

ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖZELLİĞİNE GÖRE YER KABUĞUNUN YAPISI I: PREKAMBRIYEN KABUK

CONDUCTIVITY STRUCTURE OF THE EARTH CRUST I: PRECAMBRIAN CRUST

Aysan GÜRER

I.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü 34850 Avcılar - ISTANBUL

ÖZ

Doğal kaynaklı elektromanyetik alanlar, yer kabuğunun yüzeyinden başlayarak, mekanik sondajlarla ulaşamadığımız derinliklerine kadar nüfuz ederek, yer yüzeyinden kabuk tabanına kadar derin yapının araştırılmasına yardımcı olurlar. Bu yazıda, ilk olarak derin kabuk araştırmalarında kullanılan jeoelektromanyetik arazi yöntemleri tanıtarak, Yer iletkenliğini etkileyen fiziksel değişkenlere değinilmiştir. Daha sonra, yer yüzündeki Prekambriyen yaşlı bölgelerde saptanan elektriksel iletkenlik değerleri sınıflanmış ve farklı fiziksel koşullar altında gerçekleşebilecek elektriksel iletim türleri ışığında tartışılmıştır. Çalışmalar, alt kabukta gözlenen iletkenlik değerlerinin, bölgenin jeolojik yaşı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Prekambriyen yaşlı kalkan çekirdeklerinde, genç bölgelerin tersine, alt kabuk genelde yüksek öz dirençlidir. Kabuk araştırmaları için, jeoelektromanyetik ve sismik profillerin birlikte uygulandığı bölgelerde, elektriksel olarak yalıtkan olan alt kabuk katmanının, genelde iyi bir sismik aktarıcı olduğu gözlenmiştir. Laboratuvar deneyleri, Prekambriyen alt kabukta, granülit metamorfik fasiyesinin (susuz koşulların) egemen olması durumunda, alt kabuk için arazide gözlenen sismik ve elektriksel değişkenlerin elde edilebileceğini göstermiştir. Bazı Prekambriyen bölgelerde, kalkan çekirdeklerinin tersine, iletken bir alt kabuk bulunmaktadır. Bu bölgelerdeki yüksek iletkenliğin nedeni çok tartışmalı olmakla birlikte, Prekambriyen yaşlı alt kabukta grafit varlığı günümüzde en çok kabul gören açıklamadır.

Anahtar Sözcükler: Yerkabuğu, jeoelektromanyetik yöntemler, elektiksel iletkenlik, jeolojik yaş (Prekambriyen)

ABSTRACT

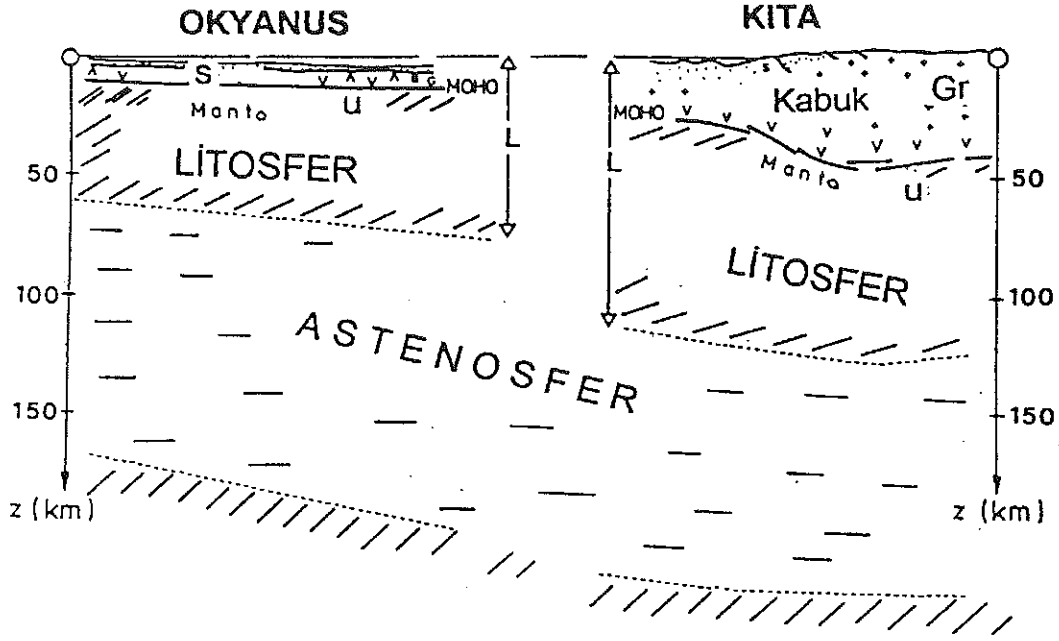
The natural sourced electromagnetic waves that propagate from the Earth's surface into the bottom of the crust, help us to investigate the deep crustal structures. In this paper, firstly, the electromagnetic methods applied for the investigation of the lower crust are introduced and the physical conditions that affect the electrical conductivity are mentioned. Secondly, the classified conductivity values in the Precambrian areas are reviewed and discussed in the light of the different conductivity mechanisms that may occur in various Physical conditions. The studies showed that the conductivity values observed in the lower crust are related to the geological age of the region. The lower crust is generally resistive in the cores of the Precambrian aged big shields. The results of the seismic and electromagnetic methods where they are applied together for regional crustal studies, showed that the lower crust is seismically transparent in Precambrian areas where it is electrically resistive. The laboratory measurements revealed that the seismic and electrical parameters observed for the lower crust can occur in the granulite metamorphic facieses (anhydrous conditions). There are some Precambrian regions that show a conductive lower crust. Although the reason of the such conductivity anomalies is rather controversial, the most appropriate explanation is the graphite existence in the lower crust

Key Words: Earth's crust, conductivity, geological age (Precambrian), geoelectromagnetic methods.

GİRİŞ

Yer'in en dış katmanı olan kabuk hakkındaki ilk bilgilerimiz, yer yüzeyinde yapılan jeolojik gözlemlerden ileri gelmektedir. Yer kabuğu, kıtasal alanlarda, çökeller, gnayslar, granit, granodiyorit, gabro, amfibolit, granülit gibi kayalardan oluşmuştur. Okyanusal kabuk ise sedimanlar, bazalt ve gabro ve yer yer serpantinlerden oluşmuştur. Kıtasal ve okyanusal alanlarda yer kabuğu ve üst man-

to katmanları ve oluştukları kayaç tipleri şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Kabuksal kayaçların mineralojik ve kimyasal bileşiminde, feldspatların diğer minerallere oranı %50 dir. Bunların büyük bölümü Ortoklas $KAlSi_3O_8$ ve Albit $NaAlSi_3O_8$ (birlikte %30) ve Plajioklas ($NaAlSi_3O_8$ ve $CaAl_2Si_2O_8$) (%19) tan oluşmuştur. Kimyasal içerikler incelenirse, yer küre kabuğunun silikat bile-



Şekil 1. Okyanusal ve kıtasal kabuk ve üst manto katmanlarını ve oluştukları kayaç türlerini gösteren şematik kesit. Gr, granitik-gneysik üst kabuk mazemesi, BG, bazaltik ve gabroyik alt okyanusal kabuk, S, çökeller, U, üst manto ultramafik malzemesi ve L, litosfer (Meisner 1986).

Figure 1. Schematic cross-section of crust, mantle lithosphere and asthenosphere for oceanic and continental structures; Moho discontinuity between crust and mantle boundary; Gr, granitic-gneissic material of upper crust; BG, basaltic-gabbroic lower oceanic crust, s, sediments, U uppermost part of the mantle (ultramafic material); L lithosphere, (after, Meisner 1986).

şiminde olduğu görülür. Kıtasal kabukta, kayaçların bileşimindeki SiO_2 oranı % 60 ve okyanusal kabukta %49 dur.

İlk kez, Yugoslav sismolog Mohorovicic 1909 Balkan depremini inceleyerek, sismik P dalgası hızlarının 10 km' nin birkaç katı derinliklerde arttığını gözlemiştir. Yer içinde P dalgası hızının arttığı bu bölge, katı ve kırılğan yer kabuğunu, mantodan ayırır ve Mohorovicic süreksizliği olarak bilinir. Sismolojik bulgulara göre, kabuk içinde yayılan P ve S dalga hızları (V_p , V_s) sırasıyla 7.6 km/s ve 4.4 km/s değerlerinin altında büyüklükler alır. Mohorovicic'den çok önceleri, Bouguer'in 18. yüzyılda, sarkaç ölçmeleri ile saptadığı yoğunluk değişimi de yoğunluğu kabuktan farklı olan, bir başka katmanın (manto) varlığına bir işarettir. Gravimetrik çalışma bulgularına göre, kabuksal kayaçların yoğunluğu 3.1 gr/cm^3 den düşüktür.

Yer elektrik özelliklerine göre kabuk yapısına ilişkin ilk bilgiler ise, çok daha sonra 1970'li yıllarda derin erimli jeoelektromanyetik tekniklerin yaygın kullanılmaya başlaması ile elde edilmiştir. Bu güne kadar yapılan çalışmalardan elde edilen

verilerden, genç (Fanerozoik) bölgelerde, yaklaşık 20 km. derinlikte (alt kabuğun üst kısmı) çok iletken bir katmanın varlığı belirlenmiştir. Daha yaşlı olan Prekambriyen alanlarda ise, alt kabuk katmanını genelde çok daha dirençlidir (düşük iletkenliklidir).

Kayaçların elektriksel iletkenliği, sıcaklık, basınç, gözeneklilik gibi farklı pek çok fiziksel değişkenden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu özellik, yer bilimcilere, EM yöntemler yardımıyla, yerin iletkenlik yapısını saptayarak, yer kabuğunun ulaşmadığımız derinliklerinde bulunan fiziksel koşullar hakkında bilgi edinme yolunu da açmaktadır. Bu amaçla, Yerküre'nin farklı bölgelerinde jeoelektrik ve jeoelektromanyetik yöntemlerle ölçmeler yapılmıştır. Günümüze kadar yapılan bir çok çalışmadan elde edilen bilgiler, yer kabuğunun elektriksel özelliklerinin bölgeden bölgeye ve farklı fiziksel koşullara bağlı olarak önemli bir değişim gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, jeoelektromanyetik yöntemlerle kabuk içinde saptanan iletken zonların nedenini tanımlayarak bu zonları belirli bir yeraltı yapısı ile ilişkilendirmek oldukça karmaşık bir iştir. Ancak arazi ve laboratuvar

ölçmelerinin hızla artması ile gelişen bilgiler, yer içinin elektriksel iletkenlik yapısı hakkında geçerli genel bilgiler oluşturmak amacıyla bazı sınıflamalar yapabilmemize yardımcı olmuştur. (Haak ve Hutton 1986, Hynman ve Shearer 1989, Marquis ve Hynman 1992, Jones 1981, Jones 1987). Bununla beraber, belirli jeolojik yapılar gözetilerek, yer kabuğunu tam olarak temsil eden kesin genellemelere ulaşabilmek için, ilk olarak, Dünya'nın bütün bölgelerinden arazi verilerinin eksiksiz elde edilmesi gerekir. Oysa EM yöntemlerle kabuk araştırmaları, yer yüzeyindeki her bölgede henüz uygulanamamıştır. Örneğin ülkemizde, Türkiye genelini kapsayan bir kabuk projesi oldukça yenidir (1995 yılında başlamıştır).

