

Makale Gönderim Tarihi: 29.03.2018

Yayına Kabul Tarihi: 23.05.2018

Jeotermal Alanların Değerlendirilmesinde Jeofizik YöntemlerGizem Güzel ALTINSU¹, Tolga BEKLER^{1*}, Lúdvík S. GEORGSSON²¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü² Birleşmiş Milletler Üniversitesi, Jeotermal Eğitim Programı, İzlanda*Sorumlu Yazar: tbekler@comu.edu.tr**Özet**

Jeofizik yöntemler, uygulama aşamasında serbest yüzeyden daha derinliklerde termal akışkanların kimyasal ve jeolojik yapısına göre jeotermal kaynakların araştırılmasında üç temel disipline sahiptir. Elektrik özdirenç, termal yöntemler gibi temel disiplinler jeotermal aktiviteden doğrudan etkilenebilen parametrelerin elde edilmesinde etken role sahiptir. Jeofizik yöntemler ile incelemesi yapılan jeotermal alanlar oldukça karmaşık yapısal özelliklere sahiptir. Bu anlamda çoklu jeofizik yöntemlerin problemin çözümüne tümleşik olarak katkısı oldukça önemlidir. Bu çalışmada özellikle popüler olan yöntemlerin uygulama aşamasında tanımları ve sınırları örneklerle sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal, Jeofizik**Abstract**

Geophysical methods have three main disciplines in the exploration of geothermal resources in application according to the chemical and geological structure of thermal fluids located at free surface to the deeper parts. Those basic disciplines such as resistivity methods and thermal methods are aimed to investigate the parameters that are directly influenced by the geothermal activity. Geothermal areas examining with geophysical methods are naturally complex geological environments. Integration of multiple approaches provides significant contribution to solving the problem. This study aims to make short descriptions of the most popular geophysical methods and examples about their limits and uses.

Keywords: Geothermal, Geophysics

1. Giriş

Jeotermal güç üretimi yüksek üretim maliyetleri paralelinde artmakla beraber hızlı gelişen bir endüstri haline gelmiştir. Bu yüksek maliyetlerin en büyük nedenlerinden biri yeraltı ortamındaki sınırlı bilgiden dolayı saha çalışmalarındaki geniş ölçüdeki risklerdir (Barbier, 2002, Tester ve ark., 2006). Risklerin en aza indirgenmesinde jeotermal kaynağın varlığı, potansiyeli ve yeraltındaki geometrik sınırlarının görüntülenmesinde yapısal parametre uzayına sahip tekniklerin jeofizik yöntemlerin birlikte analizinden faydalanılmaktadır. Jeotermal kaynakların jeofizik yöntemlere verdiği parametre uzayının farklılığının (anomali) araştırılmasında, hazne kaya akışkan içeriği, ısı yayılım farklılıkları, süreksizlik morfolojisi ve derinliği, bu parametreleri doğrudan etkileyen faktörlerdir. Arama amaçlı bu çalışmaların hedefinde; bir jeotermal kaynağın taslağını çıkarmak (delineate), üretim sahasının taslağını çıkarmak, kuyu açmak için artezyen akiferlerinin ve artezyen akiferlerini kontrol eden yapıların yerini saptamak ve/veya jeotermal sistemin genel özelliklerini saptamaktır. Bu hedeflerin en önemli unsuru da kaynağın verimliliğini doğrudan ilgilendiren parametreler olup bunlar; sıcaklık, gözeneklilik, tuzluluk ve basınç değişimleridir. Bu parametrelerin çoğu anomali verebilecek nitelikleri ile doğrudan yada dolaylı olarak jeofizik ölçümlerin hassas olduğu parametreleri ile ilişkilendirilir ve jeotermal sistem ile ilgili önemli bilgi verirler. Bu parametrelerin başında, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, mıknatıslanma, yoğunluk, sismik hız, sismik aktivite, ısı iletkenliği gelmektedir.

Genelde birincil, dolaylı ve yapısal yöntemler arasında bir ayırım yapılır. Birincil yöntemler jeotermal yöntemlerden etkilenen parametreler hakkında bilgi verirken, yapısal yöntemler jeotermal sistemi anlamak için önemli olan jeolojik alanları ve yapıları açığa çıkaran bilgiyi içerir. Birincil yöntemler termal, elektrik özdirenç ve doğal potansiyel uçlaşmaya yönelik yöntemlerini içerirken, yapısal yöntemler manyetik, yerçekimi (gravite) ölçümlerini, aktif sismik ve depremselliğin pasif görüntülemesini içerir. Yüksek ısı üreten kaynaklar ile karşılaştırıldığında düşük ısılı kaynakların araştırılması içinde farklı yöntemler uygulanabilir. Araştırmacıların uyguladığı rutinlerden yola çıkılarak uygulanan yöntemler benzer jeotermal alana rağmen bir ülkeden diğerine farklılık gösterebilir. Ayrıca; farklı yöntemlerin tümleşik analizi modelleme çalışmalarında önemlidir çünkü jeotermal bir sistemi iyi anlayabilmek için gerekli olan bilgiyi genelde tek bir yöntemin bağımsız ve bağımlı parametreleri veremez. Aşağıdaki bölümlerde jeotermal alanların jeofizik araştırmasında kullanılan en önemli yöntemleri kısaca tanımlanmış ve kullanımları üzerine örnekler verilmiştir.

2. Elektrik Yöntemler

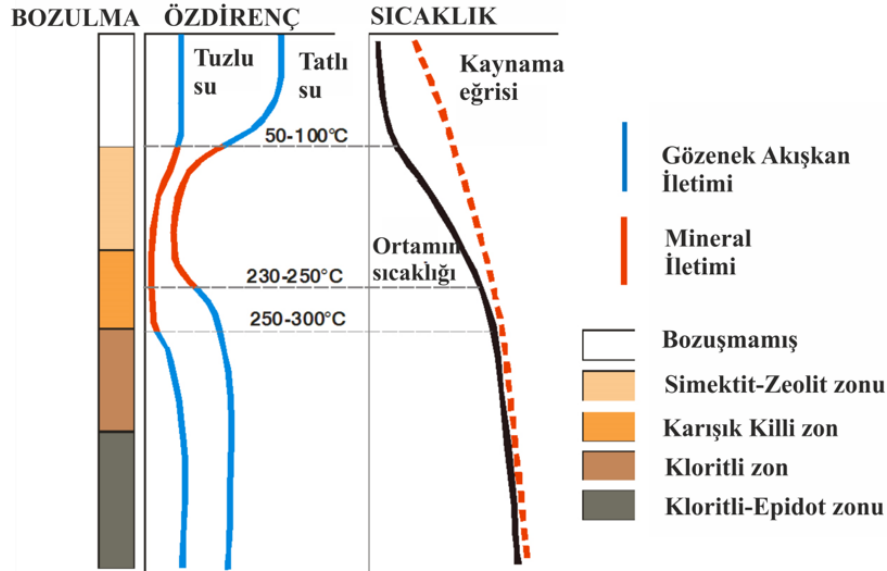
Jeotermal alandaki kayaçların elektrik özdirenç değeri, jeotermal sistemin veya oluşumun özelliklerini yansıtan bir parametredir. Kayaçların elektrik iletkenlikleri jeotermal kaynağın varlığı, uzanımı gibi kuvvetli anomali verebilecek karakteristik özelliklerini belirleyebilmek için oldukça önemlidir. Bu, ayrıca şu olgu ile ilintilidir; kayaçların özdirenci başlıca jeotermal aktivite ile örtüşen parametreler tarafından kontrol edilir. Bu jeotermal aktiviteler;

- Gözeneklilik ve gözenek yapısı ayırımının yapıldığı;
- Sedimanter kayaçlarda olduğu gibi tanecikler arası gözeneklilik,
- Volkanik kayaçların çatlak dokusuna veya soğumasına, gerilmesine bağlı olarak çatlak gözenekliliği,
- Kireçtaşı veya gaz içeriğinin (volkanik magma) çözünmesi ile olan gözeneklilik
- Kayaçların alterasyonu; sıklıkla su kaya etkileşimi ile ilgili olan gözenek duvarlarının sıralanması,
- Gözeneklerdeki akışkanın tuzluluğu,
- Sıcaklık

- Su miktarı örn; doygunluk veya buhar içeriği ve basınç.

