modeling, the reservoir and the aquifer are modeled using homogeneous tanks. Mass and energy balance equations are solved on the tanks for making future performance predictions of pressure and temperature. These pressure and temperatures represent the average pressure and temperature of the reservoir. If production data is available, model parameters that best describe the system could be obtained through history matching. In this study, advantages of tank modeling was considered and we have also pointed out a methodology for determining the best model that represents the system. For this purpose we perform history matching with various models and select the one that matches best the production data and the model that gives the lowest confidence intervals for the model parameters. Effect of temperature is neglected at low temperature geothermal reservoir. Although it is important to make accurate predictions of pressure and temperature, it is more important to make predictions of the uncertainty regarding the pressures and the temperatures. In this study we have used the randomized maximum likelihood method for quantifying the uncertainty associated with pressure performance predictions. In synthetic example reservoir whose parameter was known was modeled and we tried to get same parameter value. A real field example is also presented with production data from the İzmir Balçova-Narlıdere field.

GİRİŞ

Jeotermal (jeo-yer, termal-ısı anlamına gelir) yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısıнын oluşturduğu, kimyasallar içeren sıcak su, buhar ve gazlardır. Jeotermal enerji de bu jeotermal kaynaklardan ve bunların oluşturduğu enerjiden doğrudan veya dolaylı yollardan faydalanmayı kapsamaktadır.

Jeotermal kaynaklar ile;

- Elektrik enerjisi üretimi,
- Merkezi ısıtma, merkezi soğutma, sera ısıtması vb. ısıtma/soğutma uygulamaları,
- Proses ısısı temini, kurutma işlemleri gibi endüstriyel amaçlı kullanımlar,
- Karbondioksit, gübre, lityum, ağır su, hidrojen gibi kimyasal maddelerin ve minerallerin üretimi,
- Termal turizm'de kaplıca amaçlı kullanım,
- Düşük sıcaklıklarda (30 °C'ye kadar) kültür balıkçılığı,
- Mineraller içeren içme suyu üretimi,

gibi uygulama ve değerlendirme alanlarında kullanımlar gerçekleştirilmektedir.
[url-1]

Jeotermal enerji yenilenebilir, sürdürülebilir, tükenmez bir enerji kaynağıdır. Türkiye gibi jeotermal enerji açısından şanslı ülkeler için bir özkaynaktır. Jeotermal enerjinin diğer enerji türlerine göre bir çok avantajı sayılabilir. Öncelikle temiz ve çevre dostu bir enerji türüdür. Konutlarda, tarımda, endüstride, sera ısıtmasında ve benzeri alanlarda çok amaçlı ısıtma uygulamaları için idealdir. Rüzgar, yağmur, güneş gibi meteoroloji şartlarından bağımsız olarak kullanılabilir. Fosil enerji veya diğer enerji kaynaklarına göre çok daha ucuzdur. Yangın, patlama, zehirlenme gibi risk faktörleri taşımadığından güvenilirdir. Yağmur, kar, deniz ve magma sularının yeraltındaki gözenekli ve çatlaklı kayaç kütlelerini besleyerek oluşturdukları Şekil 1.1 gösterilen jeotermal rezervler, yeraltı koşulları devam ettiği müddetçe yenilenebilir ve sürdürülebilir özelliklerini korurlar. Kısa süreli atmosfer koşullarından etkilenmezler.



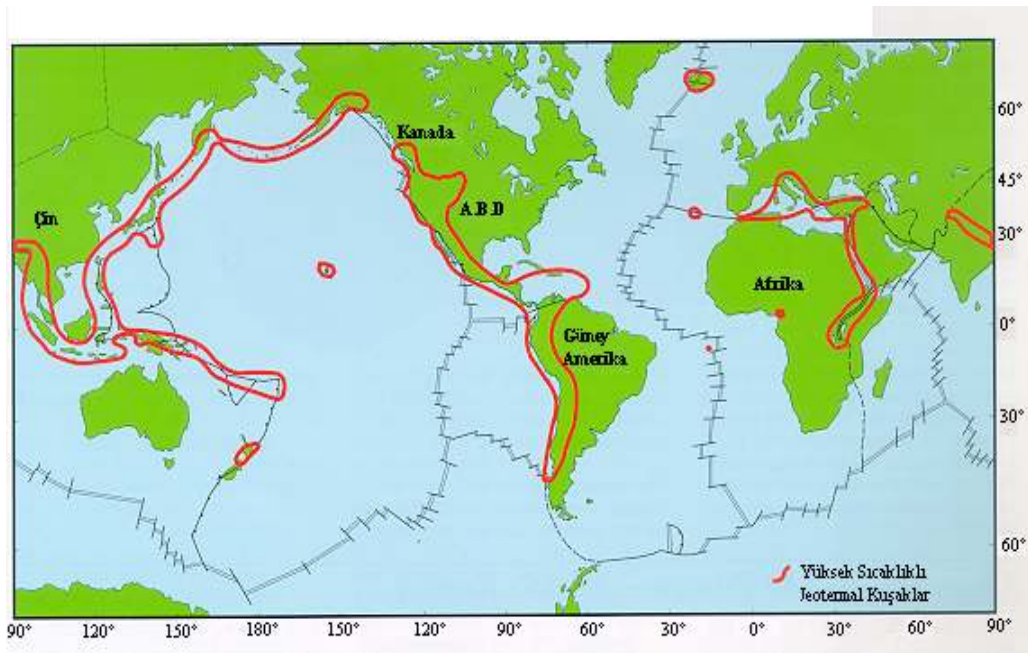
Şekil 1.1: Jeotermal sistem.

Jeotermal rezervuarlar yerkabuğunun tektonik hareketlerine göre oluşmaktadır ve tektonik hareketler rezervuarın özelliklerini belirlemektedir. Jeotermal rezervuarlar sıcaklık değerlerine ve faz yapılarına göre sınıflandırılırlar. Sıcaklığı $< 90^{\circ}\text{C}$ olan rezervuarlar düşük sıcaklık jeotermal rezervuarlar, $90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ılıman rezervuarlar ve sıcaklığı $>150^{\circ}\text{C}$ olan rezervuarlarda yüksek sıcaklık rezervuarlar olarak adlandırılır. Rezervuarlar sahip oldukları sıcaklık değerlerine göre farklı alanlarda kullanılır. [url-2]

Jeotermal sistemler faz yapılarına göre başlıca, üç ana başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlar hidrotermal sistemler, jeobasinçli sistemler ve sıcak kuru kaya sistemlerdir. Hidrotermal sistemler bünyesinde akışkan bulunduran jeotermal sistemlerdir. Bu sistemlerde kendi içerisinde buhar ağırlıklı ve sıvı ağırlıklı sistemler olmak üzere ikiye ayrılır. Buhar ağırlıklı sistemlerde sıvı ile buhar birlikte bulunmalarına rağmen rezervuar boyunca süreklilik gösteren ve basıncı kontrol eden faz buhar fazıdır. Sıvı ağırlıklı sistemlerde ise, rezervuarda süreklilik gösteren ve basıncı kontrol eden faz sıvı fazıdır. Jeobasinçli sistemler hidrostatik basıncın çok üzerinde, akışkan içeren kayalardan oluşan sistemlerdir. Bu sistemler genellikle geçirimsizliği yüksek olan bir örtü kaya ile kaplı olan zonlardan oluşmaktadır. Geçirimsiz örtü kaya etkisiyle sistemde sıkışan akışkan, basınç gradyanının etkisi ile yükselerek yüzeye ulaşmaktadır. Sıcaklık kuru kaya sistemleri ise, ısı taşıyıcı ortam olan suyu içermeyen sistemlerdir.

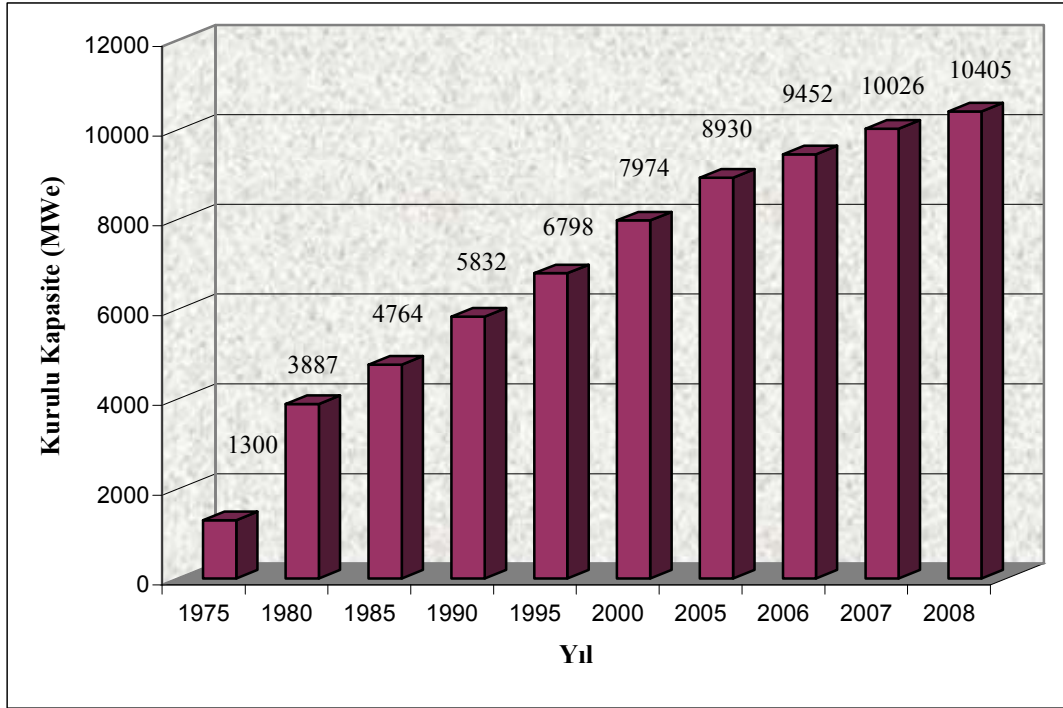
1.1 Dünyada Jeotermal Enerji

Enerjiye olan ihtiyacın hergün attığı günümüzde bütün enerji kaynakları en verimli şekilde kullanılmaya çalışılmaktadır. Şekil 1.2 de gösterilen jeotermal rezervler özelliklerine göre farklı alanlarda kullanılır. Tetektonik hareketlerin yüksek olduğu bölgelerde bulunan yüksek sıcaklık rezervuarlarının başlıca kullanım alanı elektrik üretimi olup, düşük sıcaklık rezervuarlar ise termal, ısı pompaları, ısınma gibi alanlarda kullanılır.



Şekil 1.2 : Dünyada jeotermal rezervler [url-3].

Dünyada 24 ülke tarafından jeotermal rezervler elektrik üretiminde kullanılmaktadır. GIA 2008 yıllık raporuna göre 2008 yılında dünyada jeotermal enerjiden direk elektrik üretimin yapıldığı kurulu kapasite 10.405 MWe ulaşmıştır. 2005 yılı için 38.373 GWh olan diğer alanlarda kullanılan enerji miktarıda 2008 yılı için 57.957 GWh da ulaşmıştır. Şekil 1.3 de verildiği gibi yıllara göre dünyada jeotermal enerji kullanımı hızla artmaktadır.



Şekil 1.3 : Dünyada jeotermalden elektrik üretilen kurulu kapasite (IEA 2008).

1980 yılından 2005 yılına kadar dünya genelinde jeotermal enerjiden elektrik üretimine bakıldığında sabit bir ivmeyle yıllık ortalama 200 MWe olarak artış gösterdiği görülmektedir. 2005-2008 yılları arasında ise daha hızlı bir yükseliş görülmektedir. 2005-2008 yılları arasındaki artış miktarı 500 MWe'dir. GİA üyesi olan ülkelerin 2005 ve 2008 yılı için bildirdikleri kurulu kapasite miktarı toplamı 5.449 ve 6.575 MWe'dir. Toplam artış miktarı 1.126 MWe olup, jeotermal enerjinin kullanımında % 20'lik bir artış olmuştur.

Dünyada jeotermal enerjiden elektrik üretiminde Çizelge 1.1'de görüldüğü gibi ilk 5 ülke sıralamasında ilk sırayı 3.040 MWe'lik kapasite ile ABD alırken, ikinci sırayı 1.970 MWe enerji ile Filipinler almaktadır. Meksika, Endonezya ve İtalya da onları takip etmektedir. İzlanda, Çin (Tibet), Kenya gibi ülkeler enerji ihtiyaçlarının büyük bir kısmını jeotermalden sağlamaktadır. İzlanda kurulu kapasitesi 575 MWe olmasına rağmen ulusal enerji ihtiyacının % 24,5'ini jeotermal enerjiden sağlamaktadır.

Çizelge 1.1 : Jeotermalden elektrik üreten ülkelerin kurulu kapasitesi(IEA 2008)

Ülke	Kurulu Kapasite (2008) Mwe	Yıllık Elektrik Üretimi (GIA 2008) (Diğer 2005) GWh/yıl	Ulusal Kapasite %	Ulusal Enerji %
Avusturalya	0,12	2		
Avusturya	1,1	3,2		
Çin (Tibet)	28	95,7	30,0	30,0
Kosta Riko	163	1.145	8,4	15,0
El Salvador	204	967	14,0	24,0
Etopya	7		1,0	
Fransa	17,2	90	9,0	9,0
Almanya	6,6	18		
Guatalama	53	212	22,3	3,0
İzlanda	575	4.000	2,2	24,5
Endonezya	992	6.085	1,0	6,7
İtalya	810,5	5.181	0,2	1,8
Japonya	535,26	3.064	11,2	0,3
Kenya	129	1.088	1,9	19,2
Meksika	958	7.056	6,0	3,0
Yeni Zelanda	632	3.962	11,2	10,5
Nikarigua	87	270,7	10,9	9,8
Papua Yeni Gine	56	17	12,7	
Filipinler	1.970	9.419	25,0	19,1
Portekiz	23	90		
Rusya	79	85		
Tayland	0,3	1,8		
Türkiye	38	105		
USA	3.040	15.000	0,3	0,4
Toplam	10.405	57.957	9,4	11,6

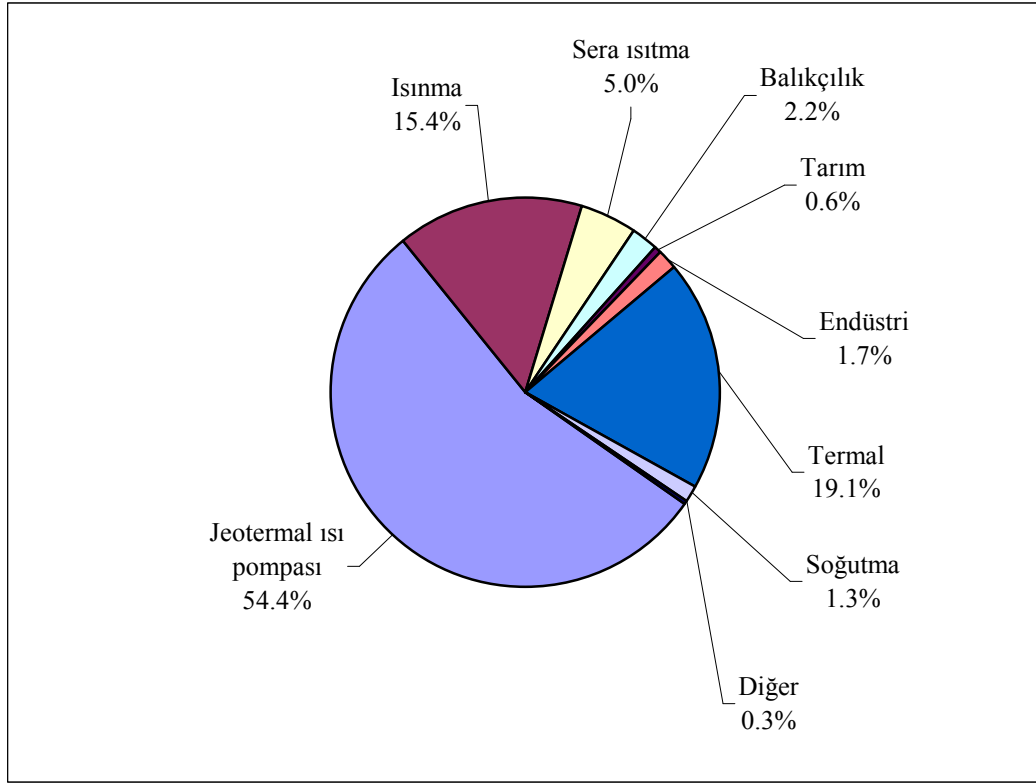
Jeotermal kaynakların elektrik harici kullanım alanları ve elde edilen enerji miktarı yıllara göre Çizelge 1.2 verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi jeotermal kaynaklar özelliklerine göre çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Yıllara göre jeotermal enerjinin direk kullanım kapasitesine bakıldığında hızlı bir artış olduğu görülmektedir. 2000 yılında 28.269 MWth olan kapasite, 2005 yılında 28.269 çıkmıştır. 2008 yılında 72 ülke tarafından direk olarak kullanılan jeotermal enerji kapasitesi 36.023 MWt 'a ulaşmıştır

Çizelge 1.2 : Dünyada jeotermal enerjinin kullanım kapasitesi
(Elektrik üretimi hariç) (IEA 2008).