Yer kabuğunun en eski kayaçları (ilk kayaçları) Prekambriyen döneminde gelişmiştir. Prekambriyen yaşlı kabuğa, tipik olarak tektonik etkinliğin bittiği durağan kristalin kalkanlarda rastlanır. Türkiye'de kabuk daha genç olmakla birlikte, bazı bölgelerde (Amnoslar, Derik, v.b.) Prekambriyen yaşlı kayaçlar görülmektedir. Genç (Fanerozoik) kabukla karşılaştırıldığında, Prekambriyen kabuk, olgunlaşmış ve gelişimini tamamlamıştır. Bu durum, gerek jeofizik (sismik, elektrik ve ısı akısı), gerekse jeolojik (tektonik, jeokimyasal ve petrografik) bulguların, Fanerozoik ve Prekambriyen yaşlı bölgeler için oldukça farklı olmasına yol açmıştır. Dolayısıyla, kabuk araştırmalarında bulgular, jeolojik yaş gözetilerek sınıflanmalıdır.

Laboratuvar çalışmaları; metalik mineraller, sıcaklık artışı, kayaç gözeneklerindeki su içeriği, suyun tuzluluğu, kayaç gözenekliliği, gözenek geometrisi, kayaç kimyası, basınç gibi etmenlerin, Yer iletkenliğini arttırdığını göstermiştir. Arazi ve laboratuvar verilerine göre, yer kabuğunda iletkenlik anomalilerine aşağıdaki özelliklerden biri ya da bir kaçını neden olabilir:

- (1) kayaç gözenekleri ve kırıkları içinde bulunan tuzlu su,
- (2) yer kabuğunda bulunan iletken katı mineraller, örneğin grafit ve sülfürlü mineraller v.b.,
- (3) kayaç gözenekleri içlerinde bulunan yüksek sıcaklıktaki akışkanlar,
- (4) yüksek sıcaklıklarda kayaçlarda oluşabilecek kısmi ergimeler.

Bu yazının amacı, bu güne dek sağlanan bilgileri derleyerek, farklı jeolojik alanlarda EM yöntemlerle elde edilmiş olan sonuçları sunmaktır. Bu

girişim, halen sürmekte olan ve başlatılması planlanan araştırmalara, sonuçların jeolojik yapılarla ilişkilendirilmesi yönünde katkı sağlayacaktır. Ayrıca, araştırmacılara, önceki sınıflamalarla uyumsuz olan yeni bulguları saptama kolaylığı sağlayarak, bilinen sınıflamaların geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Bu yazıda, ayrıca, elektriksel iletkenliği etkileyen fiziksel değişkenler tartışılmıştır. Bu fiziksel değişkenlerin ve kayaç türlerinin etkisi de dikkate alınarak, Prekambriyen alt kabuğun jeoelektrik yapısını oluşturabilecek kayaçlar ve koşullar hakkındaki savlar açıklanmıştır.

KAYAÇLARIN İLETKENLİĞİNİ ETKİLEYEN FİZİKSEL DEĞİŞKENLER:

Yerkabuğunun jeoelektromanyetik yöntemlerle araştırılmasında, arazide yapılan ölçmelerle, alt kabukta farklı derinliklerde, üst kabuğa göre beklenenden daha yüksek iletkenlikli zonların (anomalilerin) varlığı belirlenmiştir. Bu yüksek iletkenliklere neden olan yeraltı kayaçları ve bu derinliklerde egemen olan fiziksel koşullar belirlenebilir mi? Bu sorunun yanıtı yer içi iletkenlik özelliklerine laboratuvar deneyleri ile benzeşim yapılarak araştırılmıştır.

Yer kabuğunu oluşturan kayaç örnekleri üzerinde laboratuvarda yapılan deneyler ile, bu kayaçların elektriksel iletkenliklerinin, pek çok fiziksel değişkenden etkilendiği belirlenmiştir. Bunlardan bazıları, sıcaklık, kayaç türü, su içeriği, basınç, tuzluluk, gözeneklilik olarak sıralanabilir.

Kayaç türü: Yer kabuğunu oluşturan kayaç türleri arasındaki iletkenlik farkı, logaritmik ölçekte yedi kat olabilmektedir (örneğin 0.1-1000000). Kayaç örnekleri üzerindeki ölçmeler, genel olarak çökel kayaçların, sokulum ve başkalaşım kayaçlarından çok daha iletken olduğunu; sülfürlü ve grafitli minerallerin ise yer kabuğunu oluşturan malzemeler arasında iletkenliği en yüksek olan kayaç grubunu oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Su içeriği: Arazi ve laboratuvar sonuçları, kayaçlardaki su içeriğinin, öz direnci (iletkenliğin tersi) en çok etkileyen fiziksel özellik olduğunu göstermiştir. Gerçekten de bir çok kayaç türü üzerinde yapılan deneyler, kayaç iletkenliğinin kayacın içerdiği su ile logaritmik olarak 5-15 kat arttığını ortaya koymuştur. Örneğin, kuru ve tuzlu suya doygun Westerly granit örneği üzerinde yapılan (Olheft

1981) ölçmelere göre, ıslak granit oda sıcaklığında, kuru halinden 12 kat daha iletkeçdir. Kısmen ergitilmiş, El'dzurta granit örneğine farklı oranlarda su ekleyerek yapılan çalışmalar (Lebedev 1975), yalnızca %0.3 ağırlıkta su eklenmesiyle bile, kayaç özdirençinin logaritmik olarak bir kademe düştüğünü göstermektedir. Gerek gözenekli katı kayaçlarda, gerekse kısmen ergimiş kayaçlarda, su içeriğinin artmasıyla özdirenç büyük ölçüde düşmektedir.

Sıcaklık: Elektriksel iletkenliği en çok etkileyen değişkenlerden bir diğeri sıcaklıktır. Olheft (1981) Westerly granit örneği üzerinde yaptığı ölçmelerde, sıcaklığın 25°C den 1200°C ye kadar artması ile kuru granitte özdirençin logaritmik ölçekte 13 kat düştüğünü ortaya koymuştur. Benzer bir deney tuzlu suya doymun granit için düşüşün logaritmik ölçekte 3 kat olduğunu gösterir. Sıcaklık etkisi ile yüksek iletkenlikli kabuksal zonların oluşumunda, suya doymun kayaçların türü de önemli rol oynar (Glover ve Vine 1994). Bazik ve asidik bileşimli kayaçların iletkenlikleri özellikle 300-350°C üstündeki sıcaklıklarda birbirinden farklı değişim göstermektedir. Bu sıcaklıklara ulaşıncaya kadar, hem asidik hem bazik kayaçların iletkenliği artarken, daha yüksek sıcaklıklarda, asidik kayaçlarda iletkenlik hızla düşmekte, fakat bazik kayaçlarda iletkenlik artmaya devam etmektedir.

Gözeneklilik: Doğada kayaçlardaki elektriksel akım iletiminin önemli bir bölümü elektrolitik yolla (tuzlu su içindeki iyonların serbest dolaşımı ile) sağlanmaktadır. Dolayısıyla akışkanın kayaç içindeki dolaşımını sağlayan kayaç geçirirliiği ve gözenek oranı da kayacın iletkenlik özelliklerini dolaylı olarak etkileyecektir. Suya doymun gözenek oranı ve kayaç özdirenç arasındaki ilişki Archie yasasından bilinmektedir. Kayaç gözenekliliği toplam kayaç hacminin %3'ne ulaşıncaya kadar arttırıldığında iletkenlik artmakta ancak %3 aştığında, kayaç iletkenliği değişmemektedir (Hyndman ve Shearer 1989). Gözenek oranının yanısıra, gözenek yüzeyleri arasındaki açılar da, elektriksel iletkenliği etkiler. Gözenek oranı gibi, gözenek bağlantı açılarında hesaba katarak, gözeneklilik-iletkenlik ilişkisi "eşdeğer gözeneklilik" kavramı ile tanımlanmıştır (Hyndman ve Shearer 1989). Buna göre, gözenekler arası bağlantı, en iyi 0° (gözenek yüzeyleri birbirine paralel ve bağlantı yolu tüp biçiminde) yüzey açılı kanallarla sağlanırken, taneciklerin birbirine tam teğet olarak temas ettiği 180° yüzey açısı olan (iç açılı toplam 180°

olan üçgen biçimli kapalı bir alan) tam geçirimsizlik durumunu oluşturur. Hyndman ve Shearer (1989) gözeneklilik-geçirirliiği ilişkisini farklı yüzey ıslanma açılına göre hesaplamışlar ve alt kabuk için saptanan iletkenlik değerlerinin (1-100 ohm.m) en çok %3 porozite ve 50-60° açılı ile sağlanabileceğini bulmuşlardır.

Tuzluluk: Kayaç gözeneklerinde bulunan suyun tuzluluk oranı da, kayaç iletkenliğini değiştirmektedir. Quist ve Marshall (1968) tarafından NaCl konsantrasyonu farklı olan tuzlu çözeltinin özdirenç değişimi (500°C sıcaklık ve 4 Kbar basınç altında) ölçülmüş ve tuzluluk arttıkça özdirençin düştüğü (iletkenliğin arttığı) belirlenmiştir. Ancak, tuzluluktaki artış oranı ile iletkenlikteki düşüş oranını nicel olarak bire bir eşit değildir. Gerçekten de, Nesbit (1993) kabuksal koşullarda çözeltideki tuz oranının iki kat artması ile iletkenliğin (azalmakla birlikte) logaritmik ölçekte iki kat düşmediğini göstermiştir.

Basınç: Kayaçların elektriksel iletkenliklerinin, basınca bağlı olarak değiştiği de bilinmektedir. Yüzeydeki kayaçların ağırlığının derindeki kayaçlar üzerine yaptığı litostatik basınç ile kayaç gözenekleri daralır ve belli ölçüde kapanır. Bu basınç kapatma basıncı olarak adlandırılır. Yer kabuğundaki pek çok kayaçta, gözenekler arası bağlantı ince gözenek boğazlarıyla, elektiriksel iletim ise gözenekler arasında serbestçe dolaşan suyun taşıdığı iyonlarla sağlanır. Bu türden kayaçlarda iletkenlik kapatma basıncı ile azalırken, doğada daha az bulunan grafitli kuru kayaçlarda kapatma basıncı tanecikler arası yüzey bağlantısını artırarak, kayaç iletkenliğini arttırmaktadır (Glover ve Vine 1995). Ancak, kayaç iletkenliği sıcaklık ile onüç kat değişirken (artarken), kuru grafitli kayaçlar dışındaki kayaçlarda basınç ile iletkenlik değişimi (artışı) iki kat bile olmamaktadır. Dolayısıyla alt kabukta gözlenen iletkenlikleri yalnızca basıncın sağladığı düşütülmemektedir.

Kısmi ergime: Kayaçların sıcaklık ve basınç etkisi ile kısmi olarak ergimesi iletkenliği önemli ölçüde arttırmaktadır. Kısmi ergime, özellikle üst mantoda (astonosferde) gözlenen iletkenlik anomalilerinin (beklenenden yüksek iletkenlik değerlerinin) açıklanmasında önem taşımaktadır. Yer kabuğunda gözlenen anomalilerin genel nedeni ise kısmi ergimeye kolaylıkla bağlanamamaktadır. Sulu koşullarda, kabuk içinde kısmi ergimenin başlayabilmesi için sıcaklık en az 700°C civarında ol-

malıdır. Ancak, yer kabuğu için normalde sıcaklığın üst sınırının 700°C yi geçmediği bilinmektedir (Craford ve Holister 1986).