Yukarıda sıralanan çatlak (ikincil) gözenekliliği, akışkan değişimi ve tuzluluğu, derecesi jeotermal bir sistemin en temel ve en önemli parametreleridir. Bu, jeotermal bir aramada ve özellikle volkanik bir sahada 'kayaçların özdirenç' parametresinin neden bu kadar önemli olduğunu açıklamaktadır.

Genelde elektrik iletiminin esas olarak birbiriyle bağlantılı ve su dolu gözenekler yoluyla olduğu söylenebilir. Kayaç oluşumu çok genç ise iletim esasen su boyunca olurken, çok iletken özelliklerinden dolayı 50 - 200°C arasında olduğundan, gözenek duvarlarının değişimini belirleyici faktör olabilmektedir. Sudaki akışkan dinamiğinde tekrar mekanizmasını kararlı iletme dayalı taşınmasındaki değişim yerine daha yüksek sıcaklıklarda dirençli alterasyon yer alır. Şekil-1'de alterasyon ve ısı ile su taşıyan kayaçların özdirençinin nasıl değiştiğini özetlemektedir. Düşük özdirençli bir katman içindeki yüksek özdirençli çekirdek yüksek ısı jeotermal sistemler için tipik bir göstergedir ve bu durum yüksek ısılarda şekillenen dirençli alterasyon mineralleri ile ilişkilidir.



Şekil 1. Kayaçların özdirenç, alterasyonu ve sıcaklıkla ilişkilendirilmesi (Árnason ve ark., 2000).

Doğru akım (DC) ölçümleri özdirenç yöntemlerinin bilinen en eski uygulamasıdır, uygulama açısından jeotermal aramalarda kullanılan ve 1950-1980'ler arasındaki rutin yöntemler olarak kabul edilmesine rağmen günümüzde kullanım pratikliği ve model çözümündeki zayıflıklarından dolayı sık uygulanmamaktadır. Ölçüm dizilimi 1 çift akım ve 1 çift potansiyel olmak üzere dört elektrot üzerinden gerçekleştirilir. Ölçüm yerinin morfolojik ve jeolojik şartları yanında hedef derinliği dizilimin konfigürasyonunu etkileyebilmektedir. Bu duruma bağlı olarak dizilimin düşey yönde değişimi (sondaj) veya yatay (profil) olacak şekilde ayarlanması gerekebilmektedir. Düşey elektrik sondajı ve profilleme arasında hedef yapının özdirenç tepkisinin düşeydeki veya yataydaki değişimine bağlı bir ölçüm farklılığı ve buna uygun dizilim dizayn farklılığı söz konusu olabilmektedir. Çok daha yaygın olan düşey elektrik sondajının sabit bir merkezi vardır ve derinlikle özdirenç değişimlerini haritalamak için elektrot mesafelerinin merkezden olan uzaklığı değiştirilerek yer içine verilen akımın oluşturduğu potansiyel farkına bağlı özdirenç değerleri hesaplanır. Profillemede ise elektrot mesafeleri sabitlenir, ve yanal

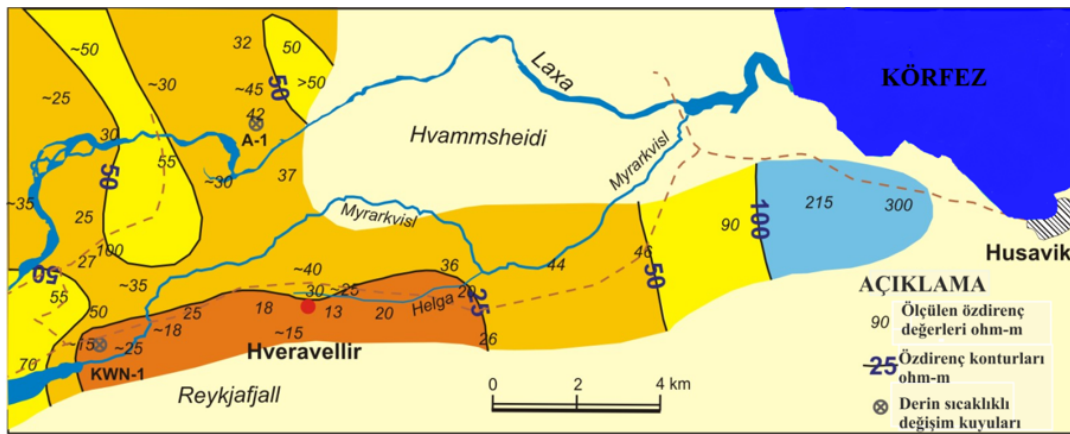
değişimleri haritalamak için tüm profil boyunca hizalanır. Jeotermal aramalarda en yaygın yapılandırmalar;

- En çok kullanılan dizilim türü olan Schlumberger düşey elektrik sondajıdır. Elektrotlar bir sıradadır (hizadadır) ve kurulum merkeze yansıtılır. Potansiyel elektrotlar çifti merkeze yakın tutulurken, akım elektrotları çifti kademeli olarak merkezden uzaklaştırılır.
- Çift kutuplu (dipol) düşey elektrik sondajı ve profillemeye; bu profillemeye birçoğu 1970 ve 1980'lerde oldukça yaygın kullanılmış olan çeşitli dizilimler vardır.
- Yüzeyle yakın düşey çatlakları veya fayları tespit etmek için olan doğrudan profillemeye kullanılır.

DC derinlik ölçümü yapılan yerler için gerekli ekipman iyi bir akım üreticisi, hassas bir potansiyel-voltaj alıcısı, makara üzerinde kablolar, elektrotlar ve bir akım (güç) kaynağıdır. Akım iletimi için pratik ve ekonomik olması açısından akü (12V, 40-60AH) kaynak olarak ölçümlerde tercih edilir.

Yerkürenin tekdüze olmaması ve yön bağımlı olması nedeni ile kayaçlarının elektriksel özellikleri de yatay ve düşey yönde farklılık gösterebilir. Katmanlı yapılar üzerinde elektrik özdirenç ölçmelerinin temel hedefi, serbest yüzeyde ölçülen gerilim farklılıklarına bakmak, serbest yüzeyin altındaki katman sayısını modellemek, dolayısı ile her katmana ait kalınlık ve elektriksel iletkenliklerinin nasıl değiştiğini belirlemektir. Bu yöntemi uygulamak için yerinin elektrik akımı ile uyarılması ve buna tepki olarak kayaç ortamındaki gerilim oluşması ve bunun kuramsal olarak ölçümü gereklidir. Yöntemin uygulanmasında ölçülen iki nokta arasındaki gerilim farklılığıdır. Serbest yüzeyde belirli bir doğrultu boyunca seçilen bir serime ait dizilimin geometrisine uygun örneğin orta noktasına göre dizilim uçlarına doğru açılım yapılır. Her açılım artırımı için akım geçişine derinlikteki ek bir direnç katılımı ile kayaç tepkisi olacağından yüzeyde ölçülen gerilim özdirençin derinlikle olan değişimini yansıtacaktır. Bu yöntemin bu hali bilinen ve en sık kullanılan dizilimi Schlumberger olup genelde en fazla 1-2 km'lik AB/2 (AB, akım elektrot aralığı) elektrod aralığı akım gücüne göre artırılır. Uzak mesafeler için daha uzun kablolar kullanmak pratikte zor olabilir. Dirençli cisimlerin 1 boyutlu yorumlanması basittir ancak çoğunlukla 2 ve 3 boyutlu yorumlanmaları gereklidir ve çok daha karmaşıktır.

Şekil-2'de Schlumberger dilimine dayanarak deniz seviyesinden 500 m altında özdirenç gösteren Husavik (Kuzey İrlanda) bölgesel özdirenç haritası gösterilmektedir. Hveravellir düşük sıcaklık sahası alanı ile ilişkili düşük özdirenç anomalisi belirgin bir şekilde izlenmektedir.