Kategori	Kapasite (MWth)				
	1995	2000	2005	2007	2008
Jeotermal ısı pompası	1.854	5.275	15.384	19.010	
Isınma	3	3.263	4.366		
Sera ısıtma	1.085	1.246	1.404		
Balıkçılık	1.097	605	616		
Tarım	67	74	157		
Endüstri	544	474	484		
Termal	1.085	3.957	5.401		
Soğutma	115	114	371		
Diğer	238	137	86		
Toplam	8.664	15.145	28.269	35.570	36.023
ToplamGIA ülkeleri				20.547	21.000
Kategori	Kullanım (TJ/yıl)				
	1995	2000	2005	2007	2008
Jeotermal ısı pompası	14.617	23.275	87.503		
Isınma	38.230	42.926	55.256		
Sera ısıtma	15.742	17.864	20.661		
Balıkçılık	13.493	11.733	10.976		
Tarım	1.124	1.038	2.013		
Endüstri	10.120	10.220	10.868		
Termal	15.742	79.546	83.018		
Soğutma	1.124	1.063	2.032		
Diğer	2.249	3.034	1.045		
Toplam	112.441	190.699	273.372	329.270	329.880
ToplamGIA ülkeleri				154.560	155.170

Jeotermal enerji elektrik üretiminden sonra en çok ısı pompalarında kullanılmaktadır. 2005 yılında 1.3 milyon jeotermal ısı pompası 33 farklı ülkede kullanılmaya başlandı. Bu nedenle 2000 yılında 5.275 MWth olan ısı pompaları kapasitesi 2005 yılında 15.384 MWth enerjiye ulaşmıştır. 2000 yılında jeotermal enejriden 273.372 TJ enerji edilmiştir. 2007 yılında kullanılan enerjiye bakıldığında 329.270 TJ wnwri kullanılmış olup, jeotermal enerjinin kullanımında % 20 lik bir artış olduğu görülmektedir.

Jeotermal rezervlerin diğer kullanım alanlarına yüzdesel olarak bakıldığında Şekil 1.4 de görüldüğü gibi %54,4 ile jeotermal ısı pompaların , %19,1 ile termal kullanımın başı çektiği görülmektedir. Isı ve kaplıca uygulamalarındaki ilk 5 ülke sıralaması ise Çin, Japonya, ABD, İzlanda ve Türkiye'dir.



Şekil 1.4 : Jeotermal enerjinin doğrudan kullanım alanları [url-4].

Enerjinin kullanımında en önemli parametre enerjinin verimliliğidir. Jeotermal enerji diğer yeninebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında çok daha verimli bir enerji kaynağıdır. Verimlik, üretilen enerji miktarının mevcut kapasiteye oranı olarak tanımlanabilir. Buna göre dünya üzerindeki yenilenilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji miktarına bakıldığında Çizelge 1.3 de görüldüğü gibi sudan en yüksek enerji elde edilmesine rağmen, hidrolik enerjinin verimliliği 3,7 GWh/MWe dir. Rüzgar enerjisinden yüksek enerji elde edilmesine rağmen bu enerjiyi elde etmek için yüksek kapasite gerektiğinden verimliliği 2,1 GWh/MWe dir. Tablodan görüldüğü gibi çok daha düşük kapasiteli jeotermal sistemlerden, yüksek enerji elde edilebilmektedir. Jeotermal enerjinin verimliliğine bakıldığında diğer enerji kaynaklarına göre çok daha yüksektir.

Çizelge 1.3: Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliği (IEA 2008).

Kaynak	Kapasite (MWe)	Üretilen Enerji (GWh)	Verimlilik (GWh/Mwe)
Jeotermal Enerji			
GIA Üye ülkeler (2008)	6.575	38.373	5,8
OECD (2006)	5.400	38.100	7,1
Biokütle Enerjisi (2006)	22.000	115.900	5,2
Hidrolik Enerji (2006)	344.600	1.286.300	3,7
Rüzgar			
2006	63.700	116.200	1,8
2008	91.770	194.000	2,1
Okyanus, Dalga, Gelgit Enerjisi (2006)	300	550	1,8
Güneş Enerjisi (2006)	4.100	2.626	0,6

1.2 Türkiye’de Jeotermal Enerji

Türkiye bulunduğu coğrafi ve jeolojik konumu gereği jeotermal enerji bakımından önemli potansiyele sahip bir ülke konumundadır. Şekil 1.5 den görüldüğü gibi Türkiye’nin birçok bölgesinde jeotermal rezervuarlar mevcuttur. Ülke genelinde 277 alanda jeotermal etkinliğin olduğu görülmektedir. Bu rezervler Ege bölgesinde yoğunluk göstermektedir.



Şekil 1.5: Türkiye’de jeotermal enerji kaynakları.

Jeotermal arama faaliyetleri Türkiye’de 1960 yıllarda başlamıştır. İlk olarak 1968 yılında yüksek entalpili bir jeotermal saha olan Kızıldere Sahası keşfedilmiştir. Orta sıcaklıklı sahalar olarak nitelendirilen Balcova ve Seferihisar Sahaları 1960 ve 70 li yıllarda bulunmuştur. İkinci yüksek entalpili saha, Germencik ve diğer orta entalpili sahalar olarak kabul edilen Salavatlı ve Simav sahaları ise 1980’li yıllarda keşfedilmiştir.

Türkiye’nin bugün için jeotermal enerjiden elektrik üreten kurulu santral kapasitesi yaklaşık 100 MWe dir. Çizelge 1.4 mevcut ve yakında kurulacak santrallerin kapasite değerleri verilmiştir. Jeotermal enerjinin direk kullanımdan elde ettiği enerji miktarı ise 795 MWt dir. Türkiye ilk jeotermal enerji 1987 yılında Gönen de kullanılmıştır. 1991 yılından 2006 yılına kadar da 19 farklı bölgede kullanılmaya başlanmıştır.(Serpen, 2009)

Çizelge 1.4: Türkiye’nin jeotermal enerji santralleri.

Yer	İşletmeye Alındığı Yıl	Kurulu Kapasite(MWe)
Kızıldere (Denizli)	1984	17.8
Dora I Salavatlı (Aydın)	2006	7.35
Bereket Enerji (Denizli)	2007	7.5
Gürmet (Germencik)	2009	47.4
Tuzla (Çanakkale)	2009	7.5
Dora IISalavatlı (Aydın)	2010	9.7

Mayıs 2009 itibariyle, Türkiye’deki keşfedilmiş mevcut bütün jeotermal oluşumlar değerlendirilerek Türkiye’nin tahmini görünür kapasitesi referans sıcaklığının 15 °C olması durumu için yaklaşık 4.800 MWt olarak hesaplanmıştır. (Satman, 2009)

1.3 Jeotermal Rezervuarların Modellenmesi

Jeotermal rezervuar modellemesi literatüre bakıldığında genel olarak iki şekilde yapılır; sayısal modeller kullanılarak ya da tank modeller kullanılarak. Sayısal modellerin çalışma prensibi herhangi bir rezervuarı hücelere bölerek her bir hücre üstünde kütle dengesi ve enerji dengesi denklemlerinin çözülmesine dayanır. Bu şekilde rezervuarın ve kuyuların ileriye yönelik basınç ve sıcaklık performanslarını modellemek mümkündür. Sayısal modeller, rezervuar özelliklerinde heterojenliği, karmaşık akışkan özelliklerini ve karmaşık kuyu geometrileri gibi zor durumları modelleyebilmektedir. Bu nedenle jeotermal rezervuarlar için oldukça çekici bir yöntemdir. Sayısal modellerin en önemli dezavantajları ise çalışabilmeleri için çok fazla veriye ihtiyaçları olması (en basit modellerde dahi her bir hücre için en azından geçirgenlik ve gözeneklilik verilerine ihtiyaç duyulmaktadır) ve model karmaşıklıkla birlikte çalışma sürelerinde artışlar olmaktadır. Çalışma süreleri özellikle tarihsel karşılaştırma problemlerinde öne çıkmaktadır çünkü tarihsel karşılaştırma sırasında sayısal modeller defalarca çalıştırılmaktadır.

Tank modellerinde ise jeotermal sistemin içindeki rezervuar ve akiferler tanklar tarafından temsil edilmektedir. Kütle ve enerji dengesi denklemlerinin tanklar üstünde çözülmesiyle rezervuar ve akiferlerin ortalama basınç ve sıcaklık davranışları modellenenir. Tank modelleri sayısal modeller ile karşılaştırıldığında avantajlı olduğu iki durum söz konusudur. Öncelikle tank modellerin çalışabilmesi için gerekecek parametre sayısı, sayısal modellere göre çok daha azdır çünkü çok daha basit bir sistem modellenmektedir. Tank modellerinin diğer avantajı ise çalışma sürelerinin sayısal modellere göre çok daha kısa olmalarıdır. Bu özellikle tarihsel karşılaştırma açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Rezervuar mühendisleri 1960'lı yılların başlarında ise jeotermal rezervuarlarla ilgilenmeye başlamışlardır. Farklı yöntemler uygulanarak rezervuar özellikleri tayin edilmeye çalışılmıştır. Whiting ve Ramey (1969) tümsel (lumped) parametre modeli kullanarak rezervuar özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Brigham ve Morrow (1974) tümsel parametre modelini buhar baskın bir sistemde uygulamışlardır. Bodvarsson (1984) ve Pruess (1984), Krafla jeotermal alanında rezervuarın gelecekteki performansının tahmini için detaylı bir modelleme çalışması yapmışlar ve bu çalışmaya ait sonuçları 4 ayrı makalede toplamışlardır. Bunlardan ilkinde

kuyularda yapılan test verilerinin, analizi, ikincisinde rezervuann doğal halinin kavramsal olarak modellenmesi, üçüncüsünde ise rezervuar kapasitesinin belirlenmesine ilişkin çalışmalara ait sonuçlar verilmiştir. Dördüncü makalede tüm bu çalışmaların, ışığında, kuyuların ve rezervuann gelecekteki performansının tahmini için geliştirilen dağınık parametrelili modele ilişkin bilgiler yer almaktadır.

Bodvarsson vd.(1986), modelleme alanında süregelen gelişmeleri de göz önüne alarak, jeotermal rezervuarların modellenmesine yönelik teorik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında farklı modelleme yaklaşımlarını tanımlamış, bunların avantajını ve limitlerini tartışmışlardır. Kütle ve ısı taşınım eşitliklerinin oluşturulması ve bunların çözüm teknikleri ile jeotermal rezervuarların modellenmesinde karşılaşılan problemleri ortaya koymuşlardır.

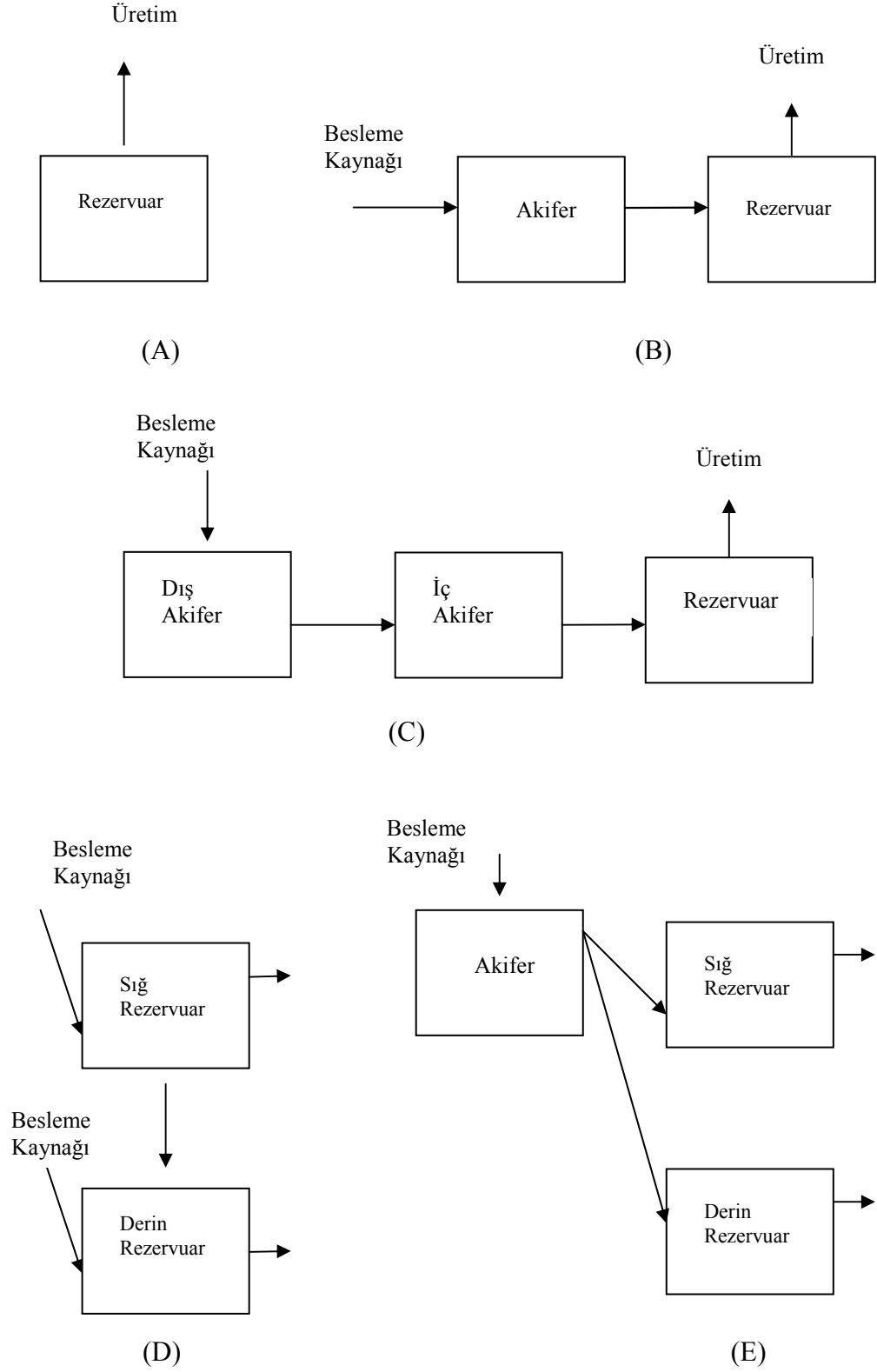
Alkan ve Satman (1990) boyutsuz parametre modelini karbondioksit içeren jeotermal rezervuarlar için geliştirmişlerdir. Sarak (2004) düşük sıcaklık jeotermal rezervuarlar için çeşitli konfigürasyonlardaki tank modeller için analitik denklemler geliştirmiştir. Onur (2008) izotermal olmayan boyutsuz parametre modelini sıvı ağırlıklı düşük sıcaklık jeotermal rezervuarlar için geliştirmiştir. Bu çalışmanın bir adım ileriye olarak Tureyen ve Onur (2009) izotermal olmayan sıvı ağırlıklı jeotermal rezervuarlar için boyutsuz parametre modelini geliştirdiler. Bu çalışmada birbirine bağlı farklı şekillerdeki tank modellerinin kütle ve enerji denklemleri geliştirilerek, model parametrelerinin belirlenmesinde sıcaklık ve basınç etkisi incelenmiştir. Sıcaklık verilerinin basınç verileri ile birlikte kullanılması daha doğru tahminler yapılabileceğini göstermiştir.