Bütün bu sonuçlar, kayaç iletkenliğini nicel olarak en çok değiştiren fiziksel etkenlerin sırasıyla su içeriği, sıcaklık ve kayaç türü olduğunu göstermektedir. Kayaç iletkenliğinin artması için gözeneklerdeki suyun tuzlu olması, bir başka deyişle su içinde elektriği taşıyan iyonların bulunması ve gözenek oranı ve bağlantılarının tuzlu suyun serbest dolaşımına izin vermesi gereklidir. Dolayısıyla tuzluluk ve gözeneklilik, alt kabukta gözlenen iletkenlik değerlerinin sağlanmasında, pek çok kez gerekli olan iki niteliktir.

YER KABUĞUNDA ELEKTRİKSEL İLETİM MEKANİZMALARI

Üst kabuk için gözlenen özdirenç değerleri jeolojik yaştan bağımsızdır ve üst kabuk genellikle yüksek özdirençlidir. Üst kabukta gözlenen yüksek özdirençleri açıklamak için bir kaç farklı iletim mekanizması öne sürülmüştür. Jones (1987) üst kabuğun dirençli olmasını üst kabuğu oluşturan granitik kristalin kayaçların serbest su içermemesine bağlamaktadır. Bir başka deyişle, üst kabuk özdirençinin önemli bir bölümü, elektronik iletim (katı mineral iletimi) ile sağlanmaktadır. Üst kabuğu oluşturan kristalin kayaçlar asidik bileşimli granitik ya da granodiyoritik kayaçlardır. Bu kayaç örnekleri üzerindeki sıcaklık ve basınç kontrollü deneyler (Glover ve Vine 1995), tamamen kuru granit ve granodiyoritlerin arazide gözlenenden üç kat yüksek özdirenç verdiklerini ortaya koymuştur. Dolayısıyla, alt kabuk kayaçları gibi, üst kabuk kayaçlarında da kuru kayaç iletkenliğinin (yalnızca elektronik iletimin) arazide gözlenen iletkenlikleri sağlamaya yeterli olmadığı belirlenmiştir. Üst kabuk sıcaklıklarında yapılan laboratuvar deneyleri, su içermek koşulu ile üst kabuk için yeryüzünde gözlenen özdirençleri, asidik kayaçların sağlayabildiğini göstermiştir. Dolayısıyla, gözlenen yüksek özdirençler, üst kabuğun kuru olmasından çok kayaç türünün alt kabuktakinden farklı olması ile açıklanmaktadır (Glover ve Vine 1995).

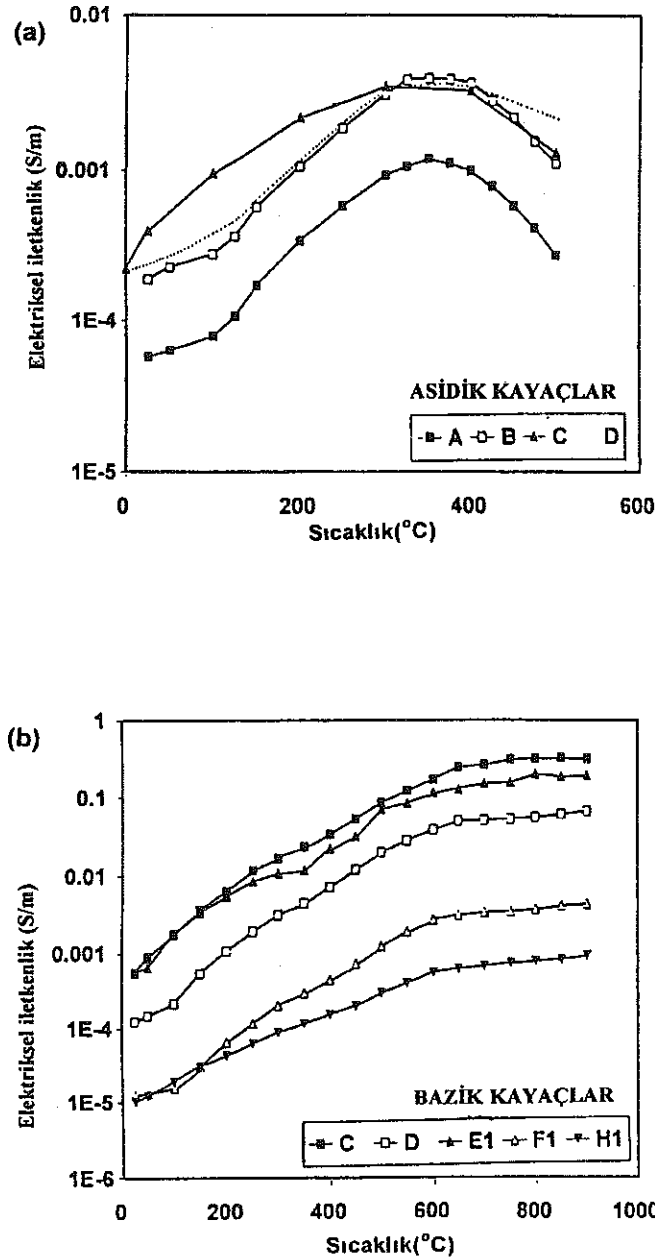
Kayacı katı kısmı olmaksızın, gözenekleri içersinde bulunabilen tuzlu su üzerinde (0.1 mol. NaCl çözeltisi), Quist ve Marshall'ın (1968) yaptığı laboratuvar deneyleri, sıcaklık 350°C'ye ulaşınca kadar artırılırsa, çözelti özdirençinin düştüğünü göstermiştir. Bu deneye göre, daha yüksek sı-

caklıklarda, çözelti gaz fazına geçer ve özdirenç aniden artar. Kayaç özdirençinin sıcaklığa bağımlılığının; içerdiği çözeltinin özdirençinin sıcaklığa bağlı değişiminden kaynaklandığı düşüncesi (Quist ve Marshall 1968), daha sonra gelişen teknoloji yardımı ile, suya doymuş kayaçlar üzerinde yapılan ölçmelerle de denenmiştir (Glover ve Vine 1995, 1994). Glover ve Vine (1994) yaptıkları deney düzeneği ile suyla doymuş asidik kayalar için sıcaklığı basıncı da kontrol ederek 500°C ye çıkartmayı başarmışlardır. Bu araştırmacılar, asidik kayaçlar için Şekil 2a'da görüldüğü gibi maksimum elektriksel iletkenliğe, 350°C de ulaşmışlardır. Hem bu değer hem de asidik kayacın sıcak-iletkenlik davranışı, salt tuzlu suyun (0.1 mol NaCl çözeltisinin) sıcaklık-iletkenlik davranışının tamamen aynıdır. Dolayısıyla, asidik kayaçların katı kısmının (kayaç matrisi) yalıtkan bir matrisi gibi davrandığı ve iletkenliğin tamamen kayacın taşıdığı çözeltinin iletkenlik özelliklerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, hem salt tuzlu su için hem de kayaçlar için laboratuvar koşullarında daha yüksek sıcaklıklarda (>350°C) iletkenlik değeri düşmektedir. Bilindiği gibi çözelti gaz fazına geçtiğinde çözeltinin yoğunluğu ve buna bağlı olarak da elektriği ileten iyonların yoğunluğu düşer. Sonuçta, sıcaklık arttıkça artan iletkenlik, akışkanın gaz fazına geçtiği daha yüksek sıcaklıklarda aniden düşer. Ancak, yer içindeki basınç, laboratuvar koşullarında uygulanandan fazladır. Bu nedenle kayaç içindeki çözelti gaz fazına geçemez ve sıvı fazda kalır. Dolayısıyla, alt kabuk derinliklerinde, suyla doymuş asidik kayaçlar için 350°C nin üzerindeki sıcaklıklarda, iletkenlik duyarsızlaşacak ve 350°C civarında sabit kalacaktır. Suya doymuş asidik kayaçlarda gözlenen sıcaklık-iletkenlik davranışı, NaCl çözeltisi için gözlenen davranışın aynıdır. Bu benzerlik, asidik kayaçlarda elektriksel iletimin kayacın katı kısmı üzerinden (elektronik iletim) değil, içerdiği çözelti aracılığı ile (elektrolitik yolla) gerçekleştiğini ortaya koyar.

Aynı deney düzeneği ile tuzlu suya doymuş bazik kayaçların sıcaklık-iletkenlik davranışı da basınç denetiminde incelenmiştir (Glover ve Vine 1995). Bu çalışmalar, bazik kayaçlarda elektriksel iletimin, 300°C ye kadar olan sıcaklıklarda asidik kayaçlarla aynı şekilde davrandığını ve bu sıcaklıkların üzerinde, asidik kayaçlardakinin aksine, kayaç iletkenliğindeki artışın sürdüğünü ortaya koymuştur (Şekil 2b). Bu sonuç, suya doymuş bazik

kayaçlar için 350°C nin üzerindeki sıcaklıklarda elektrolitik (sudaki iyonlarla) olmayan bir iletim mekanizmasının rol oynadığını göstermektedir. Alt kabuk genelde bazik kayaçlardan ve çoğunlukla da

amfibolitten oluşmuştur. Amfiboliti oluşturan amfibol minerali uzun eksenli boyunca elektriği iyi iletmektedir. Dolayısıyla, 350°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bazik kayaçlarda iletkenliğin artmaya



Şekil 2. 0.5 mol NaCl ergiyiği ile doyurulmuş kayaç örnekleri üzerinde elektriksel iletkenlik ölçmeleri, Kapatma basıncı 0.2 GPa, gözenek sıvısı Basıncı 0.18 GPa, (a) Asidik kayaçlar üzerinde ölçmeler, sıcaklık 500°C'ye kadar artırılmıştır, A:Granit (porozite % 0.5), B:Granodiyorit (% 0.7), C:kuramsal bir egridir ve elektriksel iletkenlik, kayaç matrisinin iletkenliği olmaksızın yalnızca gözenek sıvısı öz direnç ile Archie kanunundan hesaplanmıştır. D: 250°C'den düşük sıcaklıklarda mineral taneciği genişmesi ve bu sıcaklığın üstündeki sıcaklıklarda yeniden kırılma olguları göz önüne alınarak, kuramsal eğrinin yeniden oluşturulmuş hali (b) Bazik kayaçlar üzerinde ölçmeler, sıcaklık 900°C'ye kadar artırılmıştır. C:Amfibolit gnays (porozite % 1.02), D: Amfibolit gnays (% 0.89), E1: Bazaltik amfibolit (% 0.68), F1: Bazik 2-piroksen granülit (% 0.78), H1: Ortopyroksenit (% 0.4) (Glover ve Vine 1995).