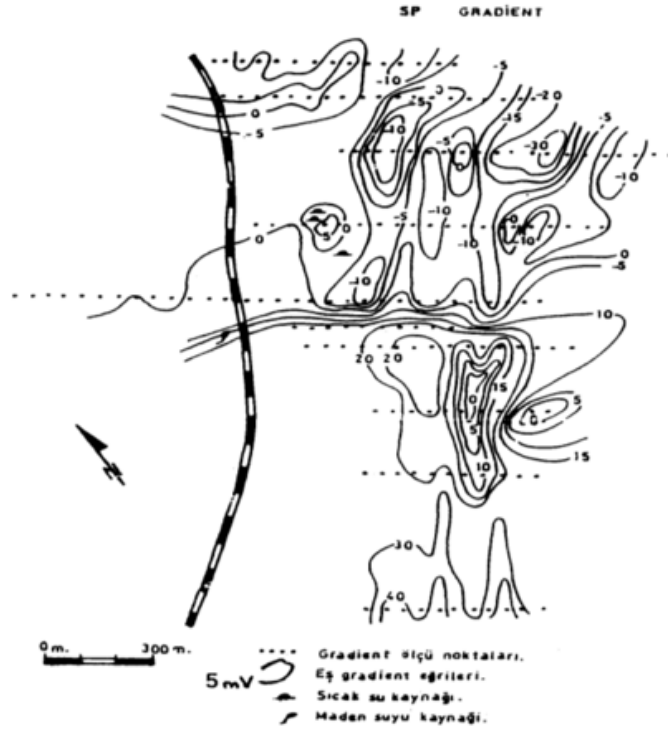


Şekil 2. Hveravellir düşük sıcaklık sahası ile uyumlu düşük rezistivite anomalileri (Georgsson et al., 2005).

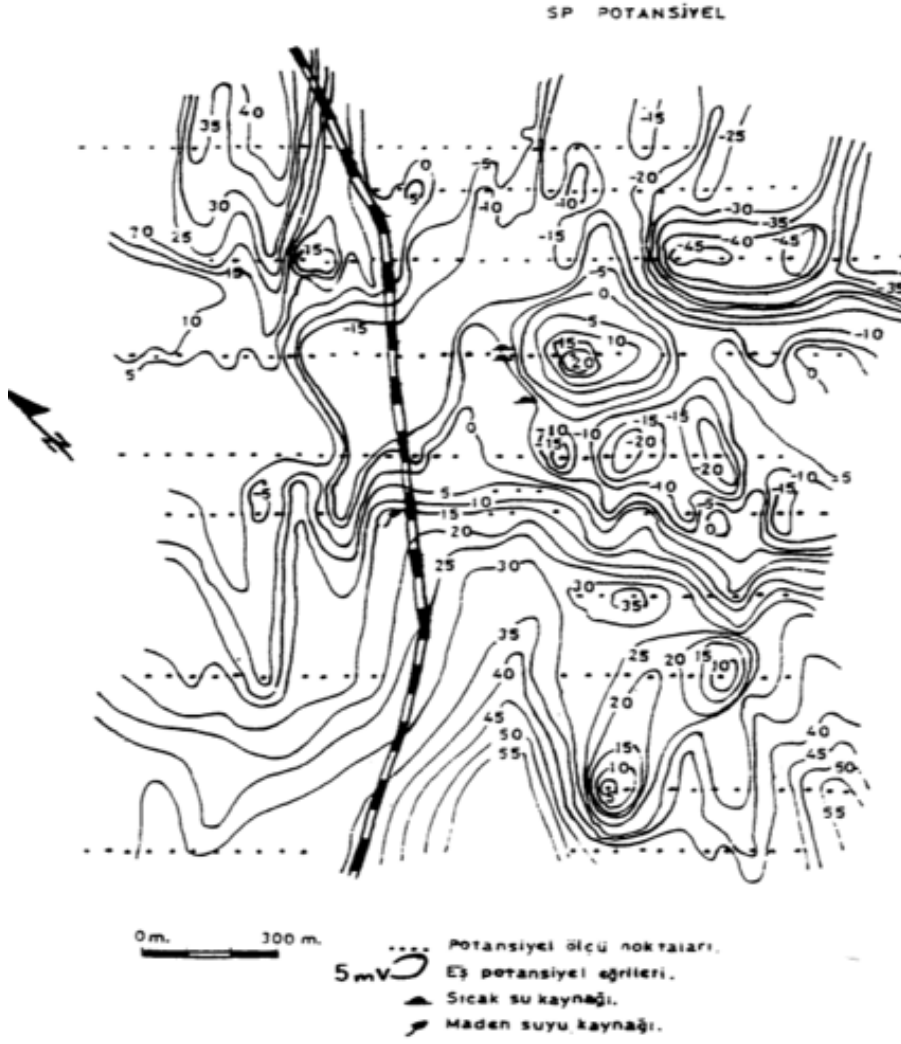
3. SP Ölçümleri:

Doğal potansiyel veya SP (Spontaneous Potential - Self Potential) elektriksel ölçümler, yerkürenin doğal elektrik potansiyelini DC bileşeni ile eşleme amaçlı özel bir yer elektrik oluşum çeşididir. Kapanım şeklinde anlamlı anomaliler jeotermal aktiviteler ile ilişkili olabilmektedir. Anomaliler de sıcaklık farkı; termo-elektrik oluşturma potansiyeli ile ilgili olabilir veya sıcak sıvı ya da soğuk su akışı, fakat aynı zamanda kaya veya gözenek suyu iletken maden veya kimyasal değişimlerini de etkileyebilir. Yöntem güncel olarak jeotermal alanların ortaya çıkarılmasında önemli çıktılara verebilecek niteliklere sahip olmakla beraber ölçülen verinin yorumlanmasının oldukça zor olması nedeni ile kullanımı çok fazla değildir. En önemli uygulamalar jeotermal alan sınırlarının haritalanması ve fay izlerinin belirlenmesine yönelik görüntüleme çalışmalarıdır. Örneğin Japonya'daki bir çalışmada, SP anomalisini veren temel nedenlerden birinin buharlaşma potansiyeli olması nedeni ile sıvı-baskın jeotermal sistemlerin rezervuar görüntülenmesinde bu yöntem kullanımı tercih edilmiştir (Yasukawa ve ark., 2005).

Anadolu'nun tektonik penceresine bakıldığında oldukça aktif fay sistemlerin baskın olduğu görülmektedir. Bu dinamik kuvvetler etkisi altında tektonik çarpışma bölgelerinde genç volkanizma oldukça etkindir ve Alp orojenezi sırasında şiddetli tektonizma geçirmesi, konvektif dinamikler ve buna bağlı olarak yerkabuğunun içine yerleşen magma odaklan jeotermal oluşumlarda etkin faktör olmuştur (Şener ve ark., 1986). Ülkemizde de bu tektonik pencere içerisinde birçok jeotermal alanın ortaya modellenmesinde yararlanılan SP yönteminin uygulandığı bir bölgede Uşak-Banaz jeotermal sahasıdır. Gradyent ve potansiyel ölçümleri ile daha güvenilir SP ölçümlerinden beklenen sıcak su çıkışı olduğu yerlerde değerler pozitif olurken soğuma ile derine dönüşlerin olduğu yerlerde ise negatif değerlere ulaşılacaktır. Şekil-3 (SP, gradyent haritası) ve şekil-4 (SP, potansiyel haritası) de gösterilen her iki haritada da sıcak su kaynaklarının etrafında belirgin kontür kapanımları dikkati çekmektedir (Türker ve ark., 1991)



Şekil 3. SP gradient haritası, Uşak – Banaz (Türker ve ark., 1991)



Şekil 4. SP potansiyel haritası, Uşak – Banaz (Türker ve ark., 1991)

4. MT Ölçümleri:

Manyetotellürik (MT) veya doğal kaynaklı elektromanyetik güç kaynağı olarak dünyanın doğal elektromanyetik alanını kullanır. Değişken doğal manyetik alanı iletken yeryüzünde elektrik akımları doğurur. Düşük frekanslarla daha derin seviyelere ulaşılacak istenmesi sondaj derinliği ile ilgilidir. Böylece, 0.00001 – 10 Hz frekanslar yüksek frekanslar üst tabaka için, 10 - 1000 Hz düşük frekanslar gibi derin yer kabuğu araştırmaları için kullanılır. Yöntemin alt sınıfları;

- MT: 10-5 - 1 Hz
- Duyulabilir (Audio) MT: 1Hz - 5x10⁴ Hz
- Radyo MT: 10⁴ - 10⁶ Hz
- Kaynağı Kontrollü (Controlled Source) AMT, İnsan-yapısı kaynak kullanarak sinyal sağlama.

