

# ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖZELLİĞİNE GÖRE YER KABUĞUNUN YAPISI II: FANEROZOYİK KABUK

## CONDUCTIVITY STRUCTURE OF THE EARTH CRUST II: PHANEROZOIC CRUST

*Aysan GÜRER*

I.Ü. Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Böl., 34850 Avcılar - İSTANBUL

### ÖZ

Yer kabuğu, fiziksel özellikleri (elektrik iletkenlik, sismik hız ve yansımaya v.b.) birbirinden farklı olan çeşitli kayaç türlerinden oluşmaktadır. Dolayısıyla, yer kabuğunun gözleyemediğimiz derinliklerindeki iletkenlik değişimlerini haritalamak yerici jeolojisine ilişkin bilgi verecektir. Bu çalışmada, Dünya'nın Fanerozoik yaşlı çeşitli bölgelerinde gözlenen alt kabuk iletkenlik değerlerinin, belirli jeolojik yapılar ve fiziksel koşullar ile ilişkileri (diğer jeofizik bulguların da katkısı ile) araştırılmıştır.

Arazi jeoelektromanyetik ölçmeleri üst kabuktaki kristalin kayaçların yüksek özdirençli olduğunu göstermiş, alt kabukta ise, bölgenin jeolojik yaşına bağlı olarak farklı iletkenlik değerleri gösteren zonların yer aldığını ortaya koymuştur. Fanerozoik (Prekambriyenden güzümme) yaşlı bölgelerde, alt kabuğun üst yüzeyinde genelde yaklaşık 20 km. derinlikte, kalınlığı 10-15 km. olan ve sismik olarak iyi bir yansıtıcı yüzeye sahip çok iletken bir katman saptanmıştır. Deneysel sonuçlara göre arazide gözlenen bu yüksek elektriksel iletkenlik ve iyi sismik yansımaya Fanerozoik yaşlı alt kabuk katmanında su varlığı ile sağlanabilmektedir (Hyndman ve Shearer 1989). Fanerozoik bölgelerdeki bu iletken zon büyük fay hatlarında yüzeye daha yakın derinliklerde ve daha yüksek iletkenlik değerleri ile gözlenmektedir.

**Anahtar Sözcükler:** Yerkabuğu, elektriksel iletkenlik jeolojik yaş (Fanerozoik), jeoelektromanyetik yöntemler.

### ABSTRACT

The Earth's crust consists of various rock types whose physical properties (electrical conductivity, seismic velocity and reflectivity exc.) are different one from another. This feature makes us possible to learn structure of the lower crust by mapping the conductivity variations through the crust. In this study, the relations between geological structure, physical conditions in the lower crust and the observed lower crustal anomalies from various regions of the world in Phanerozoic age is researched by the light of the geoelectrical and the other geophysical findings.

The electromagnetic field measurements, yielded that, the upper crust which is mainly formed by the crystalline rocks is highly resistive. However, the observed resistivity of the lower crust depends on the geological age of the region where the measurements are made. In the Phanerozoic aged regions, a very conductive layer with 10-15 km. thickness at the depth of 20 km. is detected. The deep seismic studies showed that the surface of this layer is also a good reflector. The laboratory measurements on lower crustal rocks showed that the observed electrical conductivity and the seismic reflectivity can be formed by the water in the lower crust (Hyndman and Shearer 1989). This observed crustal conductive layer in the Phanerozoic regions, occurs at the shallower depths with the higher resistivity values in the long fault zones

**Key Words:** Earths' crust, electrical conductivity, geological age (Phanerozoic), geoelectromagnetic methods

### GİRİŞ

Elektromanyetik (EM) yöntemlerle yer kabuğu araştırmalarının amacı, yüzeyden derine doğru yer iletkenlik yapısını saptamak ve bulunan iletkenlik değerlerini, bölgenin derin jeolojik yapısı ile ilişkilendirmektir. Ayrıca, bulunan iletkenlik değerlerinin oluşumunu etkileyecek fiziksel değişkenleri tanımlayarak kabuksal derinliklerde egemen olan fiziksel koşulları kestirebilmektir. Yer kürenin daha çok sayıda bölgesinde EM çalışmalar yapmak ula-

şılan bilginin güvenilirliğini artıracaktır. Dünyada yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar bir kaç sınıflama girişimi dışında genelde dağınık yerel sonuçlar olarak belirmektedir. Jeolojik verilerin ışığında, bu iletkenlik değerlerinin bir sınıflamasına ulaşarak, beklenebilecek sonuçlar hakkında bilgi sahibi olmak, ülkemizde aratarak süren MT araştırmalarının planlanması yönlendirilmesi, sonuçların yorumlanması aşamasında da yarar sağlayacaktır.

Yer kabuğu içinde belirlenen yüksek ve düşük

iletkenlik zonları ile jeoloji arasındaki ilk ilişki bölgenin jeolojik yaşı ve tektoniği arasında gözlenmiştir. Bu ilişkinin bir benzeri, derin sismik çalışmalarından elde edilen yansıma değerleri için de geçerlidir. Alt kabuk araştırmalarında ortak yapılan EM ve sismik profillerin sonuçları, Fanerozoik yaşlı bölgelerde, alt kabuğun elektriksel olarak iletken ve iyi bir sismik yansıtıcı yüzey olduğunu göstermiştir (Jones, 1987). Bu bölgelerde alt kabuk, yaklaşık 20 km. derinlikte yer almaktadır, düşük öz dirençli bu katman genellikle 10 km kalınlığındadır ve öz direnci 3-100 ohm.m arasında değişmekle birlikte, ortalama 20-30 ohm.m öz direnç değerine sahiptir. Dünyanın farklı pek çok bölgesinden alınan arazi gözlemlerinin modellenmesi ile aşağıdaki gibi genel bir elektriksel iletkenlik modeli elde edilmiştir (Jones 1987).

Yeryüzünde çeşitli bölgelerde yapılan derin erimli elektromanyetik ölçmeler ve sismik yansıma profil verilerinin korelasyonu, yer kabuğunun çok basitçe üst ve alt kabuk olarak iki ayrı katmana ayrılabilirliğini göstermiştir. Jones (1987), manyetotellürik (MT) gözlemleri değerlendirerek, Fanerozoik bölgelerde (Prekambriyen sonrası günümüze kadar olan devre), iletkenlik özellikleri bakımından iki katmalı bir alt kabuk yapısı öngörmüş ve üst kabuk katmanı ile birlikte toplam üç katmanlı bir yer kabuğu modeli önermiştir (Şekil 1). Bu modele göre, genellikle yalıtkan (10000 ohm.m) bir üst kabuk ile alt ve üst kabuğu ayıran Conrad süreksizliğinin hemen altında başlayan çok iletken (1-10 ohm.m) alt kabuk gözlenir. Alt kabuğun daha derin seviyeleri ise nispeten daha dirençlidir (100-1000 ohm.m).

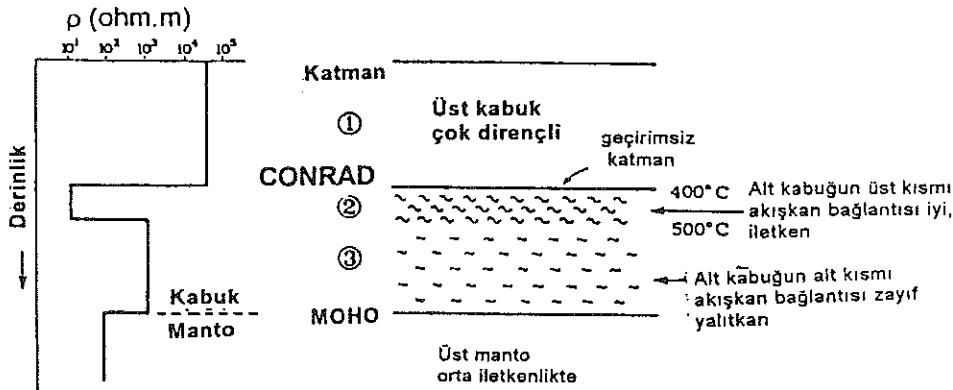
Üst kabuk iletkenliği ise jeolojik yaşa ba-

ğımlı olmaksızın bütün yer küre için dirençli (10000) ohm.m bir yapı sunar. Ancak bazı alanlarda, üst kabuğun birkaç km kalınlıklı çok iletken bir tortul örtü ile kaplandığı da bilinmektedir.

Bu yazıda Fanerozoik yaşlı kabukta, arazi ölçmeleri ile saptanan iletken zonların nedenleri araştırılmıştır. Durağan ve tektonik olarak aktif alanlarda gözlenen iletkenlik anomalileri arasındaki farklılık, kabuk içindeki fiziksel koşullar ve kayaç türleri tartışılmıştır. Kabuk araştırmalarında, diğer jeofizik yöntemlerin jeoelektrik bulgulara birlikte yorumlanmasının önemi belirtilmiştir.

### FANEROZOYİK BÖLGELERDE KABUKSAL İLETKENLİK ZONLARININ OLUŞUM NEDENLERİ

Alt kabuğu temsil eden kuru kayaç örnekleri üzerinde yapılan ilk iletkenlik ölçmeleri, arazide Fanerozoik alanlarda gözlenenden logaritmik olarak üç dört kat yüksek öz direnç değeri vermiştir (Brace 1971). Arazide ölçülen iletkenlik değerlerinin, laboratuvar verilerine göre beklenenden yüksek olması nedeni ile, kabukta gözlenen iletken zon anomalisi olarak tanımlanabilir. Fanerozoik bölgelerde, alt kabukta gözlenen bu yüksek iletkenlikli zon merak uyandırmış ve bir çok jeolojik ve jeofizik araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırmalar sonucunda kuru kayalardaki elektronik iletimin (kayacın katı kısmı üzerinden elektrik iletimi) alt kabuktaki iletkenlik değerlerini sağlayamayacağı belirlenmiştir. Dolayısıyla, alt kabukta gözlenen iletkenlik değerini oluşturacak fiziksel ve petrografik koşulların araştırılması gereklidir. Alt kabukta gözlenen iletken zon, bu derinlikte bulunan grafit, sü-



Şekil 1. Kıtasal kabuk için önerilen genel modeli gösteren şematik diyagram (Jones 1987).

Figure 1. The schematic diagram for the proposed general conductivity model continental crust (after Jones 1987).

fürlü mineral ya da metalik cevherleşmeler tarafından da yaratılabilir. Ancak, kayaçlardaki grafit içeriği bazı özel durumlarda yerel kabuksal iletkenlik anomalilerinden sorumlu görülmekle birlikte, bunun Fanerozoik yaşlı kabuk için genel bir sonuç olmadığı düşünülmektedir (Shankland ve Ander 1983). Yapılan araştırmalar, kayaç iletkenliğini önemli ölçüde değiştiren iki fiziksel değişkenin; sıcaklık ve kayacın tuzlu su içeriğinin, Fanerozoik yaşlı alt kabukta gözlenen iletken zonlardan sorumlu olabileceğini göstermektedir.

