

# JEOTERMAL KAYNAK ARAMALARINDA YAPILAN JEOFİZİK ÇALIŞMALAR

**Doç Dr. Zeynel DEMİREL**

Mersin Üniversitesi

Jeotermal aramalarda jeofiziksel yöntemlerin uygulanması oldukça yaygındır. Jeofizik aramaları jeotermal sistemlerin fiziksel parametrelerinin yüzeyden yapılan ölçümlerle bulunmasına yöneliktirler. Fizik ilkelerini kullanarak yerküreyi inceleyen bilim dalı olan jeofizik, yer fiziği anlamındadır.

Jeofizik bilim dalında kullanılan başlıca yöntemler;

-Gravite: Yer altı yapılarının yer çekimi özelliğini inceler.

-Manyetik: Yer altı yapılarının manyetik özelliklerini inceler.

-Sismoloji: Depremlerin özelliklerini ve yerin derinliklerini inceler.

-Sismik: Yer altı yapılarının sismik hız değişimlerini inceler.

-Elektrik: Yer altı yapılarının elektrik iletkenlik özelliklerini inceler.

-Elektromanyetik: Yer altı yapılarının elektrik iletkenlik ve elektromanyetik özelliklerini inceler.

-Radyometrik ve Jeotermik: Yer altının radyoaktif ve sıcaklık özelliklerini inceler

.-Kuyu Logları: Sondaj kuyularında yapılan yer çekimi, manyetik, radyometri, elektrik vb. jeofizik yöntemlerdir.

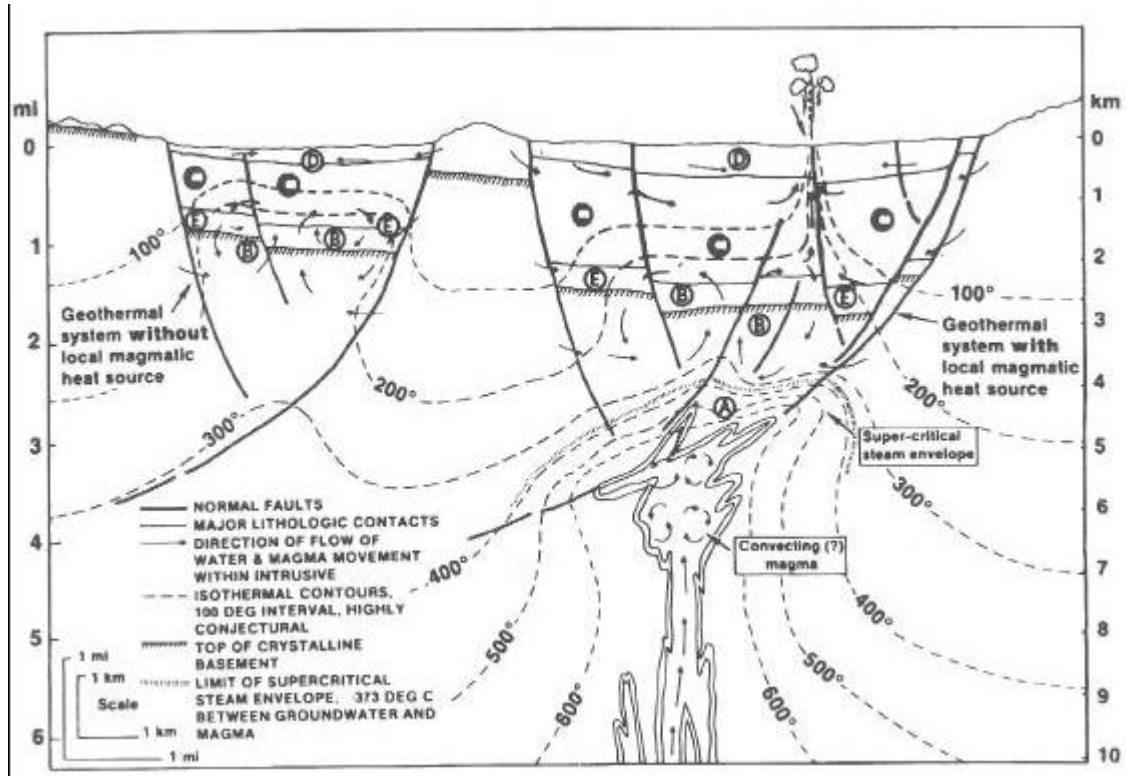
Bir jeotermal sistem 4 temel elemandan oluşmuştur: *ısı kaynağı, rezervuar, ısıyı derinden yüzeye taşıyan jeotermal akışkan ve beslenme alanı*. Isı kaynağı genelde sığ derinliklerde bulunan magmatik bir sokulumdur. Jeotermal rezervuar içerisinde ısı enerjisinin üretildiği bir kayaç topluluğudur ve içerisinde sıcak jeotermal akışkan, çoğu kez sıcak su, buhar ve gaz içerir. Bir jeotermal rezervuar genelde soğuk kayaçlar tarafından çevrelenmiştir ve bu kayaçlar rezervuar ile hidrolik kontaklıdır. Soğuk suyun rezervuara doğru hareket etmesi ile rezervuardaki sıcak su yüzdürme (buoyancy) etkisi ile boşalım zonuna doğru hareket etmektedir.

Ekonomik olarak işletilebilecek bir jeotermal rezervuarın ulaşılabilir bir derinlikte olması gerekir. Bu derinlik günümüzde 1-2 km civarındadır.

Bir üretim kuyusunun yeterince akışkan üretebilmesi için geçirimli bir zona ulaşması gereklidir, genelde çatlaklı ya da fay tarafından etkilenmiş bir zon olmalıdır.

Jeotermal rezervuarların litolojileri çok çeşitlidir, kireçtaşı, şeyl, volkanik kayalar ve granit gibi kayalar rezervuarları oluşturabilirler. Dünyada işletilmekte olan jeotermal sahaların çoğunda hidrotermal sistemler karşımıza çıkmaktadır, bu sistemlerde jeotermal akışkan rezervuarın üstündeki örtü kayayı ki bu kayalar çoğu kez altere olmuş kayalardır, keserek yüze ulaşmaktadırlar. Bu nedenle jeotermal sistemler araştırılırken litolojik ayrımların yanı sıra tektonik özellikler de önemle üstünde durulmaları gereken araştırmalardır.

Jeotermal sistemler çoğu kez kalın örtü tabakaları tarafından izole edilmiş temel kayalar içinde ortaya çıkar. Volkanik bir arazide ise bir jeotermal sistemin en önemli elementi sistemin kaynağı, yani yüze sokulmuş magmatik kayacın varlığı-yeridir. Jeotermal sistemin kaynağı bir pluton olabileceği gibi karmaşık bir dayk'ta olabilir (Şekil 1).



Şekil 1: Sol taraftaki jeotermal sistem yüksek jeotermal gradyan sonucu, sağdaki ise ısı kaynağı olarak bir sokulumun sonucunda oluşmuştur.

Bir ısı kaynağı üzerinde bulunan bir jeotermal sistem tektonik aktiviteden etkilenmiş olmalı, konveksiyon hücrelerinde sirkülasyon için akışkan mevcut olmalı ve bir örtü kayaca sahip olunmalıdır. Tüm bu elemanlar jeolojik, jeofiziksel ve jeokimyasal araştırma yöntemlerinin hedefini oluşturmaktadırlar. Yüksek sıcaklıklar dolayısıyla kayalarda ortaya çıkmış olan değişimler de göz ardı edilmemelidir.

Isı küçük hacimde bir kayaç içine kolaylıkla hapsedilemez. Isı çok kolaylıkla diffüze olur ve jeotermal rezervuar etrafındaki büyük hacimdeki kayaçları da altere eder.

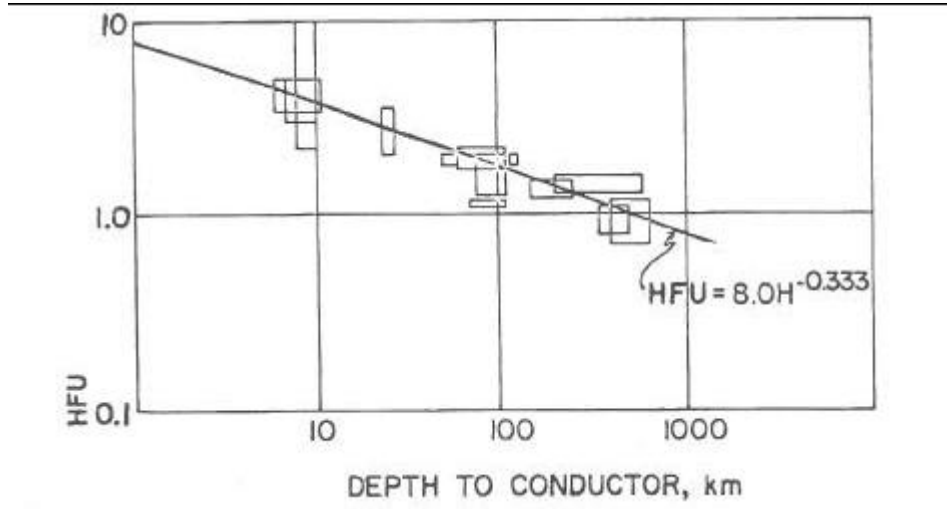
Jeotermal bir araştırmada öncelikle tüm ısı akısı verileri haritalanır ve yüksek anomalili yerler belirlenir.

Jeotermal bir sistem genelde yeraltında fiziksel özelliklerde heterojeniteye neden olur, yeraltının fiziksel özelliklerindeki bu değişkenlikler yüzeyden yapılan bazı ölçümler ile ortaya çıkarılabilir.

Bu fiziksel parametreler sıcaklık (termal araştırmalar), elektriksel iletkenlik (elektrik ve elektromanyetik yöntemler), elastik dalgaların yayılım hızını etkileyen elastik özellikler (sismik araştırmalar) yoğunluk (gravite) ve manyetik duyarlılık (manyetik araştırmalar). Bu yöntemlerin birçoğu jeotermal bir rezervuarı ve bazen de ısı kaynağını içeren derindeki bir jeotermal sistemin şekli, derinliği ve boyutları hakkında önemli bilgiler verir. Volkanik kayalarda silika miktarının artışı yoğunluğu düşürür. Termal yöntemler sıcaklık dağılımını ortaya koyar ve sahanın boyutlarını sınırlandırır. Jeolojik yapıda jeotermal akışkanın varlığı elektrik ve elektro manyetik yöntemlerle belirlenir. Özellikle akışkanın tuzlu olması durumunda yöntem daha hassastır. Bunun dışında rezistivite artan porozite ve artan doygunluk ile azalmaktadır.

Yüzeyde dolaylı olarak ölçülen bu parametreler kuyularda da ölçülebilir, bu yöneme de jeofiziksel kuyu logu adı verilmektedir.

Termal uyarılma sonucu konduktif olan kayacın derinliği manyetotellürik yöntemler ile belirlenebilir. Dünyada yapılan çalışmalardan kazanılan deneyimler bölgesel ısı akısı ve termal olarak uyarılmış konduktor arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Konduktör ve ısı akısı arasındaki korelasyon

Curie noktası yöntemi kabukta sıcak kaya kütesinin varlığını belirlemek için potansiyel bir göstergedir. Eğer kayalar 500°C üzerine kadar ısınırsa ferromagnetizimlerini yitirirler. Olumlu koşullar altında bu demagnetizasyon seviyesinin derinliği yeterli duyarlılıkta belirlenebilir.