Bu yöntemin tercih nedeni,

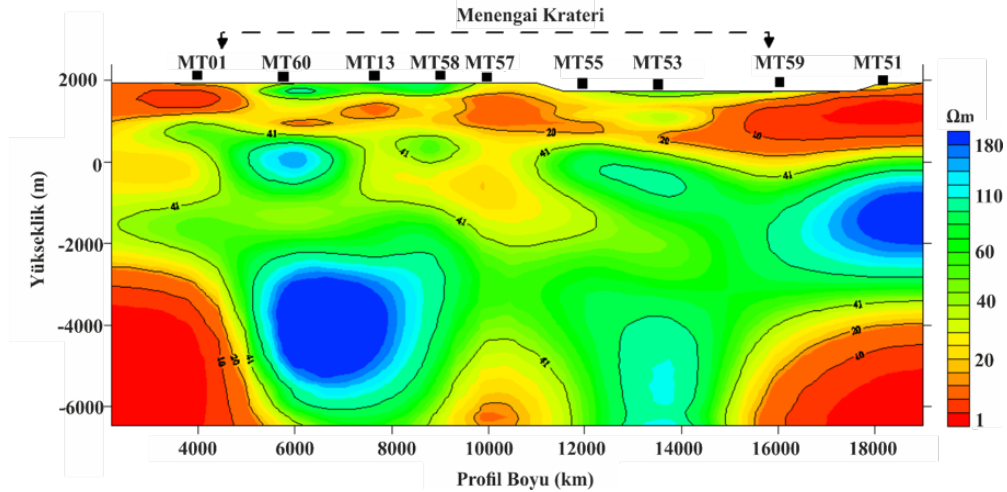
- 1- Derine nüfuz etmesi,
- 2- Sismik yöntemin zayıf kaldığı yerlerde uygulanabilir olmasındandır.

MT' nin amacı: yüzey elektromanyetik empedansından (Z_s) hesaplanan yeraltının (x,y,z) öz direnç dağılımıdır. MT diğer temel elektrik yöntemlerine göre bir avantaj sağlayan derin direnç

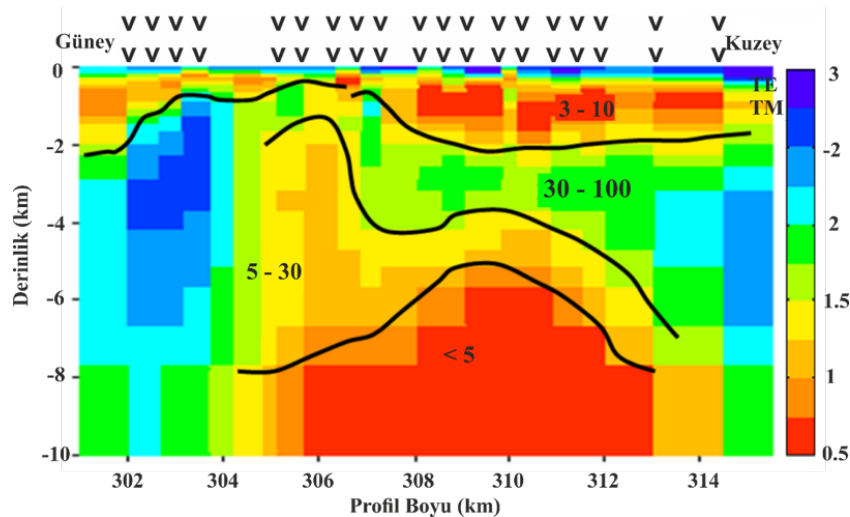
yapıları, tespit etmek için güçlü bir yöntemdir. Ekipmanlar taşınabilir ve veri toplama oldukça basittir. MT ölçümlerine zamanın fonksiyonu olarak manyetik alan bileşeni B ve indüklenen elektrik alan E ölçülür. Ancak MT ölçümleri kültürel gürültülere oldukça duyarlıdır (enerji hatları vb.). Son yıllarda MT ve TEM (Geçici – Transient- Elektromanyetik Yöntem) sıklıkla birlikte kullanılmaktadır. TEM ölçümleri en üst haritalama elde etmek için MT ölçümlerinin yorumlanması ve böylece daha derin bir yüzeyden daha iyi bilgi elde etmek ve derinliğin artırılması amacıyla kullanılan önde gelen yöntemlerden biri olmuştur. Bu şekilde 5-10 km kilometre derinliğe ulaşan jeotermal sistemlerin derin parçalarının direnç dağılımları hakkında güvenilir bilgilere ulaşmak mümkündür.

Şekil 5’da yaklaşık 8 km derinlikteki Kenya’da bulunan Menengai yüksek sıcaklıktaki jeotermal sisteminin MT kesiti gösterilmiştir. Düşük dirençleri, Menengai içerisindeki en üst kilometrelerdeki bir kraterden, daha yüksek dirençler ise daha derin seviyeleri göstermektedir.

Şekil 6’ de Kuzey –İzlanda bulunan yüksek sıcaklıktaki Krafla jeotermal sistemine ait MT kesiti gösterilmiştir. Düşük direnç, yüzey yakın alanları yansıtır, 1-4 km derinliğindeki işletilebilir jeotermal rezervuarı yüksek dirençli alanlardır. Düşük dirençli alanlar ergimiş büyük bir magma kütesini yansıtabilir.



Şekil 5. Yüksek sıcaklıktaki Menengai alanından ve Kenya rift kraterinden alınan MT kesiti (Wameyo, 2005).



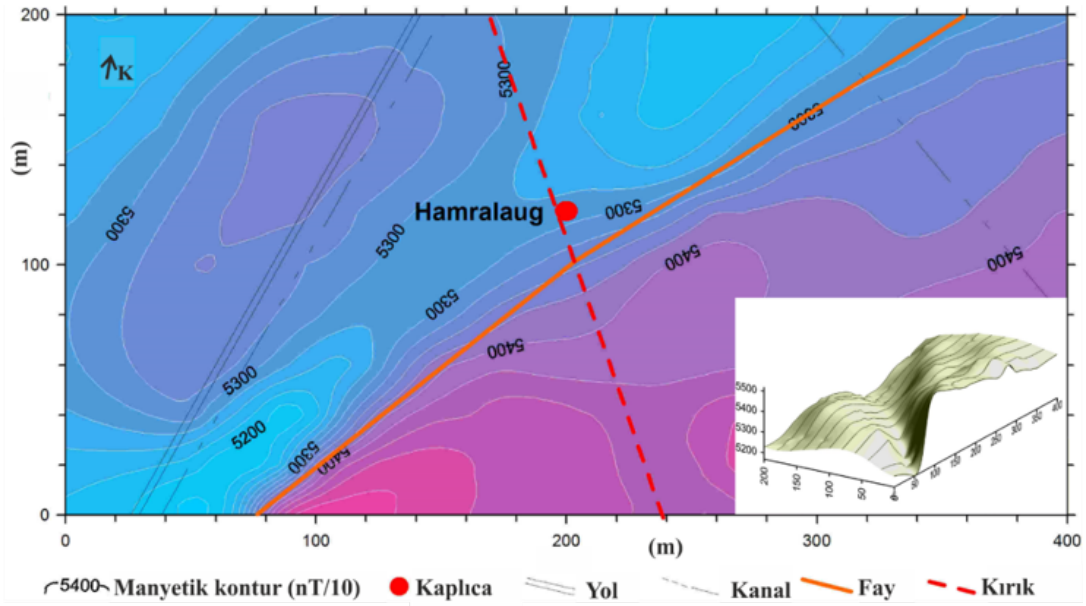
Şekil 6. Kuzey-İzlanda da bulunan yüksek sıcaklıktaki Krafla alanından alınan MT kesiti (Árnason, 2007)