Figure 2. The electrical conductivity measurements on several rock specimens that are saturated with 0.5 mol NaCl brine when subjected to a constant confining pressure (0.2 GPa), pore fluid pressure (0.18 GPa), (a) measurements are on acidic rock specimens, A: Granite (porosity 5%), B: Granodiorite (7%), C: electrical conductivity of a model rock with conduction occurring through a 0.5M NaCl pore-fluid with no matrix conduction. It has been generated using the empirical relationship by Archie, temperatures up to 500°C. (b) measurements are on basic rock specimens, C: amphibolite gneiss (1.02% porosity), D: amphibolite gneiss (0.89%), E1: Basic amphibolite (0.86%), F1: Basic pyroxene granulite (0.78%), H1: Orthopyroxeneite (0.4%), (after, Glover and Vine 1995).

devam etmesi, amfibol gövdeleri boyunca gerçekleşen elektronik iletimin sıcaklıkla artmasına bağlanmaktadır. Sonuç olarak suya doygun asidik kayalarda yalnızca elektrolitik yolla gerçekleşen elektriksel iletim, suya doygun bazik kayalarda elektrolitik ve elektronik (350°C ve yukarıdaki sıcaklıklarda) iletim mekanizmalarının işbirliği iletimliliği oluşturmaktadır.

Üst kabukta elektriksel iletim asidik kayalar içindeki tuzlu sular aracılığı ile elektrolitik yoldan sağlanmaktadır. Genç (Fanerozoik) alt kabukta ise bazik kayalar içindeki tuzlu sularla elektrolitik yolla sağlanan iletkenlik, yüksek sıcaklıklarda katı mineral gövdeleri boyunca elektronik iletimin de katkısı ile sürmektedir. Prekambriyen yaşlı alt kabukta gözlenen yüksek öz dirençlerin, amfibolit granülit fasiyesinde yani susuz koşullarda ve yüksek karbon çökelişi (grafit) ile oluşturulduğu düşünülmektedir. Yaşlı durağan alanlarda alt kabukta gözlenen iletken zonları oluşturan mekanizma tartışmalıdır ve yeterli bilgi için çok sayıda araştırma yapılması gereklidir.

YER KABUĞU İLETKENLİĞİNİN ARAZİDE ÖLÇÜLMESİ

Kabuksal iletkenlerin araştırılmasında başlıca dört yöntem kullanılır.

- 1) Doğru akım ile öz direnç-derinlik sondajı
- 2) Manyetotelirik (MT) yöntem
- 3) Jeomanyetik derinlik sondajı "Geomagnetic Depth Sounding) (GDS) veya Weise (ya da Parkinson) vektörü yöntemleri
- 4) Yapay kaynaklı Elektromanyetik (EM) yöntemler

Birinci yöntem dışındakiler indüksiyon yöntemleri olarak adlandırılır. Bu yöntemin kökü uygulamalı jeofizik alanında Schulumberger ve diğer araştırmacıların çalışmalarına dayanır. Doğru akım yöntemleri, genellikle kabuğun sığ derinliklerinde yer alan ekonomik hedefleri saptamaya dönük uygulanmaktadır. van Zijl (1975), derin kabuk araştırmalarında doğru akım yönteminin uygulanmasına dönük bir girişimde bulunmuştur. Doğru akımı alt kabuk derinliklerine ulaştırabilmek için, çok uzun kablolar ve çok yüksek bir enerjiye ihtiyaç vardır ve van Zijl (1975), henüz kullanıma geçmemiş güç aktarım hatları ve telefon hatlarından yararlanarak daha derine erim sağlamaya çalışmıştır. Yeterince

güçlü bir doğru akımı alt kabuk derinliklerine gönderebilmek çok zor bir işidir. Çoğunlukla akım ya çok iletken sığ bir katman içinde akmayı yeğleyerek ya da çok yalıtkan bir katman tarafından engellenerek derine aktarılamaz ayrıca ve bir enerji hatında bulunabilecek uzunlukta kabloları her zaman sağlamak da olanaksızdır. Bu nedenle doğru akım yöntemleri derin kabuk araştırmalarında yaygın olarak uygulanabilir yöntemler olamamışlardır. Derin erimli olan ve ayrıca enerji üretmeyi gerektirmeyen doğal kaynaklı indüksiyon yöntemleri (MT, GDS), bu zorlukları taşımadıklarından, alt kabuk araştırmalarında en çok kullanılan yöntemlerdir.

İkinci ve üçüncü yöntem, manyetik alanın, kaynağı yer küre dışında olan, doğal kaynaklı değişimlerini ya da titreşimlerini (daha yüksek frekanslı değişimlerini) kullanır. Jeomanyetik derinlik sondajında manyetik alanın normal (sakin) S_q günlük değişimleri ve manyetik alanın bozulmuş D_{st} türü değişimlerinden yararlanılmaktadır. Kaynağı Manyetosferde olan, doğal kaynaklı jeomanyetik alanlar, yer içinde indüklenen akımlar tarafından değiştirilir. Yer içinden akan bu akımlar, kayaların elektriksel iletkenliklerine ve dalga frekansına bağlı olarak derine doğru söneler. Elektromanyetik alanların, iyi bir iletkene nüfuz etmesi, kötü bir iletkene nüfuz etmesinden çok daha zordur. Bu olay deri olayı olarak bilinir. İndüklenen akımların oluşturduğu manyetik alanlar kaynak alana (birincil alana) eklenerek, birincil alanı değiştirirler. Dolayısıyla elektrik ve manyetik alanların yer yüzünde gözlenen bileşenleri, kaynağı yerin dışında olan alanlarla yer içinde indüksiyon ile üretilen alanların bir toplamıdır. Manyetotelirik yöntemde yer yüzeyinde Elektrik alanın E_x , E_y ve manyetik alanın H_x , H_y , H_z bileşenleri, yer yüzeyinde belirlenen gözlem noktalarında ölçülür. Manyetik ve elektrik alanların birbirine dik bileşenleri kullanılarak, yer yüzeyinde etkin empedans $Z(\omega)$ hesaplanır. Burada ω açısal frekanstır.

$$Z(\omega) = E_x / H_y$$

Bu yaklaşımda ρ_a görünür öz direnç, Cagniard bağıntısından (Cagniard 1953) aşağıdaki gibi verilir.

$$\rho_a(\omega) = (1/\mu_0 \omega) |Z(\omega)|^2$$

Burada μ_0 ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$) havanın manyetik geçirgenliğidir. Empedans ve görünür öz direnç fre-

kansın bir fonksiyonudur. Elektromanyetik dalgaları oluşturan ve yer yüzeyinde ölçülen zamanla değişken elektrik ve manyetik alanlardan, periyodu düşük olanlar sığ derinliklere nüfuz ederken periyodu yüksek olanlar yer içinde daha büyük derinliklere doğru yayınırlar. Dolayısıyla yukarıda anlatılan yöntemde yerin yüzeyden derine doğru değişen elektrik yapısını ortaya koymak mümkündür.

Manyetotelürik yöntem, kabuk araştırmalarında en çok kullanılan EM yöntemidir. Bunun nedeni, derin erimli olmasının yanı sıra, ölçme ve değerlendirme alanında sağlanan gelişmelerle yeraltı yapılarını daha duyarlı ve yüksek çözünürlükle saptama olanağı vermesidir. GDS yöntemi ayrırlılığın az oluşu ile bilinir, kaynağı kontrollü elektromanyetik yöntemler ise hem arazide konuşlanma taşınmalarındaki zorluklar, hem de genellikle yorum yöntemlerinde gelişmelerin ilerleme aşamasında olması nedeniyle güçlükler taşır. Bununla beraber MT yöntemin yorumunda bazı sorunlar da vardır. Bunlar, 1) düşey yönde ayrırlılık 2) statik kayma ve 3) ölçme istasyonu yakınında deniz, ya da çökel dolu bir büyük vadi türündeki iletken yapılar bulunması nedeniyle oluşabilecek akım yoğunlaşması sorunlarıdır. Düşey yönde ayrırlılık için, 1) tek bir alt kabuk katmanı ile kendi içinde katmanlanmış bir alt kabuk katmanını ayırmak için ölçmelerdeki standart hatanın, (özellikle alt kabuksal derinliklere nüfuz eden ve MT sinyallerin zayıf olduğu 0.1-10 sn periyodunda) %1 den küçük olması gerekir. 2) bir iletken katmanın altında yer alan ikinci bir iletken katmanı bir boyutlu olarak bulmak zordur. Böyle bir yapı yüksek duyarlılıklı bir tepki fonksiyonunun, yeterli sayıda ölçme istasyonu olmak koşulu ile iki boyutlu değerlendirmesi ile mümkündür (Jones 1987). Statik hata, yüzeye yakın bozucu küçük kütlelerin etkisi ile MT görünür öz direnç eğrilerinin düşey eksen (öz direnç eksenini) doğrultusunda, her bir periyottaki görünür öz direnç değerinin bir sabitle çarpılarak, belli ölçüde yukarı veya aşağı kayması anlamındadır. Faz değerleri ise yüzeye yakın bozucu kütlelerin varlığından etkilenmez. Faz eğrilerinde herhangi bir kayma gözlenmez. Statik kayma gösteren öz direnç eğrilerinin faz eğrisi ile birlikte yapılan bir boyutlu ters çözümü sonucunda, katman geometrisinin korunduğu, ancak, katman sınırlarının (derinliklerinin) değiştiği bilinmektedir (Jiracek 1990). Dolayısıyla statik kayma içeren eğrilerin değerlendirilmesinde düşey yönde katman sınırları doğru olarak saptanamayacaktır. Bu sorunlar son yıllarda alet

teknolojisinde sağlanan gelişmelerle, istenen frekanslarda %1 den daha az standart sapma ile ölçüm yapabilen MT sistemlerin geliştirilmesi ve statik kayma etkisini düzeltecek pek çok yeni yöntemin (Jiracek 1990) devreye girmesi ile büyük ölçüde giderilmiştir. 3) elektriksel akımlar çok iletken yapıların içinden akmak eğilimindedirler. Bu olay akım yoğunlaşması olarak bilinir. Ölçme istasyonu bir deniz yakınıdaysa, yeraltında iletken bir yapı olmasa bile MT eğrilerinde iletken bir katmanın varlığı belirebilir. Bundan kaçınmak için mümkünse istasyonu denizden uzak ve dirençli kayalar üstüne kurmak yararlı olmaktadır.

Ancak bütün bu sorunlara karşın, eski teknoloji ile yapılmış ölçmelerle bile, alt kabuk derinliği, MT yöntemle oldukça iyi bir biçimde saptanmıştır. Eski yüzey ısı akısı ve iletkenlik verilerinden bulunan iletken katmanın üst yüzeyine olan derinlikler ve sıcaklıkların çok uyumlu bir dağılım göstermesi (Shankland ve Ander 1983) bunun bir kanıtıdır.

