

# JEOTERMAL ENERJİNİN DOĞASI

Abdurrahman SATMAN

## ÖZET

Jeotermal enerjinin varlığında yerin derinliklerinden gelen ısı, akışkan ve maddeden insanoğlunun yararlanması gerçeği yatmaktadır. Tarihin ilk dönemlerinde bugünkü sağlık turizminin temelini oluşturan kullanım yönteminin yaygınlaşmasının yanısıra son yüzyıldaki artan enerji gereksinimi ile birlikte doğrudan kullanım yöntemlerindeki ve elektrik üretme teknolojilerindeki gelişmeler, ısının akışkanla yüzeye taşınması durumunda ise akışkanın içerdiği çözünmüş ve/veya askıda madde ve minerallerden (örneğin CO<sub>2</sub>, tuz, v.b.) yararlanma jeotermal enerjinin bir uzmanlık dalı ve dünya için vazgeçilemez bir alternatif enerji kaynağı olmasını sağlamış durumdadır.

Yeraltındaki ısının yeryüzüne iletimle ve doğal kaçaklarla taşınımıyla ulaştırılması ihmal edilirse, günümüzde jeotermal enerji olarak yararlanan ısının tümü teknolojileri hızla gelişen kuyu ve üretim/enjeksiyon yöntemleri aracılığıyla taşınımıyla sağlanmaktadır. Taşınım, akışkan içeren gözenekli ve geçirgen jeotermal rezervuarlardan üretimle doğal olarak veya araştırma/geliştirme aşamasında olan sıcak kuru kayaçlardan yapay olarak gerçekleştirilmektedir.

Jeotermal enerjinin doğasının anlaşılmasında temel bilimlerin, araştırılmasında yerbilimlerinin ve geliştirilmesi ve işletilmesinde ise farklı disiplinlerdeki mühendislik bilimlerinin kullanılması esastır. İlgili kayaç ve akışkanların özellikleri, basınç-sıcaklık-hacim ilişkileri, jeotermal rezervuarların doğal ve homojen olmayan yapısı, kullanılan üretim/enjeksiyon yöntemleri ve delinen kuyuların özellikleri, üretilen enerjinin kullanım alanları, tüm bunlar bir jeotermal sahanın optimum ve verimli işletilmesini etkileyen ve belirleyen parametrelerdir. Jeotermal enerji içeren sahanın sürdürülebilir bir üretim yöntemiyle, çevreye saygılı ve verimli işletilmesi amaçlanmalıdır. Bu bildiride, jeotermal enerjinin doğasındaki özellikler incelenecek, Türkiye’de bilinen jeotermal sahaların ortak yönleri ağırlıklı olarak tartışılacaktır.

## 1. GİRİŞ

Bilinen tarihi kayıtlar Türklerin, Romalıların, Japonların, İzlandalıların ve Merkezi Avrupalıların jeotermal enerjiyi yıkanma, ısınma ve pişirme amaçlı olarak kullandıklarını göstermektedir. Roma İmparatorluğundaki banyolar, Osmanlılar dönemindeki Türk hamamları, ılıca ve kaplıcalar toplumların sosyal yaşamlarında sağlık ve yıkanmaya yönelik geleneklerde jeotermal enerjinin etkisini açıklamaktadır.

Jeotermal kaynaklar dünyada birçok yerde vardır. Jeotermal sistemler ve jeotermal enerji çoğunlukla yerküredeki levha sınırlarıyla ilişkilendirilmektedir. Jeotermal enerji volkanik bölgelerde bulunmakla beraber, sedimanter formasyonlar içinde ılık yeraltı suları olarak ta görülmektedir. Doğal çıkışı olan jeotermal sistemler olduğu gibi herhangi bir yeryüzü etkinliği göstermeyen sistemlerde vardır.

Jeotermal saha, sistem ve rezervuarları birbirlerinden ayırmak üzere aşağıdaki tanımlar yapılabilir:

*Jeotermal Saha:* Yeryüzünde bir jeotermal etkinliği gösteren coğrafik bir tanımdır. Eğer yeryüzünde herhangi bir etkinlik yoksa, yeraltındaki jeotermal rezervuarın üstündeki alanı tanımlamakta kullanılır.

*Jeotermal Sistem:* Yeraltındaki hidrolik sistemi bütün parçalarıyla birlikte (beslenme zonu, yeryüzüne çıkış noktaları ve yeraltındaki kısımları gibi) tanımlamakta kullanılır.

*Jeotermal Rezervuar:* Doğrudan işletilen jeotermal sistemin sıcak ve geçirgen kısmını tanımlar.

Jeotermal sistemler ve rezervuarlar; rezervuar sıcaklığı, akışkan entalpisi, fiziksel durumu, doğası ve jeolojik yerleşimi gibi özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Örneğin jeotermal rezervuarda 1 km derinlikteki sıcaklığa bağlı olarak sistemleri 2 gruba ayırmak olasıdır[1]:

- 1) Rezervuar sıcaklığının 150°C'dan düşük olduğu *düşük sıcaklıklı sistemler*: Bu tür sistemler genelde yeryüzüne ulaşmış doğal sıcak su veya kaynar çıkışlar gösterirler.
- 2) Rezervuar sıcaklığının 200°C'dan yüksek olduğu *yüksek sıcaklıklı sistemler*: Bu tür sistemler ise buhar, kaynayan çamur göletleri ve altere olmuş yeraltı formasyonlarıyla bilinirler.

Türkiye'de Kızıldere ve Germencik jeotermal rezervuarlarının sıcaklığı 200-240°C arasında olup, Balçova-İzmir'in de içinde bulunduğu diğerleri ise genelde düşük sıcaklıklı sistemlerdir.

Sistemleri sıcaklıklarına göre olduğu gibi entalpilerine göre de düşük entalpili ve yüksek entalpili sistemler diye iki gruba ayırmak olasıdır. 190°C'daki entalpi olan 800 kJ/kg'dan düşük entalpili sistemler "*düşük entalpili sistemler*" olarak, entalpisi 800 kJ/kg'dan daha yüksek olanlar ise "*yüksek entalpili sistemler*" olarak tanımlanabilirler.

Jeotermal sistemler sınıflandırılırken sistemin fiziksel durumuna bağlı olarak yapılan sınıflandırma literatürde daha fazla rağbet görmektedir. Bu yaklaşıma göre 3 farklı rezervuar durumu tanımlanmaktadır:

- 1) *Sıvının etken olduğu jeotermal rezervuarlar*: Rezervuardaki basınç koşullarında su sıcaklığının buharlaşma sıcaklığından daha düşük olduğu rezervuarları tanımlamakta kullanılır. Rezervuar basıncını sıvı su fazı kontrol etmektedir. Bu tür rezervuarlarda, özellikle basıncın düşük olduğu üretim kuyuları civarında su buharına rastlamak olasıdır.
- 2) *İki fazlı jeotermal rezervuarlar*: Rezervuarda sıvı su ve su buharı birlikte bulunmaktadır ve rezervuar basıncı ve sıcaklığı suyun buhar basıncı eğrisini izler.
- 3) *Buharın etken olduğu jeotermal rezervuarlar*: Rezervuar basıncındaki akışkan sıcaklığının suyun buhar basıncı eğrisi sıcaklığından daha yüksek olması durumunda bu tür rezervuarlar oluşurlar. Rezervuardaki basıncı su buharı fazı kontrol etmektedir.

Jeotermal sistemlerin ve rezervuarların içinde fiziksel durum yere bağlı olarak değişiklik gösterebilir ve rezervuarlar zamanla durum değişikliği de gösterebilirler. Örneğin sıvının etken olduğu bir rezervuar, üretim sonucu oluşan basınç düşümünden dolayı, zamanla iki fazlı bir jeotermal rezervuar durumuna dönüşebilir. Rezervuar içinde buhar (veya rezervuardaki suyun yeterli oranda çözünmüş CO<sub>2</sub> içermesi durumunda gaz) başlığı oluşabilir. Düşük sıcaklıklı sistemler genelde sıvının etken olduğu sistemler tanımına girerken, yüksek sıcaklıklı sistemler ise üç gruba da girebilir.

Türkiye'de buharın etken olduğu rezervuar keşfedilmemiştir. Tümü sıvının etken olduğu rezervuarlar grubundandır. Kütleli olarak %1.5 kadar CO<sub>2</sub> içeren Kızıldere jeotermal rezervuarı başlangıçta sıvının etken olduğu bir rezervuar davranışı gösterirken, yapılan üretim sonucu oluşan rezervuar basıncının sıvı su-CO<sub>2</sub> sistemi için geçerli buharlaşma (veya gazlaşma) basıncından daha düşük düzeylere inmesinden dolayı, rezervuar şu anda iki fazlı jeotermal rezervuar davranışı göstermektedir. Dünyada buharın etken olduğu jeotermal rezervuarlar olarak A.B.D.'deki Geysers sahası ve İtalya'daki Larderello sahası örnek olarak verilebilir.