Jeotermal rezervuarların geliştirilmesinde yapılacak ekonomik yatırımlar büyük ölçüde rezervuarın ileriye yönelik sıcaklık ve basınç davranışlarına bağlıdır. Fakat ileriye yönelik tahminlerde her zaman için belirsizlikler söz konusudur. Bu tezin ana amacı, jeotermal rezervuarlar için tank modelleri kullanılarak model parametrelerinin üretim verileri kullanılarak bulunması ve ileriye yönelik basınç tahminlerindeki belirsizliğin sayısallaştırılmasıdır.

2. TANK MODELLERİ

Rezervuar üretim programını belirlemek ve üretim performansını artırmak için yapılan rezervuar modellemesinde, tank modellemesi parametrelerin ve verilerin az olması durumlarında sayısal modellere alternatif bir yöntemdir. Tank modellerinde rezervuar ve aquifer homojen tanklar olarak tanımlanır. Tank modelleri üç ana bölümden oluşmaktadır: (1) Rezervuar, (2) Akifer ve (3) Besleme kaynağı. Bunlardan ilk ikisi (rezervuar ve akifer) ortalama özelliklere sahip homojen tanklar tarafından temsil edilmektedir. Besleme kaynağı ise bu tanklardan herhangi birine (akifer ya da rezervuarın kendisine) ya da tüm tanklara bağlanabilmekte ve sistemin sabit basınçlı dış sınırını temsil etmektedir. Eğer tank modeli beslenme kaynağına bağlı ise bu sistem açık sistem, bağlı değil ise bu sistem, kapalı sistem olarak adlandırılır. Şekil 2.1 de açık ve kapalı sistemlere örnek tank modelleri Şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.1A'da kapalı tek tank modeli verilmektedir. Bu modeller eğer rezervuar herhangi bir akifere ya da beslenme kaynağına bağlı değil ise ve kapalı bir sistemi oluşturuyor ise rezervuarı temsil etmek için kullanılabilir. Şekil 2.1B'de ise jeotermal sistemin içinde rezervuar ile birlikte akiferlerin de olduğu durum göz önüne alınmaktadır. Burada akifer rezervuarı beslemekte akiferi ise beslenme kaynağı tarafından beslenmektedir. Bazı durumlarda rezervuarı besleyen akifer birden fazla tank kullanılarak modellenabilmektedir. Bu durum Şekil 2.1C'de verilmektedir. Tank modeller kullanılarak birbiri ile iletişimde olan iki farklı rezervuar modellemesi de yapılabilmektedir. Şekil 2.1D ve Şekil 2.1E'de bu durum gösterilmektedir. Burada sığ ve derin rezervuarların farklı besleme kaynakları tarafında beslendiği ve aynı akifer tarafından beslendiği durumlar gösterilmektedir. Şekil 2.1'den görüldüğü gibi tankları jeotermal sistemin durumuna göre farklı konfigürasyonlarda kullanmak mümkündür. Burada kritik noktalardan birisi sistemin temsili için kaç tankın ve hangi düzende kullanılması gerektiğidir. Bu sorunun yanıtı için jeotermal sistem içinde eldeki tüm veriler (jeolojik, jeofizik ve üretim verileri) değerlendirilmeli ve en uygun model seçilmelidir.

Bu çalışmada, sadece üretim verilerinin kullanılması durumunda hangi tank modelinin kullanılması gerektiğine nasıl karar vermemiz gerektiği araştırılmıştır.



Şekil 2.1 : Tank modelleri.

Daha öncede belirtildiği gibi tank modellerinde basınç ve sıcaklık hesaplamalarının temelini kütlenin ve enerjinin korunumu denklemlerinin her tank için çözülmesi oluşturur. Tanklar için sadece kütlenin korunumu denklemleri çözülüyorsa, bunlara izotermal modeller denir. Kütlenin korunumu ve enerjinin korunumu denklemleri çözülüyorsa bu modellere izotermal olmayan modeller denir.

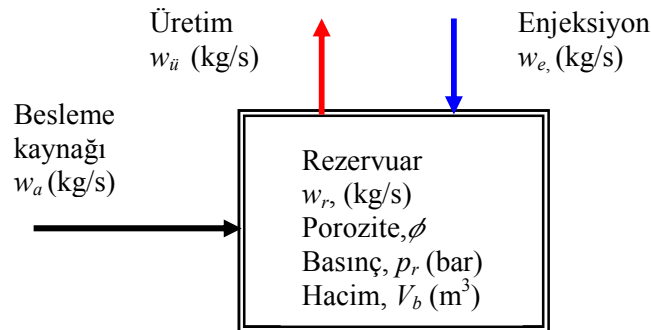
2.1 İzotermal Tank Modelleri

Daha önce de belirtildiği gibi, jeotermal sistemi temsil eden tanklar üstünde sadece kütlenin korunumu denklemleri çözülürse, bu modellere izotermal modeller denir. Bu bölümde izotermal modeller ile ilgili denklemlerin çıkartılması yer alacaktır. İlk önce, basit tek tanklı sistem üstünde denklemler çıkartılacak daha sonra da çok tanklı sistemlerde denklemler açıklanacaktır.

2.1.1 Tek Tank Açık Model

Tek tank modeli Şekil 2.2 de şematik olarak gösterilmiştir. Burada, V_b (m^3) rezervuar hacmini, ϕ poroziteyi ifade etmektedir. $w_{\bar{u}}$ (kg/s) toplam üretim debisi, w_e (kg/s) toplam enjekte edilen kütle debisini ve w_a (kg/s) üretim nedeniyle meydana gelen basınç farkından dolayı akiferden rezervuara geçen toplam kütlenin akış debisini ifade eder. Rezervuarda biriken kütle w_r (kg/s) için kütle dengesi denklemi yazıldığında aşağıdaki denklik elde edilir.

$$w_r = w_a + w_e - w_{\bar{u}} \quad (2.1)$$



Şekil 2.2 : Tek tank modeli.

Rezervuardaki kütlenin birikim debisi olarak tanımlanan w_r , rezervuarda sıkışmış halde bulunan akışkanın yani suyun kütlesi olarakda yazılabilir. Rezervuardaki kütle

zamana göre değişim göstereceğinden aşağıda belirtilen denklem 2.2 de olduğu gibi rezervuarda biriken kütleye, rezervuar hacmi ve ρ_s (kg/m³) sıvı yoğunluğunun zamana göre değişimi olarak ifade edilebilir:

$$w_r = \frac{\partial(V_b \phi \rho_s)}{\partial t} \quad (2.2)$$

Elde edilen bu yeni denklem ile denklem 2.1 de yazılan kütle denkliği denklemini tekrar yazılır ise;

$$\frac{\partial(V_b \phi \rho_s)}{\partial t} = w_a + w_e - w_{ii} \quad (2.3)$$

eşitliği elde edilir. Rezervuarda biriken kütle denkleminde rezervuar hacminin sabit olduğu varsayılırsa; kütle debisinin zamana göre türevinde sabit terim denklem 2.4 de gösterildiği gibi dıőarı alınır:

$$\frac{\partial(V_b \phi \rho_s)}{\partial t} = V_b \frac{\partial(\phi \rho_s)}{\partial t} \quad (2.4)$$

Rezervuarın porozitesi ve sıvının yoğunlu rezervuar basıncına bağlı olarak değişir. Bu deęiőime c_t (bar⁻¹) toplam sıkıştırılabilirlik denir. Sıvının c_f (bar⁻¹) ve kayanın c_r (bar⁻¹) sıkıőtırılabilirlięinin toplamı olarak ifade edilir:

$$c_t = c_f + c_r \quad (2.5)$$

$$c_f = \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \quad (2.6)$$

$$c_r = \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \quad (2.7)$$

Denklem 2.4 porozite ve su yoğunluğunun zamana göre türevinde zincir kuralı uygulanarak denklem genişletilirse denklem 2.8 elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_s) = \phi \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_s \frac{\partial \phi}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.8)$$

Elde edilen denklem $\phi \rho_s$ parantezine alınarak düzenlenir ise;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_s) = \phi \rho_s \left[\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \right] \quad (2.9)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 2.9 un sağ tarafındaki terimlere bakıldığında c_t toplam sıkıştırılabilirliği ifade ettiği görülür. Denklemde de c_f (bar⁻¹) ve c_r (bar⁻¹) yerine yazıldığında rezervuarda biriken kütle debisini basınçın zamana göre değişimine bağlı olarak denklem 2.10 gösterildiği gibi elde ederiz:

$$\frac{\partial V_b \phi \rho_s}{\partial t} = V_b \phi \rho_s c_t \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.10)$$

Bu noktaya kadar elde edilen denklemler ana denklem olan denklem 2.3 de yerine konulduğunda aşağıda verilen ifade elde edilir.

$$V_b \phi \rho_s c_t \frac{\partial p}{\partial t} = w_a - w_u + w_e \quad (2.11)$$

Ana denklemin ikinci terimi w_a , akiferden rezervuara üretim nedeniye hareket eden kütle debisini ifade etmektedir. Akiferi besleyen kaynağın büyük olduğu varsayılırsa bu sistemin dış sınırındaki basınç sabittir. Bu durumda su girişi debisi Schilthuis modeli kullanılarak (Schilthuis,1936)

$$w_a = \alpha [p_i - p(t)] \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir.

α (kg/bar – s), rezervuar besleme sabiti, p_i rezervuarın ilk basıncını $p(t)$ ise birim zamandaki rezervuar basıncını ifade eder.

Elde edilen değerler ana denklemde yerine konulduğunda denklem 2.13 elde edilir.

$$V_b \phi \rho_s c_t \frac{\partial p}{\partial t} - \alpha [p_i - p(t)] + [w_u - w_e] = 0 \quad (2.13)$$

İlk terim rezervuarda biriken madde miktarını, ikinci terim akiferden rezervuara geçen madde miktarını ve son terimde net üretim değişimini ifade eder. İlk terimdeki sabit olan değerler tek bir ifade altında depolama kapasitesi. κ (kg/bar) olarak adlandırılabilir.

$$\kappa = V_b \phi \rho_s c_t \quad (2.14)$$

Üretilen madde miktarından, sisteme enjekte edilen madde miktarı çıkarıldığında net üretim elde edilir.

$$w_{u,net} = w_u - w_e \quad (2.15)$$

Bu iki yeni ifade denklem 2.13 de yerine konulursa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$w_{ü,net} = \alpha [p_i - p(t)] - \kappa \frac{dp}{dt} \quad (2.16)$$

Rezervuar beslemesinin sabit basınçlı olduğunu varsayarsak, birim zamandaki fark basıncını aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$\Delta p(t) = p_i - p(t) \quad (2.17)$$

Elde edilen bu denklemleri birleştirdiğimizde denklem 2.18 elde edilir.

$$\frac{d\Delta p}{dt} + \frac{\alpha}{\kappa} \Delta p = \frac{w_{ü,net}}{\kappa} \quad (2.18)$$

Birinci derece differansiyel denklem haline dönüştürdüğümüz denklem 2.18 çözüldüğünde genel çözüm denklem 2.19 da belirtildiği gibi elde edilir.

$$\Delta p(t) = c \exp\left(-\frac{\alpha t}{\kappa}\right) + \frac{w_{ü,net}}{\alpha} \quad (2.19)$$

Denklemin çözümü için uygun başlangıç koşulları tanımlanmalıdır. $t=0$ anında sistemde basınç farkı olmadığı varsayılırsa, $\Delta p(t=0)=0$ olacaktır. Denklemden değerler yerine konduğunda c sabitin değeri net üretimin, rezervuar beslemesine oranı olarak bulunur.

$$c = -\frac{w_{ü,net}}{\alpha} \quad (2.20)$$

Denklem 2.19 da c sabiti yerine yazıldığında;

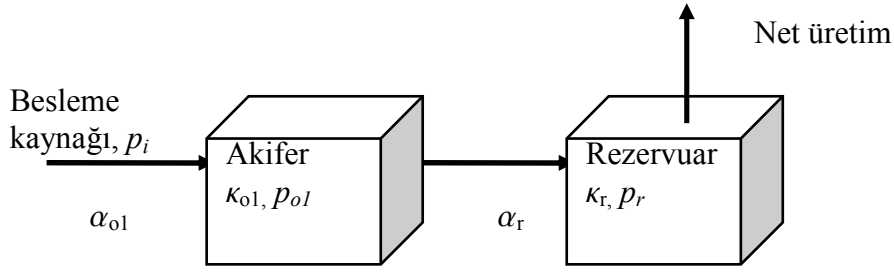
$$\Delta p(t) = \frac{w_{ü,net}}{\alpha} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha t}{\kappa}\right) \right] \quad (2.21)$$

elde edilir. Δp ifadesi açık olarak yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilir.

$$p(t) = p_i - \frac{w_{ü,net}}{\alpha} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha t}{\kappa}\right) \right] \quad (2.22)$$

2.1.2 2 Tank Açık Model

2 tank model Şekil 2.3 de görüldüğü gibi 1 tane rezervuar, 1 tane rezervuarı besleyen akiferden oluşan 2 tankın bulunduğu sistemdir. Akifer sabit basınçlı sürekli bir besleme kaynağı tarafından beslenir.



Şekil 2.3 : 2 tank açık model.

Bu sistemde hem akifere, hemde rezervuara akış olduğundan Schilthuis modeli her ikisi içinde kullanılır.

$$w_a = \alpha_{ol} [p_i - p_{ol}(t)] \quad (2.23)$$

$$w_r = \alpha_r [p_{ol} - p_r(t)] \quad (2.24)$$

α_{ol} (kg/bar – s) akifer besleme sabiti olarak adlandırılabilir. Besleme kaynağından akifere doğru geçen kütle için kullanılır. α_r (kg/bar – s) rezervuar besleme sabiti, akifere doğru geçen kütle için kullanılır. p_{ol} (bar) ve κ_{ol} (kg/bar) akifer için herhangi bir t anındaki basınç ve depolama kapasitesidir. $p_r(t)$ (bar) ve κ_r (kg/bar) rezervuar için herhangi bir t anındaki basınç ve depolama kapasitesini ifade eder. 2 tank açık sistem için elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir. Bu denklemler Sarak (2005) tarafından çıkarılmıştır.

$$\Delta p_r(t) = \frac{w_{ü,net}}{\kappa_r} \left[\frac{d}{\mu_1 \mu_2} + \frac{\mu_1 - d}{\mu_1 (\mu_2 - \mu_1)} \exp(-\mu_1 t) + \frac{\mu_2 - d}{\mu_2 (\mu_1 - \mu_2)} \exp(-\mu_2 t) \right] \quad (2.25)$$

Denklemden μ_1 , μ_2 ve d olarak belirtilen kat sayılar aşağıda verilen denklemlerle ifade eder.