### Sıcaklık

1970'li yıllarda, kabuksal iletkenlik anomalilerine alt kabukta hüküm sürdüğü tahmin edilen yüksek sıcaklıkların neden olduğu düşünülmüştür (Adam 1978). Adam (1978), yüzey ısı akısı ölçmelerini kullanarak, Doğu ve Orta Avrupa'da gözlenen kabuksal iletkenlik anomalilerini sınıflamaya çalışmıştır. Şekil 2a'da, dünyanın çeşitli bölgelerinden derlenen EM. indüksiyon çalışmalarından (Adam 1978) elde edilen iletken katmanın üst yüzey derinliği o bölgede ölçülen yüzey ısı akısı değerlerine karşı çizilmiştir. Şekilde bölgesel ısı akısı değerlerine göre iletkenlik anomalilerinin üç farklı derinlikte kümelenildiği görülmektedir. En sıgdaki (40-10 km) ilk iletken katman (İİK) kabuk içersindedir. İkinci orta iletken katman (OİK), 50-150 km derinliktedir ve üst mantoda yer alır. Buradaki yüksek iletkenlik astonosfer katmanına bağlanmıştır. En alt iletken katman (AİK) ise yeryüzünün değişik bölgelerinde 150- 600 km derinlikte gözlenen iletkenlik anomalilerini gösteren bir katmandır. Şekle bakılınca, ilk iki iletkenlik düzeyinin üssel azalan bir bağıntıyla temsil edilebileceği göze çarpmaktadır. Bu bağıntı, Adam (1978) tarafından  $q$  ısı akısı ve  $h_0$  iletken katmanın üst yüzeyine olan derinlik olmak üzere aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$H=h_0q^{-a}$$

| İletken katman | $h_0$ (km) | $a$  |
|----------------|------------|------|
| İİK            | 35         | 1.30 |
| OİK            | 155        | 1.46 |

Adam (1978) İİK ve OİK anomalilerini sırasıyla sıcaklık artışı nedeni ile kabukta ve astonosferde oluşan kısmi ergimelere bağlamıştır. İlk (İİK) ve orta (OİK) iletken katmanların bulunduğu derinlikteki, sıcaklık Pollac ve Chapman (1977) tarafından verilen jeotermier (Şekil 2b) yardımı ile kaba-

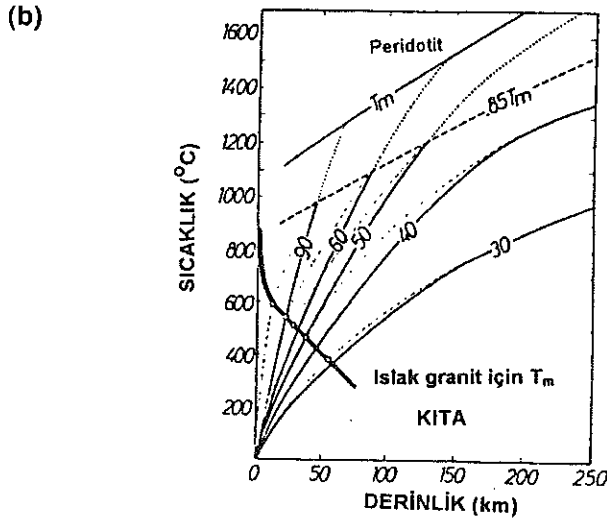
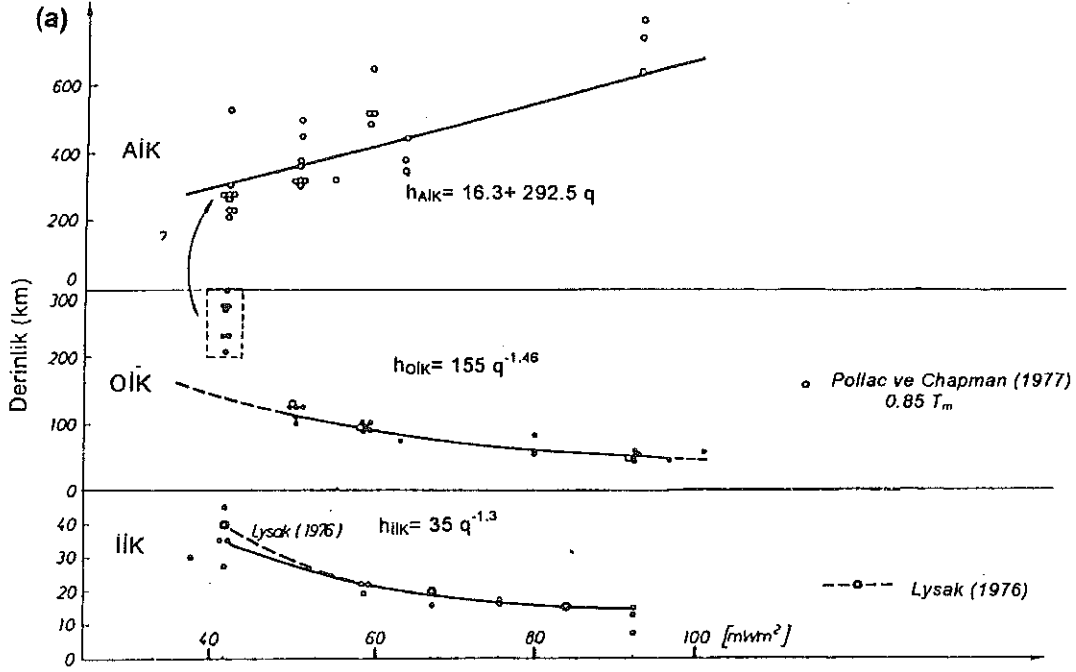
ca hesaplanabilir. Şekil 2b'de granit ergime eğrisi (Feldman 1976) ile ısı akısı jeotermier ilk iletken katmanın (İİK) gözlendiği derinliklerde kesişmektedirler. Bu nedenle, İİK zonunun oluşumu, granitik alt kabuk kayaçlarındaki kısmi ergimeye bağlanmıştır (Adam, 1978). OİK ise üst manto derinliklerinde yer almaktadır ve yer kürenin pek çok bölgesinde, kayaçlar alt kabuk-üst manto sınırında kısmen ergiyerek, astonosfer katmanını oluşturur. Astonosferik derinliklerde beklenen kayaç türü su ve CO<sub>2</sub> gibi akışkanlar içeren peridotidir. Peridotitin içerdiği akışkanlar kayacın ergime sıcaklığını 0.85 kat azaltır. Kuru peridotite ait ergime sıcaklığı-derinlik doğrusunun 0.85 katı alınarak elde edilen derinlik-ergime sıcaklığı doğrusu ve ısı akısı jeotermier yaklaşık olarak orta iletken katmanın yer aldığı derinliklerde kesişmektedir (Şekil 2b). Bu durum, litosferik levhanın tabanında yer alan, OİK'nın astonosferdeki kısmi ergimeye bağlı olarak oluştuğunu düşündürmüştür.

Alt iletken katmanın (AİK) derinliği ile ısı akısı arasındaki ilişki, İİK ve OİK için bulunan üssel değişimden farklıdır ve doğrusaldır. Bu ilişki, aşağıdaki doğrusal ampirik bağıntı ile tanımlanmıştır (Adam 1978).

$$H_{AİK} = 16.3 + 292.5q$$

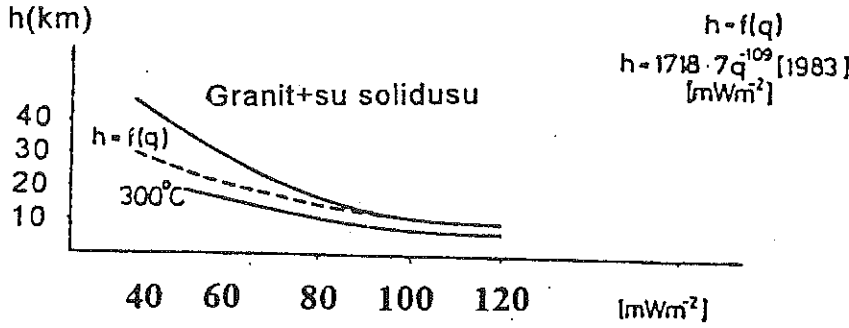
Bu derinlikte gözlenen yüksek iletkenlik değerleri ise, manto içersindeki bir sınırda, mineral türünün değişmesi (olivinin spinele dönüşümü; Ringwood 1976) ile açıklanmıştır (Adam 1978).

Daha sonraki yıllarda elde edilen bulgular, İİK için öne sürülen kabuksal kısmi ergime görüşünün ancak yerel bazı iletkenlik anomalileri için geçerli olabileceğini ortaya koymuştur (Shankland ve Ander 1983). Adam'da (1987), kısmi ergime görüşünü desteklemeyen bazı gözlemleri fark ederek önceki görüşünü irdelemiştir. Şekil 3'de, kabuksal derinliklerde, gözlemsel değerlere en iyi çakışan ampirik  $h(q)$  fonksiyonu (kesikli çizgiler) çizilmiştir. Aynı zamanda, granit + su ergime eğrisine ait ısı akısı ve derinlik ilişkisi şekilde yer amaktadır. Sulu granit ergime eğrisi ile gözlemsel eğri 85 mW m<sup>-2</sup> ve daha yüksek ısı akısı değerlerine ulaşıldıktan sonra çakışmaktadır. Tuzlu suyun çok iyi iletken olduğu bilindiğinden KCl eriğinin en yüksek iletkenlik gösterdiği sıcaklık olan 300°C izoterminine ait derinlik-ısı akısı eğrisi de şekilde eklenmiştir. KCl eğrisi ile gözlemsel eğri arasındaki nitel yakınlık, katı kayaçların gözeneklerinde bulunan su-



Şekil 2. (a) Bölgesel ısı akısı ve iletken katmanın yüzeyine olan derinlik arasındaki ilişkiler, İİK: ilk iletken katman, OİK: Orta iletken katman, AIK: Alt iletken katman. (b) Farklı ısı akısı değerleri için derinlik sıcaklık eğrileri (Chapman ve Pollac 1977) ve üzerlerine sulu granit, peridotit ergime eğrileri çizilmiştir (Adam 1978).  $T_m$  ergime sıcaklığını gösterir. Kesik çizgi Lysak (1976) verilerine göre çizilmiştir.

Figure 2. (a) The connection between the regional heat flow and the depth of the conducting layers for tree different depth range. (b) temperature-depth curves of Pollac and Chapman (1977) and melting curve of peridotite and water bearing granite. (Adam 1978).  $T_m$  melting temperature. The dashed lines shows the data from Lysak (1976), (after Adam 1978).



Şekil 3. Yüzeysel ısı akısının fonksiyonu olarak, granit+su ergime eğrisine karşılık gelen derinlikler (Feldman 1976 ve Chapman ve Pollac 1977), kabuksal iletkenlik katmanı ( $h=f(q)$ ) ve 300°C izotermi için derinlikler (Adam 1987)

Figure 3. The depths corresponding the granite+water solidus as a function of surface heat flow (Feldman 1976, Chapman and Pollac 1977), the crustal conductive layer ( $h=f(q)$ ) and depths for 300°C (Adam 1987).

yun, bu derinliklerde gözlenen iletken zondan sorumlu olabileceğini düşündürmektedir. Dolayısıyla, ilk iletken katman her durumda kısmi ergimeye bağlamanın doğru olmayacağı açıktır, 85-90 mW/m<sup>2</sup> den daha düşük ısı akısı gözlenen bölgelerde kabuksal kısmi ergime beklenmemelidir.