Jeotermal sistemler ayrıca doğal durumuna ve jeolojik konumuna bağlı olarak sınıflandırılmaktadırlar[2]:

- 1) *Volkanik sistemler*: Volkanik etkinlikle ilişkilendirilen sistemlerdir. Isı kaynağı mağma veya sıcak yükselticilerdir. Geçirgen çatlaklar ve fay zonları volkanik sistemlerde suyun akışını kontrol ederler.

- 2) *Taşınım sistemleri*: Düşey ısı akışı değerlerinin yüksek olduğu tektonik olarak aktif bölgelerde sıcak kabuğun ısı kaynağı olduğu sistemlerdir. Düşey çatlak ve fayların bulunduğu ortamlarda jeotermal su 1 km'den daha derinlere indikten sonra aşağıdaki kayalardan ısı almakta ve daha sonra yükselerek taşınım sistemlerini oluşturmaktadır.
- 3) *Sedimanter sistemler*: 1 km'den daha derin yerlerde geçirgen sedimanter tabakalarda oluşan, ısı taşınımından çok iletimin doğal olarak etken olduğu ve bazı durumlarda fayları da içeren sistemlerdir.
- 4) *Yüksek-basınçlı sistemler*: Yüksek basınçlı petrol ve gaz rezervuarlarına benzer olarak, basıncın normal basınçlardan yüksek olduğu tabakaların bulunduğu sistemlerdir. Genelde oldukça derindirler.
- 5) *Sıcak kuru kayaç sistemleri*: Volkanizma veya anormal yüksek ısı akışı sonucu oluşmuş kayaç hacimleridir ve fakat geçirimsiz özelliği olan sistemlerdir. Geçirgen olmadığından ve akışkan içermediğinden normal jeotermal rezervuarlar gibi işletilemezler. Yapay çatlaklar açılarak yine yapay bir rezervuar yaratma yöntemiyle işletilmesi henüz araştırma aşamasındadır.

Türkiye'de bilinen ve işletilen sahaların tektonik olarak aktif bölgelerdeki taşınım sistemleri olduğu söylenebilir. Batı Anadolu bölgesindeki birçok jeotermal saha (Kızıldere, Ömer-Gecek Afyon ve Balçova-Narlidere İzmir gibi) bölgedeki graben yapıları içinde yer almaktadır. Doğu Anadolu bölgesinde volkanik sistemlerin varlığı tahmin edilmekte beraber, bugüne kadar yapılan araştırmalar sonucunda henüz ekonomik olarak işletilebilir bir saha bulunmamıştır.

Jeotermal enerji yerin ısısıdır. Enerji olarak konutların ve binaların ısıtılmasında ve soğutulmasında kullanıldığı gibi, sıcak su temininde ve ayrıca endüstrinin ısı gereksiniminin karşılanmasında doğrudan kullanılır. Dünyada 2004 sonu itibariyle elektrik-dışı kullanım (seralar, havuzlar, merkezi ısıtma, ısı pompası, endüstriyel işlemler) yaklaşık 28 000 MWt olarak tahmin edilmektedir. Jeotermal enerjinin %33'ü ısı pompalarında, %29'u banyo ve yüzme amaçlı, %20'si bina ısıtma, %7.5'u sera ısıtma ve açık alan ısıtma, %4'ü endüstriyel işlem ısısı, %4'ü kültür havuzculuğu ve yolların ısıtılması, %1 gıda kurutma ve % 1.5 diğer (kar eritme, soğutma vb.) amaçlı kullanılmaktadır. Türkiye'de Balçova-Narlidere, Afyon, Gönen, Simav, Kızılcahamam, Kırşehir gibi yerlerdeki jeotermal merkezi ısıtma projeleri on binlerce (yaklaşık 60 000) konutun ısıtılmasını gerçekleştirmektedir ve jeotermal ısıtma kapasitesinin yaklaşık 650 MWt'a çıktığı belirtilmektedir. [4] Seracılıkta 130 MWt ve termal havuz ve kaplıcalarda 330 MWt jeotermal ısı kullanıldığı ve toplam jeotermal kullanımda kurulu güç kapasitesinin 1 200 MWt'a yakın olduğu rapor edilmektedir. Ülkemizde henüz yeteri kadar gelişmemiş olmakla beraber, jeotermal ısı pompaları dünyada birçok ülkede jeotermal enerjiden verimli yararlanmak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin A.B.D. ve Avrupa'da 1.3 milyon adet jeotermal ısı pompası konutları ve binaları jeotermal enerjiyle ısıtmak amacıyla kullanılmaktadır. [4]

Jeotermal enerji elektrik üretiminde de dolaylı olarak kullanılmaktadır. Kızıldere jeotermal santrali 17.4 MWe kurulu gücüyle jeotermal enerjiden elektrik eldesi için ülkemizdeki tek önemli örnektir. A.B.D.'de kurulu gücü 2850 MWe olan jeotermal güç sektörü gelişmiş durumdadır. Dünyada 2004 yılı itibariyle jeotermal elektrik santrallerinin kurulu gücü 8 000 MWe'e ulaşmıştır. [3] Filipinler'de elektriğin %18'i, Nikaragua'da %17'si, El Salvador'da %12'si ve Kosta Rika'da %11'i jeotermal buharından elde edilmektedir.

## 2. YERİN ISISI VE AKIŞKANLAR

Yerin Isısı: Jeotermal enerji yerkürenin iç ısısıdır. İç ısı merkezdeki sıcak bölgeden yeryüzüne doğru soğuk bölgelere doğru yayılır. Sıcaklığın derinlikle arttığı bilinmektedir (ortalama 1°C/33m). Dünya genelinde yeryüzüne ısı akışı ortalama 82 milliwatt/m<sup>2</sup> olarak varsayılır. Yerkürenin yaklaşık 10 km derinliği içindeki kayaların içerdiği ısının dünya enerji gereksinimini 6 milyon yıl (ve en üst 3 km derinliğindeki kıtasal kabuğun içerdiği ısının 100 000 yıl) karşılayacak büyüklükte olduğu tahmin edilmektedir. [3]

Jeotermal kaynakların üç önemli bileşeni vardır: (1) ısı kaynağı, (2) ısıyı yeraltından yüzeye taşıyan akışkan, (3) suyun dolaşımını sağlamaya yeterli kayaç geçirgenliği.

Jeotermal alanlarda sıcak kayaç ve yüksek yeraltı suyu sıcaklığı normal alanlara göre daha sığ yerlerde bulunur. Bunun başlıca nedenleri arasında:

- Mağmanın kabuğa doğru yükselmesi ve dolayısıyla ısıyı taşıması,
- Kabuğun incelmesi yerlerde yüksek sıcaklık gradyanı sonucunda oluşan yeryüzüne ısı akışı,
- Yeraltı suyunun birkaç km derine inip ısındıktan sonra yüzeye doğru yükselmesi.

Elektrik güç üretiminde kullanılan yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynakların çoğunun yukarıda verilen birinci mekanizmayla oluştuğu düşünülürken, düşük ve orta sıcaklıklı kaynakların ise ikinci ve üçüncü mekanizmalarla oluştuğu düşünülmektedir.

Dünyanın belirli bölgelerinde yüzeye doğru yükselen magmanın soğuması sırasında verdiği ısı o bölgelerdeki jeotermal sahaların oluşumunu açıklarken, magmatik etkinliklerin olmadığı yerlerde yerküre mantosunun yüzeye yakın olduğu kısım olan kabuğun jeolojik koşullarındaki değişmeden kaynaklanan ısı birikimi diğer jeotermal sahaların oluşumunu açıklamaktadır.

Yerkürenin yaklaşık 100 km derinliğe kadar olan katı tabakası litosfer olarak bilinir. Litosferin yeryüzüne yakın olan tabakası kabuk ve derin kısmı üst manto olarak tanımlanmaktadır.

Levha tektoniği teorisine göre litosfer "litosferik levha" olarak tanımlanan birkaç blok veya levhaya bölünmüştür. Levha hareketinin normalden sığ derinliklerde magmatik ısı kaynakları oluşturduğu bilinmektedir. Mağmanın manto içinde yükselmesi ve daha sonra soğuyup tekrar derine inmesi şeklinde tanımlanan taşınım hareketlerinin litosferdeki kırıkların nedeni olduğu tahmin edilmektedir. Litosferin kırılması sonucu oluşan 12 büyük levhanın varlığı bilinen bir gerçektir. Levhalar kıtaları ve deniz tabanlarını kapsarken, teoriye göre kıtalar ve deniz tabanları hareket etmekte, mantonun plastik parçası (astenosfer) üzerinde kaymaktadır. Levhalar birbirinden uzaklaşıyor, birbirine yaklaşıyor veya birbirlerine göre yer değiştirerek kayıyor olabilirler. En yüksek enerji potansiyeli olan jeotermal kaynaklar levhalar arasındaki sınırlarda yer almaktadır. Levhalar her yıl birkaç cm'lik hızda hareket etmekte ve levhalar arasındaki sınırlar, alttaki magma hareketi sonucunda, ısının biriktiği sığ kaynaklar içeren bölgeler oluşturmaktadır. Bazı levhaların dalma zonu gibi hareketi, levhaların birbirine sürtünmesinden kaynaklanan, ısı üretmektedir.