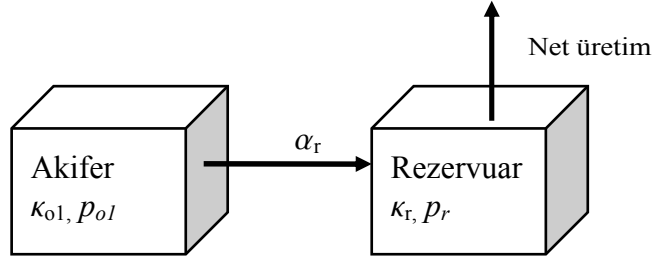
$$\mu_1 = \frac{\left[d + \frac{\alpha_r}{\kappa_r} \right] + \sqrt{\left[d + \frac{\alpha_r}{\kappa_r} \right]^2 - 4 \frac{\alpha_{ol} \alpha_r}{\kappa_{ol} \kappa_r}}}{2} \quad (2.26)$$

$$\mu_2 = \frac{\left[d + \frac{\alpha_r}{\kappa_r} \right] - \sqrt{\left[d + \frac{\alpha_r}{\kappa_r} \right]^2 - 4 \frac{\alpha_{ol} \alpha_r}{\kappa_{ol} \kappa_r}}}{2}$$

$$d = \frac{[\alpha_{ol} + \alpha_r]}{\kappa_{ol}} \quad (2.27)$$

2.1.3 2 Tank Kapalı Model

2 tank kapalı model aşağıdaki Şekil 2.4 de gösterildiği gibi akifere beslemenin olmadığı başka bir değişle akifer kütle debisinin $w_a=0$ ve akifer besleme sabitinin $\alpha_{o1} = 0$ olduğu sistemlerdir.



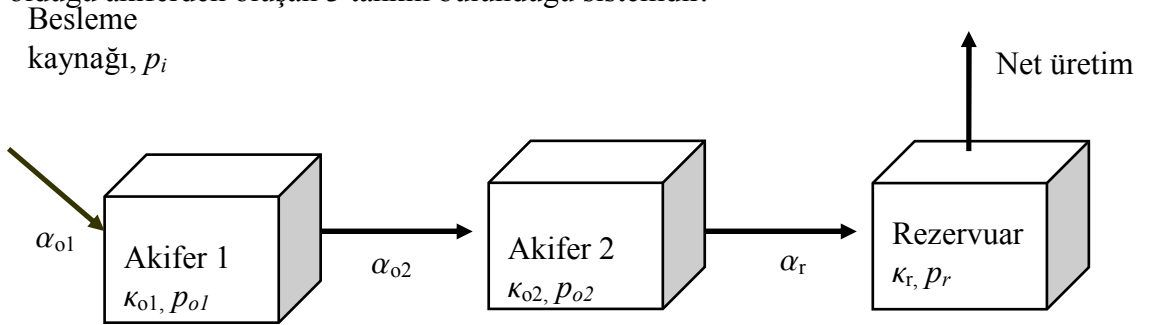
Şekil 2.4 : 2 tank kapalı model.

Kapalı model için kütle denklığı denklemi yazılıp çözüldüğünde denklem 2. 28 elde edilir.

$$\Delta p_r(t) = \frac{w_{ü,net}}{(K_{o1} + K_r)} t + \frac{w_{ü,net}}{\alpha_r} \left(\frac{K_{o1}}{(K_{o1} + K_r)} \right)^2 \left[1 - \exp \left(-\alpha_r \frac{K_{o1} + K_r}{K_{o1} K_r} t \right) \right] \quad (2.28)$$

2.1.4 3 Tank Açık Model

3 tank model Şekil 2.5 de görüldüğü gibi 1 tane rezervuar , 2 tane rezervura akışın olduğu akiferden oluşan 3 tankın bulunduğu sistemdir.



Şekil 2.5: 3 tank açık model.

Bu sistemde hem akifere, hemde rezervuara akış olduğundan Schilthuis modeli her ikisi içinde kullanılır.

$$w_r = \alpha_r [p_{o2} - p_r(t)] \quad (2.29)$$

$$w_{o1} = \alpha_{o1} [p_i - p_{o1}(t)] \quad (2.30)$$

$$w_{o2} = \alpha_{o2} [p_{o1} - p_{o2}(t)] \quad (2.31)$$

α_{o2} (kg/bar – s) 2 nolu akifer için besleme sabiti olarak adlandırılabilir. Besleme kaynağından akifere doğru geçen kütle için kullanılır. p_{o2} (bar) ve κ_{o2} (kg/bar) akifer için herhangi bir t anındaki basınç ve depolama kapasitesidir. Δp yi elde etmek için genel yol takip edildiğinde denklem 2.32 elde edilir.

$$\Delta p_r(t) = \frac{w_{ü,net}}{\kappa_r} [A + B \exp(-\mu_1 t) + C \exp(-\mu_2 t) + D \exp(-\mu_3 t)] \quad (2.32)$$

Denklemde belirtilen A, B, C, D, μ_1 ve μ_2 değerleri aşağıda verilen denklemler kullanılarak elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{a_2}{\mu_1 \mu_2 \mu_3} \\ B &= -\frac{\mu_1^2 - a_1 \mu_1 + a_2}{\mu_1 (\mu_2 - \mu_1) (\mu_3 - \mu_1)} \\ C &= -\frac{\mu_2^2 - a_1 \mu_2 + a_2}{\mu_2 (\mu_1 - \mu_2) (\mu_3 - \mu_2)} \\ D &= -\frac{\mu_3^2 - a_1 \mu_3 + a_2}{\mu_3 (\mu_1 - \mu_3) (\mu_2 - \mu_3)} \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

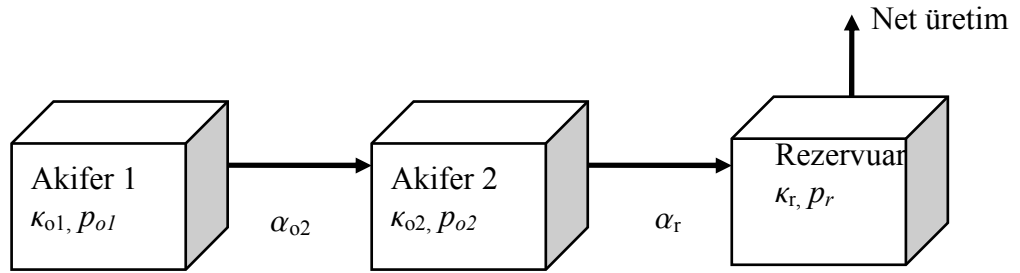
$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= 2\sqrt{Q} \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) + \frac{a_3}{3} \\ \mu_2 &= 2\sqrt{Q} \cos\left(\frac{\theta + 2\pi}{3}\right) + \frac{a_3}{3} \\ \mu_3 &= 2\sqrt{Q} \cos\left(\frac{\theta + 4\pi}{3}\right) + \frac{a_3}{3} \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{a_3^2 - 3a_4}{9} \\ R &= \frac{2a_3^3 - 9a_3 a_4 + 27a_5}{54} \\ \theta &= \arccos\left(\frac{R}{\sqrt{Q^3}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

$$\left. \begin{aligned}
a_1 &= \frac{\kappa_{o2}(\alpha_{o2} + \alpha_{o1}) + \kappa_{o1}(\alpha_{o2} + \alpha_r)}{\kappa_{o2}\kappa_{o1}} \\
a_2 &= \frac{\alpha_{o2}\alpha_r + \alpha_{o1}\alpha_r + \alpha_{o2}\alpha_{o1}}{\kappa_{o1}\kappa_{o2}} \\
a_3 &= \frac{\kappa_{o1}\kappa_r(\alpha_{o2} + \alpha_r) + \kappa_{o2}\kappa_r(\alpha_{o2} + \alpha_{o1}) + \kappa_{o2}\kappa_{o1}\alpha_r}{\kappa_{o2}\kappa_{o1}\kappa_r} \\
a_4 &= \frac{\kappa_r(\alpha_{o2}\alpha_r + \alpha_{o1}\alpha_r + \alpha_{o2}\alpha_{o1}) + \kappa_{o2}(\alpha_{o2}\alpha_r + \alpha_{o1}\alpha_r) + \kappa_{o1}(\alpha_{o2}\alpha_r)}{\kappa_{o2}\kappa_{o1}\kappa_r} \\
a_5 &= \frac{\alpha_{o2}\alpha_{o1}\alpha_r}{\kappa_{o2}\kappa_{o1}\kappa_r}
\end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

2.1.5 3 Tank Kapalı Model

3 tank kapalı model aşağıda verilen şekil 2.6 da gösterildiği gibi 2 no'lu akifere beslemenin olmadığı yani akifer besleme sabitinin $\alpha_{o1} = 0$ olduğu sistemlerdir.



Şekil 2.6: 3 Tank kapalı model.

Denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\Delta p_r(t) = \frac{w_{p,net}}{\kappa_r} a_2 \left\{ \frac{t}{\mu_1 \mu_2} + \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} \left[\frac{\exp(-\mu_1 t) - 1}{\mu_1^2} - \frac{\exp(-\mu_2 t) - 1}{\mu_2^2} \right] \right\} \\
+ \frac{w_{p,net}}{\kappa_r} a_1 \left\{ \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} \left[\frac{1 - \exp(-\mu_1 t)}{\mu_1} - \frac{1 - \exp(-\mu_2 t)}{\mu_2} \right] \right\} \\
+ \frac{w_{p,net}}{\kappa_r} a \left\{ \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} [\exp(-\mu_1 t) - \exp(-\mu_2 t)] \right\} \quad (2.37)$$

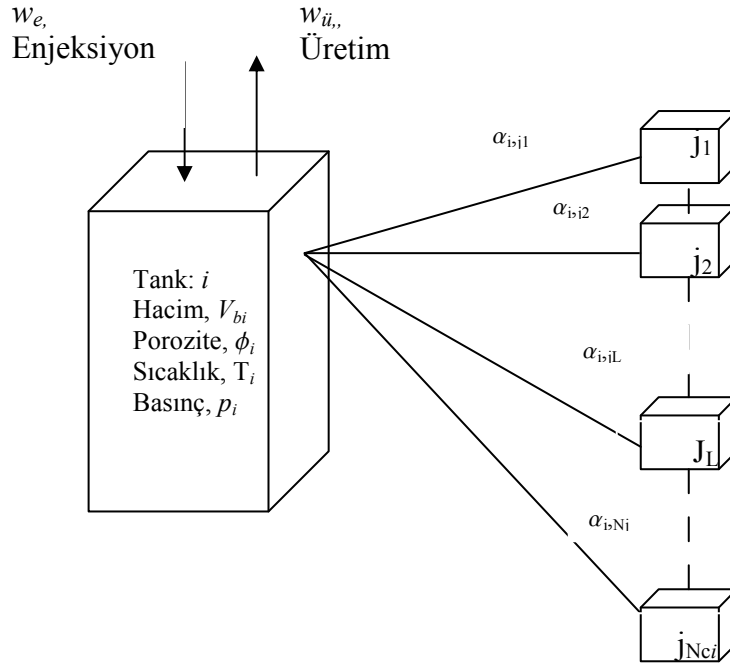
$$\mu_1 = \frac{a_3 + \sqrt{a_3^2 - 4a_4}}{2} \quad \mu_2 = \frac{a_3 - \sqrt{a_3^2 - 4a_4}}{2} \quad (2.38)$$

$$\left. \begin{aligned}
a_1 &= \frac{\kappa_{o1}(\alpha_{o2} + \alpha_r) + \kappa_{o2}\alpha_{o2}}{\kappa_{o2}\kappa_{o1}} \\
a_2 &= \frac{\alpha_{o2}\alpha_r}{\kappa_{o2}\kappa_{o1}} \\
a_3 &= \frac{\kappa_{o1}\kappa_r(\alpha_{o2} + \alpha_r) + \kappa_{o2}\kappa_r\alpha_{o2} + \kappa_{o2}\kappa_{o1}\alpha_r}{\kappa_{o2}\kappa_{o1}\kappa_r} \\
a_4 &= \frac{(\kappa_{o2} + \kappa_{o1} + \kappa_r)\alpha_{o2}\alpha_r}{\kappa_{o2}\kappa_{o1}\kappa_r}
\end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

2.1.6 İzotermal Modellerin Sayısal Çözümleri

Daha önceki bölümlerde izotermal modeller için analitik çözümler verilmiştir. Analitik çözümler, anlaşıldığı gibi tankların konfigürasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu bölümde tanklar için kütle korunumu denklemleri sayısal olarak çözülecektir. Geliştirilen sayısal çözümler tank konfigürasyonundan bağımsız olacak şekilde genel olarak verilecektir.

Şekil 2.8 herhangi bir i tankı gösterilmektedir.



Şekil 2.7 N_i tane tank içeren sistemin şematik gösterimi.

Şekil 2.8'deki i tankının V_{bi} (m^3) hacmi, ϕ_i gözenekliliği ve p_i (bar) basıncı olsun. Bu tankdan $w_{ü,net}$ üretim debisi bulunmaktadır. Bu tankın aynı zamanda N_{ci} adet başka tank ile bağlantısı bulunmaktadır. Burada N_{ci} herhangi bir i tankının yaptığı toplam bağlantı sayısını gösterir.

Eğer i tankı üstünde kütle korunumu prensibini yazacak olursak:

$$\begin{array}{l} \text{Net üretilen} \\ \text{kütle debisi} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Diğer tanklardan gelen} \\ \text{kütle debisi} \end{array} = \begin{array}{l} i \text{ tankında} \\ \text{biriken kütle debisi} \end{array} \quad (2.40)$$

$$\text{Net üretim debisi} = w_{ü,net} \quad (2.41)$$

$$\begin{array}{l} \text{Diğer tanklardan gelen} \\ \text{kütle debisi} \end{array} = w_{i,j1} + w_{i,j2} + \dots + w_{i,jL} + \dots + w_{i,jN_{ci}} \quad (2.42)$$

Tanklar arasındaki kütle debisi Schulthuis yaklaşımından yazılır.

$$w_{i,jL} = \alpha_{i,jL} (p_{jL} - p_i) \quad (2.43)$$

$\alpha_{i,jL}$, i tankı ile jL tankı arasındaki değişim indeksidir. Bu denklem 2.40 de yerine yazılır ise;

$$\kappa_i \frac{\partial p_i}{\partial t} = [\alpha_{i,j1} (p_i - p_1) + \alpha_{i,j2} (p_i - p_2) + \dots + \alpha_{i,jN_{ci}} (p_i - p_{N_{ci}})] - w_{ü,net} \quad (2.44)$$

Denklemde basıncın zamana göre türevi için sonlu farklar yaklaşımı kullanılırsa,

$$\kappa_i \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} + w_{ü,net}^n = [\alpha_{i,j1} (p_i^{n+1} - p_1^{n+1}) + \alpha_{i,j2} (p_i^{n+1} - p_2^{n+1}) + \dots + \alpha_{i,jN_{ci}} (p_i^{n+1} - p_{N_{ci}}^{n+1})] \quad (2.45)$$

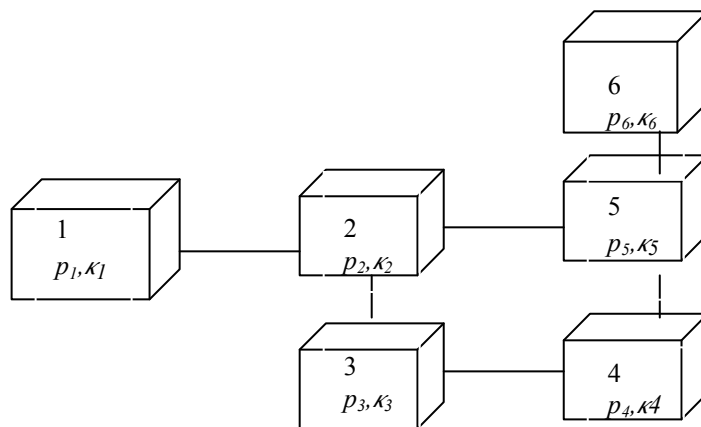
Denklem 2.45 düzenlenir ise aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sum_{L=1}^{N_i} \alpha_{i,jL} (p_i^{n+1} - p_{jL}^{n+1}) = \kappa_i \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} + w_{ü,net}^n \quad (2.46)$$

Elde edilen denklem 2.46 de bilenenleri ve bilinmeyenleri topladığımızda i tankı için kütle denkliği denklem 2.47 elde edilir.

$$\sum_{l=1}^{N_i} \alpha_{i,j_l} p_{j_l}^{n+1} + \left[\sum_{l=1}^{N_i} \alpha_{i,j_l} - \frac{\kappa_i}{\Delta t} \right] p_i^{n+1} = -\frac{\kappa_i p_i^n}{\Delta t} + w_{ü,net}^n \quad (2.47)$$

i tankı için elde edilen kütle denkliği geliştirilerek tank modellerine uygulanır. Elde edilen denklemin uygulamasını daha net anlayabilmek için kütlenin korunumu şekil 2.9 da gösterilen 6 tanklı modelde uygulayalım.