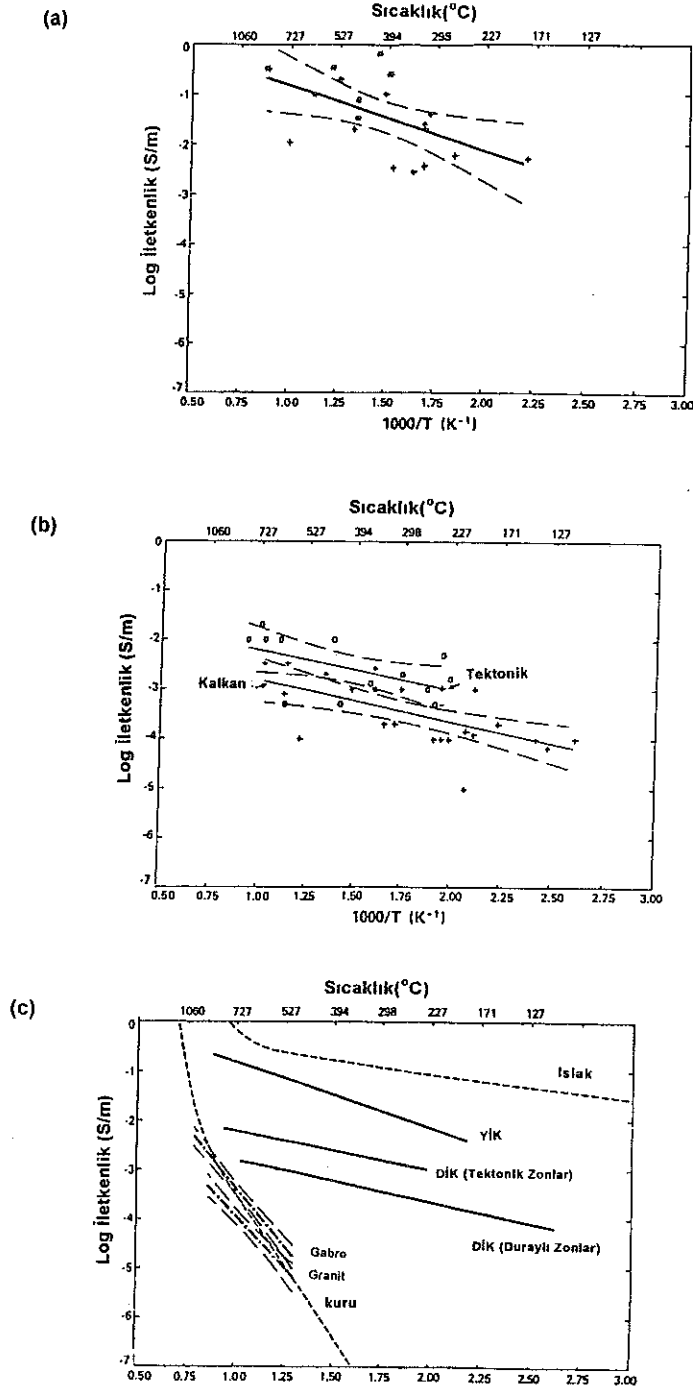
#### Kayaç gözeneklerinde su içerilmesi

Yer yüzünün çeşitli bölgelerinde yapılan MT çalışmalarından elde edilen kabuksal iletkenlik ve ısı akısı ölçmelerinden elde edilen sıcaklık değerlerinin dağılımı incelenerek iletkenlik-sıcaklık ilişkisi araştırılmıştır (Shankland ve Ander 1983). Şekil 4a ve b de yer yüzünde bu bölgelerde kabuk içinde gözlenen iletkenlik değerleri, aynı bölgede gözlenen sıcaklık değerlerine karşı işaretlenmiştir. Ortaya çıkan sıcaklık-iletkenlik dağılımlarını en iyi temsil eden doğrular, sırası ile alt kabuğun iletken ve yalıtkan olduğu durumlar için % 95 güvenilirlik sınırları içinde çizilmiştir. Olheft (1981) laboratuvarında, kuru ve ıslak (%1-2 su içeren) granit örneklerinin sıcaklık iletkenlik davranışlarını ölçmüştür. Elde ettiği eğriler, Şekil 4c'de kesikli çizgilerle ve Şekil 4a ve 4b'de verilen, arazi sıcaklık iletkenlik doğruları ile birlikte gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, durağan ve tektonik olarak etkin zonlarda gözlenen düşük (DİK) ve yüksek (YİK) iletkenlik-sıcaklık doğruların, birbirlerine ve ıslak granit deneySEL eğrisine yaklaşık olarak paralel oldukları görülür. Ayrıca, Şekil 4c'deki laboratuvar sonuçları (Olheft 1981, kesik çizgiler), kabuksal sıcaklıklarda (< 700°C), sıcaklığa bağlı iletkenlik artışının, kayacın su içeriğine bağlı oluşan iletkenlik artışı

yanında çok önemsiz olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, alt kabuk iletkenliğinin sıcaklık değişimlerinden çok, kayaç gözenekleri içerisinde bulunan serbest su ile açıklamanın daha doğru bir yaklaşım olacağını ortaya koymuştur. Arazi iletkenlik-sıcaklık eğrilerinin sulu granit eğrisine paralel olması da gözlenen iletkenlik anomalilerine, kabuktaki su içeriğinin önemli katkısı olduğunu düşündürmektedir. Bu sonuçlar da kısmi ergime varsayımının kabuksal iletkenlikler için genel bir açıklama olmayacağını gösterir. Ancak, araştırma yapılan bölgede, kabukta bir kısmi ergime oluşturabilecek güçte bir tektonik etkinlik varsa, yüksek sıcaklıklara bağlı olarak, kabuksal iletkenlik değerleri artabilir. Şekil 4a da görülen iletkenlik değerlerindeki saçılmaya, bazı bölgelerde oluşan kabuksal kısmi ergimelerin neden olduğu düşünülmektedir. Gerçekten de Basin and Range (A.B.D.) bölgesi, Ren grabeni (Almanya), İzlanda gibi yüksek ısı akısı izlenen bölgelerde, iletkenlik anomalisinin olduğu derinliklerde, ısı akısı yöntemi ile bulunan sıcaklıklar kabuk malzemesinin ergime sıcaklığının çok üstündedir. Bu nedenle özellikle ısı akısının yüksek olduğu ve riftleşme gibi aktif tektonikle denetlenen kabuksal inceltme bölgelerinde, kısmi ergimiş kütlelerin de yüksek iletkenliklerin oluşumuna katkısı olabilmektedir.

#### Tektonizma

Kabuk ve üst manto araştırmalarında en sık kullanılan MT ve GDS (Geomagnetic Depth Sounding) yöntemlerinin araştırma derinliği, genel olarak, üst kabuk-üst manto aralığını kapsar. Bu nedenle



Şekil 4. (a) Yüksek iletkenlikli kabuksal katmanlar için, (b) tektonik (boş daireler) ve duraylı (artı işaretleri) bölgelerde düşük iletkenlikli kabuksal katmanlar için, sıcaklığa karşı elektriksel iletkenlik değerleri, kalın çizgiler dağılıma en küçük kareler ile en iyi çakışan doğrular ve kesikli çizgiler bu doğrular için % 95 güvenilirlik sınırları, (c) arazi iletkenlik-sıcaklık eğrileri kalın çizgiler, laboratuvara kuru ve ıslak granit üzerinde yapılan iletkenlik ölçüm sonuçları (Olhoeft 1981) kesikli çizgiler birlikte gösterilmiştir. Noktalı- kesikli çizgiler kuru kabuksal kayalar üzerindeki diğer deney sonuçlarını gösterir (Shankland ve Ander 1983).

Figure 4. Logarithm of electrical conductivity versus reciprocal temperatures (a) for high conductivity layers in the crust (b) for low conductivity layers in tectonic regions (circles) and stable regions (crosses). The solid lines are linear least squares fit and the dashed lines give 95% confidence limits for these lines (c) field conductivity-temperature curve of this figure (a) and (b) (solid lines) compared with laboratory measurements of conductivity in dry granite and wet granite with 1-2% water (short dashed lines (Olhoeft 1981) with laboratory measurements, (after, Shankland and Ander 1983).

bu iki yöntemle ölçülen verilerin derlenmesi ile verilerden yapılan sınıflamalar, yer kabuğunun, tektonik olarak etkin olan alanlarda, durağan alanlara göre daha iletken olduğunu göstermiştir. Shankland ve Ander (1983) tarafından yapılan iletkenlik-sıcaklık sınıflamasına göre, durağan bölgelerde ve tektonikçe etkin bölgelerde iletkenlik anomalileri farklı dağılım göstermektedir. Durağan alanlar genellikle daha yüksek özdirençlerle temsil edilirler.

Adam (1987), uzun ve derin kırık zonları civarından elde edilen alt kabuk iletkenlik anomalilerinin, derinlik ve ısı akısı arasında tanımladığı amprik dağılıma uymadığını saptamıştır. Şekil 5a'da kabuktaki genel gözlem değerlerine karşışan  $h(q)$  amprik fonksiyonu görülmektedir. Kayaç gözeneklerindeki tuzlu (KCl ve NaCl) çözeltilerin, sıcaklık arttırıldığında artan iletkenlikleri genellikle 300°C civarında en yüksek değere ulaşmaktadır. Dolayısıyla, 300°C izoterminden hesaplanan derinlik-ısı akısı eğrisi karşılaştırma amacıyla şekle eklenmiştir. Orta ve Doğu Avrupa'da farklı kırık hatlarında MT ve GDS (Geomagnetic Depth Sounding) ölçmeleri ile gözlenen iletken katman derinlikleri de Şekil 5a üzerine işaretlenmiştir (Adam 1987). Bu araştırma, her bir fay hattında gözlenen iletken zonu, alt kabuk iletken kuşağının genel derinliğinden ( $h(q)$  eğrisi) daha sığda yer aldığını göstermiştir. Bu zon 300°C izotermi için çizilen kuramsal sıcaklık-ısı akısı eğrisinin de altındadır. Şekil 2b'deki jeotermilere bakılırsa, daha yüksek sıcaklık izotermi (400-500°C) kullanılarak oluşturulacak derinlik-ısı akısı kuramsal eğrilerinin 300°C eğrisinden de daha büyük derinliklerde yer alacağı görülür. Yani, uzun fay hatlarında kabuk içinde gözlenen iletken zonu oluşumuna yüksek sıcaklıklar neden olmamıştır. Uzun fay hatlarında gözlenen alt kabuk iletken kuşağı, Yerküre genelinde gözlenen iletken alt kabuk katmanından çok daha sığ derinliklerde (7-10 km civarı) yer almaktadır. Şekil 5b de ise, Baltık ve Kanada kalkanı gibi iki duraylı alanda ve Baykal rift zonu gibi büyük bir fay kuşağında elde edilen iletkenlik-periyot değişimi ve iletkenlik derinlik dağılımları karşılaştırılmıştır. Rift zonunda, kabuksal iletkenlik anomalisi daha sığ derinliklerde yer almakta ve daha yüksek iletkenlik değeri göstermektedir. Afrika'daki Kaapvaal duraylı kratonu (C) ve Limpopo hareketli kuşağı (L) için verilen derinlik özdirenç modellerinde de (Şekil 5c) kabuksal iletken katmanın Limpopo hareketli kuşağı için Kaapvaal duraylı kratonuna göre daha sığda yer aldığı ve daha düşük özdirenç de-

ğerine sahip olduğu görülmektedir.