Isı geçişi derinlerde iletimle ve yeryüzüne yakın yerlerde taşınım ile gerçekleşir. Isı iletimi kayaç ortamında oluşurken, ısı taşınımında taşıyıcı jeotermal akışkandır. Beslenme havzalarından derine inen (genelde) yağmur sularının derindeki sıcak kayaçlarla teması ile ısınması ve daha sonra akiferlerde toplanması sonucu jeotermal rezervuar oluşur. Rezervuarlar, çoğunlukla, geçirimsiz kayaç içeren tabakalarla örtülmüştür. Geçirimsiz örtü tabakası jeotermal akışkanın yeryüzüne kolayca ulaşmasını engeller ve aynı zamanda rezervuar basıncının korunmasını sağlar.

Akışkanlar: Jeotermal kaynakların ekonomik olarak işletilmesi için, yerin derinliğindeki ısının yeryüzüne taşınması gerekmektedir. Yeraltındaki formasyonların gözeneklerindeki su bu görevi görür. Suyun ısı kapasitesi ve buharlaşma ısı doğada rastlanan diğer akışkanlara göre yüksektir. Dolayısıyla su iyi bir ısı taşıma akışkanıdır.

Sıcaklık artarken suyun yoğunluğu ve akma hızı azalır. Derinlerde ısınan su hafifler ve yukarıya doğru hareket eder. Eğer suyun kayaç içinde akışında gösterilen direnci yenecek bir ısınma sonucu kaldırma kuvveti varsa, ısınan su yeryüzüne ulaşacaktır. Sıcak su yukarıya doğru yükselirken, sığ derinliklerdeki soğuk su onun boşalttığı hacimleri (gözenekleri) doldurur. Bu durumda, daha derindeki ısı kaynağının üstündeki yeraltı suyu içinde doğal bir taşınım ve dolaşım olayı gerçekleşmiş olur. Sıcaklığın buharlaşma noktasına ulaşması durumunda ise su buharı oluşur ve sistem iki faza geçer.

Suyun etken olduğu bir rezervuar sistemi için, suyun toplam ısı içeriği suyun yoğunluğuna ve ısı kapasitesine, rezervuarın toplam ısı içeriği ise su ve rezervuar kayacının yoğunluğuna ve ısı kapasitesine bağlıdır. Suyun ısısının toplam rezervuar ısısına oranı,

$$\frac{\text{Suyun Isısı}}{\text{Rezervuar Isısı}} = \frac{\rho_w C_w \phi}{\rho_w C_w \phi + \rho_r C_r (1 - \phi)} \quad (1)$$

olarak verilebilir. Kayaç yoğunluğu için  $\rho_r = 2.65 \rho_w$  ve kayaç ısı kapasitesi için  $C_r = C_w / 4$  yaklaşık ilişkileri varsayılırsa, Denklem 1:

$$\frac{\text{Suyun Isısı}}{\text{Rezervuar Isısı}} = \frac{\phi}{\phi + 0.66(1 - \phi)} \quad (2)$$

olur. Gözeneklilik için tipik değerler olan %5-20 alınır, rezervuardaki ısının yoğunluğunun (%92.6-72.5) rezervuar kayacı tarafından tutulduğu kolaylıkla anlaşılır.

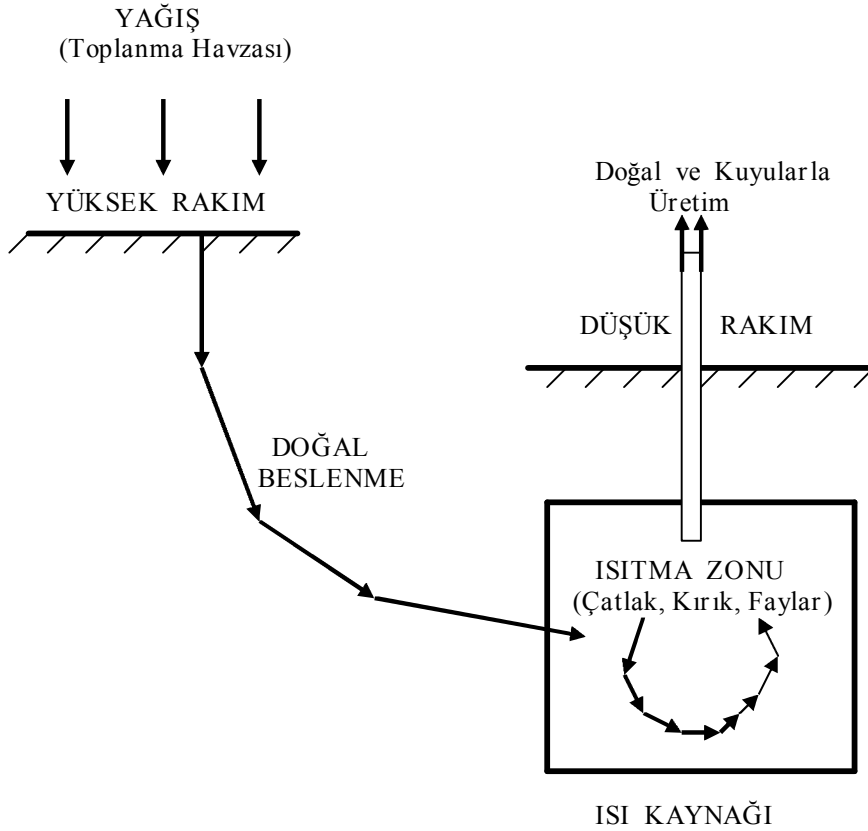
### 3. DÜŞÜK SICAKLIKLI SİSTEMLERİN DOĞASI

Türkiye'de keşfedilmiş jeotermal sistemlerinin çoğunluğunun düşük sıcaklıklı sistemler olduğu bir gerçektir. Düşük sıcaklıklı sistemler için ısı kaynağı normalden yüksek sıcaklıktaki yer kabuğudur. Süregelen tektonik aktiviteler neticesinde akışa açık olan çatlak, kırık ve faylar, yeraltından ısı taşıyan ve sistem içinde dolaşan su için kanallar oluşturur.

Düşük sıcaklıklı sistem için basitleştirilmiş bir model Şekil 1'de gösterilmektedir. Bir toplanma havzası özelliğine sahip yüksek rakımlı yerlerde oluşan yağış süzülerek birkaç km derindeki ana kayaca kadar iner. Orada sıcak kayaktan ısı alır, yoğunluğu azaldığından dolayı tekrar yeryüzüne doğru yükselmeye başlar. Toplanma havzası ile sıcak akışkanın yeryüzüne çıkış noktası olan düşük rakımlı yer arasındaki uzaklık değişebilir, ancak ortak özellik ısının derinden sıç formasyonlara su ile taşınmasıdır. Isıtma zonu ile yeryüzü arasındaki bağlantı doğal olabileceği gibi delinmiş kuyularla da sağlanabilir. Isıtma zonu içindeki ve yüzeye kadar uzanabilen çatlak, kırık ve faylar akışkanın ısıtma zonu içindeki hareketini ve yüzeye olan hareketini belirleyen akış kanallarıdır.

Isı taşınımının etken olduğu jeotermal sistemler, jeolojik faylanma ve kıvrımlanmanın aktif olduğu, bölgesel ısı akışının normalden yüksek olduğu yerlerde görülür. Daha önce de vurgulandığı gibi, Türkiye'nin Batı Anadolu bölgesinde bilinen jeotermal sistemler ısı taşınımının etken olduğu jeotermal sistemlere örnek olarak verilebilir.

Taşınımın etken olduğu kaynaklar için bazı basit modeller Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2 (a)'da bir fay zonu boyunca yeraltı bir kaynak gösterilmektedir. Fay zonunun bir tarafından su derine iner ve ısıdıktan sonra aynı fayın diğer tarafından yeryüzüne yükselir. Kaynağın işletilmesi için delinen kuyunun fay zonunu derinde kesmesi yeterli olacaktır. Şekil 2 (b)'de ise dağlarla sınırlanmış bir fay bloğu vadisi içindeki bir olası taşınım sistemini göstermektedir. Vadinin bir kenarındaki fay zonu boyunca su derine iner, derinde yatay bir akifer içinde akarken ısınır, ve daha sonra da vadinin diğer kenarındaki bir ikinci fay zonu içinde yükselerek yeryüzüne ulaşır. Şekil 2 (c)'de ise bir fay zonu boyunca yükselen sıcak suyun bir bölümünün yeryüzüne ulaşmadan önce bir yeraltı akiferine girmesi olasılığını şematik olarak gösteren bir model yer almaktadır. Fay zonu boyunca yüzeye ulaşan sıcak su jeotermal sistemin bir parçasını oluştururken, vadi içindeki gözenekli ve geçirgen tabakalı akifer içerdiği sıcak su ile jeotermal sistemin ikinci parçası olmaktadır. Jeotermal akışkanın soğuk yeraltı suyu ile karışması durumunda akışkanın sıcaklığı da düşecektir.