Daha fazla bilgi p-dalgalarının gecikmelerinin ve share (kesme) dalgalarının izlenmeleri ile elde edilir. Volkanik kayalarda silika miktarının artmasıyla p-dalgalarının yayılma hızında düşme olur. Bunun ötesinde sismik hızlar porozite ve doymuluktan kuvvetlice etkilenirler. Dalga hızı porozitenin artmasıyla artar ancak farklı doymuluklarda farklı davranışlar sergiler.

Jeotermal araştırmalarda hangi yöntemin uygulanmasının gerektiği her araştırmadaki kendine özgü karakteristiklere bağlıdır. Örneğin yüzeye yakın, sığ konveksiyon sistemlerinin sınırlarını belirlemek için en uygun yöntem elektrik yöntemleri olacaktır. Bu arada geniş kil/killi masiflerin bulunduğu bölgelerde bu yöntem aldatıcı olacaktır. Bunu aşmak için elektrik yöntemlerin birçoğunun uygulanması gerekebilecektir, Schlumberger dizilimi, dipol-dipol araştırma, dipol haritalama ölçmeleri ve elektromanyetik ölçümler gibi.

Sahada açılacak gradyan kuyularının sayısı çok değişkendir; bazı durumlarda tek bir kuyu ile yetinilebilirken bazı durumlarda yüzlerce gereksinim duyulabilir.

Jeofizik ölçümlerin tümü jeotermal rezervuarın karakteristiklerini belirlemeye yönelik uygulanırlar, bu nedenle burada bahsedilenlerin haricindeki yöntemler de uygulanabilirler. Self potansiyel ölçümleri jeotermal sahada yeraltı suyu hareketlerinin anlaşılması için yararlıdır.

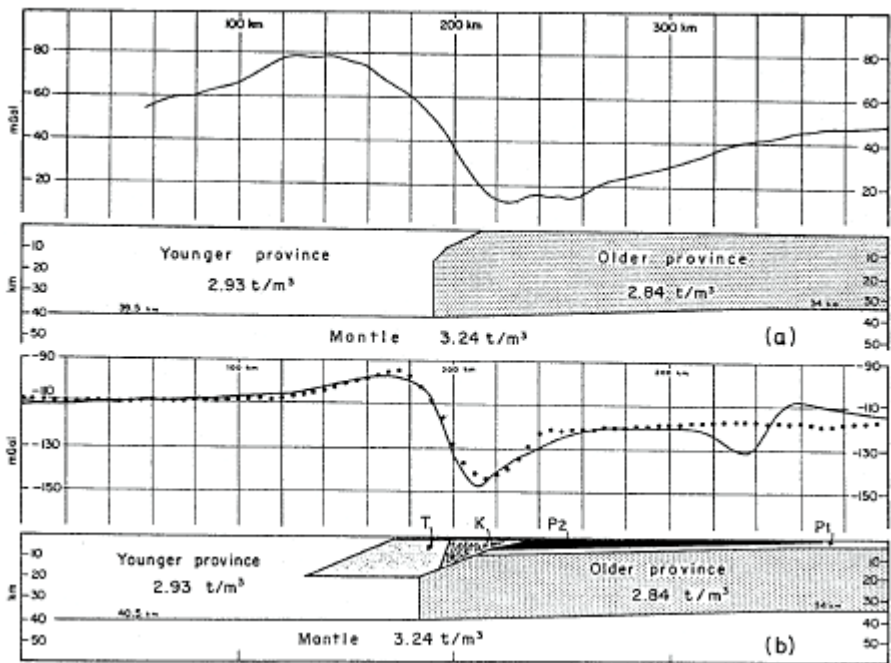
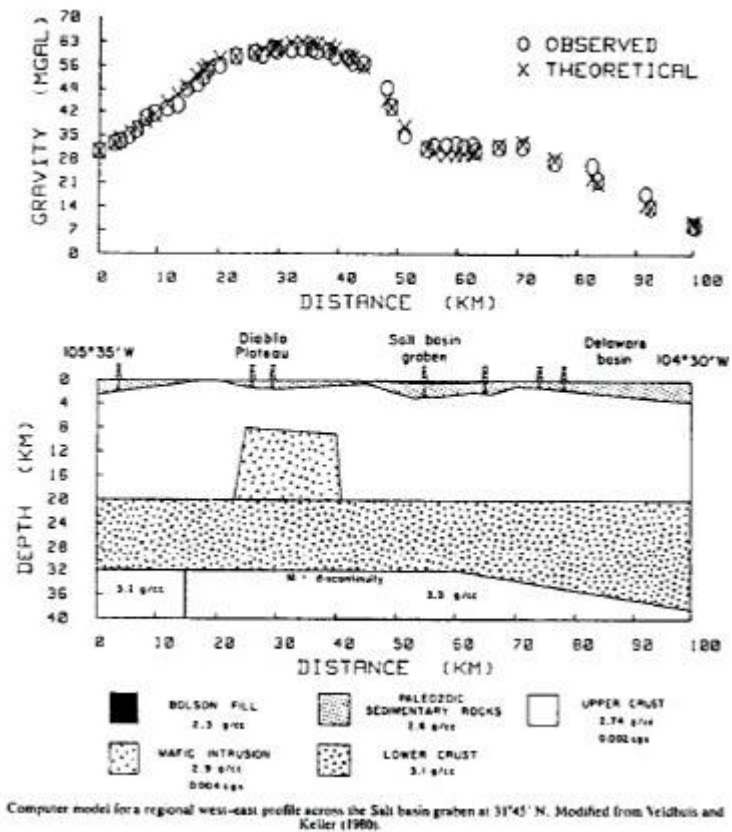
Gravite ölçümleri havzanın derinliğinin ve dolgu malzemenin kalınlığının anlaşılmasında ve intrusif kayaç kütlelerinin yerlerinin belirlenmesi için uygulanırlar. Manyetik ölçümler volkanik sahalarda akımların sınırlarının belirlenmesinde kullanılırlar.

## 1. Gravite ölçümleri

Newton'un I.inci kuramına göre cisimler birbirlerini kütleleri ile doğru, aralarındaki mesafenin karesi ile ters orantılı olarak çekerler. Newton'un II.nci kuramına göre de, çekme kuvveti, kütle ile yerçekimi ivmesinin çarpımına eşittir. Jeofizikte gravite yönteminin temeli Newton'un bu iki kuramıdır.

Gravite etütlerinde amaç, yer kabuğundaki farklı özgül ağırlıklı kayaçlar nedeniyle yerin gravite alanındaki değişimlerin saptanmasıdır. Ölçülen ise yerkürenin çekiminden ileri gelen yer ivmesinin düşey bileşenidir.  $g$ 'nin yeryüzündeki ortalama büyüklüğü cgs sistemine göre  $980 \text{ cm/s}^2$  yani 980 Gal'dir. MKS sistemine göre ise  $g$ ,  $9.80 \text{ m/s}^2$  olarak ifade edilmektedir.

Jeotermal aramalarda gravite ölçümleri derinlerdeki magmatik kütlelerle ilişkili olarak yanal yoğunluk değişimlerinin ki bu ısı kaynağının temsilidir, belirlenmesinde kullanılır. Jeotermal sahalardaki gravite gözlemleri aynı zamanda yeraltı su seviyesinin değişimlerinin belirlenmesinde kullanılır. Yeraltından su çekilmesi boşluk basıncının ve dolayısıyla yoğunluğun artmasına neden olur.



Sekil 3. Derin yapıların araştırılmasında gravite yöntemi uygulamalar (Chouteau, 1999)

## 2. Manyetik Ölçümler

Yerkabuğu üzerinde manyetik alan kuvvetindeki spatial(uzaysal) değişimlerin araştırılması uzun yıllardan beri bir jeofizik araştırma yöntemi olarak kullanılmaktadır. Havadan, karadan ve denizden uygulanabilen bir yöntem olması kendisine fazladan avantajlar sağlamaktır.

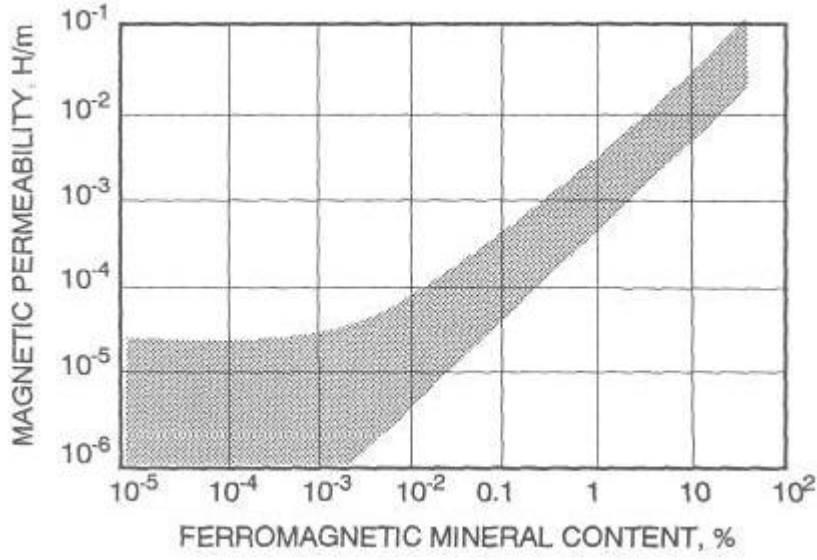
Magnetit en fazla rastlanan ferromagnetik mineraldir ve manyetik iletkenlik kayalarda bu mineralin bulunmasıyla kontrol edilir (Şekil 4). Manyetik yöntem magmatik kayaların magnetit konsantrasyonlarıyla belirlenmesi ve lokalize edilmesi ilkesine dayanır. Kuvvetli magnetik kayalar bazalt ve gabro iken, granit, granodiyorit ve riyolit orta düzeyde manyetik sussebiliteye(duyarlılığa) sahiptirler.

Yer küre üzerindeki bir noktada ölçülen yer manyetik alanın değeri Ekvator civarında 25 000 nT kutuplarda 70 000 nT dır. Manyetik alan ölçmelerinin birimi Tesla (T) olup 1nT (nanoTesla) =  $10^{-9}$  T (cgs sisteminde, 1nT = 1 gamma =  $10^{-5}$  Gauss).

Bir arazi etüdünde varılmak istenen sonuç, arazi içindeki anomalilerin varlığını saptamaktır. Manyetik anomali ise, ölçülen manyetik alan ( $F_{ölç}$ ) değerinden  $F_{igrf}$  ve  $F_z$  bileşenlerinin çıkartılması ile elde edilir. Elde edilen değer, üst ve orta kabuktaki yer manyetik alanının indüklemesiyle manyetik alan yaratan yüksek mıknatıslanma katsayılı (süseptibilite) kayaç veya madenlerdir. Bu veri ayrıca rejyonel - rezidüel anomali ayırımına tabi tutularak elde edilmek istenen anomaliye ulaşılır.