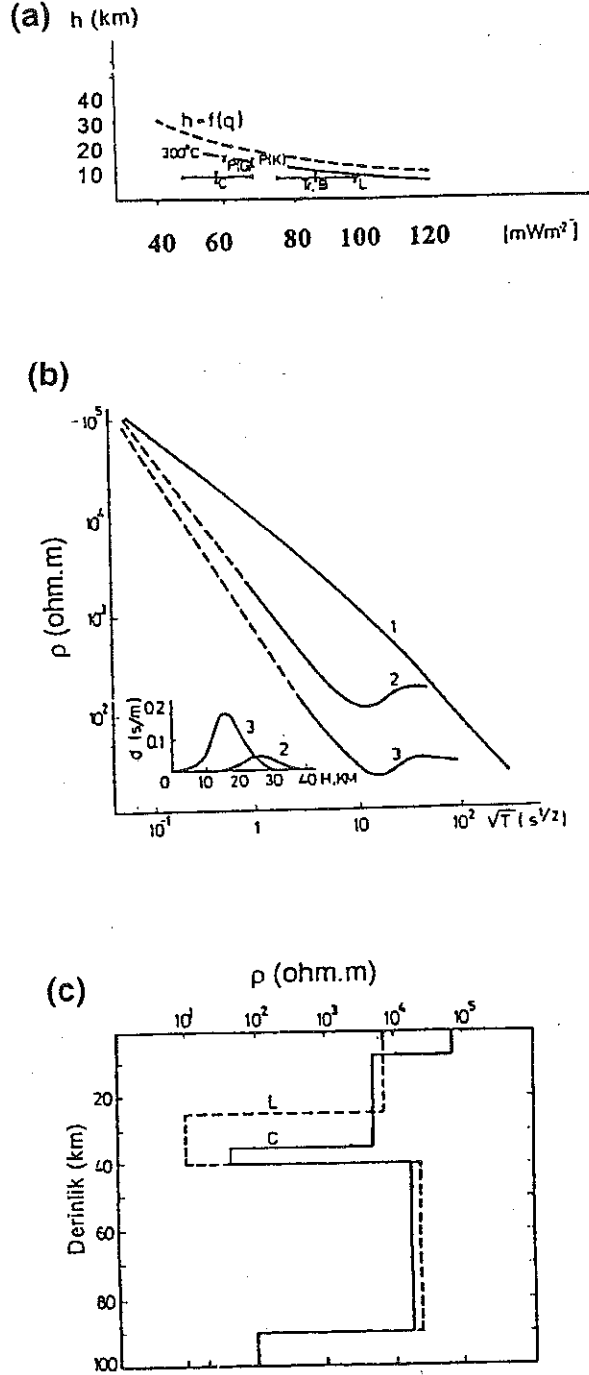
Kırılmaya bağlı olarak kayaç gözenekliliğinin ve mikro çatlakların artması nedeni ile, büyük ve genelde aktif fay zonlarında kabuksal iletkenlik zonları genelde Fanerozoik kabukta gözlenen iletken zonlardan daha iletkendir ve sığda yer alır. Kayaçlardaki gözenek oranı ile kayaç iletkenliği arasındaki ilişkiyi tanımlayan Archie yasasına göre de, kayaç özdirenç, gözeneklilik ile ters orantılıdır, gözeneklilik arttıkça özdirenç düşmektedir. Tektonik etkinliğin yüksek olduğu bölgelerde, yalnızca gözenek oranı artmaz, aynı zamanda mikro çatlak gelişimine bağlı olarak, tanecik yüzeylerinin ıslanmasını sağlayan gözenek bağlantı açıları da kayaç geçirimsizliğini arttıracak şekilde artar (Hyndman ve Shearer 1989). Dolayısıyla, gözenek oranı değişmese dahi, mikro çatlak gelişiminin geçirimsizliğini artırması, elektriği ileten iyonları taşıyan serbest suyun daha iyi dolaşım yapmasını sağlar ve iletkenliği arttırır. Tabii ki bir kırık zonunda (özellikle jeotermal alanlarla ilişkili bir zonda), gözenek suyunun tuzluluğu ve sıcaklığı da iletkenlik değerine katkıda bulunacaktır.

## JEOELEKTRİK VERİLERE GÖRE ALT KABUKTA EGEMEN OLAN FİZİKSEL KOŞULLAR

### ALT KABUKTA SICAKLIK

#### En düşük sıcaklık sınırı

Fanerozoik yaşlı alanlarda yapılan sismik çalışmalar, alt kabuğun, elektriksel olarak iletken olmasının dışında, iyi bir sismik yansıtıcı yüzey de olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 6a, arazide gözlenen yansıtıcı (Klemperer 1987) ve iletken (Adam 1976) alt kabuk yüzeyine olan derinlikleri, aynı bölgedeki ısı akısı değerlerine karşı gösterir. Chapman (1986) jeotermi kullanılarak farklı eş sıcaklık değerleri için derinlik-sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Alt kabuk için arazi verilerinden bulunan sıcaklık-derinlik dağılımına en iyi uyan ilişkiyi 300 ve 400°C izotermilerinin verdiği saptanmıştır. Buna bağlı olarak, alt kabuk üst yüzeyinde sıcaklığın ortalama 400°C civarında olduğu tahmin edilmektedir. Klemperer (1987), Adam (1976) tarafından verilen alt kabuk katmanının üst yüzeyine olan derinlik ve ısı akısı arasındaki  $q=kT/h$  ilişkisinden yola çıkarak iletkenin üst yüzeyini temsil eden derinlikler için 470°C bir sıcaklık saptamıştır. 500°C



Şekil 5. (a) Doğu-Orta Avrupa'da, uzun doğrusal kırık zonlarında gözlenen iletkenlik anomalilerinin yüzeyden olan derinliği ve bölgesel ısı akısı, kabuk için  $h=f(q)$  amperik eğrisi ve Chapman ve Pollac (1977) jeotermometresine göre  $300^{\circ}C$  eş sıcaklı eğrisi. L: Lavantal; P(G):Periadriatic hattı, P(K):Periadriatic hattı (Karawanken), Tr:Transdanubian, B:Balaton (Macaristan) Profili, ve C:Karpatlar. (Adam 1987). (b) Üç farklı jeolojik bölge için, öz direnç periyot ve öz direnç derinlik eğrileri, 1. Baltık kalkanı (Kaikkonen v.d. 1983), 2. Kanada kalkanı (Caner 1970) 3. Baykal Rift zonu (Vanyan 1984). (c) Kaapval kratonu ve Limpopo hareketli kuşağı için öz direnç-derinlik modelleri (van Zijl 1978).

Figure 5. (a) Depth of conductivity anomalies in linear tectonic zones in Eastern Europe versus surface heat flow;  $h=f(q)$  curve and depth of the  $300^{\circ}C$  isotherm vs. surface heat flow as caused from Chapman and Pollac (1977). L: Lavantal, P: Periadriatic line, Tr: Transdanubian, B: Balaton line, C: Carpathians, (after Adam 1987). (b) The resistivity- period and resistivity-depth curves for three different regions, 1. Baltic Shield, 2) Canadian Shield, 3) Baikal Rift Zone (Vanyan 1984), (c) Resistivity and depth models for Kaapval Craton and Limpopo Mobile Belt (van Zijl 1978).



den yüksek sıcaklıklarda ise kayaç sünek (plastik) davranış kazanır, gözenekleri arasındaki bağlantılar birbirine yapışarak kapanır ve gözenek sıvısı içindeki iyonlar kayaç içinde dolaşamazlar (Jones 1987). Dolayısıyla, kabuk içinde tuzlu su bulursa dahi, alt kabuğun üst yüzeyinde gözlenen iletkenlik değerlerini elde etmek, bu derinliklerde sıcaklık 500°C yi aşmadığı taktirde mümkün olabilir. Wannamaker (1997), alt kabukta yer alan kayaçların uğramış oldukları metamorfizma derecelerine göre, iletken alt kabuk yüzeyindeki sıcaklıkların yerel koşullara bağlı olarak 250-500°C arasında olabileceğini belirtmiştir. Lachenbruch ve Sass (1977) tarafından tanımlanan, 'duraylı referans kabuk' için, iletken alt kabuk katmanının üst bölümü için öngörülen 400-500°C sıcaklığa 25-30 km derinlikte ulaşılacağı hesaplanmıştır. Kola kuyusunda (Kuzeybatı Rusya) yapılan ölçüm sonuçları da 10-12 km 180°C ve 25°C/km bir sıcaklık gradyanı ile 400-500°C ye 20-24 km de ulaşıldığını göstermektedir (Jones 1987).

#### En yüksek sıcaklık sınırı

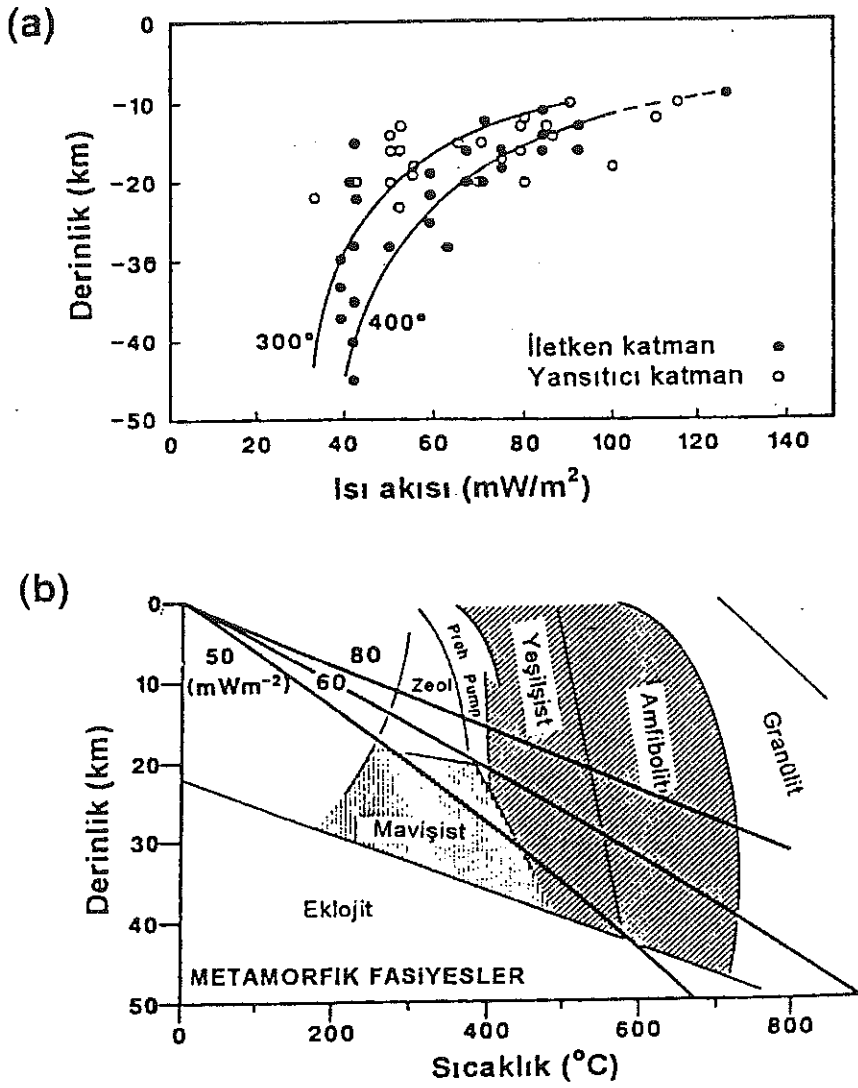
Alt kabuktaki sıcaklık sınırını saptarken jeokimyasal ve petrografik bilgiye de başvurulmaktadır. Şekil 6b metamorfik fasiyeslerin oluşum sıcaklığı ve derinlik ilişkisini ve kabukta en sık gözlenen 50, 60, 80 mW/m<sup>2</sup> ısı akısı jeotermelerini göstermektedir. 400-700°C sıcaklık aralığı yeşil şist ve amfibolit koşullarını kapsar. Bu fasiyesler için yapılan metamorfizma ve su alma (inclusion) çalışmaları litostatik basınç civarında, tuzlu su ile kimyasal dengeye bu sıcaklıklarda erişildiğini göstermektedir. Daha yüksek sıcaklıklardaki granülit fasiyesi koşullarında ise, çok az su olduğuna ya da hiç su bulunmadığına dair güçlü kanıtlar vardır (Craford ve Holister 1986). Oysa, Fanerozoik kabukta serbest su bulunduğunu gösteren pek çok jeolojik ve jeofizik bulgu vardır. Bu nedenle, Fanerozoik yaşlı bölgelerde, alt kabukta 700°C den yüksek sıcaklıklar beklenmemelidir.

## ALT KABUKTA GÖZENEKLİLİK VE SU İÇERİĞİ

### Kabukta suyun kaynağı

Laboratuarda asidik kayaçlar üzerinde yapılan elektriksel iletkenlik deneyleri (Glover ve Vine 1994, 1995), asidik bileşimli kayaçlardan oluşan Fanerozoik yaşlı üst kabukta su bulunması gerektiğini göstermiştir. Üst kabukta bulunan suyun büyük bir bölümü meteorik kökenlidir. Genç alt kabukta, iletkenliğinin kaynağı da kayaç gözenekleri içinde yer alan serbest sudur (Hyndman ve Shearer 1989, Shankland ve Ander 1983, Haak ve Hutton 1986). Alt kabukta su varlığı üç temel nedene bağlanmaktadır (Hyndman ve Shearer 1989). Bunlar, (1) Jeolojik işlemler sırasında alt kabuğa taşınan ıslak kayaçlar, (2) dalma batma zonlarında, dalan okyanusal kabuğun ve üzerinde yer alan çökeller tarafından salınan su, (3) mantodan buharlaşan suyun alt kabuğa yerleşmesidir.