Şekil 1. Düşük Sıcaklıklı Sistemler için Isı Kaynağı Mekanizması Modeli.

#### 4. JEOTERMAL REZERVUAR

Rezervuar, yararlı bir sıcaklıkta akışkan içeren hacim olarak tanımlanabilir. Rezervuar kayacının *gözenekliliği* ne kadar akışkan içerdiğini gösterirken, *geçirgenlik* ise üretilen akışkanın hızını belirler. Gözeneklilik ve geçirgenlik rezervuar içinde yere bağlı olarak değişim gösterebilir. Bir üretim kuyusu tamamlandığında genelde geçirimsiz kayaç delinirken sıcak akışkan kuyuya doğru çatlaklardan veya sınırlı bir geçirgen zondan hareket eder. Çatlak aralıkları birkaç mm'den birkaç cm'ye kadar değişen ölçülerde olabilir. Çatlakların sıkça bulunduğu geçirgen kayaç birimleri önemli miktarda akışkan üretiminde özellikle aranan birimlerdir. Üretim zonları, yerel veya rezervuar ölçeğinde gözeneklilik ağlarını bulunduran zonlardır. Eğer zonlar arasındaki geçirgenlik düşükse akışkan üretimde düşük düzeyde gerçekleşir. Eğer kuyu önemli bir fay veya çatlak sistemini keserse üretilen hacimler sürekli olarak doldurulur ve akışkan üretimi uzun süre devam eder.

Jeotermal kaynaklar "yenilenebilir enerji kaynakları" olarak bilinirler. Yerkürenin içinden yeryüzüne doğru sürekli ısı akışı bu tür bir tanım için en önemli nedendir. Çok miktarda akışkan ve ısı üretimine rağmen rezervuar basıncında veya rezervuar statik su seviyesinde herhangi bir düşme görülmemesi, söz konusu saha için üretimle beslenme arasındaki dengenin varlığını gösterir. Dolayısıyla bu tür dengenin korunduğu, üretimin doğal beslenmeden büyük olmadığı, jeotermal kaynak yenilenebilir bir kaynaktır.

Ancak çoğu kez, doğal beslenmeden düşük üretim miktarı sahanın işletilmesinde ekonomik olmayabilir. Artan yıllık üretimin yıllık doğal beslenmeyi aşması durumu, rezervuarın ısı içeriğinde önemli bir değişiklik yaratmamakla beraber rezervuarın akışkan içeriğinde ve basıncında azalmaya neden olur. Yüksek üretimin sürdürülmesi, rezervuarın ısı içeriği hissedilir oranda değişmese bile, rezervuar basıncının veya su seviyesinin azalması sorununu gündeme getirir. Sorunun çözümü tekrar-basmadır; basılan su rezervuarın akışkan içeriğini yeniler ve rezervuar basıncını veya statik su seviyesini korumaya yardımcı olur, sahanın ticari ömrünün uzamasını sağlar. Bu durumda jeotermal sahanın “sürdürülebilir” üretimi ve işletilmesi gerçekleşir.

## 5. REZERVUARIN İZLENMESİ VE İŞLETİLMESİ

Herhangi bir jeotermal kaynağın işletilmesi sırasında yapılması gereken işlemler hakkında karar vermek, söz konusu jeotermal kaynağın işletilmesinde büyük önem taşımaktadır. Kararlar genelde jeotermal rezervuarın işletme koşullarını geliştirme amacıyla alınır. İşletmede izlenecek yöntemin olası sonuçları hakkında yöneticilerin bilgili olması gerekir. Bu nedenle, dikkatli izleme işletim programının en temel gereklerinden biridir.

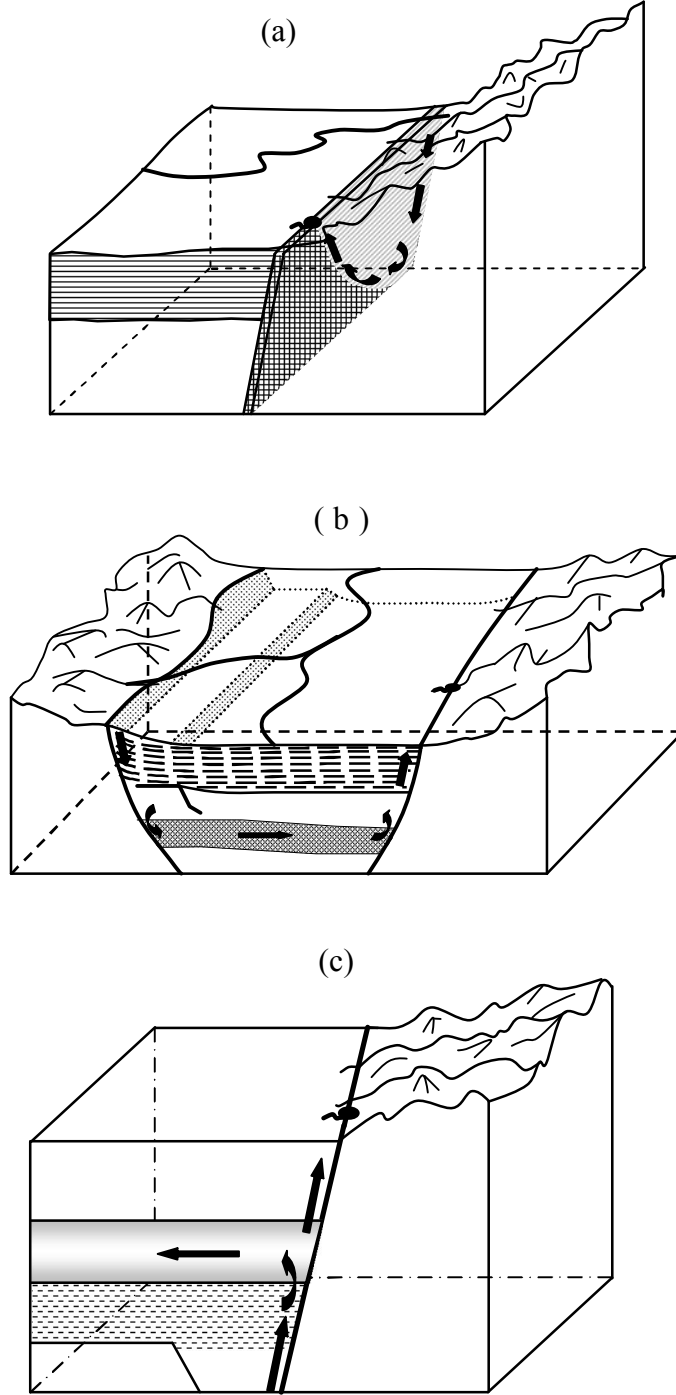
Jeotermal kaynak yönetimi farklı amaçlara yönelik olarak sahayı işletiyor olabilir:

- Jeotermal rezervuarın işletme maliyetini en aza indirme,
- Jeotermal rezervuardan en yüksek üretimi sağlama,
- Sürekli ve güvenilir enerji üretimi sağlama,
- Çevre sorunlarını en aza indirme,
- Mineral çökmesi ve korozyon gibi sorunlardan kaçma,
- İlgili ülkenin enerji politikasına bağlı kalma.

Gerçek amaç, yukarıda listelenen iki veya daha çok amaçla yönelik te olabilir. Bu durumda amaçların önem sırasına göre yerılması gerekir. Önemli olan doğru amaca doğru zamanda ulaşmaktır. Bir rezervuarı hızla üretmek ve işletmek ekonomik olarak çekici olabilir. Ancak bu yaklaşım, politik ve sosyal açıdan kabul edilmeyebilir. Herhangi bir sahanın işletilme süresi genelde 30-40 yılı kapsayan yüzey donanımları ömrüyle belirlenir.

Jeotermal kaynak işletilirken uygulanan işletme seçenekleri arasında:

- Üretim stratejisinde değişme,
  - Enjeksiyona başlama veya enjeksiyon stratejisini değiştirme,
  - Yeni kuyuların delinmesi,
  - Kuyu tamamlama programında değişiklik,
  - Kuyucu pompalarının yerleştirilmesi,
  - Yeni üretim alanlarının veya sondaj yerlerinin araştırılması,
  - Yeni jeotermal sistemlerinin araştırılması,
- yer almaktadır.



Şekil 2. Taşınımın Etken Olduğu Kaynaklar İçin Basit Modeller.