5. Manyetik Yöntemler:

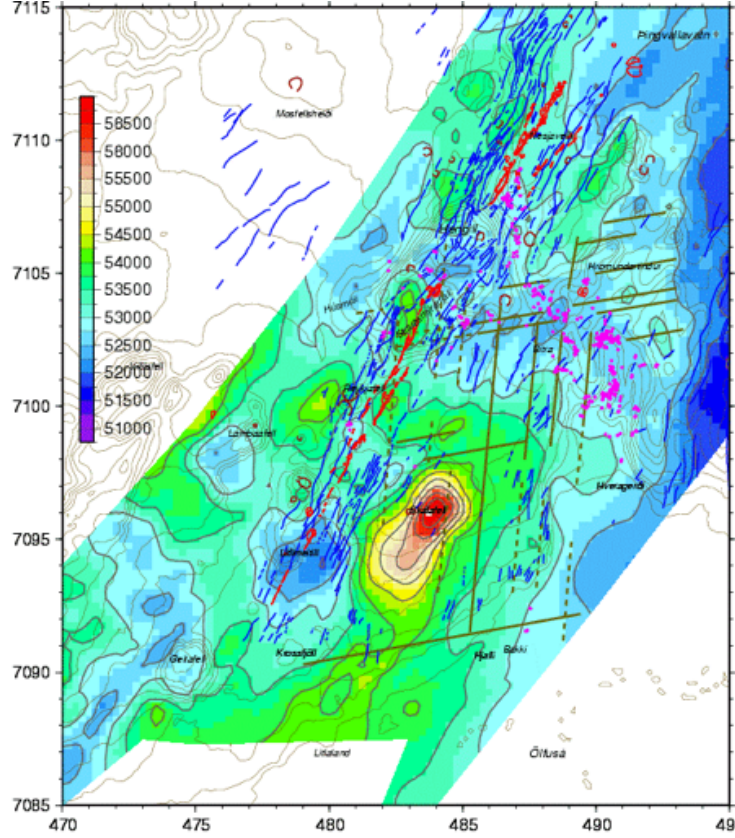
Manyetik yöntem yaygın olarak jeotermal arama ve jeolojik yapıları haritalama, gravite ve sismik kırılma ölçümleri ile birlikte tümleşik olarak kullanılabilir. Kayaçlarda mıknatıslanmanın iki türü vardır:

- İndüklenmiş mıknatıslanma M_i , Dünya'nın manyetik alanıyla aynı yönde olan mıknatıslanma türü
- Kalıcı mıknatıslanma M_p , oluştuğu zamanın özelliklerine bağlı olarak kayacın içindeki baskın mıknatıslanma özelliğidir, genellikle magmatik kayaçlarda baskındır.

Manyetik anomali yerel ya da bölgesel bir bozulma ile mıknatıslanmadaki bir değişiklik nedeniyle oluşur. Etkili mıknatıslanma anomalisi ile kütlelerin şekli, konumu, yaşı, yönü ve büyüklüğü ile karakterize edilebilir. Manyetik alan şiddeti manyetometre ile ölçülür ve manyetik alan şiddeti genellikle γ (gama) veya nT(nanotesla) ile gösterilir. Jeotermal alanlarda, manyetik ölçümler genel olarak gömülü kaynak ve fayları tek tek izleme, bulma ve muhtemel derinliklerini tahmin etmekte kullanılır. Ayrıca indirgenmiş mıknatıslanma alanları termal aktivite nedeniyle bulmakta da bir hedef olabilmektedir. Tali faylar veya çoklu çatlak sistemleri gibi yerel yapılar için ölçümler paralel profiller boyunca bu düzlem üzerinde yapılır (Şekil 7). Ölçümleri eşleme gibi daha büyük anomalileri veya daha derin yapısal unsurları ortaya çıkarmayı amaçlayan çalışmaların niteliği tortul havzalardaki MT profillerinin topoğrafik değişimlerine ve aralığı tercih edilen veri yoğunluğuna dayanır. Bu durumda işlem havadan manyetik ölçümler yoluyla yapılabilmektedir (Şekil 8).



Şekil 7. Batı-İzlanda, Ásgardur jeotermal alanındaki manyetik anomali ve 3 boyutlu yüzey haritası (sol alt) . Ana anomalideki fay için her iki taraftaki kayaçların kendine özgü mıknatıslanma farkı doğacaktır (Ganbat, 2004).



Şekil 8. Hengill bölgesi yüksek sıcaklık alanının manyetik haritası; tektonik hareketler, sıcak su çıkışları, yüksek manyetik şiddeti, buzul çağına ait volkanlar, sıcak noktalar gösterilmiştir (Árnason, 2007).

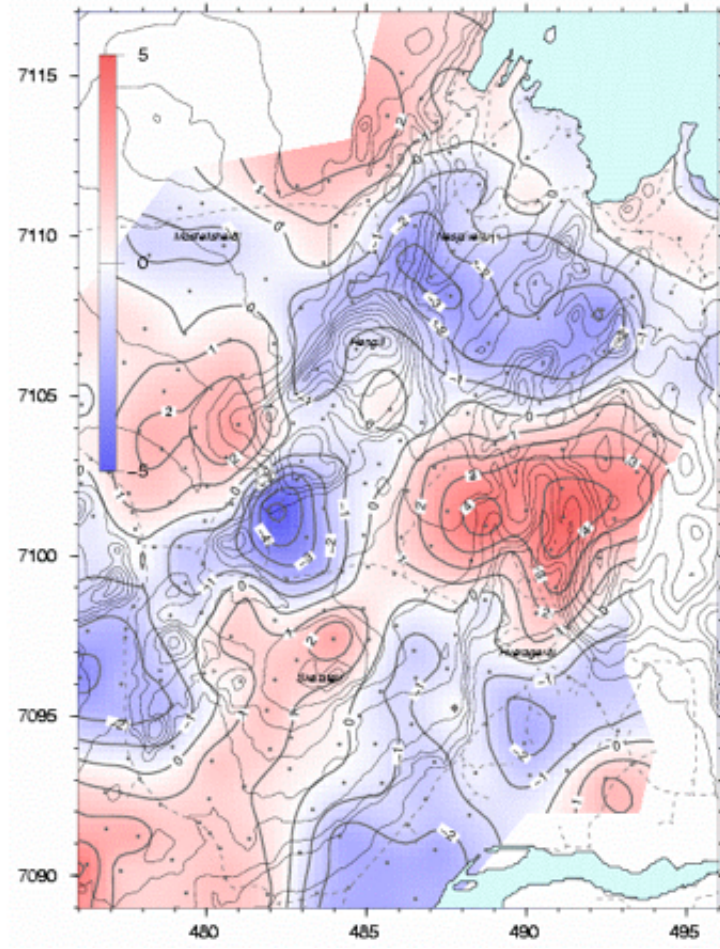
Araştırma yüksekliği için yaklaşık 100m yer üstünde ve 100m aralıklar arasında profil hatları sıklıkla kullanılır buna karşılık topografyanın düşük kotları da etkilenir. Anomalinin doğru yorumlanabilmesinde, kontur veya profil haritalarını ayırt etmek için kullanılan süzgeçler (filtering) oldukça etkilidir.

7. Gravite Ölçümleri:

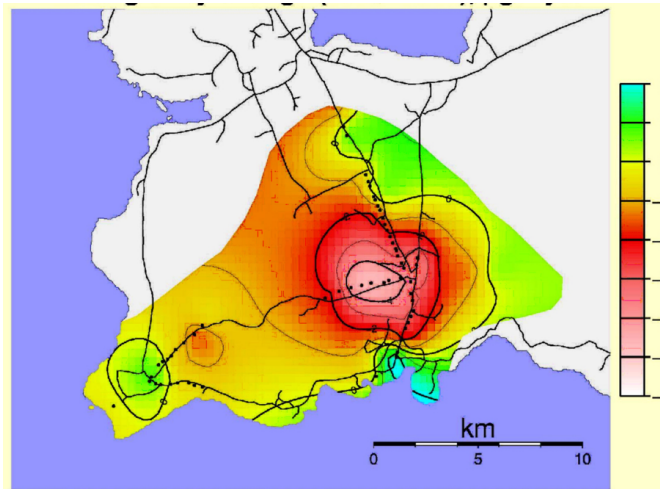
Gravite ölçümleri yeraltındaki yoğunluk farkları ile jeolojik oluşumları tespit etmek için kullanılır. Gravite ölçümlerinde yerçekimi ivmesindeki değişimler ölçülür ve genellikle mgal ya da 10^{-3} cm/s^2 olarak birimlendirilir. Kayaların yoğunluğu, yoğunlukla kaya bileşimi ve gözeneklilik dokusuna bağlıdır ve ayrıca kayaların kısmi doygunluk değerleri de etkileyebilir. Genellikle tortul kayalar kristal kayalara göre yoğunluğu daha azdır. Ham veriye çeşitli faktörlere göre düzeltme uygulanır. Bu düzeltmeler; gelgit etkileri, baza indirgeme, enlem, yükseklik, topografya ve gravimetredeki drift (sapma) düzeltmelerini yapılarak Bouger anomali haritaları oluşturulur.