Üçüncü yöntem ise, jeomanyetik alanın periyodu 10 dk.-24 saat olan dış kaynaklı geçici değişimlerinden yararlanan GDS yöntemidir. Genelde, elektrik alanının bileşenlerinin ölçülmesi bozucu etkilerin elektrik alanı daha fazla etkilemesi nedeni ile daha zordur. Bu nedenle, yalnızca manyetik alanın bileşeninin ölçülmesine dayanan GDS yöntemi kabuk ve üst manto araştırmalarında yaygın uygulama alanı bulmuştur. Bu yöntemde, yer manyetik alanının birbirine dik yönde iki yatay ve bir düşey bileşeni, üç bileşen manyetometreleri ile ölçülür. Ölçümlerin değerlendirilmesi için önerilenler arasında Schumucker'in (1970) tanımladığı yöntem, " karmaşık indüktif ölçek uzunluğu" ($C(\omega)$) kavramı ile MT empedans ($Z(\omega)$) ve manyetik alan değişimlerini ilişkilendirmiştir. Dolayısıyla, GDS yönteminde elektrik alan ölçülmediği halde, yer öz direnci (iletkenliğin tersi) saptanabilir. Karmaşık indüktif ölçek uzunluğu $C(\omega)$ ile MT empedans $Z(\omega)$ arasında aşağıdaki ilişki vardır.

$$C(\omega) = Z(\omega) / i\omega\mu_0$$

$C(\omega)$ ise

$$C(\omega) = \frac{H_z}{(\partial H_x / \partial H_x) + (\partial H_y / \partial y)}$$

olarak verilir ve $C(\omega)$ nın fonksiyonu olarak görünür öz direnç aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\rho_a(\omega) = \mu_0 \omega |C(\omega)|^2$$

Dördüncü yöntem, yer yüzeyine yakın ekonomik kaynakların aranmasında çok sık kullanılan yapay kaynaklı elektromanyetik indüksiyon yöntemidir (TEM). Diğer yöntemlerin aksine kaynak yapaydır ve büyük bir halka ya da bir telden değişken akım geçirerek üretilen, istenen frekanslardaki elektromanyetik alan yer içine indüklenir. Derin kabuk çalışmalarında, Nekut v.d.(1977) 1.5 km çaplı ve tek sarımlı bir verici halka kullanarak, yapay kaynaklı yöntemi uygulamıştır.

Kabuk araştırmalarında kullanılabilecek bir başka indüktif yöntem de, manyetotelürik (MT) yöntemle aynı ilkeleri kullanan, yapay kaynaklı yüksek frekanslı manyetotelürik yöntemdir (CSAMT, Goldstein ve Strangway ve 1975). Ancak, MT yöntem, sonsuz uzaklıktaki kaynaktan, küresel olarak yayılan EM dalgaların yeryüzeyinde düzlem olarak algılanabileceği kuramı dayandırılmıştır. CSAMT yönteminde ise kaynak alıcı uzaklığı sınırlıdır ve vericiden yayılan EM dalgalar, özellikle kaynağa yakın bölgelerde tamamen küreseldir. Değerlendirmenin, düzlem dalga kuramına dayandırılması, kabuk araştırmalarında önemli olan düşük frekans bandında CSAMT yöntemi ile ölçülen EM alanlarda, yakın alan etkisi adı verilen bozulmalara neden olmaktadır.

KABUKSAL İLETKENLİK ZONLARININ JEOLJİK VERİLERLE İLİŞKİSİ

Üst kabuk, üsteki çökel örtü hariç, dünyanın her yerinde, bölgesel jeolojik yaşa bağlı olmaksızın, genelde, yüksek öz direnç (düşük iletkenlik) gösterir. Alt kabukta ise, bölgenin jeolojik yaşına bağımlı olmakla birlikte üst kabuktan ve dolayısıyla beklenenden daha yüksek iletkenlikler gözlenmektedir. Bu durumda, jeolojik yaş ne olursa olsun alt kabukta ölçülen, beklenenden daha iletken değerler, anomali olarak adlandırılabilir.

Alt kabukta gözlenen iletkenlik anomalileri ile jeoloji arasındaki ilk ilişki jeolojik yaş ve bölgesel tektonik arasında gözlenmiştir. Tektonikçe aktif ve göreceli olarak genç olan bölgelerde (Fanerozoik bölgelerde: Prekambriyenden sonra günümüze kadar olan dönem) alt kabuk iletkenidir (10 ohm.m civarı). Kabuğun gelişimini tamamladığı

düşünülen en yaşlı ve durağan olan Prekambriyen yaşlı kalkan çekirdeklerinde ise alt kabuk elektriksel olarak yalıtıktır. Ancak bazı Prekambriyen alanlarda da, alt kabukta beklenenden yüksek iletkenlik değerleri gözlenebilmektedir. Prekambriyen alanlardaki bu yüksek iletkenliklerin kaynağı çok tartışmalıdır. Jeolojik yaş ne olursa olsun, alt kabuk yapısını ve alt kabuktaki fiziksel koşulları yalnızca jeoelektromanyetik verilerle anlamak kolay değildir. Dolayısıyla, jeoelektromanyetikle birlikte uygulanan sismik yöntemlerden elde edilen bilgiler de değerlendirmeye katılmaktadır. Bu çalışmalar, jeolojik yaş ile iletkenlik arasındaki ilişkinin bir benzerinin sismik yansıma verilerinde ortaya çıktığını göstermiştir. Fanerozoik yaşlı bölgelerde iletken alt kabuk, genelde iyi bir yansıtıcı yüzeydir. Prekambriyen yaşlı kalkan çekirdeklerinde ise öz direnci yüksek ve sismik olarak iyi aktarım gösteren bir alt kabukla karşılaşmaktadır. Şekil 3, Prekambriyen ve Fanerozoik yaşlı bölgelerde yapılan arazi çalışmalarından, alt kabuk katmanı için elde edilen öz direnç değerlerinin gözlenme sıklığını gösteren bir histogramdır. Bu veriye göre, Prekambriyen alt kabuk, Fanerozoik alt kabuğa kıyasla genelde daha dirençlidir. Tersiyer yaşlı (çok genç) tektonik olarak etkin bölgeler, bu sınıflamaya katılmamıştır. Fanerozoik yaşlı bölgede alt kabuğun daha düşük bir öz dirence sahip olduğu açıkça görülmektedir. Yaklaşık 20 Km. derinlikte beliren, 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. Prekambriyen bölgelerdeki istasyonlarda ölçülen EM veriler alt kabuk için ortalama 500 ohm.m öz direnç değeri önermektedir.

Prekambriyen alt kabuk daha dirençli olarak bilinmekle birlikte, bu yaştaki alanların tümü aynı tipte kabuksal iletkenlik anomalisi göstermemektedir. Örneğin yaşlı kalkanların çekirdeklerinde alt kabuk, 1000 ohm.m veya daha yüksek öz dirence sahiptir (Jones 1981, Haak ve Hutton 1986). Kalkan çekirdeğini çevreleyen, komşu durağan alanlarda alt kabuk için orta büyüklükte öz direnç değerleri gözlenir (yaklaşık 100 ohm.m). Alt kabukta düşük öz direnç (yaklaşık 10 ohm.m.) gözlenen Prekambriyen yaşlı bölgeler de vardır (örneğin, Güneydoğu Afrika).

Üst kabuk ise, jeolojik yaşa bağımlı olmaksızın bütün yer küre için yüksek öz dirençlidir (yaklaşık 10000 ohm.m). Ancak büyük rift vadileri ve

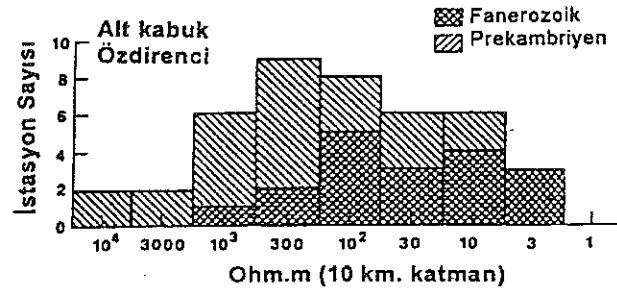
graben sistemleri gibi bazı alanlarda, üst kabuğun birkaç km kalınlıklı çok iletken bir tortul örtü ile kaplandığı da bilinmektedir.

Kabuksal iletkenlik anomalileri ve jeolojik yaş arasındaki bu gözlemsel ilişki nedeniyle, kabuğun elektriksel yapısını tanımlamak amacıyla yapılan sınıflamalar jeolojik yaşa göre düzenlenmiştir. Alt kabukta gözlenen iletkenlik değeri, durağan ve tektonik olarak etkin alanlar için birbirinden farklıdır. Isı akısı ve elektromanyetik ölçmelerden, durağan ve tektonik olarak etkin bölgelerde, alt kabuk için birbirinden farklı iletkenlik-sıcaklık dağılımı elde edilmiştir (Shankland ve Ander 1983). Yer kabuğu, tektonik olarak etkin bölgelerde, durağan bölgelere göre daha iletkenidir. Durağan (genelde Prekambriyen yaşlı) alanlarda ise öz direnç yüksektir. Bazı Prekambriyen yaşlı bölgelerde, bu saptamaya uymayan yüksek iletkenlikli bir alt kabuk katmanı belirlenmiştir. Bir görüşe göre, henüz yüzeyde belirtisi olmayan, başlangıç evresindeki çok güçlü ikincil bir tektonizma (dalma-batma zonu başlangıcı v.b.) alt kabuğu ikincil olarak kırıklandırmıştır. Böylece kırıklar arasına dolan tuzlu su, Prekambriyen yaşlı ve durağan görünümlü alanlarda alt kabukta beklenmedik yüksek iletkenlikler gözlenmesine neden olmuştur. Bir başka görüş ise, bu bölgelerde, alt kabukta grafit varlığının yüksek iletkenlikli zonları yarattığını ileri sürmektedir.

PREKAMBRİYEN ALANLARDA ALT KABUK İLETKENLİĞİ

Prekambriyen kalkanlardaki alt kabuk katmanına ilişkin jeoelektrik veriler, sismik yöntemden gelen bilgilerle de desteklenmelidir (Jones 1981). Prekambriyen kalkanların altında genelde, sismik aktarıcı ve yüksek öz dirençli bir alt kabuk gözlenmektedir. Ancak Şekil 3'deki histogramda da görüldüğü gibi, Prekambriyen yaştaki bazı bölgelerde, alt kabukta düşük öz direnç değeri bulunmuştur. Gözlenen bu düşük öz direnç değerlerinin nedeni oldukça tartışmalıdır.

Prekambriyen bölgelerde gözlenen jeofizik büyüklüklere göre (sismik hızlar, ısı akısı, iletkenlik v.b.) I, II. ve III. tip olmak üzere üç tip alt kabuk ayırtlanmıştır (Şekil 4). I. Tip -"Normal" - tipik kabuksal sismik değişkenler ve yüksek elektriksel öz dirençler (10^3 ve 10^4 Ohm.m); II. Tip -"Orta" - yüksek P dalgası hızı (ya sabit $V_p=7.0$ km s^{-1} , ya da $V_p=6.7-7.3$ km s^{-1} arasında) ve orta büyüklükte öz dirençler (birkaç yüz ohm.m) ve III. Tip -"Düşük", düşük S dalgası hızı katmanı, yüksek Poisson oranı (> 0.30) ve düşük elektriksel öz dirençler (10-50 ohm.m) ile tanımlanır.