Jeotermal rezervuarın yönetiminde söz konusu jeotermal sistemine ait güvenilir bilgilere gereksinim vardır. Yönetimin başarılı olması için gerekli bilgiler arasında ise:

- 1) Rezervuarın hacmi, geometrisi ve sınır koşulları,
- 2) Geçirgenlik, gözeneklilik, yoğunluk, ısı kapasitesi ve ısı iletkenlik gibi rezervuar kayacı özellikleri,
- 3) Basınç ve sıcaklık dağılımına bağlı olarak bulunan rezervuarın fiziksel koşulları,

sayılabilir.

Yukarda sıralanan bilgiler bir jeotermal rezervuarın araştırılması ve işletilmesi aşamalarında toplanır. İlk bilgiler jeolojik, jeofizik ve kimyasal verilerin elde edildiği başlangıç dönemlerinde toplanır. Sondajlar sırasında yapılan kuyu logları ve kuyu testleri ek bilgileri sağlarlar. Tüm bu bilgilerden yararlanarak rezervuarın ilk modeli oluşturulur. Jeotermal sistemlerin doğası ve özellikleri ile ilgili en önemli veriler ise uzun dönemli üretim davranışının izlenmesinden elde edilir. Son olarak bu verilere dayanarak matematiksel modeller geliştirilir ve sahanın farklı işletim senaryoları için rezervuarın davranışını tahmine yönelik gelecek projeksiyonları yapılır.

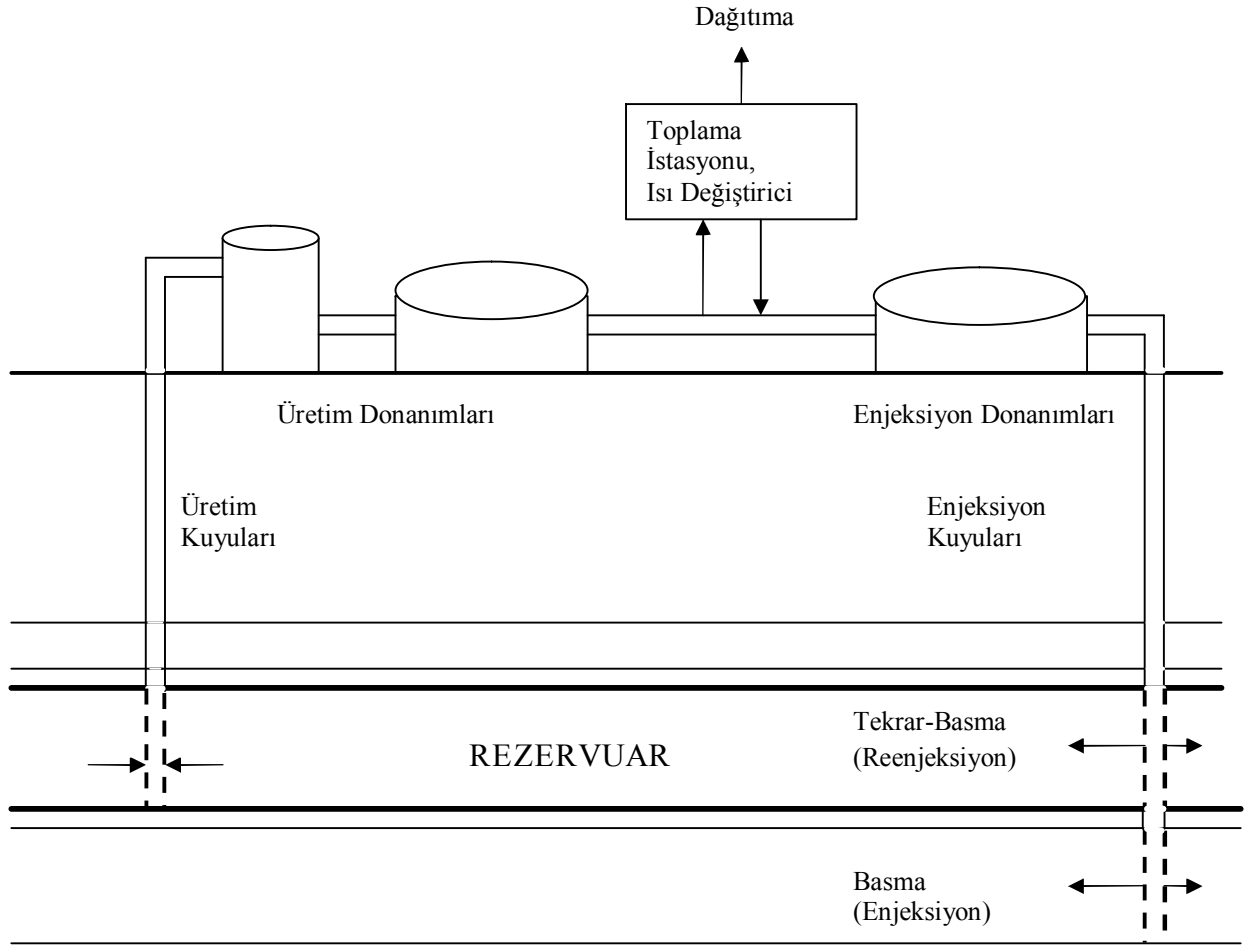
**Jeotermal Saha Geliştirilmesinde Üretim ve Rezervuar Mühendisliği Çalışmalarının Önemi:**

Yeraltı akışkanlarının üretimiyle ilgilenen kuruluşlar arama ve üretim konularında çalışmalar yürütürler. Arama işlemi uygun bir kaynak alanının bulunması ve kanıtlanması etkinliklerini kapsar. Jeoloji ve jeofizik araştırmalar kaynağın bulunması aşamasındaki, sondaj ve formasyon değerlendirme ise keşif kuyusunun sondajı ve üretime geçişteki çalışmaları kapsar. Şekil 3, jeotermal enerji kaynağı sistem şemasını gösterirken, Şekil 4 ise, jeotermal rezervuar (veya kaynak) değerlendirme akış şemasını göstermektedir.

Şekil 3, yeraltı jeotermal rezervuarını başlıca yüzey donanımlarıyla gösteren basit bir şemadır. Jeotermal enerjinin ısıtmada kullanılması durumunda üretim ve enjeksiyon donanımları, toplama istasyonu ve ısı değiştirici bir arada olmakta ve kısaca "ısı merkezi" olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3; jeotermal enerji kaynağının yeraltı rezervuarı ve yerüstü donanımlarıyla birlikte düşünülmesi gerektiğini ve jeotermal sistem işletilirken üretim, dağıtım ve tekrar-basma veya basma işlemlerinin bir bütün olarak tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır. Burada tekrar-basma işlemi olarak artık jeotermal akışkanın üretildiği formasyona basılması ve basma işlemi olarak ise atık jeotermal akışkanın üretildiği formasyonun dışında bir başka formasyona basılması işlemi olarak tanımlanmaktadır.