Veri işlem aşamaları manyetik yöntemle oldukça benzerdir. Ancak, yerçekimi yöntemi teorik yoğunluk dağılımları sonsuz sayıda verilen bir yerçekimi alanı uygun belirsizlik nedeniyle biraz sınırlıdır. Örnek olarak; Bouguer haritasında en büyük kapanımlar Tepetitán şehrinin kuzeyinde 5-9 mgal arasındadır. Ayrıca KB-GD yönlü jeotermal akışlar saptanmıştır. Rezidüel Bouguer haritasında grabenler arasındaki sınırlar belirlenmiştir. 3 km genişliğindeki kuzeydeki mavi negatif anomali bölgesi çöküntünün en çok olduğu yerdir. Jeotermal aramalardaki uygulamalar: tortul kayalarda ve volkanik kayalarda, termal etkenler yüzünden olası bir ısı kaynağı, fay ve dayk sistemleri ve bozulma (alterasyon) /çimentolama ile oluşan katman

derinlik varyasyonlarının haritalanmasıdır. Şekil 9 Hengill bölgesine ait Bouger anomali haritasını göstermektedir. Jeotermal sistemlerde önemli bir ek uygulama ise kütle ayıklama ve izleme için hassas gravite ölçümü kullanımıdır (Şekil 10).



Şekil 9. Yüksek sıcaklıklı Hengill bölgesi Bouger gravite haritası. Yüksek gravite alanları derin seviyelerdeki sokulum alanlarını göstermektedir (Árnason, 2007).



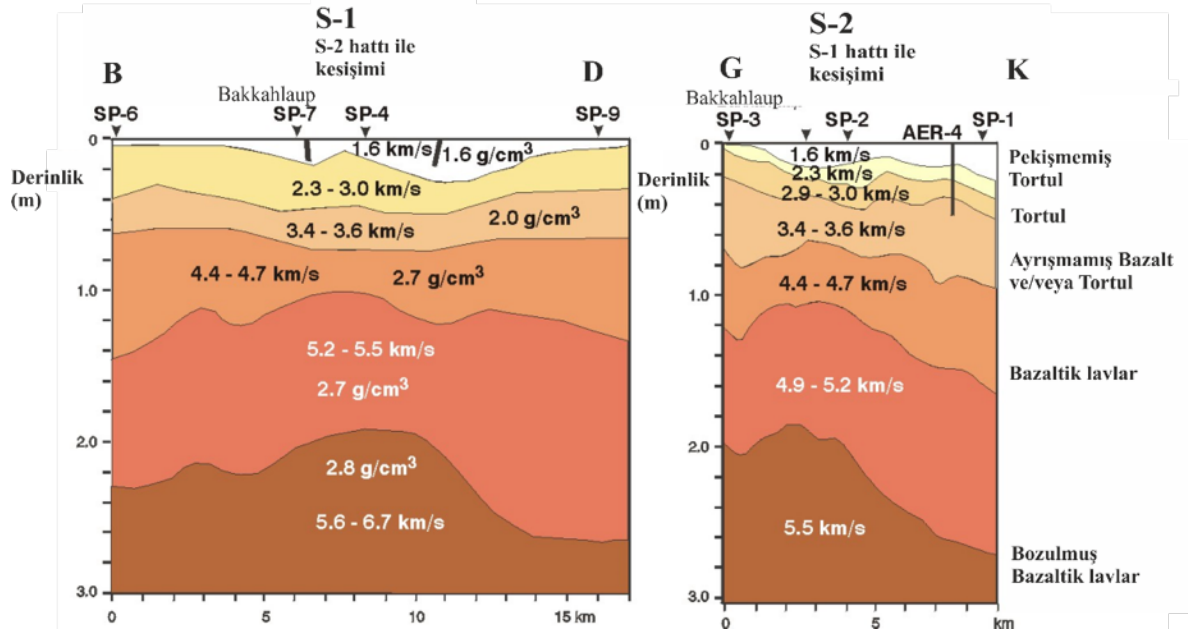
Şekil 10. Svartsengi jeotermal rezervuardaki üretim sonucunda 1975 den 1999 $\mu\text{gal/yılları}$ arasındaki Reykjanes Peninsula dışında, güneybatı-İzlanda'nın ortalama yerçekimi değişimini (azalmasını) gösteren hassas gravite ölçümlerine ait anomali haritası (Eysteinnsson, 2000).

8. Sismik Yöntemler:

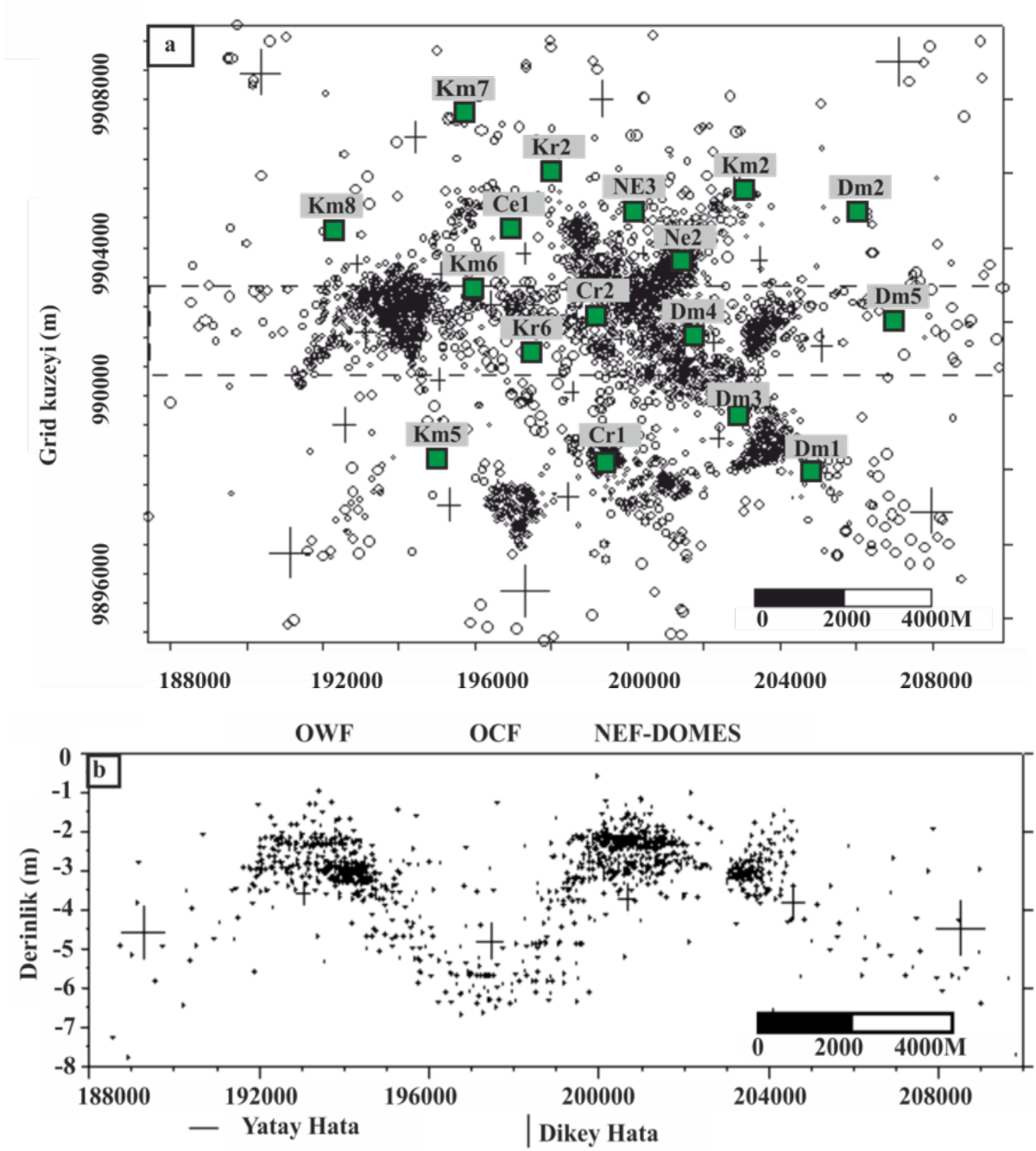
Sismik yöntem, yeryüzünden üretilen ses dalgalarının zayıflamasıyla ses dalgalarının hız dağılımının ölçülmesi prensibine dayanır. Sismik yöntemler yeryüzünde sismik aktiviteyi tespit ve bilgi almak için kullanılır, ses dalgaları, kimyasal patlatmalar veya mekanik elastik dalga üreticileri gibi, jeotermal sistem için etkili olabilecek kaynaklar olarak kullanılır. Sismik yöntemler ile oluşturan elastik dalgalar seyahat ederken farklı hızlara sahip kaya türleri ve/veya oluşumlar arasında elastik dalgalar kırılarak ve yansımaya uğrar. Elastik dalgaların yayılım özelliklerine göre iki türü vardır; P-dalgası veya basınç dalgasında, yayılım doğrultusunda tanecik hareket olurken, S-dalgası veya makaslama dalgasında ise tanecikler hareket yönüne dik doğrultuda hareket ederler. S- dalgası hareketi nedeniyle katılık modülü sıfır olan ortamlara nüfuz etmez.