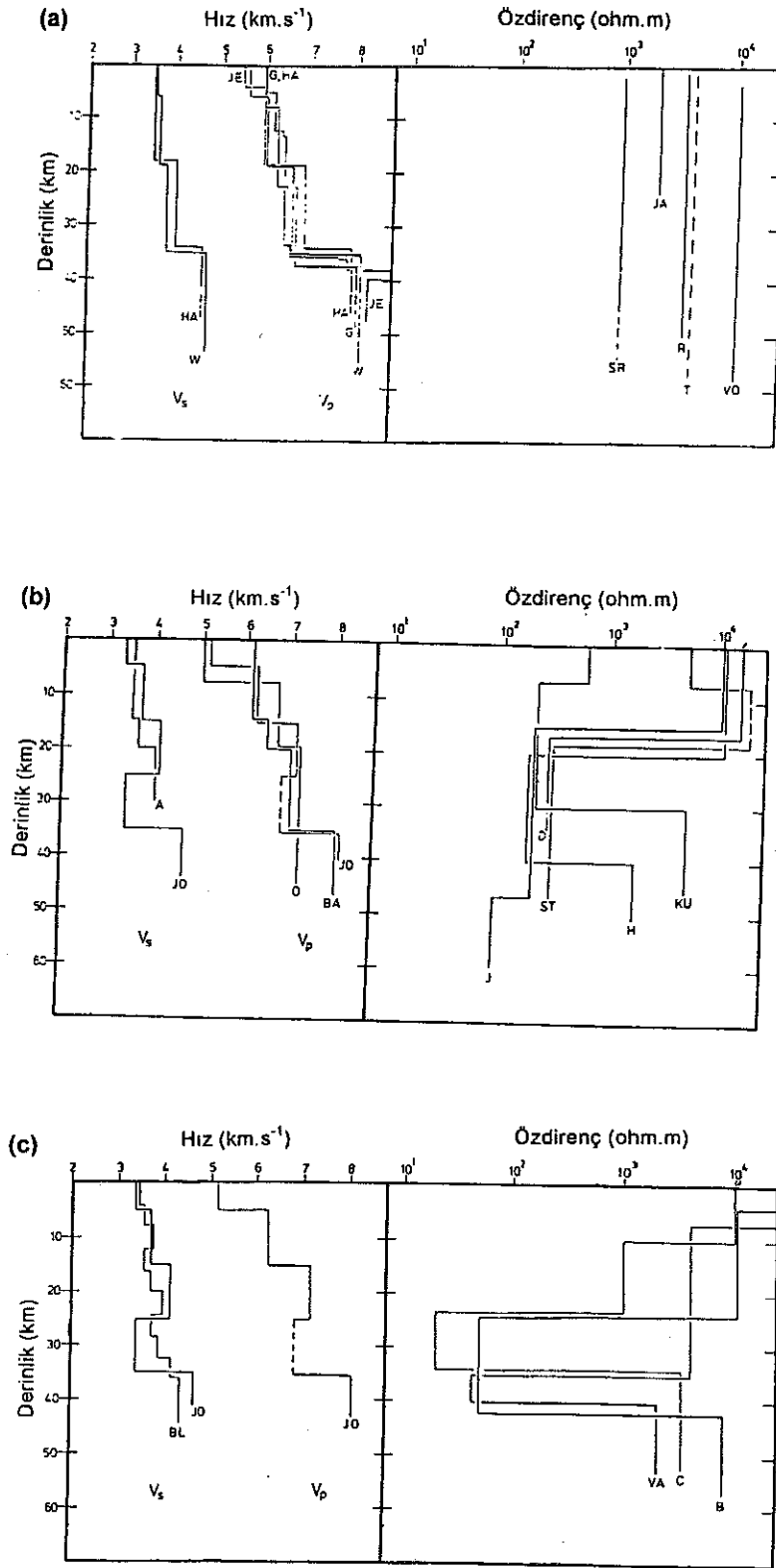
Şekil 3. Fanozoik ve Prekambriyen yaşlı alanlarda gözlenen alt kabuk öz dirençlerini gösterir histogram. (Hyndman ve Shearer 1989).

Figure 3. A histogram of lower crustal resistivity of Precambrian and Phanerozoic areas, (after Hyndman and Shearer 1989).

yüklükte öz dirençler (birkaç yüz ohm.m) ve III. Tip -"Düşük", düşük S dalgası hızı katmanı, yüksek Poisson oranı (> 0.30) ve düşük elektriksel öz dirençler (10-50 ohm.m) ile tanımlanır.

I. Tip "Normal" alt kabuk katmanı Kanada kalkanının merkezinde, Manitoba'da, Alberta'da ve Ukrayna kalkanında gözlenmiştir. Şekil 4a da çeşitli araştırmacıların verdiği sismik ve manyetotelürik (MT) çalışmalardan elde edilen yer modelleri görülmektedir. MT modeller katmanlaşma göstermeden yaşlı kalkanlarda tek bir öz direnç değeri veren tekdüze bir yer yapısı sunar. Hem Ukrayna, hem de Kanada kalkanı için alt kabuk sismik modellere göre 20 km derinde yer almaktadır. Yapılan sismik çalışmalar, Paleozik yaşlı I. tip alt kabuk katmanı için $V_p=6.4 - 6.85$ km s^{-1} ve $V_s=3.8 - 4.0$ km s^{-1} ve Poisson oranı=0.252-0.241 değerlerini gösterirken, manyetotelürik çalışmalarla çeşitli bölgelerde bulunan Prekambriyen alt kabuk öz direnci 20 km civarındaki derinlikler için 940-10.000 ohm.m arasındadır. Kanada kalkanında I.tip alt kabuk gözlenen bölgelerde ölçülen ortalama ısı akısı 39 mW m^{-2} (Rao ve Jessop 1975) ve Ukrayna kalkanında ise 25-35 mW m^{-2} (Kutas v.d.1979) olarak bildirilmiştir.

II. Tip "Orta" Prekambriyen alt kabuğa ise Kuzey İskoçya'da, Doğu Kanada'da ve Kuzey İsveç'te rastlanır. Doğu Kanada'da 40-50 mW m^{-2} (Lachenbruch ve Sass 1977) ve Kuzey İsveç'te 38-47 mW m^{-2} (Eriksson ve Malmquist 1979) ortalama ısı akısı bildirilmiştir. Kuzey İskoçya'da $V_p=7.0$ km s^{-1} ve Poisson oranı = 0.249 ve V_s hesapla 4.04 km s^{-1} olarak (Bamford v.d 1978) bulunmuştur. Bu katmana öz direnci 100-300 ohm olan



Şekil 4. (a) I. Tip, (b) II. Tip, (c) III. Tip kabuk için Prekambriyen alanlarda, sismik ve jeoelektrik çalışmalarından elde edilen modeller, Şekildeki MT modelleri, I. Tip kabuk için, Ukrayna (JE,T) ve Kanada (W,G,HA,JA,SR,RVO) kalkanında, II. Tip kabuk için İskoçya (BA,A,H) ve Kanada (O,ST,B1,HA,B2,KU,D,JO), III. Tip kabuk için Güney Afrika'da (BL,V,B) yapılan ölçmelerden elde edilmiştir (ayrıntı, Jones 1987).

Figure 4. The geoelectrical and seismic models from the measurements from the same Precambrian aged locations for (a) I. Type in Ukrainian (JE, T) and Canadian Shields (W, G, HA, JA, SR, VO), (b) II. Type in Scotland (BA, A, H) and Canada (O, ST, B1, HA, G, B2, KU, D, JO) (c) III. Type in South Africa (BL, V, B) Precambrian lower crust, (after, Jones 1981).

bir katman karşılık gelir (Hutton v.d. 1981). Doğu Kanada'da Güney Superior Province'de 19.5 km derinlikte $V_p=7.0-7.2$ km s⁻² sismik hızı sahip bir katman saptanmıştır (O'Brien 1968), 19 km derinde yer alan bu katmanın özdirenci 270 ohm.m dir. Kuzey İsveçte (Blue Road) sismik verisi, kabuksal katmanın tabanında hızı $V_p=7.0$ km s⁻¹ değerine ulaşan (Hirschleber v.d. 1975) ve özdirenci 140-450 ohm.m olarak hesaplanan bir alt kabuk katmanı tanımlamıştır. Çeşitli bölgelerden elde edilen jeoelektrik ve sismik hız derinlik modelleri şekil 4b de verilmektedir. II. Tip katman için $V_p=7.0$ km s⁻¹, tipik Poisson oranı 0.25 ve orta büyüklükte 100-300 ohm.m civarı özdirenç değerleri gözlenmektedir.

III. Tip "Düşük" alt kabukta ise Andirodack'larda (A.B.D. Kuzey New York eyaleti) ve Güneydoğu Asya kalkanında gözlenmektedir. Andirodacklar'da Connerney v.d (1980) tarafından 25-34 km derinlikte özdirenci 10-30 ohm.m olan bir katman saptanmıştır. Bu tam olarak Jordan ve Frazer (1975) tarafından bildirilen düşük Vs hızı katmanı ile aynı derinlikindedir. Araştırmacılar bu katman için 0.30 olan Poisson oranı vermişlerdir. Afrikada da Kaapval kratonu ve Zimbabwe kratonu (Blohm v.d.1977) da düşük özdirenç alt kabuk katmanı gözlenmiştir. Bloch v.d. (1969) da sismik yüzey dalgaları analizinden Johannesburg istasyonu verileri ile 12 ve 24 km derinliklerde yer alan düşük Vs hızına sahip iki katmanı tanımlamışlardır. Derindeki düşük Vs hızı kuşağı Blohm v.d (1977) tarafından bildirilen düşük özdirenç katmanıyla çakışmaktadır. Üçüncü tip Prekambriyen alt kabuk katmanı, düşük elektriksel özdirenç (10-50 ohm.m) ve düşük S dalgası hızına (3.4- 3.75 km.s⁻¹) ve yüksek Poisson oranına sahiptir. III. Tip yaşlı kabuk üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen modeller Şekil 4c de gösterilmiştir.

I. Tip çok dirençli Prekambriyen alt kabuğa büyük kalkanların merkezinde rastlanmaktadır. II. Tip alt kabuk ise daha küçük boyutlu kalkanlarda görülmektedir ve gözlenen özdirençler orta büyüklüktedir. Bu tür bölgelerin henüz büyük (I. Tip kabuk) kalkanlardaki kabuktaki gibi gelişimlerini tamamlamadıkları ve daha genç alt kabukta gözlenen değerler ile I. Tip kabuktaki değerler arasında bir özdirenç sahip oldukları düşünülmektedir. III. Tip kabukta gözlenen düşük özdirenç değerlerinin nedeni halen çok tartışmalıdır. Yaşlı alt kabukta süregelen metamorfizma koşullarında ortaya çıkan CO₂

gazının tanecik sınırlarına çökerek grafit oluşturduğu ve bu grafitin alt kabukta gözlenen iletkenlik anomalisinden sorumlu olduğu en yaygın kabul gören düşüncedir (Wannamaker 1997).

Jeofizik özellikleri, bu üç tip sınıflamaya da uymayan Prekambriyen yaşlı Doğu Avrupa platformundan söz etmekte yarar vardır. Burada sismik modeller $V_p=6.8-7.2$ km s⁻¹ gibi II. Tip kabuğa uygun değerler verirken (Bozhoko ve Starovoit 1969; Konsminskaya ve Pavlenkova 1979) manyetotellirik sonuçlar ise (Kovtun ve Chicherina 1969) I. tip-teki gibi yüksek özdirençler göstermiştir. Jones (1981) bu beklenmeyen sonucu, doğu Avrupa'ya ilişkin verilerin yalnızca görünür özdirenç dayalı olarak, MT fazları dikkate alınmadan değerlendirilmesine bağlamaktadır.