Kıtasal kabuğun oluşumuna neden olan jeolojik işlemler oldukça karmaşıktır. Kıtasal kabuk oluşumu, okyanusal kabuğun, tektonizma ile kalınlaşmasına, çökelme ve mağmatizma ile büyümesine bağlanmaktadır. Kabuk kayaçlarının çoğu başlangıçta ıslaktır ve volkanik kayaçlar için yüzde birkaçtan yüzde ona kadar değişen gözeneklilik miktarı, çökel kayaçlar için yüzde onlar civarındadır. Bu kayaçlar jeolojik hareketlerle derine gömülürlerse, basınç ve yüksek sıcaklıkların etkisi ile metamorfizmaya uğrarlar ve içerdikleri suyun bir kısmını dışarı salarlar. Salınan suyun bir bölümü metamorfizmada sulu minerallerin oluşumu aşamasında emilir, kalan su alt kabukta kayaç gözenekleri içinde tutulur. Metamorfizma ile sulu mineraller tarafından emilen su miktarı kayacın geçirdiği metamorfizmanın derecesi arttıkça azalır. Alt kabukta, amfibolit fasiyesine kadar, ortamda ek serbest su bulunmalıdır (Hyndman ve Shearer 1989). Stabil olan alanlarda, kabuksal sıcaklıklardaki artış, metamorfik minerallerin daha çok su salması ile sonuçlanır. Daha ileri dereceli metamorfizma oluşturacak sıcaklıklarda kayaçlar sünek deformasyon kazanırlar ve gözenekler arası bağlantılar basınç ve yüksek sıcaklığın etkisiyle kaynaklanarak kapanır. Metamorfizma süresince su salınması, gözenek bağlantıları tamamen kapanıp, gözenekler kendi içlerine kısılmaya kadar sürer. Kalan su, oluşan düşük geçirgenlik (permeabilite) nedeni ile kapanır. Kabukta sıcaklığı artırarak, ortama ser-



Şekil 6. (a) Yer yüzeyinde yapılan çalışmalardan bir derlemeden elde edilen ve sismik olarak yansıtıcı (Klemperer 1987) ve elektriksel olarak iletken (Adam 1987) olan alt kabuğun üst yüzeyine olan derinlikler. Standart izotermeler Chapman (1986) (b) Basitleştirilmiş metamorfik fasiyes diyagramı, 50,60,80  $mWm^{-2}$  yüzey ısı akısı değerleri için, Chapman (1986) jeotermeleri ile birlikte çizilmiştir (Hyndman ve Shaerer 1989).

Figure 6. (a) The depth to upper surface of the lower crust according the seismically reflective (Klemperer 1987) and electrically conductive (Adam 1887) zones, standard isotherms are by Chapman and Pollac (1986). (b) A simplified diagram of metamorphic facieses, The Chapman geotherms for 50,60,80  $mWm^{-2}$  are also shown (after Hyndman and Shearer 1989).

best su oluşumunu sağlayan jeolojik işlemler arasında, kabuksal gerilmeler, riftleşme, yay ardı bölgelerde ve sıcak noktalarda manto yükselimleri sayılabilir.

Bir başka görüşe göre, dalma batma bölgelerinde, dalan kabuksal parça ve üzerindeki çökeller içerdikleri suyu, derinde basınç etkisi ile salar. Açığa çıkan su, yükselerek, dalan dilimin üzerindeki alt kabuğa yerleşir (Kay ve Kay 1986) ve bu neden-

le alt kabukta su bulunur.

Mantodan buharlaşan suyun alt kabuğa yerleşmesi daha az tanımlanmış bir olgu olmakla birlikte, alt kabuktaki su için önemli bir potansiyel kaynak olarak görülmektedir. Manto derinliklerindeki kayaların mineral bünyelerinde bulunan su mantonun yükselmesine bağlı olarak metamorfizma koşullarının değişmesi ile serbest kalır. Bölgesel manto yükselimleri ve normal manto sıcaklıkların-

dan daha yüksek sıcaklıklardaki manto malzemesinin kısmi ergimesi ile açığa çıkan su, manto kökenli su için başlıca aday olarak görülmektedir (Kay ve Kay 1986).

Arazi çalışmaları alt kabukta, iletken ve sismik yansıtıcı zonların birlikte gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Hyndman ve Shearer (1989), kuramsal ve deneysel çalışmalara dayanarak, tuzlu suya doygun katmanların, hem iyi iletken, hem de, iyi sismik yansıtıcı yüzeyler sağladığını saptamışlardır. Bütün bu sonuçlar Fanerozoik yaşlı alt kabukta kayaç gözenekleri içinde su varlığı hipotezini güçlendirmektedir.

### Gözeneklilik

Arazide alt kabukta gözlenen yüksek iletkenliğin büyük bir bölümü, kayaçların tuzlu su içermesine bağlı olarak oluşan elektrolitik iletim mekanizması yolu ile sağlanmaktadır. Elektrolitik iletim, su içindeki elektronların dolanımı ile sağlandığına göre, kayacın toplam hacmindeki gözenek oranı ve gözenekler arası geçirimsizliği belirleyen taneçik yüzeyi açıları alt kabuk iletkenliklerinin oluşumunda çok önemlidir. Shankland ve Ander (1983), alt kabukta gözlenen iletkenlik değerlerini sağlayabilmek için kayaçların en az %0.01-0.1 gözeneklilik içermesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. Ancak, Hyndman ve Shearer (1989), toplam hacimdeki gözeneklilik yüzdesi ve iletkenlik ilişkisini, gözenekler arasındaki bağlantı açılarının (taneçik ıslanma açısı) etkisini de hesaba katarak tanımlamışlardır. Aynı tür bir tanımlamayı sismik yansıma, gözenek yüzdesi ve bağlantı açısı arasında da yapan araştırmacılar, 10-15 km kalınlıklı bir alt kabuk katmanı için % 0.5 den daha az olan gözenekliliğin, gözlenen iletkenlikleri ve sismik yansımaları sağlayamayacağı sonucuna varmışlardır. Dolayısıyla, alt kabuk için öngörülen gözenek oranı en az % 0.5 olmalıdır. Araştırmacılar iletken alt kabuk katmanı 10km den daha ince ise gözenek oranı daha yüksek olması gerektiğini de vurgulamışlardır.

Gözenek dengesi modeline göre (Hyndman ve Shearer 1989), Fanerozoik bölgelerde, alt kabuk iletkenliği, kayaçların, deniz suyuna yakın tuzlulukta (0.7 molar) su ve %0.5-3 oranında gözenek içermesi ile oluşabilmektedir. İletken alt kabuğun üst yüzeyi (alt-üst kabuk sınırı) aynı zamanda iyi bir sismik yansıtıcı yüzeydir ve toplam kayaç hacminin % 1-4 kadar gözenek ve tuzlu su içeren, ay-

rıca gözenek oranı, 100 m aralıklarla değişen bir fiziksel ortamla alt kabuktaki gibi bir yansıtıcı yüzey elde edilebilir. Sismik yansıma ve elektriksel iletkenlik gözlemlerinin aynı gözeneklilik oranıyla açıklanması alt kabuk iletkenliğinin gözenekler de içerilen sebest su ile sağlandığı savını güçlendirmektedir. Sonuçta, Fanerozoik alt kabukta gözlenen yüksek iletkenlik ve yansıma değerleri, içinde serbest su bulunduran, (en az % 0.5, daha genç bölgelerde ise, % 1-3 oranında) gözeneklilikle sağlanabilir.

Fanerozoik alanlarda kabuksal iletkenliğinin, üç farklı derinlik düzeyinde, farklı değerler aldığı bilinmektedir (Şekil 1). Bu durum, alt kabuğun iki farklı düzeyinde gözenek oranlarının tek düze olmaması ile açıklanmaktadır. Alt kabuğun üst katmanında gözenekler sıvı akış döngüsüne izin verecek biçimde, birbiri ile bağlantılıdır ve öz direnç düşüktür (10 ohm.m). Alt kabuğun alt katmanında gözenekler arası bağlantı sıcaklık etkisi ile kaynaklanmış ve gözeneklilik sınırlanmıştır. Bir başka deyişle, sıcaklık artışı ve kaya basıncı etkisi ile, alt ve üst kabuğu ayıran sınırdaki gözeneklilik ve gözenekler arası bağlantılar azalmakta ve bu durum öz direnci arttırmaktadır (100-1000 ohm.m). İki farklı alt kabuk düzeyinde gözenekliliğin azalması ile oluşan ara yüzeylerden biri alt ve üst kabuğu ayıran Conrad süreksizliği, diğeri de alt kabuğu iki farklı elektriksel kata ayıran bir başka ara yüzeydir.

Alt kabukta gözenekliliği sınırlayan, iki önemli mekanizma vardır. Derin kabuk ve manto kökenli sıcak akışkanlar, yükselerek üst kabuk sınırına ulaşıncaya kadar sıcaklıkları (400°C'ye kadar) azalır. Mineraller, bu sıcaklıklarda egemen olan yeşilışt fasiyesi koşullarında su alarak metamorfizmaya uğrar. Metamorfizma geçiren, bazı mineralerin su alarak şişmesi sonucunda, alt kabuğun üst sınırında, gözenekler arasındaki bağlantı ve gözenek oranları azalır. Gözenekliliği azaltan bir başka neden de, sıcak akışkanların, bu sınırdaki soğuması ile içerdikleri silikatların çökelerek gözenekleri tıkamasıdır (Jones 1987, Etherige v.d 1984). Bu işlemler alt kabuğun üst sınırında suyun yükselmesini önleyen ve alt kabukta kapanlanmasını sağlayan bir katman oluşturur. En alt kabuksal katmanda da gözeneklilik azalır. Bu nedenle alt kabuğun üst katmanında gözlenen çok yüksek iletkenlik değerleri de azalarak orta büyüklükte iletkenlik değerlerine dönüşür (100-1000 ohm.m). En alt katmanda gözenekliliği azaltan neden, sıcaklıkların 500°C ve üzerine çıkarak, kırılğan kayaçlara sünek özellik

kazandırmasıdır. Bu durumda, üstteki katmanların oluşturduğu yüksek litostatik basınç bu derinliklerde kırıkları ve gözenek sınırlarını kaynaklayarak kapatır ve gözenekliliği ve su dolaşımını azaltır.

### FANEROZOYİK ALANLARDA İLETKENLİK VE YER KABUĞUNU OLUŞTURAN KAYAÇ TİPLERİ

Glover ve Vine (1994) basınç kontrollü laboratuvar deneylerinde, Fanerozoik ve Prekambriyen alanlar için sırasıyla 20.37°C/km ve 12.7°C/km sıcaklık gradyanlarını kullanarak, çeşitli kayalar için farklı sıcaklıklarda ölçtükleri iletkenlik değerlerini, iletkenlik-derinlik sonuçlarına dönüştürmüşlerdir. Bu dönüşümü yapmak için kullanılan sıcaklık gradyanları, Marquis ve Hyndman (1992) tarafından derlenmiş olan, arazi iletkenlik ve sıcaklık gözlemlerinden ortalama olarak elde edilmiştir. Böylece, laboratuvar da ölçülen iletkenlik-derinlik değerleri, Marquis ve Hyndman (1992) tarafından derlenen arazi verilerinden elde edilen iletkenlik-derinlik sonuçları ile karşılaştırılabilmiştir (Şekil 7). Marquis ve Hyndman (1992) tarafından derlenen çalışmaların yirmidördü Fanerozoik genç bölgelerde ve onbiri stabil ve yaşlı kratonlarda gerçekleştirilmiştir. Arazi MT çalışmalarından elde edilen kabuksal katman modelleri ve laboratuvar da farklı kayalarda ölçülen iletkenlik değerlerinin ortalamalarından gelen derinlik-iletkenlik eğrileri Şekil 7 de birlikte çizilmiştir.