Sismik ölçümlerde bir ayırım da kırılma ve yansıma ölçümlerinin yöntem fiziksel temeli (Snell ve Fermat ilkeleri) ve çözünürlük yeteneklerine göre yapılır. Aktif ölçümler ile; gözeneklilik, doku, süreksizlik sınırları, içi sıvı dolu bölgeler ve sıcak zon oluşumlarının yoğunluğu hakkında bilgi verir. Başta hidrokarbon olmak üzere jeotermal ve heterojen yapısının görüntülenmesinde kullanılan sismik yansıma donanım ve veri işleme detay ve aşamaları açısından oldukça pahalı olmakla birlikte modelleme çözünürlüğü kalitesi açısından son derece etkindir.

Yüksek sıcaklıklı jeotermal aktivite de ağırlıklı kristalin kayalar karışık yapılar olarak hakim durumdadır ve bu durum genellikle de volkanizma ile ilintilidir. (Şekil 11). Bu yüzden sismik yöntem ile derinlik penetrasyonu ile ilgili bilgiyi elde edebilmek oldukça maliyet gerektirmektedir. Farklı olarak, sismik yöntemlerin hız kontrastları oluşturan ara yüzey tepkilerinin elde edilmesinde etken olması, başta yüksek hızlı birimlerin üzerine örten tortullaşmanın varlığını ortaya çıkarmakta avantajlı olduğu da kaçınılmazdır.



Şekil 11. Kuzeydoğu - İzlanda, Oxarfjordur jeotermal bölgeye ait aktivite; çökelti bir ortamda, kırılma ölçümleri ve gravite ölçümlerine dayalı oluşan katmanlar gösterilmektedir. Yukarı doğru kübelenmesi jeotermal aktiviteden dolayı hızların yükselmesidir (Georgsson ve Fridleifsson, 2000).

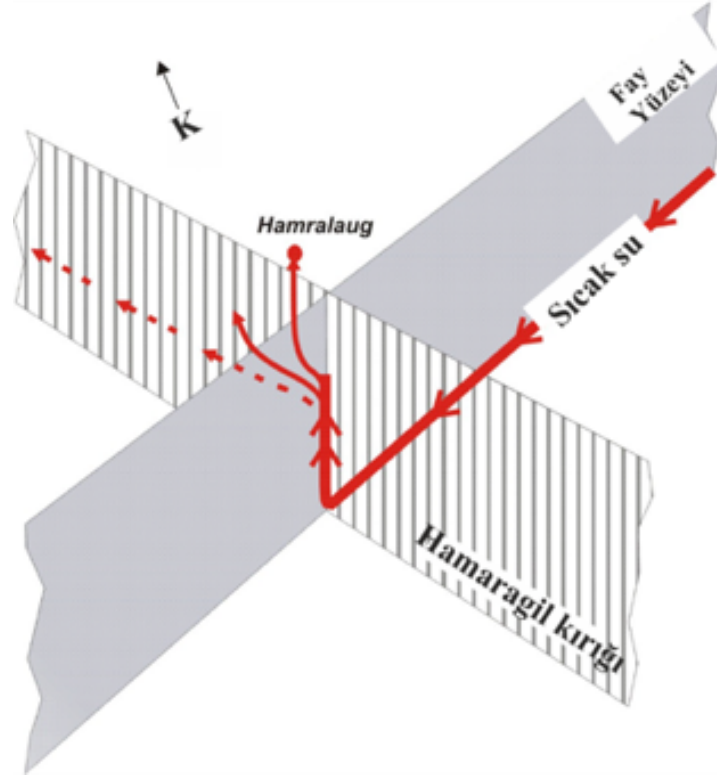


Şekil 12. (a) Kenya'da Olkaria bölgesinde meydana gelen depremlerin episantral dağılımı (b). Alttaki kesitte ana üretim alanları kırılğan/ esnek sınırlar, ısı kaynağı, yüksek ısı ve derinliği gösteren nispeten sıcaklıkların yükselmesi ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Simiyu, 2007).

Pasif yöntemler (sismolojik yöntemler) aktif faylar ve geçirgen bölgeler (makaslama zonları) tanımlamak için ya da derinlik göstergesi kaynak olabilir, kırılğan ve yumuşak kabuk arasındaki sınır, bulmak için doğal mikrodeprem aktivitesi kullanılır. Bu ölçülen bölgedeki jeotermal aktivite anlamak için önemli olabilmektedir (şekil 12). Son olarak, S-dalgası fazı ışın yolları geometrisi ve hız dağılımları magma kökenli kısmi ergime zonlarının yerleri tahmin etmek için kullanılabilir. Bu aşamada düşük hızlı bölgeler akışkan kimyası ile uyumlu jeotermal bir alanın varlığını ortaya koymakta sismik tomografi çalışmaları oldukça belirleyicidir.

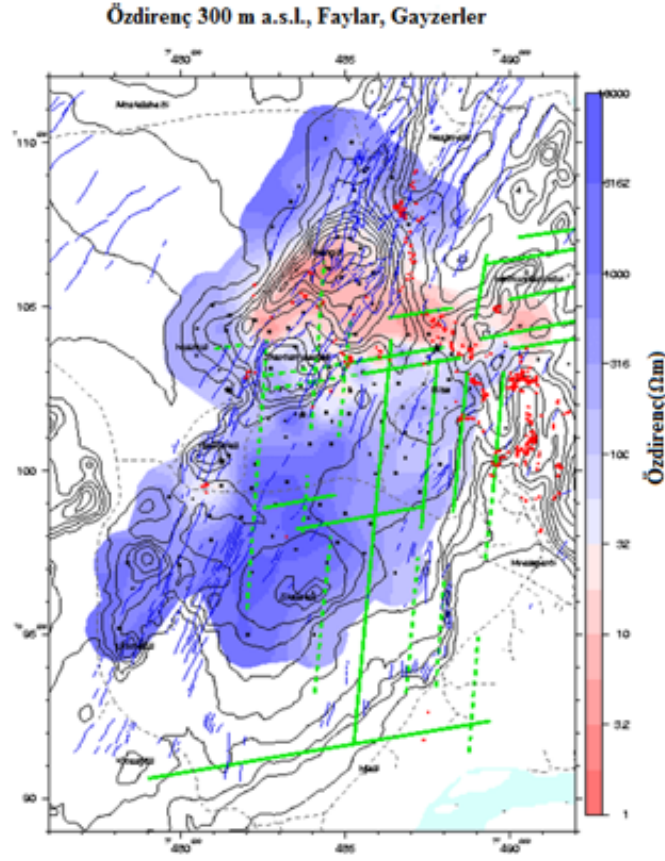
9. Bütünleşik Yöntemler

Jeofizik araştırmalar genellikle yöntemlerin bir kombinasyonuna dayanmaktadır. Bu kombinasyon işlemi jeotermal sistemleri daha iyi modellemek ve yorumlamak için gereklidir. Genel olarak, rutin yöntemler tercih edilmelidir, fakat bunlar yeterli değilse, farklı ve tamamlayıcı yöntemler kullanılabilir ya da doğaçlama yöntemlerin farklı dizilimlerinin de dikkate alınması gerekir. Şekil 13, Şekil 1 'de gösterilen sıcaklık ölçümleri ve Şekil 9'da gösterilen manyetik ölçümlerine dayalı Asgardur jeotermal sisteminin basit bir modeli gösterir. Manyetik ölçümler eşleştirilmiş ve KD-GB uzanımlı fay jeotermal alanın yüksekliklerine doğru su taşıdığını göstermektedir, ancak toprak sıcaklık ölçümleri, kuzeybatı kırığı ile jeotermal alanın kesiştiği noktada yukarı akışı bulunmaktadır.