PREKAMBRIYEN ALANLARDA İLETKENLİK VE YER KABUĞUNU OLUŞTURAN KAYAÇ TÜRLERİ

Prekambriyen alanlarda, üst kabuk özdirençleri yaklaşık olarak Fanerozoik alanlardan elde edilen değerlere benzerdir. Prekambriyen yaşlı alt kabukta ise iletkenlikler farklı üç tip kabuk yapısı gösterir (Jones 1987). Birinci tip alanlarda alt kabuk çok dirençli yapısı ile Fanerozoik alanlardaki iyi iletken alt kabuktan ayrılır. İkinci tip Prekambriyen alanlarda ise alt kabuk orta büyüklükte dirençler gösterirken, en çok tartışma konusu olan üçüncü tip alt kabukta gözlenen yüksek iletkenliğin nedenidir. Bu üç farklı türdeki alt kabuk iletkenliğinin oluşumundan sorumlu olabilecek kayaç türleri ve jeolojik yapı, farklı kayaç örnekleri üzerinde laboratuvarda yapılan çeşitli jeofizik ve petrografik ölçmeler ile jeolojik ve jeofizik arazi gözlemleri ışığında tartışılmıştır.

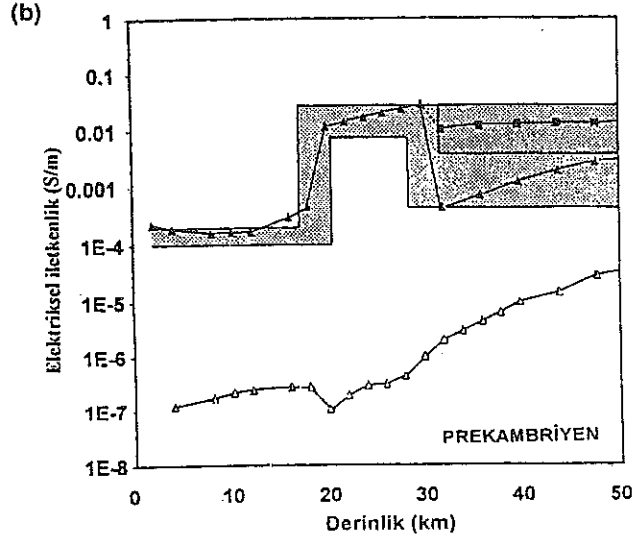
I. Tip (normal) alt kabuk koşullarında (35 km de 10 kbar basınç altında 400-500°C) ve susuz bir ortamda, kuvars toleit bileşimli bazaltlar için eklojit mineral topluluğunun granat - granülitten daha duraylı olduğu gözlenmiştir (Ringwood 1975). Bu sonuç I. Tip Prekambriyen alt kabuğun eklojitten oluştuğunu düşündürülebilir. Ancak, I. Tip kabukta gözlenen sismik hızların $V_p=6.4-6.85$ ve $V_s=3.8-4.0$ km s⁻¹ olduğu hatırlanırsa, söz konusu basınç ve sıcaklık koşullarında eklojitin verdiği sismik hızlar bu değerlerden çok yüksektir ($V_p=7.8-8.6$ km s⁻¹). Uygun bir aday granülit- eklojit fasiyesindeki, kuvars diyoritde olabilir ($V_p=6.71$, $V_s=3.8$ km s⁻¹). Granodiyoritler, kuvars diyoritler, granodiyoritler ve diyoritler üzerinde yapılan laboratuvar ölçmeleri

500°C sıcaklıkta, arazide gözlenen daha yüksek özdirençler verirken (10000-100000 ohm.m), alkali bazaltların aynı sıcaklıktaki özdirenci arazide gözlenen değerlere daha yakındır (1000-10000 ohm.m). Dolayısıyla birinci tip alt kabuğun eklojitten değil, alkali bazaltlardan, bir olasılıkla da kuvarsdiorit ya da granodioritlerden oluştuğu düşünülebilir (Jones 1981).

II. Tip alt kabukta gözlenen $V_p=6.8-7.2 \text{ km s}^{-1}$ hız değerleri susuz kabuk durumunda granat-granütle ya da sulu kabuk durumunda amfibolitle açıklanabilmektedir. Ancak, granat ve granülit için laboratuarda ölçülen Poisson oranları arazide gözlenenlerden yüksektir ve 500°C civarında Prekambriyen bölgelerde bulunan kayaların susuz ortamda gösterdikleri en düşük özdirenç değeri 1000 ohm.m dir. Bu da II. Tip alt kabuğu serbest su taşıyan amfibolitlerin oluşturduğunu düşündürmektedir (Jones 1981).

III. Tip alt kabukta gözlenen yüksek iletkenlik, başlangıçta serpantin varlığına bağlanmıştır. İletkenlik, peridotitin serpantinleşmesi sonucu ortamdaki suyun kaçamayıp, serpantinler içinde tutulması ile açıklanmıştır. Bununla beraber, yaşlı alt kabuktaki kırıklar ikincil minerallerle doldurulurlar ve çatlaklar içinde su dolaşamaz (elektrolitik iletim engellenir). Dolayısıyla, bu su varlığının serbest dolaşan bir su olamayacağı öne sürülmüştür (Connerney v.d. 1980). Ancak, serbest su dolaşımının (elektrolitik iletimin) olabileceğini öne süren bir başka görüşe göre; başlangıç evresindeki güçlü bir tektonizma (dalma batma zonu v.b.), alt kabuğu yeniden kırıklandırarak, kırıklar arasına tuzlu su yerleşmesine ve dolayısıyla iletkenliğin artmasına neden olur.

Prekambriyen bölgelerde gözlenen III. tip iletken alt kabuk için; laboratuarda kayalar üzerinde ölçülen (Glover ve Vine 1995) ve arazide gözlenen (Marquis ve Hyndman 1992) sıcaklık-derinlik değişimleri, karşılaştırmalı olarak Şekil 5'de verilmiştir. Prekambriyen alanlarda arazi gözlemleri iletken alt-orta kabuğun, genel olarak, Fanerozoik alt-orta kabuktan biraz daha dirençli olduğunu göstermiştir. En alt kabuk katmanında ise iletkenlik orta-alt kabuk katmanındaki gibi sürmekte ya da biraz azalmaktadır. Kuru ve su içeren kayalar ve grafitli kayalar üzerinde yapılan ölçmeler, Prekambriyen alt kabuk iletkenliğini su içeren grafitli ve grafitsiz kayalar tarafından oluşturulabileceği-



Şekil 5. Kıtasal kabuk için tahmin edilen kabuksal yapı ve mineralojiler için hesaplanan iletkenlik derinlik profilleri Şekil 5 de verilen kayaç örnekleri ve diğer bazı örnekler üzerinde yapılan sıcaklık-iletkenlik ölçmelerinden hesaplanmıştır (Glover ve Vine 1994, 1995). Yer kabuğunu oluşturan çeşitli kayaç türleri için sıcaklık derinlik ilişkileri, Prekambriyen alanlar için bulunan (Marquis ve Hyndman 1992) ortalama 12.7°C/km jeotermi ile hesaplanmıştır. Aynı çalışmada yer alan MT arazi ölçmelerinden bulunan derinlik iletkenlik modelleri (gölgeli alan) işaretlenmiştir. İçi dolu semboller, 0.5M NaCl çözeltisi ile doyurulmuş ve içi boş semboller kuru kayaçları gösterir. Üçgenler grafitsiz kayaçları, kareler ise grafit taşıyan kayaları gösterir (Glover ve Vine 1995).

Figure 5. Predicted conductivity-depth profiles for the Precambrian continental crust based on assumed crustal structure and mineralogies (filled symbols show profiles for 0.5M saturated rock, open symbols show profiles for dry rock: triangles show graphite free rocks and squares show graphite bearing samples). Data obtained from Glover and Vine (1994,1995) that are shown in Figure 4 The getherm was 12.7°C /km calculated from data Marquis and Hyndman (1992), (after, Glover and Vine 1995).

ni göstermiştir. Ancak kuru kayaçların, gözlenen iletkenliğin çok altında değerler verdikleri açıktır. Dolayısıyla, III. Tip alt kabuk için arazide saptanan iletkenlik değerleri, ıslak amfibolitler ya da grafit tarafından oluşturulabilir.

Yardley ve Valley (1997) kabuksal sıcaklık ve basınçları kullanarak, kayalar üzerinde laboratuarda yaptıkları petrografik incelemelerde, Prekambriyen yaşlı durağan alanlarda, alt kabuk koşullarında serbest su bulunamayacağını, dolayısıyla, Prekambriyen alanlarda alt kabukta gözlenen

iletken zondan su varlığının sorumlu olamayacağını öne sürmektedirler. Bu görüşe göre, durağan alanlarda, alt kabuktaki basınç-sıcaklık koşullarında, litostatik basınç (üstteki kayaların uyguladığı basınç) gözenek içi sıvı basıncını birkaç kat aşmakta ve gözenekler tamamen kapanmaktadır. Aynı çalışmada, el örneklerinde yeterli kalınlıkta grafit izlenmediği için grafitin de alt kabuk iletkenliklerinin nedeni olmaması gerektiği de öne sürülmüştür. Ancak, Wannamaker (1997), günümüzde duraylı olan yaşlı alanlarda iletken alt kabuğun genel olarak fosil sütur zonlarında yer aldığını ve bu büyüklükte bir grafit yerleşiminin el numuneleri ile saptanamayacağını belirterek, grafiti, yüksek iletkenlikten sorumlu olan başlıca aday olarak göstermektedir. Wannamaker (1986, 1997), durağan yaşlı alanlarda kabuk gelişiminin susuz koşullarda olduğunu, ortamdaki az miktarda suyun, granülit metamorfizma koşullarında ortaya çıkan CO₂ den kaynaklandığını öne sürer. Bir başka deyişle Prekambriyen yaşlı alt kabukta genelde, susuz koşullar ön görülmektedir. Yarley ve Valley'nin (1997) çalışmaları da, Prekambriyen yaşlı III. Tip alt kabuktaki iletkenliğin serbest su varlığı ile açıklayan görüşleri zayıflatmaktadır. Bu sonuçlar, Prekambriyen alt kabukta iletkenliği yükselten nedenin grafitli zonlar olabileceği savını daha dikkat çekici hale getirmiştir.

SONUÇLAR

Derin jeoelektromanyetik yöntemlerle, Dünya'nın farklı bölgelerinde yapılan çalışmalara göre, alt kabuk katmanının elektriksel iletkenliği, bölgenin jeolojik yaşına bağlı olarak değişmektedir. Prekambriyenden daha genç (Fanerozoik) olan alanlarda, alt kabuğun üst bölümü genelde çok iletkenlidir (yaklaşık 10 ohm.m). Prekambriyen yaşlı kayaların en tipik ve geniş ölçekte görüldüğü yerlerde (büyük ve durağan kalkan çekirdeklerinde) ise alt kabuk çok dirençlidir (>1000 ohm.m). Üst kabuk ise, genelde, dünyanın her yerinde yüksek öz dirençli olmakla beraber, Prekambriyen yaşlı bölgelerde, Fanerozoik yaşlı bölgelere göre biraz daha yüksek öz dirençli olabilmektedir.