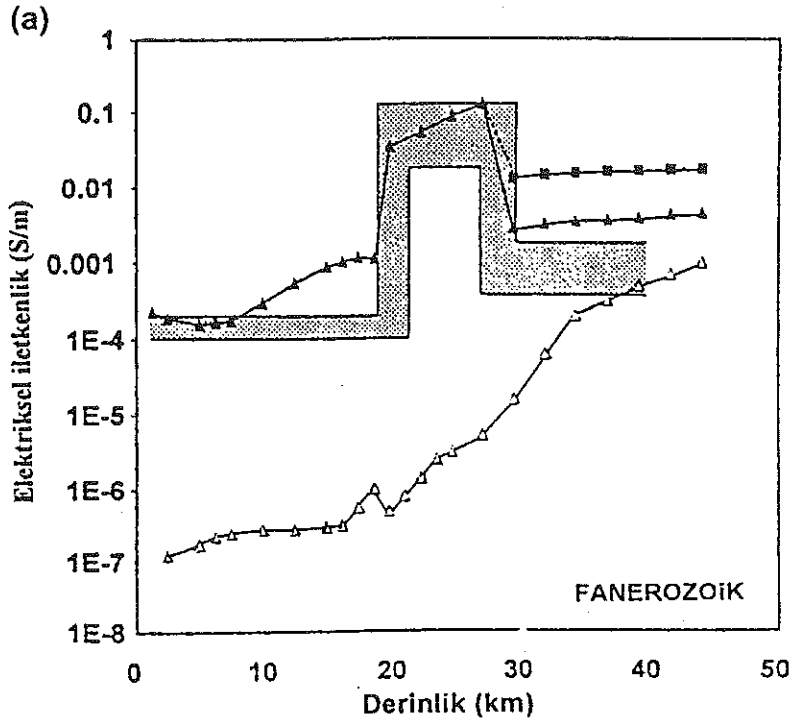
Glover ve Vine (1994) üzerinde çalıştıkları kayaç örnekleri ile arazi iletkenlik değerlerini kıyaslayarak, Fanerozoik yaşlı bölgelerde gözlenen ilk kabuksal katmanın (yüzeyden 20 km derinde) granodiyorit, ikinci katmanın amfibolit (20-30 km) ve son katmanın (30-40 km) ise granülitten oluşabileceği sonucuna varmışlardır. Şekil 6a da üç katmanlı bir kabuk yapısı gözlenmektedir. Birinci katmanın iletkenliği düşüktür. Kuru granodiyoritlerin hem üst hem alt kabuk katmanı için, şekilde gözlenen çok daha düşük iletkenlik verdikleri bulunmuştur. Gözlenen iletkenlik değerlerine ancak tuzlu suya doymuş granodiyoritler ile ulaşılmaktadır. Orta kabuk derinliklerinde gözlenen en yüksek iletkenlik değerleri, suya doymuş amfibolitlerle açıklanabilmektedir. Buradaki elektriksel iletim gözeneklerde içerilen elektrolit yoluyla, yüksek sıcaklıklarda (>350°C) ise kayaçlardaki mineral gövdeleri boyunca elektronik iletimin katkısıyla sağlanmaktadır. En alt katmanın iletkenliğini oluşturan

kayaç türüne karar vermek biraz daha zordur. Çünkü, elektrolitle doymuş ve kuru grafitli kayaçlar ve aynı zamanda grafitli kuru kayalar alt kabuk için gözlenen uygun büyüklükte iletkenlik değerleri vermektedir. Kabuğun en alt derinliklerinde, kabuk suyla doymuş olsa bile, içerilen elektrolitin alt kabuk iletkenliğini yeterince arttırmadığı düşünülmektedir. Çünkü alt kabuktaki yüksek sıcaklıklarında kayaç matriksinin elektronik iletkenliği, elektrolitin iletkenliğinden daha yüksektir. Dolayısıyla alt kabuk suya doymuş ya da kuru olabilir (Glover ve Vine 1995). Ancak, Hyndman ve Shearer (1989) ve Jones (1987) alt kabuğun alt seviyelerinde de su içerildiğini, ancak üst katmanların oluşturduğu basınç nedeniyle, gözenekler arası yüzeyin kapanması ve geçirimin azalması nedeniyle elektrolitik iletimin etkisinin azaldığı sonucuna varmışlardır. Bu yaklaşım, alt kabuğun üst katmanında gözlenen yüksek iletkenliğin en alt katmanda azalmasının nedenini de açıklamaktadır.

Suya doymuş asidik kayaçlarda laboratuvar ölçmeleri ile ulaşılabilen yüksek iletkenlik değeri arazide gözlenen değerlerin çok altındadır (Glover ve Vine 1995). Dolayısıyla alt kabuktaki özdirençlerden asidik kayalardan çok bazik kayaçların sorumlu olduğu söylenebilir. Şekil 6 izlenirse, 0.5 M NaCl ile doymuş kayaçların gerçek arazi gözlemlerinden elde edilen kabuk modelleri ile çok iyi uyum yaptığı ve kuru kayaçların arazide gözlenen çok düşük iletkenlik değerleri verdiği görülmektedir. Kuru kayaçlarda ne türden bir iletim mekanizması egemen olursa olsun, orta-alt kabukta meydana gelen iletkenlik değerlerini elde etmeye yetmemektedir. Bunun için kayaçların elektrolitle doymuş olması gerekmektedir. Glover ve Vine (1994), kabuksal iletkenliği, kayaç tipinin ve kayacın su içeriğinin birlikte belirlediği ve Fanerozoik alanlarda orta-alt kabukta gözlenen iletkenliğin suyla doymuş amfibolitlerce oluşturulduğu sonucuna ulaşmışlardır.

### KABUK ARAŞTIRMALARINDA BELİRSİZLİKLERİN DİĞER JEOFİZİK YÖNTEMLERİN DESTEĞİ İLE AZALTILMASI

Genelde Fanerozoik alt kabuğun elektriksel olarak iletken ve sismik olarak iyi bir yansıtıcı yüzey ve Prekambriyen alt kabuğun ise sismik olarak aktarıcı ve yalıtkan bir yüzey olarak gözlenmesi, kabuk araştırmalarında, sismik ve elektromanyetik yöntemlerden elde edilen bulguların ortak de-



Şekil 7. Kıtasal kabuk için tahmin edilen kabuksal yapı ve minerolojiler için hesaplanan iletkenlik derinlik profilleri, Glover ve Vine tarafından (1995, 1994) diğer bazı örnekler üzerinde yapılan sıcaklık-iletkenlik ölçmelerinden hesaplanmıştır. Fanerozoik alanlar için saptanan ortalama değer olan 20.4 °C/km jeotermi yardımıyla (Marquis ve Hyndman 1992), laboratuvarlarda kayalarda ölçülen sıcaklık-iletkenlik değerlerinden bulunmuş olan sıcaklık-derinlik eğrileri ve Marquis ve Hyndman (1992) tarafından derlenen arazi verilerinden elde edilen derinlik-iletkenlik modeli (gölgeli alan) işaretlenmiştir. İçi dolu semboller, 0.5M NaCl çözeltisi ile doymuş ve içi boş semboller kuru kayaları gösterir. Üçgenler grafit-siz kayaları kareler ise grafit taşıyan kayaları gösterir (Glover ve Vine 1995).

Figure 7. Predicted conductivity depth profiles for the Phanerozoic continental crust based on assumed crustal structures and mineralogies (field symbols show profiles for 0.5 M NaCl. Saturated rock open symbols show profiles for dry rock: triangles show graphite-free rocks and squares show graphite-bearing samples (after, Glover ve Vine 1995). The shaded area shows the conductivity depth models obtained from the real field data listed in Marquis and Hyndman (1992).

ğerlendirilmesinin yararlı olacağını düşündürmüştür (Jones 1987). Hyndman ve Shearer'ın (1989) yaptıkları çalışmalarda sismik ve EM sonuçların arazi gözlemleri ve modellerle ilişkilendirilerek incelemiştir. Bunun yanısıra alt kabukta gözlenen iletkenlik ve yansıma özelliklerinin nedenlerini laboratuvarda yapılan sismik ve elektriksel ölçmelerle birlikte tartışmışlardır. Amaç, sismik ve elektrik gözlem sonuçlarını açıklayacak, ortak bir fiziksel yer içi yapısını tanımlamaktır. Gerçekten de, laboratuvarda kayaç örnekleri üzerindeki çalışmalar, arazide gözlenen iletkenlik ve yansıma değerlerini yer içinde ortak bir gözenek geometrisine sahip, aynı oranlarda serbest su ve gözeneklilik oranı içeren kayaçlar ile açıklayabilmektedir (Hyndman ve Shearer 1989). Isı akısı ve MT arasındaki da açık bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Adam 1976, Shankland ve Ander 1983). İlk kez Garland (1975),

arazi gözlemlerinden yola çıkarak, ısı akısı, sismik kalite (Q) faktörü, yoğunluk, sismisite gibi diğer jeofizik değişkenler ile elektriksel özdirenci karşılaştırmıştır.

Sismik yöntemler, jeolojik yapıyı haritalamakta başarılı olmakla beraber, orta ve alt kabuğun bileşimini anlamakta tek başına yeterli değildir. Bu nedenle, kabuk araştırmalarında diğer jeofizik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır (Jones 1987). Sismik sonuçların yorumlanmasında özellikle EM verileri güçlü bir araçtır. Yer EM tepki, yüzeyden derine doğru (nüfuz derinliğine kadar) yer iletkenlik yapısının bir tür toplamını temsil ettiği için düşey çözünürlük sismikteki kadar yüksek değildir. Ancak, değişik kayaç türlerinin özdirenci arasında genlik olarak yedi merteye fark bulunmaktadır (0.1-1000000 ohm.m). Sismik değişkenler için ise

bu fark ancak genliğin bir mertebesi kadardır. Elektriksel iletkenliğin kayaç türüne bu denli duyarlı olması, EM yöntemlere, yeraltı yapısını saptamaktan öte, yer içinde egemen olan fiziksel koşulları çok daha belirgin olarak algılayabilme ve tanımlayabilme avantajını sağlar. EM yöntemler, yanal öz direnç değişimlerine sismikten çok daha duyarlıdır ve yatay çözünürlükleri sismikteki düşey çözünürlüğe eşdeğerdir (Jones 1987).

MT ve sismik yöntemlerin kabuksal çalışmalarda birlikte uygulanmasının önemli avantajları olarak, sismikle saptanamayan düşey fayların MT ile çok iyi saptanması ve sismik yansıtıcı alt kabuktaki jeolojik koşulların MT desteği ile tanımlanabilmesi sayılabilir. Sismikte alt kabukla orta kabuk arasındaki süreksizliği tanımlayan Conrad süreksizliği, muhtemelen yansıtıcı alt kabuktaki suyun kapanlanmasını sağlayan ve alt kabuğun üst yüzeyinde silika çökmesi ile oluşan geçirimsiz bir katmana karşılık gelebilir. Örneğin Meissner v.d.(1983) tarafından Ren massifinde yapılan sismik çalışmalar ve aynı bölgede Jödicke v.d. (1983) tarafından yapılan MT çalışmalarının sonuçları Şekil 8a da görülmektedir. Sismik 20 km de Conrad (şekilde işaretlenmemiş Jones 1987) ve 30 km de ise Moho süreksizliklerini bildirmiştir. MT ise aynı bölgede 20 km derinlik civarında Conrad süreksizliğinin eşdeğerinde ince bir iletken katmanı ortaya koymuştur.