Şekil 2.8 : 6 tanklı model.

Sistemde bulunan her tank için ayrı ayrı kütle denklığı yazıldığında aşağıdaki denklem 2.48 verilen denklemler elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} \left(\alpha_{12} - \frac{\kappa_1}{\Delta t} \right) p_1^{n+1} + \alpha_{12} p_2^{n+1} &= -\frac{(\kappa_1 p_1^n)}{\Delta t} + w_{ü.net1}^n \\ \alpha_{12} p_1^{n+1} + \left(\alpha_{21} + \alpha_{23} + \alpha_{25} - \frac{\kappa_2}{\Delta t} \right) p_2^{n+1} + \alpha_{23} p_3^{n+1} + \alpha_{25} p_5^{n+1} &= -\frac{(\kappa_2 p_2^n)}{\Delta t} + w_{ü.net2}^n \\ \alpha_{23} p_2^{n+1} + \left(\alpha_{23} + \alpha_{34} - \frac{\kappa_3}{\Delta t} \right) p_3^{n+1} + \alpha_{34} p_4^{n+1} &= -\frac{(\kappa_3 p_3^n)}{\Delta t} + w_{ü.net3}^n \\ \alpha_{34} p_3^{n+1} + \left(\alpha_{34} + \alpha_{45} - \frac{\kappa_4}{\Delta t} \right) p_4^{n+1} + \alpha_{45} p_5^{n+1} &= -\frac{(\kappa_4 p_4^n)}{\Delta t} + w_{ü.net4}^n \\ \alpha_{25} p_2^{n+1} + \alpha_{45} p_4^{n+1} + \left(\alpha_{25} + \alpha_{45} - \frac{\kappa_5}{\Delta t} \right) p_5^{n+1} + \alpha_{56} p_6^{n+1} &= -\frac{(\kappa_5 p_5^n)}{\Delta t} + w_{ü.net5}^n \\ \alpha_{56} p_5^{n+1} + \left(\alpha_{56} - \frac{\kappa_6}{\Delta t} \right) p_6^{n+1} &= -\frac{(\kappa_6 p_6^n)}{\Delta t} + w_{ü.net6}^n \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

Toplam sistem için denklemler yazıldığında 6 bilinmeyenli 6 eşitlik elde edilir. Çizelge 2.1 de tankların birbirleri ile etkileşimi gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 Tank etkileşimleri.

Tank Sayısı (i)	Bağlı olduğu tank sayısı (N _i)	Bağlı olduğu tank (j _i)
1	1	J ₁ =2
2	3	J ₁ =1, J ₂ =3, J ₃ =5
3	2	J ₁ =2, J ₂ =4
4	2	J ₁ =3, J ₂ =5
5	3	J ₁ =2, J ₂ =4, J ₃ =6
6	1	J ₁ =5

$\mathbf{p}^{n+1}$, bilinmeyen basınç verilerin 6 boyutlu vektörü ve $\mathbf{d}^n$ bilinen verilerin 6 boyutlu vektörü olsun.

$$\mathbf{p}^{n+1} = \begin{bmatrix} p_1^{n+1} \\ p_2^{n+1} \\ p_3^{n+1} \\ p_4^{n+1} \\ p_5^{n+1} \\ p_6^{n+1} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$\mathbf{d}^n = \begin{bmatrix} -\frac{(\kappa_1 p_1^n)}{\Delta t} + w_{\bar{u},net1}^n \\ -\frac{(\kappa_2 p_2^n)}{\Delta t} + w_{\bar{u},net2}^n \\ -\frac{(\kappa_3 p_3^n)}{\Delta t} + w_{\bar{u},net3}^n \\ -\frac{(\kappa_4 p_4^n)}{\Delta t} + w_{\bar{u},net4}^n \\ -\frac{(\kappa_5 p_5^n)}{\Delta t} + w_{\bar{u},net5}^n \\ -\frac{(\kappa_6 p_6^n)}{\Delta t} + w_{\bar{u},net6}^n \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Bu varsayımlar altında denklemimiz aşağıdaki gibi matris-vektör formunda yazılabilir.

$$\mathbf{A} \mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{d}^n \quad (2.51)$$

Burada A matris sabitidir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left(\alpha_{42} - \frac{\kappa_1}{\Delta t}\right) & \alpha_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{42} & \left(\alpha_{21} + \alpha_{23} + \alpha_{25} - \frac{\kappa_2}{\Delta t}\right) & \alpha_{23} & 0 & \alpha_{25} & 0 \\ 0 & \alpha_{23} & \left(\alpha_{23} + \alpha_{34} - \frac{\kappa_3}{\Delta t}\right) & \alpha_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{34} & \left(\alpha_{34} + \alpha_{45} - \frac{\kappa_4}{\Delta t}\right) & \alpha_{45} & 0 \\ 0 & \alpha_{25} & 0 & \alpha_{45} & \left(\alpha_{25} + \alpha_{45} - \frac{\kappa_5}{\Delta t}\right) & \alpha_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{56} & \left(\alpha_{56} - \frac{\kappa_6}{\Delta t}\right) \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (2.52)$$

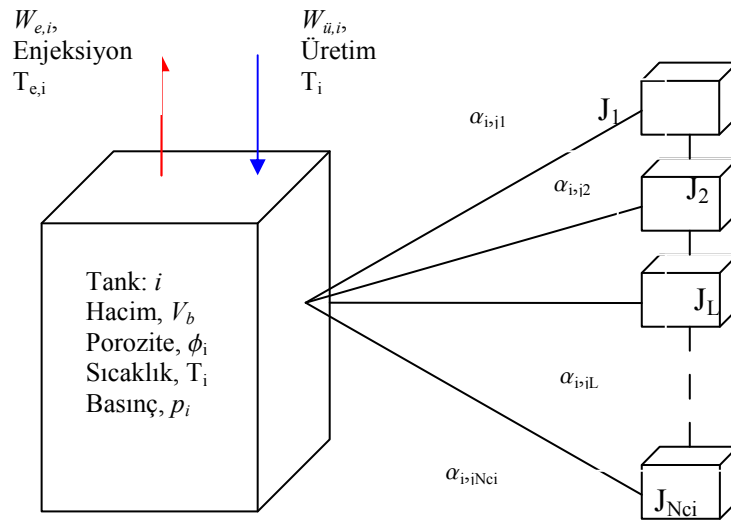
Denklem 2.51 tekrar düzenlenerek basınç değeri elde edilir.

$$\mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{d}^n \quad (2.53)$$

2.2 İzotermal Olmayan Tank Modelleri

Jeotermal rezervuarlarda sıcaklığın modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Jeotermal sistemlerde sıcaklık değişimleri geri basma işlemlerinden ve beslenme kaynaklarından soğuk su girişinden kaynaklanabilmektedir. Bunların neticesinde oluşabilecek sıcaklık değişimlerinin modellenmesi özellikle jeotermal rezervuarın ömrü ve yapılacak yatırımların belirlenmesi için zorunludur. Bir önceki bölümde verilen izotermal modeller jeotermal rezervuarların ortalama basınçlarını modelleyebilme yeteneğine sahip olsa da sıcaklık davranışlarını modelleyemezler. Tank sisteminde kütle dengesi denklemiyle birlikte enerji dengesi denklemlerinin çözülmesiyle izotermal olmayan modeller elde edilir. Bu modeller sayesinde jeotermal sistemdeki akiferlerin ve rezervuarın basınç davranışlarıyla birlikte sıcaklık davranışları da modellenebilmektedir. Bu bölümde izotermal olmayan modeller için çözüm denklemlerinin çıkartılması ve çözüm yöntemleri gösterilecektir.

Şekil 2.10’da verilen izotermal olmayan tank modeli şematik olarak gösterilmiştir. V_{bi} (m^3) i tankı için hacmi, ϕ_i poroziteyi, T_i ($^{\circ}C$) rezervuar sıcaklığını, $T_{e,i}$ ($^{\circ}C$) enjekte edilen akışkanın sıcaklığını, $T_{a,i}$ ($^{\circ}C$) besleme kaynağının sıcaklığını ve p_i (bar) rezervuar basınçını ifade eder. Şekilde görüldüğü gibi bütün tanklar birbirine bağlıdır. N_{ci} , i tankının diğer tanklarla yaptığı bağlı sayısını, $w_{ü,i}$ (kg/s) toplam üretim debisi, $w_{e,i}$ (kg/s) toplam enjekte edilen kütle debisini ve $w_{a,i}$ (kg/s) üretim nedeniyle meydana gelen basınç farkından dolayı diğer tanklardan i tankına geçen toplam kütlenin akış debisini ifade eder.



Şekil 2.9 i tankı ve bağlantıları.

Burada $w_{a,jL}$ (kg/s) olarak adlandırılan kütle debisi, herhangi j_L tankından i tankına olan akışı ifade eder ve denklem 2.54 den elde edilir.

$$w_{a,jL} = \alpha_{i,jL} [p_{jL} - p_i] \quad (2.54)$$

Elde edilen denklemler genel kütle denkleminde yerine konulduğunda denklem 2.55 elde edilir.

$$V_b \frac{\partial(\rho_s \phi_r)}{\partial t} + [w_{u,i}(t) - w_{e,i}(t)] + \sum_{j=1}^{N_{ci}} \alpha_{i,jt} [p_{jt} - p_i(t)] = 0 \quad (2.55)$$

$\rho_{s,i}$ (kg/m³) tank içinde bulunan suyun yoğunludur. Denklemdaki ilk terim rezervuarda biriken kütle debisini, ikinci terim net üretim debisini ve son terimde bağlı olan tankların net akış debisini ifade eder.

Rezervuarlarda ısı konveksiyonel olarak yayılır. Başka bir deyişle rezervuardaki sıcaklık, genellikle üretim nedeniyle çekilen veya enjeksiyon nedeniyle rezervuara basılan akışkanın hareketi yada besleme kaynaklarından gelen akışkanın hareketi nedeniyle değişir. Rezervuarlarda konduksiyonel ısı transferi çok düşük olduğundan ihmal edilebilir. Yapılan varsayımlar doğrultusunda i tankı için enerji denkliği yazıldığında denklem 2.56 elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [(1-\phi)V_b \rho_r C_r T + V_b \phi_r \rho_s u_s] - w_e(t) h_{s,e,i}(T_{e,i}, t) + w_{u,i}(t) h_{s,i}(T_i, t) \\ + \sum \alpha_{i,jt} [p_{jt}(t) - p_i(t)] h_y = 0 \end{aligned} \quad (2.56)$$

Burada, ρ_r (kg/m³) kayanın yoğunluğunu, C_r (J/(kg °C)) kayanın ısı kapasitesini, $h_{s,e,i}$ (J/kg) enjekte edilen suyun entalpisini, u_s (J/kg) suyun iç enerjisini ifade eder. Denklemden ilk terim akışkanda ve kaya içinde biriken enerjiyi, enekte edilen akışkandan sisteme giren enerjiyi ve üçüncü terim üretim nedeniyle sistemden çekilen enerjiyi son olarak dördüncü terimde bağlı olan tanklardan sisteme giren enerjiyi ifade eder. Dördüncü terimde yer alan h_y ifadesinin açılımı aşağıda verilmiştir.

$$h_y = \begin{cases} h_{s,i}(T_i, t) \longrightarrow p_i > p_{jL} \\ h_{s,jt}(T_{jL}, t) \longrightarrow p_i < p_{jL} \end{cases} \quad (2.57)$$

h_s (J/kg) tankın içindeki suyun entalpisini ifade eder.

Eğer, porozite sıcaklığa ve basınça bağlı olarak değişir ise aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\phi(p, T) = \phi_0 [1 + c_r (p - p_0) - \beta_r (T - T_0)] \quad (2.69)$$

ϕ_0 , tankın ilk koşullardaki porozitesidir. c_r (1/bar) kayanın sıkıştırılabilirliği ve β_r (1/°C) kayanın termal büyüme sabitidir.

3. TANK MODELLERDE MODEL SEÇİMİ VE İLERİYE YÖNELİK PERFORMANS DEĞERLENDİRMELERİ

3.1 Tarihsel Çakıştırma Problemi

Model parametrelerinin belirlenmesinde rezervuarların üretim/re-enjeksiyon esnasında elde edilen veriler kullanılır. Belirli bir süre üretim yapmış rezervuardan gelen veriler, tank modellerinden alınan veriler ile çakıştırma yapılarak rezervuar parametreleri tayin edilir. Başka bir deyişle, ilk olarak rezervuar parametreleri tahmin edilir ve tank modellerinden elde edilen basınç veya su seviyesi değerleri sahadan gelen verilerle uyum sağlayıncaya kadar değiştirilir. Model parametreleri belirlenen rezervuarların geleceğe yönelik davranışlarının tahmininde de aynı yöntem uygulanır. Tahmin edilen parametreler kullanılarak tank modelleri ile geleceğe yönelik basınç tahminleri yapılır. Çakıştırmalar en küçük kareler tabanlı olasılık yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir.

1.1.1 3.1.1 En Küçük Kareler Yöntemi

En küçük kareler yöntemi, birbirine bağlı olarak değişen iki fiziksel büyüklük arasındaki matematiksel bağlantıyı, mümkün olduğunca gerçeğe uygun bir denklem olarak yazmak için kullanılan, standart bir regresyon yöntemidir. Bir başka deyişle bu yöntem, ölçüm sonucu elde edilmiş veri noktalarına mümkün olduğu kadar yakın geçecek bir fonksiyon eğrisi bulmaya yarar. Elde edilen eğrinin hata oranı ise ortalama karesel hataları (OKH) ile ifade eder.

$$OKH = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_d} [y_i - f(m)]^2} \quad (3.1)$$

OKH değeri ne kadar düşük olur ise sahadan gelen veriler ile hesaplanan veriler o kadar iyi eşleşiyor demektir. Fakat OKH değerinin küçük olması en uygun tank modeli ile tarihsel çakıştırma yapıldığı anlamına gelmez.