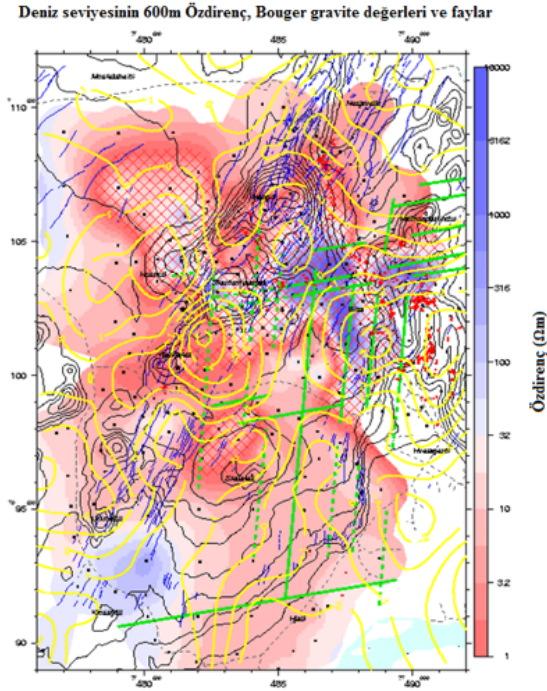


Şekil 13. Toprak sıcaklık ölçümleri ve manyetik ölçüm sonuçlarına göre batı-İzlanda Asgardur düşük sıcaklıklı jeotermal sisteminin basit bir modeli (Ganbat, 2004).

KB-İzlanda Hengill yüksek sıcaklıklı jeotermal alanın, öz direnç lokasyonları ve gravite verisi kombine edilmiştir, aktif faylar ve jeotermal aktivitenin dağılımı hakkında bilgiler şekil 14-15'da ki haritalar ile gösterilmektedir. Haritalar jeotermal sistemin anlaşılması için önemli bilgiler sağlamakla beraber olası yeni üretim alanları ortaya çıkarılmasında etkili olmuştur.



Şekil 14. Özdirenç haritaları, 300 m a.s.l. de ve 600 m b.s.l. de jeotermal aktivite dağılımı ve bir Bouguer gravite haritası ile birlikte aktif faylar üzerinde sismik ölçümler hakkında bilgiler vermektedir. Jeofizik veri bilinen üretim alanları hakkında önemli bilgiler sağlamıştır (Árnason, 2007).



Şekil 15. Özdirenç haritaları, 300 m a.s.l. de ve 600 m b.s.l. de jeotermal aktivite dağılımı ve bir Bouguer gravite haritası ile birlikte aktif faylar üzerinde sismik ölçümler hakkında bilgiler vermektedir. Jeofizik veri bilinen üretim alanları hakkında önemli bilgiler sağlamıştır (Árnason, 2007).

10. Sonuç ve Tartışma

Bir jeotermal sistemde kabuk ve üst kabuk 1-3 km'lik derinlikle sınırlıdır. Jeofizik yöntemlerin seçiminde sadece yöntem parametreleri değil, hedef derinlik ve sondaj seçimi de ön plana çıkacaktır. Araştırmanın amacına uygunluk, yöntem seçimine diğer yöntemler ile olan uyumluluğu ve beraber yorumlanabilir ortak parametrelerin belirlenmesini de gerektirir. Ancak, aynı zamanda doğaçlama ve geleneksel yöntemler gerekli bilgileri sağlayabilecek nitelikte değilse alternatif yöntemleri adapte edebilmek için bilgi ve kapasiteye sahip olmak gerekir. Son olarak jeofizik yöntem sonuçları, jeotermal alanının jeolojisi, jeotermal akışkanların kimyası ve jeotermal sisteminin iyi anlaşılması için bilgilerin bütünleştirilmesi ve varsa uyumluluğu/uyumsuzluğunu ortaya koymak gerekmektedir. Özellikle ekonomik değeri yüksek petrol ve kömür yerine yenilenebilir bir enerji kaynağından sıcak su veya elektrik üretimi aşamalarında yeraltı araştırmalarında jeofizik yöntemlerin uygulanabilirliği sadece bu yöntemlerin model öneri çıktılarını değil, zaman ve ekonomik çıktıların da başarısında kaçınılmaz katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Birleşmiş Millet Üniversitesi bünyesinde jeotermal eğitim programı yöneticisi Lúdvík S. Georgsson tarafından yapılan çalışmanın ağırlıklı olarak derlenmesi sonucu ortaya çıkarılmıştır. Türkiye tarafı yazarları çalışmayı paylaşması ve katkıları sebebi ile Lúdvík S. Georgsson'a içten teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

Barbier, E., 2002. Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3,65.

Árnason, K., Karlsdóttir, R., Eysteinnsson, H., Flóvenz, Ó.G., Gudlaugsson, S.Th., 2000. The resistivity structure of high-temperature geothermal systems in Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan*, 923-928.

Árnason, K., 2007. Geothermal exploration and development of the Hengill high-temperature field (presentation). In: Georgsson, L.S., Holm, D.H., Simiyu, S.M., and Ofwona, C., *Short course II on surface exploration for geothermal resources. UNU-GTP & KenGen, Naivasha, Kenya, UNU-GTP CD SC-05*, 29 s.

Georgsson, L.S., Saemundsson, K., Hjartarson, H., 2005. Exploration and development of the Hveravellir geothermal field, N-Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, CD 10s*.

Eysteinnsson, H., 2000. Elevation and gravity changes at geothermal fields on the Reykjanes Peninsula, SW Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan*, 559-564.

Ganbat, E., 2004. Geothermal investigations at the Ásgardur farm, Reykholtaldalur, W-Iceland. Report 6 in: *Geothermal training in Iceland 2004. UNU-GTP, Iceland*, 83-98.

Georgsson, L.S., Fridleifsson, G.Ó., 2000. The geothermal exploration of the Öxarfjörður high-temperature area, NE-Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan*, 1157-1162.

Simiyu, S.M., 2007. Application of micro seismic methods to geothermal exploration (sunum). In: Georgsson, L.S., Holm, D.H., Simiyu, S.M., Ofwona, C., Short course II on surface exploration for geothermal resources. UNU-GTP & KenGen, Naivasha, Kenya, UNU-GTP CD SC-05, 55 s.

Şener, Ç., Erdoğan R., Özgüler M. E. 1986. Türkiye'deki Jeotermal Alanların Araştırılmasında Jeofizik Çalışmalar. MTA dergisi, 107, 152-168.

Tester, J.W., Anderson, B.J., Batchelor, A.S., Blackwell, D.D., DiPippo, R., Drake E.M. (editörler), 2006. The Future of Geothermal Energy Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States in the 21st century. Prepared by the Massachusetts Institute of Technology, under Idaho National Laboratory Subcontract No. 63 00019 for the U.S. Department of Energy, Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Geothermal Technologies. 358 s.

Türker, A. E., Keçeli, D.A., Kaya, M.A. Kamacı, Z. 1991. Uşak-Banaz Jeotermal Alanının Jeoelektrik Yöntemlerle Araştırılması, Jeofizik, 5, 59-74.

Wameyo, P., 2005. Magnetotelluric and transient electromagnetic methods in geothermal prospecting, with examples from Menengai, Kenya. Report 21 in: Geothermal training in Iceland 2005. UNU-GTP, Iceland, 409-439.

Yasukawa, K., Ishido, T., Kajiwara, T., 2005. Geothermal reservoir characterization by SP monitoring. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 8s.