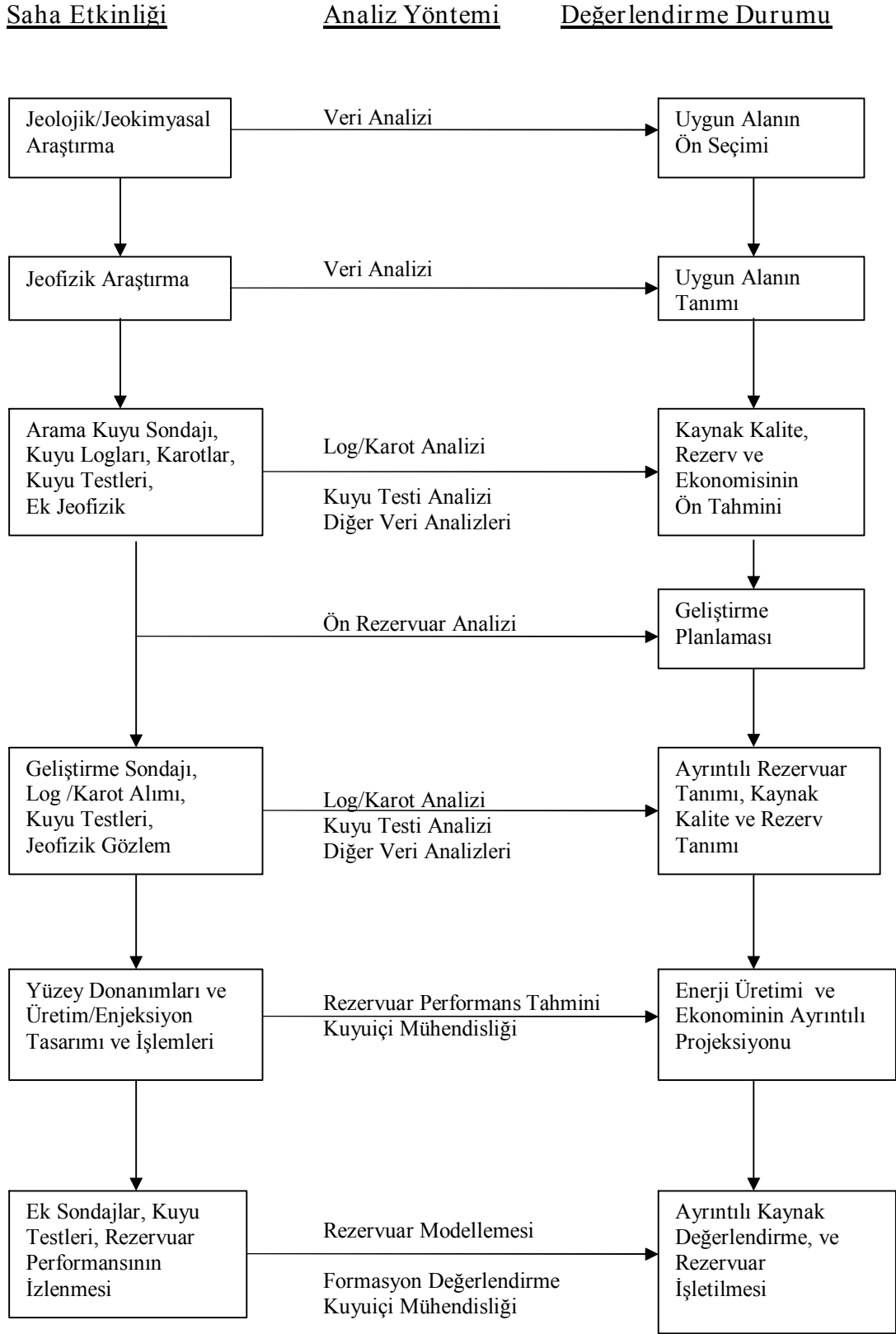
Jeotermal enerji kaynağı işletilirken, enerji kaynağının kullanımı için gerekli yüzey donanımlarının ve enerjinin kullanıcıya dağıtımı söz konusu ise gerekli merkezi ısıtma ve dağıtım sisteminin tasarımı, yeraltındaki jeotermal rezervuarın ısı kapasitesine, üretilebilirliğine ve ömrüne bağlı olarak yapılmalıdır. Rezervuarın ne kadar ısı içerdiği bilinmeden, bu ısının ne kadarının üretileceği ve ne kadar bir süre işletilebileceği belirlenmeden, yüzey donanımlarının ve merkezi ısıtma sistemleriyle konutlara dağıtım için hatların yapılması, sahanın işletiminde kesinlikle doğru bir yaklaşım değildir.

Jeotermal sahalar işletilirken üretilen artık jeotermal akışkanın geldiği yere basılması veya üretilen atık jeotermal akışkanının üretildiği formasyon dışında bir başka formasyona basılması işlemi, tüm jeotermal saha işletimlerinde olmazsa olmaz koşullardan birisidir. Tekrar-basma işleminde genel yaklaşım; basılan akışkanın mümkün olduğunca üretilen akışkanın sıcaklığını etkilemeyecek kadar uzaklara basılması, rezervuardaki orijinal akışkana göre yoğunluğu daha yüksek olan artık akışkanın formasyon içinde daha derinlere basılması ve daha sonra ısıdıktan sonra yükselerek üretim kuyularına varması şeklindedir. Bu nedenle, tekrar-basma işleminde kullanılan kuyuların yerlerinin seçimi ve derinlikleri oldukça önemlidir.



Şekil 3. Jeotermal Enerji Kaynağı Sistem Şeması.

Uygun kaynak alanı bulunduğundan sonra, üretim çalışmaları gündeme gelir. Geliştirme kuyularının sondajı başlar, rezervuar mühendisliğinin planlamasında ve gözetiminde kuyular işletilir ve üretilen kaynak tüketiciye veya kullanıcıya ulaştırılır. Şekil 4'te kaynağın bulunmasından terkedilmesine kadar geçen sürede başvurulan yaklaşım rezervuar kaynağının verimli değerlendirilmesinde esastır. Şekil 4'te adı geçen farklı disiplinlerin birbirini izleyen çalışmalarının yanısıra, yüzey donanımlarının ve dağıtım hatlarının tasarımında ve işletilmesinde makina, elektrik ve kimya mühendisliği gibi ilgili disiplinlerle ortak çalışmalar sahanın işletilmesinde katkıda bulunurlar. Şekil 4'te verilen tüm etkinlik ve değerlendirmelerin gerçekleştirilmesi jeotermal kaynağın teknik ve ekonomik olarak işletilmesinde gereken en önemli koşuldur.



Şekil 4. Jeotermal Rezervuar (Kaynak) Değerlendirme Akış Şeması.

Şekil 4'te gösterildiği gibi, sahanın geliştirilmesi ve işletilmesi birbirini izleyen aşamaların ve etkinliklerin gerçekleştirilmesiyle mümkündür. Her aşamada sahada etkinlikler yapılmakta, etkinlikler sonucu elde edilen veriler analiz edilmekte, yapılan değerlendirmeler sonucunda bir sonraki aşama için planlama yapılmaktadır. Kuyular için jeolojik, jeofizik ve jeokimyasal verilerin yanısıra, delinen her kuyudan elde edilen karot, kuyu logları ve kuyu testleri verileri saha içinde kuyuların deldiği noktalarda rezervuarın özelliklerini belirlemesi yönünden önemlidir. Rezervuarın ortalama özelliklerinin belirlenmesi için ise, delinen kuyular arası akış ve formasyon özelliklerini belirleyen çok-kuyulu testlerin (girişim testleri ve izleyici testleri gibi) yapılması kesinlikle gereklidir. Rezervuarın ve rezervin tanımı ile rezervuarın verimli işletilmesinde kuyucu mühendisliğinin, rezervuar performans tahmininin ve rezervuar modellemesinin önemi Şekil 4'te açıkça görülmektedir.

Yukardaki açıklamalardan kolayca anlaşılacağı gibi, bir jeotermal rezervuarın işletilmesi boyunca yapılan dikkatli izleme yaklaşımı, başarılı bir işletme programının ayrılmaz bir parçasıdır. Eğer jeotermal sistem iyi anlaşılırsa, gelecekte rezervurda olabilecek değişiklikler izleme sırasında tahmin edilebilecektir. Örneğin kuyular içerisinde ve yüzey donanımlarında mineral çökmesi veya korozyon gibi sorunlar bu tür değişiklikler olarak önceden tahmin edilebilir. Jeotermal rezervuar için uygun bir izleme programının önemi hafife alınmamalıdır.

Üretim sırasında rezervuarın tepkisini belirlemek amacıyla izlenmesi gerekli parametreler bir rezervuar sisteminden diğerine değişebilir. Normal bir jeotermal izleme programında incelenmesi gerekli parametrelerin listesi aşağıda sıralanmaktadır:

- Üretim kuyularından yapılan üretim debisi ve toplam üretimin zamanla değişimi,
- Üretilen akışkanın sıcaklığı ve/veya entalpisi,
- Üretim kuyularının kuyubaşı basınçları (veya kuyucu su seviyeleri),
- Üretilen akışkanın kimyasal bileşimi,
- Gözlem kuyularında rezervuar basıncı (veya kuyucu su seviyeleri),
- Gözlem kuyularında kuyucu sıcaklık profilleri.

## 6. ÜRETİMİN REZERVUARA ETKİLERİ

Bir jeotermal rezervuardan su, buhar veya gaz üretimi yapılırsa rezervuar basıncında düşme görülür. Eğer rezervuardan üretim rezervuara doğal beslenme ile giren akışkan miktarından az ise düşüş görülmez. Jeotermal sistemin doğasına ve özelliklerine bağlı olarak basınç düşüşü az veya çok, hızlı veya yavaş olabilir. Üretim sürecinde rezervuarda görülen bazı önemli değişiklikler:

### 1. Rezervuarda basınç düşümüyle olan değişiklikler:

- Kuyu üretiminde azalma,
- Kuyuların su seviyelerinde düşüş,
- Uygun rezervuarlarda veya üretim kuyuları yakınında buharlaşma veya gazlaşma.

### 2. Rezervuara (doğal veya yapay yolla sıcak veya soğuk) su girişi olması durumunda değişiklikler:

- Rezervuar akışkanının kimyasal bileşiminde değişme,
- Rezervuar akışkanının sıcaklık veya entalpisinde değişme,
- Kuyuların sıcaklık profillerinde değişme.

### 3. Yeryüzünde çökme.

olarak sıralanabilir.

Basınç düşümünün büyüklüğü ve hızı, rezervuardan yapılan üretime ve ayrıca jeotermal sistemin ölçüsüne ve özelliklerine bağlı olarak oluşur. Sisteme beslenmenin yetersiz olması durumunda basınç üretime bağlı olarak hızla düşer. Basınç düşüşü, sisteme sıcak veya soğuk doğal beslenme suyu girişini sağlar. Eğer soğuk su girişi gerçekleşirse, üretilen suyun sıcaklığı ve entalpisi azalır. Basınç düşümü ve sıcaklık azalması jeotermal sistemin potansiyelini sınırlayan iki önemli faktördür.