1.1.2 3.1.2 Rastgele Maksimum Olasılık Yöntemi

Rastgele maksimum olasılık yöntemi, bu çalışmada, ileriye yönelik basınç tahminleri üstündeki belirsizliğin tayin edilmesi için kullanılan yöntemdir. Rastgele Maksimum Olasılık Yönteminde y ölçülen (gerçek sahadan elde edilen) zamana karşı kaydedilmiş basınç ya da dinamik su seviyesi verilerini temsil etmektedir. Toplam veri sayısı ise N_d ile gösterilmektedir. C_D boyutu $N_d \times N_d$ olan ölçülmüş verilerin hatalarına ait kovaryans matrisidir. Basınç verilerine ait hataların ortalaması sıfır olan normal dağılım gösterdiği varsayılmakta ve kovaryans matrisi C_D ile temsil edilmektedir. $N(0, C_D)$ ortalaması sıfır ve kovaryans matrisi C_D olan bir normal dağılımı temsil etmektedir. Ölçümler üstündeki hataların e ile gösterildiği ve $m=(m_1, m_2, \dots, m_M)^T$ de tank modeline ait bilinmeyen parametre vektörü olduğu varsayımı yapılırsa, gözlemlenmiş veriler aşağıdaki gibi temsil edilebilmektedir.

$$y = f(m) + e \quad (3.2)$$

$f(m)$, m model parametreleri (örneğin, üç tank açık model için a_{o1} , k_{o1} , a_{o2} , k_{o2} , a_r , k_r) kullanılarak tank modelleri ile hesaplanan basınç verileridir. M bilinmeyen model parametre sayısını (örneğin üç tank açık model için bilinmeyen model parametre sayısı altıdır) temsil etmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi e , $N(0, C_D)$ dağılımının gerçeklemeleridir. Buna göre ölçülmüş basınç verilerine koşullu olasılık fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$L(m|y) = \exp \left[-\frac{1}{2} (y - f(m))^T C_D^{-1} (y - f(m)) \right] \quad (3.3)$$

En olası model, yukarıdaki denklemi maximize eden m değeridir. Exponansiyel ifadenin maksimum değerini elde etmek için negatif ifadenin minimum değerinin elde edilmesi gerekir. Diğer bir deyişle denklem 3.4 de verilen hedef fonksiyonun minimize edilmesine eşdeğerdir.

$$Q(m) = \left[(y - f(m))^T C_D^{-1} (y - f(m)) \right] \quad (3.4)$$

Tank modellerinde model parametreleri ile basınç verileri arasında doğrusal olmayan ilişki mevcuttur. Dolayısı ile denklem 3.4'ün minimize edilmesi doğrusal olmayan minimizasyon yöntemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada denklem 3.4'ün minimizasyonu için Levenberg-Marquardt yöntemi kullanılmıştır.

Rastgele Maximum Olasılık yönteminin temelini beş adımda özetlemek mümkündür

i) Model parametre vektörü (**m**) için tahminde bulunulur

ii) Sahadan gelen ölçülmüş verilere $y_e = y + C_D^{-1/2} z_u$ kullanılarak gürültü eklenir.

Burada z_u , N_d boyutlu birbirinden bağımsız standart normal dağılımından elde edilen verilerdir. Bu çalışmadaki örneklerde basınç verileri üstündeki hataların birbirinden bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle $C_D^{1/2}$ köşegen bir matristir. Bu matrisin elemanları C_D ; matrisinin elemanlarının kareköküne eşittir.

iii) y yerine y_e kullanılarak denklem 3.4 minimize edilir. Böylece model parametrelerinin koşullu gerçekleştirilmesi elde edilir.

iv) Dördüncü adım olarak model parametreleri ile hesaplanan basınç verilerinin gerçek sahadan gelen veriler ile karşılaştırılarak kontrol edilir.

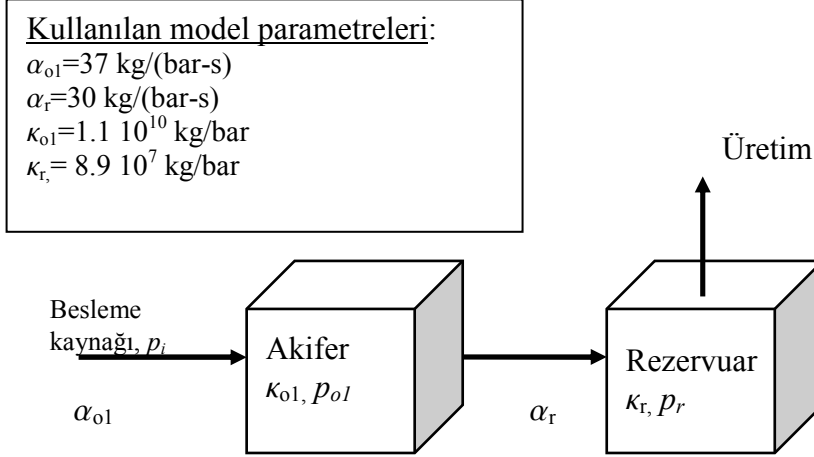
v) N adet gerçekleştirme elde etmek için (i-iv) N kez tekrarlanır. N adet kabul edilir karşılaştırma sağlandıktan sonra geleceğe yönelik N tahmin yapılabilmektedir. Dolayısı ile geleceğe yönelik basınç ya da su seviyesi tahminleri üstündeki belirsizlik tanımlanabilmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen verilerin ne kadar iyi bir karşılaştırma yapılarak elde edildiğinin yani hata payının tespiti için OKH değerlerine bakılır.

3.2 Yapay Uygulama

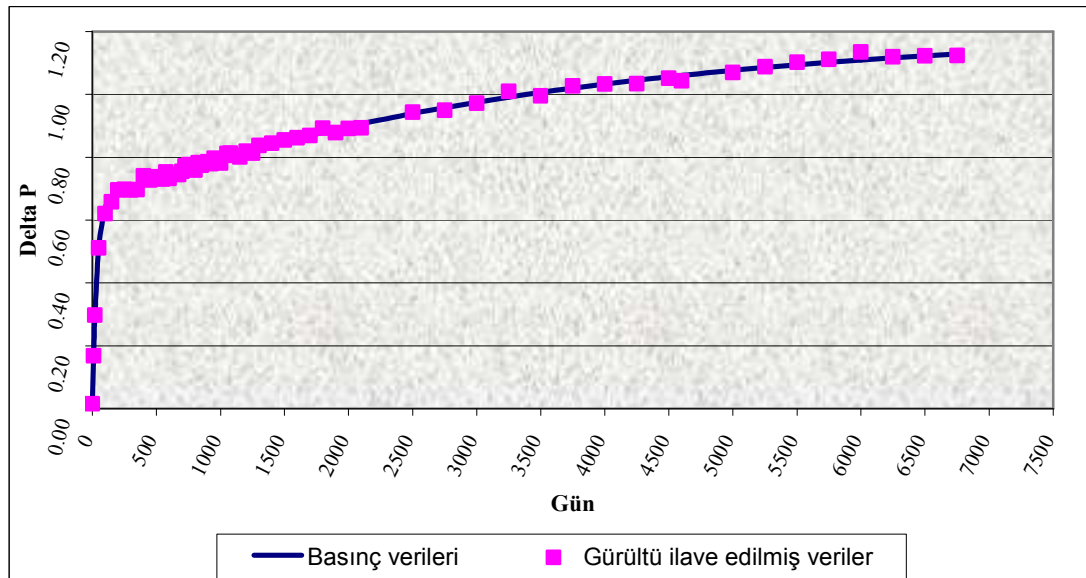
Bu bölümde ileriye yönelik basınç performanslarının üstündeki belirsizliğin sayısallaştırılması amacı ile yapay örnek verilmektedir. Burada ilk önce, seçilmiş bir model kullanılarak yapay saha verileri üretilecektir. Daha sonra, bu verilere rastgele maksimum olasılık yöntemi kullanılarak tarihsel karşılaştırma yapılacak ve ileriye yönelik belirsizlikler sayısallaştırılacaktır. Aynı zamanda elde edilen istatistiksel veriler kullanılarak model seçiminin nasıl yapılması konusunda bilgi verilecektir. Rezervuar modellemesinde en önemli adımlardan birisi doğru tank modelinin seçilmesidir.

Yapay verilerin üretilmesinde 6750 gün, sabit 20 kg/s kütleli debi ile üretim yapan, Şekil 3.1 de verilen iki tanklı sistem kullanılmaktadır.



Şekil 3.1: Gerçek rezervuarın şematik gösterimi.

Bilindiği gibi gerçek saha verileri gürültü içermektedir. Bu nedenler, Şekil 3.1'deki model kullanılarak üretilen veriler üstüne, gerçek saha verilerine benzemesi amacıyla, standart sapması 0,01 ve ortalaması 0 olan rastgele üretilmiş hatalar ilave edildi. Şekil 3.2 de model çıktısı ve gürültülü veriler gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Yapay basınç verileri.

Model parametrelerinin belirlenmesinde rezervuarların üretim/re-enjeksiyon esnasında elde edilen veriler kullanılır. Belirli bir süre üretim yapmış rezervuardan gelen veriler, tank modellerinden alınan veriler ile karşılaştırma yapılarak rezervuar parametreleri tayin edilir. Baska bir deyişle, ilk olarak rezervuar parametreleri tahmin edilir ve tank modellerinden elde edilen basınç veya su seviyesi değerleri sahadan gelen verilerle uyum sağlayıncaya kadar değiştirilir.

Şekil 3.2’de verilen yapay verilere tarihsel karşılaştırma yapmak amacıyla 4 ayrı model kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla, 2 tank kapalı model, 2 tank açık model (gerçek model) 3 tank açık ve 3 tank kapalı modeldir. İlk etapta bu modeller kullanımıyla tarihsel karşılaştırma yapılarak model parametreleri, model parametrelerine ait %95 güvenilirlik aralıkları ve tarihsel karşılaştırmanın ne kadar iyi olduğunu gösteren ortalama karesel hatalar belirlenmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 3.1’de verilmektedir. Çizelge 3.1’den anlaşılacağı gibi, en düşük ortalama karesel hataları (OKH) 2 tank açık (gerçek model), 3 tank açık ve 3 tank kapalı modeller vermiştir. OKH’nin düşük olması bu modeller ile yapılan tarihsel karşılaştırma sonuçlarının iyi olduğunu göstermektedir. OKH değerleri, yapılabilecek en iyi karşıtırmada basınç verileri üstündeki gürültünün standart sapması kadar düşük olmalıdır. Daha önceden hatırlanacağı gibi, basınç veriler üstüne standart sapması 0,01 bar olan gürültü eklenmişti. Dolayısı ile, iyi bir karşıtmanın sağlayacağı OKH değerleri de bu değere eşit olmalıdır. 2 tank açık modelde bu değerden daha düşük OKH elde edilmiştir. Bunun nedeni ise gürültünün oluşturulduğu istatistiksel yazılım paketinin tam olarak 0.01 bar gürültülü değerler üretememesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 3.1: Dört farklı tank modeli ile gözlenmiş verilere karşılaştırma yapılarak tahmin edilen model parametreleri ve parametrelere ait güvenilirlik aralıkları.

Model parametreleri	Model parametrelerinin gerçek değerleri (2 tank açık)	Tahmin edilen model parametreleri			
		2 tank açık	2 tank kapalı	3 tank açık	3 tank kapalı
κ_r (kg/bar)	$8,9 \times 10^7$	$9,06 \times 10^7$ ($\pm 5,2 \times 10^6$)	$1,02 \times 10^8$ ($\pm 0,57 \times 10^8$)	$1,03 \times 10^8$ ($\pm 7,04 \times 10^6$)	$1,0 \times 10^8$ ($\pm 6,58 \times 10^6$)
α_r (kg/bar-s)	30	29,9 ($\pm 0,34$)	27,5 ($\pm 0,44$)	29,4 ($\pm 72,7$)	29,8 ($\pm 0,48$)
κ_{o1} (kg/bar)	$1,1 \times 10^{10}$	$1,13 \times 10^{10}$ ($\pm 7,8 \times 10^8$)	$2,43 \times 10^{10}$ ($\pm 1,4 \times 10^9$)	$1,22 \times 10^{10}$ ($\pm 1,7 \times 10^{10}$)	$1,12 \times 10^{10}$ ($\pm 1,6 \times 10^9$)
α_{o1} (kg/bar-s)	37	36,6 ($\pm 1,51$)		35,5 (± 239)	36,6 ($\pm 9,88$)
κ_{o2} (kg/bar)				$1,15 \times 10^{13}$ ($\pm 7,7 \times 10^{16}$)	$7,9 \times 10^{12}$ ($\pm 1,7 \times 10^{15}$)
α_{o2} (kg/bar-s)				19,5 ($\pm 7,0 \times 10^6$)	
OKH	0,01	0,00972	0,02817	0,01148	0,01093

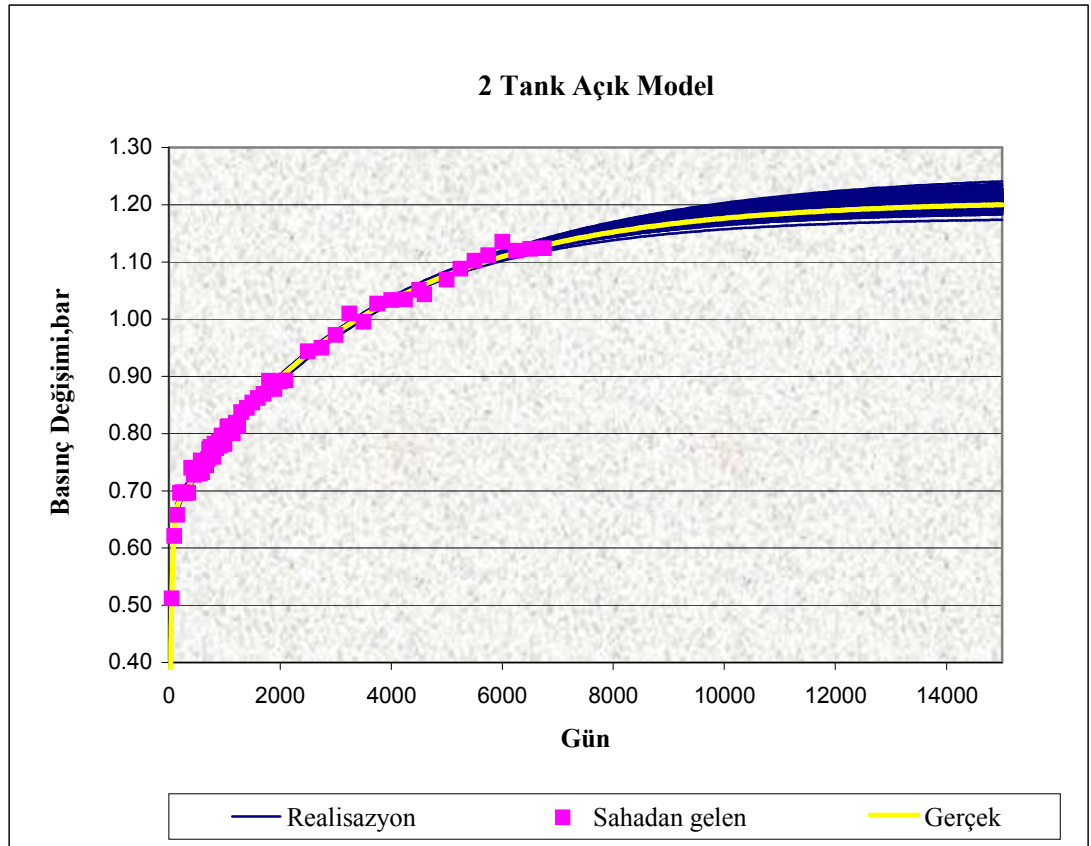
Üretilen gürültünün standart sapmasına bakıldığında aslında 0.00972 olduğu görülmektedir. Fakat pratik açıdan, 0.01 bar civarında olan OKH ler kabul edilebilir varsayılacaktır. 2 tank açık, 3 tank açık ve 3 tank kapalı modeller bunu sağlamaktadır. OKH değerleri yüksek olan modeller ise iyi bir tarihsel karşılaştırma sağlayamamaktadır ve dolayısı ile elenebilirler. Bu durumda bilmediğimizi varsaydığımız ve OKH leri kabul edilebilir olan modeller arasından gerçek modelin ne olduğuna karar vermek için ek olarak %95 güvenilirlik aralıklarına bakmamız gerekmektedir. 2 tank açık modeline ait model parametrelerinin güvenilirlik aralıkları incelendiğinde tüm parametreler için güvenilirlik aralıklarının model parametresine göre küçük olduğu görülür. Bu bize tahmin edilen parametrenin tarihsel karşılaştırma sonucunda güvenilir olarak tahmin edildiğini gösterir. 3 tank açık model ve 3 tank kapalı model incelendiğinde ise bazı model parametrelerinin (κ_{02} ve α_{02}) güvenilirlik aralıklarının model parametresine kıyasla onlarca kat daha büyük olduğu görülür. Bu tarz büyük güvenilirlik aralıkları bize bu parametreler hakkında yapılan tahminlerin hiç bir şekilde güvenilir olmadıklarını göstermektedir. Bir başka deyişle bu parametrelerin tarihsel karşılaştırma yapılan dönem boyunca basınç verilerinin üstüne herhangi bir etkisi bulunmaz.