Magnetik yöntem genelde yüzeye yakın volkanik kayaların haritalanmalarında kullanılır ve bu da jeotermal enerji aramalarına katkı sağlar. Yöntemin en önemli özelliği ise Curie sıcaklığına ulaşılan derinliğin bulunmasını sağlamasıdır. Ferromagnetik materyallerin en önemli özelliği kritik bir sıcaklık olan Curie sıcaklığında tüm magnetik hassasiyetlerini kaybetmeleridir. Değişik ferromagnetik minerallerin farklı Curie sıcaklıkları vardır, fakat magmatik kayalarda en yaygın olarak bulunan titano-magnetitin Curie sıcaklığı 570° C civarındadır.

Magnetik arazi gözlemlerinde kabuğun üst kısımlarında magnetizasyon oldukça kısa dalga boylarıyla buna karşı derinlerde Curie noktasında demagnetizasyonda magnetik alan uzun dalga boylarıyla karakterize olur.



Şekil 4: Manyetik iletkenlik ile intrüzif kayalarda ferromagnetik mineral içerikleri arasındaki korelasyon

### 3. Sismik Yöntem

Sismik yerkürenin katı, sıvı ve hava gibi ortamlarında herhangi bir enerji kaynağının meydana getirdiği mekanik titreşim dalgalarının yayılma mekanizması anlamındadır. Sismik dalga ise mekanik titreşim dalgası demektir. Sismoloji, sismik dalgaların oluşumu ve yayılma mekanizmasını inceleyen bilim dalı ve sismik yöntem söz konusu sismik dalgaların çeşitli teknik araç ve yöntemlerle kaydedilerek yerici jeolojik yapısının aydınlatılmasıdır.

Sismik dalgalar yericinden geçerken geçici olarak bir miktar yer değiştirmeye ve çok küçük bir hacim değişimine yani deformasyona neden olurlar.

Sismik dalga hareketleri iki grupta değerlendirilir;

#### 1. Cisim dalgaları

P Dalgası; Yayılma doğrultusu boyunca yayılma doğrultusuna paralel ileri-geri hareketler ileleyen veya yayılan dalga türüdür.

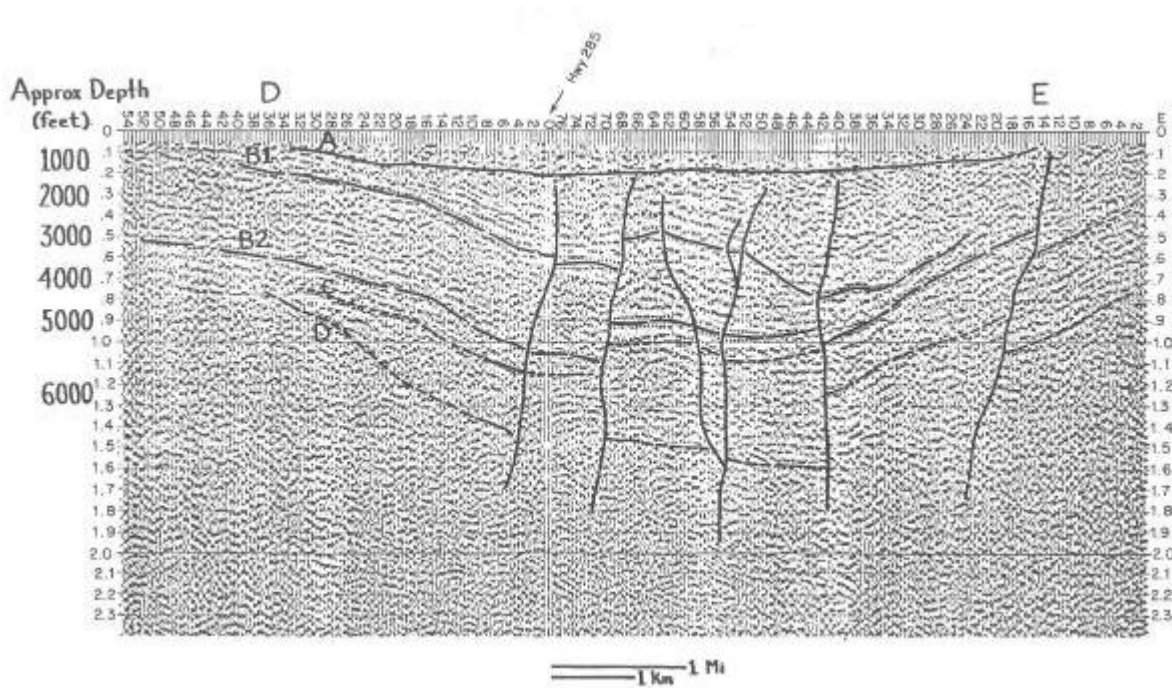


S Dalgası; Yayılma doğrultusu boyunca yayılma doğrultusuna dik olarak hareketler ilerler.

## 2. Yüzey dalgaları

Sismik refleksiyon (yansıma) ve refraksiyon (kırılma) yöntemlerinin her ikisi de jeotermal aramalarda kullanılır.

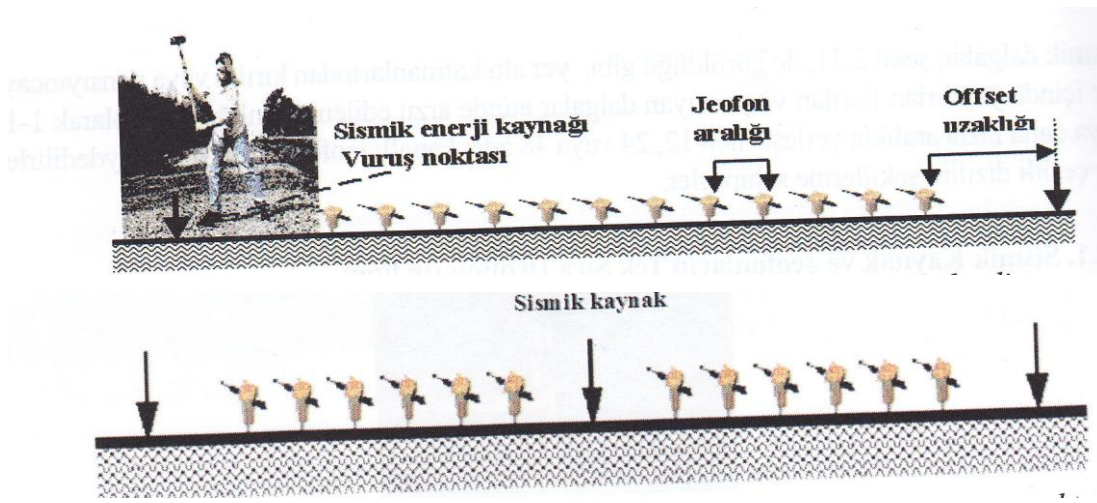
Sismik refleksiyon yöntemi kuyularda dinamit patlatma ile enerji kaynağı oluşturularak ya da patlamalı olmayan kaynak kullanarak (vibroseis) uygulanır. Günümüzde vibroseis yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Her biri 15 ton ağırlığında birden beşe kadar vibratör kullanılır. Bir sıra jeofon vibratörden belli bir mesafede yerleştirilirler. Vibratör jeofonlardan dereceli olarak uzaklaşır, böylece akustik dalgaların yeraltında yansıdıkları nokta da uzaklaşmaktadır.



Şekil 5: Colorado'da bir sismik refleksiyon profili, B1 ve B2 volkanik akıntılar, C akıntı tabanı, D muhtemelen Paleozoyik karbonatlar, Düşeye yakın çizgiler faylanmalar.

Sismik refleksiyon verilerinin elde edilmesi ve değerlendirilme prosedürleri çok gelişmiştir (Şekil 5). Performansı yüksek bilgisayarlara gereksinim duyulur.

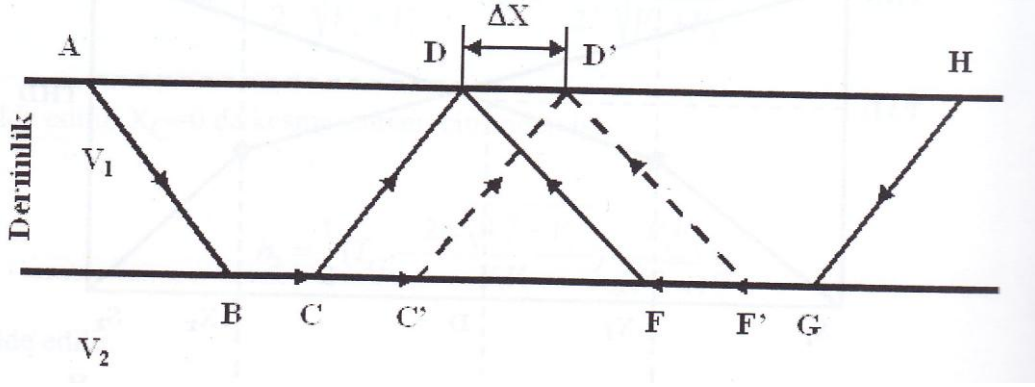
Sismik dalgalar yer altı katmanlarından kırılıp veya yansıyınca kadar yer içinde yayılırlar. Kırılan ve yansıyan dalgalar etütte arzu edilen derinliğe bağlı olarak 1-10 m veya daha fazla aralıkla yerleştirilen 12, 24 veya 48 adet kananlı jeofon dizilimi ile kaydedilirler (Şekil 6).



Şekil 6. Jeofon dizilimleri

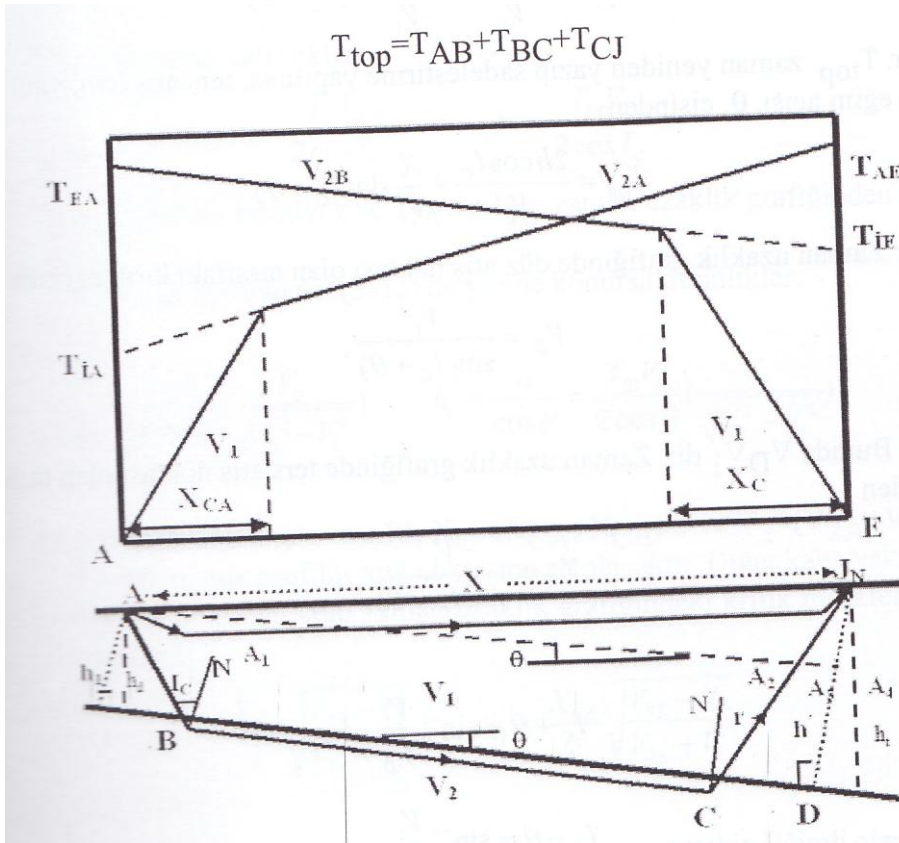
Sismik kırılma yönteminde değerlendirmede ilk adım her bir jeofonda enerjinin ilk varışı için sismik kaynaktan zaman aralığını tayin etmektir.