## 7. REZERVUAR MODELLEMESİ

Jeotermal rezervuarların davranışları çeşitli şekillerde modellenebilmektedir. Rezervuarın 3 boyutlu olarak alındığı *sayısal modellerde* rezervuara ait her türlü akışkan, kayaç ve kuyu özellikleri ile modele girilmekte, yerel, bölgesel ve rezervuar genelinde geçerli tüm parametrelerin dağılımı göz önüne alınarak rezervuar performansı incelenmektedir. Ancak bu tür modellerin doğruluğu, giren verilerin doğruluğuyla olduğu kadar çokluğuyla da ilişkilidir. Genelde bu tür sayısal modelleme çalışmaları, rezervuarla ilgili verilerin yeterli duruma ulaştığı ve belirli bir üretim ve rezervuar performansı geçmişinin olduğu aşamalarda tercih edilmektedir.

Rezervuarın işletilmesinin henüz başlangıç aşamalarında belirli jeolojik, jeofizik, saha, akışkan ve kayaç özelliklerini gerektiren *hacimsel modelleme yöntemi* kullanılabilir. Bir ilk modelleme çalışması olarak rezervuarın alanı, kalınlığı, gözenekliliği ve akışkan özellikleri veri olarak alınıp rezervuarın hacmi ve içerdiği akışkan miktarı bu tür bir modelleme çalışmasıyla tahmin edilebilir.

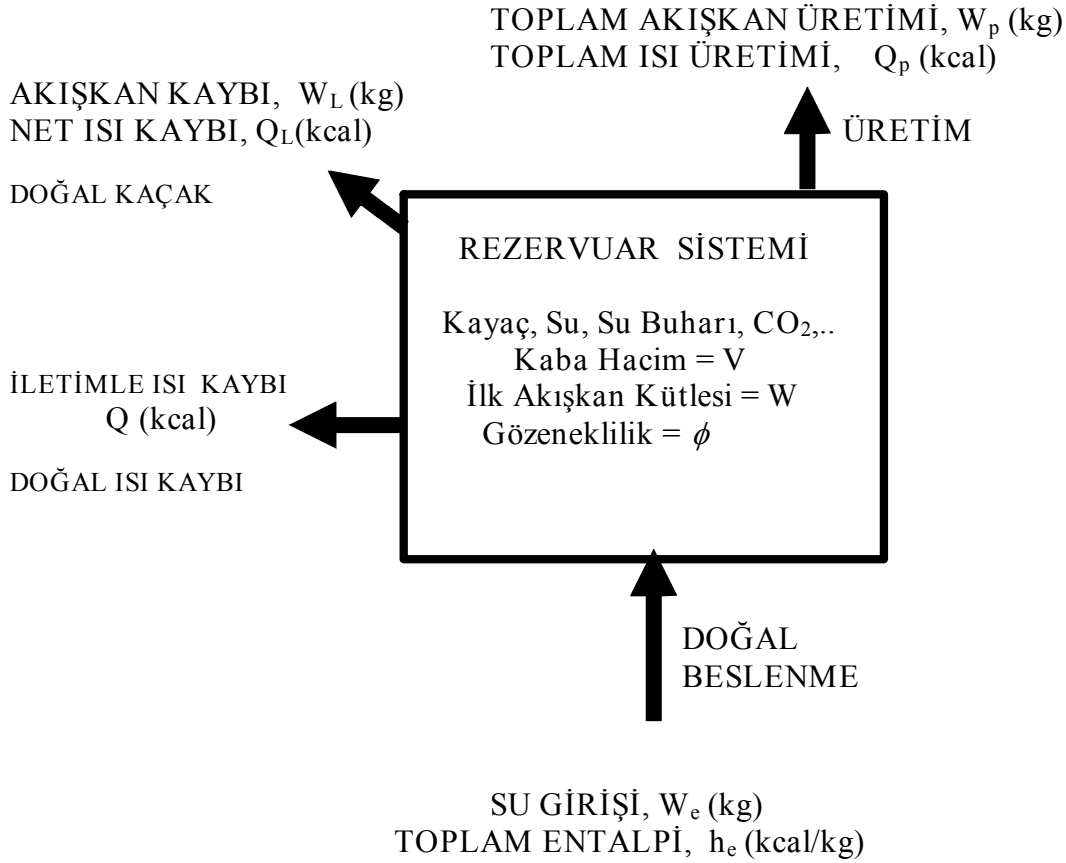
Bir diğer tür modelleme çalışması, kuyuların ve rezervuarın üretim verilerinden ve bu verilerin zamanla değişimini modelleyen *üretim debisi azalma analizi yöntemi* kullanarak yapılabilir. Geleceğe yönelik üretim debisinin değişimi ve toplam üretilebilir akışkan miktarı tahminleri bu yaklaşımın amacıdır. Ancak, yaklaşımın kullanılabilmesi için yeterli üretim verisinin varolması gereklidir.

Literatürde sıkça başvurulan bir diğer modelleme yöntemi ise "Lumped Parameter Model" olarak bilinen hacimsel modelleme yöntemine benzer özellikler taşıyan fakat rezervuarı boyutsuz olarak alan yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, rezervuar bir bütün olarak alınıp, rezervuardan giren ve çıkanlar gözetilerek ve akışkan ve kayaç özellikleri kullanılarak rezervuar basıncı ve sıcaklığının zamana veya rezervuardan yapılan üretime karşı davranışını belirlemeyi amaçlayan bir modelleme şeklidir. Kullanımı basit olduğundan dolayı tercih edilen bu modelleme yönteminde gerekli giriş verileri olarak rezervuar hacmi, doğal beslenme, toplam ısı ve akışkan üretimi, rezervuardan doğal ısı ve akışkan kaçakları alınır. Şekil 5 *boyutsuz rezervuar modellemesinde* gözönüne alınan parametreleri göstermektedir. Kaynak [6] ve [7] boyutsuz rezervuar modellemesinin kullanımıyla ilgili çalışmaları içermektedir.

Jeotermal rezervuarlar içinde akışkan akışı incelenirken dikkate alınması gereken en önemli özelliklerden birisi gözenekli ortamda akış sırasında sıcaklığın ve basıncın değişiyor olmasıdır. Özellikle rezervuara tekrar-basma işlemi sırasında oluşan akış izotermal(eşsıcaklık)-olmayan akıştır. Bilindiği gibi tekrar-basma işleminin 3 önemli amacı vardır:

- 1) Yeryüzünde üretildikten sonra kalan artık sudan kurtulmak.
- 2) Rezervuar basıncını korumak.
- 3) Rezervuardan daha fazla ısı üretimini sağlamak.

Özellikle suyun etken olduğu jeotermal rezervuarlardan çok yüksek miktarlarda sıcak su üretimi yapılır. Üretilen sıcak suyun bir kısmı sıcak su olarak doğrudan kullanılırken geri kalan önemli bir kısmı ise merkezi jeotermal ısıtma sistemlerinde ısısı alındıktan sonra artık su olarak kalır. Artık su saha yakınındaki deniz, göl ve akarsu gibi yerlere verilebilirdese, her jeotermal sahanın yakınında bu tür olanaklar bulunmayabilir. Kaldı ki olsa bile hem en doğru çözüm değildir ve hemde bazı çevre sorunları kaçınılmazdır. Dolayısıyla doğru olanı, suyu geldiği yere veya uygun yeraltı formasyonlarına basmaktır.



Şekil 5. Boyutsuz Rezervuar Modeli.

Suyun geldiği yere yani jeotermal rezervuara basılması durumunda önemli yararlar sağlanabilir. Bilindiği gibi üretimden dolayı boşaltılan rezervuar hacminin bir kısmı doğal beslenme yoluyla doldurulur. Ancak

doğal beslenme ile rezervuara giren su miktarı, üretim yoluyla rezervuardan ayrılan su miktarını karşılamayabilir ve bu durumda rezervuar basıncı düşer. Özellikle suyun etken olduğu jeotermal sistemlerde bu sorun oluşur. Bu sorunun çözümü artık suyun geldiği yere basılmasıdır. Böylece rezervuar basıncı korunmuş olur.

Basılan su formasyonda ilerlerken sıcak kayaktan ısı alarak ısınır ve daha sonra üretim kuyularına varıp üretilir. Bu işlem rezervuarın işletilmesi sırasında tekrarlanan bir işlemdir. Üretilen artık su rezervuara basılır, basılan su rezervuarda ilerlerken ısınır, ısınan su tekrar üretilir, vb. Dolayısıyla bu tür bir basma işlemi tekrar-basma işlemi olarak adlandırılmaktadır.

Sıvıyla dolu bir jeotermal sisteme soğuk su basılması durumunda Denklem 1 rezervuarda soğuk su cephesinin hareketini tanımlamakta da önem kazanmaktadır. Basılan su cephesi (kimyasal cephe) rezervuarda belirli bir uzaklığa ulaştığında, soğuk su cephesi (sıcaklık cephesi) daha küçük bir uzaklığa ulaşmış olacaktır ve iki farklı cepheye olan uzaklık oranı Denklem 1 ile tahmin edilebilir.