Jeoelektrik yöntemler, yer kabuğunun araştırılması dışında, alt ve üst mantonun araştırılmasında da kullanılmaktadır. Mantonun yapısı her ne kadar bir başka yazının konusu olsa da Garland'ın (1975) üst mantodan kaynaklanan iletkenlik anomalilerinin yorumlanmasında, diğer jeofizik parametrelerin önemini ortaya koyan örneklerine bakmak yararlı olacaktır. Bunlardan biri Japon ada yayının sismolojik özellikleri (düşük ve yüksek sismik hız ve Q faktörü zonları) ile aynı bölgedeki jeoelektromanyetik verilerle korelasyonudur. Şekil 8b de sismik ve jeoelektromanyetik ölçmelerin yorumlanmasıyla elde edilen yer yapısı modelleri üst üste çizilmiştir. Sismolojik sonuçlar, yüksek Q (sismik kalite faktörü) zonları ve yüksek sismik hız zonlarının, yay modelindeki dalan okyanusal dilimi temsil ettiğini göstermektedir. Bölgesel jeoelektrik modeldeki kama biçimli yalıtkan katman, her ne kadar dalmanın tersine eğimli olsa da yüksek Q faktörü ve sismik hız, gözlenen bölge ile çok iyi çakışmaktadır. Düşük öz dirençli astenosferin yer aldığı derinliklerde dahi, dalan kabuksal dili-

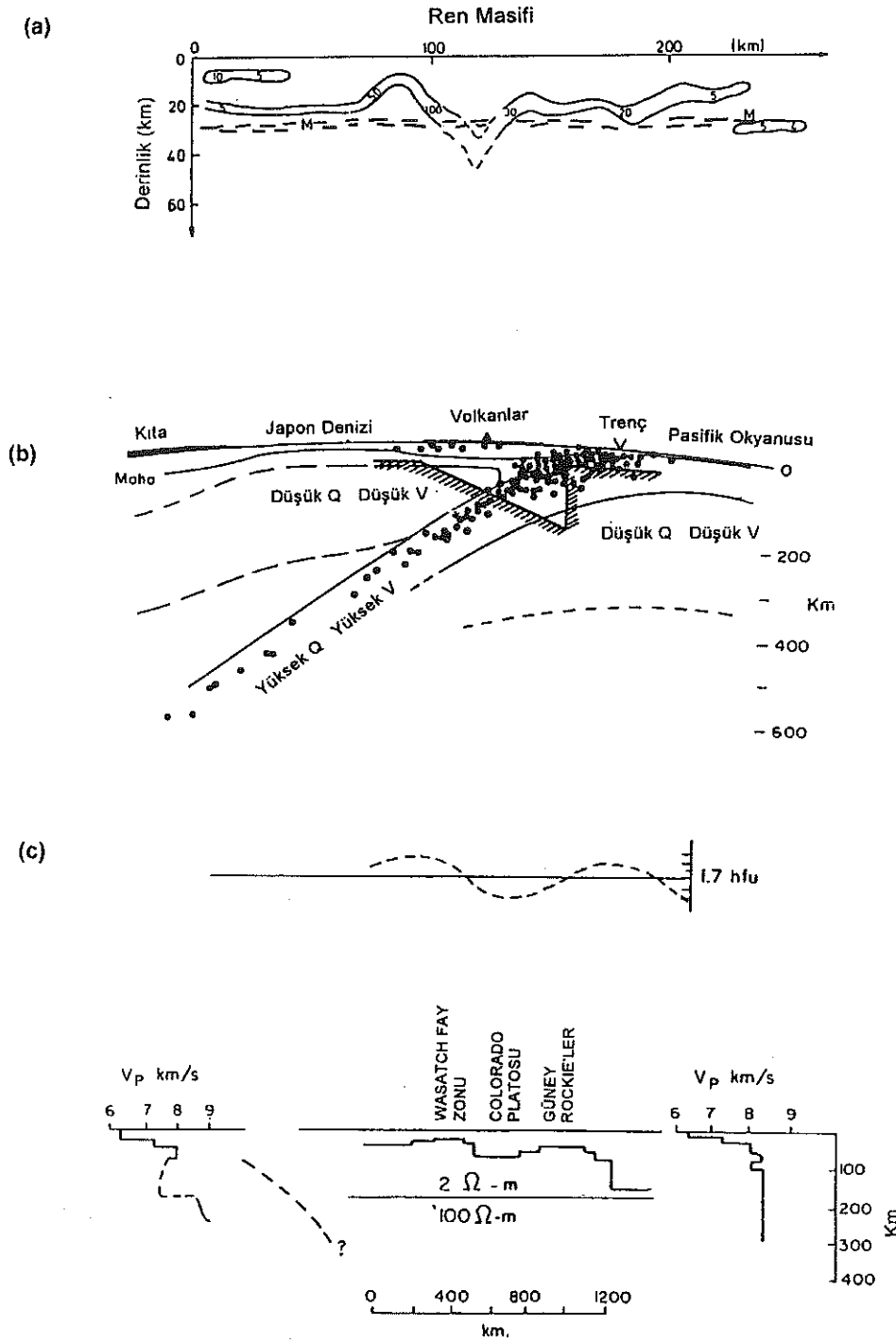
min, yüksek öz direnç, yüksek Q faktörü ve yüksek sismik hızlarla temsil edildiği görülmektedir. Bir başka örnek de Kuzey Amerika'dan verilmiştir. Şekil 8c de ise Kuzey Amerika için jeoelektrik model ve kıtanın batısı (soldaki) ve doğusundaki (sağdaki) sismik hız-derinlik modelleri verilmiştir. Jeoelektrik profil boyunca ısı akısı profili de görülmektedir. Jeoelektrik modelindeki manto kökenli iletken katman batıda kalın ve yüzeye yakındır, doğuda ise çok ince ve yüzeyden derindedir. Sismik hızda batıdaki (soldaki) düşüş, doğuda izlenmemektedir. Bir başka deyişle sismik hızlarda, batıda manto (astenosfer) etkisi gözlenirken, doğuda astenosfer etkisi görülmez. Bu sonuç jeoelektrik modelin önerdiği sonuçla çakışmaktadır. Ayrıca ısı akısı profilinde de iletken katmanın yüzeye yakın olduğu bölgelerde yüksek ve iletken katmanın yüzeyden derinliğinin arttığı ve nispeten inceldiği bölgelerde düşük değerler gözlenmektedir.

Bütün bu sonuçlar, jeoelektrik parametreler ve diğer jeofizik parametrelerin birlikte saptanmasının özellikle derin araştırmalarda yer içinin yapısal özelliklerinin ayrıntılı ve doğruya en yakın olarak belirlemedeki önemini ortaya koymaktadır. MT yöntemin bulgularını en iyi destekleyen ve bunların açıklanmasında yardımcı olan yöntemler başlıca, sismik ve ısı akısı yöntemleridir.

## SONUÇLAR

Derin erimli jeoelektromanyetik yöntemlerle, Dünya'nın farklı bölgelerinde yapılan çalışmalara göre, Fanerozoik yaşlı bölgelerde, yer kabuğu genelde derine doğru üç katmanlı bir iletkenlik yapısı ortaya koymaktadır. Manyetotelirik (MT) yöntemle arazide yapılan çalışmalar üst katmanın hemen hemen bütün bölgeler için çok dirençli olduğunu belirlemiştir. Çoğunlukla bu katmanın hemen üstünde birkaç kilometre kalınlıklı çok iletken bir çökel örtü yer alabilmektedir. Alt kabuk katmanı için ise durum, daha karmaşıktır, alt kabuk iletkenliği, bölgenin jeolojik yaşına ve tektonizmaya bağlı olarak değişir. Buna göre, genel olarak, duran ve yaşlı (Prekambriyen) alanlarda, alt kabuk katmanı yüksek öz dirençli ve sismik olarak iyi bir aktarım yüzeyidir. Genç (Fanerozoik) alanlarda ise alt kabuk katmanı çok düşük öz dirençlidir ve sismik olarak da çok iyi bir yansıtıcı yüzeydir.

Genç bölgelerde, üç katmanlı bir kabuksal iletkenlik yapısı gözlenmiştir. Üst katman dirençli kristalin kayaçlardan oluşur (10000 ohm.m), Alt



**Şekil 8.** (a) Ren masifi üzerinde yapılmış olan sismik (Meissener v.d. 1983) ve MT (Jöedicke v.d. 1983) profillerden saptanan süreksizlikler M harfi Moho anlamındadır, katman içindeki rakamlar ohm.m cinsinden öz direnç değerleridir. (b) Japonya'nın altında iletkenlik yapısı yüksek ve düşük sismik hızlarla ve sismik kalite faktörü Q ile ilişkilendirilmiştir. Taralı alan ile yüksek iletkenlikli manto işaretlenmiştir (Garland 1975). (c) Kuzey batı Amerika'da, yüksek iletkenlikli ve kalınlığı değişen üst manto katmanının iletkenlik yapısı ve sismik-hız kesitleri batıda ve doğuda ve ısı akışı elektriksel modelin üstünde gösterilmiştir. Kesikli hat önceki dalma batma zonunun olası yerini göstermektedir (Garland 1975).

**Figure 8.** The models for the seismic (Meissener 1983) and magnetotelluric (Jöedicke 1983) profiles from the Reinish massif (M is Moho). The numbers into the layer are the resistivity values in ohm.m. (b) Conductivity structure beneath Japan in relation to zones of high and low seismic velocity and seismic quality factor Q. The hatched line is the inferred surface of high conductivity mantle. (c) A model of the conductivity structure in Western North America in terms of a highly conducting upper mantle layer of varying thickness. Seismic-velocity sections to the west (left) and east and heat flow (top) are shown. The broken line marks the possible location of the subduction zone (Garland 1975).

kabuğun üst kısmı (orta katman) çok iletkendir (10 ohm.m). En alt katman ise orta derecede iletkendir (100-1000 ohm.m). Alt kabuğun üst kısmında gözlenen yüksek iletkenliklerden bazik amfibolitler içerisinde dolaşan tuzlu su ve alt kabuktaki görece- li olarak yüksek (>300°C) sıcaklıklarda bazik kayalardaki katı mineraller üzerinden gerçekleşen iletiminin artması (elektronik iletim) sorumlu tutulmaktadır. Bu seviyede beklenen kayaç amfibolittir. En alt kabukta ise öz direncin bir ölçüde artması, artan litostatik basıncın gözenek bağlantılarını azaltmasına bağlanmaktadır. Laboratuarda kayalar üzerinde yapılan jeofizik ve petrografik deneyler, bu seviyede beklenen kayaç türünün amfibolit veya granülit olabileceğini göstermiştir. Üst kabuktaki iletkenlikler ise suya doygun granodiyoritlerle sağlanabilmektedir. Sıcaklığın da iletkenliği büyük ölçüde düşürdüğü bilinmesine karşın, alt kabukta gözlenen iletkenliklerin oluşumunda su varlığının sıcaklığa göre daha etkin bir rol oynadığı belirlenmiştir (Shankland ve Ander 1983; Hyndman ve Shearer 1989).

Tektonik olarak aktif bölgelerde, örneğin uzun kırık hatlarında gözlenen derin iletkenlik zonları, Fanerozoik kabuktata beliren genel iletken zondan daha sığda yer alır (7-10 km) ve daha yüksek iletkenlik değeri gösterir (Adam 1987). Bu durum kırık zonlarındaki mikro çatlakların gözenek bağlantısını ve oranını artırmasına bağlanmıştır.