Farklı iki katmanın yatay olmaları durumunda sismik dalga Şekil 7 deki gibi yayılarak jeofonlara ulaşır. Bu durumda söz konusu ortamın derinlik ve kalınlıkları ve sismik hızları zaman uzaklık grafiğinden aşağıdaki gibi saptanır. Zaman uzaklık grafiklerinden katman hızlarının ve derinliklerinin elde edilmesi işlevine düz (forward) veya direk çözüm denir.



Şekil 7: Yatay tabaka durumunda düz (Forward) çözüm

Money eğimli katmanların çözümü için karşı atışlı bir yöntem önermiştir (Şekil 8).



Şekil 8: Eğimli tabakalar için çözüm

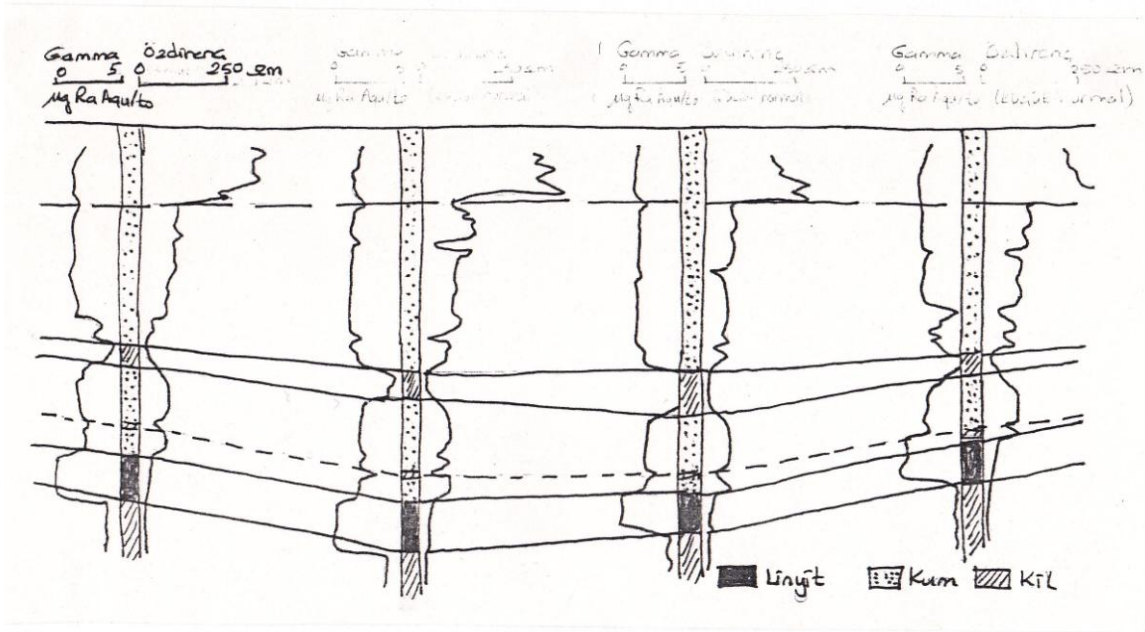
#### 4. Jeofizik kuyu logları ve kuyu yöntemleri

Karotlu ilerlemenin yapılmadığı sondajlarda kırıntılardan kayaçların tanımları ve kesilen birimin stratigrafik istifteki yerinin belirlenmesi oldukça zordur. Ayrıca rotary sondajlarda tabaka

sınırlarının belirlenmesi de yeterince sağlıklı yapılamaz. Açılmış kuyuların içinde su içerikleri de dâhil olmak üzere fiziksel özellikleri ölçülür. Jeoloji verileri ile ölçülen bu fiziksel veriler arasında ilişki kurulduktan sonra, araştırmaların devamında jeofizik kuyu loglarının sağladığı yararlı bilgiler ile karotlu sondajlardan vaz geçilebilir.

Jeofizik kuyu logu ölçümleri için ölçü aleti düzenli bir hız ile kuyu içine indirilir veya kuyu tabanından itibaren yukarı doğru çekilir, bu esnada ölçülen değerler otomatik olarak diyagram şeklinde ve sayısal olarak kaydedilir. Kuyu logları olasıncı kesintisiz olarak alınır. Genelde casing yapılmamış kuyularda alınır.

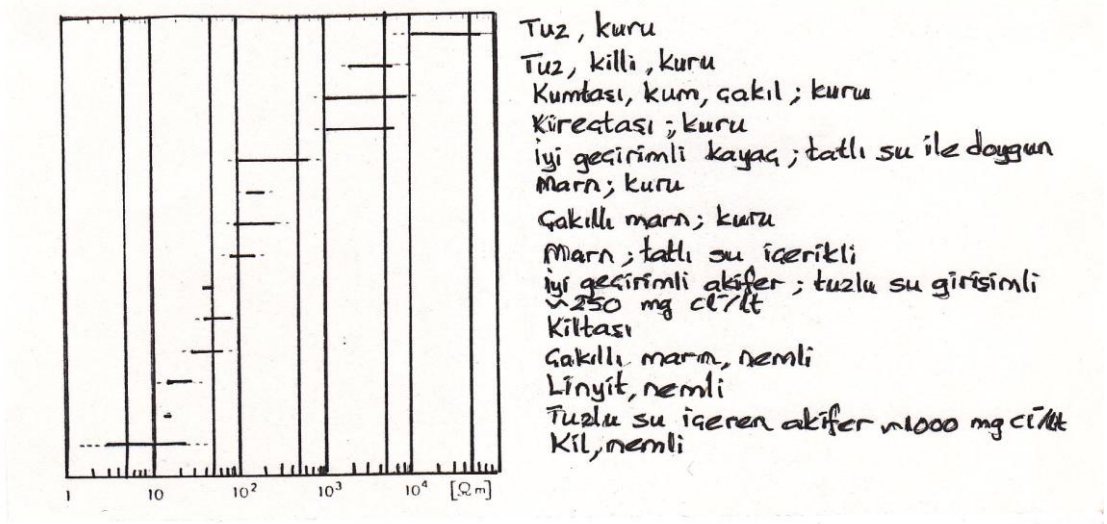
Jeofizik kuyu logları öncelikle sondajların korelasyonunda ve stratigrafik istifin sağlıklı olarak belirlenebilmesi için uygulanır (Şekil 9).



Şekil 9: Çeşitli kuyu loglarının korelasyonu

## SPESİFİK ELEKTRİK DİRENCİNİN ÖLÇÜLMESİ (RES; REZİSTİVİTE LOGU)

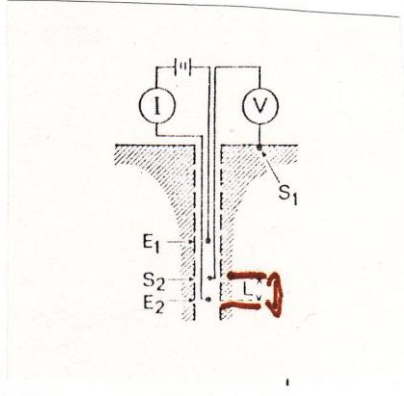
Tüm kuyu logları yöntemleri içinde en kullanışlı ve hidrojeoloji-jeotermal araştırmaları için yararlı olanı elektrik logudur. Deneyimler kayaçların öz dirençlerinin onları en iyi karakterize eden özelliklerden biri olduğunu göstermiştir. Şekil 10'da değişik kayaçların gerçek öz dirençleri görülmektedir.



Şekil 10: Bazı kayaçların gerçek öz dirençleri

Rezistivitenin ölçülmesi; tabaka sınırlarının belirlenmesine ve aynı litolojide yeraltı suyu içeren tabakaların ayırtlanmasına hizmet verir. Tuzlu su içeren bir kum taşının rezistivitesi, tatlı su içeren bir kumtaşının rezistivitesinden daha düşüktür.

Rezistivite ölçümleri sadece techiz edilmemiş kuyularda uygulanabilir. Ölçü prensibi şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11: Rezistivite logu ölçü prensipi

E1 ve E2 elektrotlarından kuyuya, dolayısıyla araziye elektrik uygulanır ve oluşan potansiyel S1 ve S2 sondalarında ölçülür. Hesaplanan rezistivite değeri ölçü aletinin kuyu içindeki düzenli hareketi esnasında otomatik olarak kaydedilir. Bulunan direnç değerleri kayacın cinsine, su içeriğine, kuyu çapına, ölçü kablosunun direncine, sondajda kullanılan sirkülasyon sıvısının cinsine ve ölçü düzenine bağlıdır. Bu nedenle ölçülen değerler görünür özdirenç olarak adlanırlar.

Rezistivite eğrisinin çözümü, yani kaydedilen tabakanın kalınlığı, ölçü düzenindeki L ölçü uzunluğu ile ilişkilidir. Genelde kullanılan ölçü uzunlukları  $L=0.81$  (orta-normal) ve  $L=1.63$  (büyük normal) dir. Ölçü uzunluğu ne denli küçük olursa çözülebilirlik o denli büyük olur, yani hassasiyet artar. Ancak küçük ölçü düzeninde elektriğin nüfus etme yeteneği de azalır ve dolayısıyla kuyu duvarında sondaj esnasında oluşan kek'in bozucu etkisi de artar. Hidrojeoloji araştırmalarında aynı kuyuda genelde hem orta-normal, hem de büyük normal ölçümler alınır.

Kantitatif değerlendirmeler için ARCHIE kayaç özdirenci, porozite ve boşluk içeriği arasındaki ilişkiyi gösteren şu eşitliği önermiştir;

$$\rho = \rho_w / \Phi^m * (s_w^2) \quad F = 1/\Phi^m$$

F - formasyon faktörü; genellikle gözeneklilik ve çimentolanma derecesine bağlıdır.