Yapılan gözlemler, Prekambriyen yaşlı bölgelerde, iletkenlikleri farklı üç tür alt kabuk katmanı olduğunu göstermiştir. I. Tip kabuk, Prekambriyen yaşlı büyük kalkanların çekirdeklerinde (Kanada ve Ukrayna kalkanı gibi) gözlenir ve elektriksel olarak tek düze ve yüksek öz dirençli bir yapı sunar.

Petrografik bulguların alt kabuk için önerdiği olası kayaç türleri üzerinde yapılan deneylerle elektriksel ve diğer bir çok jeofizik değişkenler izlenerek, I. Tip Prekambriyen alt kabuğun alkali bazaltlardan oluşabileceği sonucuna varılmıştır. II. ve III. Tip alanlarda ise tıpkı Fanerozoik yaşlı bölgelerdeki gibi, ilki yalıtkan üst kabuk katmanı olmak üzere, üç katmanlı bir iletkenlik yapısı gözlenir. Daha küçük kalkanlarda ve büyük kalkanların dış kesimlerinde gözlenen II. Tip alt kabuk, orta derecede iletkenlidir (100 ohm.m). I. Tip kabuğa kıyasla, gelişimini tamamlayamadığı düşünülen II. Tip Prekambriyen kabukta gözlenen iletkenlik değerleri, laboratuvarında, su içeren amfibolitler tarafından sağlanmıştır (Jones 1981). III. tip alanlarda ise alt kabuk katmanının üst kısmı, tıpkı Fanerozoik alanlardaki gibi düşük öz direnç gösterir (10 ohm.m).

Basınç ve sıcaklığa bağlı olarak yapılan petrografik deneyler Prekambriyen alanlarda alt kabukta susuz metamorfizma koşullarının hakim (granülit metamorfik fasiyesi) olduğunu göstermektedir (Wannamaker 1986). Prekambriyen alt kabuğun, Fanerozoik kabuğa göre kuru olması I. Tip alt kabukta gözlenen yüksek öz direnç değerlerini açıklamaktadır. Asıl tartışma, Prekambriyen bölgelerde gözlenen iletken katman (III. tip alt kabuk) üzerinde sürmektedir. Bir görüşe göre, alt kabukta metamorfizma sırasında ortaya çıkan CO₂ gazı kabuk içinde üst seviyelere yükselirken soğuyarak, içerdiği karbon tanecik sınırlarına çökeler ve grafit oluşturarak iletkenliğin artmasına neden olur (Wannamaker 1997). Bir başka görüş ise, yeni başlayan büyük bir tektonik hareketin (bir Beniof zonu başlangıcı v.b.) yüzeyden duraylı görünen Prekambriyen yaşlı alt kabuğu ikincil olarak kırıldırması sonucunda, kırıklara dolan sudaki iyonların III. Tip Prekambriyen alt kabuktaki iletkenliği doğurmuş olabileceğini öne sürmüştür. Ancak Yardley ve Valley (1997) Prekambriyen alt kabukta, litostatik basıncın gözenekler içindeki sıvı basıncını bir kaç kat aştığını ve bu durumda gözeneklerin ve kırıkların tamamen kapanması gerektiğini göstermiştir. Bu çalışma, ikincil kırıkların iletkenliği arttırdığı savını iyice zayıflatmıştır. Dolayısıyla III. Tip Prekambriyen alt kabukta bulunan grafitli zonların iletkenliği arttırdığı görüşü önem kazanmıştır.

SUMMARY

According to the deep penetrating electromag-

netic studies from the different parts of the world, the conductivity of the lower crust changes depending on the geological age of the region. The upper part of the lower crust is highly conductive (10 ohm.m) in the Phanerozoik regions (younger than Precambrian). In the centre of the big and stable shields which represents the Precambrian aged regions typically, the lower crust is highly resistive (>1000 ohm.m). The upper crust resistivity is independent from the geological age and it is generally resistive all over the world, however, it is slightly more resistive in the Precambrian regions compared to the Phanerozoik aged regions. Sedimentary cover.

Three types of conductivity anomaly are observed in Precambrian regions. I. type crust is observed in the centre of the big Precambrian shields (Canadian, Ukrainian Shields) and shows a resistive, homogeneous electrical structure. The laboratory test on some petrographic samples and the variation of electrical and other geophysical parameters proposes that the most suitable rock type is the alkali basalts for the I. Type Precambrian lower crust. A three layered conductivity structure is observed in II. and III. type crust in Precambrian regions. The II. type lower crust which is observed in smaller shields and the outer parts of the big shields is moderately conductive (100 ohm.m). Water saturated amphibolites supply these conductivity values in laboratory measurements (Jones 1981). III. type Precambrian lower crust is very conductive (10 ohm.m).

The pressure and temperature controlled petrographic experiments yielded that anhydrous metamorphic conditions prevails in the Precambrian lower crust (Wannamaker 1986). The dry lower crust can explain the high resistivity values in the I. Type Precambrian crust. The reason of the high conductivities in the III kind of Precambrian lower crust is the main problem. The most plausible explanation is the graphite formation by the precipitation of carbon from the CO₂ gas that comes from the anhydrous metamorphic processes (Wannamaker 1997). A second explanation for the III type lower crustal conductivity is the water saturated secondary cracks that are formed at the beginning of a big, new tectonic activity (like the formation of a Bennis zone). However the petrographic experiments by Yardley and Valley (1997) yielded that lithostatic pressure on the Precambrian lower crust is a few times greater than the pore fluid pressure.

This closes all of the cracks and pores at the lower crust depths. So the conductivity anomalies are not caused by the water in the primary pores and cracks in the stable Precambrian lower crust. The most popular explanation for the origin of the conductive zone in the III type Precambrian lower crust is the graphite existence.

KATKI BELİRTME

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

DEĞİNİLEN BELGELER

- Bamford D., Nunn K., Prodehl C., ve Jacob B., 1978: LISPB-IV. Crustal structure of Northern Britain, *Geophysical Journal Royal Ast. Soc.*, 44, 144-160.
- Bloch S., Hales A.L., ve Landisman M. 1969: Velocities in the crust and upper mantle of southern Africa from multi-mode surface wave dispersion. *Bulletin of Seismological Soc. Am.* 59,1599-1629
- Blohm E.K., Worzyk P., ve Scriba H., 1977: Geoelectrical deep soundings in southern Africa using the Caborasa power line, *Journal of Geophysics.* 43, 665-679.
- Bozhoko G.N., ve Starovit O.E., 1969: Phase velocities of Rayleigh Waves on the Russian platform In: *Proceedings of the Eight Assembly of the European Seismological Commission. E. Bisztricsany, ed.: pp.339-343. Budapest, Hungary: Acad. Kiado 1969*
- Cagniard, L., 1953: Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, 18, 605-635.
- Connerney, J.E.P., Nekut A., ve Kuckes A.F., 1980: Deep crustal electrical conductivity in the Adirondacks. *Journal of Geophysical Research*, 85, 2603-2615.
- Eriksson, K.G., ve Malmquist, D. 1979: A Review of the Past and Present Investigations of Heat Flow in Sweden. In: *Terrestrial Heat Flow in Europe. Inter-Union Comm. Geodyn. Sci. Rep. No.58. V.Cermak and L. Rybach. eds.: pp.267-277 Berlin: Springer.*
- 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.
- Goldstein M., A., ve Strangway D.W., 1975: Audio-frequency magnetotellurics with grounded electric dipole source, *Geophysics* 40, 669-683.
- 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.*

- Hnydman 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.
- Hirschleber H.B., Lund C.E, Meissner R., Vogel A., ve Weinrebe W.**, 1975: Seismic investigations along the Scandinavian "Blue Road" traverse, *Journal of Geophysics*, 41, 135-148
- Hutton V.R.S., Dawes, G., Ingam M.R., Mbipom E.W., ve Sik J.**, 1981: Recent studies of time variations of natural electromagnetic fields in Scotland, *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 24, 66-87
- Jiracek G.R.**, 1990: Near surface and topographic distortions in electromagnetic induction, *Surveys in geophysics*, 11,163-203.
- 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.
- Jordan T.H., ve Frazer, L.N.**, 1975 : Crustal and upper mantle structures from Sp phases. *J. Geophysical Research*. 80, 1504-1518.
- Kominskata I.P., ve Pavlenkova N.I.**, 1979: Seismic model of inner parts of the Euro-Asian continent and its margins, *Tectonophysics*, 59,307-320.
- Kovtun A.A., ve Chicherina N.D.**, 1969: Results of magnetotelluric investigations in the central Russian depression. In: *Magnetotelluric methods for studying the structure of earth's crust and upper mantle (in Russian)* Moscow: Nauka
- Kutas R.I., Lubimova, A.A., ve Smirnov, Y.B.**, 1979: Heat flow studies in the European part of the Soviet Union, In: *Terrestrial Heat Flow in Europe. Inter-Union Comm. Geodyn. Sci. Rep. No.58. V. Cermak and L. Rybach, eds.* pp.301-308 Berlin: Springer.
- Lachenbruch 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.
- Lebedev E.B.**, 1975: Physical properties of magmatic melts , In: *Physical chemistry problems in hydrothermal and magmatic processes*, ed: Tushkin A.A. pp.33-47 Nauka, Moscow.
- 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.**, 1986: The continental crust, *Academic Press Inc. P:6.*
- Nekut A., Connerney J.J.E.P., ve Kuckes**, 1977: Deep crustal electrical conductivity; evidence for water in the lower crust, *Geophysical research letter*. 4, 239-242,
- Nesbit B.**, 1993: Electrical resistivity of Crustal Fluids, *Journal of Geophysical Research*, No:98, B3, 4301-4310.
- O'Brien, P.N.S.**, 1968: Lake Superior crustal structure- a re-interpretation of the 1963 Seismic experiment. *Journal of Geophysical Research*, 73, 2669-2689.
- Olhoeft G.R.**, 1981: Electrical properties of granite with implications for the lower crust, *Journal of Geophysical Research*, 86, B2, 931-936.
- Quist A.S., ve Marshall W.L.**, 1968: Electrical conductance of Aqueous sodium chloride solutions from 0 -800°C and at Pressures 4000 bars, *J. Phys. Chem.* 73, 978-985
- Rao R.U.M. ve Jessop, A.M.**, 1975. A comparison of the thermal characteristics of the shields. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 12, 347-360.
- Ringwood A.E.**, 1975: Composition and petrology of the Earth's mantle, New York: McGraw-Hill
- Schumucker U.**, 1970: Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. *Bull. Scripps Inst. Oceanog*, 13
- 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.
- van Zijl J.S.V.**, 1975: A crustal geoelectrical model for South African Precambrian granitic terrains based on Schullumberger soundings, *Geophysics* 40, 657-663
- Wannamaker P.E.**, 1997: Comment on "The petrologic case for a dry lower crust" by Yardley B.W.D., and Valley J.W., on : <http://nazca.cge.mr.ca/mtnet/fora/clc/pw.23Oct97.html>
- Wannamaker P.E.**, 1986: Electrical conductivity of water under saturated crustal melting, *Journal of Geophysical Research*, 91, 6321-6327.
- Yardley B.W.D., ve Valley J.W.**, 1997: The petrologic case for a dry lower crust. *Journal of Geophysical Research*, 102, B6, 12173-12185.

Makalenin geliş tarihi: 8.06.1998

Makalenin yayına kabul tarihi: 21.05.1999

Received June 8, 1998

Accepted May 21, 1999