Basılan artık akışkanın gözenekli ortamda akışı dikkatle incelenmesi gereken önemli konulardan birisidir. Gözenekli ortam homojen, doğal çatlaklı, bir tek düşey veya yatay çatlaklı olabilir. Akış doğrusal, çevrel veya yarıküresel olarak gelişebileceği gibi laminar veya türbülans olabilir. Akışkan tek veya iki fazlı olarak akabilir. Kaynak [8], [9] ve [10] bu konularda yapılmış bazı çalışmalarını tartışmaktadır.

## 8.ÜLKEMİZDE İŞLETİLEN JEOTERMAL SAHALARLA İLGİLİ BAZI GÖZLEMLER

- (1) Türkiye’de özellikle Batı Anadolu bölgesinde bugüne kadar bulunmuş olan jeotermal rezervuarların çoğunluğu içinde çözünmüş CO<sub>2</sub> bulunan sıcak su sistemleridir. Rezervuar koşullarında su içinde çözünmüş olarak bulunan CO<sub>2</sub> sahanın işletilmesi sırasında yarattığı sorunlarıyla ve yararlarıyla ihmal edilmemesi gereken bir gazdır. Yarattığı en önemli sorun, rezervuardan akışkan üretimi sırasında kuyu içinde ve yüzey donanımlarında kalsit çökmesidir. Oluşturduğu kalsit sorununa karşın CO<sub>2</sub>’in rezervuarda bulunmasının yararları da vardır. Rezervuar içinde CO<sub>2</sub>’in kısmi basıncı, üretim sırasında oluşan basınç düşümüne olumlu katkıda bulunur ve rezervuar basıncının korunmasına yardımcı olur. Ayrıca CO<sub>2</sub> endüstriyel bir maddedir ve halen bazı sahalardan ticari amaçlı olarak üretilmektedir.
- (2) Bazı jeotermal kaynaklarımızdan üretilen su, Kızıldere jeotermal sahasında olduğu gibi, bor içermektedir. Üretilen artık sudan kurtulmak amacıyla artık suyun saha yakınındaki akarsulara verilmesi tarımsal açıdan sorunlar yaratmaktadır. Bu tür çevre sorunlarının da olası çözümü tekrar-basma uygulaması olabilir.
- (3) Ülkemizde jeotermal merkezi ısıtma projelerinin kapasitesi daha öncede değinildiği gibi 650 MWt’a ve ısıtılan konut sayısı kapasites yaklaşık 60 bin konuta ulaşmış durumdadır. Kapasitenin çok daha yüksek rakamlara çıkarılabileceği ve ısıtılan konut sayısının 500 bine ulaştırılabileceği iddia edilmektedir. Enerji darboğazı içindeki ülkemiz için jeotermal enerji kullanımının yaygınlaştırılması doğal olarak arzu edilir. Ancak yadsınamıyacak bir başka gerçeği burada vurgulamakta yarar vardır. Gerçekleştirilen jeotermal merkezi ısıtma projelerinde yüzey donanımları ve tesisatları genelde kabul edilebilir bir düzeyde ve kalitede yapılmış durumda olmasına rağmen, bu tür projelerin olmazsa olmaz parçası olan üretim ve rezervuar mühendisliği konuları, rezervuar modelleme çalışmaları, tekrar-basma uygulamaları, işletilen sahaların izlenmesi programları genelde ihmal edilmektedir. Bu önemli bir eksiklik, ve varolan jeotermal merkezi ısıtma projelerinin sürdürülebilir olması için yukarıda bahsedilen çalışmaların tamamlanması gerekmektedir.
- (4) Jeotermal sahalar yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik koşullarına bakılmadan işletilmektedir. Sahalarda dileyen dilediği yerde kuyu delmekte ve günlük enerji sorunları çözülmektedir. Bu durum jeotermal enerjinin yenilenebilirliği ve uygulamaların sürdürülebilirliği konusunu tartışmaya açmaktadır. [11] Jeotermal projeler geliştirilirken, jeotermal enerjinin yenilenebilir ve sürdürülebilir olduğunu, uygulamaların büyüklüğü ve teknolojisi göz önüne alınarak, göstermek gerekmektedir.

## SONUÇLAR

Jeotermal enerji yerin ısısı olarak önemli bir enerji kaynağıdır. Hava kirliliği yaratmayan ve dikkatli kullanıldığında çevre sorunlarını en aza indirmeye özelliği olan bir kaynaktır. Özellikle tektonik yapısının uygunluğundan dolayı ülkemizin Batı Anadolu bölgesi jeotermal enerji kaynaklarının zenginliğiyle bilinen bir bölgedir.

Her jeotermal saha ayrı bir yaşayan varlık gibi değerlendirilmeli ve incelenmelidir. Sahalar özellikleri itibariyle farklılıklar gösterebilirler. Ancak jeotermal enerji mühendisliği gelişmiş bir disiplindir ve varolan teknoloji yerin binlerce metre derinliğinde bulunan yer ısısının üretilmesi ve insanlığa kazandırılması için yeterlidir.

Jeotermal enerji kaynağının sürdürülebilir projelerde kullanılması amaçlanmalıdır. Projelerin sürdürülebilir olması için jeotermal sistemlerin ve rezervuarların iyi bilinmesi ve varolan yeraltı özelliklerinin projelerin avantajına olacak şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Projelerde üretim ve rezervuar mühendisliği konularının, rezervuar modelleme çalışmalarının, tekrar-basma uygulamalarının ve işletilen sahaların izlenme ve gözlenme programlarının eksiksiz olarak gerçekleştirilmesi doğru olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] BODVARSSON, G., "Physical Characteristics of Natural Heat Sources in Iceland", Proc. UN Conf. On New Sources of Energy, Vol. 2:Geothermal Energy, 82-89, Roma, August 1961, United Nations, New York.
- [2] AXELSSON, G., GUNNLAUGSSON, E., Long-Term Monitoring of High- and Low-Enthalpy Fields Under Exploitation, International Geothermal Association, WGC2000 Short Courses, Kokonoe, Kyushu District, Japan, 28-30 May 2000.
- [3] STEFANSSON, V., "World Geothermal Assessment", World Geothermal Congress 2005, Antalya, 24-29 Nisan 2005.
- [4] LUND, J.W., FREESTON, D.H., BOYD, T.L., "World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2005", World Geothermal Congress, Antalya, 24-29 Nisan 2005.
- [5] RAMEY, H.J., Jr. ve diğ., Reservoir Engineering Assessment of Geothermal Systems, Department of Petroleum Engineering, Stanford University, California, Oct. 1981.
- [6] ALKAN, H., SATMAN, A., "A New Lumped Parameter Model For Geothermal Reservoirs in the Presence of Carbon Dioxide", Geothermics, Vol. 19, No. 5, 469-479, Oct./Nov. 1990.
- [7] SATMAN, A., UĞUR, Z., "Flashing Point Compressibility of Geothermal Fluids with Low CO<sub>2</sub> Content and Its Use in Estimating Reservoir Volume", Geothermics, Vol:31/1, Jan. 2002, 29-44.
- [8] SATMAN, A., Jeotermal Rezervuarlarına Soğuk Su Enjeksiyonu İle Enerji Üretiminin İncelenmesi ve Türkiye'de Uygulanabilirliği, Proje MAG-593, TÜBİTAK, Ankara, Nisan 1983.
- [9] SATMAN, A., "Solutions of Heat and Fluid Flow Problems in Naturally Fractured Reservoirs:Part 1-Heat Flow Problems", SPE Production Engineering, 463-466, Nov. 1988.
- [10] SATMAN, A., SERPEN, U., UĞUR, Z., TÜRKMEN, N., "Kızıldere Jeotermal Rezervuarı Üretim Performansının ve Tekrar-Basma Testinin Analizi", Türk Petrol ve Doğal Gaz Dergisi, Vol. 3, No. 2, 56-64, Şubat 1997.
- [11] TOKSOY, M., "Jeotermal Enerji Uygulamalarında "Yenilenebilirlik ve Sürdürülebilirlik"", Termodinamik, 46-50, Ağustos 2000.

## ÖZGEÇMİŞ

Abdurrahman SATMAN

İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nden Y. Mühendis olarak mezun olduktan sonra gittiği A.B.D.'deki Stanford Üniversitesi'nde Petrol Mühendisliği Bölümü'nden MS ve Doktora ünvanlarını aldı. Daha sonra Stanford Üniversitesi'nde Assistant Profesör olarak çalıştıktan sonra 1980 yılında İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümünde çalışmaya başladı. 1985-1987 arasında Suudi Arabistan'da KFUPM-Research Institute'te çalıştı. Halen İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi ve İTÜ Enerji Enstitüsü'nde Müdür olarak görev yapmaktadır. İlgili alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliği ve üretim ve rezervuarla ilgili konular yer almaktadır.