OKH'lere bakarak seçim yapamadığımız bu durumlarda, %95 güvenilirlik aralıkları model seçimi konusunda yardımcı olabilmektedir. Eğer parametreler arasında güvenilirlik aralıkları çok yüksek olan parametreler bulunuyorsa, bu durumda bu modeller elenebilmektedir. Dolayısı ile yukarıda verilen örnek için en uygun şekilde gerçeği yansıtan model 2 tank açık modeldir.

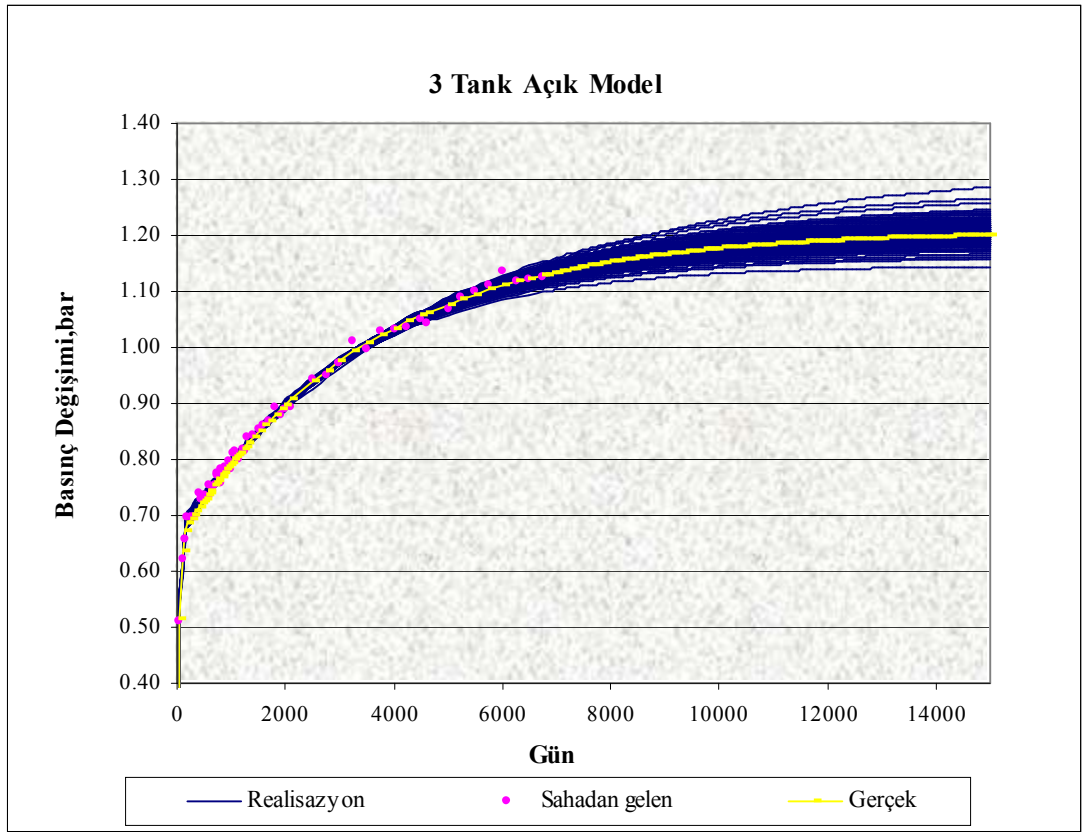
Model parametreleri tahmin edildikten sonra, ileriye yönelik basınç performansları üstündeki belirsizlik analiz edilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi bu amaç için rastgele maksimum olasılık yöntemi kullanılmıştır. Tarihsel karşılaştırma sırasında kullanılan modellerin ileriye yönelik performansları karşılaştırılmıştır. Bunun için, eldeki basınç verileri üstündeki hataların 0 bar ortalama ve 0,01 bar standart sapmaya sahip normal dağılımdan geldiği varsayılır. Daha sonra her bir basınç verisi için bu dağılım kullanılarak 1000 adet koşulsuz gerçekleştirme çekilir. 2 tank kapalı, 2 tank açık, 3 tank kapalı ve 3 tank açık modeller kullanılarak bu 1000 adet gerçeklemeye ayrı ayrı tarihsel karşılaştırmalar yapılır ve her bir model için 1000 set model parametresi elde edilir. Daha sonra bu parametreler ile model tekrar çalıştırılarak ileriye yönelik olarak tahminler yapılır.

İleriye yönelik tahminlerde, model tekrar 20 kg/s kütleli debi ile 8250 gün daha çalıştırılmıştır (ilk 6750 günlük tarihsel verilerin olduğu döneme ek olarak yani toplamda 15000 gün). 2 tank açık model için sonuçlar Şekil 3.3 de verilmektedir. Şekil 3.3 den anlaşılabacağı gibi, ileriye yönelik belirsizlikler rastgele olasılık yöntemi ile belirlenmiştir. Gerçek model çalıştırıldığında ise, gerçek modelin ileriye yönelik performansı rastgele maksimum olasılık yöntemiyle bulunan belirsizlik bandının içinde kalmaktadır.

Şekil 3.4 'de ise 3 tank açık modele ait ileriye yönelik performanslar verilmektedir. Hatırlanacağı gibi, 3 tank açık model OKH ler göz önüne alındığında en az gerçek model kadar iyi sonuç vermekteydi, fakat bazı parametrelerin güvenilirlik aralıkları kabul edilemeyecek derecede yüksek çıkmıştı. Şekil 3.4'de, bu yüksek güvenilirlik aralıklarının etkileri görülmektedir. Yüksek güvenilirlik aralıklarının sonucu olarak, ileriye yönelik basınç tahminlerinde belirsizlik bandı, gerçek modelin bandına kıyasla daha yüksek çıkmaktadır. Fakat, gerçek modelin ileriye yönelik performansı hala belirsizlik bandının içinde yer almaktadır.



Şekil 3.3 : 2 tank açık model için ileriye dönük performans belirsizliği.



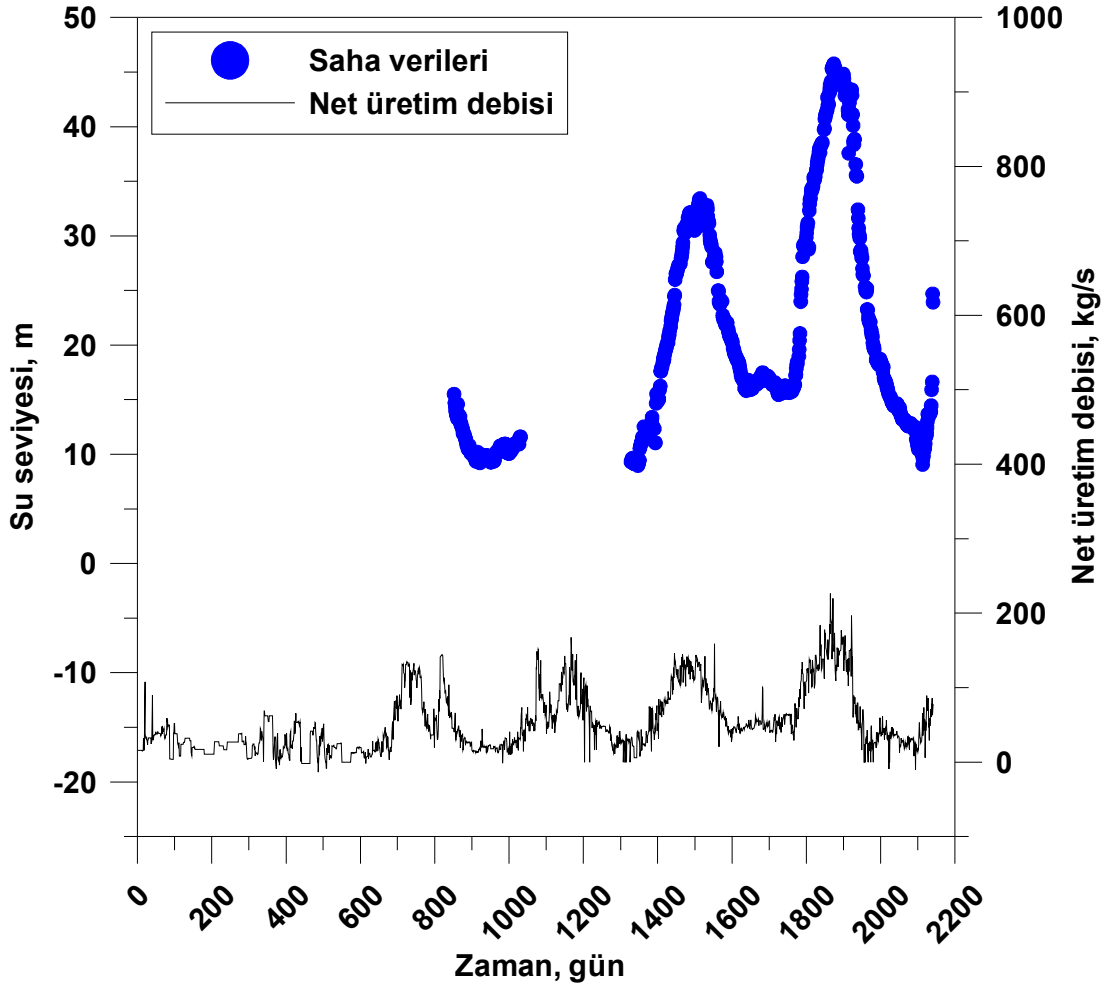
Şekil 3.4: 3 tank açık model için ileriye dönük performans belirsizliği.

Bu tür uygulamalarda önemli olan ileriye yönelik belirsizliğin doğru tahmin edilmesidir. Bu amaçla, model seçimi yaparken OKH (yani modelin sahadan gelen verilere ne kadar iyi çakışma yapabildiği) değerlerinin yanı sıra, tahmin edilen parametreler üstündeki güvenilirlik aralıklarına da bakılmalıdır. Sadece OKH değerlerini model seçiminde kullanmak, ileriye yönelik performans tahminlerinin hatalı yapılmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle model seçimi sırasında OKH'nin yanı sıra tahmin edilen parametrelerdeki güvenilirlik aralıkları da hesaba katılmalıdır.

3.3 Balçova-Narlidere Saha Uygulaması

Rastgele maksimum olasılık metodu, jeotermal rezervuar tank modellerinin yapay örneklerinde Onur ve Türeyen (2008) tarafından uygulanmıştır. Bu çalışmada, Rastgele Maksimum Olasılık metodu İzmir Balçova-Narlidere sahasında uygulanmıştır. İzmir'in 10 km batısında yer alan Balçova-Narlidere jeotermal sahası Türkiye'nin en eski sahasıdır. Jeotermal su sıcaklığı 80°C ile 140°C arasında değişmekte ve kuyu derinlikleri 48,5m ile 1100m arasında değişmektedir.

Rastgele maksimum olasılık metodunun uygulaması tek bir kuyudan alınan veriler ile yapılmıştır. Uygulamada kullanılan veriler, 01/01/2000 tarihinde alınmaya başlanan net üretim debisi ve 17/06/2001 tarihinde alınmaya başlanmış su seviyesi değerleridir. 10/11/2005 tarihine kadar net üretim debisi ve su seviyesi bilgileri kayıt edilmiştir. Saha verileri Şekil 3.5’de verilmektedir.



Şekil 3.5: İzmir Balçova Jeotermal sahasına ait su seviyesi verileri.

Daha önce de belirtildiği gibi, tank modeller jeotermal rezervuarların ortalama basınç ve sıcaklıklarını modelleyebilmektedirler. Dolayısı ile, tarihsel karşılaştırma yapılacak verilerin de ortalama basınç ve sıcaklık verileri olması gerekmektedir. İzmir Balçova-Narlıdere sahasındaki gözlem kuyusundan elde edilen verilerin ortalama basınçları temsil ettiğine inanılmaktadır.

İlk önce saha verilerine 5 farklı model (1 tank açık, 2 tank kapalı, 2 tank açık, 3 tank kapalı ve 3 tank açık) kullanılarak tarihsel karşılaştırma gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2’de her bir model için karşılaştırma sonunda elde edilen model parametreleri, OKH değerleri ve her bir parametre için %95 güvenilirlik aralıkları verilmektedir.

Çizelge 3.2’de OKH’ler incelenecek olursa, en yüksek OKH değerini 1 tank açık model ve 2 tank kapalı model vermektedir. Dolayısı ile bu modeller gerçek sistemi diğer modeller kadar iyi temsil etmemektedir. Diğer modellerin OKH değerleri ise birbirlerine oldukça yakın görünmektedir. Dolayısı ile, aynen yapay örnekte yapıldığı gibi, parametrelerin güvenilirlik aralıklarına bakılacaktır.

Çizelge 3.2: Beş farklı tank modeli İzmir Balçova-Narlidere verilerine yapılan tarihsel karşılaştırma sonucunda elde edilen model parametreleri ve gerekli istatistikler.

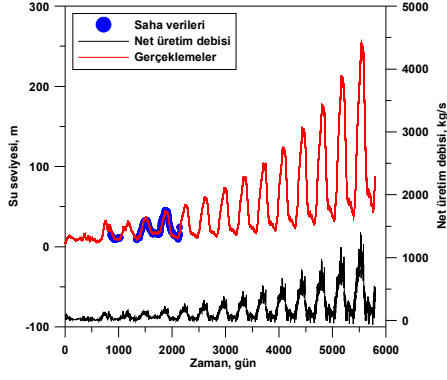
Model parametreleri	Tahmin edilen model parametreleri				
	1 tank açık	2 tank açık	2 tank kapalı	3 tank açık	3 tank kapalı
κ_r (kg/bar)	$8,68 \times 10^7$ ($\pm 0,33 \times 10^7$)	$7,13 \times 10^7$ ($\pm 0,48 \times 10^7$)	$8,19 \times 10^7$ ($\pm 0,32 \times 10^7$)	$7,13 \times 10^7$ ($\pm 0,53 \times 10^7$)	$7,13 \times 10^7$ ($\pm 0,53 \times 10^7$)
α_r (kg/bar-s)	37,9 ($\pm 0,58$)	40,5 ($\pm 1,12$)	39 ($\pm 0,60$)	40,5 ($\pm 1,67$)	40,5 ($\pm 1,15$)
κ_{o1} (kg/bar)		$3,17 \times 10^9$ ($\pm 1,46 \times 10^9$)	$2,44 \times 10^{10}$ ($\pm 4,2 \times 10^9$)	$3,17 \times 10^9$ ($\pm 1,52 \times 10^9$)	$3,18 \times 10^9$ ($\pm 1,47 \times 10^9$)
α_{o1} (kg/bar-s)		144 ($\pm 20,4$)		144 ($\pm 60,7$)	144,3 ($\pm 61,1$)
κ_{o2} (kg/bar)				$3,8 \times 10^{13}$ ($\pm 5,9 \times 10^{16}$)	$1,5 \times 10^{14}$ ($\pm 2,2 \times 10^{15}$)
α_{o2} (kg/bar-s)				290 ($\pm 1,6 \times 10^8$)	
OKH	0,202	0,17956	0,188	0,17956	0,17958

Tarihsel karşılaştırma sonucunda 3 tank açık ve 3 tank kapalı modellere ait tahmin edilen parametrelerin bazılarında (κ_{o2} ve α_{o2}) çok yüksek güvenilirlik aralıkları göze çarpmaktadır. Buna göre 3 tanklı modelleri de elemek mümkün olacaktır. Bu durumda gerçeği en iyi şekilde yansıttığına inandığımız tek model bulunmaktadır (2 tank açık). Satman ve diğ. (2002) İzmir Balçova-Narlidere jeotermal sahasının doğal beslenmeli bir sistem olduğunu söylemektedir. Bu da 2 tank açık modelin (açık olması bakımından) sahayı uygun bir şekilde temsil eden bir model olduğunu desteklemektedir. ϕ

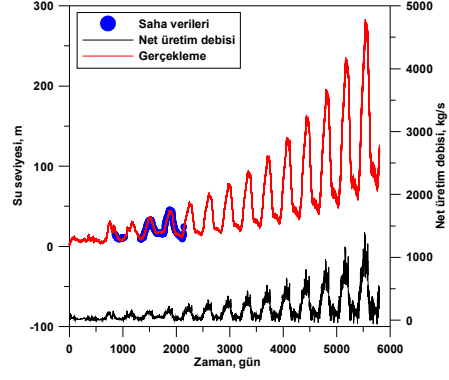
İkinci adımda, rastgele maksimum olasılık metodu 5 farklı tank modeli (1 tank açık, 2 tank açık/kapalı, 3 tank açık/kapalı) kullanılarak uygulanmıştır. Her bir model için 100 adet gerçekleştirme oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. .