$\rho$  - kayacın öz direnci

$\rho_w$  - boşluk içeriğinin öz direnci

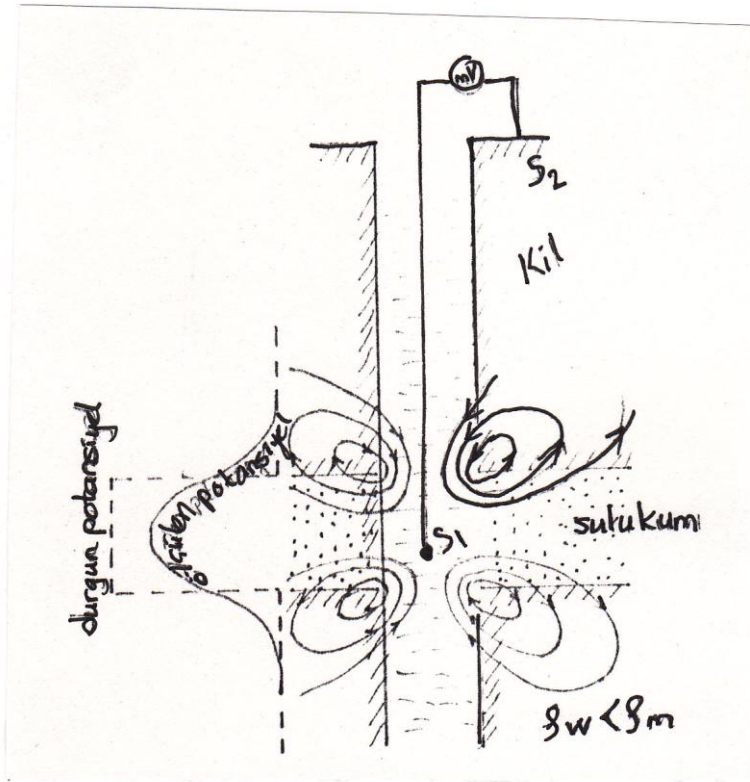
$\Phi$  - porozite

$s_w$  - dođunluk derecesi

$m$  - çimentolanma faktörü (1.3 ve 2.6 arası)

### SELF POTANSİYEL (DOĞAL POTANSİYEL, SPONTANEOUS POTANSİYEL)

Doğal potansiyel dışarıdan elektrik akımı verilmeksizin tabaka sınırlarında ve tabaka-sirkülasyon sıvısı arasında oluşan elektriksel gerilimlerdir. Ölçüm basit olarak, bir tane yüzeyde, bir tane de kuyu içinde hareketli iki elektrot arasındaki potansiyel farkının kaydedilmesi şeklindedir (Şekil 12).



Şekil 12: Bir kuyuda özpotansiyelin oluşumu ve ölçülmesi

SP eğrisindeki oynamalarda o anda geçilen tabakaların özellikleri etken olmuştur. Özellikle gözenekli ve çatlaklı tabakalar diyagramda oldukça belirgindirler. Sp eğrileri, RES eğrileri ve Gamma-Ray eğrileri ile birlikte değerlendirilerek tabaka sınırları net bir şekilde ayırtlanır. Çok anlamlı SP eğrileri, sondaj sirkülasyon sıvısı ile yeraltı suyu arasında yeterince elektriksel iletkenlik farklılığı mevcut olduğunda elde edilebilir.

## GAMMA RAY ÖLÇÜMLERİ (GRL- GAMMA-RAY LOG)

Gamma ışınlarının metallere de nüfus etme özelliği nedeniyle bu ölçümler techiz edilmiş kuyulara da uygulanabilir.

Gamma ışınlarını oluşturan neden radyoaktif element ve izotopların parçalanmalarıdır (örneğin uranyum ve toryumun stabil olmayan parçalanma ürünleri ve 40 atom ağırlıklı K izotopu). Bu tür maddeler kil'de bulunurlar ve bu nedenle bu tür kayaçlar oldukça yüksek gamma ışınları yayma özelliğine sahiptirler (kil, kil taşı, marn, killi-silt vs).

Bu kayaçların dışında mika içeren kumtaşlarında da yüksek değerler elde edilebilir.

Gamma-Ray ölçümleri için kuyu içi sintilometreleri kullanılır. Bu aletlerin yüksek sayma kapasitesine sahip olmaları gerekir.

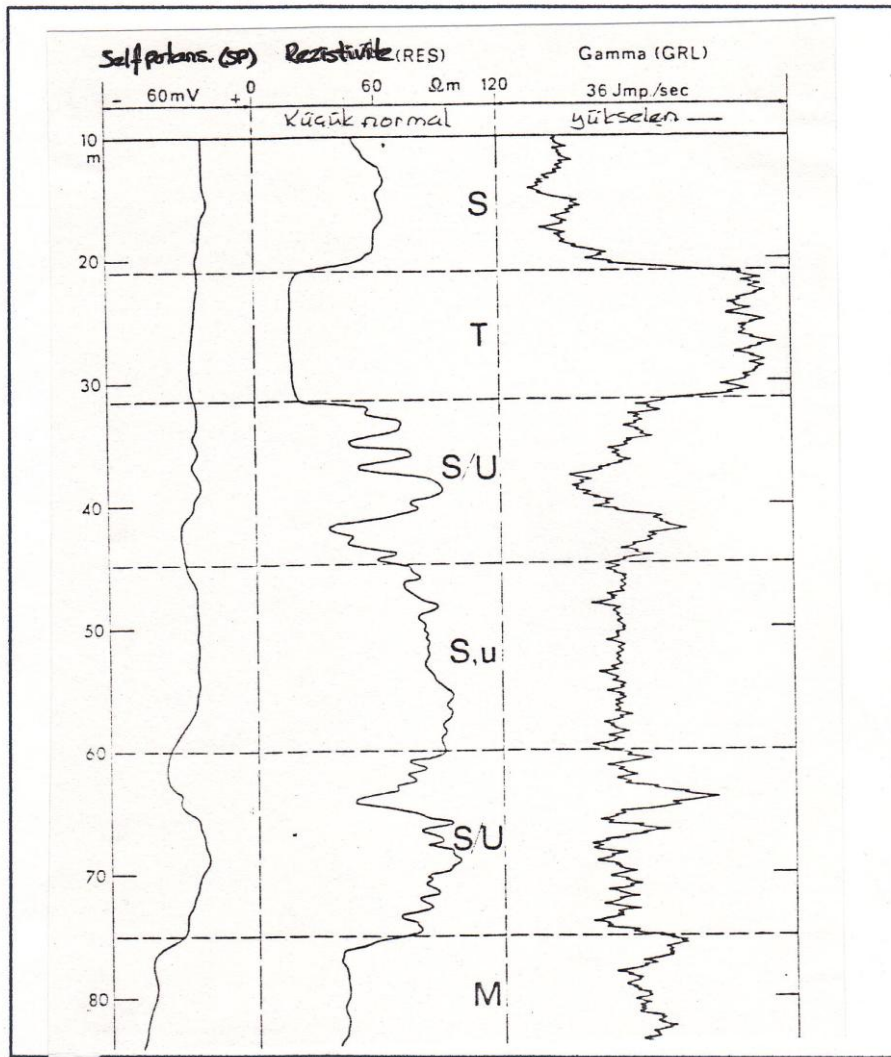
## TEMPERATÜR LOGLARI (T- Log)

Kuyu içi sıcaklık ölçümleri ile özellikle kuyuya su giriş noktaları, düzeyleri (rezervuar seviyeler) belirlenebilir. Temperatur logları techizsiz kuyulara uygulanabilir. Soğuk yeraltı suyu araştırmalarının yanı sıra sıcaksu, jeotermal enerji araştırmalarında, özellikle jeotermal gradyanın belirlenmesi için uygulanırlar.

Yukarıda bahsedilen kuyu loglarının dışında hidrojeoloji araştırmalarında DENSITY-Log (yoğunluk ölçümü), CALIPER-Log (kuyu çapının ölçülmesi) ve SONIC-Log sıkça uygulanan loglardır. Aşağıdaki tabloda değişik kuyu logu yöntemlerinin hangi amaçlı araştırmalarda kullanıldıkları gösterilmiştir.



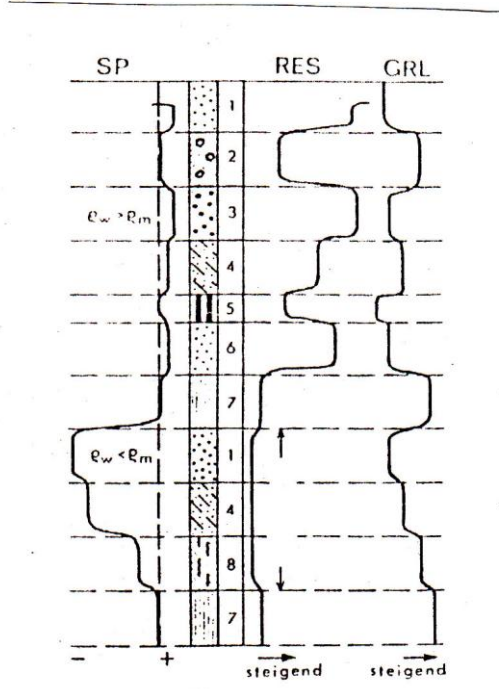
BELIRLENECEK ÖZELLİK	PEKİŞMİŞ techizsiz	KAYAÇLARDA techizli	PEKİŞMEMİŞ techizsiz	KAYAÇLARDA techizli	KUYUDA
Tabaka sınırları	SP, RES,GRL	GRL	SP, RES,	GRL	GRL
Arazi geçirirmliliği	SONIC, CAL				
Kuyuya su girişi	T, CAL				T
Suyun tuzluluğu	SP, RES		SP, RES		
Kuyu çapı	CAL		CAL		



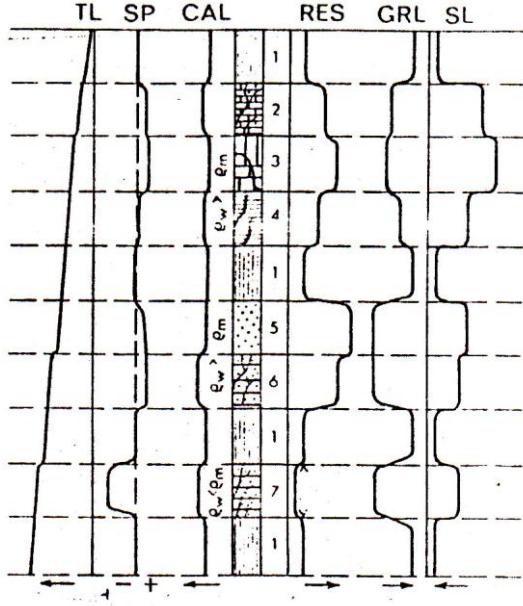
Şekil 13 : Kuyu logu ölçümleri (SP, RES, GAMMA) (Litoloji; S: Kum, T: Kil, S/U : Kum, silt ardalanması, Su: siltli kum, M: Marn)

Şekil 13'te bir kuyudan alınan değişik kuyu loglarının birlikte değerlendirilmesi gösterilmektedir.

Şekil 14 ve 15'de ise değişik logların pekişmiş ve pekişmemiş kayalarda gidişleri şematik olarak gösterilmiştir.