Arazi gözlemleri ve bu gözlemleri açıklamak amacı ile yapılmış olan laboratuvar çalışmaları alt kabukta egemen olan fiziksel koşullar ile gözlenen iletkenlik değerleri arasında bir bağlantı olduğunu gösterir. Alt kabuktaki, yüksek iletkenlik zonlarının açıklanması için yapılan çalışmalar bu anomalilerin oluşabilmesi için alt kabukta şu fiziksel koşulların bulunmasını öngörür: Alt kabuğun üst yüzeyinde sıcaklık ortalama 400°C civarında olmalıdır (Klemperer 1986, Adam 1976) Ancak Wannamaker (1997) alt kabuk kayalarının metamorfizma derecesine bağlı olarak alt kabuğun üst yüzeyinde sıcaklıkların 250-500°C aralığında oluşabileceğini öne sürmüştür. Bu katmanda sıcaklık 500°C yi aşamaz (Jones 1987). Alt kabukta, kabuğun en alt bölgesinde beklenen en yüksek sıcaklık ise 700°C'yi aşmamalıdır (Hyndman ve Shearer 1989). Alt kabukta gözlenen iletkenlik değerlerine, özellikle bazik kayalarda 350°C'den yüksek sıcaklıklarda elektronik iletimin katkısı olsa da, iletimin büyük bir bölümü elektrolitik yolla olmaktadır. Bu durumda gözeneklilik ve tuzluluk çok

önemlidir. Alt kabuk için %0.5-3 gözenek oranı ve 0.7 M tuzlu su gözlenen iletkenliklerin oluşumunu (diğer koşullarında katkısıyla) açıklayabilmektedir (Hyndman ve Shearer 1989). Alt kabukta gözlenen iletkenliklere göre yapılan sıcaklık tahminleri ile ilişkili olarak, Fanerozoik alanlarda su gerektiren işlemlerin gerçekleştiği amfibolit ve yeşil şist fasiyesleri öngörülürken, Prekambriyen alanlar için susuz ve yüksek sıcaklıklı granülit fasiyesinin geçerli olduğu düşünülür.

Kabuğun genelde suya doygun bir yapısı olduğu açıktır. Üst kabukta suyun kökeni büyük ölçüde meteorik olmalıdır. Çünkü alt kabuk ve üst kabuk sınırında geçirimsiz bir katman olduğu düşünül- mektedir. Alt kabuktaki su varlığı ise, ıslak üst kabuk kayalarının jeolojik işlemlerle alt kabuğa taşınması, dalma batma zonlarında dalan dilimden ayrılan suyun kabuk içine yerleşmesi ve mantodan gelen su olarak üç ayrı kaynakla açıklanmaktadır.

#### KATKI BELİRTME

Bu çalışma İ.Ü. Araştırma Fonu 842/190496 ve kısmen TÜBİTAK, YDABÇAG 230/G, numaralı projeleri kapsamında yapılan araştırmalar sonucunda gerçekleştirilmiştir.

#### SUMMARY

In this study, the electrical conductivity structure and related physical conditions in the Phanerozoic aged Earth crust are reviewed. The investigations with the deep penetrating electromagnetic methods revealed a three-layered geoelectrical structure for the Phanerozoic Earth crust. The first layer (upper crust) is highly resistive ((10000 ohm.m) and the second layer (upper part of the lower crust) is highly conductive ((10 ohm.m) and third layer (lowermost crust) is moderately conductive ((100-1000 ohm.m). The boundary between the highly conductive lower crust and resistive upper crust is also a good seismic reflector in the Phanerozoic aged regions. This highly conductive mid crustal layer is caused by the saline water saturated basic amphibolites with interconnected pore geometries. The increase in resistivity in the lowermost crust is explained by the annealed pore interconnections under the high litostatic pressure and water is confined into isolated pockets. Laboratory experiments showed that the expected rock type is amphibolite or granulite in the lower crustal



depths. The conductivity values that are observed at the upper crust can be supplied by the water saturated granodiorites. It is well known that the increase in the temperature decreases the rock resistivity but the existence of free water is more important parameter that forms the lower crustal conductivities (Shankland and Ander 1983, Hyndman and Shearer 1989).

In tectonically active regions, for example in the long fault lines, the deep conductivity anomalies are take place at shallower depths (7-10 km.) than the depths expected for the other Phanerozoik areas (Adam 1987). The increase of the conductivity value and the decrease in the depth of the conductive layer in active tectonic zones is related to the micro cracks that develops the stronger interconnection between pores in the rocks.

The field measurements and the laboratory experiments on rocks under different physical conditions, show that there is a relation between the physical conditions and observed conductivity anomalies. According to the results from the laboratory and field studies the observed conductivity anomalies can be constructed by the following physical conditions. At the surface of lower crust the lower limit of the temperature is 400°C (Klemperer 1986, Adam 1976). But Wannamaker (1997) stated that the temperatures at the upper surface of lower crust changes from 250 to 500°C depending on the metamorphism grade of the lower crustal rocks. In the upper part of the lower crust temperature can not exceed 500°C (Jones 1987). The conduction in the lower crust is mainly carried on by the electrolytic conduction mechanism with the contribution of the electronic conduction mechanism. In this case the porosity and the salinity of the lower crustal fluids play significant role in the formation of the lower crustal conductivity anomalies. The observed lower crustal conductivity values can be explained by the 0.5-3 % porosity and 0.7 molar NaCl solution into the rock pores. According the conductivity anomalies and plausible temperatures in the lower crust, it is concluded that amphibolite and greenschist metamorphic facieses where the free water exists are valid in the Phanerozoik lower crust (Hyndman and Shearer 1989).

The crust has a structure that is generally saturated by saline water. The origin of the water in the upper crust is generally meteoric. Because it is concluded that there should be an impermeable bo-

undary between lower and upper crust that traps the deep originated fluids into the lower crust (Jones 1987). Three different processes explain the origin of the water in the lower crust for Phanerozoik areas. First is the transportation of the wet upper crustal layers to the lower crust by the tectonic activities. Second is the water separated from the subducted slice in subduction zones and the last one is the mantle originated water.

## DEĞİNİLEN BELGELER

- Adam A., 1976: Quantitative connections between regional heat flow and the depth of conductive layers in the Earth's crust and upper mantle, *Acta Geodaetica, geophysica et Montanistica (acad.Sci., Hungary)* 11,503-509.
- Adam A., 1978: Geothermal effects in Formation of Electrically conducting zones and temperature distribution in the earth, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 17, 21-28.
- Adam A., 1987: Are there two types of the conductivity anomaly caused by fluid in the crust ?, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 45, 209-215.
- Brace W. F., 1971: Resistivity of Saturated Crustal Rocks to 40 km. based on Laboratory studies. *The structure and Physical Properties of The Earth's Crust* pp., 169-184. Edt. Heacock J.G. *Geophys. Monogr.No:14 Am. Geop. Un.*
- Caner B., 1970: Electrical conductivity structure in Western Canada and petrological interpretation, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 22: 113-129.
- Chapman D.S. 1986: Thermal gradients in the continental crust, In: *the nature of the lower continental crust*, pp. 63-70 eds. Dawson J.B. Carswell D.A., Hall J. & Wedepohl K.A., *Spec Pub., no.24 Geol.Soc.Lon.*
- Chapman D.S., ve Pollac H.N., 1977: Regional Geotherm and Lithospheric Thickness. *Geology*, 5, 265-268.
- Craford M.L., ve Holister L.S., 1986: Metamorphic fluids in the evidence from fluid inclusions, In: *Advances in Physical Geochemistry*, 5, 1-35, ed. Walter J.V., Wood B.J., Springer-Verlag
- Etheridge M.A., Wall V.J., Cox S.F., ve Vernon R.H., 1984: High Fluid pressures during regional metamorphism and deformation: implications for mass transport and deformation mechanisms, *Journal of Geophysical Research*, 89, 4344-4358.
- Feldman I.S., 1976: On the nature of conductive layers in the Earth's crust and upper mantle. In: *Geoelectric and geothermal studies*, ed. Adam A., *Academia Kiado, Budapest* pp.721-731.
- Garland G.D., 1975: Correlation between electrical conductivity and other geophysical parameters, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 10, 220-230.
- Glover P. W.J. ve Vine F.J., 1994: Electrical conductivity of the continental crust, *Geophysical research letters*, 21, 2357-2360.

- Glover P. W.J. ve Vine F.J., 1995: Beyond KTB - electrical conductivity of the deep continental crust. *Surveys in Geophysics*, 16, 5-36.
- Haak V. ve Hutton R., 1986: Electrical resistivity in continental lower crust, in *The nature of the lower continental crust*, pp.35-49, eds. Dawson, J.B. Carswell, D.A., Hall J., & Wedepohl K.H., *Spec. Publ. 24, Geol. Soc. London*.
- Hyndman R.D. ve Shearer P.M., 1989: Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results, *Geophysical Journal International*, 98, 343-365.
- Jones A.G., 1981: On a type classification of lower continental crustal layers under Precambrian regions, *Journal of Geophysics*, 49, 226-233,
- Jones A.G., 1987: MT and reflection: an essential combination, *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 89, 7-18.
- Jödicke B., Untiedt J., Olegmann W., Schulte L., ve Wangenitz V., 1983: Electrical conductivity structure of the crust and upper mantle Beneath the Rennish Massif, In: plateau uplift, Berlin, Heidelberg, ed. Fuchs, K., Springer-Verlag, pp.288-302
- Kaikkonen, P., Vanyan L.L., Hjelt S.E., Shilovsky A.P., Pajunpaa K., ve Shilovsky P.P. 1983: A Preliminary geoelectrical model of the Karelian megablock of the Baltic shield. *Physics of Earth and Planetary Interior*. 32, 301-305.
- Kay R.W., ve Kay S.M., 1986: Petrology and Geochemistry of the lower continental crust: an overview, in: *The nature of the lower continental crust*, pp.174-159 eds. Dawson J.B. Carswell D.A., Hall J. & Wedepohl K.A., *Spec. Pub.*, no.24 *Geol.Soc.Lon*
- Klemperer S.L., 1987: A relation between continental heat flow and seismic reflectivity of the lower crust., *J. Geophysics*, 61, 1-11.
- Lanthenbruch A.H., ve Sass, J.H., 1977: Heat flow in the United States and the thermal regime of the crust, In: *The Earth's Crust: Its nature and physical properties*, *Geophys. Geophys. Monogr. Ser. Vol.20. J.G. Heacock ed.*: PP.626\*675. Washington D.C.: Am. Geoph. Un.
- Lysak S.V., 1976. Heat flow geology and geophysics in the Baikal rift zone and adjacent regions, In: *Geoelectric and Geothermal Studies, Akademiai Kiado, Budapest pp.455-467*, Editor A. Adam.
- Marquis G, ve Hyndman R.D., 1992: Geophysical support for aqueous fluids in the deep crust: seismic and electrical relationships, *Geophysical Journal International*, 110, 91-105.
- Meissner R., Springer M., Murawsky B., Bartelsen B., Flüh E.R., ve Dürschner B., 1983: Combined seismic reflection-refraction investigations in the Rennish Massif and their relation to recent tectonic movements in the Rennish massif, In: plateau uplift, Berlin, Heidelberg, ed. Fuchs, K., Springer-Verlag, pp. 276-287.
- Olhoeft G.R., 1981: Electrical properties of granite with implications for the lower crust, *Journal of Geophysical Research*, 86, B2, 931-936.
- Pollack H.N. ve Chapman D.S., 1977: On the regional variation of heat flow, geotherms and lithospheric thickness *Tectonophysics*, 38, 297-296.
- Ringwood A.E., 1976: Phase transformations in descending plates and implications for mantle dynamics. *Tectonophysics*, 32, 129-143.
- Shankland J.T. ve Ander M.E., 1983: Electrical Conductivity, Temperatures and Fluids in the lower crust *Journal of Geophysical Research*, 88, B11, 9475-9484.
- Vanyan L.L., 1984: Electrical conductivity of the Earth's crust and its connection with fluid regime. In: *Crustal anomalies of electrical conductivity*, ed. Zhamaletdinov A.A., Nauka, Leningrad, pp.27-35
- van Zijl J.S.V., 1978: The relationship between the deep electrical resistivity structure and tectonic provinces in southern Africa. 1. Results obtained by Schullumberger soundings. *Trans. Geol. Soc. S. Africa.*, 81, 129-142.
- Wannamaker P., 1997: Comment on "The petrologic case for a dry lower crust" by Yardley B.W.D., and Valley J.W., on <http://nazca.cg.emr.ca/mtnet/fora/clc/pw.23Oct97.html>

Makalenin geliş tarihi: 8.06.1998

Makalenin yayına kabul tarihi: 21.05.1998

Received June 8, 1998

Accepted May 21, 1999