Uygulaması esnasında, su seviyeleri basınç değişimlerine çevrilmiş ve bütün hesaplamalar basınç değişimi üzerine yapılmıştır. Sonuçlar ise su seviyesi olarak verilmektedir. Rastgele maksimum olasılık yönteminde gerçeklemelerin oluşturulabilmesi için basınç verilerinin üstünde 0 bar ortalaması ve 0.1796 bar standart sapması olan normal dağılıma sahip gürültüler olduğu varsayılmıştır. Rastgele maksimum olasılık yönteminde böyle bir standart sapmanın kullanılması tarihsel karşılaştırma sonucunda elde edilen OKH değerleri arasında en düşüğünün 0.1796 bar olmasındandır.

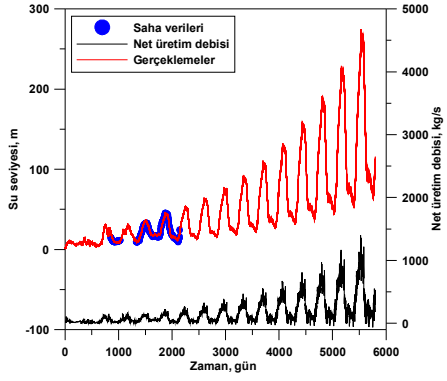
İleriye yönelik tahminler için debi senaryosu, tarihsel karşılaştırma dönemine ait son bir yılın debi verileri her yıl %20 arttırılarak alınmıştır. Sonuçlar tüm modeller için Şekil 3.6'da verilmektedir. Şekil 3.6 F'de 5350. günde her bir modelin sağladığı belirsizliklerin kutu grafiği verilmektedir. Burada her bir kutunun alt ve üst limitleri sırasıyla 25. yüzdendirlik ve 75. yüzdendirlikleri verir. Kutuların ortasındaki çizgi ise medyanı ve kutuların dışında kalan yatay çizgiler ise elde edilen maksimum ve minimum değerleri vermektedir. Buna göre, belirsizliği en düşük olan tek tank açık modeldir. Tek tank açık ve iki tank kapalı modeller diğerlerine kıyasla ortalama olarak daha farklı su seviyesi bölgelerini örneklemektedirler. Bu da beklenen bir sonuçtur çünkü Çizelge 3.2'den de anlaşılacağı gibi bu modellere ait OKH'ler diğerlerine göre daha yüksektir. 2 tank açık ve 3 tank açık/kapalı modeller ise hemen hemen aynı ortalama su seviyelerinden örneklemeye yapmaktadırlar. Çizelge 3.2'den görüldüğü gibi bu modeller kullanılarak yapılan tarihsel karşıştırmalar sonucunda ortak olan hemen hemen tüm model parametreleri hemen hemen aynı bulunmuştur. Bu da yapılan tahminlerin aynı ortalama su seviyelerinde olmasını sağlamaktadır. Bu modeller arasındaki fark, belirsizlik aralıklarındadır (kutulardaki alt ve üst yatay çizgiler arasındaki fark). Beklendiği gibi üç tank açık model en geniş belirsizlik aralığını verir. Bunun nedeni ise Çizelge 3.2'den anlaşılacağı gibi bu modelin fazladan iki model parametresine sahip olması ve bu model parametreleri üstündeki güvenilirlik aralıklarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. ϕ



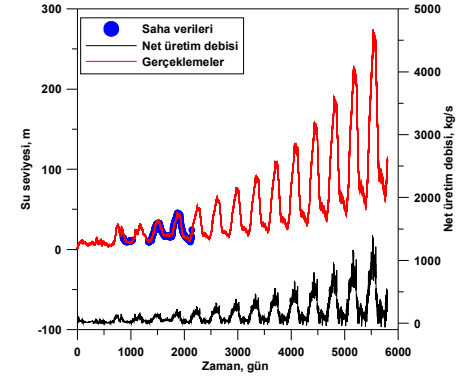
(A) 1 tank açık model



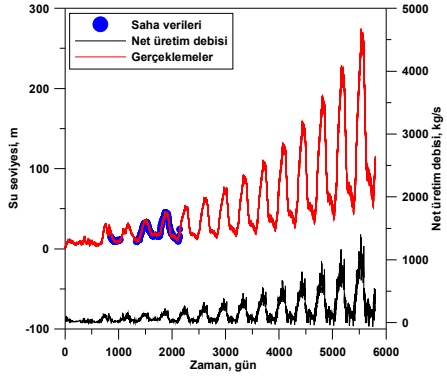
(B) 2 tank kapalı model



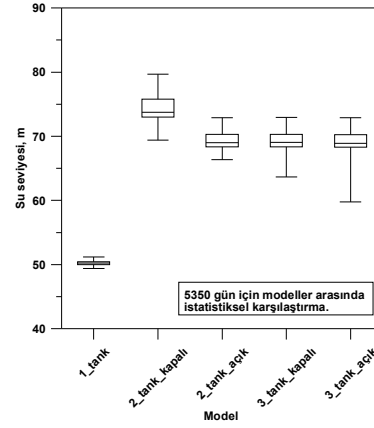
(C) 2 tank açık model



(D) 3 tank kapalı model



(E) 3 tank açık model



(F) 5350 gün için modellerin karşılaştırması

Şekil 3.6: İzmir Balçova Jeotermal sahasına ait rastgele maksimum olasılık yöntemi sonuçları.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tank modelleri kullanılarak jeotermal rezervuarlar için geleceğe yönelik rezervuar basınç davranışlarının modellenmesi ve bu basınç davranışlarının üstündeki belirsizlikler araştırılmıştır. Basınç performansındaki belirsizlikler veriler üstündeki gürültü, yanlış model kullanımı ya da model parametreleri ve basınç verileri arasındaki doğrusal olmayan ilişkiden kaynaklanabilir. İleriye yönelik basınç davranışlarını tahmin etmek önemli olduğu kadar belirsizliklerin de sayısallaştırılması gerekmektedir.

Buna göre bu çalışmadan aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Basınç davranışları için ileriye yönelik sadece bir tahmin yapmak yeterli değildir. İyi rezervuar yönetimi için ileriye yönelik basınç davranışlarının da modellenmesi gerekmektedir.
- 2) Rastgele maksimum olasılık yöntemi ileriye yönelik basınç davranışlarındaki belirsizliğin sayısallaştırılması için oldukça etkili bir yöntemdir. Bu yöntemle göre sahadan gelen verilerin koşulsuz gerçeklemeleri yaratılarak her bir gerçeklemeye tarihsel karşılaştırma yapılır. Bunun sonucunda her bir gerçeklemeden elde edilen model parametreleri kullanılarak ileriye yönelik tahminler yapılabilir. İleriye yönelik tahminlerin sayısı gerçekleştirme sayısına eşit olacaktır ve böylece tahminler üstündeki belirsizlik analiz edilebilmektedir. Rastgele maksimum olasılık yöntemi az sayıda model parametresi içermesinden dolayı özellikle tank modelleri ile kullanılmaları çok uygundur (az parametrelili tank modellerinin çalışma hızları oldukça yüksektir).
- 3) İleriye yönelik tahminlerdeki belirsizliğin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için seçilen modelinde gerçeği yansıtmaması gerekmektedir. Bunun için model seçimi sırasında, sadece modelin OKH' sine değil aynı zamanda tahmin edilen parametreler güvenilirlik aralıklarına da bakılması gerekir.

4) İzmir Balçova-Narlidere jeotermal sahasından elde edilen verilere tarihsel çakıştırma yapılarak model seçimi yapılmış ve model parametreleri belirlenmiştir. Buna göre İzmir Balçova-Narlidere jeotermal sahasını en iyi şekilde temsil eden model 2 tank açık model olarak görünmektedir.

Bu çalışmada, ileriye yönelik performanslardaki belirsizliklerin daha çok veriler üstündeki gürültülerin neden olduğu varsayılmıştır. Debi ölçümleri üstündeki belirsizlikler dikkate alınmamıştır. Gerçek hayatta debilerin ölçümlerinde de hatalar söz konusu olabilmektedir. Debiler üstündeki hataların ileriye yönelik performans tahminlerini nasıl etkileyeceği önemli bir araştırma konusu olarak durmaktadır.

Çalışmada da belirtildiği üzere, tank modellerinin kullanılabilmesi için jeotermal rezervuarın ortalama basınç ve sıcaklıklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sahalarda ise ortalama özelliklerden çok kuyu dibi ya da kuyu başı basınç ve sıcaklıkları ölçülür. Kuyu verilerine tank modelleri kullanılarak tarihsel çakıştırma sonucunda elde edilecek model parametrelerinin tam olarak neyi temsil ettikleri hala araştırmaya açık bir konu olarak yer almaktadır.

KAYNAKLAR

- Akan, B.**, 2002 : Jeotermal sistemlerde ısı taşınımının modellenmesi, Jeoloji Mühendisliği dergisi, 26 (2)
- Alkan, H., and Satman, A.**, 1990: A new lumped parameter model for geothermal reservoirs in presence of carbon dioxide, *Geothermics*, **19/5**, 469-479.
- Axelsson, G.**, 1989: Simulation of pressure response data from geothermal reservoirs by lumped parameter models, *14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Palo Alto, California, 257-263.
- Axelsson, G. and Björnsson G.**, 1993: Detailed three-dimensional modeling of the both hydrothermal system in N-Iceland, *18th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, January 26-28.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., Stefansson, V., and Eliasson, E.T.**, 1984-b. The Krafla Geothermal Field, Iceland: 2. The Generating Capacity of the Field., *Water Resources Research*, 20 (11), 1531-1544.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., Stefansson, V., and Eliasson, E.T.**, 1984-c. The Krafla Geothermal Field, Iceland: 3. The Generating Capacity of the Field., *Water Resources Research*, 20 (11), 1545-İ 559.
- Bodvarsson, G. S., Pruess, K., and Lippman, M. J.**, 1986: Modeling of geothermal systems, *Journal of Petroleum Technology*, September 1007-1021.
- Brigham, W. E., and Ramey, H. J.Jr.**, 1981: Material and energy balance in geothermal reservoirs, *Reservoir Engineering Assessment of Geothermal Systems*, Ramey, H.J.Jr. (editor), Petroleum Engineering Department, Stanford University, Palo Alto, California.
- Bringham, W.E., and Morrow, W.B.**, 1974; P/Z Behavior for Geothermal Steam Reservoirs. Paper SPE 4899 presented at the 44th Annual California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, AME, San. Francisco, California.
- Grant, A. M., Donaldson, I. G. and Bixley, P.F.**, 1982: *Geothermal Reservoir Engineering*, pp.55-57. Academic Press., Inc., New York.
- IEA, GIE** 2008: 12th Annual report
- Konuksal, R.**, 2007: Boyutsuz rezervuar modellerinin numeric olarak çözümlenmesi, *BSc. Thesis*, I.T.Ü, Türkiye.
- Lund, J. W., Freeston, D. H. and Boyd, T. L.**, 2005: Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review, *Geothermics* **34**, 691-727

- Olsen, G.**, 1984: Depletion modeling of liquid dominated geothermal reservoirs, *Technical Report, SGP-TR-80*, Stanford Geothermal Program, Stanford University, Palo Alto, California.
- Onur, M., Sarak, H., Türeyen, Ö. İ., Çınar, M., and Satman, A.**, 2008: A new non-isothermal lumped-parameter model for low temperature liquid dominated geothermal reservoirs and its applications, *33rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 28-30.
- Onur, M. and Türeyen, Ö. İ.**, (2006) : Assessing uncertainty in Future Pressure Changes Predicted by Lumped-Parameter Models for Low Temperature Geothermal Systems, *proceedings 31st Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA, 30 Jan-1 Feb.
- Sarak, H.**, 2004: Düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarlar için boyutsuz rezervuar modelleri, *PhD Thesis*, İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- Serpen, U., Aksoy, N., Öngür, T. and Korkmaz, D. E.**, 2009: Geothermal energy in Turkey: 2008 update, *Geothermics* **38**, 227-237
- Satman, A., Onur, M., Serpen, U.**, 2002. İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal sahasının rezervuar ve üretim performansı projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü.
- Schulthuis, R. J.**, 1936: Active Oil and Reservoir Energy, *Trans.AIME*, 118, 305-324
- Türeyen, Ö. İ., Onur, M. and Sarak, H.**, 2009: A generalized nonisothermal lumped-parameter model for liquid dominated geothermal reservoirs, *34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 9-11.
- Türeyen, Ö. İ., Sarak, H., and Onur, M.**, 2007: Assessing uncertainty in future pressure changes predicted by lumped-parameter models: A field Applications, *32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 22-24.
- Url-1** <http://tr.wikipedia.org/wiki/Jeotermal_enerji>, alındığı tarih 21.04.2010
- Url-2** <<http://geothermal.org/what.html>>, alındığı tarih 10.03.2010
- Url-3** <http://www.jeotermal.web.tr/dunyada_jeotermal> alındığı tarih 10.03.2010
- Url-4** <<http://www.geo-energy.org/currentUse.aspx>>, alındığı tarih 21.04.2010
- Whiting, R. L., and Ramey, H.J.Jr**, 1969: Application of material and energy balance to geothermal steam production, *Journal of Petroleum Technology*, July, 893-900.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyadı: Ayşe ÖZTÜRK

Doğum Yeri ve Tarihi: ANKARA 21/02/1980

Adres: 444. Sokak Ümit Mah. Kermes Sitesi 3. Blok Daire:32

Ümitköy/ANKARA

Lise : Özel Evrensel Fen Lisesi

Lisans Üniversitesi: Gazi Üniversitesi

[2002]: Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünden mezun oldum.

[2002-2003] : Ankara Seramik A.Ş, Ar-Ge Labrotuarı Bölüm Şefi olarak çalıştım.

[2006-2010]: BOTAŞ İstanbul İşletme Müdürlüğü, İşletme Bölümü Ölçümleme Şefi olarak çalıştım.

[2010-Halen]: BOTAŞ Doğalgaz İşletmeleri Bölge Müdürlüğü, Doğalgaz İletim Bölümünde Kimya Mühendisi olarak çalışıyorum.