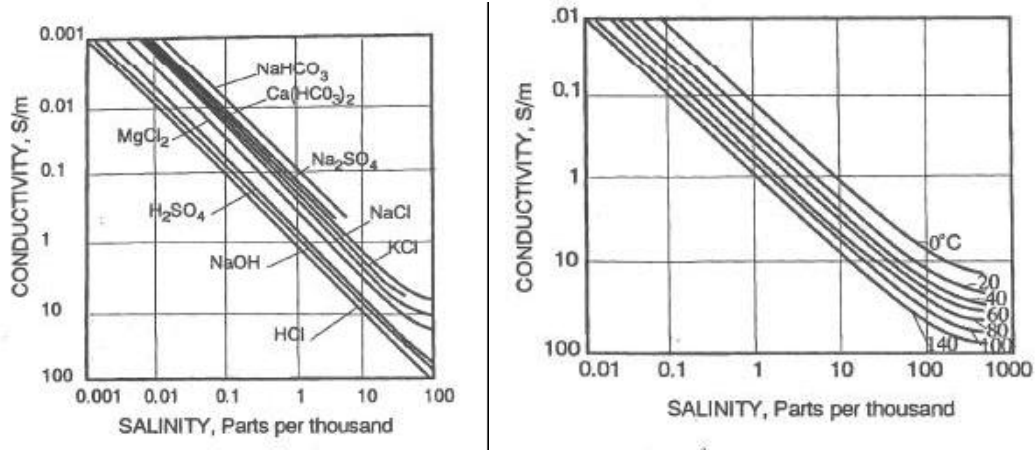
Şekil 14: SP, RES VE GRL Logları (E. GROBA, 1969'dan alınmıştır) (Litoloji: 1:orta kum, 2: Marn, çakıl üçerikli, 3: orta-iri kum, 4: siltli ince kum, 5: Linyit, 6: ince kum, 7: kil, 8: killi silt)



Şekil 15: Değişik logların şematik gösterimi ( E. GROBA, 1969'dan alınmıştır) (Litoloji; 1: kil, 2: killi kireçtaşı, 3: kireçtaşı, 4: Marn, 5: ve 6: değişik boylanmalı kum taşı, 7: tuzlu su içeren kumtaşı)

## 5. Elektrik yöntemleri

Jeotermal araştırmalarda çok sayıda elektrik yöntemleri kullanılmaktadır. Elektrik yöntemlerinde temel ilke sıcaklığın kayacın elektriksel özelliklerini etkilemesidir. Bunun yanında kayaçların iletkenliği sadece sıcaklıktan etkilenmez. Su içeriğinin veya çözülmüş katı madde miktarının artması da iletkenliği arttırmaktadır. (Şekil 16). Her iki fenomen de bazen jeotermal aktivite ile ilgilidir. Bu nedenle normal sıcaklıktaki bir rezervuarı sıcak su içerdiğinde daha iletken olarak görürüz.



Şekil 16. Bir elektrolitin iletkenliğinin tuzluluğa ilişkisi (sol taraf), sıcaklığa bağımlılığı (sağ taraf)

Yeryüzünde normal sıcaklıklarda silikat mineralleri çok düşük iletkenliğe sahiptir, genelde  $10^{-6} \Omega^{-1}m^{-1}$  değerinden küçük. Temperatur arttıkça konduktivitede artıyor, önceleri yavaş sonra mineralin ergime noktasına yaklaştıkça çok daha hızlı. Böyle yüksek konduktiviteler jeotermal araştırmalarda hedef oluşturur, ancak bu tür anomaliler çok büyük derinliklerde oluşacaktır. Tipik jeotermal sistemlerde rezervuarda sıcak jeotermal akışkan içeriğiyle ilişkili olarak elektriksel iletkenlik anomalilerinin bulunması hedeflenir.

Elektromanyetik ölçüm yerin elektriksel iletkenliğinin derinlik ile değişimini belirlemek için yapılır. Elektromanyetik ölçüm yöntemleri doğal-alan yöntemleri (magnetotellürik ve audiomagnetotellürik) ve kontrol edilmiş kaynak indükleme yöntemi (controlled source induction methods), bunun yanı sıra yüksek frekans radyasyon teknikleri örneğin radar probing gibi. Jeotermal araştırmalarda derinlik başlıca hedef olduğundan sadece doğal-kaynak ve kontrollü-kaynak yöntemleri Schlumberger ölçme yöntemi dipol-dipol dizilimi ve bidipol-dipol haritalama yöntemi gibi yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerin her birinin jeotermal aramalarda jeoelektrik yapının ortaya konulmasında kendine özgü bir hedefi vardır.

## 7.1. Doğal Kaynak Yöntemleri

### 7.1.1. Magnetotellürik Yöntem

Magnetotellürik yöntem jeotermal araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde yerin doğal elektromagnetik alanı yerini araştırmak için enerji kaynağı olarak kullanılır. Doğal elektromagnetik alan frekansların çok geniş bir spektrumunu kapsar, bunların içinde çok düşük frekanstaki olanlar onlarca kilometre derinliğin araştırılması için elverişlidirler. Yöntem jeotermal araştırmalarda öncelikle kullanılır çünkü termal uyarılma nedeniyle kayacın konduktif olduğu derinliğı bulmak için elverişlidir. Bu derinlik normal ısı akısı olan sahalarda 50-500 km arasında iken termal alanlarda 10km den az olabilmektedir. Örnek olarak Kaliforniya Geysir sahasında 10 km den az derinlikte konduktif kayalar bu yöntem ile bulunmuştur.

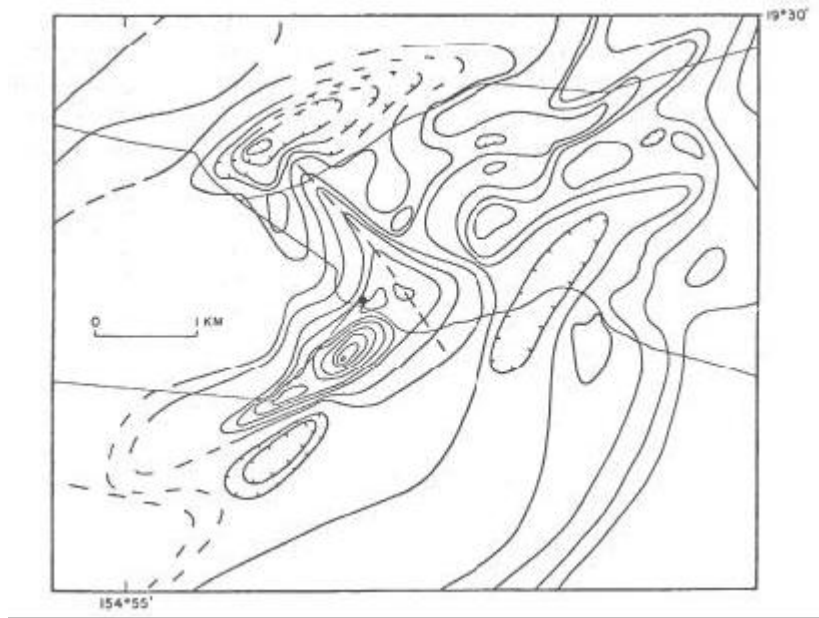
### 7.1.2. Öz (Self) Potansiyel Yöntemi

Self(öz) potansiyel ya da spontaneous (kendiliğinden gelen) polarizasyon (SP) ölçümleri elektrik yöntemlerden bir tanesidir fakat self potansiyel ölçümü yapıldığında yer kabuğunda sadece doğal olarak var olan gerilim gradyanı ölçülmektedir, bu nedenle yöntem doğal kaynaklı yöntemlerden biridir. Bu doğal gerilimin çok nedeni vardır, bunlar değışik minerallerin yer altı suyu ile reaksiyonlarıyla oksidasyon ya da redüksiyonundan, değışik kayaç birimlerinde içerilen farklı konsantrasyonlardaki suların ürettiğı Nernst gerilimi ve boşluklardaki taze suyun ince boşluk yapısında hareketlenmeye zorlanması sırasında boşluk duvarlarından iyonların ayrılmasıyla oluşan streaming (akış) potansiyelinden kaynaklanır. Bu yöntem maden aramalarında yaygın olarak kullanıldığı gibi kuyu loglarında da tuzlu boşluk suyunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Jeotermal sahalarda çok geniş self-potansiyel anomalileri gözlenmiştir, bu anomaliler muhtemelen termoelektrik etki ile streaming potansiyel (yeraltı suyu hareketi sonucunda oluşan) kombinasyonundan kaynaklanmıştır.

Tüm doğal kaynaklı yöntemlerde polarize olmayan elektrotlar kullanılmaktadır.

SP haritalamalarında iki farklı arazi prosedürü kullanılabilir, tek referans yöntemi ve leap-frog (sıçrama, atlama-kurbağı). Tek referans yönteminde polarize olmayan elektrotlardan bir tanesi bir referans noktasında sabit tutulurken diğeri incelenecek arazide değışik noktalara taşınır. Diğeri yöntemde ise her iki elektrotta incelenecek arazide değışik noktalara taşınmaktadır.

Jeotermal ile ilişkili olarak kuvvetli self-potansiyel anomalilerine bir örnek Hawaii termal alanında yapılan ölçüm verilebilir (Şekil 17).



Şekil 17: Hawaii’de küçük bir alanda yapılmış self-potansiyel haritası. Kontur aralıkları 100mV. İçi dolu daire sondaj lokasyonunu göstermekte.

## 7.2. Yapay Kaynaklı Elektromagnetik Yöntemler

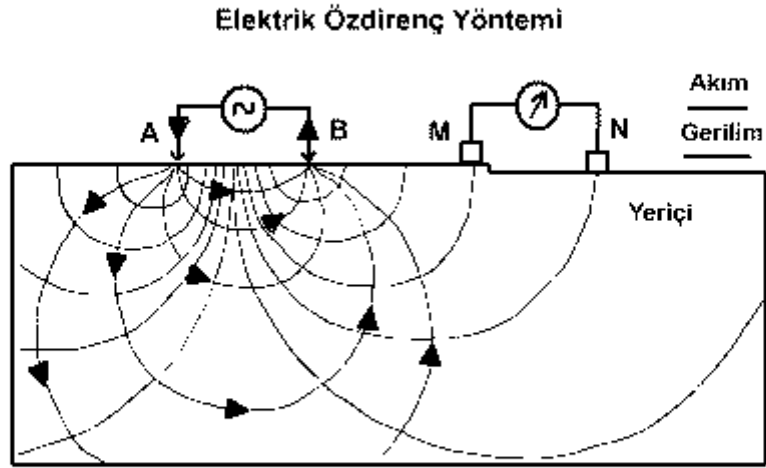
Bu yöntemlerde elektromagnetik (EM) alan oluşturmak için suni kaynak kullanılır.

EM ölçümleri doğal kaynaklı yöntemler ve doğrudan geçerli rezistivite yöntemleri ile karşılaştırıldığında bazı avantajlar ve dezavantajlar gösterir. Bazı EM ölçümleri daha iyi çözümler sağlar, ancak lateral yayılımda daha az kolay dağılım gösterir. Bunun yanı sıra derin araştırmalarda kontrollü kaynaklı EM ölçümleri daha pahalıdır.

## 7.3. Doğru akım yöntemi

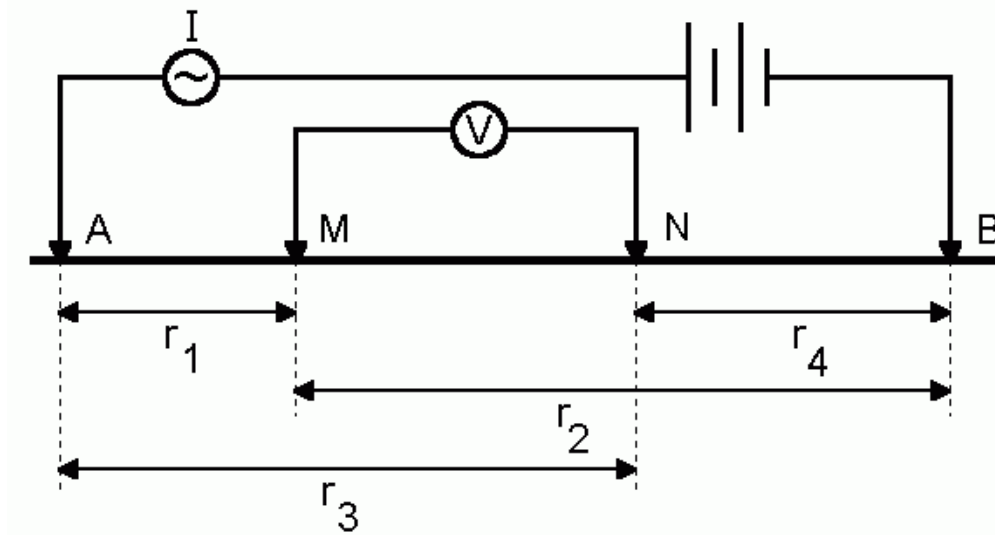
Elektrik yöntemlerde yeryüzünde toprağa çakılan iki paslanmaz metal-çelik elektrot aracılığı ile yerin içine elektrik akımı gönderilir. Yeryüzündeki diğer iki noktada yerleştirilen iki elektrot yardımı ile de oluşan gerilim farkı ölçülür. Şekil 18’ de akım elektrotlarından uygulanan akım

çizgileri dağılımı ve bunun sonucu oluşan elektriksel gerilim (elektriksel potansiyel) çizgilerinin dağılımı görülmektedir.



Şekil 18: Elektrik özdirenç yöntemi

Uygulanan akımın birimi amper ve ölçülen gerilimin birimi ise Volt' tur. Bu ölçü değerleri ve kullanılan elektrot diziliminin **K** geometrik faktörü (dizilim katsayısı) kullanılarak bu ölçü konumu için görünür özdirenç (ohm-m biriminde) hesaplanır. Genel bir elektrot diziliminde yer alan 4-elektrot (**A** ile **B** akım ve **M** ile **N** ise gerilim elektrotları) Şekil 19'da verilmektedir. Yeryüzünde yayılan bu elektrot dizilimi çalışılarak ölçülen **I**-akımı (çoğunlukla miliamper-mA) ve **V**-elektriksel gerilimi (çoğunlukla milivolt-mV) değerleri altta verilen bağıntıda yerlerine konulup hesaplama yapıldığında bu ölçü konumu için elektrik özdirenç ( $\rho_a$  : ohm-m) değeri ( $\rho$ -**m**) elde edilir.



Şekil 19: Elektrik yönteminde kullanılan elektrotlar

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)}$$

Jeoelektrik yöntemlerde yukarıda gösterilen genel dizilim yerine standart ve özel dizilimler tercih edilir.

Bu dizilimlerin Jeolojik problemin türlerine göre kullanım alanı bulunduğunu belirtmek gerekir. Örneğin Wenner ve Schlumberger gibi simetrik dizilimler **Düşey Elektrik Sondaj (DES)** tekniğinin uygulanmasında yaygın olarak kullanılır. Yukarıda verilen bu dizilimler aynı zamanda Elektrik Kaydırma (Electrical profiling) tekniğinin uygulanması için tercih edilirler.

Jeolojik malzeme	Elektrik özdirenç $\Omega$ -m
Islak aşırı killi toprak	1- 10
Islak aşırı siltli toprak ve siltli kil	< 10
Islak siltli ve kumlu toprak	10-100
Silt araldanmalı kum ve çakıl	<1000
Kaba kuru kum ve çakıl depozitleri	>1000
Çatlakları ıslak toprakla dolmuş çok kırıklı kayaç	100



Çatlakları kuru kumla dolmuş az çatlaklı kayaç	<1000
Masif ve sağlam olarak oluşmuş kayaç	>1000
<b>Sular</b>	<b>Elektrik özdirence (Ω-m)</b>
Yüzey suları (mağmatik)	0.1-3x10 <sup>3</sup>
Meteorik yüzey suyu	30-10 <sup>3</sup>
Yüzey suları (çökellerde)	10 -10 <sup>2</sup>
Toprak suları	100
Doğal sular (mağmatik kayaçlarda)	9
Doğal sular (çökellerde)	3
Tuzlu sular %3	0.15
<b>Kömürler</b>	<b>Elektrik özdirence (Ω-m)</b>
Çeşitli kömürler	10-10 <sup>11</sup>
Linyit	9-200
<b>Kayaçlar</b>	
Konglomeralar	2x10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>
Kumtaşları	1 - 6.4x10 <sup>8</sup>
Kireçtaşları	50-10 <sup>7</sup>
Dolomit	3.5x10 <sup>2</sup> -5x10 <sup>3</sup>
Marn	3-70
Killer	1-100
Alüvyon ve kumlar	10-800
Petrol kumları	4-800
Granit	3x10 <sup>2</sup> -10 <sup>6</sup>
Diyorit	10 <sup>2</sup> -10 <sup>6</sup>
Andezit	20 -5x10 <sup>7</sup>
Diyabaz	20 -5x10 <sup>7</sup>
Gabro	10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup>
Bazalt	10 -10 <sup>7</sup>

Gnays	$7 \times 10^4 - 3 \times 10^6$
Mermer	$10^2 - 2.5 \times 10^8$
Kuvarsit	$10 - 2 \times 10^8$
Şeyl	$20 - 2 \times 10^3$

### Kayaç Su içeriği ve Elektrik Özdirenç

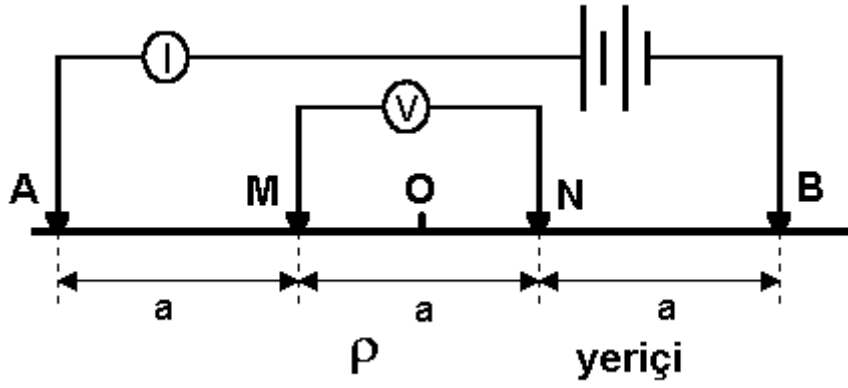
Kayaç ve su içeriği (%)	Elektrik özdirenç ( $\square$ -m)
Silttaşı ( %0.54 H2O)	$1.5 \times 10^4$
Silttaşı ( %0.44 H2O)	$8.4 \times 10^6$
Silttaşı ( %0.33 H2O)	$5.6 \times 10^8$
Kaba taneli kumtaşı ( %0.39 H2O)	$9.6 \times 10^5$
Kaba taneli kumtaşı( %0.18 H2O)	$1 \times 10^8$
Orta taneli kumtaşı ( %1.00 H2O)	$4.2 \times 10^2$
Orta taneli kumtaşı ( %1.67 H2O)	$3.2 \times 10^6$
Arkozik kumtaşı ( %1.26 H2O)	$1 \times 10^3$
Arkozik kumtaşı ( %1.00 H2O)	$1.4 \times 10^3$
Organik kireçtaşı (%11.0 H2O)	$0.6 \times 10^3$
Dolomit (%2.0 H2O)	$5.3 \times 10^3$
Dolomit (%1.3 H2O)	$6 \times 10^3$
Peridotit (%0.1 H2O)	$3 \times 10^3$
Peridotit (%0.03 H2O)	$2 \times 10^4$
Granit (%0.31 H2O)	$4.4 \times 10^3$
Granit (%0.19 H2O)	$1.8 \times 10^6$
Diorit (%0.02 H2O)	$5.8 \times 10^5$
Diorit (%0.0 H2O)	$6 \times 10^6$
Bazalt (%0.95 H2O)	$4 \times 10^4$
Bazalt (%11.0 H2O)	$9 \times 10^5$
Bazalt (%11.0 H2O)	$1.3 \times 10^8$

## Kayaç gözenekliliği (porozite) ve Elektrik anizotropi

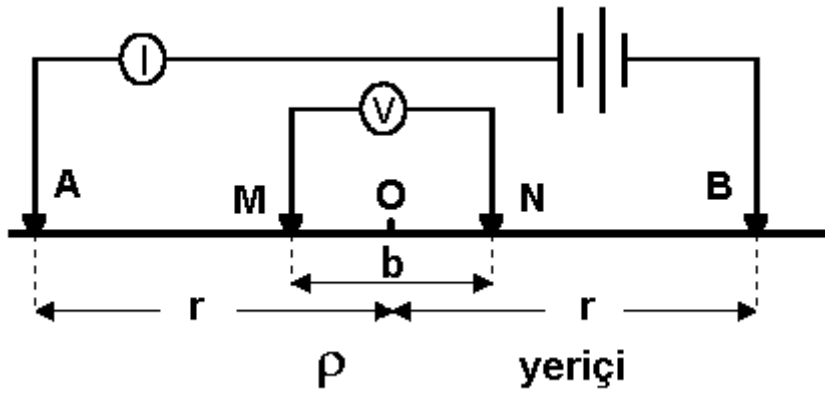
Kayaç	□-Porozite %
Paleozoik kumtaşı ve şeyl	5-30
Paleozoik kireçtaşı	2-10
Paleozoik Volkanik kayaçlar	5-30
Paleozoik sonrası kumtaşı ve şeyl	10-40
Genç derinlik kayaçları	0-10
Kayaçlarda Elektrik Anizotropi (yönbağımlılık) □	
Grafit	2-2.8
Antrasit kömürü	2-2.6
Bitümlü kömür ve çamurtaşı	1.7-2.6
Şeyl ve kumtaşı	1.05-1.15
Şeyl (katman)	1.02-1.05
Kireçtaşı	2-3
Volkanik tüf ve alüvyon	1.02-1.1

DES ölçü tekniğinin amacı yeraltı yatay tabakalaşmanın ortaya konulmasıdır. Bu tekniğin uygulanması ile yeraltı jeolojik katmanların elektrik özdirenç değerleri ve kalınlıkları elde edilir

Bu ölçü tekniğinin uygulandığında arazide bir simetrik elektrot dizilimi (Wenner veya Schlumberger) daha yaygın kullanılır (Şekil 20 ve 21). Bu dizilimlerin merkezi O noktasıdır. Ölçülen görünür özdirenç değerleri bu noktanın altına atanırlar. DES tekniğinde bu merkez noktada yayılı bulunan elektrot dizilimindeki akım ve gerilim elektrotları arası belli bir sistematik içerisinde daha geniş açılarak ölçüler alınır.



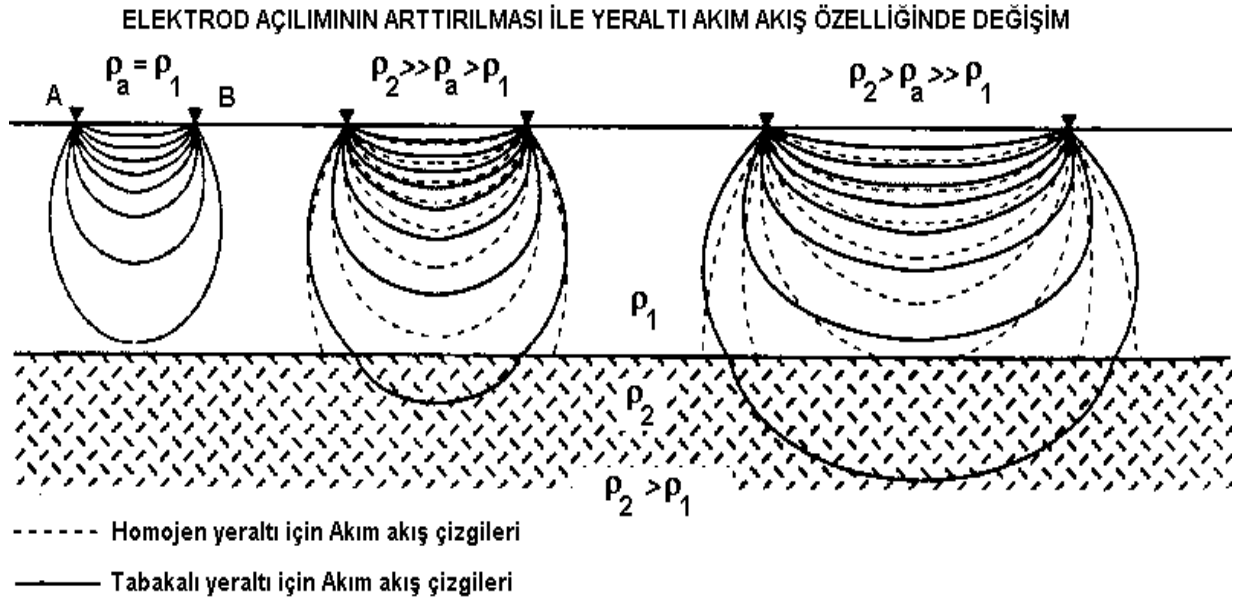
Şekil 20. Wenner elektrot dizilimi



Şekil 21. Schlumberger elektrot dizilimi

Alınan ölçüler elektrot aralığının ( $AB/2$ ) fonksiyonudur. Akım elektrotları (A ve B) aralığının arttırılması yerin daha derin kesimlerine elektrik akımının gönderilmesini sağlayacaktır (Şekil 22). Böylelikle yapılan ölçümler yerin daha derin kesimlerine ait görünür öz direnç bilgilerini ortaya koyar. Elektrot aralığı arttırıldığında yüksek akım yoğunluğu gerekir.

İki tabakalı bir yer modelinde (tek bir ara sınır) yani üst tabakanın elektrik öz direnci alttaki tabakanınkinden ya yüksek veya düşük değerde bulunması koşulunda artan elektrot aralığına karşın yeraltı akım akış şekli farklı gerçekleşir (Şekil 22). Eğer alttaki katman dirençli ise elektrik akımı, artan elektrot genişliğine (artan  $AB/2$ ) bu iki katman sınırına doğru dikleşerek yer içinde akar. Buna karşın, eğer alttaki katman üstteki katmana göre daha iletken ise bu kez yine artan  $AB/2$  için elektrik akımı her iki tabaka sınırına paralel görünümüne yakın olarak akar.



Şekil 22: İki tabakalı yer altı

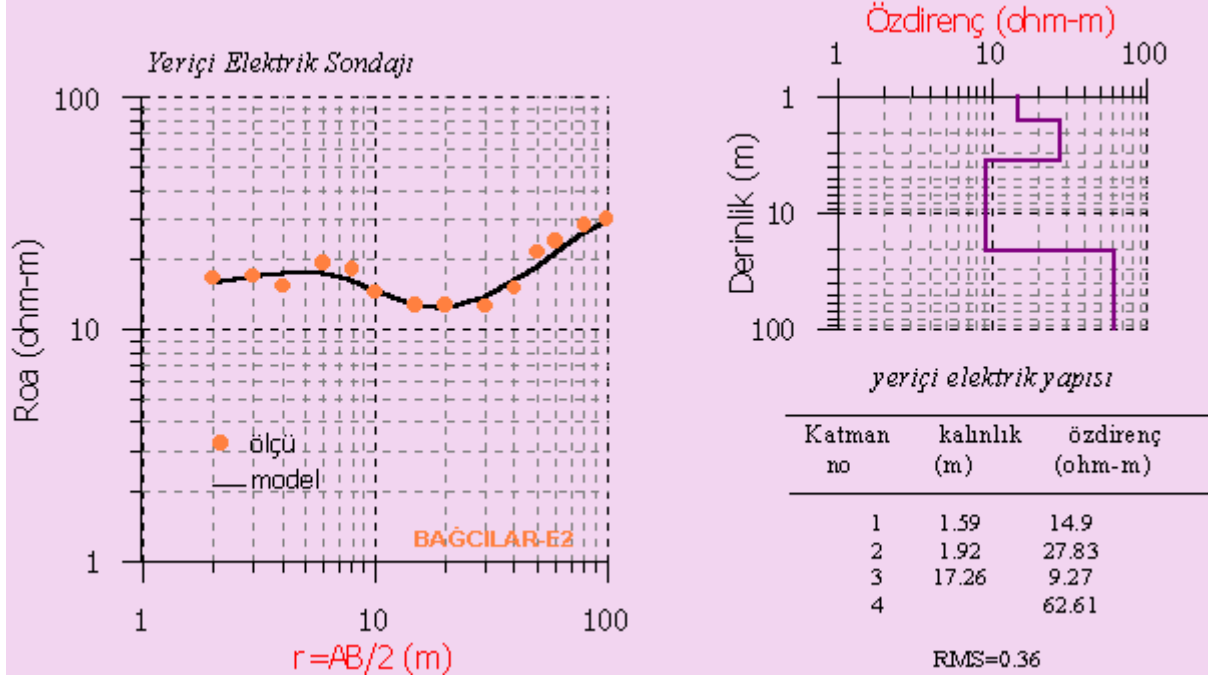
Yukarıda verilen iki tabaka yer modeli örneğinde yeryüzünde ölçülen elektrik öz direnç gerçek olmayıp görünür (apparent) değerdir. Bu değer her iki tabakanın toplamsal bir etkisini yansıtır.

Dipol-Dipol Dizilimde, akım ve gerilim elektrod çiftleri birbirlerinden ayrı olarak arazide yerleştirilir. Her iki çiftin aralarında  $n$  çarpanı ( $n=1, 2, 3$  gibi tamsayı) kadar ( $n \times$  elektrot aralığı) bir uzaklık vardır. Bu dizilim türü daha çok yapay polarizasyon (IP) uygulamalarında tercih edilir.  $n$ -aralıklaşmasına bağlı olarak yapılan çizim tekniği ile elde edilen IP andıran kesitleri uygulamalı jeofizikte başarılı bir uygulamadır

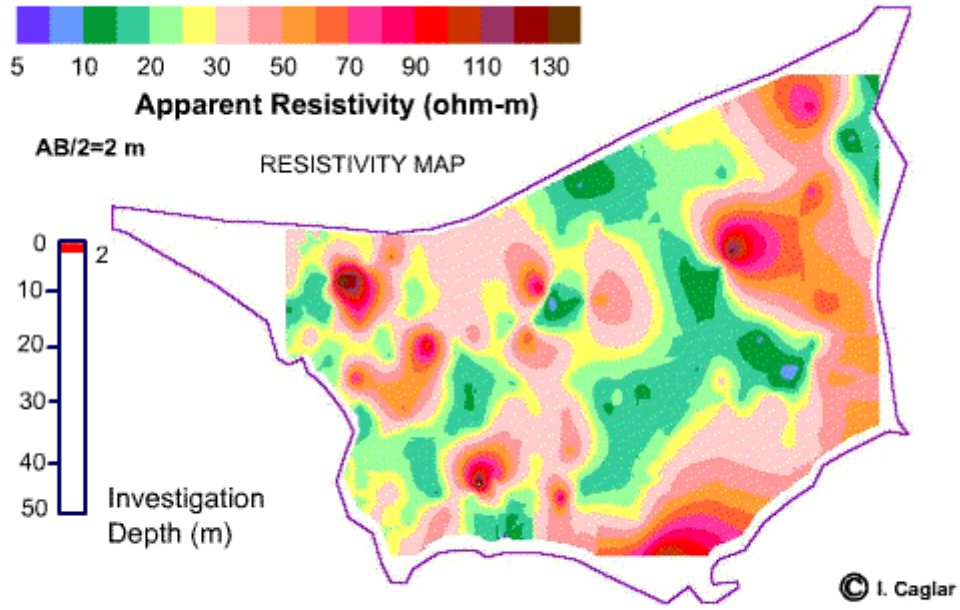
### Veri Değerlendirme ve Görüntüleme

- **Nokta Değerlendirme:** Yukarıda örnekleri verildiği gibi DES arazi verisi çift logaritmik eksen takımında gösterilir. Yatay eksen elektrot aralığı, dikey eksen ise ohm-m birimindedir. Bir DES arazi eğrisi bir takım taslak kuramsal eğri grupları ile planlı şekilde karşılaştırılarak bu DES arazi veri setinin analizi yapılmış olur. Böylece DES noktası altındaki yatay elektrik tabakalaşma modelini açıklayan ve her tabakaya ait olan öz dirençleri ile  $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$  kalınlıkları elde edilir. Bu işleme karşılaştırma ile değerlendirme denir. Elde edilen bu parametreler, bilgisayar yazılımlarına giriş verisi

olarak girilerek benzer analizler yapılır. Altta verilen örnekte DES ölçü verileri kırmızı noktalar ile gösterilmiştir. Bu verilerin bilgisayar yazılımına girilip değerlendirilmesi ile hesaplanan **model** eğri yine arazi verileri ile birlikte aynı grafikte gösterilmiştir. Bu hesaplamalardan bulunan elektrik katmanların parametreleri ve yer modeli de şekilde verilmiştir.



- **Elektrik Haritalar:** Projelendirilen bir sahada seçilmiş çok sayıdaki DES noktaları bazen bu sahayı tamamen karakterize edecek şekilde dağılım göstermiş olabilir. Kısacası ölçü noktaları çalışma sahasının çeşitli yerlerine uygun şekilde konumlandırılmıştır. Böyle bir uygulamada bu çok sayıdaki DES noktalarında ölçülmüş olan eğrilerine ait veriler kullanılarak tüm sahayı elektrik olarak karakterize eden haritalar geliştirilir. Bu amaçla DES noktalarının konumlarının ölçekli olarak yerleştirildiği taslak plan üzerine amaçlanan derinliklere karşılık gelen  $AB/2$  açılımları için  $\rho_a$  değerleri atanır. Her bir noktaya atanan görünür özdirenc değerleri göz önüne alınarak hazırlanan haritalar elektrik harita olarak adlandırılır. Bu işlem amaçlanan  $AB/2$  derinlikleri için gerçekleştirilir. Bu haritalar  $AB/2$  nin artan değerleri için yerin daha derin kesimlerini karakterize eder. Aşağıda verilen arazi örneğinde sahada yaklaşık 250 DES noktası vardır.



## KAYNAKLAR

Aydın, İ.; Maden Arama Jeofiziği Ders Notları, 1.Bölüm, (Gravite-Manyetik) Genişletilmiş, 2.inci Yazım, Ocak 2008-Ankara, 1.nci Yazım, Eylül 2003-Isparta

Çağlar, İ. ; Jeofizik ders notları, İTÜ

Demirel, Z.; Hidrojeoloji ders notları, Mersin Üniversitesi

Hölting, B. Hydrogeologie, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1980

Kaya, M. A., T.C.Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Lisans Ders Notları – I Uygulamalı Jeofizik GRS Aralık - 2006

Keçeli, A., Uygulamalı Jeofizik, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası, No 9